

# 高分子科学風塵帖—古き好き時代—

奈良女子大学名誉教授  
榮永 義之



平成 22 年 9 月 21 日



## まえがき

本書は高分子科学の発展の中に現れる人物について、インターネット上で入手できる記事、伝記、写真等を収集したもので、「肖像から見る高分子科学とその基礎になっている科学の年代記」といった散文集である。

対象とした主題は高分子科学のうちの主として溶液学分野である。登場する人物(エピソードに出てくる人物も含めて)の間の繋がりや絡み合いから、科学の1分野の世界(世間)の広がり(狭さと広さ)、ならびに臃な流れを感じ取って貰えれば幸いである。

近年、大学における研究ですら金を追う町工場的なものに墮していくように感じられる中で、先人達が苦闘しながら高分子の科学を立ち上げてきた歴史を知ることは意義があると考えます。

なお、各章節は連続した話ではないので、どの章あるいは節から読んで戴いてもよい。

.....

—寺田寅彦「科学者とあたま」—(青空文庫より)

私に親しいある老科学者がある日私に次のようなことを語って聞かせた。

「科学者になるには『あたま』がよくなくてはいけない」これは普通世人の口にする一つの命題である。これはある意味ではほんとうだと思われる。しかし、一方でまた「科学者はあたまが悪くなくてはいけない」という命題も、ある意味ではやはりほんとうである。そうしてこの後のほうの命題は、それを指摘し解説する人が比較的少数である。

この一見相反する二つの命題は実は一つのものの互いに対立し共存する二つの半面を表現するものである。この見かけ上のパラドックスは、実は「あたま」という言葉の内容に関する定義の曖昧不鮮明から生まれることはもちろんである。

論理の連鎖のただ一つの輪をも取り失わないように、また混乱の中に部分と全体との関係を見失わないようにするためには、正確でかつ緻密な

頭脳を要する。紛糾した可能性の岐路に立ったときに、取るべき道を誤らないためには前途を見透す内察と直観の力を持たなければならない。すなわちこの意味ではたしかに科学者は「あたま」がよくなくてはならないのである。

しかしまた、普通にいわゆる常識的にわかりきったと思われることで、そうして、普通の意味でいわゆるあたまの悪い人にも容易にわかったと思われるような尋常茶飯事の中に、何かしら不可解な疑点を認めそうしてその闡明に苦吟するということが、単なる科学教育者にはとにかく、科学的研究に従事する者にはさらにいっそう重要必須なことである。この点で科学者は、普通の頭の悪い人よりも、もっともっと物わかりの悪いのみ込みの悪い田舎者であり朴念仁でなければならない。

いわゆる頭のいい人は、言わば足の早い旅人のようなものである。人より先に人のまだ行かない所へ行き着くこともできる代わりに、途中の道ばたあるいはちょっとしたわき道にある肝心なものを見落とす恐れがある。頭の悪い人足ののろい人がずっとあとからおくれて来てわけもなくそのだいいじな宝物を拾って行く場合がある。

頭のいい人は、言わば富士のすそ野まで来て、そこから頂上をながめただけで、それで富士の全体をのみ込んで東京へ引き返すという心配がある。富士はやはり登ってみななければわからない。

頭のいい人は見通しがきくだけに、あらゆる道筋の前途の難関が見渡される。少なくとも自分でそういう気がする。そのためにややもすると前進する勇気を阻喪しやすい。頭の悪い人は前途に霧がかかっているためにかえって楽観的である。そうして難関に出会っても存外どうにかしてそれを切り抜けて行く。どうにも抜けられない難関というのはきわめてまれだからである。

それで、研学の徒はあまり頭のいい先生にうっかり助言を請うてはいけない。きっと前途に重畳する難関を一つ一つしらみつぶしに枚挙されてそうして自分のせっかく楽しみにしている企図の絶望を宣告されるからである。委細かまわず着手してみると存外指摘された難関は楽に始末がついて、指摘されなかった意外な難点に出会うこともある。

頭のよい人は、あまりに多く頭の力を過信する恐れがある。その結果として、自然がわれわれに表示する現象が自分の頭で考えたことと一致し

ない場合に、「自然のほうが間違っている」かのように考える恐れがある。まさかそれほどでなくても、そういったような傾向になる恐れがある。これでは自然科学は自然の科学でなくなる。一方でまた自分の思ったような結果が出たときに、それが実は思ったとは別の原因のために生じた偶然の結果でありはしないかという可能性を吟味するというだいじな仕事を忘れる恐れがある。

頭の悪い人は、頭のいい人が考えて、はじめからだめにきまっているような試みを、一生懸命につづけている。やっと、それがだめとわかるころには、しかしたいてい何かしらだめでない他のものの糸口を取り上げている。そうしてそれは、そのはじめからだめな試みをあえてしなかった人には決して手に触れる機会のないような糸口である場合も少なくない。自然は書卓の前で手をつかねて空中に絵を描いている人からは逃げ出して、自然のまん中へ赤裸で飛び込んで来る人にもその神秘の扉を開いて見せるからである。

頭のいい人には恋ができない。恋は盲目である。科学者になるには自然を恋人としなければならない。自然はやはりその恋人にもみ真心を打ち明けるものである。

科学の歴史はある意味では錯覚と失策の歴史である。偉大なる迂愚者の頭の悪い能率の悪い仕事の歴史である。

頭のいい人は批評家に適するが行為の人にはなりにくい。すべての行為には危険が伴うからである。けがを恐れる人は大工にはなれない。失敗をこわがる人は科学者にはなれない。科学もやはり頭の悪い命知らずの死骸の山の上に築かれた殿堂であり、血の川のほとりに咲いた花園である。一身の利害に対して頭がよい人は戦士にはなりにくい。

頭のいい人には他人の仕事のあらが目につきやすい。その結果として自然に他人のする事が愚かに見え従って自分がだれよりも賢いというような錯覚に陥りやすい。そうなると自然の結果として自分の向上心にゆるみが出て、やがてその人の進歩が止まってしまう。頭の悪い人には他人の仕事がたいていみんな立派に見えると同時にまたえらい人の仕事でも自分にもできそうな気がするのでおのずから自分の向上心を刺激されるということもあるのである。

頭のいい人で人の仕事のあらはわかるが自分の仕事のあらは見えな

いという程度の人がある。そういう人は人の仕事をくさしながらも自分で何かしら仕事をして、そうして学界にいくぶんの貢献をする。しかしもういっそう頭がよくて、自分の仕事のあらも見えるという人がある。そういう人になると、どこまで研究しても結末が見つからない。それで結局研究の結果をまとめないで終わる。すなわち何もしなかったのと、実証的な見地からは同等になる。そういう人はなんでもわかっているが、ただ「人間は過誤の動物である」という事実だけを忘却しているのである。一方ではまた、大小方円の見さかいかもつかないほどに頭が悪いおかげで大胆な実験をし大胆な理論を公にしその結果として百の間違いの内に一つ二つの真を見つけ出して学界に何がしかの貢献をしまた誤って大家の名を博する事さえある。しかし科学の世界ではすべての間違いは泡沫のように消えて真なもののみが生き残る。それで何もしない人よりは何かした人のほうが科学に貢献するわけである。

頭のいい学者はまた、何か思いついた仕事があった場合にでも、その仕事の結果の価値という点から見るとせっかく骨を折っても結局たいした重要なものになりそうもないという見込みをつけて着手しないで終わる場合が多い。しかし頭の悪い学者はそんな見込みが立たないために、人からはきわめてつまらないと思われる事でもなんでもがむしゃらに仕事に取りついてわき目もふらずに進行して行く。そうしているうちに、初めには予期しなかったような重大な結果にぶつかる機会も決して少なくはない。この場合にも頭のいい人は人間の頭の力を買いかぶって天然の無際限な奥行きを忘却するのである。科学的研究の結果の価値はそれが現われるまではたいていだれにもわからない。また、結果が出た時にはだれも認めなかった価値が十年百年の後に初めて認められることも珍しくはない。

頭がよくて、そうして、自分を頭がいいと思い利口だと思う人は先生にはなれても科学者にはなれない。人間の頭の力の限界を自覚して大自然の前に愚かな赤裸の自分を投げ出し、そうしてただ大自然の直接の教えにのみ傾聴する覚悟があって、初めて科学者にはなれるのである。しかしそれだけでは科学者にはなれない事ももちろんである。やはり観察と分析と推理の正確周到を必要とするのは言うまでもないことである。

つまり、頭が悪いと同時に頭がよくなくてはならないのである。

この事実に対する認識の不足が、科学の正常なる進歩を阻害する場合

がしばしばある。これは科学にたずさわるほどの人々の慎重な省察を要することと思われる。

最後にもう一つ、頭のいい、ことに年少気鋭の科学者が科学者としては立派な科学者でも、時として陥る一つの錯覚がある。それは、科学が人間の知恵のすべてであるもののように考えることである。科学は孔子のいわゆる「格物」の学であって「致知」の一部に過ぎない。しかるに現在の科学の国土はまだウパニシャドや老子やソクラテスの世界との通路を一筋でももっていない。芭蕉や広重の世界にも手を出す手がかりをもっていない。そういう別の世界の存在はしかし人間の事実である。理屈ではない。そういう事実を無視して、科学ばかりが学のように思い誤り思いあがるのは、その人が科学者であるには妨げないとしても、認識の人であるためには少なからざる障害となるであろう。これもわかりきったことのようにあってしばしば忘れがちなことであり、そうして忘れてならないことの一つであろうと思われる。

この老科学者の世迷い言を読んで不快に感ずる人はきつとうらやむべきすぐれた頭のいい学者であろう。またこれを読んで会心の笑みをもらす人は、またきつとうらやむべく頭の悪い立派な科学者であろう。これを読んで何事をも考えない人はおそらく科学の世界に縁のない科学教育者が科学商人の類であろうと思われる。

.....

## 目次

<b>1 章</b>	<b>高分子科学事始</b>	<b>1</b>
1.1	Staudinger—Mark—Kuhn . . . . .	1
1.1.1	Hermann Staudinger . . . . .	12
1.1.2	Herman Francis Mark . . . . .	14
1.1.3	Werner Kuhn . . . . .	26
<b>2 章</b>	<b>高分子鎖の統計力学</b>	<b>37</b>
2.1	Eugene Guth . . . . .	37
2.2	Peter Josseph Wilhelm Debye . . . . .	41
2.3	Paul John Flory . . . . .	68
<b>3 章</b>	<b>高分子溶液</b>	<b>85</b>
3.1	高分子科学が平易に見えた頃 . . . . .	85
3.1.1	Walter Hugo Stockmayer . . . . .	100
3.1.2	Bruno Hasbrouck Zimm . . . . .	105
<b>4 章</b>	<b>溶液の統計力学</b>	<b>115</b>
4.1	Raymond Matthew Fuoss . . . . .	115
4.2	Lars Onsager . . . . .	123
4.3	John Gamble Kirkwood . . . . .	148
<b>5 章</b>	<b>流変学</b>	<b>157</b>
5.1	Friedrich Wilhelm Ostwald . . . . .	157
5.2	Maurice Marie Alfred Couette . . . . .	162
5.3	Karl Weissenberg . . . . .	174
5.4	James Gardner Oldroyd . . . . .	185
5.5	Crifford Ambrose Truesdell III . . . . .	188
5.6	Hagen - Poiseuille - Reynolds . . . . .	208
<b>6 章</b>	<b>拡散</b>	<b>227</b>
6.1	拡散の 1 世紀半 . . . . .	227
6.1.1	Thomas Graham . . . . .	227

6.1.2	Adolf Eugen Fick . . . . .	228
6.1.3	William Chandler Roberts-Austen . . . . .	231
6.1.4	Albert Einstein、Jean Baptiste Perrin . . . . .	232
6.1.5	György von Heresy . . . . .	237
6.2	Robert Brown . . . . .	238
6.3	George Gabriel Stokes . . . . .	244
6.4	Adolf Eugen Fick . . . . .	255
6.5	John Warren Williams . . . . .	261
<b>7 章</b>	<b>熱力学</b>	<b>271</b>
7.1	Jacobus Henricus van't Hoff . . . . .	271
7.2	Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz . . . . .	278
7.3	Josiah Willard Gibbs . . . . .	300
<b>8 章</b>	<b>高分子科学</b>	<b>317</b>
8.1	倉田道夫先生 . . . . .	317
8.2	Wallace Hume Carothers . . . . .	335
<b>9 章</b>	<b>電磁気学、統計熱力学</b>	<b>351</b>
9.1	James Clerk Maxwell . . . . .	351
9.1.1	生涯 . . . . .	351
9.1.2	科学 . . . . .	379
9.2	Ludwig Eduard Boltzmann . . . . .	389
<b>10 章</b>	<b>附録</b>	<b>401</b>
10.1	レーリー卿 (Lord Rayleigh) . . . . .	401
10.2	アインSTEIN (Einstein) . . . . .	429
10.3	ルクレチウス (Lucretius) と科学 . . . . .	443



# 1 章 高分子科学事始

## 1.1 Staudinger—Mark—Kuhn

Staudinger、Mark、と Kuhn の関わりについて、1960 年代にスイスの Basel 大学の物理化学研究所の学生であった W. Gerhard Pohl の文書<sup>1</sup>がある。彼が博士課程の学生として Werner Kuhn 教授の下で、高分子電解質ゲルの研究をしていた 1963 年に Kuhn 教授が急死した。そのとき、彼は教授の伝記を調べて、Kuhn が、Copenhagen で Niels Bohr と知り合い、一時 Ernest Rutherford の研究室で研究したのを出発点として、多くの異なった科学の分野で仕事をしていたことを知った。このことから、彼は科学史に興味を持った。Kuhn の初期の研究で特筆すべきは「Mössbauer 効果」を理論的に予言したことである。しかし、残念ながら実験的に示すことはできなかった。その後、Kuhn は Heidelberg 大学の有機化学者 Karl Freudenberg と合流し、光学活性の理論を展開するとともに高分子の研究を開始した。Kuhn の研究は Staudinger と Mark の注意を惹き、多年に亘って彼らと往復書簡を交換している。

Pohl の文書の内容は以下のとおりである：

19 世紀、化学者達は通常の有機化合物とは違った振る舞いをする物質を見出していた。それらは望ましくない反応副産物で、粘々しており、不溶で、普通の方法では調べられない物質であって、高分子 (polymer) とかコロイド (colloid) とかと言った新語で呼ばれた。例えば Adolf von Baeyer はフェノールとホルムアルデヒドの反応でそのような高分子ができることを見出し、非常に大きい分子を合成する可能性を考えた。1885 年、友人の有機化学者 Victor Meyer は Baeyer に手紙で、「巨大分子がどこまで行くのか見たい。1000 個の原子から成る組成の解った炭化水素が得られればすばらしいでしょう。あなたの計算では、百万個の原子を持つ分子は目



図 1.1 Leo Hendrik Baekeland (1863/11/14–1944/2/23)

に見えるでしょう。」と書いた。1907年、ベルギー生まれのアメリカ人科学者 Baekeland は Baeyer の反応を用いて初めての合成樹脂バークライトを創った。彼は Berlin に最初の工場を造り、後に世界中に会社を展開して富裕になり、1924年アメリカ化学会の会長になった。

.....

Staudinger の高分子時代は 1920 年の論文 “Über Polymerisation” に始まる。この時、彼はほとんど実験的な証拠は持っていなかったにも拘わらず、共有結合で繋がった多くの原子を持つ粒子を高分子 (macromolecule) と定義した。例として、彼はセルロース、ゴム、タンパク質、いくつかの合成分子 (セルロースのモデルのポリメチレン、ゴムのモデルとしてのポリスチレン、タンパク質のモデルとしてのポリアクリル酸) を示唆している。しかしながら、この文書の執筆者 Pohl の推測によると、Staudinger が高分子に向かったのには不純な動機があったようである。Staudinger は、Baekeland の成功を見ていたので、商売になる可能性のある物質に興味を抱いたということである。Zürich 時代の彼の学生 Thadeus Reichstein は笑いながら Pohl に言った。「Staudinger はいつも化学で多くの金を作ることを試みていた。」しかし、この点では彼は Reichstein ほど成功はしな



図 1.2 Hermann Staudinger (1881/3/23–1965/9/8)

かった。Reichstein は Basel 大学での Pohl の先生の 1 人で、Staudinger の一番の学生として Zürich ではコーヒーの香り成分を調べた。後にアスコルビン酸の合成で財を成した。

.....

高分子説では、Staudinger は四面楚歌であった。当時の指導的研究者は高分子は単に低分子の会合体であること、いわゆるミセル説を信じていた。

1907 年、Fischer はタンパク質の分子量に関して云った。「これらの数値 (12000–15000) は非常に不確かな仮定に基いている。なぜなら我々は天然のタンパク質が均質な物質である保証を持たないからである。」

1913 年の Perrin の言は「非常に複雑な分子は 2、3 個の原子から成る分子に比べて脆いだろう。だからそれらが観測にかかる機会はほとんどないと考えられる。」であった。



図 1.3 Emil Hermann Fischer (1852/10/9–1919/7/15)

1925 年、Zürich 化学会の会合で Paul Niggli は云った。「そのようなものは存在しない。」その嵐のような会合の最後に Staudinger は絶叫した。「ここでは私は立ち止まっている以外やりようがない。」

1926 年、Wieland は Staudinger に

「巨大分子の考えを捨てなさい。5000 以上の分子量を持つ有機分子は存在しない。ゴムのようなあなたの生成物を精製しなさい。そうすれば、それらは結晶化し、低分子量化合物であることが分かるでしょう。」  
といった。

同じ年の Max Bergmann の言は

「天然の高分子量有機化合物が大きい分子を形成するとか、あるいは特殊な重合過程がそれらの構造を関係づけらるに違いないという仮定は完全に打ち負かされた。」

であった。

これらの発言者の内、Fischer と Wieland はそれぞれ 1902 年と 1927 年のノーベル化学賞受賞者であり、Perrin は 1920 年のノーベル物理学賞受賞者である。錚々たる人物が立ちほだかっていたことになる。

1926 年、Staudinger は Zürich から Freiburg に移った。当時、Kaiser-Wilhelm 繊維研究所の所長 Reginald O. Herzog は Meyer、Mark とともに X 線結晶学の研究をしていた。1925 年、彼は X 線結晶学データはセルロースのミセル構造を支持すると述べた。Herzog、Meyer、Mark はミセル説支持者だったので、Staudinger は彼らを敵と感じていた。Staudinger



☒ 1.4 Jean Baptiste Perrin (1870/9/30–1942/4/17)



☒ 1.5 Heinrich Otto Wieland (1877/6/4–1957/8/5)



*H. F. Mark*

☒ 1.6 Herman Francis Mark (1895/5/3–1992/4/6)



☒ 1.7 Kurt Otto Heinrich Meyer (1883/9/29–1952/4/14)

は良心的徴兵忌避者で、第一次世界大戦への反対を大胆に発言していた。一方、Meyer は非常な愛国者であり、その戦争中 Fritz Haber の毒ガス部門で働いていた。だから彼は科学における頑固な考え以外の理由でも Staudinger を好まなかった。Meyer と Staudinger は妥協する意思は持たなかった。Mark は科学的な傑出に加えて、その戦争で勲章を受章した、Meyer にとって魅力的な兵士であった。しかし、オーストリア人である Mark は Staudinger との攻撃的な論争を避けた。Meyer と Mark は 5、6 年 BASF 社で一緒に働いた。彼らは二人とも部分的にユダヤ人であり、後にドイツから移民した。

Staudinger とミセル説信奉者との鍵となる対決は、1926 年 Düsseldorf におけるドイツ自然科学者医者協会の会議で起こった。Mark の発表は X 線結晶学によるミセル説への見かけの支持の土台を崩すのを助けるものであった。何人かの指導的な科学者が高分子の概念の方に傾いた。Richard Willstätter は「私にとって、有機化学者として、分子が 100000 もの分子量を持ちうるという考えは驚くべきことである。しかし、今日聞いた事柄を基にすれば、私はゆっくりとでもこの考えに適應していかなばならないようだ。」彼はまた「Staudinger は化学に対して全ての有機化学よりも大きい分野を開いている。」と述べた。

Staudinger、Mark、Meyer の間で何故長い間論争が続いたのか、今日では理解するのは難しい。1928 年、Emil Fischer の以前の学生 Karl Freudenberg が Staudinger が具象化したような小分子が鎖状に繋がったセルロースの構造を示唆した。彼の研究室では、若いスイス人物理化学者 Kuhn が多糖類の光学活性の研究を始めていた。1930 年、Frankfurt におけるドイツコロイド学会の会合で Meyer はその学会の会長に擁立された。その地位は Wolfgang Ostwald や他のミセル論者が占めていたものである。一般にその会合は高分子学派が勝利した会合と考えられている。ただし、ミセル論者は全面的な敗北を受け入れていたわけではない。

1930 年、Staudinger は古典的な分子量決定法がうまくいかないところから、新たな高分子の分子量決定法を展開した。彼は高分子溶液の粘度と分子量との間に相関があることを見出し、それを「粘度則」と呼んだ。彼は高分子のモデルとして木の杖を用いた。Staudinger は優れた有機化学



図 1.8 Werner Kuhn (1899/2/6–1963/8/27)

者であったが、物理化学の能力はまったく限られたものであり、「粘度則」の解釈は近視眼的なものであった。

それに対して、Mark と Kuhn は優秀な物理化学者であった。Kuhn は Staudinger の杖模型と「粘度則」を信じなかった。1932 年、Kuhn は統計鎖 (coil) のモデルと高分子溶液の粘度に対する異なった式を展開し始めた。Staudinger は自分の見方を言い張っていた。

Staudinger と Kuhn の間にいくつかの往復書簡がある。

Staudinger の手紙:

「私の意見では、有機化学の観点から、あなたがしたように分子のコイル状の形態を仮定することは不可能です。分子は長い剛直な棒として思い描かねばなりません。もちろん、二重結合は自由に回転するので、(sic!)(なんたること:筆者註) 棒はゆらゆら動くことができます。しかしながら、平均して分子は直線的な伸びた形をもっており、それ以外粘度則は理解でき



図 1.9 Kuhn's Coil Model (1963)

ないでしょう。」

Staudinger が常に先取権 (priority) にこだわっていた事は次の文から知れる:

「この研究分野を支持していくことを私は明確に主張せねばなりません。そして私は例えば Mark がやったような、粘度と分子量の関係はずいぶん前から知られていたということを示すこの分野の取り扱いを否認せねばなりません。」

Kuhn は Staudinger には同意しなかった。返書で彼は書いている:

「ともかく、粘度の増加についての私の考えが棒状粒子への溶媒の結合という仮説とは決して両立しないという結論は否定できるものではありません。また、比粘度が鎖の長さに比例するというあなたの結果はほとんどまっすぐな剛直鎖の仮定では説明できません。」

しかし、1934 年のドイツ Bunsen 学会の会合で、Staudinger は長いまっすぐな鎖模型を用い、完全に間違った議論で自分の見解を支えた:

「有機分子の剛直性は、一重結合で繋がる炭素原子は自由に回転することができず、(sic!)(なんたること:筆者註) 炭素の二重結合のように固定されているという事実から説明できる。」

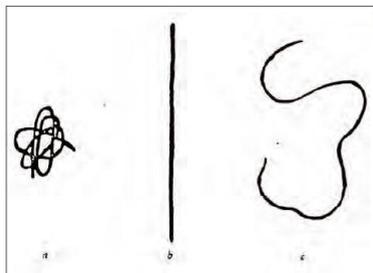


図 1.10 Mark's Sketch (1936)

「また、溶液中で分子は平均して結晶中のように棒状である。最近たびたび仮定されているように、それらはコイルであったり螺旋 (helix) 状であったりはしない。」

Staudinger は頑固に自分の古い見方に固執した。最良の有機化学者に対抗して鎖状高分子の概念を古典的有機化学に導入したという正方向のものが、今や物理化学者達の新しい結果に対する意味のない戦いとなった。1935年、イギリスの Cambridge で Faraday 学会シンポジウムで Staudinger は Wallace H. Carothers とともに最近 10 年間におけるそれぞれの研究の概要を述べた。英国物理化学学会によるその会議は高分子が承認され、高分子論争の終焉と見なされる最初の国際会議であった。Staudinger は 1951 年までコイル状高分子という描像の受け入れを拒んだ。彼の研究所のパーティで、共同研究者の一人が詩を書いている：「Kuhn のコイルは我々にとって悪夢だ。」

Kuhn らは何年にも亘ってより一般的な粘度式を展開した。それらは溶解した高分子について、塊状の小球から膨張した球さらに直線棒状分子に至る様々な形態を含むものである。特に最後の形態の場合、Staudinger の関係とは異なり、粘度は分子量の 2 乗に比例することが観測されている。

1953 年、Staudinger はノーベル賞を受賞して、自分の幻影を飛び越えた。受賞講演で Kuhn のコイルに言及し、事実として受け入れた。

高分子化学という新しい化学の専門分野が誕生したのは第一次世界大戦と第二次世界大戦の間であった。この時期に高分子の概念への変換の鍵と

なった人物は Mark と Kuhn の 2 人である。1920 年には 2 人とも未だ大学に居た。Mark はこの期間には Staudinger とは関係を持たなかった。友人になったのは 1950 年代である。1930 年代の初めに高分子についての論争が終結した後、注目は高分子の物理化学、すなわち、溶液中の高分子の形状、ゴム弾性へと向かった。この分野における先駆的人物はスイス人物理化学者 Kuhn で、上述のように 1930 年代の間 Staudinger の誤った考えと闘った。Kuhn は Ludwig E. Boltzmann のエントロピーの式  $S = k \log W$  を初めて応用した人物であり、1934 年には溶液中の高分子鎖における排除体積効果の概念を初めて提出した人物である。1974 年 Paul J. Flory はノーベル賞受賞講演で Kuhn の研究に対する賛辞を捧げている。

上述したように、Kuhn は高分子の先駆的研究に加えて、他の科学の分野でも画期的業績を挙げている。1927 年彼は Mössbauer 効果の存在を理論的に予測した。35 年後それは実験的に示された。このことは Rudolf Mössbauer が 1961 年のノーベル賞受賞講演で述べている。1933 年 Kuhn は同位体の光化学的分離を初めて行った。1939 年 Basel に移った後、彼は新しい型の蒸溜塔を建設し、重水を得た。Kuhn の多段分離過程の理論は腎臓における尿生産、および魚類の浮き袋中の高圧の生成を説明した。彼はまた、地質学者と一緒に研究し、地球内部の構造の新理論を出している。

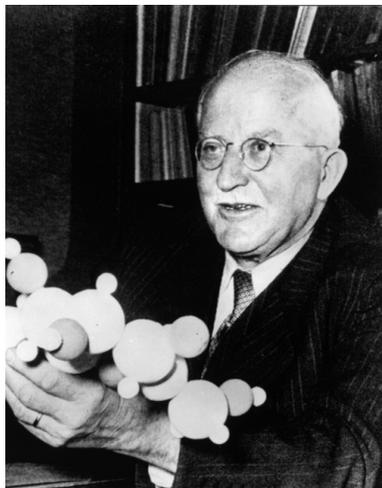


図 1.11 得意満面の Staudinger

### 1.1.1 Hermann Staudinger

Staudinger の履歴はノーベル賞組織による伝記などから分かる。<sup>1,2</sup>

Hermann Staudinger は 1881 年 3 月 23 日ドイツの Worms で生まれた。父は Darmstadt の哲学の教授で、彼に化学を勉強して植物学への道の準備をするよう勧めた。彼は Worms で教育を受け、1899 年に大学入学を許可された。最初は Halle 大学で、後に Darmstadt、Munich で勉強を続けた。1903 年、Halle で大学院を修了し、学位を得た。1907 年の春に Strasbourg 大学の Thiele 教授の下で講師としての就任が認められた。彼がケテン類 (ketenes) を発見したのはここであった。1907 年 11 月に、Karlsruhe の工科大学 (Technische Hochschule) における化学研究所の有機化学の助教授職に任命された。ここで彼はコーヒーの香り成分など多くの有用な有機化合物を単離した。

1912 年、Staudinger は Zürich に移り、14 年間 Eidgenössische 工科大学 (ETH) の講師であった。ここで、1919 年に彼と同僚の Meyer はアジド類 (azides) がトリフェニルフォスフィン (triphenylphosphine) と反応して phosphazide を生成する Staudinger 反応を発見した。彼はまた、アル

カリ金属とハロゲン化合物との爆発反応を研究した。Karlsruhe と Zürich で Staudinger はゴムの化学の研究を始め、Raoult や van't Hoff の物理的手法を用いて高い分子量の測定を行った。Karlsruhe での Staudinger の最良の学生 Leopold Ruzicka はケテン類の研究で 1910 年に博士号を得、彼に随って Zürich に移った。彼はそこで殺虫剤の研究を割り当てられた。Ruzicka が自分のテルペン類への興味を追求したいと Staudinger に云ったとき、彼は助手の職を失い、研究道具もひどく削減された。これで Ruzicka はがっかりした。Staudinger は若手を鼓舞する教師であると同時にどぎつい監督だった。1926 年、Staudinger は Freiburg 大学の招聘に従って化学の講師になった。彼は残る生涯をこの街で過ごした。1940 年以降高分子化学研究所の所長の地位が加わった。1951 年春に、彼はその大学の化学研究所所長の地位を退き、州の高分子化学研究所の所長としての名誉ある官職を受け入れた。彼は 1956 年 4 月までその地位にとどまった。

1920 年以降、彼は約 500 編の高分子物質の論文を書いている。そのうち、約 120 がセルロース関係、約 50 がゴムとイソプレン関係である。1965 年 9 月 8 日 Staudinger は亡くなった。



図 1.12 若い Mark

### 1.1.2 Herman Francis Mark

Herman Francis Mark の人生は数奇なもので、將に小説より奇なりである。<sup>3,4</sup>

Herman F. Mark は 1895 年 5 月 3 日オーストリアの Vienna で優れた医者であった父 Herman Carl Mark と母 Lily Müller の 2 番目の息子として生まれた。若いとき、H. F. Mark は心理分析者 Sigmund Freud、劇作家 Arthur Schnitzler、シオニズム (イスラエル国家へのユダヤ人の帰還運動) の創始者 Theodore Herzl などの客人との夕食のテーブルを囲んでの会話に印象を受けた。Gustav Mahler が Vienna フィルハーモニーの指揮者だった時期の音楽も強い印象を与えた。Mark はまた、特にスキー、サッカーなどのスポーツに熱中しており、一時期、オーストリア-ナショナルサッカーチームの一員であった。

この牧歌的な生活に突然終わりがやってきた。第一次世界大戦の勃発である。第一次世界大戦中、Mark は 4 年間オーストリア軍のスキー部隊で勲章を受けた戦闘歩兵将校を務めた; 彼はあらゆる前線で戦った。5、6 回

負傷し、勇敢さによって14個のメダルを受けた。あるとき、イタリア軍が Monte Ortigora を奪取し、オーストリア人は退却を命じられた。Mark は反撃に行かせてくれるように上官を説得した。甚大な犠牲はだしたが、その反撃で戦略的な峰は取り戻した。その戦争の最後の数ヶ月の間に Mark は捕らえられた。Bali に近い修道院で、彼は殆ど1年間戦争捕虜として過ごした。囚人に対する当時の人道的な扱いについての彼の話は今日では御伽噺のようである。囚人生活の退屈を紛らすために、Mark は言葉の勉強をし、化学の勉強を再開した。化学の勉強は戦傷から回復した2年前に開始していたものであった。1919年10月、彼は父が病気になったことを知った。Mark は看守を賄賂で抱きこみ、Vienna への汽車に乗った。

Mark の経歴は Vienna 大学から有機化学で博士の学位を得た1921年に始まる。彼は Wilhelm Schlenk の指導の下で、学位論文の仕事としてペンタフェニル エチル フリーラジカルの合成と特性決定の研究をした。Schlenk は Mark の元素分析を繰り返した後、博士論文を書くことを許した。Mark はこの指導者を崇拜しており、Schlenk もこの学生に最も印象付けられていた。彼は Mark に一緒に Berlin 大学に来よう誘った。1921年のことで、Schlenk は Emil Fischer が占めていた椅子を提供されていたのである。彼ら2人の協力は長くは続かなかった。ポスドクの講師として Berlin に移った1年後、Kaiser Wilhelm 研究所の所長 Fritz Haber が研究所に新しく組織する繊維研究所へ1人有機化学者を頼んできた。Schlenk は躊躇無く Mark を推薦した。彼はその研究所に職を得た。このようにして、Mark にとって信じがたいほどの生産性のある期間が始まったのは当時世界における指導的科学的センターの一つであるこの研究所においてであった。直近にその研究所に参加していた Michael Polanyi の指導の下で広範な X 線結晶学研究のプログラムが開始した。Polanyi はセルロース繊維からの X 線回折が繊維軸方向に配向した微結晶の存在を示すこと、類似の配向結晶が金属のワイヤーにもあることを見出した。セルロースの完全な構造解析は当時の実験では実行の可能性を超えているように見えたが、Mark と Polanyi はセルロースの弾性率が延伸によって増大するのは金属ワイヤーが冷延伸によって強化されるのに似ていることに注目した。彼らは冷延伸にともなう亜鉛ワイヤーの変化の詳細な解析に着手した。

その後、Mark が結晶学研究に選んだ多くの物質のうちのいくつかは以下のとおりである：1923 年のヘキサメチレン-テトラミンの構造決定は比較的複雑な有機分子に対する最初の一つであった。後 (1924 年) のグラファイトの構造は共有結合構造物が結晶学的な単位格子を越えて広がっていることを Mark が確信したことで重要なものであった。1924 年、シュウ酸の研究で Mark は一つのシュウ酸分子のカルボキシル基はもう一つの分子のカルボキシル基と同様水の OH 基をひきつけているという結論を得た。1926 年のカンコウ (塩化水銀) の研究で、彼は複屈折を結晶構造に結びつけた。1925 年、1926 年の二酸化炭素の結晶学研究は C-O の結合長を決定することを狙ったものであった。1925 年のエタンとジボランの結晶構造の比較はこれら 2 つの分子が類似の幾何構造を持っていることをしめした。3 価のホウ素が  $B_2H_6$  分子を造る方法はミステリーであったから、その結果は当時驚くべきものだった。エタンとジボランの構造の類似性の発見は、この研究結果を無視して、一般には 1937 年の S. H. Bauer による電子線回折の研究に帰属せられている。

Berlin では、Mark は最新の物理学の手法を大きい分子の研究に応用し、基礎的な研究方法を展開することによって彼の名声は高まっていった。Mark はもともと有機化学者として訓練を受けたことを考えると、Kaiser Wilhelm 研究所の年月の間如何に多くの努力が屈折率、X 線の偏光、Stark 効果、Compton 効果のような物理学の問題に向けられたかは驚くべきことである。

Mark の経歴の中で一つの重要な段階は 1926 年に Düsseldorf で開催されたドイツ自然科学者医者協会の会合であった。この会合で、Hermann Staudinger は彼の長鎖分子の概念に極端な疑念を持つ何人かのドイツの卓越した科学者と対決した。彼らは Staudinger が高分子に帰した全ての効果は低分子のコロイド会合によって説明できると主張した。Mark の講演題目は「有機、特に高分子物質のレントゲン画像による構造決定」であった。ここで、高分子という単語は当時においてはそういう物質が Staudinger のいう高分子から成るのか反対者のコロイド会合体から成るのかは意味を持たなかったということを記しておくのは重要である。Mark は彼の結晶学研究を総括し、詳細な分子構造は手に入らないにしても、重要な情報が単位格子や空間群から得られることを強調した。高分子に関しては、彼は

未だ長い分子に係わる用意がなかった。しかし、高分子が溶解によって低分子に分解しないことは、格子の力は定性的にも定量的にも分子内の力と同等であることを示していること、つまり、微結晶全体は大きい分子のように振舞うことを示唆した。

1926年、Friedrichshafenのドイツ最大の複合化学会社であるI.G. Farben工業のディレクターK. H. Meyerが、Ludwigshafenにある高分子研究所のディレクターになるようMarkを誘った。I.G. はレイヨン、セルロースアセテート繊維の飛び抜けたメーカーだった。1928年、MarkはI.G. Farben工業の研究所のディレクターになった。Ludwigshafenにおける研究目的は明確で、天然繊維に代わる合成の代替物の開発であった。Markはその目的のために高分子の研究を合成、特性決定、応用の3つの部門に編制、組織した。彼は紡糸技術の研究ならびに基礎的な研究を追及する完全な自由を与えられた。そこでは、彼と彼の仲間はセルロース、絹、綿、羊毛、タンパク質のような天然高分子の構造の研究に進んだ。生態の中の有機高分子の構造が正確に定義されたのは初めてであった。この仕事の一方、彼はKarlsruhe工科大学でも教えていた。そこでの彼の学生にはEdward Teller、Leo Szilard、Eugene P. Wignerがいた。Kaiser Wilhelm研究所での年月はMarkにセルロースの構造を考える十分な準備を与えた。1921年に遡ると、Polanyiはセルロースの単位格子が4個のグルコース残基を含んでいることを指摘していた。彼は回折図形がグルコース残基から成る長い鎖と矛盾しないことに気づいていたけれども、その可能性を重要とはしなかった。Markは後で、セルロースがエーテル誘導体やエステル誘導体に変換しても、繊維方向の単位(identity)周期は変化しないという暗示的な観測をした。1926年、SponslerとDoreがアメリカ合衆国で、セルロースはグルコース残基の長い鎖からできているとするX線構造の解を提案した。しかし、その構造はセルロースは分解するとセロビオースになるという化学的証拠と矛盾していた。1928年の先駆的論文で、MeyerとMarkは回折図形を解いて化学的証拠に一致する構造を出した。時代のテストに生き残る最初の高分子結晶構造であった。

もう一つの重要な研究はHeveaゴムに関するものである。MarkがKaiser Wilhelm研究所にいた時、同僚の一人J. R. Katzが天然ゴムは緩和状態で

は無定形であるが、延伸状態では X 線回折図形を示すという驚くべき発見をした。I.G. の研究室で、Mark はその発見を追試し、G. V. Susich と一緒に Hevea ゴムの結晶構造を解いた。この結果は、化学組成の問題を初めて解決したということで特に重要である：天然ゴムが poly(1,4-isoprene) であることは知られていたが、それが炭素-炭素二重結合の周りで cis 配位を持っていることを証明したのは結晶構造のみだったからである。

Mark は高分子の分子特性とそれらの技術的に有用な性質との間の関係に強い関心を持っていた。彼はセルロースの結晶構造と分光データから見積もった共有結合の破壊に要するエネルギーとを基礎にして、理想的なセルロース繊維の究極の強さを計算した。この方法では、彼は当時のはるか最先端をきっていた。彼は最良の工業的繊維でも理想的な繊維のわずか 10% の強さしかないことを示した。それは明らかに様々な欠陥によるものである。

Meyer の激励で、Ludwigshafen の年月の間 Mark は自由に多くの科学的興味を追及できた。それらは会社にとって金銭的な利益をもたらさそうにはなかったが、研究室にとっては学問的な名声をもたらした。彼は初めて気体の電子線回折の研究を行い、四塩化炭素、四塩化ゲルマニウム、ベンゼン、シクロヘキサン、*cis*-1,2-dichloroethylene、*trans*-1,2-dichloroethylene の結合長と結合角を決定した。1930 年という早い時期に、彼が 1,2-dichloroethane のデータは自由回転とは一致しない、すなわち、(内部) 回転角のある値が優位であることを結論しているのは特に興味をもたれる。若い Linus Pauling は Mark の研究室を訪れ、これらの研究に大きな感銘を受けたことを、後にしばしば思い起こしている。

.....

この時期、Hermann Staudinger の方に責任のあることで、Mark が被った苦い攻撃について述べておく必要がある。Staudinger の激情的な、情緒的な対応は、彼が最初に長い砂鎖状分子の存在を提案し、有機化学に新しい肥沃な分野を開いた、だから高分子を研究する物理化学者や物理学者は彼の考えを盗んだことで自由に糾弾できる、自分の分野への侵入者と見な

せると確信していたことにある。核となる論点は高分子は剛直棒であるという Staudinger の主張に対して、Mark や Meyer は高分子中の結合の回りの障害を持つ回転のため、高分子は屈曲性のコイルと考えねばならないことを解っていたことである。

1932 年までに、I.G. の経営陣は、多分 Hitler の政党がドイツ政府を乗っ取るだろうから、ユダヤ人の父を持つ Mark はこの会社の上級の地位を維持し続けることはできないだろうということを結論していた。彼は、最も気分を害さない色合いで、彼が去らねばならないだろうと言われたと、Mark 独特のやり方で、その会見を描いている。

1932 年、Mark は Vienna 大学の化学の教授に任命された。1933 年 Nazis がドイツを支配した。彼はすぐその種のものとして初めての高分子科学のカリキュラムのデザインに着手した。新規のモノマーや高分子の合成は Ludwigshafen の方が実行力があるので、彼は基礎研究に姿勢を切り替えた。Mark は多くの博士課程の学生、若い助手を雇った。その中には Johann Wolfgang Breitenbach、Eugene Guth、Friedrich Eirich、Robert Simha、Engelbert Broda、Max Perutz がいた。学生たちの研究では、重合の機構と高分子溶液の粘度を扱った。Mark の指導の下、ポリスチレン、強靱で無色透明なプラスチック、最初の 2 つの合成ゴムが商業生産物の方向に発展した。もう 1 つの業績は高分子の分子量を測る基礎となる粘度式 櫻田-Mark-Houwink の式の発見である。しかし、そこでの最も重要な成果は E. Guth と行ったゴム分子の弾性に対する統計力学理論の定式化であった。それは架橋ゴムの弾性理論を導く基礎的な考えを与えるものであった。

1935 年、Mark は自分の科学的興味と登山への愛着を結びつける精妙なアイデアを思いついた。彼は Soviet 科学アカデミーの友人を説得して、重水素が古代の氷河に凝縮されているかどうか決定するために、Caucasus の最高峰への探検を組織させた。結果は決定的ではなかったが、探検隊のメンバーは素晴らしい時を過ごした。

再び、政治的な大動乱が Mark の人生に痛みを伴う変化をもたらした。反ユダヤ主義 (anti-Semitism) による差別はドイツ同様オーストリアでも激しかった。1938 年 3 月、Hitler の軍隊がオーストリアを占領した。Mark

は教授職を解雇され、オーストリアの独立を維持しようとして1934年の倒閣未遂の間に Nazi 陰謀団に虐殺された Dollfuss 首相と友人であったということで逮捕された。Mark は監獄から開放されるためとパスポートを取り戻すために、今や新体制の中で影響力を持つ人物になっていた高校の級友の影響力を使うしかなかった。そのために友人が要求した料金は Mark の大学での年間給与であった。

幸運にも前年に Mark はカナダの Ontario 州 Hawkesbury にある国際製紙会社のディレクターと接触していた。彼は研究ディレクターの地位を申し出てきており、その提供が繰り返された。Mark はその提供を受け入れた。彼は妻、二人の若い息子、ユダヤ人の姪をつれてオーストリアを離れ、スキー休暇に見せかけてスイスにいった。そこからイギリスへと進んだ。旅券の問題はカナダ大使が解決した。Mark は貨幣の持ち出しの問題を科学的に取り扱った。彼は Vienna の多くの業者から白金・イリジウムワイヤーを買い、それを曲げてコートのハンガーにした。スイスへの車にはボンネットに Nazi の旗を掲げ、屋根にはスキー用具を括り付けてドライブした。1938年5月10日のことだった。Mark と同様、大抵のユダヤ人の共同研究者はオーストリアを去らねばならなかった。1939年2月7日の Manchester Guardian 紙は「Mark 教授が Vienna に組織した化学学派は崩壊した。」と報告した。彼のグループの国外追放は Anglo-American 世界での学問と専門分野の過程での跳躍台となった。9月に Mark はカナダに到着し、そこで2、3週間後に家族と合流した。Mark が Hawkesbury に停どまったのは2年間だけだった。

Brooklyn に至る Mark の3年間の移民過程では多くのことがあった:

Hitler によるオーストリア占領の後、イギリスの大学難民のための London 協会 (London Society for Academic Refugee) は Mark と他の7人のオーストリア人科学者をイギリスの工業会や大学に救出しようとした。彼らの中にはノーベル賞受賞者 Franz Viktor Hess、Otto Loewi、Erwin Schrödinger がいた。イギリスの著名な科学者や工業会の巨頭が Mark を固体、生態物質、高分子の X 線解析の分野における最も優れた研究者の一人であるとしていた。彼らは Oxford の Balliol 大学に研究者協会を組織し、Mark にもしイギリスに来ることを決めれば、彼とかれの家族が餓え

ることではないと保証した。Vienna のイギリス諜報機関によるその申し出を Mark は断った。彼にとってイギリスは行くべき場所とは見えなかった。しかし、Hawkesbury で 1 年を過ごした後、Mark はそこでは孤立しているように感じ、志願兵としてイギリスに行こうとした。Mark の独特の知識はイギリスの同僚に高く評価されていた。W. Lawrence Bragg は彼に Cavendish 研究所の特別研究員になることを申し出た。他にも大学、会社からの申し出があった。しかし、New York での大学からの任命が Mark がアメリカを去ることを防いだ。

Hawkesbury にいた間、木材パルプ、セルロースアセテート、ヴィスコースの製造の改良に集中した。ヴィスコースの仕事は特に骨の折れるものであった。というのはそれをタイヤコードに使うのに新しい正確な規格の繊維が求められたからである。この仕事が Du Pont 社との密接な関係を導いた。Mark が Hawkesbury は彼の科学的興味に対して十分な広い視野を与えないと決めたとき、この関係は重要になった。Mark がタイヤコードのプロジェクトで付き合いあった Du Pont の社員の一人は Brooklyn の Polytechnic 研究所の理事会のメンバーだった。彼は Polytechnic での学問的な職と Du Pont のコンサルタントの職との併任を提案した。1940 年 9 月、Mark は非常勤教授として Polytechnic の教授会に加わった。この時期は Hitler のヨーロッパからの難民の洪水が押し寄せ、彼らの資質と経験にふさわしい学問的地位を得るのは不可能に近い状況だった。Mark は Shellac Bureau に割り当てられた。その機能は shellac(ワニス)のテストと化学的特性の決定であった。Brooklyn は shellac の主な輸入港であった。shellac は天然高分子で、光学工業、歯科、音響レコードなどに使われていた。しかし、この物質はアジアから輸入されていたので、戦争のため合成による代替物の研究が奨励されていた。Mark は過去の経験で、shellac より優れた性質を持つ合成樹脂の知識をもっていたので、適任であった。

1930 年代に Mark は既に世界でも最も重要な高分子研究者の一人と認められていた。北アメリカには高分子化学の組織された研究機関はなく、当時のアメリカのどの大学にも高分子化学科はなかった。Mark はすぐにこの新しい分野の仲介者として行動し、ヨーロッパ型の物理を基礎とする研究方法をカナダやアメリカ合衆国に移植した。



図 1.13 Arthur Victor Tobolsky (1919–1972/9/7)

Polytechnic における Mark の活動は化学研究開発の戦時オフィスとの研究契約の結果としてかなり広がった。彼は A. V. Tobolsky、P. M. Doty、B. H. Zimm を雇った。彼らの誰も高分子の経験を持っていなかったが、後には高分子研究の指導的人物になった。また、Mark の影響は S. Krimm や R. S. Stein などの多くの天与の才を持つ学生に大学では流行から外れたこの分野で経歴を積み上げさせた。

Mark は合成ゴム、繊維、フィルムなどのプロジェクトで政府を助けた。第二次世界大戦中、アメリカ合衆国は天然ゴムが入手できなくなり、ゴム不足がすすむ衝撃は政府に合成ゴムの研究の支援を急がせた。すぐに 2500–3000 の化学者と技術者が合成ゴムの研究に専念した。Mark は I.G.Farben 研究所が開発した Buna S と Buna N の合成ゴムプラントで働いた経験があり、Know-How を知っていた。彼は合成ゴムを開発する工業会社を助ける委員会に参加した。彼の協力で、アメリカゴム工業は合成ゴムを開発し、第二次世界大戦での必要量を生産することができた。

Mark はまた多くの奇妙な戦時プロジェクトに巻き込まれた。最も興味をそそられるものは、氷の脆さが 2、3%のおがくずを含ませることで大いに除去できるという Mark の観測結果からでたものである。Washington のイギリス軍事使節は着陸設備の不足に係わっていた。その不足はドイツの潜水艦に対する航空攻撃の監視区域を限定しており、その組成で造られた平らな氷河が不沈の着陸場として使えるという望みを抱いた。一つの試作品が建設中であった 1942 年 9 月、戦争の状況における劇的な改善がその努力に終止符を打った。



Carl Shipp Marvel

図 1.14 Carl Shipp Marvel (1894/9/11–1988/1/4)

1944年、Polutechnic に彼を初代ディレクターとする高分子研究所が設立された。それはアメリカ合衆国における高分子研究の中心となり、高分子の力学特性の体系的理解を得ることができた。それは化学者達がその特性を予測し、意図する物質を仕立てあげることが可能にした。これによって、多くの新しいプラスチック、繊維、塗料などの物質が工業生産できるようになった。

高分子化学を真に科学の専門分野として受け入れさせるのに決定的に貢献したのは Mark である。彼がアメリカ合衆国に来た時、学問的地位にいた高分子科学者は Illinois 大学の Carl S. Marvel 唯一人であった。しかし、Marvel は高分子合成を研究していたのみで、高分子の振る舞いには興味がなかった。高分子の化学と教育を結ぶ大使になったのは Mark だった。1947年、Polytechnic の高分子研究所にアメリカで最初の大学院プログラムが設けられた。Mark の情熱的な指導性が欠くべからざるものであり、彼の世界中に亘る数多くの接触によって、学生は当時の指導的高分子科学者全てと会うことができた。土曜日の午前中、早い進歩を遂げている高分子研究に関する課題のシンポジウムが Brooklyn で開催され、広い地域から人々が出席した。

高分子研究が活発な全ての国の高分子研究者と Mark との友情は高分子の社会を密に編まれたグループにした。彼は遺恨をもつことができない性格で、ドイツとオーストリアの同僚には特に協力的だった。彼はまた、

Soviet Union の支配地域と残りの科学の世界との間に橋をかけるために多くの事をした。第二次世界大戦の終結前の 1944 年に Palestine に創られた Weizmann 研究所には特に奉仕した。

.....

Mark は「高分子科学の父」と認められるように高分子科学のパイオニアであるばかりでなく、構造化学の創始者でもあった。1936 年学生として Cambridge に配されていた Max F. Perutz は後に先生である Mark の X 線結晶学の方法を用いてヘモグロビンの  $\alpha$  ヘリックス構造を解いた。Perutz の学生であった Watson と Crick は DNA の二重螺旋構造を調べた。したがって、Mark が高分子科学に応用した方法はタンパク質の研究、分子生物学の進展への道を切り開いたことになる。

Mark は自分で数えたところ、500 回ほどの海外訪問をしている。その中で特に記憶に残っているのは 1962 年に日本を訪問し、天皇陛下に講義をしたことである。彼が聞いたところでは、そのような招待はノーベル賞受賞者が日本を訪問したときには慣例であるが、Mark の場合は異例とのことであった。また、その 10 年後、共産党政府が権力を握った 1949 年以降で中国を訪れた最初のアメリカ人科学者二人のうちの一人であった。

1961 年 Mark は所長を退き、Polytechnic の学部長に、1964 年には名誉学部長、評議員になった。

1992 年 4 月 6 日、Mark は短い病気の後、Texas 大学の学長である息子 Hans M. Mark 博士の家で 96 才で亡くなった。

Mark は高分子化学に関して 600 編の研究論文と 40 冊の本を書いた。

#### 「追記」

筆者は 1980 年 (と思うが) 滞在していた Carnegie-Mellon 大学でのシンポジウムで H. F. Mark に会ったことがある。彼はケブラーなどの耐熱性高分子について講演した。米国でのシンポジウムの常として、開会前にはドーナツ、コーヒーなどが供され、演者と聴衆が雑談を交わす。私が水を飲んでいると、Mark が近寄ってきて、その水をくれと言った。何か講演

中の演示実験にでも使うのかと思って、飲みさしのコップを手渡すと彼はいきなり飲み干してしまった。それを見て私も周りにいた院生もびっくりしたことであった。



図 1.15 若き日 (1926) の Kuhn(中央), Linus Pauling(左), Wolfgang Pauli(右)

### 1.1.3 Werner Kuhn

Werner Kuhn はスイス Zürich 近くの Mazur で 1899 年 2 月 6 日に生まれた。<sup>5,6</sup> 父は教会区員 G. Kuhn である。Kuhn は 1917 年に高校を卒業、Zürich の Eidgenössische 工科大学 (ETH, 連邦工学研究所) の化学工学を卒業した後、1921 年に ETH で物理化学と電気化学の修士号を得た。それから、Zürich 大学に移り、1923 年に Victor Henri の指導の下で、アンモニアの光化学分解の研究により Zürich 大学から物理化学の博士号を得た。Zürich における大学からのその年の卓越した卒業生として、Kuhn は Rockefeller 財団の特別研究員資格を授与された。当時の前途有望な若手科学者と同様に、彼は Copenhagen にある Niels Bohr の理論物理学研究所で研究を続けることを決めた。そこでは量子力学を学び、Kuhn はすぐに Bohr の量子論の真髄、その仮定、選択率を吸収した。特に、対応原理に惹きつけられた。異常なスピードで彼は勉学を独自の研究に向け、光の分散理論の柱となる“Summensatz”の定式化に成功した。この仕事は、彼自身の貢献を加えることになる科学の分野における新しい考えをすばやく完全に掴み取る彼の能力と想像力とを例証するもので、彼の最も強い武器となっている。

1927 年から 1928 年、Zürich 大学で講師として認められた後、Heidelberg 大学で Karl Freudenberg とともに研究するためにドイツに移った。そこでは、光学活性を解釈するモデルを作り上げた。それは高分子の研究とと



図 1.16 Kuhn 60 才

もに彼の主要な研究上の興味の一つになった。

1930 年から 1936 年の間、彼は Karlsruhe 工科大学の準教授として、ドイツ人物理化学者 Georg Bredig と一緒に光学活性化合物の光学的配位の研究を行った。

1936–1939 年、Kuhn は Kiel 大学の教授に任命された。

その後、スイスに帰り、1939 年から 1963 年の間 Basel 大学の物理化学研究所のディレクターになった。その間の 1955 年から 1956 年は学長を務めた。

1963 年 8 月 27 日、Kuhn は Basel で亡くなった。

光の分散、分子や結晶の光学活性、ゴム弾性の動力学理論、高分子溶液の熱力学と流体力学、同位体の分離法、地球の内部構造、腎臓の機能の理論、などが幅広く異なったテーマが Kuhn の興味をそそり、簡明さと応用性において他が凌ぐ事のできない理論展開と目的のはっきりした決定的な実験で、それらのそれぞれが Kuhn によって実質的に進歩した段階まで持ち上げられた。

Kuhn はセルロースの分解、ゴム弾性、溶液粘度の理論を通して、高分



図 1.17 Hans Kuhn(親族ではなく、弟子) (1919/12/5-)

子物理化学における最も早いパイオニアの一人である。彼は基礎を築いただけでなく、自分の考えと式を拡張かつ精密化し続け、進歩の最前線に居続けた。彼は精妙な実験の遂行と困難な理論の数式化の両方に巧みであって、それらの発展のどの段階においても非常に複雑な問題にうまく取り組むことができた。

Werner Kuhn の学生であった Hans Kuhn が自伝<sup>7</sup>の中で、高分子の研究を振り返っている。自伝の中の Kuhn 研究室時代の部分は以下のとおりである。なお、文中の「私」は Hans Kuhn である。

.....

私は Zürich (ETH) で勉強している間に Werner Kuhn について、彼の物理化学のいくつかの分野の基礎研究、光学活性の理論、分離過程の理論は世界的に有名であるということを知っていた。私は彼が Nazi ドイツから逃れて最近 Basel に来たことを聞いた。1942 年の春に化学工学の卒業証書を得たとき、私は Werner Kuhn とともに Ph.D の仕事ができれば素晴らしいだろうと思った。そこで、私は真新しい卒業証書をポケットに入

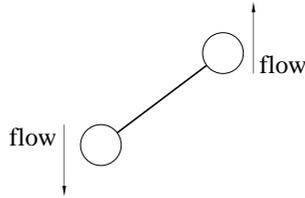


図 1.18 Dumb-bell モデル

れて、それまで会ったこともない Werner Kuhn に会う機会を得るために Zürich から Basel への汽車に乗った。私は勇気を奮い起こして彼のオフィスのドアをノックした。幸い彼はいた。私は彼に Ph.D の学生として受け入れてくれるように頼んだ。彼は予期しない見知らぬ訪問者に時間をとってくれ、学位論文のいくつかの可能な課題を私に説明した。私は彼の提案に大喜びで、即座に、非常に興奮しながら Basel での研究を開始した。私は Werner Kuhn の提案は私が生涯を通して使うことになる鍵、すなわち、できる限り単純でありながらなおかつ複雑な現象を表すのに本質的な点を含んでいるモデルを工夫しようとする試み、を私に与えているのであることを知らなかった。

私の学位論文は高分子の形態とその形態によって決まる性質についての Werner Kuhn の理論に関係するものであった。理論的に解くべき問題は、稀薄溶液中の高分子コイルが流れの勾配を課されたとき、何が起こるかということであった。コイルは引き伸ばされ、回転し、丸まり、熱運動で形を変えるだろう。その問題は私にとって複雑すぎて解けないように思われた。しかし、Werner Kuhn はびっくりするほど単純なモデル、分子鎖の両端に球があるダンベルで分子を置き換えたモデルを提案した。これらの球は分子コイルに代わるバネで結び付けられていると想定されていた。バネは、溶媒分子と鎖との熱的な衝突によって鎖の両端が互いにひきつけられるという事実を説明する。溶媒の流れによる粘性力に対して働く鎖の流体力学的抵抗は二つの球に集中していると仮定される。だから、分子を置き換えたこれらの球とバネは Brown 運動している粒子のように振る舞い、互いにひきつけあい、流体力学力で駆動される。私の仕事は鎖の両端の距

離の空間分布関数を様々な流れの勾配とコイルのサイズに対して見つけること、およびその結果、溶液の粘度と流動複屈折に対する関係を見出すことであった。

私は理論的な予測と低い流れの勾配における実験データとの素晴らしい一致を見て非常に驚き、本質に焦点を当てる Werner Kuhn の直感に魅了された。

この例は Werner Kuhn のやり方をよく示している：つまり、実際の状況を思い切り単純化するがなおかつ物理的な本質を考慮しており、各単一段階での見通しの良い数学的処理ができるように十分単純なモデルから始めるやり方である。彼は実験データでそれらの結果をすぐに点検するのを狙い、全ての結果を研究して注意深く彼のモデルを調べた。Werner Kuhn は抽象的な数式表現よりも初歩的な数学処理の方により信頼を置いていた。彼は考察している効果（現象）に対して何が重要であるかを真に理解することを望んだ。

Werner Kuhn が提案した高分子の性質を理解するための基本的な考えは分子鎖を長さ  $A$  をもつ  $N$  個のセグメントに分けることであった。ここで、 $A$  はセグメントの両端間距離である。 $N$  は任意であるが、与えられたセグメントの向きが隣接するセグメントの方向から独立と見なしうるのに十分大きい。このようにして、コイルの形と形の分布は単に統計の問題になる。鎖の両端間の距離  $h$  の自乗平均は

$$\langle h^2 \rangle = NA^2 \quad (1.1)$$

となる。この研究は高分子の形と、外力により形が変化しているときの性質とに対する最初の定量的、理論的記述を与えた。Werner Kuhn はこのようにしてゴム弾性を説明した。

超遠心機中での沈降の間の分子の抵抗は、定性的に、比較的短い鎖 (open coil) の場合と長い鎖 (密なコイル) の場合とでは全く異なっている：前者では流体力学力は鎖の各部分に作用するが (素抜け鎖)、後者ではコイル中の溶媒は動けない (非素抜けコイル)。当時、Werner Kuhn はこれらの両極端の場合を含む一般的な場合の沈降速度の定量的記述に関心を持ってい

た。彼は溶媒を連続と考える流体力学的な記述法に大いに確信を持っていた、しかしこの単純化した仮定をもってしても問題は恐ろしく難しかった。

私はそこでワイヤを曲げて巨視的なモデルを作りそれらのモデルの粘性液体中の沈降速度を測ることで困難を回避してみようではないかと考えた。モデルの形状因子は対応する分子のそれと同じでなければならない。私はモデル化する分子を表すような断面と長さの比を持つ 1 本のワイヤーを採った。 $L$  は拡大因子を適用した分子の糸の経路長に対応するものである。私はワイヤーを長さ  $A$  の部分に分けた。 $A$  は拡大因子を適用した後で、分子の平均自乗両端間距離  $\langle h^2 \rangle$  を与えるように

$$\langle h^2 \rangle = NA^2, \quad NA = L(\text{thus, } A = \langle h^2 \rangle / L) \quad (1.2)$$

で決めた。鎖のそれぞれの部分は任意の角度に曲げた。この方法で私は対応する分子のスナップショットに相当するモデルを得、沈降速度を測った。

Werner Kuhn は私の毀損した統計鎖要素に強く反対した。勿論彼は正しかった。それは彼の明確な思考に対抗するものだった。分子鎖の十分長い部分として  $A$  を定義することが問題の統計的取り扱いの基礎であった。一方、私の実験にとって、概念的な明確さを犠牲にした良いモデルが必要だった。Werner Kuhn は、このようにして定義した鎖のセグメントが有用なものと考えることに私と同意するまでに繰り返し繰り返し熟考した。本質は以下のことである：Werner Kuhn の統計鎖要素は真の分子の部分と考えられるべきものである。追加の式  $NA = L$  による  $A$  の決定で、我々は真の分子とは似てはいるが明らかに異なったモデルを表していた。このように決定されたセグメントは批判的な基礎を考へることなしに今日広く用いられている。Werner Kuhn の元来の考察を心に止めておくべきである。

以下で、私はセグメントに対して  $\langle h^2 \rangle = NA^2$  と  $NA = L$  から決めた  $N$  と  $A$  を用いる。セグメント  $A$  は異なる多くの状況で高分子を理論的にモデル化するとき特に有用である。

私はランダムな形態を模倣するモデルを数多く作り、粘性液体中での並進と回転の抵抗を測った。この実験はゆるいコイルでさえも素抜けからの強いずれを示した。沈降、流動複屈折、粘度に対する関係は実験事実とよく一致した。分子を模倣したワイヤーの (拡大因子を考慮した) 径さえも

分子系の径と殆ど一致した。これら全ては Werner Kuhn の流体力学モデルによる高分子の性質の単純な記述に保証を与えた。

巨視的モデルは素朴なアナログコンピュータとしてよい仕事をした。私はコイルの最大幅  $R$  の確率分布  $P(R)dR$  を得ることに興味を覚えた。 $R$  の射影に対する分布函数は得ることができたが、 $P(R)$  を得ることはできなかった。そこで、私は素朴に多くのモデルの  $R$  を計って  $P(R)$  を決定した。今日、蛍光ラベルした DNA 二重螺旋の場合には  $R$  は直接測定でき、 $P(R)$  に対する結果が得られる。「理論的」な分布との一致が見られた。

平均して距離  $h$  に固定された鎖の両端に働く力  $f$  は

$$f = \frac{3kTh}{\langle h^2 \rangle} = \frac{3kT}{A} \frac{h}{L} \quad \text{for } \frac{h}{L} \ll 1 \quad (1.3)$$

で与えられる、ここで、 $k$  は Boltzmann 定数、 $T$  は絶対温度である。今日、この力は分子の両端を固定して直接測ることができ、上の式との正確な一致が見出されている。ただし、 $f$  が大きいところではこの式は成り立たない。10 pN のオーダーの延伸力のところでは、延伸された系はまだ弾性変形しており、その弾性率は DNA の二重紐を用いて測ることができる。その弾性率は鋼材の 1/1000 である。DNA 二重鎖を引き裂く力は 500 pN であり、断面積で割った力 ( $10^8 \text{Nm}^{-2}$ ) は鋼材の力に近くなる。実験的に決定された  $A = 100 \text{ nm}$  の長さを用いて、セグメントを曲げる弾性エネルギー  $900 kT$  との比較から曲げの弾性率の値を得ることができる。それは試験管の曲げ弾性率に近い。同じことが擦れの弾性率についても云える。日常見られるものとのこの様な比較は現代の文献では容易には見つけられないので、ここで述べておく。Werner Kuhn がいつも生き生きとした描像を持っていたということは重要であった。分子的な過程を知的にモデル化するには、日常生活で過程を考えることによって分子的過程を生き生きと想像することに関連した直感が要求される。

私は稀薄溶液中の分子コイルの低い流動勾配における振る舞い、ならびに理論と実験との良い一致について述べた。Werner Kuhn は私の Ph.D 論文の課題を提案したとき、もう一つの問題を心に持っていた。私は高い流動勾配で流れている溶媒中のコイルがほどけることを示すべきであったろう。当時一般に、一重結合の回りで自由回転があり、この場合流体力学的

な力の影響のもとで、コイルは溶媒の運動に対してその形態を即座に適応させるだろうと仮定されていた。コイルは、引き伸ばされてほどけ、回転し、収縮して元の形を回復するというサイクルに従うだろう。結果として、稀薄溶液の流動複屈折は比例以上に流動勾配とともに増加するだろう。

ニトロセルロースとメチルセルロースの稀薄溶液についての Signer の貴重な実験でチェックして、私は増加が比例よりも少ないことを見つけた。コイルは、回転しているとき、ほどけ、収縮し、形を回復するのに時間がないほどに固いに違いない、つまり、コイルは形態抵抗 (shape-resistance) を持っているということがすぐに明らかになった。

我々はコイルが任意の形態抵抗を持つ一般的な場合にモデルを拡張した。粘度と流動複屈折の測定の実験との比較から、我々は結合の回転のポテンシャル障壁の高さを計算することができた。類似の障壁の高さがエタン中の C—C 結合回りの  $\text{CH}_3$  の回転に対して得られていた。

当時 Werner Kuhn と私は高分子稀薄溶液の粘度の定量的記述に関したより基礎的な問題に拘わっていた。小さい伸びた粒子の流動状態における溶液のエネルギー散逸を計算する際、私は文献では無視されてきていた拡散項を考慮し、以前に Werner Kuhn が得ていた散逸エネルギーの2倍の散逸エネルギーを得た。我々二人はどちらの計算が正しいか大いに悩んだ。驚いたことに、Werner Kuhn は私の計算が正しいと感じ、私は自分が間違っていると感じた。我々はその問題を再々議論し、最後に思考実験を基にして、拡散項は実際に付け加えられねばならないことを納得した。

形態抵抗を含めたことの結果を調べることは私の主要な仕事であったが、その一方で、私は Werner Kuhn が元々セットした仕事、すなわちコイルをほどくこと、を解決しなかった。そこで、私は形態抵抗には独立であるだろう方法を探した。私は一方の端に電荷を帯びさせたカルボキシル基を持つメチルセルロース鎖を高電場中に置き、電荷を持つ端に作用させて溶媒を通して鎖を引っ張ることによって、その問題を解こうとした。私はそのような鎖の溶液に小さい複屈折を観測した。それは電場の二乗に比例して増加した。手に入る電場は低すぎてコイルをほどくには到らなかった。

この問題が今日水中の単一の蛍光ラベルした DNA 二重螺旋鎖を用いて如何に解かれているかを見るのは魅惑的である。そこでは一方の端を固定して弱い流れにさらすかあるいは端に小さい粒子を付けて水を通して粒

子を引っ張るかする。部分的あるいは完全なほどけが直接観測され、鎖を引っ張るのに課された力が鎖の端の速度  $v$  の函数として測定される。その函数は定量的に記述される。完全にほどけた鎖がコイルを復元するのは直接観測できる。巨視的モデルを用いた流体力学実験はこの実験データから数値を得ることを容易にし、理論と実験との素晴らしい一致が見出された。これらの興奮させられる実験が 56 年前の私の学位論文の仕事におけるアイデアで再び仕事することで、私を忙しくしていることを述べるのは面白いことである。

DNA のゲル電気泳動は前述の事柄に応じて取り扱われうる。分子鎖は網目中に閉じ込められている。それは課された電場によって駆動され、揺動にさらされる。溶媒 (水) の抵抗は再び流体力学で近似される。この描像は速度を鎖長の函数として与える。実験とよく一致することが見出されている。

高分子の振る舞いを近似するために流体力学を用いる際の Werner Kuhn の確信は 1940 年代では決して明白なものではなかった。Kirkwood と Riseman によれば、高分子の沈降速度への理論的アプローチにおいて、調節パラメータと考えられていた摩擦因子に流体力学モデルのよるものより 10 倍ほども小さい値が与えられた。これは合理的でないように見えたが、何もメッセージは聞かれなかった。適当に合わせられたパラメータを持つ Kirkwood-Risman の論文は今日では古典的な論文である。Werner Kuhn の思考方法における重要な面が忘れ去られている。この例がそれを例証している。彼はパラメータで遊ぶことは好まず、確固とした地面に立つことを望んだ。理論の中の自由なパラメータは失敗に対して組み込まれた一種の言い訳である。

流動場中の高分子を記述する最も初期の試みで、Werner Kuhn と私は巢抜けコイルの描像を用いた。我々はこの極限では容易に見えた亜鈴モデルを拡張することをしばしば議論した。すなわち、二つの球の代わりに、間に鎖の部分に代わるバネで繋がった一連の球のモデルである。巨視的モデルを用いた実験の結果は、素抜けコイルは全く非現実的な極限の場合であることを明確にしていた。そのため、我々はそのような拡張がもっと良い記述に導くだろうと感じていた。ことはそのようにはいかなかったが、更なる発展にとって重要だったのはちょうどこの拡張であった。Prince

Rouse の論文が示すように。

理論的モデルを工夫することによって問題へ近づく方法は物理化学における過去の成功物語である。コンピュータによって創り出された素晴らしい可能性の代わりに、本質を抽出するために単純なモデルを工夫する鋭い眼識が生き延び続けるべきである。有力で単純なモデルが理論的枠組みとして役立つことが致命的である。Werner Kuhn の亜鈴モデルは一つの傑作であった。科学の社会がそのモデルとそれに基づいた研究を心に止めていないのは悲しいことである。

私は Werner Kuhn の研究における幅広い面に魅了された。私が Basel に来る少し前に、彼は細いチューブ内での特に効率的な分別蒸溜の原理を発見しており、同位体の効率的な分離のための装置を開発している途中であった。彼はすぐに腎臓の作用がこの原理に基づいていることを実感し、腎臓機能の理論を展開した。その後、彼は魚の浮き袋が同じ原理に基づくもので、深海の魚が 200 bar の圧力の下で如何に空気を作り出せるかを説明することができた。これは以前には謎とされていたことだった。Werner Kuhn が彼以前には完全に未知であった分野の重要問題を如何に掴み取ったか、驚異的である。彼は特別の問題を繰り返し繰り返し考える深い思索家であり、そのようにして重要で完全に新しい局面を発見した。

.....

## 参考文献

1. W. Gerhard Pohl, “*Staudinger—Mark—Kuhn: Historical Notes from the Development of Macromolecular Chemistry between 1920 and 1940*,” 6th International conference on the history of chemistry, pp. 211-218.
2. Nobelprize.org, “*Hermann Staudinger—Biography*,” 1953.
3. Johannes Feichtinger, “*Herman F. Mark (1895-1992): Viennese born ‘Ambassador’ of Macromolecular Research*,” 6th International conference on the history of chemistry, pp. 219-229.
4. Herbert Morawetz, “*Herman Francis Mark*,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
5. H. F. Mark, “*Werner Kuhn on His 60th Birthday*,” *J. Polym. Sci.*, **39**, 1-2 (1959).
6. “*Werner Kuhn*,” Encyclopaedia Britannica Online  
(<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1304008/Werner-Kuhn>).
7. “*Kuhn, Hans—Autobiography: Early Ideas in the History of Quantum Chemistry*,”  
(<http://www.quantum-chemistry-history.com/Kuhn1.htm>).

## 2章 高分子鎖の統計力学

### 2.1 Eugene Guth

Guth は 1905 年 8 月 21 日ハンガリーの Budapest に生まれた。<sup>1,2</sup> 彼は 1928 年 Vienna 大学で物理学の博士課程を終えた。1928 年から 1930 年の間は Vienna 大学の Research Associate で、1929 年、23 才の若さで 170 頁におよぶ量子論に関する最初の包括的な歴史を書いた。この論文は Niels Bohr と Wolfgang Pauli に高く賞賛された。

1930 年から 1931 年には、Guth は Zürich の連邦工学研究所 (ETH) で Wolfgang Pauli とともに、ついで Leipzig 大学で Werner Heisenberg のもとでポスドク Research Associate として働いた。

その後、彼は Vienna 大学に戻り、1932 年から 1937 年迄物理学の教授を務めた。

Vienna にいた間、彼は生涯の友人かつ同僚となった Herman F. Mark とともに高分子の統計力学のモデルを展開した。それはゴム弾性の動力学理論の礎石となるものであった。高分子化学物理の権威である A. J. Staverman はそのモデルについて、「弾性力が絶対温度に比例するという観測から導かれたゴム弾性のエントロピー起源に対する Guth と Mark の説明は、分子が動的な系であり、ゴムが変形するとき配位の数が減少するという仮定を意味している。ここで、この高分子についての動的な概念は新鮮で、気体の動力学理論の概念に匹敵する、科学史における前進の大いなる一歩と考えられるだろう。」と述べている。Herman Mark はその発見を Guth のお陰としている:「私はそのような問題を扱うには数学的に巧みではなかったので、著名な Vienna 人理論物理学者 Hans Thirring に助けを頼んだ。彼は私に最良の共同研究者の一人である E. Guth 博士を推薦した。実際、彼は非常に短期間に、線状の屈曲性分子がコイル状に縮

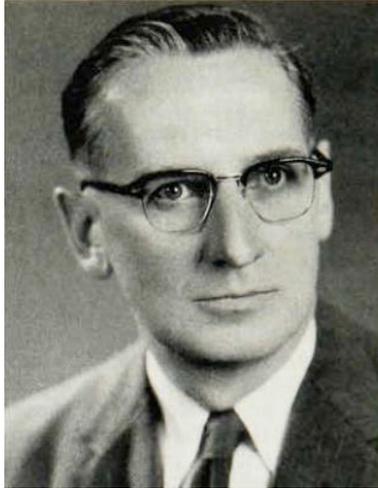


図 2.1 Eugene Guth (1905/8/21–1990/7/5)

む間に獲得するエントロピーを表す重要な式を開発した。その式はゴム弾性に対する新しい有名な動力学理論の基礎になった。」

1937年、GuthはNotre Dame大学(米国)における物理学の教授会に加わった。1931年から1945年の間は教授で、1945年に彼は最初の研究教授(Research Professor)になり、1955年まで続けた。その間の1942年にアメリカに帰化した。

1930年から始めて、GuthはHubert M. Jamesと一緒にゴム弾性の最初の定量的な網目理論を展開した。

第二次世界大戦中、Guthは海軍研究所のために合成ゴムを研究する研究者達を率いた。戦後、Guthと仲間達は彼のゴム弾性の動力学理論の結論の多くを核磁気共鳴を用いて点検し、理論の基礎的な過程、すなわち、紐つまり高分子鎖の屈曲性が正しいことを確立した。

Guthはまた、Albert Einsteinが1906年の学位論文の中で最初に展開した懸濁液の粘度理論を様々に一般化した。教科書「Low Reynolds Number Hydrodynamics」の中で、次のように述べられている:「球状粒子の懸濁液に対するEinsteinの粘度理論と楕円体状粒子へのJefferyによるその拡張は1936年にVienna大学のGuthと彼の共同者によって更に色々な方



図 2.2 Guth (circa 1935 ウィーン大学)

向に拡張された。」Guth はあとで、Notre Dame 大学高分子物理学研究所のディレクターをしていた間に、粘度理論がゴム中のカーボンブラック (carbon black) のような「固体懸濁物」の理論と同型であることを示し、それを実験的に証明した。

Guth は高分子物理と高分子物理化学の創設者、展開者の一人であり、その業績とレオロジーへの寄与によって 1965 年にレオロジー学会の最高の賞である Bingham Medal を受けた。前学会長の H. Leaderman は *Physics Today* に「高分子化学の基礎は長い鎖状分子の存在を示した Staudinger によって確立された。高分子物理化学と物理の基礎は Brown 運動している屈曲性を持つランダムに折れ曲がった分子の取り扱った Guth と Mark によって確立された。」と書いている。

1956 年、Guth は Oak Ridge 国立研究所に移り、研究所のディレクター Alvin Weinberg の技術顧問になった。彼は 1971 年に退職するまでその地位を保った。Oak Ridge を離れた後、1971 年から 1972 年まで Guth は Rice 大学の客員教授になった。また、1968 年から亡くなる 1990 年まで Tennessee 大学 Knoxville における物理学・天文学のパートタイムの教授であった。

Guth の核物理学への貢献も広範である。彼は電子を用いて原子核を崩壊させることを示唆し、最初の実験に参加した。

彼はまた、核の光子効果の最初の詳細な理論を提案した。それは、歪ん



図 2.3 最晩年 (死の 2,3 週前) の Guth

だ波の Born 近似の最初の核への応用、Coulomb 励起の最初の正確な理論的研究、Mössbauer 効果と密接に関係する X 線による核の励起の最初の取り扱いを含むものであった。1966 年以来発見されたいくつかの核融合の型の一つである Coulomb 融合が Guth と Lawrence Willets によって最初に予言され、最近観測されている。

Guth はまた、固体物理学でもいくつかの重要な結果を出している。彼と Mayerhöfer は高電流密度での Ohm の法則の限界を議論する論文を書いている。

また、彼は Mullin と電場中での金属からの電子の放出の最初の理論を作り、Schottky 線からの周期的ずれを説明した。

Guth は生涯を通して物理学と高分子科学の新しい発展の情報を得続けており、いくつかの独自の論文を用意していた。彼は決して科学から離れず、科学への関心を止めなかった。死の 2、3 週間前に Herman F. Mark との共著のゴム弾性に関する短い論文を仕上げている。Guth は 1990 年 7 月 5 日に心臓発作で亡くなった。

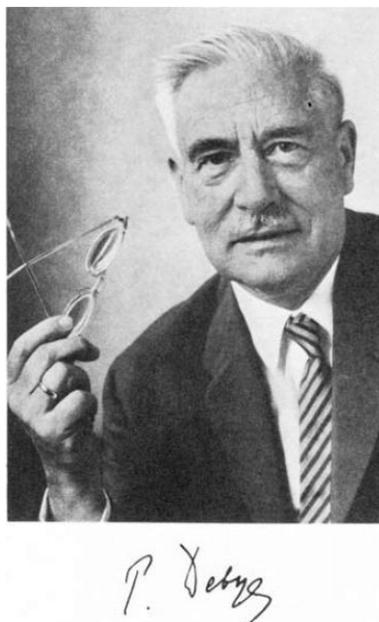


図 2.4 Petrus Josephus Wilhelmus Debye (1884/3/24–1966/11/2)

## 2.2 Peter Joseph Wilhelm Debye

Peter Joseph Wilhelm Debye の伝記は J. W. Williams の文献<sup>3</sup> および P. P. Ewald の文献<sup>4</sup> 等<sup>5</sup> に見られる。

Debye はドイツとの国境に近いオランダの Maastricht で 1884 年 3 月 24 日に生まれた。父は機械工作場の職長だった。彼の活発さと素早い認識力の多くは父から受け継いだものであった。Maastricht での学校、小学校 (elementary school) と中学 (secondary school) を終えた後、1901 年、Debye はライン地方のプロシャから 30 km 離れた Aachen にある近くの工科大学 (Polytechnic School) で工学の勉強を始めた。そこで彼は偶然工業力学の若い教授であった Arnold Sommerfeld のコースをとった。他に Max Wien 教授の影響も受けた。数学と古典物理学を勉強し、1905 年、電気工学で学位 (卒業証書) を得た。Sommerfeld はこの輝くような学生に対する

認識を誤らなかった。彼は間もなく Debye を工業力学の助手にし、1906年に Bavaria 地方の Munich へ理論物理学の教授として招聘されたとき、助手および博士課程の学生として一緒に連れて行った。後年 Sommerfeld は彼の最も重要な発見は Peter Debye であると云った。1907年、Debye は渦電流を含む問題の数学的に優雅な解を与える最初の論文を出した。

Debye の学位論文の課題は小さい誘電体球による光の回折に対する厳密な理論に基いて、虹の新しい改良された理論を導くことであった。1908年7月、Debye は放射圧の学位論文で Ph.D の学位を得た。この学位論文の全部が出版されたかどうかは分からない。それは次の事情による。Debye の学位論文は通常の Ph.D 論文のボリュームを越えており、出版者 Teubner は本として出すことを提案した。しかし、この初期の時代、重要で話題となる課題が次から次へと Debye を急がせ、彼は名人芸のやり方で取り組んでいたから、古典的な問題の本を仕上げるのはそれほど急ぐことではなく、魅力のあることではなかった。この学位論文のために開発された数学的方法は分離して 1910 年に出版された、以来多くのところで役立てられている。それは複素積分を求める際の鞍点法であった。1910年にはまた、Max Planck よりも単純な方法で Planck の輻射の式を導いた。それは Planck も認めている。その年、Debye は私講師に昇進した。

Debye が Munich にいた 1906–1911 年は荒れ狂う状態であった。一方では、Einstein の相対論の結果で基礎の激変があり、他方では、黒体輻射の正しいスペクトル分布を得るために Planck が 1900 年に導入したエネルギー量子  $h\nu$  が、このとき未だ孤立したその場しのぎの仮定にとどまっていた。1905年の4つの有名な論文のうちの一つで、Einstein は  $h$  について他の意味を初めて見つけた。彼は固体が共振器を含んでいると仮定し、Planck が輻射の空洞共振器で用いたのと同じ函数によって共振器にエネルギーを分布した。それは固体に熱容量を、その微分が比熱を与えた。後者は Nernst の初期の測定に対応して、低温で消失した。更なる測定は Einstein の式が十分ではないことを示した。Nernst と Lindemann が周波数  $\nu$  と  $\nu/2$  の2種の共振器を示唆したことによってますます混乱することになった。Debye が弾性体の適切な振動モードに Planck の分布を適用することによって状況を救ったのはこの段階だった。それは、Planck や



図 2.5 若き日の Debye

Einstein が考えていた原子や分子の共振器を固体に広がる状態で置き換えるという非常に大胆な方法だった。Debye は古典力学と古典物理学、特に Rayleigh の論文、音の理論の熱心な読者であった。適切な振動モードは彼の心の中で最重要であった。Debye は、まず連続体の弾性理論のよって弾性球の振動周波数分布を見つけることによって適切な周波数の分布を得て、次に有限の分子数に対応する周波数の数でその無限に続くスペクトルを切り取った。これは思いつきの、出たとこ勝負のやり方であったが、深い物理的洞察に基くものであった。

1911 年、Albert Einstein が Bohemia の Prague で教授に任命されたとき、Debye はスイスの Zürich 大学の理論物理学教授に任命された。その後の Debye の University Swing は次のようなものである: 1912 年 Utrecht へ、1913 年 Göttingen へ、1920 年 Zürich の ETH へ、1927 年 Leipzig へ、1934 年 Berlin へ移った。

1912 年、Debye は Utrecht 大学の理論物理学教授の地位を受け入れてオランダに帰った。2 年後、Göttingen から招聘を受け物理学研究所の理



図 2.6 少し若い Debye

論部門の世話を引き受けた。短期間のうちに彼は研究所のディレクターとなり、第一次世界大戦が終わった後まで実験物理学の講義をした。

1920年、DebyeはZürichへ戻り、こんどは物理学教授およびEidgenössische工科大学(ETH)の物理学研究所のディレクターとなった。1927年同等の地位がLeipzig大学の開かれ、彼はその地位を占めるよう招聘された。1934年から1940年まで、DebyeはBerlin大学の物理学教授ならびに、Einsteinの後を継ぎ、Berlin-DahlemにあったKaiser Wilhelm物理学研究所のMax Planck研究所のディレクターを務めた。1937年から1939年の間、Debyeはドイツ物理学会の会長であった。

Berlinでの職はヨーロッパにおけるDebyeの最後のものではあった。

Debyeの更なる研究の多くは古典力学、電気動力学、光学とPlanckの量子エネルギー分布や他の形の統計との組み合わせにその特徴がある。Laue-Friedrich-KnippingのX線回折写真の解釈が未だ生みの苦しみ状態にあった1913年、Utrechtの新しい新婚の理論物理学教授Debyeは、熱運動で不規則になった結晶によるX線回折の問題に取り組んだ。それは

当時極端に難しい問題に見えた。Debye は徐々にそれを解いた。1914 年の彼の 3 番目の論文は、弾性波に調和した秩序を持つように調整されて原子が移動する 3 次元結晶を取り扱っており、現代の形で温度因子を導入している。11 年後、Ivar Walter が指摘したように、指数中の定数が 2 倍間違っており、そこからこの因子は Debye-Walter 因子と呼ばれる。

Utrecht では、Debye は彼の理論的研究を実験で検査する機会を与えられなかった。そこで、彼は Göttingen 大学からの招請を受け入れ、そこに 1914 年から 1920 年の間とどまった。原子中の量子化された電子軌道についての Niels Bohr の最初の画期的論文が 1913 年に現れた。Debye はその原子模型が真実かどうか、軌道上の電子の空間距離に応じた X 線干渉効果を観測することによって確立できることを議論した。彼と Paul Scherrer は単色の X 線の散乱体として弗化リチウムを用い、実際に干渉環を得た。しかしそれらの環は原子中の短い距離によって引き起こされるものとしてはあまりにも鋭すぎた。Debye と Scherrer はすぐに粉末結晶の回折の性質を理解し、環の番号付けおよび議論を展開した。粉末回折法はすぐに多くの化学、鉱物学、金属学の研究室における結晶解析と同定のためのお気に入りになった。その最初の応用の一つとして、Scherrer は金属コロイド溶液の性質を解明し、光学顕微鏡の解像度よりはるかに小さい粒子のサイズと構造を如何に決定するかを示した。

Debye は原子核の周りの電子の分布を調べるために回折を用いることに比べて、結晶構造を見出すことにはあまり興味がなかった。彼は 1916 年、原子の形状因子を散乱角  $0$  へ外挿して LiF 中のリチウムと弗素のイオン電荷を確認した。1919 年には、金属が、当時主張されていたような、正の核と電子が塩化ナトリウム状の配列を持っていないことを示した。

Debye と共同研究者のその後の研究は、単一分子、流体、高分子の構造の研究に光、X 線、電子線の散乱を利用している。議論は多くの場合古典的な干渉理論と古典統計の組み合わせである。電荷分布の一次および二次モーメント、原子間距離、鎖状高分子の両端間距離などの多様な物理的に意味のある物理量が測定から導かれている。Debye は、例えば四塩化炭素などの、真空中の分子ビームに X 線や陰極線を衝突させて気体中の単一

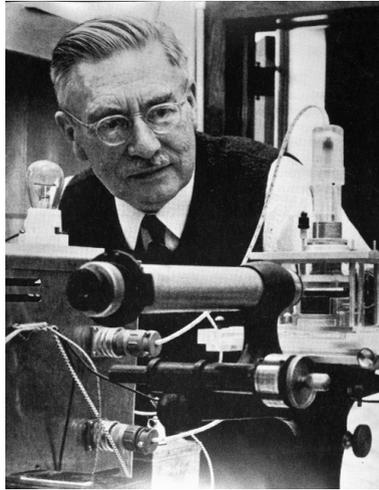


図 2.7 実験室の Debye

の分子の X 線あるいは電子線回折を実験的に研究した。彼は電子線回折において前方散乱を減らすために回転セクター法を初めて応用し成功している。また、流動している粘性流体と変形を加えた高分子における光散乱の異方性を測定し、その結果が分子あるいは鎖の配向で解釈できることを示した。Debye は誰にもまして、広く散った散乱 (通常の光散乱: 筆者註) から情報を得る多くの方法を工夫した。この理由だけでも、物質の構造に興味を持つ人は誰でも彼に多くを負っている。

1923 年の論文で、Debye は Compton とは独立に Compton 効果の理論を展開した。(Compton の論文は Debye の論文より 2、3 週早かった。) 1913 年 Easter での Göttingen における物質の動力学理論の会議で、彼は固体の動力学に対して素晴らしい貢献をした。彼の熱容量および X 線の熱散乱の論文は原子間の線型の力あるいは線型の弾性力の仮定に基いている。これらでもって固体の二つの一般的な性質、熱膨張とゆっくりした熱伝導を説明することはできない。Debye は彼の貢献の中で、非線型力を仮定し、再び出たとこ勝負のやり方で、如何にその恐ろしく難しい問題に取り組むかを示した。彼は非線型力を持つ固体中で、熱波が如何に密度と弾

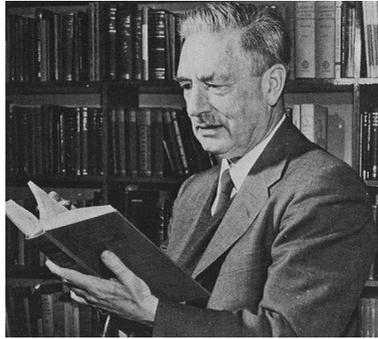


図 2.8 書齋の Debye

性の局所的で一時的な揺らぎを引き起こすかを示し、波の移動に対して固体は光に対して濁った媒体に似ていることを示した。それ故熱波は散逸され、熱雑音に変わるまでにはある限られた範囲だけにある。熱伝導において、エネルギーは、棒の熱い端から冷たい端へ高速で弾性波の背に乗って行くのではなく、高いエネルギー密度から低い方へと棒に沿って拡散する。Debye の理論は完全ではなかったが、一つの基礎を敷いた。Peierls が重要な特徴、Umklapp 過程を付け加えるまでに 15 年掛かった。

Debye の名を冠する 3 つの課題がある：

- 分子間の van der Waals 力の説明；
- 誘電測定の基礎として分子構造の研究に広い分野を開いた極性分子の理論；
- 強電解質の一般理論、Debye-Hückel 理論

である。なお、Erich Hückel は Debye の助手であった。これら 3 つの課題全てが 1920 から 1923 年の間に始められた。それらは全て双極子や四重極子間の統計的な相互作用の基くものである。それぞれの課題が物理化学的特性に対する大部の更なる研究へと導いてきている。Debye の最後の関心は、液体系の臨界状態における光散乱の観測から長距離の分子間力を決定することを中心とするものであった。



図 2.9 講義する Debye

上述のように、1934年から1939年の間 Debye は Berlin の Kaiser Wilhelm 研究所における物理学部門のディレクターであった。Debye は 1936 年ノーベル化学賞を受賞した。受賞理由は「双極子ならびに気体中の X 線と電子の回折の研究を通して分子構造について私達の知識に貢献したこと」であった。1936 年以降は Berlin の Frederick William 大学の理論物理学の教授でもあった。Adolf Hitler が Nazi ドイツを支配し、1938 年以降オーストリアも支配した間も、彼はこれらの地位を保った。

1939 年、Debye は New York 州 Ithaca の Cornell 大学で Baker 講義をするためにアメリカ合衆国へ旅行した。1940 年初め、彼はドイツを去り、Cornell 大学の教授となり、10 年間化学科の椅子を占めた。1946 年には Debye はアメリカ市民になった。2、3 年毎に街から街を移動したヨーロッパでの生活とは異なり、アメリカでは Debye は残る経歴の間 Cornell にとどまった。1952 年に退職したが、死ぬまで研究は続けた。

Cornell 大学における Debye の仕事の多くは光散乱法を用いて高分子の分子量とサイズを決定することに関係するものであった。これは第二次世界大戦中における彼の合成ゴムの研究として出発したものであったが、タンパク質や他の高分子へも拡張された。

Debye は 1966 年 4 月心不全を患い、9 月 2 日 2 度目の心臓発作によって New York 州 Ithaca で急死した。初期の癌であった。

### 「戦争活動と論争」

#### 「2006 年論争」

2006 年 1 月オランダで 1 冊の本が出された。著者は Sybe Rispens で、題名は「オランダでのアインシュタイン」である。この本の 1 章で Debye と Einstein の関係が扱われている。Rispens は、彼が信じたこととして、新しい文書を発見し、Debye は Kaiser Wilhelm のディレクターの間に、ユダヤ人や他の非アリア要素をドイツの科学研究所から浄化するのに積極的に参加したことを示した。Rispens は Debye が 1938 年 12 月 9 日に、ドイツ物理学会の会長としての資格で、全会員に次のように書いたことを記録している:

「現在の状況に照らして、Nuremberg 法に規定されているようにドイツのユダヤ人によるドイツ物理学会の会員権は継続することはできない。役員会の希望に従って、私はこれらの定義が適用される全ての会員に辞表を私まで届けるよう依頼する。Heil Hitler!」

Rispens の仕事より前に出版された多くの伝記は以下のように述べている: Debye は Nazis によって強要されたドイツ市民権を受け入れることを拒んだので、アメリカ合衆国へ移った。彼は 1939 年遅くに Maastricht にいる彼の母親を訪ねている間にドイツからの出発を計画し、1940 年 1 月に Genoa で船に乗り、1940 年 2 月の初めに New York に着いた。彼はすぐに合衆国での永久職を探し、1940 年 6 月に Cornell からのそのような申し出を受け入れた。その月、彼は合衆国とカナダの国境を越え、数日のうちに移民ビザで戻った。彼は 1940 年 12 月までに彼の妻をドイツから合衆国につれてくることができた。彼の出発前に 1916 年生まれの彼の息子 Peter Paul Rupprecht Debye は既に合衆国にいたが、1921 年生まれの 19 才の娘 Mathilda-Maria Debye と義理の妹はドイツを離れられなかった。彼女らは Berlin にある Debye の官舎に住み、Debye の給料で支えられていた。そのために、Debye は注意深く公的出張を維持し続けた。

Rispens は更に、以下のように主張する: 1940 年前半に、Albert Einstein は Debye が合衆国で Cornell に任命されることを防ぐことを活発に試みた。伝えられているところでは、Einstein はアメリカ人の同僚に「信頼できる筋から私は Debye がドイツの Nazi 指導者達と未だ密接に接触していることを知っている。」と書いた。そして、Rispens によれば、Einstein は同僚達に「アメリカ市民として義務であると考えをすることをしよう」依頼した。このことを支持するために、Rispens はよく知られている Debye から Einstein への手紙とそれに対する Einstein の返書を挙げる。

Van Ginkel はこの件についての 1940 年の FBI(連邦調査局)の報告を調べ、「信頼できる筋」が Einstein に向けられた 1 通の手紙であり、書いた人物の名前は失われているところまで追跡した。この人物は個人的には Einstein の知らない人物で、Einstein によれば、Debye もまた個人的には知らない人物だろうということであった。さらに、この告発的な手紙は直接 Einstein には届かなかった。イギリスの検閲官に妨げられ、その検閲官が Einstein に示した。Einstein はその手紙とともにイギリス情報員を Cornell に送った。そして Cornell の当局はその件を Debye に話した。Debye は Einstein に良く知られた 1940 年の手紙を書き、それに Einstein が答えた。これら 2 通の手紙は出版された Einstein 書簡集で見ることができる。

Rispens は、Debye は 1941 年 6 月 23 日に彼の以前の雇用主に、彼が Kaiser Wilhelm 研究所での義務を再開することができるしそれを希望するという電報を送っていると主張する。それは、たぶん出張を続け、彼の娘のために Berlin の家と給料を維持するためであったろう。1941 年夏に、Debye はアメリカ市民になるという意向の書類を提出した。彼はすぐに連合国の戦時研究に参加するよう合衆国に召集された。

Debye とオランダ人の同僚が、ユダヤ人の同僚 Lise Meitner が 1938–1939 年に Nazi の訴追を逃れ、ドイツとオランダの国境を越えて最終的にスウェーデンに至るのを、自分と家族への大きな危険を犯して助けたことは、多くの伝記や Rispens の本にも書かれている。

Rispens の本に先立つ 18 年前の Rechenberg の論文は、Debye の信書をもっと詳しく書いており、Debye が Nazi 活動家達に抵抗した努力を好意

的に表している。その論文ではまた、反 Nazi の見解でよく知られていた Max von Laue もドイツ物理学会長の手紙を承認していたことを指摘している。

### 「国際的反響」

Debye の息子 Peter P. Debye は 2006 年 89 才で会見し、彼の父親が全く政治に関心はなく、家庭でも政治は決して議論されなかったことを回想している。この息子によれば、Debye は Kaiser Wilhelm 研究所で仕事をするのを望んでおり、Nazis が彼を煩わさない限りそうすることができた。彼は母親が戦争の間息子の彼に合衆国にとどまるよう強制したことを思い出している。この Debye の息子は 1939 年夏に 2ヶ月の休暇を計画して合衆国にやってきており、戦争の勃発のため決してドイツには戻らなかった。

Utrecht 大学の理事会は Rispen の告発を非常に有害であると考え、2006 年 2 月 16 日に Debye 研究所の名称を変更すると声明した。これは NIOD(The Netherlands Institute for War Documentation: Amsterdam のオランダ戦時文書研究所) との相談の上でなされた。

2007 年 4 月まで Utrecht の Debye 研究所の上級経営ディレクターであった Gijs van Ginkel 博士は、Debye 研究所のウェブサイトにした意見論文で、この決定を嘆いた。その中で彼は、Nazi からの増大する圧力の下で、ドイツ物理学会は脅かされていた職員を望む限り保留できたと指摘する学者を挙げている。彼はまた次の重要な議論を前面にだしている: Debye が戦後の 1950 年にドイツ物理学会の Max Planck メダルを受けたとき、誰も反対しなかった。反対する立場にあったであろう国家社会主義者(Nazi) に対するよく知られた対向者 Max von Laue でさえも。大きな威光をもつ Einstein も未だ生きていたし、Debye を親しく知っていた Lise Meitner、James Franck などの他のユダヤ人科学者もいた。彼らの誰も、Debye がドイツ最高の科学的栄誉を受けるのに抗議しなかった。事実、Albert Einstein は、永年の間 Max Planck メダルの候補者への投票に参加しなかったが、Debye への投票過程には加わった。

Maastricht 大学もまた、科学研究に対する Peter Debye 賞への立場を再考していると声明した。

ドイツ物理学会のウェブサイト上の返答で、Dieter Hoffmann と Mark Walker は、Debye は Nazi 活動家ではなかったと結論している。彼らは、Max von Laue もまた “*Heil Hitler*” をつけた手紙にサインを強要されており、余儀なくサインしたことを認めている。彼らはまた、ドイツ物理学会がユダヤ人会員を、それも非常にいやいやながら、追放した最後の科学会の一つであったと述べている。彼らは Debye の手紙に対する帝国大学教員組合 (国家社会主義者組織) の次の応答を引用している:

「明らかにドイツ物理学会はまだ非常に遅れており、彼らの愛しいユダヤ人に強い愛着を覚えている。“我々の制御できない事情のために”のみ、ユダヤ人の会員権をもはや維持できないというのは実際異常である。」

2006年5月、Rispen の本の序文を書いたオランダ人のノーベル賞受賞者 Martinus Veltman は、その本の Peter Debye に関する記述を否定し、彼の序文を取り下げた。そして Utrecht 大学の理事会に Debye 研究所の名称変更の決定を撤廃するよう頼んだ。

Maastricht 大学の行動に続いて、オランダと米国の双方において、様々な歴史上の調査が行われた。これらの調査の最も早いものは Cornell 大学の化学科および生物化学科で行われた。2006年5月31日に発表された Cornell の調査報告は次のように述べている:

「今までのところ情報に基いて、我々は、Debye が Nazi 同調者や協力者であったとか、彼が反ユダヤ主義の見解を持っていたという告発を支持する証拠を見出せなかった。これらは最も深刻な申し立てであるので、このことは明確に述べておくことが大事である。」

続いて次のように宣言している:

「それ故、現在まで知られている情報、証拠、歴史的記録に基いて、我々は、Cornell における化学・化学生物学科から Debye の名を引き離すどのような行為も是認されない、と信じる。」

2006年6月、(前)Debye 研究所の科学ディレクターが Debye の戦争の年月についての新しい出版をし、それが研究所の名称問題に関してあまりにも個人的に歪めたものであるということで、Utrecht 大学の理事会によって譴責されたことが報じられた。理事会によれば、その本は Debye 研究所の出版物としてではなく、個人的なものとして出版すべきであった。その本は Utrecht 大学によって禁止され、(前)Debye 研究所の二人のディ

レクターは出版社とのどのような接触も禁じられた。

2007年5月、Utrecht 大学と Maastricht 大学は、Jan Terlow を委員長とする新しい委員会が名称変更について大学に勧告をするだろうと発表した。また、2007年の初めに、公式の報告が NIOD によって出版され、オランダ教育省によって公認されることを発表した(2007年秋が計画されていた)。

#### 「2007年 NIOD 報告」

2007年11月27日に、Debye と第三帝国 (Hitler のドイツ帝国) との関係について、Martijn Eicknoff を著者とする「科学の名において？」と題する報告が出版された。

その報告は、Rispen が、Nazis に対して不服を持たなかった日和見主義者として Debye を表現しているのは風刺漫画である、と記し、1933年から1945年の Debye の行動は、物理学の研究を人類に福音をもたらすものと見た科学に対する19世紀の正方向の見方に基いたものであったと、結論している。その報告は、Debye が同時代人の何人かには日和見主義者と考えられ、他の人には高潔な人間と見られていたと述べている。報告は、Debye が Nazis に脅迫されて悪名高い *Heil Hitler* 付きの手紙を書いたのではなく、また、そうすることを他の学会の先例に随ったものでもなく、むしろ他の学会が彼の先例に倣った、と主張している。NIOD の報告もまた、Debye は手紙を送ることを強いられていると感じており、それは単に存在している状況を確認するだけのことだったと結論している。報告は、第三帝国において Debye は、政治的動乱に拘わらず、科学的経歴を追及しようとするあいまいな生き残り法をとったと議論している。この生き残り法にとって決定的なことは、例えば1941年の Nazis との秘密の取引におけるように、必要なら使うように逃げ口の用意を確保しておくことであった。

#### 「2008年 Terlow 報告」

2008年1月、Terlow 委員会は Utrecht 大学に化学と物理学の研究所に Peter Debye の名を用い続けるよう、Maastricht 大学に科学賞を授与し続けるよう、それぞれの大学の理事会に薦めた。委員会は、Debye が党のメンバーではなく、反ユダヤ主義者でもなく、Nazi の宣伝もせず、Nazi

の戦争機械に協力もせず、協力者でもなく、ただしまだ、レジスタンスの英雄でもなかったと結論した。彼は実際主義的で、柔軟な、輝かしい科学者で、科学を追及することに関して理想主義的で、ただ表面的に政治に向かっただけだった。ドイツ物理学会の手紙を発送したことに、委員会は Debye がその状況を避けられないと見たものと結論した。委員会は、オランダ王立科学アカデミーもまた Albert Einstein の名誉会員権を剥奪していることを指摘し、これらの決定がなされた事情を強調している。委員会は、70 年も経ってから、Debye が当時おかれた異常に困難な事情のもとでその手紙にサインすると決定したことについてどんな判決も為されるべきでない、と述べた。しかしながら、委員会はドイツ物理学会の手紙は極めて不愉快な事実であって、Debye の人生の歴史に暗いページを作っていると書いている。最後に、委員会は NIOD 報告に基いて、Debye の側に不誠実を示されておらず、彼の誠実が想定されねばならないから、Utrecht 大学にはナノ物質科学の Debye 研究所の名を維持することを、Maastricht 大学には Peter Debye 賞に関与し続けることを薦めた。Utrecht 大学はその薦めを受け入れたが、Maastricht 大学は受け入れなかった。しかし、Peter Debye 賞の創設者でスポンサーである Hustinx 財団が 2008 年 2 月に賞の授与を続けると声明した。Debye の生誕地 Maastricht 市は Debye 通と Debye 広場の名を変える理由はないと宣言した。

## 「科学」

### 「X 線散乱」

1910–1912 年の間 Munich で Ewald と Sommerfeld による結晶を通しての光の透過の研究の進展について学んだ後、von Laue がそのような物質を通しての非常に短い波の透過に如何に興味を持つようになったか、しばしば語られてきた。彼はその理由を、放射光の波長が構造単位間の距離と同じ程度であったとしたら、回折効果が得られるだろうからと説明した。彼は実験的なテストには X 線を使うべきことを示唆した。その結果は、結晶による X 線の回折に対する彼の予測の正しさを強く支持するものであった。この実験の結果として、全く新しい課題、X 線解析が創り出された。

その解析は原理的に単純であると認識されるようになってきたが、詳細な応用においてはある複雑なことがあった。Munich における研究活動をよく知っていた Debye は、その解析が定量的な性格をもつためにはいくつかの改良が必要だろうと、すぐに見て取った。それらのうちの彼の二つの取り扱い、温度効果 (1914) と原子散乱因子の効果 (1915)、は偉大な草分け的な業績の代表である。

これらのうちの最初のものでは、Debye は固体の熱振動の X 線回折パターンへの影響を計算した。有名な結晶固体の熱容量の理論的評価 (1912) での彼の初期の経験がこの努力の中で十分な役に立った。結晶中で熱で誘起された原子の移動はその物質を通して伝播する弾性波であるとして記述できるという、同じアイデアを用いて、彼は X 線構造の振幅因子の温度依存性を表す数式を展開した。導入されたのは Debye もしくは Debye-Waller 温度因子として現在知られている量であった。偶然であるが、この因子は Mössbauer 効果の理解に本質的なものである。

X 線解析で議論された二つの改良の 2 番目、原子散乱因子の考慮は構想決定において致命的に重要である。解析のために、観測されたスペクトル強度は、構造要素の電子配置を仮定して計算した結果と比較される。その計算には、原子散乱因子の知識、散乱原子内の干渉効果の結果を表す量が必要である。

異なる種類とサイズの原子の X 線に対する散乱能は変化する。更に、核を取り巻く電子雲の違った部分から散乱された波は、観測方向での位相差をもって回折するだろう。それ故、全振幅は散乱角と原子の周りの電子密度の関数になる。計算するべき量、原子散乱因子は実際の振幅と、同じ実験条件の下で単一の Thomson 電子によって生じるであろうものとの比として定義される。

Debye はこれらのいくつかの要因を定量的に取り入れることができた (1915)。彼は、散乱角が大きくなるにつれてこれらの位相差が大きくなり、有効な散乱単位数は少なくなることを示した。散乱因子  $f$  は、今や、原子中の全電子数よりも小さい量である。この因子は  $\sin \theta / \lambda$  の関数になるということで、入射光の波長  $\lambda$  に依存する。ここで、 $\theta$  は回折の Bragg 角である。例えば、Debye は、核の周りの円形軌道に配置された電子を持つ Bohr 原子に期待される回折 X 線強度の分布曲線を描くことができた。

Debye が、どのような状態の物質中でも原子や分子の完全に無秩序な配置は見られないし、また、X 線の回折に対して完全な結晶化は必要でないという、結論を記録したのは 1915 年のこの時であった。この有名な論文 (1915) の中で、気体中でさえ原子の秩序は完全にはランダムではないと指摘している。この観察は、気体、液体、無定形固体による X 線散乱に関係した Debye の一連の実験的研究の始まりであった。そのような系では回折角に対する回折強度の曲線は広い極大と極小を示すであろう。しかしながら、Scherrer と行った Debye の最初の実験的テスト (1916) は予期せぬ結果を生み出した。テスト物質は細かい弗化リチウムの粉末であったが、観測された X 線回折パターンは結晶格子による回折独特の鋭い斑点から成っていた。鋭い円環ができることは、ランダムな向きの結晶からの連続した円錐状光線の写真乾板上の切り口によるものとして正しく説明された。新しい有用な X 線解析の方法、粉末法が発見されたのはこのようにしてであった。

Debye は研究で X 線光学に固執した。少し後の論文 (1925) で、彼の考えは洗練され、拡張され、纏められた。彼は、物理的な状態に拘わらず、原子、分子の構造の言葉で解釈できる回折効果を観測することができるだろうことを再確認した。もっと断定的に云うと、その考えは、次のように云える：任意の与えられた原子の隣接する原子に関する一つの配置は他の配置より確率が高いだろう；それ故、物質の状態に拘わらず、X 線解析によって原子配置についての情報を得ることは可能だろう。X 線に曝された液体では、少数の幅広くぼやけたハローが散乱で生成する。二つの要因がこれらのハローの輪廓を決定する。Debye は初めはそれらを内部 (inner) 干渉および外部 (outer) 干渉と呼んだ。前者は同じ分子に属する原子による散乱波の間の干渉であり、後者は分子間の干渉に由来するものと考えた。今や、この区別は一般に為されてはいない。

分子構造を決定する場合、系を稀釈すれば、気体におけるように、「外部」干渉は消えるだろうと云える。そのようにして、数学的解析と解釈は大きく単純化されだろう。気体による散乱の強度因子  $I$  は平均的なもので、よく知られた Debye の式

$$I = k \sum_1^n \sum_1^n f_i f_j \frac{\sin x_{ij}}{x_{ij}} \quad (2.1)$$

で表される。ここで、 $x_{ij}$  は原子  $i$  から原子  $j$  への距離  $l_{ij}$  に比例し、 $f_i$  と  $f_j$  はそれらの原子散乱因子である。和は  $i = j$  も含んでおり、 $n$  個の原子から成る分子に対して書かれている。いる。散乱角  $2\theta$ 、入射光波長  $\lambda$  に対して

$$x_{ij} = 4\pi l_{ij} \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad (2.2)$$

である。

それ故、散乱曲線は分子中の原子間の距離の数だけの個々の曲線から構成される。そのような個々の距離は散乱角が大きくなるにつれて増えたり減ったりする強度を造りだす。原子  $i$  と  $j$  の距離の持つ重みは散乱因子  $f_i$  と  $f_j$  の積で与えられる。

Debye の実験室からの最初の気体の実験結果が Leipzig(1929) から報告された。考えは正しかった: X 線の散乱による干渉リングが最も単純な分子からでさえ造り出された。例えば、リングに対する光度計の記録から、四塩化炭素中の塩素-塩素の原子間距離が正確に決定された。この分子のモデルは正四面体と取られているから、この一つだけの距離で分子構造を決定するのに十分である。類似の研究のより決定的で拡張された説明が、他の分子に広げて、翌年 (1930) 現れた。

気体による X 線の散乱を記述する Debye の式が、気体による電子線の散乱を記述するのもにも応用できることを示す研究の予備的な論文を H. F. Mark と R. Wierl が提出したのはこの時 (1930) であった。物理的には一つ違いがある。電子の干渉は原子核の位置に関する情報を与えるのに対し、X 線の干渉はそれらの周りの電子雲の重心の位置を明らかにする。どちらの場合でも実際に確かめられるのは、望む量である原子の中心の位置である。

.....

気体構造の研究と同時に、Debye は Menke とともに X 線回折による液体の内部構造を決定する実験研究を進めた (1930)。散乱パターンは今や二つの干渉現象、分子内と分子間の部分、の重ね合わせを表す。これらの二つの部分を分離することができれば液体の構造に関する結論を引き出す

ことができるようになるだろうということが議論された。単原子液体である水銀が適切なテスト物質として選ばれた。この選択では、内部効果と外部効果の分離が可能になる。散乱パターンへの寄与の分離は達成され、F. Zernike と J. A. Prins によって既に出されていた (1927) 型の解析を用いて液体中の分子を特定の距離に見出す確率を表す分布関数を計算することができた。水銀に対するこの分布関数曲線は液体中でさえも準結晶状態があると見られることを示した。クラスター化という言葉が一般的なこの型の短距離秩序の状態に対して適用されてきた。この単語は、他の Debye の議論、特に電解質溶液の振る舞いの基礎となる原理の記述、臨界状態の取り扱いの中でも用いられている。

このようにして、無定形と結晶状態の間に絶対的に際立った区別はないことが証明された。

#### 「双極子能率」

大抵の分子が永久双極子能率を持っているのは非対称な (電氣的) 構造の結果としてである。この特性量の大きさは分子の分極の定量的な尺度である。双極子能率の実用単位は  $1 \times 10^{-18}$  e.s.u で、一般的に “debye” (記号 D) で知られている。

この課題での Debye の元々の論文 (1912、1913) が現れてから 60 年経った後でも、分子の双極子能率の測定と解釈は衰えずに続いている。二つの論文のうち、一つは静電場中の誘電体の振る舞いの問題に向けられたもので、他方は電場が時間とともに正弦的に振動している場合に対するものである。それらを教えることの完全な意味はすぐには化学の団体には認められなかった。その報告は物理学の課題を扱う学術誌に現れた。それらは数学的な性格のものであった。状況は Debye による二つのもっと長い論説の出現で変わった。その一つは Marx *Handbuch der Radiologie* (1925) 中の有名な論文であり、もう一つは 1927 年の初めに Wisconsin 大学で行われた講義の記録で、後に (1929) 極性分子 (Polar Molecules) という題で出版された。これらの出版物中で、素材は豊富で、壮大に纏められ、組み立てられており、すぐに物理学者達の注意を惹いた。彼らは彼らの関心を化学の友人に伝えた。合衆国では K. T. Compton と R. C. Tolman の二人の教授がこの面で大きな影響をもった。

.....

Debye は、常磁性分子の永久磁気能率に対する配向の Langevin の統計理論を、電気の場合の取り扱いに利用した。そうすることにおいて、彼は物質が電氣的な電荷単位を積み重ねているという事実を認定した。1912 年より前に、アンモニアや水など多くの分子が異常に高い電気感受性を持っているが、それに対する説明がないことが認識されていた。磁気の問題との類似で、Debye はその理由は、それらの非対称な分子が有限の永久電気モーメントを持っているに違いなく、それらの全電気分極は分子中の原子と電子のずれと電場における分子全体の配向との二つの寄与からなる、ことによっていると説明した。どんな場合の現実の応用においても、これらの分極のそれぞれを定量的に評価するには手段を工夫する必要がある。低圧の極性気体あるいは(少し不正確であるが)無極性溶媒中の極性物質の稀薄溶液に適用できるもう一つのよく知られた Debye の式が双極子能率  $\mu$  を計算する手段をもたらしている:

$$P = \frac{4\pi}{3} N \left( \alpha + \frac{\mu^2}{3kT} \right) \quad (2.3)$$

Debye が分子分極と呼んだ量  $P$  は誘電率と密度を含む Clausius-Mossotti の式を用いて実験的に評価される。式中の  $\alpha$  は電場が課されたときの分子における電子と原子の分極の効果の和で、温度にはよらない定数である。量  $\mu^2/3kT$  は分子当りの配向分極を表す。この式は  $P$  対  $1/T$  のプロットが直線になることを示している。その直線の傾きから分子の双極子能率が計算できる。

発端の時点から、双極子能率は分子構造の主要な情報源であった。

$P$  対  $1/T$  のプロットが直線にならず、上に凸の曲線になる分子がある。この結果は分子の双極子能率が温度に独立ではないことを示しており、極性基の分子内回転によって説明できる。そのような効果は、比較的小さい分子から、例えば  $-C-C-$  結合を持つランダムコイル状高分子までの全てに観測される。そのような結合周りの内部回転を持つ分子に対してある温度で観測された双極子能率に対する特定の値は、それ故、全ての可能な回転についての平方根平均二乗平均値である。

例えば 1,2ジクロロエタンの場合、 $-C-C-$  結合の回りでの二つの  $-CH_2Cl$  基の回転が起こる。この場合、その回転は自由回転というよりも束縛回転である。二つの Cl 原子が最も離れた *trans* 型を取るとき分子の配位は対称中心を持っており、その配置では双極子能率は 0 である。他のどんな配位でも、双極子能率は有限で内部回転の角が大きくなるほど大きくなる：方位角が  $180^\circ$  の *cis* 型のとき、それは最大値に達する。3 番目の回転状態、*gauche* 型では、方位角  $\Phi$  は  $\Phi = \pm 120^\circ$  である。これら 3 つの回転状態は分子の揺れ動いている型を表し、特徴づけるのに役立つ。このようにして、それぞれの状態の占有の分率と相対的なポテンシャルエネルギーを計算することが可能になる。

Debye は F. Bueche とともにこの比較的単純な内部回転の考えを有機高分子系に適用した (1951)。後で示すように、光散乱測定から溶液中のコイル状高分子の平均サイズの情報を得ることができる。しかし、その実験で得られる平均のコイル径は通常、同じ分子量のランダムコイル分子に対する計算値や、モノマー構造単位を繋ぐ結合の回りに自由回転を持たせて計算した値よりずっと大きい。その差はこれらの結合回りの回転の制限に帰せられ、その効果を取り込むモデルが工夫されてきた。

双極子能率の研究で確立された自由な非束縛回転に出くわす場合があることを述べておくべきだろう。高分子化学で興味のある例は  $\omega$ -ヒドロキシデカン酸エステル ( $\omega$ -hydroxydecanoic acid ester) の例である。その結果、Debye の双極子理論の実際的勝利である解釈、が高分子化学者によるランダムコイルモデルの一般的な使用に対して初期の豊かな正当化を与えた。

電場中 (今度は交番電場) の極性分子の配向の概念は、Debye によって、観測される実数と虚数の二つの誘電定数の振る舞いの説明に応用された (1913)。基礎となる原理は、場が課された時、あるいは除かれた時、分子の回転運動に対する粘性抵抗があるために、分子が平衡の向きにくるまでに有限の時間が必要になるということである。実数の誘電定数が変化する周波数範囲は静電場 (周波数 0) から、極性分子のどんな回転運動も全くできないほど速く振動している周波数まで広がっている。それ故、その理論は典型的な分子の緩和過程を記述している。それに伴う緩和時間と呼ばれる定数は、実数の誘電定数かあるいは系のエネルギー吸収の周波数変化の

測定から手に入れることができる。溶液中の場合には、この時間定数は分子の形とサイズに関係づけることができる。

周波数依存性の問題に関連した議論と式は電気工学でも関心をもたれるだろう。Debye 理論の一つの困難はそれが分子サイズや媒体の内部摩擦の言葉で書かれていることである。その理論は、分子的機構を全く述べることなく、物質の不均一性に基いた Wagner のもう一つの説明と全く同じ数学的形の式を与えている。Debye のモデルについて何も曖昧さはなく、電気的な絶縁体の分子挙動を探求しようとする人に訴えるところは大きい。

### 「電解質」

1920 年代の初めに物理化学が教えられていたとき、その主要な分野の一つは電解質溶液の電氣的挙動の記述であった。しかしこの特別な分野で、人々は多くの困惑する状況に出くわした。全体として、それを考えることは教師にとっても学生にとっても満足する経験ではなかった。明らかに新しい考えが必要であった。Debye はそれを与えることはできなかつたけれども、彼は一つの新しい仮説を有効で実用的な仕事の道具に移すことに大きな成功を成し遂げた。

特に基本的な問題があった：弱電解質（有機の酸と塩基）の平衡状態と輸送過程の性質の研究への応用で成功した Arrhenius と van't Hoff の単純な法則が、強電解質（塩、ある種の無機の酸と塩基）の溶液に対する同じ種類のデータを説明するのに適用されると完全に失敗した。後者では、出発点の質量作用の法則は広範な実験結果と明らかに矛盾していた。答えは、強電解質は水に溶かしたとき、完全に解離するという仮定のなかに見出された。この描像は他の人、特に Bjerrum と Sutherland によって考えられた。それを用いて、S. R. Milner は電解質の浸透圧を実際に計算した。確かに、Milner の解析は原理的に熱力学の問題の一つの解であるが、その結果が図上の実際的でない方法で表さねばならないという実質的な数学的困難が残っていた。

平衡の性質の取り扱いについて、Debye と Hückel はもう一つの数学的やり方を選んだ（1923）。結果は定量的な式で出され、稀薄な強電解質水溶液の凝固点降下に単純かつ直接的に適用でき、データと関連付けることができた。古典的理論では、イオンは独立に活動する単位として取り扱

われる。新しい解析では、溶液挙動に見られる非理想性の基本的原因であると証明されたのはイオン間に働く静電力であった。ここから、「イオン間引力理論」という言葉が与えられた。実際、十分稀薄な電解質溶液に対して、Debye と Hückel が実験に先立って、水溶液中の与えられたイオン強度 (電解質濃度) での異なる原子価の型の塩に対する浸透圧、凝固点降下などを計算することが可能になった。稀薄溶液の振る舞いに絞ったことは、さもなければ非常に複雑な数学的問題を容易なものにした。

その議論は Maxwell-Boltzmann 統計とともによく知られた静電気の法則を応用することに基くものであった。イオンは球対称に広がる電荷を持つ、同じ径の球と考えられた。溶媒は溶質のイオンの添加によって変わらない一様な誘電率の媒体だった。

溶液中のイオンは無秩序な熱運動をしていると期待できる。しかし、それらが持つ電荷のために、時間平均すると、着目する個々のイオンの周りの隣接する小さい体積要素には同符号のイオンよりも反対符号のイオンの方がより多く存在するだろう。結果として、系のなかに完全に規則的ではなく、完全にランダムでもない構造が存在する。それ故、各イオンは全ての他のイオンによる平均すると正味の静電引力をうけており、その結果クラスタ化が生じる。この引力の大きさはイオンの電荷とそれらの間の平均距離との積 (したがって、溶液の濃度) の函数である。溶液中で任意に選んだ中心イオンのポテンシャルエネルギーは、そのイオンの電荷が 0 のとき持つであろうエネルギーに比べて低くなる。イオンの引力と斥力の大きさは Coulomb の法則で表され、強電解質の稀薄溶液の実験で観測された平衡および輸送の振る舞いに対する濃度の平方根挙動の事実が、最終的に導かれる。

この理論で最初に決定されたのは中心イオンの周りのイオン雰囲気的最確分布であった。それから、与えられた一つのイオンの他の全てのイオンの存在による平均の電気ポテンシャルが計算された。その計算は、ポテンシャルを平均の電荷密度に関係づける Poisson の微分方程式と Boltzmann 分布の理論の組み合わせを含んだものであった。ずっと後のコメントの原因となったのは、数学的問題の単純化に役立つためにここで導入した近似であった。確かに、それらの近似は理論の適用を稀薄水溶液に制限している。

このポテンシャルの知識で、静電相互作用による過剰自由エネルギーが計算された。それは溶液の非理想性のいくつかの尺度、例えば凝固点降下のデータからの浸透圧係数、より簡単には、活量係数と関係づけられる。

今日の共通した使用法では、求められるのは活量係数である。Debye は拙速に浸透係数への使用の利点を評価していた (1924)。彼は Hückel との前の表式 (1923) が、活量係数の言葉で書けば大きく簡単化できることに気づいた。現代の物理化学の教科書で殆ど普遍的に再現されているのはこの熱力学の極限則に対する 2 番目の導出と同等のものである。この論文の題名は「稀薄強電解質の浸透状態方程式と活量」である。この報告の序文に次のように書かれている: 「そのうえ、私はそうしているうちに、G. N. Lewis が純粋に実験的方法で発見した強電解質の活量に関するいくつかの法則を偶然見つけた。私はそれらの繊細な観測の特別な重要性を強調する機会を持つことができ嬉しい。Lewis の法則がここに提案する理論で非常に用意に説明できるから、なおさらそうである。」

電気伝導度に対する特に難しい輸送問題は Debye-Hückel の理論的取り扱いの 2 番目の課題だった。Arrhenius 理論の基にして、電解質濃度による等価電気伝導度の変化は電流の運び手である相対的イオン数の変化で、すなわち、濃度の函数として、質量作用の法則で、説明されていた。この説明は弱電解質に対する良い近似として正しいものであったが、強電解質に対して Kohlrausch やその他が既にも実験的に発見していた濃度の増加とともに等価電導度が濃度の平方根で減少するということを説明できなかった。ここで、等価な電解質当りの電気の運び手の数は稀薄溶液では実質的に一定にとどまる: 電解質濃度の増加とともに減少するのはイオンの易動度である。これはイオン間の引力の効果である。今や議論の焦点はイオン雰囲気の中の二つの性質、緩和時間効果と電気泳動効果とになった。今度は絶対値を計算することはできなかったが、Debye と Hückel は極原則として、塩濃度の増加とともに進行する二つのイオン易動度の減少がそれぞれ等価濃度の平方根に比例することを示すことができた。Debye と Hückel は輸送問題の最初の取り扱いで、電場中で移動する時間の間でのイオンの Brown 運動の効果を完全には取り入れなかった。必要な修正は L. Onsager によって与えられた。今日それらを合せて Debye-Hückel-Onsager 理論と呼ばれる。

これらの論文の出現で、電解質を含む系の取り扱いに全く新しい時代が始まった。Debye 自身はこの課題の新しい領域に気づき続け、彼の習慣的な冷静さでそれらを処理し続けた。基本的発見の出版に続いてすぐに、彼は、強電解質の活量係数に対する彼の単純な極限則が、共通のイオンを持たない塩の溶液への添加によって引き起こされる難溶性の塩の溶解度の変化の説明に直接適用できることを、詳細に示した (1923)。 $\log s/s_0$  対イオン強度の平方根は直線になり、 $\log s/s_0$  が難溶性塩に対する  $-\log \gamma_{\pm}$  の直接的な尺度になる。ここで、 $s$  と  $s_0$  はそれぞれ添加電解質があるときとないときに飽和している塩の溶解度であり、 $\gamma_{\pm}$  はその平均活量係数である。

塩析効果の二つの論文 (1925, 1927) で、Debye は、塩の添加による飽和水溶液からの有機溶質の分離がイオンにより運ばれる局所化した電荷で造り出された不均一な電場の結果であることを示した。再び、この説明は他の力の存在の事実を考慮していない。特に、このなかでの扱いはもはや稀薄溶液ではない。

輸送問題の更なる取り扱い (1928) で、Debye と Falkenhagen は、イオン雰囲気緩和時間は有限であるために強電解質溶液の電気伝導度には周波数依存性があるに違いないと説明した。更に、測定で高い電場強度が課されたときの Ohm の法則からのずれの Wien の観測は周波数依存性の問題と関連付けられることを示した。実験を行うのは難しいけれども、電導度の電場周波数依存性についての詳細な予言は後に直接の実験で確かめられた。Debye モデルは電導度の挙動を説明するだけでなく、稀薄電解質溶液の拡散、粘度などのような他の輸送問題を扱うのに十分に確立された。

イオン間引力理論を表す Debye の論文はいくつかの関連分野における研究の方向に深遠な影響を与えた。そのうちの二つは以下のものである:

1. イオン反応の速度は系に塩を添加することで変えられる。これらの効果は一般に塩の直接的な作用ではない: それらはむしろ反応の速度定数に影響するイオン間の静電力によるものである。
2. タンパク質物理化学者の文献の中に、典型的な平衡ならびに輸送実験のデータを解釈する際の多くの混乱があった。用いられる系は伝統的に水、タンパク質、塩から成るもので、3成分系であり、詳細

な数学的解釈を要するものであった。支持電解質と呼ばれる過剰の塩の添加という最も単純な便宜の方策によって、高分子への電荷の影響は大いに抑えられ、問題の複雑さは中性分子の2成分系の解析に出くわす程度まで減じられる。E. F. Casassa と H. Eisenberg はそのような系の浸透圧、光散乱、沈降平衡の関係して、この問題を議論している。

### 「光散乱」

Debye の最後の期間は Cornell 大学に着いた 1940 年に始まった。今や Debye は彼の才能を高分子とコロイド化学に適用し、直ちにそれらの研究に新しい考えと方法を提供し始めた。中心の課題は再び放射と物質の相互作用であった。彼は、ちょうど X 線の波長が結晶中の原子のサイズと同程度であるように、光線の波長は高分子やコロイド粒子の大きさと同じ程度であることに気づいていた。その結果として、我々は文献中に、光散乱実験が高分子のサイズ、回転半径やランダムコイル配位を採っているときの両端間距離の言葉で解釈できる理論的解析を見出す。

溶液からの光散乱に対する 2 種類の数学的解析、H. Herz の振動双極子理論と von Smoluchowski と A. Einstein の密度揺らぎ理論のうち、後者は最も一般的に適用できる。

基本量は以下のように一般的な形の指数則で書かれる濁度  $\tau$  である：

$$I = I_0 e^{-\tau r} \quad (2.4)$$

この式は振動双極子理論を源にしている。式中、 $I$  と  $I_0$  はそれぞれ、散乱光と入射光の強度であり、 $r$  は散乱中心から観測点までの距離である。濁度はそれ故  $\text{cm}^{-1}$  の単位をもつ消光係数である。実験量を用いるとそれは次式のように書ける：

$$\tau = \frac{32\pi^3}{3} \frac{\nu}{\lambda^4} \left( \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dc} \right) \quad (2.5)$$

この式は著名な Rayleigh 散乱因子  $(\lambda^4)^{-1}$  を含んでいることが解る。 $\nu$  は  $\text{cm}^3$  当りの高分子の数で、 $cN/M$  に等しい。分子量  $M$  を用いると、 $\tau = HMc$  となる。濃度  $c$  は溶液  $\text{cm}^3$  当りの溶質の重量、 $H$  は  $(\lambda^4)^{-1}$  を含むよく知られた光散乱定数、 $dn/dc$  は屈折率増分である。

揺らぎの理論は溶解している物質の過剰散乱を計算するのに有利に用いることができる。浸透圧と光散乱との Einstein の関係から、Debye は、単色光の波長と比較して小さいサイズの中性高分子の 2 成分非理想溶液に対して、溶質濃度 ( $c$ ) の函数として光散乱挙動を記述する一般式を得た:

$$\frac{Hc}{\tau} = \frac{1}{M} + 2Bc \quad (2.6)$$

ただし、 $B$  は浸透圧の第 2 ビリアル係数である。

より大きい屈曲性高分子に見られる光の分子内干渉で、状況はより複雑になる: そこでは、粒子散乱因子が本質的作業方程式に導入されねばならない。X 線解析における原子散乱因子についての Debye の古典的な独自の研究が、ここで入ってくる光散乱の角度非対称性を、粒子の形状に関係づける方法を彼に示した。粒子散乱因子は、サイズパラメータ、散乱角、および波長依存性を含んでいる。

光散乱の Einstein と Rayleigh の式の、溶液中の高分子の分子サイズの決定への応用は Debye から始まったのではない。より早い P. Putzeys と J. Brosteaux および S. D. Gehman と J. E. Field の寄与がある。Debye は彼らの論文を参照している。しかし、典型的なことであるが、Debye は彼らの方法を実用的なものにはしなかった。Debye の発表が現れるとすぐに、有機高分子化学の爆発的な発展が始まった。

更に、光散乱法は珪酸塩や石鹸ミセルのような他の型の系へも適用された。1948–1951 年に発表された一連の興味ある論文で、Debye は何人かの共同研究者とともに、その方法を用いてパラフィン鎖の塩の溶液中でのミセル形成を調べた。目的はミセルが構成されている基本単位の数、およびミセルが全て似たサイズを持っているかどうかを決定することであった。また、もう一つはミセル形成の機構を表すことであった。

1949 年文献に現れたミセル形成の Debye 理論に対する二つの説明のうち、*the New York Academy of Sciences* の論文はより完全である。しかし、Debye はその問題の取り扱いで深刻な誤りを犯していると、L. Reich と Y. Ooshika の二人が信じていることを述べておかねばならない。二人の批判は一致しており、安定なミセルサイズは、Debye が仮定したように個々のミセルに対する自由エネルギーより、系全体に対する自由エネルギーが極小になることからでてくる結果であるとしている。

科学人生の最後の期間に Debye は臨界蛋白光の現象に興味を持ち、その課題について広く熱狂的に講義した。ある状況下で、低分子は光の波長に相当するサイズの会合体を形成することがある。再び、典型的なクラスター化の現象である。そのような系からの光散乱の研究は分子の最近接距離の情報を与え、それは分子の相互作用の範囲の目安と採れる。しかし、ここでは Debye の仕事は完全には実現せず、完全にはではないが、L. S. Ornstein と F. Zernike によって殆ど予測されていたものであった。この距離を確認する彼らの分布函数は Debye が用いたものであった。彼らの研究は臨界領域における密度揺らぎに関わっていた：論文の題目は「単一物質の臨界点における密度の偶然のずれと蛋白光」である。8年ほどの間における一連の論文で、これらの著者は、臨界状態での分子のクラスター化傾向と結果として起こる蛋白光に関する問題の様々な面の理論展開を続けた。

#### 「その他」

Debye は多方面の研究を行っており、上述の他にも有名なものがある。少しだけ挙げる：

- 1912 年、固体の比熱に関して、(エネルギー等分配則から導かれる)Dulong-Petit の法則が極低温で破れることを説明する Debye の比熱理論を発表した。
- 1926 年、絶対零度に向かう断熱消磁法に関する論文「定温における磁化についてのいくつかの注釈」を出した。
- 1948 年には、F. Bueche とともに高分子の固有粘度、拡散および沈降速度の理論を発表している。



図 2.10 Paul John Flory (1910/6/19–1985/9/8)

### 2.3 Paul John Flory

Flory は年 6 月 19 日米国 Illinois 州 Sterling で生まれた。<sup>6,7</sup> Flory のピューリタン (清教徒) の信条は彼の背景から生まれてきている。Flory 一家の故郷 (roots) は Alsace、それから英国、後に Pennsylvania、それから Ohio へと遡って辿ることができる。Flory は特にユグノー (Huguenot: フランス新教徒) の血統であることを誇りにしていたように見える。彼の父 Ezra Flory は Brethren 教会、幾分クウェーカー教徒に似た派 (sect)、の牧師だった。彼が異なる教区に任命される度、一家はしばしば引っ越した。Ezra は Emma Brumbaugh と結婚して二人の娘 Margaret と Miriam を得た。Emma は出産で亡くなり、Ezra は彼女の従姉妹 Martha Brumbaugh と再婚して二人の息子を得た。それが James と Paul である。Ohio 州 Dayton (ライト兄弟が初めて飛行機を飛ばした所) 郊外の農地が大統領の下賜で Flory 一家に与えられた。それはまだ一家のものである。

Flory は子供時代かなり虚弱で非常におませであった。彼はいつも特に

半分の姉 (half-sister) Margaret にまわりついていて、彼女はまた、彼の6年生の教師だった。彼女は彼の能力を認め、彼にさらに教育を受けさせることに熱心だった。彼は成熟するにつれ、水路掘り、激しい水泳、山登りのような活動を通じて肉体を鍛えることに精励した。彼は元気いっぴいの強い男になった。彼は、強力な心臓発作で死ぬ前、それほど永くない水泳で疲れに悩まされ始めたときでさえ、定期的な健康診断を受けることにいつも断固として反抗した。

1927年 Flory は Illinois 州 Eigen の Eigen 高校を卒業し、大恐慌の間だったが、Indiana 州の Manchester 大学 (college) に入った。彼は様々な仕事で自活しながら3年で1931年に卒業して学士号を得た。彼が科学、特に化学に関心を持ったのは Carl W. Holl 教授に鼓舞された Manchester 大学に於いてであった。教授は Flory に Ohio 州立大学の大学院に入るよう激励した。Ohio 州立大学の初年度、彼は溝堀や Kelvinator 社での労働で自活し、最初は Cecil E. Boord 教授の下で有機化学の修士のプログラムを推し進めた。2年次、彼は物理化学の方を選ぶことを決め、学位論文の指導者 Herrick L. Johnston 教授の実験助手になった。Flory は彼を、学生達に印象を与え続けた科学研究への限りない情熱を持った人と描いている。一方、当時の仲間の大学院生は、Johnston と Flory は見解が全く同じではなかったと回想している。

Flory は落ち着いた無き人物で、現状に満足することは無かった。彼は常に彼と彼の同僚の科学的興味が花開きうるより良い場所と条件を捜し求めていた。大学院の後、1934年に彼は DuPont 社に入った、4年後の1938年、彼はそこを去り、Cincinnati 大学の基礎研究所に加わった。第二次世界大戦に引き起こされた合成ゴム開発の緊急性が Standard 石油開発会社の Esso 研究室での工業研究へ (1940–1943)、それから Goodyear タイヤ会社の研究所へ (1943–1948) 彼を引き戻した。1948年、彼は Cornell 大学の教授を受け入れた、そこで彼は9年間かなり満足していた。それから1957年に彼は基礎研究の広範なプログラムを確立するように Pittsburgh の Mellon 研究所に誘われた。彼の指導の下でこの企画は数年間の間、経営のトップがその計画に興味を失い始めるまでは成功していた。1961年、彼は Stanford 大学の教授を受け入れた、彼は1985年に死去するまでそこに留まった。



図 2.11 Thomas G Fox (1921–1977)

1934年に始まって Flory は高分子物質の物理化学の主要な問題の殆どを取り扱った。それらの中には、重合の動力学と機構、分子量分布、溶液熱力学と流体力学、熔融粘度、ガラス形成、結晶化、鎖のコンフォメーション、ゴム弾性、液晶がある。論文は 300 報以上出版されている。

彼の永い間の友人で共同研究者であった Thomas G Fox は Flory の研究の特殊な性格を述べている：

「彼の成功の秘密は、問題の物理的本質を掴む比類ない直感である。その問題のもともとの表現から要求される程度には正しい結果を生み出す真っ直ぐな取り扱いに馴染む単純なモデルで現象を目に見えるようにする。その結果、読者にとって教育的な、理解しやすい、直接有用な方法で、Flory の概念と結果は提供される。基礎的な高分子科学の研究をしている人々に対しても、工業的な応用に関心を持つ人々に対しても、これは等しく真実である。」

工業界においても学問の世界においても仕事が殆ど手に入らなかった大恐慌の真っ盛りの時期 1934 年に、Flory は DuPont 社に地位を提供された。彼は偉大な Wallace H. Carothers の直接の下で研究するよう割り当てられたことで特別幸運だった。Carothers は、高分子概念の固い基盤の確立への貢献で、Hermann Staudinger のライバルだった。Flory は、例えばエチレングリコールとコハク酸とのエステル化のような、2 官能の試薬を含む最も単純で最も確立された反応を研究することを選んだ。そのよ

うにして作られた縮合高分子は異なる長さの鎖状高分子から成ることが明らかになってきた。そこで Carothers が Flory に当てがった問題はその分布の数学的理論を開発することだった。この研究がスタートした時、ある与えられた種類の官能基の反応性は、それが大きい分子上にあったとしたら、抑えられるということが一般に想定されていた。単なるサイズそれ自体は限界の無い鎖の成長を塞ぐ機能失陥を与えると考えられていた。これはその時広まっていた 2 分子化学動力学の衝突理論に基いた結論だった。Flory は分布の問題の真っ直ぐな統計処理を組み立てる際、与えられた溶媒、温度、圧力、濃度の下における反応性は本質的に局所構造のみの函数であって分子全体のサイズの函数ではないという反対の見解を採った。彼は、増大するサイズは分子の並進運動性を減じるだろう、しかしそれは反応物間の接触の持続期間を増加させることで補償されるだろうと議論した。当時良い実験情報は乏しかった。しかし続く数年間で、彼は自分自身の手で、彼の見解を支える動力学データの多くを出した。結果としての分布の式はそれほど単純ではなかった。 $x$  結合を持つ鎖の数は  $x$  とともに指数函数で減少する。Flory が名付けたこの“最確分布”はしばしば実際の高分子生成物を記述する標準となっている。1936 年に出版された時、鎖長分布の直接の測定は面倒くさくて不正確なものであった。しかし今日、それはゲル排除クロマトグラフィー (GPC) 法で日常的に観測されている。

DuPont にいた年月、Flory は重合反応の理解へのもう一つの基本的な寄与をした。オレフィンの重合動力学を総説した論文で、Flory は連鎖移動として知られる段階を含める必要を指摘した、その段階は、それによって活性を持ち、成長する鎖状分子が他の分子の原子を引き抜き、活性部位を移動させてその成長を止めるものである。連鎖移動の実際的な重要性は、第二次世界大戦の全ての米国合成ゴムに対して責任を持つ会社を含めて、多くの工業的重合過程の制御にあった。連鎖移動反応は大抵の重合機構の本質的部分である。1937 年の Carothers の自殺による早過ぎる死の後、Flory は DuPont を去り、Cincinnati 大学へ行った。そこには 1938 年から 1940 年までいた。

線状系についての実験結果を集積し続ける一方、Flory は 3 つ以上の官能基を持つ成分を含むポリエステルに注意を向けた。分枝構造を含むいわ



Wallace H. Carothers

図 2.12 Wallace Hume Carothers (1896/4/27–1937/4/29)

ゆる 3 次元高分子である。この型の一つの例は既によく知られていた商業生産物 “glyptal” でグリセロールとフタル酸無水物から作られる。そのような系は、完全な反応の十分短い段階で流動性が 0 の状態、ゲル点に到達することがよく知られていた。Carothers は、この状態は鎖が巨大な網目を形成しており、無限大の分子量を示すものと正しく結論していた。しかし、彼は簡単な化学量論から適当な指標として数平均分子量を計算した。実際には、数平均分子量がそれほど大きくないかなり早くにゲル点が生じることが見出される。ここで、Flory は分枝高分子は線状高分子に比べてもっと広い分子量分布を持ち、ゲル点は重量平均分子量が発散することに対応することを認識した。彼の以前の論文よりかなり進んだ数学的洗練の特徴を持っている一連の 3 つの論文のなかで、彼はゲル点と完全な分子量分布の定量的理論を展開した。

第二次世界大戦の勃発は合成ゴム開発の緊急性を大きく増大させ、Flory を納得させて工業に復帰させた。Esso 研究所にいた 1940 年から 1943 年の間、彼はそれにも拘らず、高分子物理化学におけるいくつかの非常に基本的な結果を生み出した。John Rehner, Jr., とともに、彼はゴム状網目の有用なモデルとその膨潤現象への応用を展開した。ポリイソブチレン溶液について彼は以前のどの例よりもはるかに大きく非常に広い分子量範囲に亘って個人的に粘度を測定した。そしてそれらが分数指数 0.64 を持つ Houwink- Mark- 櫻田の式に合うことを示した。疑いも無くこれらの年月における彼の突出した業績は、高分子溶液の混合エントロピーに対

する有名な Flory-Huggins 理論 “体積分率式” である。この結果は米国の Maurice L. Huggins および Nazi 占領下のオランダの A. J. Staverman によって独立にかつ同時に得られた。この今や古典となった式は実在気体の van der Waals 状態方程式と類似の役割を演じている。というのは、それは近似ではあるけれども、物理の本質を伝達しており、信頼できる定性的な予測を導くからである。それは実際の挙動と比較する伝統的な標準になっている。彼は後にその取り扱いを任意の複雑さを持つ高分子溶液へと拡張した。

Goodyear 研究所にいた 1943 年から 1948 年の間、Flory の応用高分子科学とのかかわりは最高度に達した。彼は網目の構造欠陥と関係づけてエラストマーの引っ張り強度を研究し、高分子熔融体の粘度やガラス温度を測定した。彼はまた、以前にはよく定義されていなかった分野である高分子の結晶化の熱力学の研究を始めた。彼の理論は結晶化度の温度、分子量、鎖の固さ、高分子の化学的均一性、引っ張り力の下での伸長への依存性を予測した。彼の式から、高分子の融解熱と融解エントロピー、および添加した稀釈剤との熱力学的相互作用パラメータを決定することができた。

1948 年の春、Flory は 1 年間の George Fisher Baker 客員講義をするよう Cornell 大学に、化学教室長であった Debye に招かれた。彼は Ithaca に趣味に合った雰囲気を見出し、その教授会に加わるようにという提供をすぐに受け入れた。

Baker 講師の間に Flory は重要な計画を開始し、それは 1953 年に終わった。Baker 講義を基にした教科書 “*Principles of Polymer Chemistry*” の作成であった。単一の本でこの拡大している分野にこの本ほどの影響を与えた教科書はほとんどない。

Baker 講師をしていた年に思いついた彼の最も偉大な業績は速やかに完成した。いわゆる排除体積効果の活きた理論である。それは、実在の高分子鎖が有効な幅を持っており、それ故自分自身と交錯できないこと、さらにそれらの持つ原子は近接の隣接分子と、それらが同一分子鎖であれ周りの分子であれ、van der Waals 相互作用を受けることを説明する。Werner Kuhn、Huggins、Robert Simha による以前の不完全な議論を越えて、Flory の “平均場” 理論は今でも広く使われている。特別な状況を除

いて、排除体積や他の相互作用の正味の効果は消えない。良溶媒中では、鎖状分子は鎖が長くなるに連れて限界無く増大する正味の摂動を受ける。分子量と有効半径 (光散乱で測定できる平方根平均二乗回転半径) との間の数値的關係は、全ての相互作用が無視できる時に屈曲性鎖に対して成り立たねばならない平方根則からずれる。Flory 理論は半径と分子量を関係づける極限指数  $3/5$  を導く。この値は現代最も良い理論からの  $0.5887$  からそれ程離れてはいない。

Flory の結果は当時 Debye やその他の多くの研究者には歓迎されなかった。平方根則に従う“非摂動”鎖は Brown 運動の理論で既によく知られていた酔歩の法則に正確に従っていたからである。しかし、Flory は非常にしばしば、引力と反撥の相互作用が丁度相殺する特別な温度、Flory は  $\Theta$  温度と言い、他の人は Flory 温度という温度があることを示した。この特別な状態は、不完全気体の Boyle 温度に類似の場合で、浸透圧の第二ビリアル係数が消えることによって認識できる。それはまた、Flory と Krigbaum の集中的な研究の課題だった。

Flory は次に高分子溶液の粘度の解釈の方に向かった。Kirkwood や Debye による以前の理論の特徴である不完全な流体力学遮蔽は無視できることを認識して、彼と Fox は、個々の鎖状分子によって作り出される粘度の増加は排除体積理論で与えられる有効半径の 3 乗に比例すること、そして比例係数はあらゆる溶媒中の全ての鎖状分子に対して本質的に普遍であることを示した。このようにして、存在する膨大なデータから鎖のコンフォメーションについての情報を引き出す特に簡単な方法が用意された。鎖のコンフォメーションは、彼の残りの経歴の中で Flory が特に夢中になった課題の一つである。粘度の問題解決 (breakthrough) のすぐ後、Flory は共同研究者 Mandelkern、Scheraga とともに超遠心機中における沈降速度の同様な取り扱いを生み出し、二つの測定を一緒に行えば、高分子の分子量を引き出すことができることを示した。何年かの間、この方法は生化学者によって専ら用いられた。当時手に入った他の方法に比べて必要な試料の量が少なかったからである。Cornell 時代のもう一つの先駆的な仕事は、サバティカルで英国の Manchester 大学にいた間に、剛直性分子の熱力学的性質に対する理論を創ったことである。Flory はそれを何年も後に液晶の研究へと更に使用を推し進めた。

Flory は数年の間 Mellon 理事会の任務を果たしており、工業界の研究員制度の長期計画を修正して基礎研究に向かうように理事会に強く急ぎ立てていた。理事会の返答は、Flory がその仕事を指導するのに丁度の人間であるということだった。そこで、Flory はその提案を取り上げる義務があると感じた。ただし、条件は研究所のかなりの予算をその目的のために確かに献じるということだった。しかし、数年後、理事会は成し遂げることに失敗し、Flory は 1957 年から 1961 年までただで大学生活に戻ることに決めた。

1961 年 Flory は Stanford 大学に移った。移動前にスタートしていた研究を続け、R. L. Jernigan とその後の Do Yoon の特別な助力で、彼は鎖状分子のコンフォメーションを記述する強力な行列法を展開した。彼はソ連の M. V. Volkenshtein、日本の永井和夫、イスラエルの S. Lifson の仕事を習得しただけでなく、実際それらを凌いで意味深い新しい結果を生み出した。それらは 1969 年の 2 番目の本 *Statistical Mechanics of Chain Molecules* に具体化し、ポリペプチドやポリヌクレオチドを含む様々な高分子に適用された。

Flory はまた、彼の好みの課題の一つ、高分子溶液の熱力学に戻った。Flory-Huggins 理論は捨てられはしなかったが、より多くの努力が混合エンタルピーの詳細の改良に費やされた。Flory によって“状態方程式”項と呼ばれる圧縮率と自由体積の効果が導入された。その取り扱い是非高分子液体混合物にも適用されかなりの成功を収めた。

以前関心があった他の二つの分野も再開された。彼の 1956 年の論文に始まった非等方性溶液の理論が剛直鎖と屈曲性鎖の混合物も扱うように展開された。1943 年に始まったゴム網目の理論は大きく洗練された。鎖のコンフォメーションのエネルギー論の重要な情報源は、排除体積効果が無視されうるとすれば、ゴム状高分子の弾性力の温度依存性である。Flory はこの無視は正当化されるものと見なした。彼自身の言葉は、

「純状態 (bulk state) の鎖状分子はそれ自身と干渉し、膨張することで得るものは何も無い。というのは、自分自身との相互作用の減少は隣接分子との干渉の増大で補償されるだろうからである。」

彼がこう述べた何年も後、Grenoble や Jurich での中性子による研究がそ

れを確認した。重水素と水素の中性子散乱断面積の大きな差を利用して、非稀釈無定形試料中の多くの異なった高分子の平均的大きさが稀薄溶液中におけるそれらの非摂動鎖と同等であることが直接示された。

半結晶性高分子の形態 (morphology) に関する問題が幅広い、いろいろな文献に発生してきた。その問題の主要部分は Flory の生存中には解決されなかった。高分子が稀薄溶液から平板状に結晶化するとき、単結晶が観測され、引き伸ばされた鎖の方向は平板 (lamellar) の面に垂直であることが見出されている。典型的な鎖長はラメラの厚みの 10 倍以上もあるから、鎖はあちこちで何回も折り畳まれねばならない。高分子が純状態 (bulk) で結晶化するときも、ラメラ結晶がしばしば形成される。問題は鎖がすぐ隣の位置で結晶に再び入って行き結晶表面で鋭く折れ曲がるのか、あるいは鎖はある遠く離れたところに再突入口を見つけるまでの無定形領域で大きい環状形態を取るのかということである。後者の“電話のスイッチ板”モデルは Flory と Yoon に強く好まれた。しかし、隣接再突入モデルにも多くの強い有能な支持者があった。全ての事実を調和させるためには、ざっと 50~70% の隣接再突入が起こっているという中間の状況が必要であることが分かってきた。

#### 「William S. Johnson の追想」

私が Flory と初めて接触したのは 1960 年で、私が化学教室の頭として Stanford 大学に移った年だった。私の主な任務は多くの卓越した学者を募集することだった。12月に私は偶然、Paul Flory が Mellon 研究所の職を辞任して、大学生活に復帰することに関心を持っていると聞いた。私は即座に我々の事務部長 Fred Terman に接触し、15分以内で Flory に申し出をする承認を得た。私が会ったこともない Flory に電話した時、彼は他の3つの大学からの申し出についてまもなく決定することになっているので、それに関わるのは遅すぎるだろうと明かした。しかし、いつも新しい冒険に興味があった彼は風雨の強い週末に素早く我々を訪問することに同意した。

手紙の遣り取りの後、Flory は Stanford へ加わることを受け入れた。彼の受諾は我々のプログラムに深遠な効果を持った。その時 Chicago 大学にいて、我々が時々 Stanford 大学へ引き抜こうとしていた Henry Taube が

まもなく我々の好ましい方向に決めた。Taube は書いている:

「果断な性格の Flory は私が決心する前に決心していた。1961 年の彼の Stanford 大学からの申し出を受けるという決定は私自身の決定に影響を与えた。その時まで彼の科学的人気は広く固く確立されており、私は彼と彼の妻 Emily と数回会っていた。全ての因子が、同僚として彼と結びつく強い勧誘として寄与した。」

当時、Flory と Taube は真に卓越した科学者として既に広く認められていた。彼らの助けて、1962 年 Wisconsin 大学からの Gene van Tamelen や 1964 年 California 工科大学 (Caltech) からの Harden McConnell というトップの学者を引き抜くことがかなり容易になった。これらの初期の任命は、Stanford の化学教室の位置の劇的な上昇を招いた。アメリカ教育諮問会議による「大学院教育の質の評価」(American Council on Education, “An Assessment of Quality in Graduate Education”) の 1966 年報告によると、国中で 1957 年の 15 位から 1964 年には 5 位に上がっている。1960 年以来任命された 6 人の新しい教授全てが 1968 年までに国立科学アカデミー (National Academy of Sciences) の会員になった。Flory が Stanford へやってきたことがこの爆発的な一連の出来事の“臨界質量”を象徴した。

1961 年夏に Flory と家族は、低い湾岸部と Santa Clara 山脈の壮大な景観を持つ Portola 峡谷の素晴らしい家へ引っ越した。彼の最初の目的の一つは室外の水泳プールの設置だった。彼は残りの人生の間定期的にそれを使った。Flory は新しい化学教室のプログラムの展開に関心があったから、私はこれらの早い日々に彼の多くを見た。彼は時間を惜しみなく使い、我々は頻繁にお互いの部屋を訪ねた。私はこの関係を大いに楽しんだ。というのは深刻な事柄を扱っている時でさえ、Flory の細やかなユーモア感覚が必要な緊張の緩和を与えたからである。彼の管理上の専門技術をフルに利用する目的で、私は Flory、副学科長 Douglas Skoog と私から成る実行委員会を創設した。そこでは、教室の政策、給料、昇進、教育分担のような重要事項を話した。この役目には彼は欠かせなかった。

1964 年の初夏に Flory は私に、Cornell 大学に前に Peter Debye が持っていた Todd 教授への申し出を受けていて、彼は真面目に関心を持っていると言った。Stanford の蜜月は終わった。Flory はある問題、特に化学教室のための便宜になる適切な建物の不足の解決でなされている遅い進展

についての、過度にならない不平を持つ状態に落ち込んでいた。Terman は問題を深刻に受け取り、新しい化学の建物に高度の優先権を約束した。加えて、彼はすぐに化学に最初の基金付きの椅子を創設するように寄贈者 (Stanford 家の人?) を説得した。Flory は9月の理事会会合で Jackson-Wood 化学教授に任命された。これらの安心させる動きに拘わらず、Flory は1964年9月28日私の部屋にやって来て、申し訳なさそうに Cornell 大学からの申し出を受け入れることをほぼ決めたと告げた。彼の友人と大学を通しての同僚はその状況を知って、大挙して集まった。その結果、彼は決心を変えた。

結局 Flory は残りの人生の間 Stanford に留まった。私が1969年に頭を辞任した時、当局と教室は3年任期の学科長を持つもっと伝統的なシステムへの変更へ同意した。Flory は最初の学科長に好ましい人間だった。彼は2年間それを受け入れた。彼が主張したように、彼は私がサバティカルで留守にした1966–1967年の1年間既に頭をしていたからであった。Flory が学科長になる時までに Stanford 当局は高度に民主的なシステムへの変更の途上にあった。Sterling と Terman の二人は引退した。Flory は副学部長になった。彼の新しい物理的便宜への頑固な活動は続いた。理事会が新しい化学の建物のための予算執行を承認したのは、彼が1974年のノーベル化学賞受賞者と告げられた後だった。

Flory は Stanford での最初のノーベル化学賞受賞者だった。アナウンスがあった日は巨大な興奮の日で、教室ではお祭り騒ぎだった。Flory はその栄誉でうぬぼれを膨らませるような種類の人ではなかった。しかしながら、彼は非常に喜んだ。ノーベル賞受賞者が惹きつけるメディアの関心と名声は彼に人権問題での仕事において以前よりもっと大きな効果がある機会を与えたからである。

抑圧された海外の科学者の人権への Flory の関わりと弛まぬ闘士としての人気はよく知られている。それは彼の人生の最後の10年間における最も重要な関心事の一つになった。彼の努力は夫人 Emily に強く支えられていた。彼女は彼のために背後事情を読み、東ヨーロッパの国々の政府に反対している科学者への訪問に付き添った。様々な他の活動はソ連や東ヨーロッパへの放送のための “Voice of America” の多数回のインタビューも含んでいる。彼は人権に関する様々な委員会に奉仕した。彼は科学者の人

権を守るために強い態度を取らない国立科学アカデミー、アメリカ化学会や他の科学会に批判的だった。1980年彼は西ドイツ Hamburg で開かれた35ヶ国科学フォーラムへの米国代表団の一員だった。そこでは Helsinki 協定の下での科学交流と人権が議論された。Flory は創設者、スポークスマン、活動家として “the SOS” と特に同じ見解を持っていた。その非設立グループは世界中からの9000人の科学者から成っており、Sakharov、Orlov、Shcharansky の投獄に対応してソヴィエトとの科学的共同を撤回した。このボイコットはその数年間に起こったかなり好ましい展開における重要な因子だった。Flory の献身の強さは、Sakharov の妻 Yelena Bonner が必要な医学的処置の悪い国を離れることを認められるなら、彼が彼女の “良い” 振る舞いを保証する人質になるというソ連への提案が、その例証である。

Flory は平穏な時を持つことがあった。彼は喜びあふれたホストで、完全に寛いでいる様に見える。友人をもてなすのを明らかに大いに楽しんでいた。激しい水泳の後、彼は満面に笑みを浮かべ、明らかな幸福感を持ってプールから出てきた。もう一つの彼の大きな楽しみは山中のハイキングだった。彼と Emily は山道では疲れを知らず、完全に寛いでいた。彼らは素晴らしい地図のコレクションを持っており、彼らはそれに慣れ親しんでいて、殆どどこへも自由に行けると感じていた。Yosemite で彼らに同道し、Flory と Emily は暗くなってから険しい見知らぬ山道で行き止まりになってしまったとき、彼らの安全についての Barbara と私の心配を、彼らのどちらも全く理解しなかった。この環境での Flory の楽しみはほとんど多幸症的であった。彼は自然の近くにいることを楽しんだ。彼はその地域の新人だったけれども、近くの植物や動物の生活を異常によく知っていることを証明した。早い時期の別の時、我々は Flory 一家と Big Sur へハイキングした。そのとき彼らはその地域と恋に落ち始めた。とうとう Flory はそこに不動産を買い、小さな家を建てた。高所で地道を辿ってしか近づけない処だった。Flory が中断される事無く書き物ができ、電話からの孤立を楽しみ、ハイキングし、山道を綺麗にし、彼自身の木を切った避難所が此処だった。1985年9月8日、Portola 峡谷へ帰る用意ができた時に突然の心臓発作で死んだのは此処だった。

## 「Walter H. Stockmayer の追想」

私が Flory に初めて会ったのは 1942 年の何時かだった。その時、彼は Esso 研究所におり、私は Columbia 大学にいた。大学院生だった Tom Fox が多官能系のゲル化についての Flory の最近の理論を話したのを聞いて、私は自分自身の興味を高分子の問題に切り替えて、Flory の方法とは別の方法を開発することに成功した。私がそれを Flory への手紙に書いたとき、彼は私に彼を訪問するよう招待し、更に仕事を進め、その線で続けるように励ましてくれた。我々は極近くで働くことはなかったけれども、彼と私は手紙や電話で、彼の残りの人生の間、かなり密接な接触を保った。私は彼の死の数年前を特に思い出す。その時、彼は忙しい生活からまる 1 日をとって、Portola 峡谷から Big Sur の丘の上の彼の山荘まで、彼のジープで長いドライブに連れて行ってくれた。

我々の誠実な友情は、我々が科学的事柄で同意しなかった 2、3 回における彼の比較的やさしい反応にあった。その最初のものは、ゲル点を通過した後の 3 次元高分子を取り扱った時だった。彼の取り扱いはそのような網目中に環状構造と許していた。一方私ののは反応の全ての段階でそれらを厳密に禁止していた。彼の結果は物理的にははるかに優れていた。しかし、それは、私のより厳密な数学、物理的にはそれほど褒められない数学からは見られない、幾分人為的な過程を含んでいた。2 番目の不一致は何年も後でやってきた。倉田と私はある高分子鎖中の隣接した内部回転の間のいわゆる“ペンタン効果”のコンフォメーションへの結果を無視した。ここでは我々が全く間違っており、Flory が正しかった。これらの二つの場合に、Flory は決して印刷物では私を批判しなかった。既にしばしば言われているように、彼は他人とのそのような不一致を強い言葉で指摘するのに躊躇しなかった。しかし私の場合はそうしなかった。彼は単にそれらを無視し、書いたものではそれらへの言及を省いた。

私は常に Flory の絶えず増えていく形式的な数学の運用力に印象付けられた。Ohio 州立大学では彼は数学の補習授業を取らねばならなかったこと、Manchester 大学からの乏しい背景を補うために自分で勉強せねばならなかったことを思い出す。しかし、彼は、理論家の経歴のかなり遅くになっても、必要なものを開発し続けた。

## 「Henry Taube の追想」

私が初めて Flory という人間を見たのは Cornell 大学の化学教室での聴衆の一人だった時である。そのとき彼はセミナーの演者として現れた。多分 1944 年頃だった。私は彼の話の生き生きした記憶を持ち続けている。私が聞いた最良の最も教育的な科学の講義の一つとして、私はそれを振り返る。それは主として彼の論文「高分子溶液の熱力学」に基いていた。その発表のうちに、彼が抜群の科学者であることを部分的に説明する知性の力と鋭しさ、才能が現れていた。彼は、科学的問題の心臓部まで到達し、複雑な系でさえもその本質的な特徴を取り出して厳密な数学解析に馴染み易くする異常な能力を持っていた。私はセミナーの終わりに浮き浮きした気分であったことを未だ覚えている。「Flory は接着剤からさえ科学的な意味を作り出すことができる。」と思った。

私はこのセミナーの時には Flory とは会わなかった。しかし、Stanford 大学にともにいたとき彼をもっとよく知るようになった。Stanford 大学での彼の殆どの時間、我々は化学の建物のある階の空間を分け合った。我々の部屋はわれわれの秘書が占めるスペース分離されていただけだった。だから、どちらかが町を出ている時を除いては、私は殆ど毎日彼を見た。私が持っている一つの強い印象は彼が熱心に働き、決して怠けているように見えなかったことである。彼は殆どの時間を自分の部屋で過ごした。そこで、理論を開発し、論文を書き、通信(手紙)を処理した。それから離れると、彼は普通実験室に現れ、共同研究者と話をしていた。

我々の物理的な近さや互いの尊敬にも拘わらず、また私が彼との親交を好んでいたにも拘わらず、我々の関係は寛いだ親しい水準にまで成熟しなかった。しかしながら、偶然のふとした接触を通してさえ、私は彼について多くを学んだ。彼についての私の印象は追想の初めに現れた賛辞を確認するものである。Flory は良いユーモア感覚を持っていた。我々の会話の課題はしばしば、彼が非常に楽しそうによく物語った彼の逸話だった。彼自身ユーモアを楽しんでいることは、もともとハンサムな顔を輝かせる暖かい微笑みやしばしば心からの含み笑いによって表された。彼は親切な面倒見の良い男だった。彼の他人の幸福に対する心配は行動に移された。ノーベル賞を受賞した後、人権問題における彼の活動の速度は増した。彼は加わった声望を、道徳的理由で権威者と衝突しているソヴィエトの科学

者の条件を改善しようとすることに使った。彼は、科学に対して持っていたのと同じ情熱と献身でもってその問題に関わった。

彼は強い性格で高潔であった。彼の重要問題についての信念は深く、しっかりしたものだった。彼の感覚の深さのせいで、彼は、善意の人々が無理も無く反対の見解を持っていた事柄でさえ、彼に同意しない人々に酷く批判的であった。彼の信念はそれほど重要でない事柄についてさえ深く、彼はしばしばそれらと他人との彼の不一致を書き物で表すことに訴えた。彼は情熱を持って、鋭い眼識で書き、結果できた散文は力強かった。

Flory がまだ活動の義務を持っていた短期間の間、私は教室の学科長をしていた。義務を果たしているうちに、彼は日常の接触では明らかになりそうもない彼の個性の一面を見せた。私は、彼が同僚達による非常な尊敬を評価していないことを知って驚かされた。事実あるとき、彼は、同僚達が彼を特に支持していないと感じていると述べた。この種の誤解が続いたのは彼の親しい友人の環に多くの教室の同僚が含まれていないということに帰せられると、私は信じている。その原因は、彼の卓越した業績に拘わらず、そして彼の全ての行動が強く力強い結果をもたらしたけれども、彼が造り上げたものの中に不安(危険)が残っていたことによるのであろう。私が学科長をしていた時に我々が持った公式の接触で私に明らかになったもう一つの洞察がこれに関係している。私が聞いた彼の早い時期のセミナーの生き生きした記憶を未だ持っていた私は、Flory が教室で教えることを特に楽しんでいないということを知っていささか驚いた。その報告は、公式のコースで彼の講義が乾燥に向かっているというものだった。私は彼が講義を面白いものにしようとすることに興味を持っているかどうか疑った。私は、課題そのものが能力ある人に訴えかけるという見解を我々の多くと共有して、彼がそうする必要は無いと見たものと信じている。ともかく、彼が彼のコースへの学生の応答に度々不満を持っていたことを知っている。高分子物質の科学の多くを化学の中心カリキュラムに持ち込んだ声高の強い主唱者であった Flory が、この教室でそれが最良に為される方法の具体的な提案を出せという招請に何故答えようとしなかったのか、これはその説明の助けになる。採用された提案を履行する責任は彼に委ねられたらさう、そしてそれは彼がもっと気持ちよく感じるであろう他の活動を妨げることになっただらう。

人生を通して彼は研究を大いに楽しみ、家庭を誇りにした。彼は自然を楽しんだ。彼は肉体的スタミナを持っており、肉体的に激しい活動を避けることはなかった。彼は良い満たされた人生を送った。私は彼が退屈したことがあるとは思わない。

Paul John Flory は 1985 年 9 月 8 日 California 州 Big Sur の丘の上の山荘 (vacation home) で突然の心臓発作により亡くなった。

## 参考文献

1. Harold Schweinler, Burak Erman, James E. Mark, Alvin Weinberg, “Eugene Guth,” *Physics Today*, 133-134 (1991).
2. “Dr. Eugene Guth, Physicist, Polymer Pioneer, Reserach Professor of Physics, Notre Dame Univ.,”  
(<http://michaelguth.com/family/eugeneguth.htm>).
3. J. W. Williams, “Peter Joseph Wilhelm Debye,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
4. P. P. Ewald, “Obituary; Peter Debye 24 March 2884–2 November 1966”  
(<http://www.iucr.org/people/crystallographers/debye>)
5. “Peter Debye - Wikipedia, the free encyclopedia,”  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Peter\\_Debye](http://en.wikipedia.org/wiki/Peter_Debye))
6. William S. Johnson, Walter S. Stockmayer, and Henry Taube, “Paul John Flory,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
7. “Paul J. Flory, Autobiography,” *The Nobel Prize in Chemistry 1974*, Nobelprize.org

## 3章 高分子溶液

### 3.1 高分子科学が平易に見えた頃

Walter Hugo Stockmayer と Bruno Hasbrouck Zimm の二人が New York にある Columbia 大学の化学科 Mayer 研にいた時代を振り返った回想録がある。<sup>1</sup> 少し詳しく引用すると以下の如くである。なお、彼らが Mayer 研にいたのは 1940 年代の初めである。

背景となる高分子科学の発展の段階は次のようである。

Hermann Staudinger と Wallace H. Carothers による「高分子仮説」を確立しようとする闘争が報われたのが 1920 年代から 1930 年代初めであった。同じ分野の物理化学はそれよりも更に遡る。例えば、球状粒子の懸濁液に対する粘度の計算結果を Einstein が発表したのは 1906 年であった。ただし、5 年後に修正版が出ている。Svedberg が超遠心機を開発したのは 1920 年代であった。それは 1930 年代に著しく進歩している。最も刺激的な展開は Staudinger の「粘度-分子量則」(間違いであると判っている)の発表と、Eugene Guth と Herman Mark によるゴム弾性の分子理論の最初の論文だった。Werner Kuhn、Paul J. Flory、G. V. Schulz、Maurice L. Huggins が高分子の舞台に初めて登場したのはこの時期であった。多才な理論家の Kuhn は光学活性とスペクトルの古典的経験則で既によく知られていた。彼は屈曲性高分子鎖のコンフォーメーション統計の古典的論文を提出し、その中で排除体積効果を予見した。また、彼はセルロースのランダムな加水分解の統計という明確に化学的な問題も考察した。

Flory は初期の活動では重合反応に多く関わっていて、重縮合およびラジカル連鎖重合の統計と動力学についての萌芽的研究をした。この分野には、Schulz の先駆的な動力学の研究が見られる。一方、Huggins は、高分子溶液の粘度は高分子が Staudinger が見せた剛直棒ではなく、Kuhn、

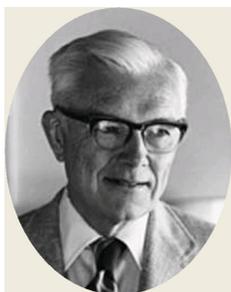


图 3.1 Paul John Flory (1910/6/19–1985/9/8)



图 3.2 Günt(h)er Victor Schulz (1905–1999)



图 3.3 Maurice Loyal Huggins (1897/9/19–1981/12/17)



図 3.4 Joseph Edward Mayer (1904/2/5–1983/10/15)

Guth、Mark のランダムな屈曲性コイルであることをはっきりと確立した。

1941年9月、Stockmayer は Joseph E. Mayer の招きに応じて Columbia 大学の公開講座の講師になり、Chandler Hall の8階にある個室を占めた。彼が Massachusetts 工科大学 (MIT) で学位を得た1年後で、彼の義務は分析化学と物理化学の夜間授業 (evening lecture) であった。同じ時に、Columbia 大学を1941年に卒業した Zimm が Mayer を博士課程の指導者を選び、Mayer 研に配属された。

1940年代、Columbia 大学化学教室の部長は重水素を発見した Harold C. Urey で、教授には Louis P. Hammett、George F. Kimball、Victor K. LaMer、Joseph E. Mayer などの綺羅星がいた。Stockmayer の個室の隣は Kimball と Charles O. Beckmann の研究室であった。

当時、Mayer は流体の統計力学の創始者として、能力と名声の絶頂期で、嫁さんとの共著で開拓者的な教科書 *Statistical Mechanics* を出していた。彼の妻 Maria Goeppert Mayer は Sarah Lawrence 大学の物理学教授であったが、週に4、5日は Columbia で過ごすようにしていた。彼女は多様な問題を研究しており、直近には元素93のアクチニド系列の出発点を予言する Thomas-Fermi 計算を論文にしていた。それは、彼女が1963年のノーベル物理学賞を受けた仕事である原子核の安定性に対する “magic numbers” の説明の数年前だった。



図 3.5 Maria Goeppert Mayer (1906/6/28–1972/2/20)

第二次世界大戦は既にヨーロッパで吹き荒れており、多数の難民が Columbia の近くに向かっていた。その中に化学教室にしばしば立ち寄った Francis Perrin と Ronald W. Gurney もいた。

1941 年 12 月の真珠湾攻撃のすぐ後、Urey は教室員全員を集めて、「この戦争は応用科学の闘いになる。軍のドンキホーテ的な徴兵は何の役にも立たず、無知の証でしかない。」と力説した。続く数ヶ月の間にスタッフの何人かと多くの学生が戦争関連の活動に参加するため、他の場所に移った。J. E. Mayer は週の殆どを Aberdeen 実験場に張り付き、講義と相談のために 1、2 日だけしか来なくなった。Mayer 研と Kimball 研との月曜昼食談話会 (Lunch Club) はより開かれた火曜昼食談話会に替わった。この会は Stockmayer と Zimm に、Enrico Fermi、Eugene P. Wigner、Edward Teller、John G. Kirkwood など多くの大物に非公式にしばしば会う機会を与えた。

彼らは二人とも Columbia に留まったが、勿論戦争関連の研究に巻き込まれた。Zimm は煙幕、分子量と光散乱のプロジェクトに携わり、Stockmayer は Urey の指令で、Kimball と一緒に重水素交換平衡の計算を行った。

Stockmayer と Zimm の会話をしばしば高分子物理化学に引き込んだのは、同じ Chandler Hall の 8 階の住人 Beckmann だった。Beckmann の専門は光学活性と高分子、特に澱粉誘導体の研究であった。彼は彼らと同様、論文を書くのを楽しむ方ではなく、新しい問題を考える方を好んだ。Beckmann とその学生達は彼らの誇る手造りの超遠心機で研究していた。



*Turner Alfrey Jr*

図 3.6 Turner Alfrey (1918/5/7–1981/8/10)

Beckmann のくだけた性格は彼の若者達の悪戯に無防備だった。ある夕方、Beckmann が教室のコロキウムで講演したとき、Stockmayer と Zimm は最初のスライドを修正して、超遠心機を操舵している Beckmann の写真のそばに殆ど裸で入浴中の美女を加えた。

Stockmayer と Zimm は別々に Columbia を離れた。Stockmayer は 1943 年遅くに MIT に戻り、戦争関連の仕事を Arthur von Hippel の下の絶縁体研究所に移した。LaMer は Beckmann に「Stockmayer が去るのは残念だ。なにしろ、彼の妻は教室一番の踊り手なんだから。」と打ち明けた。一方、Zimm は戦争が殆ど終わるまでとどまってから、Brooklyn Polytechnic 研究所に移って Herman Mark の高分子科学チームのメンバーである Paul Doty、Turner Alfrey、Arthur Tobolsky らと一緒にになった。

#### 「Zimm の回想」

1940 年代初め、大抵の高分子の絶対分子量は不明であるか、極めて不確かなものであった。それは測定が難しかったからである。高分子は気体にならないので、稀薄溶液で測らねばならない。しかし、分子量決定の基となる自由エネルギーのうちの理想項、Raoult の法則の項は一定濃度では分子量の逆数で減少する。一方、非理想項は概ね分子量に独立で一定である。そこで、濃度に比例以上で増大する非理想項を抑えるためには、分子量が高くなるほどより低い濃度での測定が要求される。ある点で測定精

度に限界がくる。凝固点降下法のような有機化学の常套手段である伝統的方法では、この限界点は分子量が  $10^4$  程度でやってくる。この値は意味のある殆どの高分子の分子量よりもかなり小さい。

十分な感度を持つ唯一の熱力学的方法は浸透圧法である。しかしここでは、浸透膜の浸透性と選択性および化学的力学的安定性が致命的である。当時、有機溶媒で用いられる膜は通常部分的にジニトロ化したニトロセルロースで、実験者は自分で用意せねばならなかった。方法は、水銀表面上でキャストして部分的に乾燥したコロジオンフィルムを硫化アンモニウムで処理することだった。そのような膜の透過性と選択性は乾燥の程度と移される溶媒に依った。一方、可溶な不純物の量は硫化物処理とそれに続く洗浄の徹底の程度に依った。この種の新しい膜を浸透圧計に装着して両側に純溶媒を入れたとき、膜中の可溶な不純物によると思われる見せ掛けの浸透圧が生じた。それは劇的で、しばしばゆっくりとしか減衰しなかった。また、そのような膜の多孔性の穴には大きいものがあり、いくらかの高分子成分を容易に透過させた。だから、浸透圧による分子量決定は実験ごとにかなり変化する結果を与えた。

他の方法として唯一知られていた絶対法も困難を伴っていた。化学分析による末端基定量はポリエステルのように末端基が確定している2、3の高分子にのみ適用でき、それもちかなり低分子量に限定されていた。Svedberg が超遠心機を發明していたが、その機械は世界中でも2、3台しか無かった。Spinco 社が電気駆動の機械を商業生産するまでそのような状況であった。その上、合成高分子は分子量的に多分散で、その溶液は非理想性が高いので、超遠心機での分子量決定は複雑であり、苦勞が多く時間のかかる方法であった。

そういう訳で、分子サイズの目安として最も広く用いられたのは固有粘度であったが、それは相対的なものであり、絶対的な尺度ではなかった。それ故、1940年代、合成高分子の絶対分子量の決定は基本的な関心事であった。そういう時、Debye が新しい、違った方法、すなわち光散乱法を導入した。

光散乱については歴史があった。19世紀に Rayleigh が個々の微粒子からの光散乱の理論を展開した後、1908年に von Smoluchowski の予備的な議論に従って、Einstein が密度揺らぎの Fourier 解析に基いた純液体か

らの散乱の式を導いた。Debye の理論はそれを混合物中の組成の揺らぎを含むように拡張したもので、組成揺らぎを熱力学、稀薄溶液の法則に結びつけた。彼の式は

$$\tau = \frac{32\pi^3 k T n^2}{3\lambda^4} \left[ \frac{\rho(\partial n / \partial \rho)^2}{(\partial p / \partial \rho)_{T,c}} + \frac{c(\partial n / \partial c)^2}{(\partial P / \partial c)_{T,p}} \right] \quad (3.1)$$

である。ここで、 $\tau$  は濁度、 $n$  は屈折率、 $\lambda$  は真空中の波長、 $\rho$  は密度、 $p$  は圧力、 $c$  は溶質濃度、 $P$  は浸透圧である。右辺の第一項は Einstein によるもともとの項で、密度散乱項であり、第二項が組成揺らぎによる散乱を表す。第一項は実質的に濃度に依らないので、稀薄溶液では純溶媒の散乱  $\tau_0$  で置き換えられる。浸透圧  $P$  に対する van't Hoff の法則を用いると

$$\tau - \tau_0 = \frac{32\pi^3 n^2 (\partial n / \partial c)^2 c M}{3\lambda^4 N_A} \quad (3.2)$$

と書ける。ここで、 $c$  は高分子の質量濃度、 $M$  は分子量、 $N_A$  は Avogadro 定数である。Debye はこの式 (若干異なっているが) について、

「それ故、この式は、濁度および溶液と溶媒の屈折率との差の二つの測定を組み合わせによって、如何なる種類の経験的定数を導入することなく溶液中の溶質の分子量を決定する方法を示していると解釈できる。」

と述べている。

高分子の分子量とサイズの決定法としての光散乱法の実質的導入は第二次世界大戦中のことで、研究の多くは通常の学術雑誌には決して発表されなかった。

Zimm が光散乱法を知ったのは博士課程 1 年生の終わりであった。その時彼は軍事用の煙幕に使う煙の光学的性質を調べるプロジェクトの仕事をしていた。このプロジェクトは化学教室に置かれ、Victor K. LaMer の指揮下にあった。同じく博士課程 1 年生の Paul Doty と Zimm はそれを助けるために夏の間雇われた。問題の煙は可視領域に強い吸収帯を持つ染料の細かい球状粒子から成っており、散乱に対して複雑な波長依存性があった。プロジェクトの目的は、白色光 (太陽光) は強く散乱するが、特定の波長では透明な煙を見つけることができるかという事であった。彼らはそのような煙を見つけることができなかったが、そのプロジェクトは光散乱理

論への良い導入になった。Zimm はその時手に入る最も良い本、Born の「光学」のドイツ語版原本を勉強した。その本は、そのプロジェクトで働いていた David Sinclair が貸してくれた。Zimm がドイツ語を読むのが易しいと思えるようになったのは、この Born の優美なドイツ語で、物理学を勉強した余禄ということである。

Zimm と Doty は J. E. Mayer のところで学位論文の研究をしていたが、同じとき Mayer の 3 番目の学生に William G. McMillan, Jr. がいた。彼はトリエチルアミン水溶液の低温臨界共溶点近傍における蒸気圧の研究を始めていた。彼の狙いは、Mayer が理論的根拠から提唱していた山高帽 (Derby-hat) 型の臨界点に対する実験的証拠を見つけられるかどうかということだった。山高帽は臨界点近くの領域にあり、そこでは蒸気圧等温線が 0 の勾配を持つと想定されていた。McMillan は、非常に正確に蒸気圧曲線を測定し、それらのデータを通る曲線の殆ど 0 に近い勾配が有限の範囲で確かに 0 であると言えるのか、という報われない仕事に直面していた。Zimm と Doty のどちらかが、Fowler の統計力学の本に、Einstein-Smoluchowski の光散乱理論とそれの揺らぎとの関係を議論した節があるのに気づいた。その理論は、散乱強度が蒸気圧対濃度の等温線の勾配に逆比例することを示していて、明らかに McMillan の難問に有用なものだった。

もしも Beckmann が Zimm らの会話を立ち聞きしなかったら、何事も起こらなかつたらう。Beckmann は前述のように、澱粉の物理化学に興味があり、米国で初めて作られた超遠心機を持っていた。また、ドイツの Jena にある Carl Zeiss 社製の濁度系を持っていた。彼は友情に厚い人物で、Zimm らが光散乱について話しているのを聞くとすぐに彼の濁度系を提供した。それは簡単な装置で、目視の Pulfrich 示差光度計、カラーフィルター付きのタングステン電球、と循環恒温水用ジャケット付きのセルホルダーから成っていた。最も重要な付属品として、綺麗な曇りガラスの濁度標準があり、それには真鍮製のホルダーの Zeiss 社が刻んだ濁度の値が付いていた。測定するには、二つの目標、その一つは溶液で他方は同一光線中のオパール硝子、を見ているそれぞれの絞り窓を較正付きの円筒を廻して調整することによって、望遠鏡の接眼レンズの半分ずつの照射強度を合さなければならなかつた。1943 年遅くに、Zimm、Doty、McMillan は



図 3.7 Paul Mead Doty (1920/6/1-)

このようにして、トリエチルアミン水溶液について多くの測定を行った。しかし、山高帽は見つからなかった。彼らは両対数用紙にデータをプロットし、直線を引き、その勾配を記録したが、その勾配が持つ意味は考えなかった。McMillan はトリエチルアミンの仕事を追及するのを止め、統計力学で学位論文を作った。それは有名な多成分系の McMillan-Mayer 理論となった。

1944年の初め、Doty は臭素の電子親和力の学位論文を仕上げ、Brooklyn の Polytechnic 研究所の Herman Mark の研究プロジェクトに場所を得た。そのプロジェクトは高分子化学と高分子物理学の様々な面に関係するもので、特に銃砲のカバーや供給品の容器のような軍事用のプラスチックの成型工程への応用であった。なお、Doty は学生時代から原爆開発の Manhattan プロジェクトに参加しており、後に Harvard 大学に移って生物化学および分子生物学教室を創設し、円偏光二色性や光散乱を用いて DNA、タンパク質、コラーゲンなど生体高分子の研究を行った。Mark のプロジェクトに参加してすぐのある日、Doty が帰ってきて、Debye が未だ未発表であるが、高分子の分子量を光散乱で決定する方法を開発したというニュースを告げた。Einstein-Smoluchowsky の理論に慣れていた彼らはすぐに、その理論と Raoult の法則を結びつければ分子量決定法になるだろうことを理解した。彼らはすでに必要な装置を持っていたから、その方法を実際に確かめることに興味を持った。Doty は、Mark の以前の学生の二人 Turner Alfrey と Al Bartovics がつくり、浸透圧で特性決定したポリスチ

レン 3 試料を手に入れた。2、3 週間のうちに、彼らはトルエンとメチルエチルケトンを溶媒として、それらの試料の溶液を調製し、その光散乱と屈折率増分を測った。Einstein-Smoluchowsky の式の定数の単位で少しごたごたした後、異なった溶媒中での同じ試料の分子量が一致するだけでなく、浸透圧法からの値とも一致することを見つけて、彼らは喜んだ。1944 年 4 月に Doty、Zimm、Mark はそれを短い論文にした。なお、Debye の最初の論文も同じ年のすぐ前にでている。

較正付きの装置といい、溶解性がよく屈折率の高い分子量既知の試料といい、彼らは幸運であった。しかし、彼らが後で気づいたのもっと隠れた幸運があったということであった。光散乱法の分子量と浸透圧法の分子量は一致しすぎた。光散乱は重量平均分子量を与え、浸透圧は数平均分子量を与える。試料はざっと分別しただけだったから、前者は後者より高い(約 50%) 分子量を与えてしかるべきだった。一つにはたぶん Alfrey と Bartovics の浸透膜が透過しすぎて、彼らの分子量が高過ぎたのであろう。他方、光散乱測定にはいくつかの問題があった。その一つは、ある屈折率の媒体(試料溶液)から他の媒体(空気)へ光が通過するとき屈折することによる補正(いわゆる屈折率補正)を Zimm らが見過ごしたことであった。この補正は散乱強度の値を大きくしていただろう。また、Zimm らは散乱強度の角度依存性を考慮しなかった(できなかった)。Zeiss の濁度計は入射光方向から  $135^\circ$  の 1 角度でしか測れなかった。

これら全ての問題を解決するには多くの年月がかかった。最初、彼らは Zeiss Pulfrich 光度計で仕事を続けた。ただし、二つのセルホルダーを装備し、その一つは  $90^\circ$  の散乱を、もう一つは  $45^\circ$  と  $135^\circ$  の散乱の比(非対称性)を測れるようにした。この研究は Brooklyn の Doty と学生達が行った。Zimm はハロゲン化アルカリの蒸気圧に関する学位論文を仕上げ、1944 年の大部分を LaMer のプロジェクトである煙を作ることで働いた後、その年の遅くに Brooklyn へ移った。

だんだんに新しい光散乱装置の較正に困難があることが分かってきた。彼らは、敵国にあって当然接触できない Carl Zeiss を頼ることはできなかった。

1946 年 Zimm は California 大学 Berkley 校に移り、そこで眼の代わり

に、新しく手に入るようになった光電子増倍管を搭載した光散乱光度計を作った。Zimm の学生 Clide I. Carr, Jr., が純液体と溶液の絶対散乱強度および散乱と Einstein 理論との関係についての学位論文の仕事に選ばれた。その過程で、彼は Zimm らがかつて見落としていた屈折率補正の効果を再発見した。それにより、全てが落ち着くべきところに落ち着いた。光度計を較正する 3 つの独立な方法は一致し、純液体と溶液からの散乱の測定値は理論と一致した。ベルギーからのポスドク研究員 Paul Outer はその方法でポリスチレン溶液の広範な測定を行うことができ、全ての数値の出所を明らかにすることができた。Debye のグループは彼らの研究の最初から屈折率補正には気づいていた。しかし、彼らを書いたものの中ではその意味ははっきりとは判らないように伏せられており、誰もが見逃ごしてしまっていた。

文献学上の見地から、高分子の分子量決定の最初の出版物を巡る状況は奇妙である。Cornell 大学における Debye とその協同者との最初の研究は “the Office of Rubber Reserve, Reconstruction Finance Corporation” への報告の中で出され、戦時の安全のための制限によって限られた部数しかなかった。1944 年の開かれた文献中の Debye の最初の論文は分子量を決定する式における以前の導出を省いていた。Zimm は、確かに Debye にとって難しくはなかったであろうが、彼がその式を独立に導いたのかどうか、しばしば訝った。実際、純液体に対する 1910 年の Einstein の式の拡張であるその式は、ずっと前、1923 年の Gans や Raman と Ramanathan による広範な議論の中に出されていた。Einstein 自身は組成揺らぎを短く取り扱っていたが、不必要に、成分の蒸気が理想気体である場合に限定していた。Einstein のコメントは

「実験的に入手できる量だけを含むこの式は、飽和蒸気が理想気体として取り扱える限り、臨界点の極近傍の小さい領域まで、2 成分混合液体の臨界蛋白光の性質を完全に決定することができる。」

であった。だから、それを使いたい人がいたら、理論の本質は 1910 年に入手可能であった。Raman が論文 “*Indian Journal of Physics*” のなかで、その式がコロイド溶液に適用できることを初めて指摘したのは 1927 年だった。Zimm らは 1946 年頃予期せずこの論文のリプリントを受け取った。それは説明や注釈なしにインドから郵便で届いた。

## 「Stockmayer の回想」

1942年の初め、BeckmannのグループのセミナーにFloryの学生Thomas G Foxが招かれ、Floryのゲル化の理論の講演をした。Floryはモノマーが2より多い官能基を持つときの樹状型の重合あるいは重縮合の統計を扱って、生成物の高分子が極端に広いサイズ分布を持つこと、および数平均サイズが小さくても僅かの巨大分子があれば粘度は跳ね上がりゲル化することを示した。彼は、モノマーの官能基の数 $f$ と反応の化学量論式から求まる、一つの官能基が反応した確率 $\alpha$ との関係を定式化した。その式は、実験結果に近いゲル化点における反応分率の値を与えた。予測は驚くほど良かった。Foxの話を受けてStockmayerは雷に打たれたような感動を覚えた。それは一種の相転移であり、それが化学量論式と唯の統計から殆ど定量的に予言できるということであった。高次のクラスター積分も格子のコンビネーション因子も要らない。しかし、Floryの方法は変則であり、Stockmayerはゾル-ゲル転移はもっと統計熱力学の規範に合う方法で処理され得るだろうと考えた。それをする過程でStockmayerは高分子科学に嵌まり込んだ。

当時、相転移の知識はそれほど広まっていなかった。臨界領域は何か異常であるという実験的証拠はあったが、大抵の物理化学者はMaxwell、Gibbs、van der Waalsが使った気液平衡の古典的取り扱いを超えようとはしなかった。圧力とHelmholtz自由エネルギーは、熱力学表面の何処においても温度と密度の解析函数であると考えられていた。平衡する2相は不安定、準安定領域を越えて化学ポテンシャルが等しいという要請だけで決まるべきものだった。1930年代の遅くに、J. E. Mayerは正準分配函数自身は双交曲線(binodal)上の特異点を含めて、平衡の秘密全てを含んでいるに違いないという考えを持って、“そのポートを揺さぶった。”その考えは理想的Bose-Einstein凝縮から抱いたように推測される。同じ考えを、以前Göttingen大学時代のMayer夫妻のパトロンであったMax Bornも持っていた。

気液凝縮に関するMayerの考えはそう容易に決着をつけられるものではなかった。彼と彼の学生達は、熱力学函数をクラスター級数展開し、特異点は原理的に、二つのはっきりと異なった、一致する必要がない、数学

的条件のどちらかからも生じることを見つけた。このようにして、近代的理論への重要な段階となった臨界領域の“山高帽”の描像が出現した。

Mayer 理論は、大きいクラスター積分を評価する必要があることから、定量的なテストをうまく逃げていた。格子模型については、磁化していない2次元のイジング (Ising) モデルに対する正確な臨界温度が Kramers と Wannier によって与えられていた。しかし、Onsager による分配函数の評価は1944年まで現れなかった。本来樹状構造 (Bethe 格子) を持つ Flory のゲル化モデルはもっと単純であり、その成功は一般化をけしかけた。それはもっと恐ろしく難しい転移と理論的に関係づけられるという望み、および任意の化学量論関係の系に対する分子種の分布を見出す方法を作り出せるという望みを与えた。

Stockmayer は簡単のため、一種類の  $f$  官能のモノマーがそれ自身と反応する、いわゆる  $RA_f$  モデルを考えた。その場合、 $\alpha$  は結合反応の達成分率である。 $RA_f$  モデルでは、環形成を除く小正準集合を用いて、一定の結合形成におけるエントロピーを極小化することで、真っ直ぐゴールまで行くことができる。コンビネーション因子が頭痛の種であったが、それは最終的に Mayer のクラスター理論に生じる同様の問題を意図的に真似る事で得ることができた。ちょうど Mayer は新しい大学院生 Harris Mayer を取っていたので、Mayer、Mayer、Mayer、& Stockmayer による論文を作ろうという強い誘惑があったが、Mayer 夫妻は決して屈服しなかった。

小正準集合の取り扱いが望むなら正準集合に置き換えることができる。どちらの場合も、環を除く  $RA_f$  モデルに対するサイズ分布が数学的近似なしに導かれる。それは  $x$  マーの重量分率、数平均重合度  $\langle x \rangle_n$ 、重量平均重合度  $\langle x \rangle_w$  を与える。明らかに広い分布があり、Flory のゲル化点で、 $\langle x \rangle_n$  は小さいままであるが、 $\langle x \rangle_w$  は発散する。論文を仕上げる前に、Stockmayer は New Jersey の Esso の研究所にいた Flory に手紙を書き、Flory から「こちらに来て考えを付き合わせよう。」という親切な招待状を受け取った。彼らは顔を合わせることは無かったが、それが友人関係を妨げることはなかった。

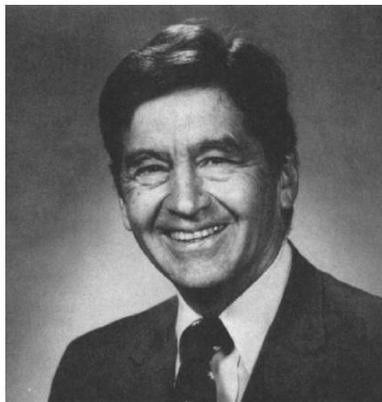
1942年の夏には Stockmayer の主要な研究の関心事が高分子であるかどうか未だははっきりしなかった。彼は3個の He 原子の対加性 (pairwise-

additive) でない重ね合わせエネルギーの簡単な量子力学計算をしていた。偶然が再び邪魔に入った。Stockmayer は彼の部屋と廊下を挟んですぐ向かいにある実験室で有機合成をしていた大学院生 Lester Weil と親しくなった。Weil の指導教官が突然戦争の仕事に行ってしまった。彼はやっていた研究に稔りがないと判ったので、新しい研究課題を始めることを選んだ。二人はすぐに Flory の論文に刺激を受けた計画を考え出した。ゲル化点への稀釈効果を測ること、それから溶液と熔液の粘度への分枝の影響を調べることであった。化学の様々な分野を形式的に差別しない、また、単なる講師に研究指導者になることを許す Urey および Columbia 化学教室の自由主義的政策のおかげで、すぐに青信号が灯った。そういう訳で、大学院生の協同者ができ、彼は高分子の研究をすることになった。

ゲル化点の研究は実際非常にうまくいった。 $f = 4$  のペンタエリスリトール  $C(CH_2OH)_4$  とアジピン酸  $HOCO(CH_2)_4COOH$  の等量混合物に、様々な量の不活性なポリエーテル稀釈剤  $CH_3(OCH_2CH_2)_4OCH_3$  を加えることによって、Weil はエステル化度の臨界値  $p_c$  が稀釈度とともに単調に増加することを発見した。それは分子内の環形成が増えていくということが無ければ定性的に期待されることだった。非稀釈系に対して、Weil は純粋の“樹”の系に対する理論値  $1/\sqrt{3} = 0.577$  より数パーセント大きい  $p_c = 0.630$  の実験値を得た。彼らは、活性な成分の体積濃度を  $c$  として、 $p_c$  が  $1/c$  とともに直線的に増加するだろうことを仮定し、 $1/c$  が 0 になるところでは環は存在しないだろうと議論した。Weil は  $p_c$  を  $1/c$  に対して直線外捜し、最小二乗法による切片  $p_c(0) = 0.578 \pm 0.005$  を得た。彼らが有頂天になったのはよく分かる。“樹”理論への特筆すべき支持だった。初めて、“相転移”が実験室で、先験的に予言されたまさにその点に現れた。振り返ってみると、 $p_c$  対  $1/c$  の外捜が直線であるべきだという証拠はないということは認めねばならない。

Weil は溶液および熔融状態の分枝ポリエステルの粘度について数多くの測定を行った。しかし、論文発表は遅らされ、終に無期限に延期された。末端基滴定だけでは信頼できる分子量が得られないことが明らかになったからである。更に、結果を議論するための健全な粘度理論が手元に無かったからでもある。しかし、彼らの分枝高分子のサイズと性質に関する興味

が Weil の努力の終焉とともに死に絶えるということではなかった。数年後、MIT の Stockmayer と Berkeley の Zimm との間の長距離の共同によって、様々な分枝 Gauss 鎖の平均二乗回転半径が計算された。



*Walter H. Stockmayer*

図 3.8 Walter Hugo Stockmayer (1914/4/7–2004/5/9)

### 3.1.1 Walter Hugo Stockmayer

Stockmayer は New Jersey 州 Rutherford で 1914 年 4 月 7 日に生まれた。<sup>2,3,4</sup> 1935 年、彼は Massachusetts 工科大学 (MIT) から化学の学士号を得た。そこで級長を務めて Rhodes 奨学金を得、イギリスの Oxford 大学 Jesus 校に行った。そこで、D. L. Chapman と気体の動力学の研究を行った。Oxford からは 1937 年に理学士と、生涯の蓄えとなった戯詩を得た。彼は MIT に戻り、James A. Beattie の下で極性気体とその混合物の熱力学的性質の研究で、1940 年に博士号 (PhD) を得た。その学位論文の仕事の一つの成果は極性分子の Stockmayer ポテンシャルとして知られるようになり、広く使われている。

Stockmayer は大学の経歴を、1941 年 Columbia 大学でスタートした。そこで、Joseph と Maria Goeppert の Mayer 夫妻との個人的ならびに同僚としての深い関係から、彼は理論への関心を深めていった。1943 年、彼は MIT に助教授として呼び戻され、昇進を続けて、9 年後の 1952 年に教授になった。1940 年代の半ば、彼は Du Pont 社の中央研究所の技術顧問になった。その関係は半世紀以上続いた。彼はまた、Chicle 社、Humble



図 3.9 若い日の Stockmayer

Oil 社、および米国陸軍の Picatiny 兵器廠の顧問でもあった。

一時期 Stockmayer はフランスの Stranburg 大学で Gugenheim 研究員をした後、再び MIT に戻った。

1961 年、Stockmayer は New Hampshire 州 Hanover の Dartmouth 大学に移り、教育、研究、公共活動を 2002 年まで続けた (名目的な引退は 1979 年であったが。) 彼の息子 Ralph によると、この転任の理由の一部は Stockmayer の山好きによるもので、White 連峰の傍に学校があったからという事である。Dartmouth 大学化学教室の部長 Dean Wilcox によると、Stockmayer が来たとき、化学教室は研究よりも教育で知られていた。Stockmayer は二度教室部長を務め、それを変えた。彼は同僚を励まし、峰の間の鋭く狭い尾根道になぞらえて、よく「そのやせ尾根を歩め。」と言った。Wilcox は言う: 「我々は、研究もあまり前へ踏み出さないよう、教育もあまり前へ踏み出さないよう、このバランスを維持し続けてきた。」 Stockmayer は高分子科学で研究業績を挙げるだけでなく、教育も愛した。彼はしばしば特定の分子の形を例証するのを助けるために愛犬 Emmett を連れて来た。その犬は、Stockmayer が爪楊枝とホットドッグで注意深くモデルを組み上げてクラスに見せている間、教室の一番前に座っていた。最後に Stockmayer はその肉を Emmett に投げてやり、犬も教室中も喝采した。彼は自然な教育能力を持っていた。彼は教えている課題の権威であったばかりでなく、教えるときには学生に上から教え諭されているという感じは与えなかった。常に彼は学生に満足感を与えるようにした。彼は

どうすれば学生達が酔ってくれるか知っていた。1979年 Stockmayer は引退したけれども、教育は続けた。2002年に一人の化学の教授が突然教室を去ったとき、彼は熱力学のコースを回復させた。

Frank A. Bovey とともに、彼は、1968年に創刊されたアメリカ化学会誌 *Macromolecules* の創設以来の準編集者 (associate editor) であった。編集長は Field Winslow であった。Stockmayer は 1994年までその役目を続けた。その年、彼は四半世紀に亘る科学界への無欲な、手間のかかる奉仕活動を降りた。

Columbia 大学で初めて高分子に興味を持ったすぐ後、環状の DNA が知られるずっと前に、Stockmayer と Homer Jacobson は線状 Gauss 鎖が環化する際のエントロピー損失を計算した。その研究は 1950年まで発表されなかった。彼の言葉によると「時期はずれにことをするのは本当の砲弾 (whiz-bang) ではない」ということである。

Stockmayer は好敵手 Ronald Koningsveld に出会った。Koningsveld は 1972年、二人で高分子溶液の相平衡の教科書を書こうと提案した。Stockmayer は 1949年の高分子溶液の臨界点に対する分子量多分散性の影響に関する短い論文 (Note) でその分野に大きな衝撃を与えていた。教科書 “*Polymer Phase Diagrams*” はもう一人 Erik Nies を共著者に加えて、2001年に出版された。

他の主な研究には以下のものがある: 1949年 Zimm との分枝高分子にサイズに関する論文、1972年以降 Dartmouth で行った Alan Jones と Keizo Matuo との誘電および核磁気緩和の研究、1979年以降 Dartmouth 大学と Freiburg 大学で行った Walther Burchard と Manfred Schmidt との動的散乱の研究、などである。

Kurt Vonnegut, Jr., は著書 “*Breakfast of Champions: Or, Goodbye Blue Monday!*” の中で、Stockmayer を科学以外にも多くの関心を持つ万能の人物と書いている。彼らは、Kurt の兄弟 Bernard が Stockmayer と MIT の物理化学の大学院生仲間であったことから知り合い、友人になっていた。Bernard は後に、著名な雲の物理学者になった。Stockmayer が特に熱中した二つは音楽と登山であった。彼は繊細なタッチの完成したピアニストで、様々な場所、各所の Gordon 会議で、死ぬ数ヶ月前までは



図 3.10 Sarah Belchetz-Swenson の油絵 (1992)

Vermont の自宅 で演奏 を楽しんだ。彼 が好んだ 作品 は、浪漫 派 の もの で、特に Brahms、Liszt、Schumann であった。

Stockmayer は彼の物惜しみしない性格と一致して、New Hampshire 州の White 連峰への愛着を友人、同僚、学生達と分け合った。彼の学生の一人が最もよく憶えているハイライトは Stockmayer と一緒にある頂上に登り、そこで Old Grand Dad ウイスキーを分け合い、囁きあったことである。彼の他の業績に相応しく、Stockmayer は White 連峰の 4000feet(約 1200 m) 以上の 40 の峰全てに、それも多くは冬に登った。彼は 70 代にその芸当を繰り返した。

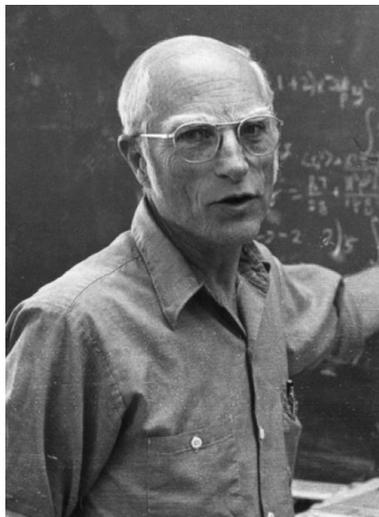
Stockmayer は素晴らしいユーモア感覚を持っていた。彼の戯詩は記憶には残るが、繰り返すことができない。彼はよく考えられた悪戯を評価した。彼自身の悪戯の一つが遠い山中の非難小屋であった。その小屋に、訪れた人全てに小屋を維持し、改善するように強いる張り紙があった。Stockmayer はそのようなことに冷静で、几帳面だった。彼は張り紙に答えて、電気のソケットを設備し、近くの流れにある架空のタービンの定格電力を超えないようにという張り紙をした。

Stockmayer の息子 Ralph によると、彼は Murphy の法則に似た新語「易しそうに見えるものは難しい。難しそうに見えるものはどうしようもないほど不可能に近い。」を作って自分の名を冠した。

1963年、Michio Kurata との論文が印刷されたとき、Stockmayer は自分に責任がある間違いを見つけ、直したいと思った。誰も気づいてくれそうになかったので、彼は Waldemer Silberszyc という偽名で修正を投稿した。その原稿は当然出版された。W. H. Stockmayer への謝辞が入っていた。彼は架空の友人に仕事をさせるというペテンを楽しみ、指導的化学誌に筆名での出版を続けた。

W. Gobush と K. Sölc との2本の高分子鎖の相互作用についての論文を仕上げているとき、二つの近づいてくるコイルが Stockmayer に Marx 兄弟の映画にある有名な夜着を着た無言劇を思い起こさせた。彼は論文の中に引用文献 “27. *G. Marx and H. Marx, Duck Soup, 1934.*” を入れた。

Walter Hugo Stockmayer は2004年5月9日 Vermont 州 Norwich の自宅で亡くなった。



*Bruno H. Zimm*

図 3.11 Bruno Hasbrouck Zimm (1920/10/31–2005/11/26)

### 3.1.2 Bruno Hasbrouck Zimm

Zimm は 1920 年 10 月 31 日 New York 州 Woodstock に生まれた。<sup>5,6</sup> 父は名声のある彫刻家の Bruno Louis Zimm、母は作家の Louise Zimm で、一人息子だった。

Zimm は 1941 年に Columbia 大学から化学の学士号を得た。1944 年には Joseph E. Mayer の指導の下で、同じく Columbia 大学から博士号 (PhD) を得た。それは第二次世界大戦時だったので、彼は Victor K. LaMer の指揮下で戦争関連の計画に夏を過ごした。彼と仲間の大学院生 Paul Doty は煙幕の光学的性質を調べるために光散乱理論を勉強した。だから、その夏のプロジェクトは Zimm にとって光散乱理論への導入であった。1944 年、Zimm は街を横切って、Brooklyn の Polytechnic 研究所へ移り、講師および Herman Mark の研究協力者になった。1944 年から 1946 年のそこでの彼の研究は生体および合成高分子との生涯に亘る取り組みの出発点となった。

1946年、ZimmはCalifornia大学Berkeley校の教授会の地位を受け入れた。彼は高分子量の高分子溶液に対する光散乱を用いた解析法を開発し始めた。若い助教授として、彼は3つの基本的な高分子のパラメータ、すなわち、回転半径、第二ビリアル係数、分子量を同時に決定する有名なZimmプロットを工夫した。1948–1949年のこの開拓者的仕事の3報の論文は千回以上引用されてきている。そのうち、2報はZimmの単著である。Berkeley校で準教授であった1950年から1952年の間に、彼はそこを離れてHarvard大学の化学の客員講師になった。1951年、ZimmはNew York州SchenectadyにあるGeneral Electric(GE)の研究所に移った。彼はそこで殆ど10年間過ごし、合成高分子からポリペプチドやDNAの生体高分子への転身をした。GEで、Zimmは最もよく引用される二つの論文を発表した：一つはポリペプチド鎖のヘリックス–コイル転移についてのZimm-Bragg理論の報告(1959)であり、もう一つは高分子溶液の粘弾性および流動複屈折の理論的記述(1956)である。後者は高分子動力学の基本的記述と見なされており、2000回近くも引用されている。

1960年Zimmは大学に復帰し、Yale大学での客員教授としての短い仕事の後、California大学San Diego校(UCSD)に移り、化学教室を創設した。彼は生涯の残りをそこで過ごした。

Zimmが浮沈子(Cartesian-diver)を持つ粘度計を設計したのはUCSDにおいてであった。それは深度を変えて自由に浮遊し、回転する内筒を持っており、染色体DNAを測定するために非常に低いズリ速度を発生できた。その装置はDNAの融解やゲル電気泳動の理論に貢献した。

1991年、Zimmは化学および生化学の名誉教授になった。彼はできる限り長く研究を続け、科学や世界が如何に動いているかについて語り疲れることはなかった。もはや、公式に学生やポストドクを指導することはなかったが、2000年までは毎年1報か2報の論文を発表した。彼は大学のキャンパスの近くに住んでおり、2002年パーキンソン病のために不可能になるまで、名誉教授の役目を果たすため定期的にUCSDに通った。

.....

高分子溶液の性質を理解するというZimmの生涯に亘る関心はColumbia

大学で、火を着けられた。そこで、生涯の友人、協同者となった Walter Stockmayer に出会った。Zimm と Stpckmayer を鼓舞したのは Joseph E. Mayer であった。Zimm は Mayer の博士課程の学生で、Stockmayer は Mayer の近くにいるという目的で Columbia 大学の講師の職についていた。Zimm はまた、彼と Stockmayer を高分子化学への会話に引き込んだのには Charles O. Beckmann に大いに責任があると述べている。しかし、Paul Flory の萌芽的研究も過少評価できない。その研究は若い物理化学者としての Zimm に高分子科学の成長している分野に注意を向けさせた。そして、Mayer 研の仲間の博士課程学生 Paul Doty がいた。Zimm と Doty はともにどのようにすれば高分子の絶対分子量とその分布を測定できるかを熟考した。その好奇心が最終的に Zimm を巨大な染色体 DNA の分子量測定に導いた。

1940 年代初期、合成高分子の分子量を得ることは基本的な関心事であったが、当時知られていた方法は全て難点を持っていた。1944 年、Brooklyn の Polytechnic 研究所にいた Zimm と Doty は、P. J. W. Debye が光散乱から高分子の分子量を測るという未発表の方法を開発したことを聞いた。以前彼らがしていた、煙幕の密度揺らぎに関連した光散乱の Einstein-Smoluchowsky 理論についての議論から見て、Zimm と Doty は、Smoluchowsky の式を Raoult の法則と結びつければ、二つの測定、すなわち濁度と溶液の屈折率増分の測定、から絶対分子量が得られることを、すぐに認識した。Herman Mark と共同して、Zimm と Doty は実験を行い、その新しい方法が役に立つことを見つけた。

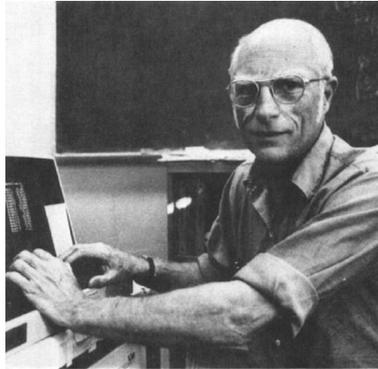
高分子についての Zimm の好奇心は続いた。Berkeley 校の助教授として、Zimm はポリスチレンの研究を続けた、ポリスチレンはほぼ 15 年の間、彼の好む高分子だった。Zimm は例外的に、理論と実験の双方に明るく堪能であった。彼の経歴の初期でさえ、彼は確固とした実用の感覚を持って、深い物理的洞察を、回転半径、第二ビリアル係数、分子量を同時に解析する有名な実験方法を開発することに結びつけた (1948)。その解析法は Zimm プロットと呼ばれている (Zimm 以外の人々には)。Zimm の学生の一人 C. B. Post がその方法を使って DNA 凝縮の研究を行い、論文原稿の図に “Zimm プロット” と入れた。刷り上りを見るとその図には “強度の逆数光散乱プロット (reciprocal-intensity light-scattering plot)” と

あった。Zimm は編集者であった。

散乱光強度から高分子の性質を解析する方法は、Zimm プロットを初めて報告した 1948 年の論文に現れていることが全てではない。Zimm の本当の際立った才能の証拠として、その論文には、電気回路、異なる角度で測定を実行する詳細、を含めた新しい光度計の設計が書かれている。その装置は、当時手に入ったどの装置よりも正確に散乱光強度を測定した。Zimm がまた、散乱光強度の角度依存性の理論的取り扱いに貢献したことを見逃すべきではない。現代の科学研究の学際性を強調する人は、装置製作、実験、基礎理論を述べたこれらの例外的に単著で、背中合わせになった論文を記録しておくべきだろう。それらは千回以上引用されている。Zimm プロット法の応用は、高分子溶液の興味ある新しい振る舞いを表す豊富なデータを生み出し、それらはその先の理論を構築させた。

Zimm は多年の間高分子の平衡の統計的性質に注意を持ち続けた。彼は統計力学に対する鋭い理解を高分子のコンフィギュレーションや相転移に関連する多くの問題に応用した。彼の経歴の初期において、彼は非電解質溶液に対する Mayer 理論に基づいて、高分子溶液の統計的取り扱いを展開し、第二ビリアル係数の一般的な式を得た (1946)。この研究はすぐに高分子鎖の大きさの研究へと続いた。排除体積効果を取り入れた分枝高分子の回転半径の計算の優美な記述が、友人 Stockmayer との古典的論文に現れた (1949)。何人かの高分子科学者の興味が生体高分子に向かい始めた 1950 年代、Zimm はもう一つの有名な研究を発表した。それには、ポリペプチド鎖のヘリックス-コイル転移を記述する Zimm-Bragg 理論と、その理論を検証する注意深い実験研究が付随していた (1959)。ヘリックス-コイル転移の Zimm-Bragg 理論は、今日でも、蛋白質の折り畳みや設計、蛋白質の構造安定性の測定の理論予測における重要な要素となっている。1 年後、DNA のヘリックスの“融解”の論文を出した。これらの論文は、彼の統計力学を背景として、マトリクス法をそれらの現象の厳密な取り扱いに応用したもので、協同現象をよく説明したものである。

Zimm の高分子科学への影響は高分子の非平衡の性質の理解への多くの寄与も含むものである。最もよく引用されている論文 (1956) は粘弾性、複屈折、誘電緩和の式を得るための屈曲性高分子の見識ある実際的な取り扱いを与えている。それは、有用な結果を得るために、如何に問題を定式



*Bruno H. Zimm*

図 3.12 工作中的 Zimm

化し、如何に数学の道具を正しく応用するかを認識できる Zimm の能力の美しい例である。彼はまた DNA の動的性質も研究した。彼の注意を捉えた問題のいくつかは、二重螺旋 DNA の融解や DNA の蛍光分極を如何に説明するかということであった。高分子の振る舞いの理解を追及していて、Zimm はそれら巨大分子を調べる助けとなる新しい技術を熱心に採用した。彼は、沈降やその他の輸送過程ならびに平衡にある対イオン分布に対する解析的理論の導出で使った仮定をテストするために、Monte Carlo など計算機による手段も利用した。最近では、Zimm は DNA の高分子電解質挙動に興味を持ち、課された電場の下でのゲル中の長い DNA 鎖の爬行運動に対する厳密な式を展開した。

UCSD に着任すると、Zimm は天然 DNA の真の長さを見つけるという長期の実験計画を開始した。当時、DNA の真のサイズは未知であったが、放射能写真撮影や電子顕微鏡観察からそれは信じられないほど長く、それ故脆いという証拠があった。再び、Zimm の創造的天才が登場する。単に概念においてだけではなく、その新しい概念を探索するための科学道具を設計し、製作するという点においてもである。Zimm は外筒が固定され、内筒が外部の磁力で回転するという逆の設計をもつ新しい発想の回転粘度計を考え付いた (1962)。この単純な逆転は、ズリ応力が固定され、ズリ速

度が測定されるという結果となり、応力を除いて長い DNA 分子が壊れる機会を減らすという条件を与えることになる。DNA は注射針を通して押し出すだけで、かかる応力のため簡単に切れることが知られていた。この発想が Zimm に起こったのは皿洗い機で日課の仕事をしている時だった。その時、彼は洗浄水の中でコップが回転しているのを見て、その回転運動から内筒を廻す利点を実感した。

回転粘度計に関する、Zimm と彼の学生 Don Crothers との最初の論文が 1963 年に出てから、その完全な改良型が出るまでには 10 年以上掛かった。鍵となる修正は DNA 溶液の中で自由に浮遊する浮沈子 (Cartesian-diver) を内筒にしたことだった。その修正は溶液粘度だけでなく、全く異なった性質である弾性回復の測定も可能にした。DNA はズリ応力が加えられているときは引き伸ばされており、応力が除かれるとランダムコイル状態に回復する。その結果、内筒の回転方向は反転する。その内筒の回転が止まるまでの時間が緩和時間あるいは遅延時間で、それは DNA のサイズに敏感である。緩和時間は系に含まれる最も長い分子に重みのかかったパラメータで、小さい汚染物質にはあまり影響されない。

DNA は、古典的には生化学者が子牛の胸腺あるいはえんどう豆の若木から DNA-蛋白質複合体として単離していた。1960 年までに、分子生物学者はバクテリオファージのような存在に注意を向け、その DNA の量を遺伝内容にざっと関連させることができた。DNA のサイズの決定における技術的問題は、DNA を傷つける事無く、全ての蛋白質を消化し去ることだった。実際、調製の間の損壊を防ぐために、Zimm のグループは回転粘度計の中で、彼らの調製液を Pronase のような蛋白質分解酵素で消化させた。

装置の新しい改良で、測定精度は良くなった。これらの優雅な研究の成就是、Zimm と生物学者 Ruth Kavenoff によるショウジョウバエ (*Drosophila*) の染色体 DNA の全長の測定であった (1973)。形態学的に異なったサイズの染色体を持つ異なった種のショウジョウバエからの染色体の使用は 20 億から 80 億 Dalton に亘る彼らの測定値を検証するための外部基準を与えた。止めの一撃として、彼らは短い染色体を持っていたショウジョウバエのミュータント種からの DNA を用いて、その測定値が顕微鏡で観察されたものと完全に相関することを示した。そのようにして、彼らは結果的

に各染色体は単一の DNA 分子から成っていることを示した。

これらの研究の過程で、分子量多分散性、分子形状などを説明する新しい理論が展開されねばならなかった。物理と数学の混合は、光学スキャンと電子回路に必要な装置の製作と合わさって、単に美しい。

.....

Zimm は彼の研究室から歩いて 10 分のところに住んでいて、毎日 2 度（一度は昼食のため）自宅と研究室を往復した。彼は永年 UCSD で高分子のコースを教えた。最初は大学院生のためのものであったが、後には大学上級生にも開放された。彼の説明は常に簡明で、決して“終わり (*pass outs*)”という言葉は使わなかった。1970 年代の半ば、タイから交換学生がやって来て、そのコースの綺麗な一連のノートを作った。彼女は帰国後、彼女の教師とともにそのノートをタイ語に翻訳した。

Zimm は黒板とチョークを好んだ、数式を展開するときには特にそうだった。セミナーでは、OHP を使った。彼が J. E. Mayer の大学院生だった Columbia 大学時代の毎週の教室セミナーでの話がある：演者がスライドを使うのを選んだ場合、そのスライドはプロジェクターにセットする前にシャッフルして順序をばらばらにしなければならなかった。それは時間を稼いで、聴衆が演者に就いていくのによりチャンスを与えるために考えられたことであった。

Zimm は専門的な大望の奴隷になる男ではなかった。彼の妻 Georgianna によると、「彼は賞とか認定とかを考慮しなかった。彼は楽しむために研究を行った。」という事である。彼は世界について熟考し、発見の喜びや世界が如何に機能しているか理解して歓喜した。

Zimm は小さなグループで研究する方を選んだ。彼は一度に 2、3 人の大学院生と僅かのポスドク以上はめったに取らなかった。それにも拘わらず、学生やポスドク達に、圧倒的多数が大学での経歴を積むということで、注目すべき遺産を残した。UCSD における彼の最初の学生とポスドクのグループの二人、Don Crothers と Vic Bloomfield は DNA 物理化学の萌芽的教科書を書いた。Zimm が彼のグループを小さなものに留めたのは、

彼がいつも完全に学生達と緊密にしており、彼らの考えに耳を傾け、彼らの問題を聞き出すための時間が要ったからである。Zimm は偉大な思索家ならびに最も天与の才を持つ化学者の一人であっただけでなく、素晴らしい聞き手でもあった。彼は同僚や学生達の思索、考え、疑問と並んで彼らの持っている問題にも耳を傾けた。彼は、実験であれ理論であれ、彼らの問題を底まで突き詰めるように何時も意図的に努力した。彼はまた自分自身のためにも考える時間が欲しかった。彼の経歴を通して、彼の論文の多くは単著である。

彼の実験と理論の両方における熟達に調和して、Zimm は考えることと同じくらい手で働くことを楽しんだ。研究と実験室は彼にとって仕事以上に趣味といったようなものであった。UCSD の彼の実験室には長年に亘って集めた道具にあふれた部屋があった。道具類には、硝子細工用の器具(ダイヤモンドのこぎり、パーナーなど)、電気用具(ハンダ付け用ガン、オシロスコープ、回路板など)、Zimm の好みの玩具の旋盤などがあった。当然 Zimm は、下手な修繕への好みを彼と共有して、その部屋を利用する学生を持つことを喜んだ。しかしながら、その部屋に一人で残されることはめったになかった。その部屋の入り口は Zimm の部屋の真向かいにあって、気づかれずに入ることは難しかった。ひとたび旋盤が廻り始めると、Zimm が現れて、微笑みながら、「助けは要りませんか?」と尋ねた。

彫刻家の父と作家の母から受け継いで、Zimm は美術工芸と音楽を深く評価した。彼はクラリネットの演奏を愛した。長年の間、金曜の昼食時には彼の部屋で二重奏曲の演奏があり、実験室ではホールを横切って発散してくる Bach を聞くことができた。

Zimm はドイツ語および英語で幅広く読書していた。彼は Columbia 大学での学生時代に Max Born の「光学」のドイツ語原書版を読んで光散乱の理論を学んでいた。一度彼は、Born の優美なドイツ語を読むという演習の後では、他のドイツ語を読むのは易しいことが分かったと記している。彼は後に、ファンであった Ludwig Boltzmann の 1905 年における Berkeley での 6ヶ月の滞在の回顧録、「ドイツ人教授の黄金郷への旅」(*Reise eines deutschen Professors ins Eldorado*) を単に満足のためだけに翻訳している。同時期に、他の人が既に翻訳していたので出版はできなかった。この回顧録の中に、Boltzmann の言葉「… 本当に偉大な科学の進歩は(これ



図 3.13 趣味を楽しむ Zimm

はわが国の教育大臣には聞かせられないが) 常に最小の資金と最小の道具立てによってなされるものだ。…… 私にとってはるかに偉大に思えるのは、つつましやかな小屋で、ささやかな資金・設備でもって、根源的な真理を発見することである。そういう真理は、いつまでも人類の知的文化の基盤であり続ける。…… ピタゴラスの定理やアルキメデスの原理はまさに不滅である。…」がある。

Zimm はまた熱烈なセイラーであり、彼の美しい木のノルウェー式ヨット “*Altair*” を浮かべていた。彼はそれを維持しているのを自慢にしており、ときには、ペンキ塗りとか磨き上げるとかに学生の一人か二人の助けを求めた。その後はいつも帆走に招待した。

Bruno Hasbrouck Zimm は 2005 年 11 月 26 日パーキンソン病との長く苦しい闘いの後、California 州 La Jolla にある UCSD の Thornton 病院で亡くなった。直接の死因は肺炎で、85 才であった。

## 参考文献

1. Walter H. Stockmayer and Bruno H. Zimm, *Ann. Rev. Phys. Chem.*, **35**, 1-21 (1984).
2. Marshall Fixman, Hyuk Yu, and Jane E. G. Lipson, “*Walter Hugo Stockmayer*,” *Physics Today*, 84 (2004).
3. Marshall Fixman, Hyuk Yu, and Jane E. G. Lipson, “*Walter Hugo Stockmayer*,” *The Nucleus April*, 17-18 (2005).
4. Ronald Koningsveld and Marshall Fixman, “*Walter Hugo Stockmayer 70*,” *Macromolecules*, **17**, 507-508 (1984).
5. Carol B. Post and Russell F. Doolittle, “*Bruno Hasbrouck Zimm*,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
6. Rusell F. Doolittle, “*Obituary; Bruno H. Zimm (1920-2005)*,” *Protein Science*, **15**, 942-944 (2006).

## 4章 溶液の統計力学

### 4.1 Raymond Matthew Fuoss

Fuoss は 1905 年 9 月 28 日アメリカ合衆国 Pennsylvania 州 Bellwood で生まれた。<sup>1</sup> 彼は、当時栄えていた工場地帯で鉄道の拠点であった Pennsylvania 州の Altoona にある Altoona 高校に通った。

Fuoss は 1922 年 17 才で Harvard 大学に入学した。そこでの彼の主要な関心は有機化学であったが、最終学年の前の夏に、G. S. Forbes 教授の個人実験助手として働いているうちに電気化学への興味を開いた。彼は 1925 年に、塩素、沃素、塩酸、水の系における酸化電位と平衡に関する最初の論文を Forbes と S. W. Glass とともに出版した。2 番目の Forbes との論文は 1927 年で、塩酸中での臭素と塩化物イオンとの反応であった。

Harvard 大学では彼は Coolidge と Birkhoff から数学を学んだ。それは、全ての学部学生に 4 年間の毎年、科学と数学を取るように期待されていた時代だったからであった。彼はまた、ドイツ語を勉強した。それは彼の生涯に亘る語学への興味の始まりであった。Pennsylvania の工業都市から来た小さい、エネルギーにあふれた少年であった Fuoss がどのようにして Harvard に適応したのかを推測するのは興味がある。Fuoss は 4 年間のカリキュラムを 3 年で完成し、1925 年 20 才で、最優秀学生として Harvard 大学を卒業した。彼は、少なくとも観戦者として、フットボールに関心を持っていたように見える。彼は Harvard 大学への忠誠心を持ち続け、Yale 大学時代も New Haven の小さな Harvard Club に参加した。

Fuoss は Sheldon 奨学金を得て 1925 年から 1926 年まで、Munich 大学で学んだ。彼が天命を知ったのは Munich でだった。最優秀 Harvard 卒業生としてではなかったであろうが、彼は有機化学に能力があると思っていた。それは、Wieland と胆汁酸の構造の研究をしていた途中で、変わっ



図 4.1 Raymond Matthew Fuoss (1905/9/28–1987/12/1)

た。彼の最初の考えは、有機化学で学位 (Ph.D.) の研究をすることだった。しかし、胆汁酸中の二重結合の位置を見つけることの困難さと並んで、熱力学と物理化学の講義を受けたことが彼を物理化学への転進に導いた。彼は Fajans の熱力学の講義に出席した。Lange も当時 Munich 大学にいた。Munich 大学にいた年月の間にでた唯一の論文は Lange とのもので、塩化銀の結晶化熱の濃度依存性についてだった。

米国に戻って、Fuoss は Rose Elizabeth Harrington と結婚した。1 学期間、彼は Harvard 大学の化学 B の Austin 教師をした。その後、1927 年、彼は Boston にある Skinner 社、Sherman 社、Esselen 社の化学顧問になった。彼は、夜間と週末に化学から船舶科学までの広い課題について、学部学生の教師 (tutor) をして余分の金を稼いだ。顧問と教師が彼に十分な資金をもたらし、彼は 1930 年 9 月までに彼は大学院の研究を再開することができた。

Fuoss は C. A. Kraus 教授と大学院の研究をするために Brown 大学に入学した。Fuoss は様々な溶媒中での電解質の電導度に関して大量のデータを集めるという考えを持っていた。Kraus は創意に富んだ、独創的思索家であった。電解質への科学的興味は Debye の 1923 年の論文で刺激された。しかし、異なる実験結果を系統的に理解する方法はないように見えた。Kraus は多くの溶媒と溶質で実験することを企図し、液体アンモニア

を液体シアン化水素のように変えた溶媒の性質を測定した。巧妙な溶媒の選択によって、広い誘電率と粘度範囲に亘る電導度のデータを採ることができた。電導度はまた、温度の函数として測定された。

Lars Onsager は当時 Brown 大学にいた。Fuoss は彼の講義に出席した。それが 35 年以上に広がる協力の始まりであった。彼らが電解質の不可逆過程について書いた 1932 年の論文は *Journal of Physical Chemistry* に 89 ページを占めた。その論文は、1950 年代に再び彼らを取り上げるまで、その課題の確固とした取り扱いを受け続けた。Fuoss はデータを持っていた広範な溶媒と溶質に対する電導度は、溶媒を巨視的な値の誘電率と粘度の連続媒体とする溶液中のイオン間の静電相互作用で理解できることを悟った。

Fuoss の学位論文の課題は非水溶媒中の電解質の性質であった。それは Onsager の指導の下で、2 年間で 1932 年に完成した。ペースは加速した。Fuoss は 1932 年 Brown 大学で研究講師に任命された。後で、Kraus が Fuoss のために創設した地位である、研究助教授になった。Fuoss の能力に気づいた Kraus は彼に教育を広めるよう激励した。Fuoss は夏の間 Michigan 大学に行き、Sommerfeld と Pauli による量子力学の講義にでた。1933 年彼は Brown 大学から休暇を取って国際特別研究奨学金 (International Research Fellowship) でドイツへ行き、Leipzig 大学の P. Debye と 1 年間、Jena の M. Wein と短期間、研究した。彼はまた、統計力学の経験を得るため、ひと夏を Cambridge 大学の Fowler と過ごした。量子力学は Fuoss の研究にとって何の役も果たさなかったが、彼は多年の間、Yale 大学の物理化学者に第一学期の量子力学を教えた。

Brown 大学の時代の研究は 30 報の論文を生み出した。多くは Kraus との共著だった。そのいくつかは Fuoss が Brown を去ってから永年にわたって出版された。それらの論文は実験と理論がほぼ半々である。実験研究の多くは純溶媒あるいは混合溶媒中の広範な有機および無機の塩の高い精度での電導度測定だった。測定できる溶液中の不可逆過程のうち、電導度は最高の精度で測定でき、理論の最も良いテストを提供した。ゴールは電導度に影響する広範なパラメータに亘ってデータを集積することだった。一連のサイズと形状の陰イオンと陽イオンを持つ強電解質、弱電解質、その中間のものが用いられた。また、低い値から高い値までの誘電率と粘度

を持つ溶媒が用いられた。可溶性混合物が溶媒の物理特性を連続的に変える手段を与えた。その研究は、塩と溶媒の純度に特に注意を払ったことに特徴を持つ。Fuoss の有機合成と精製の経験が本質であった。測定そのものは当時可能な最高精度でなされ、Fuoss の全ての研究の象徴であった繊細さと詳細への注意を示すものであった。温度は  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  内に制御され、濃度は  $0.1\%$  以上の精度で決定された。電導度セルの多くは独自の設計で、安定でなければならなかった。測定はあらゆる電極効果を除去し、溶液の加熱を避ける方法でなされねばならなかった。

理論的研究は、高誘電率溶媒中の強電解質の電導度に対する Debye-Hückel-Onsager の取り扱いの一つの拡張であった。その論文の多くは弱電解質、溶質粒子間の会合定数と静電力の関係についてのものだった。伝導方程式の解と定数、極限電導度  $\Lambda_0$  と会合定数  $K_A$ 、の評価に関する数学的論文もあった。Fuoss は自分自身の電導度の測定結果を持っていたから、理論と実験の比較は直接的だった。新しい系それぞれが回答と疑問を与え、その疑問は更なる実験と、理論の改良によってのみ答えることができた。その期間に出された彼の論文のいくつかは実験と理論の双方でなされた進歩についての総説である。それらは非常に簡明で、データの編集と実験の理論的理解の要約とを含んでいる。

Fuoss が行った研究計画は、実験、計算、理論の全てで最高水準を要求した。有機化学者、物理化学者、連続体力学の理論家、と数学者の技量を併せ持つ科学者だけが成功する望みを持ち得た。Fuoss にとってそれは理想的な選択であった。

1935年、Fuoss は30才になり、永年に亘って米国最高の工業会社の研究所となる General Electric (GE) 研究所と接触した。彼はその夏を顧問として Schenectady で過ごした。それは“大恐慌”の最中で、大学の研究に手に入る予算はなかった。General Electric 研究所は大学の研究所が太刀打ちできない水準の設備と支援を提供した。Fuoss は翌年その研究所の永久職所員に加わった。

Fuoss が GE に加わった時の高分子の状況は、数年前の電気化学の状況に似ていた。高分子の電気的性質について大量のデータがあったが、それらの質を評価するのは難しかった。それがなされるまで、高分子の組成を

その物理的、電気的性質に関係づける望みはほとんどなかった。表面効果を除き、高分子のイオン含量を制御することによって、Fuoss は首尾一貫した再現性のある測定結果を得ることができた。それから、極性高分子の誘電応答が、極性基の性質と、極性基が時間変動する外部電場に追従できる程度とに依存していることが明らかになった。与えられた極性高分子の誘電特性が変化する周波数範囲は可塑剤濃度および可塑剤分子のサイズと形状に依存することが発見された。1937年と1945年の間にFuossは固体の電気特性についての論文を26報発表した。それらの殆どは第二次世界大戦の勃発前になされた研究に基いていた。戦争中は極秘扱いの課題を研究した。

1945年戦争が終わった後、FuossはYale大学における化学教室の最初のSterling教授を引き受けた。彼の資質は当時の教室に完全に適合していた。Yale大学にはLars OnsagerとJohn G. Kirkwoodがいた。この二人は統計力学理論の世界的指導者で、二人ともFuossとともに重要な論文を出していた。電気化学の最高度の才能を持つ実験家Herbert HarnedとBenton Owenもいた。数年後、Andrew PattersonとPhillip Lyonsが教授会に加わった。Fuossが教授会に加わって、教室は電解質、高分子、統計力学の研究で、国一番と考え得るようになった。Fuossは40才で、未だ限りない活力を持っており、それぞれの分野で重要な貢献をした。その任命は大学での研究、教育、大学院生の訓練に復帰する機会を探していたFuossにとって、好機であった。再び、彼は、他人に示唆されたものではなく自分に興味がある課題の研究を行った。しかし、彼は非実際的ではなく、応用研究にも反対しなかった。工業界の顧問業はHarvard大学卒業以来の年月における彼の重要な活動であった。Yale大学でも、彼は工業界と接触し、Dupont社、Monsanto社、California研究法人、Arthur D. Little社の顧問を続けた。

Yale大学に着任して、電解質や高分子の経験を引かずった新しい方向の研究を開始した。その研究は高分子電解質、すなわち高分子鎖の長さに沿った全てに正電荷を持った高分子の性質に関するものだった。正電荷の相互反撥で高分子鎖のコンフォメーションは変化し、高分子電解質溶液の粘度や電導度が溶質濃度の函数として劇的に変化した。Fuossは多くの高分子電解質を合成し、様々な純溶媒およびそれに単純な電解質を添加した

溶媒の中でのそれらの物性を測定した。彼は、高分子の構造と分子内および分子間静電相互作用を取り入れた分子モデルでその結果を説明することができた。高分子電解質、蛋白質、細胞膜の間の類似性は明らかであった。しかし、高分子電解質の研究結果を蛋白質に応用することは当時明らかではなかった。1950年代に入っても続くその研究は、徐々に多様な溶媒中における 1:1 電解質の理論的ならびに実験的研究に置き換えられていった。

Onsager と一緒に、Fuoss は電気伝導の Debye-Hückel-Onsager 理論における仮定と近似を体系的に再検査した。高次項を残すことで、Fuoss は低誘電率溶媒中の電解質に対して為されたイオン会合の場合当たりのな (ad hoc) 仮定はもはや不要であることを見出した。イオン会合と類似の項が改良された伝導方程式に現れた。この理論的厳密さのために支払った代金は 2 番目のパラメータ、イオン半径  $a_0$  の出現とずっと複雑な方程式であった。 $a_0$  は新しいイオン会合項と流体力学項の一つとに現れた。原理的に、それら二つの項から導かれる  $a_0$  の値は同一であるべきであった。これが成り立つかどうかは、以前にも増してより高い精度の電導度データに基く適切な実験的テストと、それらのデータから物理的パラメータを引き出す信頼できる数値解析に懸っていた。典型的活力と計画でもって、Fuoss と学生達は、相対精度 0.01% の測定が日常である電導度実験室を造りあげた。データ解析は Yale 大学計算機センターの一連の計算機で成された。新しい理論は完全な成功ではなかった。多くの溶質-溶媒の組み合わせに対して、伝導方程式の流体力学項から得られたイオン半径は本質的に流体力学半径に等しかった、しかし、低誘電率溶媒に対して、かなりの差があった。Fuoss の科学の経歴の残りの多くはこの差の原因の探求と伝導方程式の導出におけるより良い近似を探すことに捧げられた。1974 年 Fuoss は Yale 大学を引退したが、活発な電解質の研究は続けた。1974 年から 1980 年の間に 22 報の論文を出している。

Fuoss の語学の才は異常で、それにより多くを成し遂げた。彼は 19 の言語を読み、話し、理解することができた。彼は余技あるいは趣味として、彼の関心事を外国語で話した。彼は広く旅行し、数力国の研究者と協同した。その際、その国の言語を常に習得した。彼は Paris 大学ではフランス語で、Rome 大学と Palermo 大学ではイタリア語で、Ankara 工科大学で

はトルコ語で、Weizman 研究所と Hebrew 大学ではヘブライ語で講義した。それは言語学に興味があったのと同じくらい、彼の周りで何が起きているのかを理解するための努力であった。勿論、言語は人に心の中で、多くの対象、単語を組織化してパターンを見出すことを要求する。それは Fuoss が研究でベストを尽くした事であって、彼がその技能を言語の分野に応用できたのは驚くことではない。

Fuoss は教えることにも長けており、それを楽しんだ。彼は日常的に大学院課程で、物理化学者のための数学、応用数学の観点からの量子力学、高分子化学、電気化学を講義した。講義は正確に計画され、全てがよく構成してあって明解であって、余談はなかった。学生は、鼓舞されないにしても、出された材料は勤勉に勉強すれば修得できるという最低限の確信を持ってそれらの講義を離れることができた。神秘的な点も想像による飛躍もなかった。彼の研究グループでは、経験を積んだ協同研究者であれ、初年度の大学院生であれ、全てのメンバーがよく定義されたプロジェクトを持っていた。厳密な形式によって組織された月例の報告が、全ての人から毎月最初の月曜日までに出された。それらはすぐに読まれ、修正付きで返された。週に3回、昼食時にグループの文献セミナーがあった。大学院生の目からはそうは見えなかったが、Fuoss は彼のグループのメンバーの能力と限界を鋭く見抜いていた。それは彼が彼らに与えた課題や彼が提供した助けに反映していた。彼はしばしば「いらち」で剣呑であったが、また、激励したり、親切であったりした。彼の哲学は、研究経歴は大学院でできるものではなく、卒業後にできるものであるというものであった。彼は訓練を与え、技能を教えた。学生が研究者として成功するかどうかは学位 (Ph.D.) を得てから何をするかに懸っているということであった。Fuoss のシステムでは学位を得るには3年から4年かかった。(Fuoss 自身が2年で終えたのは特筆すべきことである。) そのスケジュールには余分な時間はなかった。しかし、結果は保証されていた。Fuoss の学生の大部分は大学やその他の研究者の位置にいる。

Fuoss とはどんな人物だったのか? 彼はエネルギーで、力強く、せっかちだった。失う時間はなかった。全ての日常の仕事はすぐその場でトップスピードでし遂げねばならなかった。それはもっと重要な研究の時間を確保するためだった。彼は彼の研究にひたむきだった。彼は他の人

の云うことに耳を傾けたが、それは大抵の場合彼らの言い訳に間違いを見つげるためだった。彼は彼の研究と論文を攻撃的に守った。しかし、彼は公正で、他人の研究の評価では妥協した。



図 4.2 Lars Onsager (1903/11/27–1976/10/5)

## 4.2 Lars Onsager

Onsager は 1903 年 11 月 27 日 ノルウェイの Kristiania (現在の Oslo) で生まれた。<sup>2,3</sup> 彼の父は法廷弁護士 (法律家) だった。家族は鉄鋼業に事業を持っていたと言われる。後に Onsager は彼の父が鉄鋼王 (tycoon: 大君) であったことを否定しようと骨折っていた。彼の初期の教育は教養的なものだった。後に彼の友人は、彼が古典文学や哲学をよく読んでいて、音楽や美術の嗜好がよかったことを認めている。彼は Oslo の高校に通い、若くして叙事詩を含むノルウェイ文学に親しんだ。

1920 年、Onsager はノルウェイ工科大学 (Norges Tekniske Hogskole) に入学し、工学の経歴の準備として化学工学を勉強した。しかし、彼の好みは主に知的なものであった。彼は既に Whittaker と Watson の専門書 “Modern Analysis” を買っていて、余分な時間に悪名高いほど難しい例題の多くを解いていた。この初期の訓練が、後の最も輝かしい業績のいくつか、2次元のイジング問題の有名な解、のための装備を与えた。

他の面も同様に、ノルウェイ工科大学の学生としての Onsager の時間

は彼の後の科学研究の前兆だった。化学の1年生として、彼は電解質溶液の当時の理論を知った。それによれば、一つの電解質の性質は、分子にわたってではなく、構成しているイオンにわたって可成的であるべきだった。彼は後に言った：

「ある種の理想化に拘わらず、それは非常に多くの目的に対して十分だった。それは多くの仕事をすっかり容易にし、我々はそれを永遠に感謝した。しかしながら、まもなく教科書ではなく、文献が私にその描像に全く合わない多くの観測結果を、ずれの一時的な説明をつけて教えた。疑問の中心はイオン間の長距離力であった。」

この「文献」の参照は、Onsager が既に、後に深い科学的独創性へと花開かせた独立心を働かせていたことを示している。Debye と Hückel が 1923 年に電解質溶液の新しい理論を出版した時、Onsager はすぐに彼らの考えを修得し、彼らの電気伝導度と拡散の説明に欠陥を見つけた。今や彼の名を冠している相反則に彼を最終的に導いたのはそれらの過程についての彼自身の考えであった。しかし、それと並んで彼の思考に影響したのは、互変異性の動力学に対する C. N. Riiber の実験的研究であった。Onsager は微視的な可逆性の原理に照らして、1924 年に既にそれを考え始めていた。彼は、3 つかそれ以上の互変異性体が平衡状態で存在しているとき、その原理は化学的な“循環”がない場合にも役に立つ詳細な釣り合いに対する十分条件を与えるだろうと見た。同じ原理が、他の自発過程の相対速度との関係へと到達させてくれるかも知れないと、彼は考えた。

Trondheim での 5 年間に、Onsager は、後に印象的に使用する数学の技能と、彼の人生で連続的に注目を繰り返した電解質への興味を獲得しただけでなく、理論と実験の関係および彼の考えの実験的テストを理論家が提案する義務を深く理解するようになった。少なくとも、熱拡散、コロイド溶液、乱流への彼の後の関心が化学工学の訓練から生まれたのはありそうなことである。ともかく、最終的に彼は 1925 年、化学工学士 (Ch. E.) として卒業した。そのとき、もっとも恐ろしい知性が科学の場面に登場した。

1925 年 Zürich に Onsager を連れて行ったのは電解質への彼の興味だった。Debye とその助手 Erich Hückel が電解質溶液の新しい理論を提出していた。それは、溶解しているイオンの静電場は、有効遮蔽距離がイオン

強度  $c$  に逆比例する、正味の反対電荷の雰囲気で遮蔽されているという考えに基いたものであった。 $c$  は次式

$$c = \sum_i c_i z_i^2 \quad (4.1)$$

で与えられる。ここで、 $c_i$  はイオン  $i$  の濃度、 $z_i$  はその基本単位での電荷である。任意のイオンの活量係数  $f_i$  ( $c_i$  で割った熱力学活量) は小さい  $c$  に対して次式から計算できる。

$$\ln f_i = A_i \sqrt{c} \quad (4.2)$$

式中、 $A_i$  は電荷  $z_i$ 、温度  $T$ 、溶媒の誘電率  $D$  の函数である。この理論は稀薄塩溶液の熱力学的性質を定量的に説明することに成功した。しかし、Debye と Hückel の理論は電解質の電気伝導度を扱うように拡張したとき、困難にぶつかった。彼らのモル電導度  $\Lambda$  に対する式

$$\Lambda = \Lambda_0 + \Lambda_1 \sqrt{c} \quad (4.3)$$

は形式的には正しそうに見えたが、 $\Lambda_1$  の計算値は  $T$  と  $D$  に依存し、実験値とは大きく違っていた。

最も重要な物理的效果は取り入れられているように見えたから、それは困惑させられることだった。その重要な効果とは、雰囲気中の対イオンが溶媒を間違った方向に引っ張り、中心のイオンを上流に泳ぐことを必要とさせる電気泳動効果と、そのイオンが雰囲気自身の正味の引力で引き戻される緩和効果である。

物理的な描像の一般的正しさを受け入れて、Onsager は自分でその深い意味を探求し、1923 年にそこそこの、しかし確固とした結果を生み出した。彼はそれを以下のように記す：

「緩和効果は陰イオンと陽イオンの易動度を同じ比率で減じさせる。驚くことに、Debye と Hückel の結果はその関係を満たさないばかりでなく、イオン A が B の西  $10\text{\AA}$  にあれば、A の東  $10\text{\AA}$  に B があるという要請も満たさない。明らかに何か本質的な事柄が、そのような非対称な結果の導出に置き忘れられている。」

1925 年のある日、Debye が Zürich の Eidgenössische 工科大学 (ETH) の自分の部屋に座っていたとき、ノルウェイから訪問者があると告げられ

た。背の高い若い男が入ってきて黙って部屋を横切って歩いてきて、机にかがみこみ、厳粛に「Debye 教授、あなたの電解質の理論は間違っている。」と言った。Debye はその見知らぬ人に座るように頼み、彼の異論を議論するよう誘った。Debye は翌年彼に助手を提供した。その男が Onsager であった。

Onsager は Debye を訪ねる 1925 年までにずれの原因を正確に指摘していた。Debye と Hückel は  $\Lambda_1$  を評価する際、一つの特定のイオンは直線上を一様に動くことと仮定し、他のイオンはそれらの歪んだ雰囲気の場に従った Brown 運動をさせていた。要求されるのは、中心のイオンが一樣運動をするという制限を緩め、隣接イオンと同様に、それらの影響と外部電場の影響の下で自由に動くことを許すことだけだった。このようにして、望む対称性が回復され、 $\Lambda_1$  の計算値は実験とよく一致するようになった。

Debye はこの驚くべき洞察に深い印象を受け、若い批判者を天才と褒めた。彼は 1926 年 4 月、Onsager を研究助手として採ることで誠実さを示した。

Onsager の極限則は 1926 年と 1927 年の一組の論文の 2 番目に最初に提出された。それらの論文の明らかな徹底と完成度は疑いなく Debye の影響に負うものであった。Onsager は、電解質の研究と、後の極性液体および極性分子の溶液の誘電率の研究とにおいて、Debye の肩に乗ったことを認めた最初の人物であった。続く数年間の間に、Shedlovsky の注意深い実験的研究が高い精度で「極限則」を確認した。Onsager は、特に Raymond M. Fuoss と協同で、その後何年もの間電気輸送の理論を展開し続けた。しかし、そうしているうちに、彼の思考はより一般的な問題、より広い視野の地平に向かい始めた

1928 年、Onsager は米国に移住し、John Hopkins 大学の化学の準教授に任命された。その任命は短期に終わった。40 年以上 Onsager の仲間の一人だった Robert H. Cole の言葉では、

「彼らは Onsager に基礎化学 I、II のコースを割り当てるという過ちを犯した。彼は新入生の水準で考えることはできなかった。あからさまに言うと、彼は解雇された。」

ということである。



図 4.3 少し若い Onsager

Onsager のより知性の弱い人間との会話の困難さは深刻で、それは彼の生涯を通してそのままだった。物理的現実をそれほど深く見抜くことができる人間が、他人の心を読むことになったときそんなにも群を抜いて想像力を欠くことになるのは奇妙に見えるかも知れない。しかし、彼に会った殆ど全ての人はこの能力欠陥にすぐ気づくようになった。Cole 教授は続ける:

「敢えて言うと、彼は世界最悪の講師だった。しかし、彼は確かに主張を持っていた。とにかく、彼は理解するのが難しかった。彼はまた、学生に背を向けて黒板に向かって書くという講義の習慣を持っていた。学生達は彼を廻りこんで覗き込み、何が書かれたのかを見ようとするしかなかった。」

Onsager の劣った連中との会話の問題は確かにせっかちさや尊大さによるものではなかった。数年後彼を知ることになった理論化学者 Julian Gibbs は Onsager について書いている: 「彼は非常に、非常に友情厚い人間で、彼は彼の聞き手が彼と同じ程度に考えを進めていることを常に仮定していた。彼は議論している課題が何であっても、彼がそれを知っていたら、その分野の他の人も自動的にそれを知っているということを仮定していた。」

Onsager が理解し難いことを見出したのは学生達だけではなかった。彼の同僚も同じ困難を持った。ポスドクとして彼と研究した Oliver Penrose は何年も経った後で、Cambridge の Kapitza Club での講義を思い出して

いる。そこで、Onsager はイジング格子についての Bruria Kaufman との共同研究を説明していた。彼は非理論家がいるだろうこと、そして話にあまり技術用語を使い過ぎることがないように予め忠告されていた。しかし、彼はスピノル (spinor) 代数の数学に突き進んだ。20 分ほど経過後、聴衆のなかの多くの実験家の一人が勇気を奮い起こしてスピノル (a spinor) とは何かを彼に尋ねた。Onsager は考えて答えた: 「スピノルでなく、スピノルのセット (A spinor—no, a set of spinors) は直交群と同型の行列のセットです。」それとともに、彼の周りで当惑している顔に、ノルウェイ風の青い目を瞬かせ、有名な Onsager の微笑みを与えた。そして、何事もなかったかのように講義を続けた。

Cyril Domb は書いた: 「個人的な議論では、解らなかつた時に質問し続けるという勇気を持っていたとしたら Onsager と会話することはずっと易しい。彼は、そのギャップに橋が架けられるまで一時に一段階ずつ水準を下げるでしょう。」

1962 年彼を称えてもたれた会議の予稿集の序文で、Shedlovsky と Montroll は彼を擁護して言う:

「当たっているかどうか判らないが、Onsager は言語不明瞭、あるいは少なくとも暗号的であるという評判を持っている。しかし、彼を知る人は、北欧神話、園芸、チェスの微妙な局面についての質問を彼にすれば、彼は明解そのもので、しばしば十分な長さで対応することを証言するでしょう。」

彼と研究した誰もが、彼が時間とアイデアを惜しみなく与えたことを証言した。

そこで、Onsager は移動しなければならなかつた。幸い、Brwon 大学に空きがあった。そこには化学教室の学科長である Charles A. Kraus がいた。この二人は非常に異なっており、Onsager が高度の力を持つ理論家であつたのに対し、Kraus は抜け目のない実験家であつた。Cole の報告によると、「Kraus は Onsager が Brown 大学にふさわしいことを知っており、彼を研究講師として署名した。Brwon 大学の Onsager の年代のカタログを見ると、ページの一番下に Mr. Onsager とリストされているのが見られる。それは彼が学位 (Ph. D.) を持っていなかつた事実を示している。彼は Brown 大学でノーベル賞につながつた全ての研究を、学位の利

点なしに行った。」

劣った科学者なら、Onsager が 5 年間見続けねばならなかった知的孤立によって落胆していたかも知れないだろう。彼が研究していた課題や彼が展開していた考えは教室の同僚には殆ど訴えかけなかった。1931 年に現れた不可逆過程に対する彼の古典的研究について、1973 年彼は云った：「それは疑いかなかった。しかし完全に無視された。」Stig Claesson は、Onsager の考えを完全に導入することが認められるまで長時間懸ったことにコメントして、「それが大きな注目を惹いたのは第二次世界大戦後までではなかった。その男は時代の最先頭にいた。」と言った。

教室の長として Kraus は常に全ての時間を理論研究に費やすより、何か実験をするように Onsager に求めていた。ある日 Onsager は彼に熱拡散によって同位体を分離する実験を試すことに決めたことを告げた。Kraus は「結構 (Fine)」と言い、Onsager が必要な設備は長いチューブだけだと話したとき二重に喜んだ。しかし彼の激励は、Onsager がそのチューブは白金で作らねばならず、化学の建物の地下から 3 階まで延びていなければならぬと説明したとき、速やかに撤回された。Kraus は再び実験をするようにと彼を困らせる事は決してなかった。Julian Gibbs は書いている：「それは悪すぎた。というのは、原爆のための Manhattan プロジェクトの一つとしてそれが必要になった 10 年後まで、その実験を進めるのに成功した者はいなかったから。」

Brown 大学での Onsager の言語上の努力は John Hopkins 大学におけるより効果的であることは殆どなかった。しかし、その努力は一つの主要な変化を導いた。Brown 大学卒業生の John F. Ryan は Onsager の統計力学のコースを思い起こして言っている：「彼がそのコースを取っていた年、新入生がそれに出席していた。2 回目の講義の初めに Onsager は黒板に典型的な難しい式を書いて、聴衆を振り返り、希望を持って「解る？」と言った。重苦しい沈黙をその新入生が破った。「しかし、それは単位ベクトルとの掛け算であるべきではありませんか？」Onsager はくると黒板の方に廻って、「そうだそうだ」と叫んで単位ベクトルの記号を書いた。そしてそのクラスならびに世界一般に微笑みかけた。彼は彼を理解する弟子を見つけた。そのコースの残りは彼ら二人の二重唱であった。それは理解できないことであらう残りの学生達に目撃されたことであ

る。その新入生は Ray Fuoss で、彼は Onsager との共同で学位 (Ph. D.) を取り、彼の最初の共著者になった。Yale 大学で再び一緒になり、彼と Onsager は続く 35 年間多くの論文で協力した。

Brown 大学で教育課程の要求に合わせるように闘っていた間も、Onsager の心は不可逆過程の速度でいっぱいであった。彼は既に溶解したイオンの電場中における運動に多くの考えを持っており、その問題を拡散と電気伝導を結びつけた場合に一般化することでより良い見通しを得ることができると感じていた。イオンにかかる力は式

$$k_i = -\nabla\mu_i - e_i\nabla\phi \quad (4.4)$$

と表せる。ここで、 $\nabla\mu_i$  と  $\nabla\phi$  は化学ポテンシャルと電気ポテンシャルの勾配で、 $e_i$  はイオンの電荷である。彼自身の電解質における輸送理論はイオン流束  $J_i$  をイオンに働く力の線型結合として与えていた。

$$J_i = \sum_j L_{ij}k_j \quad (4.5)$$

係数  $L_{ij}$  は例外なく対称行列を作った。

この対称性は理論におけるどんな数学的近似にも依らないことがすぐに明らかになった。ノーベル賞受賞講演で彼は述べている：

「緩和効果に対して、私は Newton の作用-反作用の原理に頼ることができた。流体力学のあらゆる複雑なことに対して、Helmholtz に導かれた最小散逸の原理が対称性を保証した。私は Brown 運動の動力学についていくつかの矛盾のない枠組みを仮定したことは認めるが、それでさえ、本質ではないように見えた。」

この時点で、彼の考えは砂糖の互変異性についての Riiber の正確な実験的研究に戻った。Riiber はガラクト - スが少なくとも 3 つの互変異型で存在することを発見していた。その相互変換は、

「数学に少し問題を引き起こした。それを解析する際、私は平衡状態では  $1 \rightarrow 2$  の反応は  $2 \rightarrow 1$  の反応とちょうど同じ頻度で起こることなどを、平衡に対する必要条件ではなかったけれども、仮定した。平衡は循環反応によっても保持されるだろう。」

言い換えると、Onsager は物理的見地から、そのような平衡状態は詳細

釣り合いの原理に合致しなければならないと確信していた。彼はその原理が熱力学的に最小散逸の原理と同等であることを示すことができた。

「私は最小散逸原理を強く信頼するようになり、それがどう云う訳か Helmholtz の拡散電池の理論や Kelvin の熱電子現象の理論に用いられてきたことに気づいた。」

Kelvin は、Seebeck 効果 (熱電対中の電流の発生) と Peltier 効果 (電流を流すことによるバイメタル回路中の温度勾配の形成) を結びつける熱電子の準熱力学理論を提出していた。しかしながら、Kelvin の理論は熱力学の第一原理から誘導できなかった。Helmholtz の拡散ポテンシャルの理論もまたできなかった。

「何年か後 Zürich にいたとき、P. Scherrer との会話で、私は彼が詳細釣り合いについての G. N. Lewis の考えに強い印象を受けたことを知った。これが私に荷車を馬の後ろに繋がせた。私は微視的な可逆性の条件を輸送仮定に適用する方法を探した。しばらくして私はその問題への手がかりを見つけた: ランダムな熱運動による分子とエネルギーの分布中の自然な揺らぎである。Boltzmann が定式化した原理に依れば、熱平衡と化学平衡の本質は統計である。自発的なずれの統計は随伴する熱力学特性函数、すなわちエントロピーの変化で決定される。ここに熱力学との固い繋がりがあある。そこで私は平衡からの自発的なずれは人工的に造ったものと同じ法則にしたがって減衰すると仮定して、輸送の法則とそれを結びつけた。」

この線の考えを探求するために、Onsager は、空間的に不均一な系の平衡から離れた小さな揺らぎとそれに関連するエントロピー不足を記述するための尺度を見つけねばならなかった。物理的洞察の独特の単純さと深さで、彼は非平衡パラメータに質量とエネルギーのある中心の平衡位置からのずれ  $\alpha_i$  を選んだ。このようにして、固体中の小さい温度勾配はエネルギー中心の平衡位置位置からのベクトル距離 (ずれ) に小さい有限の値を割り当てることで表されうる。そして結果として起こる熱流動はこのずれの 0 値への回帰として現れる。非平衡状態そのものは、 $\alpha_i$  に特定の値を持たせて、エントロピー  $S$  を極大にする ensemble (集合) で表される。 $\alpha_i$  と共役な「力」 $X_i$  はそのずれに関する  $S$  の偏微分で与えられる:

$$X_i = \left( \frac{\partial S}{\partial \alpha_i} \right) \quad (4.6)$$

特定の揺らぎが回帰し始めると、対応する流束  $J_i$  のセットの次式での定義に進むことができる:

$$J_i = \frac{\langle \alpha_i(t + \tau) - \alpha_i(t) \rangle}{\tau} \quad (4.7)$$

ここで、角括弧は時間  $t$  で起こっている揺らぎを表す ensemble についての平均を示す。 $\tau$  は時間間隔で、回帰時間に比べて短く、分子の衝突時間に比べて長い。

平衡の ensemble における揺らぎ  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots)$  の統計重率は Boltzmann の理論によって次式に等しい。

$$\exp\left(\frac{\delta S}{k}\right) = \exp\left(\frac{\sum_j \alpha_j X_j}{k}\right) \simeq \left[1 + \frac{\sum_j \alpha_j X_j}{k}\right] \quad (4.8)$$

この近似で、

$$J_i = \frac{\langle [\alpha_i(t + \tau) - \alpha_i(t)] \sum_j \alpha_j(t) X_j \rangle}{k\tau} \quad (4.9)$$

となる。ここで、平均は平衡 ensemble について取り、 $\alpha_i$  の平均値は平衡では 0 という事実を利用する。 $J_i$  を  $X_j$  の函数と見なすと

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j \quad (4.10)$$

と書ける。ただし、

$$L_{ij} = \frac{\langle \alpha_i(t + \tau) \alpha_j(t) - \alpha_i(t) \alpha_j(t) \rangle}{k\tau} \quad (4.11)$$

である。

微視的な可逆性の原理が関係してくるのはこの時点である。磁場や Coriolis 力がない場合そうであるように、系の動的運動方程式が時間に可逆であるなら、ずれ  $\alpha_i$  と  $\alpha_j$  の間の交叉相関函数  $\langle \alpha_i(t + \tau) \alpha_j(t) \rangle$  は  $\tau$  について対称でなければならない。したがって  $L_{ij} = L_{ji}$ 、もっと一般的には、磁場  $H$  中で、

$$L_{ij}(H) = L_{ji}(-H) \quad (4.12)$$

である。この式が有名な Onsager の相反関係である。

Onsager はこの結果を 1929 年に最初に述べた。しかし、「非常に一般的な主張という観点から、概念と条件は非常に注意して定義されるべきであ

ると感じた。そこで完全な提示は 1931 年まで現れなかった。」実際その主張は一般的であって、相反関係はしばしば熱力学第 4 法則と呼ばれる。

熱力学の他の式に似て、それらは数学的に簡単であると同時に深い。それらは電気伝導の研究から Onsager の心に現れたけれども、彼はすぐに、同じ溶液中の溶質の組の拡散の交叉係数や熱伝導、拡散、電気伝導の間に起こりうる様々な相互作用に適用できることを認識した。

熱拡散は重要な特別の例である：二つの気体の相互拡散によって形成される温度勾配は、温度勾配が混合気体に課されるとき部分的分離が起こるといふ相棒をもっている。この課題について Onsager は第二次世界大戦の初めに二つの論文を出版した。数年後、実験的証拠の包括的な総説のなかで、D. G. Miller はこれまで検査されてこなかった様々な物理状況全てにおいて実験誤差内で相反関係が成り立つことを結論した。

Onsager 自身は最小散逸原理をもっと重視していた。それは平衡に非常に近い系に対して、相反関係と数学的に同等であることを彼は示した。時間の経過がこの判定を修正した：その原理は後に Onsager と Machlup によって一般化され、新しい理論的基礎を備えたけれども、現実に平衡からかなりのずれがある場合には成り立たない。そしてどんな場合でも、実験的テストに直接到達可能なのは相反関係である。

Onsager は 1933 年まで Brown 大学に留まっていた。その年大恐慌のため彼の任命を継続できなくなった。化学教室が彼の教師としての仕事は欠かすことができないと、大学を確信させることは不可能だった。

その年の夏、Onsager はヨーロッパにいた。彼はオーストリアの電気化学者 H. Falkenhagen を訪問した。Falkenhagen はその時健康状態が悪く、妹 Gretl (Margarethe Arledter) に Onsager の接待を頼んだ。Gretl は兄が「十分時代に先んじている」と言った非常にハンサムな若い男が階段を上ってくるのを見た。彼らは夕食に出かけた。しかし、Onsager は何時もどおり無口だった。食後 Onsager はテラスで眠ってしまった。目覚めた後、言った：“Are you romantically attached?” 8 日後彼らは婚約し、1933 年 9 月 7 日結婚した。Margarethe 21 才、Onsager 29 才だった。

1933 年 Onsager は Yale 大学で Sterling ならびに Gibbs 研究員に任命された。彼は生涯の大部分をそこに留まった。彼をポスドク研究員にした

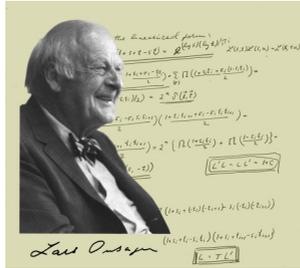


図 4.4 Onsager と計算

とき、化学教室は彼が学位 (Ph. D.) を持っていないことを発見して困惑した。相反関係は 2 年前に出版されていた。しかし、Trondheim の母校に提出したその結果の概略はそのままでは学位論文としては受理できないと判定された。この挫折は Onsager を当惑させた。そして、彼は、そのタイトルを持っていないのに “Dr. Onsager” と呼ばれるのに不快を感じた。彼の同僚は彼に Yale 大学の Ph. D. を試みるよう示唆した。Onsager は既に関係するコースと口頭試問を取っており、学位論文に関しては出版したどれでも当てはまった。

しかし、Onsager は何か新しいものを書くべきだと感じた。それはすぐ用意できた。表題は “Solutions of the Mathieu Equation of Period  $4\pi$  and Certain Related Functions” だった (1935)。化学者はその深遠さにお手上げだった。物理学者も同様だった。とうとうその学位論文は数学教室に送られた。そこに Whittaker と Watson の *Modern Analysis* の課題の熟練者だった Einar Hille 教授がいて、それを楽しみながら読んだ。彼は化学教室の学科長 Hill 教授に、「もし化学教室がそうするのが難しいと感じられるなら、数学教室は喜んで学位を出すでしょう。」と言った。人気をさらわれるのを望まなかったので、化学者達はその学位論文を支持した。

この出来事は Onsager の数学の技量への自負を例証するものと見ることができる。その技量は、彼の生涯を通して、仲間の化学者の大多数に対してよりも理論物理学者の同僚に対してもっとはっきりと示した。彼は新しい結果を出版する前に、いつも議論に数学的な隙間がないことをしつこく確かめた。しかし、数学的厳密さそれ自体のために培う範囲の割合につ

いての感覚を失うことはなかった。彼は、Birkhoffの強いエルゴード仮説を新しく誘導した際、激怒して言った：「これ以上しみ一つ無いようにするには彼らは定理同様紙も消毒し始めなければならないだろう。」

1934年 Onsager は Yale 大学化学教室で助教授に任命された。1935年には学位を得て、家族の生活は New Haven の Whitney 通りに落ち着いた。ほぼこの時期に彼は New Hampshire 州 Tilton に農場を買った。100エーカーの土地と農家付きだった。Onsager は熱狂的に野菜を育て、大工仕事や他の実用の仕事に携わった。家族は最大限田舎の生活を活用した。Onsager は熱心に散歩し、生涯の最後まで水泳とクロスカントリースキーを楽しんだ。老人に成ってから彼の重いスーツケースを人が持つことを許さなかった。彼は体力が落ちていっているのを考えることが堪えられなかった。

彼の科学上の成果は、特に Yale 大学の初期には、かなり乏しいと判断されていたかも知れない。しかしその質は非難を超えるものであった。彼は大学院生や同僚と協同するよりも一人で研究する方を選んだ。後にはポスドク研究員と協力することを好んだが、彼は何か個人主義者であるという評判を得た。彼は自分の研究グループを立ち上げるという望みは示さなかった。そして化学教室に他の理論化学者を連れて来ようという試みをしようとしないう同僚の何人かに失望したようである。彼の講義には目に見える改善はなかった。彼の統計力学のコースは“Advanced Norwegian I”、“Advanced Norwegian II”として有名であった。しかし、彼は Yale 大学の内外に固い友情を築いた。彼の自然な暖かさ、親切さ、高潔さは悪意の無さとあいまって、彼を知ることになった全ての人の愛情を勝ち取った。

その時期の最もよく知られた論文は Wien 効果についての1報と溶液中の分子の双極子能率についての1報であった。Wien は溶液中で部分的にしか解離しない酢酸のような弱電解質は高電場では低電場での値より過剰な電導度を示すことを発見していた。

Onsager はその効果が、再結合の速度は電場を実質的に影響されず、会合しているイオン対が効率的に自由イオンに解離する速度が電場によって攪乱されるために違わないと見た。この大胆で単純な仮定で、彼は有効解離定数が濃度に独立で、電場の絶対値に比例する因子だけシフトすべきことを意味する注目すべき式を導いた。ずっと後の C. T. Liu との論文で、

彼は詳細を修正したがこの研究の中心は変わっていない。その中間の年に、Onsager の Wien 効果の理論は Eigen と DeMaeyer によって、特に生物系における非常に速い反応の実験的研究に利用された。

双極子能率についての論文は多くの化学者を混乱させた。というのはそれが極性物質の誘電率と分子の双極子能率とを関係づける Debye の式に疑問を投げかけたからである。その式は気体の誘電率の温度変化から双極子能率を決定するのに広く用いられていたが、多分分子の会合や回転障害のために、極性液体ではうまくいかないことが知られていた。それは全ての極性溶液に対して強誘電体 Curie 点を予言していたが、そのような転移は観測されていなかったことから、Onsager は基になる理論に欠陥があることを疑っていた。

Onsager 自身の理論の最初の説明が論文の形を取って、*Physikalische Zeitschrift* に出版するため Debye に送られた。しかし Debye はその論文が“読めない”ことを見つけてつき返した。このかつての教師からのすげない拒絶は Onsager を深く傷つけた。彼が J. G. Kirkwood に英語版を *Journal of the American Chemical Society* に投稿するように説き伏せられたのは数年経ってからであった。もしも Kirkwood が彼にポリペプチド溶液についての Jeffries Wyman の最近の測定結果が彼の新しい考えによく合うということを指摘していなかったら、“双極子能率の研究に対する増大する熱狂の潮”に冷水を浴びせるような気持ちは持たなかっただろうという軽い注釈の後ろに、Onsager はその出来事に対する彼の感情を隠した。しかしながら、Onsager の誘電の理論がそれに相応しい注目を浴びたのは永年経ってからであった。Debye は結局彼の理論に対する Onsager の修正を受け入れた。しかし、偉大な物理学者にとって彼の有名な理論を、科学の経歴を始めたばかりの異常に若い男に手厳しく批判されることは耐えられない腹立ちであったに違いない。

戦前の最後の 4 つの論文は全てまだ途中で、やがて現れる兆候があったのみだった。結晶中の分子の静電相互作用に関する論文 (1939) は一次元以上の系における相転移の統計力学についての彼の後の研究に道筋を示した。熱拡散による同位体の分離についての 2 つの論文 (1939) は、大抵が  $^{238}\text{U}$  から成る天然ウランニウムから分解しやすい  $^{235}\text{U}$  を抽出する Manhattan 計画でのこの技術の使用の前兆となった。熱拡散塔中にお

る乱流の論文 (1939) は後に Onsager を Kolmogoroff の均一乱流の理論の再発見に導くことになった関心事をほのめかしていた。その乱流理論は 1941 年に提出されたが、西側には戦後まで知られなかった。

Gretl がオーストリア人で、Onsager がまだアメリカ市民ではないという事実が onsager 一家を活発な戦争活動への配置転換から免れさせた。多分実際は、Yale 大学での大学人生の低い昇進速度が Onsager が自分自身の研究に集中するのを容易にさせたのであろう。理由は何であれ、彼は熱心に、以前にも増してより熱心に考えるための、そして他の人々が人間の知性を超えていると信じていたかもしれない物理の鍵となる課題を解くための時間を見つけることができた。

問題はこうであった: 統計力学の基本的な仮説は物質の明確な相を説明できるか? もっと特定すると、それらの仮説は、格子の中で最近接間でのみ相互作用する粒子の規則的格子中に鋭い相転移を意味するか?

1 次元結晶に対する答えは否定的であることが知られていた。相互作用の範囲がどんなであれ、鋭い相転移は不可能だった。しかし、相転移が起こると想定される簡単な系、すなわち 2 次元イジング格子があった。当時、統計力学から任意の高次元の共同的集合の熱力学的性質を導こうとする展望は遠すぎて考える価値がなかった。

強磁性、反強磁性、気体の凝縮、混合溶液や合金の相分離のモデルとして役立つイジング模型はトポロジーにおける 4 色問題に似て専門家でない人には面白くないように見えた。イジング模型は、無限の空間格子の頂点に位置する粒子あるいはスピンの集合である。最も単純で意味のある例は 2 次元平面の正方格子である。各粒子あるいはスピンは二つの状態のいずれかを取り、格子の全エネルギーは隣接粒子対について加成性が成り立つ。任意のそのような対のエネルギーは、二つの粒子が同じ状態にあるか異なる状態にあるかによって、あるいは二つのスピンの平行にあるか反平行にあるかによって、 $+J$  か  $-J$  のどちらかを持つ。実際には Onsager はもっと意味のある一般的な問題を考えていた。そこでは、正方格子における二つの方向、水平か垂直か、に応じて相互作用エネルギーは異なる大きさ  $J$  あるいは  $J'$  を持つ。本質的に 1 次元系は  $J'/J \rightarrow 0$  で得られる。

イジング問題の初期の取り扱い、すなわち分配函数とそこからの自由エ

エネルギーの評価の仕事は H. A. Bethe と R. E. Peierls、後に H. A. Kramers と G. H. Wannier によって改良された。しかし、これらの著者は皆最大限の努力によってのみ拡張できる、正確さの査定が最も難しい、最終結果では、全く不適切であることが証明された近似法の採用を強いられていた。しかしながら、Kramers と Wannier は対称性の議論によって一つの重要な手がかりを見つけていた。それは、もし相転移の独特の点、すなわち臨界点が存在するなら、臨界温度の値は  $J$  と  $J'$  の比較的簡単な函数であるに違いないということだった。

「魅了されて、Onsager は彼らの方法を検査し、一つか二つのトリックを加えることができ、熱力学的性質を決定する分配函数を計算するまで、一つ、もう一つと励みになる導きに従って行けることが分かった。結果は 1942 年に得られた。様々な詳細を整理する時間を取って、それは 1944 年に出版された。」

事実、Onsager は Kramers と Wannier によって導入された遷移行列法を利用した。そのなかで、それぞれが  $n$  個の粒子あるいはスピンを持つ  $m$  行の正方格子の分配函数はトレース (a trace) として表される。

$$Z_{mn}(T) = \text{Tr}\{\mathbf{K}_m(T)^n\} \quad (4.13)$$

ただし、行列  $\mathbf{K}_m(T)$  は列掛ける列の格子を組み上げるのに使われる。行列の要素は対相互作用に対する Boltzmann 因子であり、そこから温度  $T$  と相互作用エネルギー  $J, J'$  に依存する。長い格子の粒子当りの自由エネルギー  $F(T)$  を得るには、いわゆる熱力学極限  $n \rightarrow \infty$  を取らねばならない。そうすると

$$-\frac{F(T)}{kT} = \frac{\ln[\lambda_{0,m}(T)]}{m} \quad (4.14)$$

が出てくる。ここで、 $\lambda_{0,m}(T)$  は  $\mathbf{K}_m(T)$  の最大の固有値である。1 次元 ( $m=1$ ) の場合は遷移行列は大きさ  $2 \times 2$  で、イジングのもともとの正確な解が得られる。一般に、 $\mathbf{K}_m$  は  $2^m \times 2^m$  の行列で、真に 2 次元の結果を得るためには更に  $m \rightarrow \infty$  の計算をせねばならない。実際、Onsager の研究は鋭い相転移は、どちらの次元でも格子が無限になるときのみ起こることを示した。

Onsager はまず最初に  $\mathbf{K}_m$  が  $4 \times 4$  行列である二つの行 ( $m=2$ ) の場合を解くことでその問題に取り掛かった。それから彼は  $m=3$  と  $m=4$

の場合を詳細に計算した。それはそんなに容易な演習ではなかった。その時点で、彼は一般的な結果がどのように変わっていくかある考えを感じた。彼はそれを  $m = 5$  の場合について検査した。それらはうまく働いた。そこから、彼は固有値問題を  $2^m \times 2^m$  のそれから  $2m \times 2m$  のそれへ還元する方法を見つけた。それから彼は一般的な  $m$  に対する固有値を見出した。

Onsager が加えた一つあるいは二つのトリックの中に、当時の理論物理学では聞いたことのない数学の分野、見知らぬ指導者 Whittaker と Watson が詳述した一般化 4 元数の代数と楕円函数の理論から採られた結果があった。30 年後の Onsager のポストドク協力者 Joseph B. Hubbard は云う：彼が *Modern Analysis* に解析接続の取り扱いで間違いがあると疑って Onsager に相談に行ったとき、Onsager は苦勞して自分の本を見つけ出した。その本は全体に亘る書き込み、修正、メモされた拡張でめっちゃめちゃに壊れていた。それは数部に分解されていたが、決して取り替えられることはなかった。

onsager のイジング問題の解は、1942 年 2 月 18 日の New York Academy of Sciences の会合での Gregory Wannier の発表に続く質疑応答で最初に現れた。それは理論物理学の世界に嵐を起こした。

「2 次元の強磁性体のイジングモデルに対する分配函数は閉じた形で求められた。Curie 点  $T_c$  に関する Kramers と Wannier の結果は、比熱の極大は結晶のサイズの対数で直線的に変化するという予想を含めて確認された。無限結晶に対して  $T = T_c$  の近くで、比熱は  $-\ln|T - T_c|$  に比例する。」

1961 年 Pippard は書いた：

「それが現れたときにセンセーションを巻き起こした Onsager の正確な取り扱いは比熱が実際に転移点で無限大に立ち上がることを示した。その現象は、解析における近似のためにいつもでこぼこが均された揺らぎを信じていた人々に深刻な混乱をもたらした。この研究は共同現象の研究に新しいはずみを与えた。」

その重要性の即座の認識は Wolfgang Pauli が戦後すぐに H. B. G. Casimir に書いた手紙の中に反映している。Casimir は長い間連合国の理論物理から切り離されたことを心配していた。しかし、Pauli は彼に、Onsager のイジング問題の解を除けば、何も面白いことは起こっていないと言って

安心させた。後に、自分の相転移の現象理論が Onsager の結果で致命的に貶められた Lev D. Landau は V. L. Pokrovskii に云った: 彼と同時代の他の物理学者の研究は彼に本当の挑戦をしなかったけれども、イジング問題の解を Onsager が成し遂げることは予見できなかった。

論文 (full paper) は 1944 年に出版された。Cambridge での会議の 2 年後、Onsager は Bruria Kaufman と共同で発見したスピノル (spinor) 代数を用いて頂上に至る少し正確さに劣る道筋を報告した。

彼は一度 Joseph Hubbard に云った: 「分配函数への妄執は鈍い人間を造る。」彼は間もなく 2 次元イジング強磁性体の他の性質を追跡し始めた。1948 年夏に彼は自発磁化に対する正確な式を黒板に書いて Cornell 大学での会議を沈黙させた。Florence での戦後初めての IUPAP (国際純正応用物理連合) の統計力学学会合で G. S. Rushbrooke の発表に続く議論の間に彼はその式をもう一度示した。この介入は引用の価値がある。

「数学的に、固溶体の組成-温度曲線 (共存曲線) はスカラーのスピンを持つ強磁性における秩序の度合いと同じ問題を提供する。B. Kaufman と私は未発表であるが、最近相互作用エネルギー  $J$ 、 $J'$  を持つ 2 次元直角網目に対する後者の問題を解いた。もし  $\sinh(2J/kT) \sinh(2J'/kT) = 1/k$  と書くなら、 $k < 1$  に対する秩序の度合いは単純に  $(1 - k^2)^{1/k}$  である。」

現代の言葉では、自発磁化あるいは共存曲線は

$$M_0(T) = B(T_c - T)^\beta \quad (4.15)$$

のように変化すると云うだろう。臨界指数  $\beta = 1/8$  である。これは、van der Waals、Curie と Weiss、Bragg と Williams、らによるような全ての以前の近似理論と対照的である。それらは放物線則  $\beta = 1/2$  を導くのが避けられなかった。現実には、3 次元の磁性系や流体系は  $\beta \simeq 0.31 - 0.36$  で、正確に特徴づけられることが発見されていた。実効的に 2 次元の層状磁性物質に対して、実験は  $\beta \simeq 0.11 - 0.14$  を生じていた。これは驚くほど Onsager の式と合っていた。

Onsager は、1949 年に Kaufman と短距離秩序の論文、もっと正確には、正方格子イジング模型の対相関函数のセットについての論文は作ったけれども、この結果の導出は出版しなかった。その結果を独立に再導出するのは C. N. Yang に残された。ただ 20 年後に、Gstaad での Battelle シンポ

ジウムで、Onsager は長距離秩序の計算で、Töplitz 行列とデターミナントの一般的考察に導かれたが、“数学の穴 ( $\epsilon$  と  $\delta$ ) を埋める”方法が分からなかったことを明らかにした。彼がそれを成し遂げるまでに、数学者が最初にそこへ辿り着いたことを彼は知った。事実、Onsager の結果の一般性と深さは長い年月と釣り合うものではなかった。

Onsager の 1944 年の比熱の臨界特異点の結果は速やかに広く賞賛されたけれども、もともとの論文の他の面は、多くの面でより深い意味があったが、長すぎて評価されなかった。Onsager は、臨界点を離れたの秩序の伝播に関する Ornstein と Zernike の一般的考えは正格子イジングモデルに対して全く正しいことを示した。彼は、 $R$  離れた粒子あるいはスピンの対に対する相関函数  $G(R, T)$  は  $\exp[-R/\xi(T)]$  のように減衰しなければならないことを見出した。相関距離あるいは相関の範囲  $\xi$  は次式に従う。

$$\begin{aligned}\xi(T) &\simeq \frac{D^+}{(T - T_c)^\nu} \quad \text{as } T \rightarrow T_c + \\ &\simeq \frac{D^-}{(T_c - T)^{\nu'}} \quad \text{as } T \rightarrow T_c -\end{aligned} \quad (4.16)$$

ここで、臨界指数  $\nu = \nu' = 1$  で、振幅比  $D^+/D^- = 2$  である。Kaufman と Onsager の研究から、更に臨界点自身に於いて相関が次式のように減衰するということがでてくる。

$$G(R, T_c) \simeq \frac{D_c}{R^{d-2+\eta}} \quad (4.17)$$

ここで、 $d = 2$  次元に対して、 $\eta = 1/4$  である。これらの正確な結果は臨界揺らぎの理論に対して最も深遠な結論をもたらし、さらには量子場の理論における演算子の“異常次元”の概念に直接導くものであることが実感された。

再び 1944 年の論文で、Onsager は天才的な工夫で、転移点以下で共存する 2 相の間の界面張力に対する明確な結果を得た。それは次のように書かれる。

$$\Sigma(T) \simeq E(T_c - T)^\mu \quad \text{with } \mu = 1 \quad (4.18)$$

この結論もまた、理論と実験の広範な再評価を導いた。

Montroll は書いた:

「Kepler や Galileo の時代には科学的結果を暗号文の配布で告げるのが流行であった。それは著者に先取権を、同僚に頭痛を与えるものだった。Onsager はこの伝統を使う数少ない現代人の一人である。」

Florence での IUPAP 会合は彼にもう二つの花火を打ち上げる機会を与えた。一つは乱流の理論で、もう一つは超流動ヘリウム運動だった。

1961年 Pippard は書いた:

「後の Feynman によるヘリウムの理論に照らしてこれを読むと、Onsager は本質的な考えのいくつか、特に超流動に対する臨界速度は循環の量子化によって条件づけられているという見解、を十分知っていたことが判る。その見解は、Hall と Vinen の実験から強い支持を受けているものである。これは、ここ 10年 Onsager の著しい特性となっているもの、完全に洗練されたもの以外どんなものも出版を躊躇うこと、格言的な言葉で表した価値のあるヒントを落としていくこと、の最初の重要な例であろう。彼の話し言葉の不明瞭さはミスリードしようという希望によるものではなく、むしろ聞き手の限界を判定できない結果である。彼が言おうとすることを理解できた人にとっては、彼は深い刺激の源泉であった。」

Onsager よりも劣った人は、他の化学者達の出版された研究への謝辞なしに彼の考えが再出現することを苦々しく思ったかも知れない。しかし、彼は絶えず競争相手に未解決問題の恩恵を与えていた。

Joseph Hubbard は Onsager が液体ヘリウムの Feynman 理論についての彼の意見を与えるようにという説得を受け入れなかったことを報告している。しかし Feynman は Onsager との個人的な出会いを生き生きと説明している: 彼らは 1953年の日本での会議で会った。

「私は私にとって新しい分野であった液体ヘリウムの理論を仕上げていた。そこで、その会合でその分野の多くの人々に初めて出会った。私が発表する前日の夕食で、私は Onsager の隣に座った。彼は言った: 「あなたは液体 He II の理論を作ったと思っているのか?」と尋ねた。私は「そうです。」と答えた。彼は単に「ふーむ」と答えてそれ以上何も言わなかった。私はそれを、彼が私の理論は無意味以外の何物でもあり得ないと信じているものと受け取った。

次の日、会合での発表で、私は全てを例外無く説明すると宣言した。私は、転移点そのものにおける熱力学函数の挙動の性質を適切に理解してい

なかったという深刻な傷があることを、弁解がましく明らかにした。質問の間にまず Onsager がしゃべった：「Feynman 氏はこの分野の新人です。明らかに彼が知らない何かがあります。我々は彼を教育するべきです。」私は固まった（茫然自失した）。これは昨夜私が感じた不平よりもっと悪かった。どんな馬鹿な誤りを彼は見つけたのか？ 彼は続けた：「私は、臨界点近傍における熱力学函数の正確な挙動はどんな物質のどんな実際の転移についてもまだ適切には理解されていないことを彼に告げるべきだと思います。だから、He II に対して彼がそれをできないという事実は、現象の残りの部分を理解することへの彼の寄与の価値に反映するものではありません。」

Feynman はすぐに、謎めいた言葉で話す Onsager の習慣の陰に、親切で雅量のある人物を認識した。後に彼らは科学的な集まりで数回会う機会があった。

「あるとき、我々が一緒に立っている所へ若い男がやって来て、我々二人に超伝導についての彼の考えを説明した。私はそいつが何を言ったのか理解できなかった。そこで、私はそれは無意味に違いないと思った（私の悪い癖です）。私は、Onsager が「そうです。それはその問題の解であるように見えます。」と言うのを聞いて驚いた。彼は超伝導の難問が解かれたと言っているのか。私はその若い男が言ったことさえ知らなかった。」

Feynman はその若い男が Leon Cooper だったかも知れないと考えている。しかし、Cooper にはその記憶がない。

外見的に 1949 年は Onsager の驚異の年だった。イジング格子の 3 番目の論文、自発磁化と量子渦への注釈だけでなく、棒状分子の非等方溶液の基本的論文が出版された。この論文は液晶の理論を確固とした統計力学の基礎に置いた。彼はクラスター積分の一つを決定するのに再び楕円函数を用いた。それは、例えばタバコモザイクウイルス (TMV) の溶液中における粒子間の神秘的な「生物的」力の存在の仮説を不必要なものにした。

しかし彼は決して全力を尽くさなかった。1951–1952 年、彼は Fullbright 奨学生として Cambridge 大学に行き、Cavendish 研究所で研究した。そこで金属における反磁性の美しい理論を作った。de Haas-van Alphen 効果、金属結晶の磁気運動の磁場による周期的変動、は既に理論家の注意を

惹いていた。しかし、当時の理論はその発生源について殆ど洞察を与えていなかった。習慣的な洞察で、Onsager は真っすぐに物事の根本、Fermi 表面の幾何学、へ行き、課された磁場に直角にその表面を囲む線上の量子化された電子で、その周期性を説明した。

同じ年、Onsager は Oxford 大学でのセミナーで液体ヘリウムについての彼の考えを述べた。しかしこのときは理論家でさえ当惑させられた。質問に答えての彼の最終的なコメントは「私が続けてきたペテンの非道さを考えれば、これらの結果は悪くない。」であった。

彼の超流動への関心は続いた。1956年、彼と Oliver Penrose は Bose-Einstein 凝縮についての重要な論文を出版した。その中で彼らは Bose-Einstein 液体を高い摂動を受けた Bose-Einstein 気体として記述するのを避け、凝縮状態 (超流体) を 1 粒子密度行列の主要項が系の示強性性質よりも示量性性質のものとして定義した。そのような系の長距離秩序の概念は密度行列の非対角要素の振る舞いに関連づけることができる。それは相転移、配向現象、対称性の破れの現代の理解の決定的な要素である。

この時までには科学の世界は遂に、稀な天才が彼らの中にいるということに気づいた。Onsager は 1945 年にアメリカ市民になった。Yale 大学は 1945 年彼を理論化学の J. Willard Gibbs 教授に任命した。

Kirkwood と Onsager は数年間ともに Yale 大学にいた。二人とも Sterling 化学研究室に輝きを加えたけれども、彼ら是对照的な学究だった。Kirkwood は形式的な厳密さに情熱を持っていたけれども、大胆に単純化した物理的仮定に対する嗜好はあまり無かった。彼は実直な教師、研究学生の指導者であり、勤勉な文通者であって、教室の柱であった。Onsager は希望の無い教師で酷い文通者だった。彼は郵便箱から彼への手紙一通ずつ取り出して、チラッとそれらを見て、よく引き裂いていたと云われる。Kirkwood が死んだとき、Onsager は「分子物理学」への短い賛辞を書くように強制された。しかし彼はそれに答えることができなかった。1ヵ月後再度その要請が繰り返されたときも。多分、彼はそれを無視する他の理由があったのであろうけれど。

Shedlovsky と Montroll が述べている：「1942年のある会議でちょうど休憩前に Kirkwood と Onsager の間に鋭い交錯があった。Kirkwood はパ

イブに火を着けていた。Onsager は最後のタバコを箱から取り出し、アルミフォイルを真っ直ぐに延ばした。彼は急にそれを Kirkwood の禿げ頭に敷いた。Kirkwood が怒りを爆発させそうになったちょうどその時、Onsager は微笑んで言った。「ジャック、あなたは遮蔽効果を忘れてる。」爆笑が腹立ちを緩めた。

Onsager のユーモア感覚はときには、特に彼が尊大な同僚をへこませようと駆り立てられたとき、悪戯に近いものになる。1948年の Florence における IUPAP 会合で卓越したイギリス人物理化学者が講演した。その人物は特に若い科学者の研究に対して公衆の中で鋭い批判をするという評判があった。黒板は素早く記号で覆い尽くされた。Onsager は前列で明らかに眠って休息していた。講演の最後に座長が質疑、コメントを依頼した。Onsager は目を覚まして手を挙げた。座長は真面目に彼に発言権を与えた。Onsager は黒板へ行き黒板消しを取り上げた。彼は黙って、聴衆に背を向け、左上隅から初めて、全ての式、図、講演中に書かれたコメントを消した。その手作業を終えて、聴衆に向かって微笑み、そして座った。座長は正当な判定がなされたと感じ、急いで議論を終了した。

Denys Wilkinson 卿によるもう一つの物語は Onsager が Cambridge 時代の初めに審査を依頼された論文に関するものである。何ヶ月経っても報告が届かなかった。Onsager はそこを去る丁度その前にとうとう説得されてその論文を返した。彼の報告はたった一言 “Somehow” だった。その雑誌が最終的に彼に審査員の役を依頼するのを止めたのは驚くことではない。しかし、個人的な近づきは分け前を生み出した。稀に、野心を持つ若い科学者が、Onsager の心象を捉えた考えへの答えとして、簡明な激励する手紙を受け取った。

1955年と1965年の間、Onsager の思考は彼の最初の問題、電解質の性質へ繰り返し戻った。Brown 大学での新人 Raymond Fuoss が1945年に Yale 大学の教室に加わった。二人は1932年に彼らが始めて詳述した考えを展開し続けた。理論はより洗練されたが、明らかにより良くなるなかった。新しい大事な問題は単なる動力学よりも大きくは構造的なものであった。Onsager はそれを実感し、氷の電氣的性質に注意を向けた。その場合、構造と様々な構造欠陥が最も重要な点だった。彼は、この魅惑的な固体の完全な理解が生体膜の構造と性質に光を投げかけるだろうと感じ

た。かれのこれらの事柄への関心は、Cambridge 大学にいた Max Perutz との会話によって火を着けられた。Perutz は言う：「当時、我々は水がヘモグロビンに結合する可能な位置と方法について数回議論していた。しかし、私の同僚と私がそのいくつかが実際に結合している場所を見つけたのはごく最近だった。」

1968 年 Onsager はノーベル化学賞を受賞した。

1972 年の引退の際、Yale 大学は Onsager に名誉教授として部屋を提供した。しかし、ポスドク協同者との共同研究を続ける便宜供与は拒否した。特に、Provost 事務所は、研究助成の役所への研究申請に名誉教授が筆頭研究者になることを禁じる規則を引用した。Onsager はその規則の盲目的な適用に憤激し、その決定に抗議したが成功しなかった。その時までには大学の他の人々がその状況に気づいて学長 Kingman Brewster, Jr., に抗議したが、それは遅すぎた。しばらくして、Onsager は Coral Gables にある Miami 大学に卓越した大学教授 (Distinguished University Professor) として任命され、Behram Kursunoglu が指導する理論研究センターに加わった。そこで彼の研究は国家機関によるもの惜しみない資金を受けた。しかしながら、Onsager は復帰する希望を持って、ある期間 New Haven の家は保持していた。

彼の人生の最後の 2、3 年間、Onsager は生物物理学に関心を持ち、神経科学研究プログラムの会合に規則的に出席した。彼は全ての種類の会議の常連であった。しかし、彼が介入することは殆どなかった。彼はしゃべるよりも、目を閉じて聞く方を選んだ。彼は脳を理解する仕事を過小評価することはなかった。脳波図 (脳電図) について彼はいちど述べている：「それは、電話会社が使う電力の揺らぎを測ることによって電話のシステムが働く方法を発見しようとする試みに似ている。」

Yale 大学でポスドク研究員として 1971 年に初めて Onsager に会い、彼に伴って Coral Gables に来た Joseph Hubbard は最後の数年間の彼の個人的な片鱗の多くを与えてくれる。Onsager は新しいポスドクに初めて会って、ロシア風に彼を抱きかかえ、リプリントを見せるために自分の部屋へ連れて行った。床も含めて全ての面は混沌の極みであった。急に Onsager が消えた。Hubbard は彼が机の下にいるのを見つけた。そこに問題のり

プリントと2ヶ月古い給料の小切手があった。リプリントは400ページの学位論文であることが分かった。Onsagerの擦れた姿勢を見て、Hubbardは考えた:「ここに、右手を頭の後ろから廻して左の耳を掻く野郎がいる。彼はどうやって靴の紐を結ぶんだろう。」

Onsagerは研究をするやり方について多くの強い意見を持っていた。「驚のように空高く舞い上がっている時間があり、ミミズのように地下に潜っている時間がある。羽を納めておく時と、腐植土をむしゃむしゃ食べ始める時とをを知っているのはかなり鋭い男だ。」

John F. NagleがYale大学の大学院生だった時、彼に対して3次元イジング問題について言った:「それは1次元だけ多すぎる。」しかし、Yale大学の同僚であったMichael J. Stephenは言う:その問題を質問されて、Onsagerは一度、最も楽観的だったときに、死ぬまでに解を見つける事は期待しないが、解析的な前進は可能であると思ったと述べている。

1976年の夏にOnsagerはカナダでの、比較的新しい興味であった放射化学の会議に行った。彼はしばらくあまり良い健康状態ではなかった。彼は頑固な喫煙者で、息をするときにある痛みを持っていた。彼は両足に静脈炎を患っていた。しかしこれらの慢性疾患について友人に不平をいうほど困ってもしなかった。彼の妻はTiltonの農場に滞在していた。Onsagerは一人でMiamiに帰った。Hubbardは金曜日に彼と会った。その後、Onsagerは夕食にKrsunoglusへ行った。月曜日彼はセンターに来なかった。電話にもでなかった。火曜日の朝、HubbardはBiltmore DriveのOnsagerの家へ行った。Onsagerは彼の室外プールで朝泳ぐのを好むので、家は開いているだろうと期待していた。しかし、鍵が懸っていた。隣人が予備の鍵を持ってきてくれた。Onsagerは万策尽きて横たわっていた。朝早い水泳のための短パンを着て。速やかな安楽死だったように見えた。彼の顔は眠っている人のようであった。



*John G. Kirkwood*

図 4.5 John Gamble Kirkwood (1907/5/30–1959/8/9)

### 4.3 John Gamble Kirkwood

John Gamble Kirkwood はアメリカ合衆国 Oklahoma 州の小さな町 Gotebo で 1907 年 5 月 30 日に、父 John Millard Kirkwood と母 Lillian Gamble Kirkwood の第 1 子として生まれた。<sup>4,5</sup> 彼の父は苦勞して Chicago の大学と法科大学院をでて、良いビジネス感覚で成功し Goodyear 社の中西部の独立した販売代理店業者になった。彼には二人の妹、2 才下の Caloline、14 才下の Margaret がある。

Kirkwood の家族は 1909 年に Kansas 州の Wichita に移った。Kirkwood は高校 3 年まで Wichita の大学進学向けの一流私立学校へいった。彼は早くから非凡な学生として認められていた。後の専門科学の業績から解るように、特に科学と数学に優れていた。彼はまた、外国語にかなりの熟達を示した。事実、彼は生涯を通してフランス語が流暢であり続け、フランス文化のあらゆる面に熱心に魅力を持ち続けた。

未だ高校生であった 1923 年の夏に、Kirkwood は California を訪れた。その結果、彼は California 工科大学 (California Institute of Technology: Cal Tech) の第一級の科学教育を受ける機会を得るのに惹かれるようになった。Cal Tech の化学者 A. A. Noyes は彼に高校の最後の年を飛び級するよう示唆した。そう激励されて、彼はその秋 Cal Tech に入学した。それは 2 年間続いたが、彼の意志強固な父とある摩擦を起こした。彼の父は理想的な大学教育に違った概念を持っていた。問題を解決するために、Kirkwood は Cal Tech から Chicago 大学に移った。そこから 1926 年 12 月に理学士を取って卒業した。

Kirkwood は 1927 年 2 月に Massachusetts 工科大学 (Massachusetts Institute of Technology: MIT) に化学科の大学院生として入った。彼は 1929 年 6 月に Ph.D の学位を受けた。Frederick Keyes の指導下での彼の学位論文は、温度と密度の函数としての二酸化炭素とアンモニアの静的誘電定数の測定であった。その研究は Keyes と共著の彼の最初の 2 つの論文の基となった。物質の誘電性への Kirkwood の興味は後の彼の経歴を通してずっと続いた。彼の 1939 年の古典的論文「極性液体の誘電分極」の中で、彼は初めて隣接分子に対する配向相関の概念を導入し、如何にそれらが液体の誘電挙動を制御するかを示した。

Ph.D の仕事を仕上げ、Kirkwood は 1929–1930 の期間国の特別研究員 (National Research fellow) になった。彼は MIT の Keyes との研究を完成するためと、Harvard 大学の John C. Slater と共同するためとで、Cambridge 区域 (Boston の東隣りで MIT と近くに Harvard 大学がある) にとどまった。分子間力と、気相のビリアル係数の理論的解析を通して表される状態方程式へのそれらの影響を含めるものへと、彼の研究の興味は広がった。

この初期の Cambridge 時代にはまた、電気化学者 Theodore Shedlovsky の前の妻 Gladys Lillian Danielson との出会いがあった。彼らは 1930 年に結婚した。息子 John Millard Kirkwood が 1935 年に生まれた。彼らは 1951 年に離婚した。

1920 年代および 1930 年代の初め、若いアメリカの科学者がヨーロッパで彼らの専門の訓練を完遂するのが必然であった。国際特別研究員資格 (International Research Fellowship) を得ることで Kirkwood は機会を得

て、1931–1932年の学期間、LeipzigのPeter Debyeのところで過ごした。また、MunichのArnold Sommerfeldを訪問した。この逗留の間に生まれた4つの研究論文はドイツ語で書かれ、*Zeitschrift für Physik*に出版された。強電解質溶液に対するDebye-Hückel理論は出されてからまだ10年も経っていないで、その重要さと正しさは生き生きした論争の源であった。驚く無かれ、その時Kirkwoodはイオン溶液への生涯を通しての関心事を開始している。それは最終的に、濃厚イオン溶液の構造と電気二重層の研究を生み出した。

KirkwoodはMITに戻り、物理化学研究室の研究助手になった。彼はその位置に1932–1934年の間とどまった。この期間の彼の科学的興味は状態方程式への量子の効果を含むもので、彼は流体混合物の一般的統計力学と電解質溶液の厳密な理論のついでに萌芽的研究を行った。この理論展開の後のものは1936年、当時Langmuir賞と呼ばれた、純粋化学におけるアメリカ化学会賞で栄誉を与えられた。彼は最年少の受賞者の一人であった。

つぎの3年間(1934–1937)、KirkwoodはCornell大学化学科の助教授であった。これは、彼がChicago大学で準教授になったことで1937年から1938年の1年間中断された。彼はCornell大学に戻って1938年から1947年まで化学のTodd教授を務めた。

Kirkwoodが1930年代と1940年代初めに開拓した液体状態理論は、導入から60年後まで主要な科学的影響を及ぼし続けている。液体の性質を分子間相互作用を用いて計算することは一組の階層方程式を解くことであるという認識が直感的な近似を説明する様々な方法の基礎を敷いた。Kirkwoodの重ね合わせ近似として知られる、それらのうちの最初で最も有名なものは、分子分布函数が満足する形でその基礎方程式を解けるように提出された。今やよりよい近似で置き換えられているが、この重ね合わせ近似は、液体の構造と性質を支配する多くの物理的效果の本質を捕まえており、凝縮系化学と物理学の多くの局面で鳴り響き続けている。しかし、もっと重要なことは、Kirkwoodによって展開された分布函数理論の形式が液体理論の鍵となる部分を占め続けているということである。

Cornell時代のKirkwoodのもう一つの萌芽的寄与は1940–1942年の間にElizabeth Monroeと一緒に出した融解の理論の3つの論文である。こ

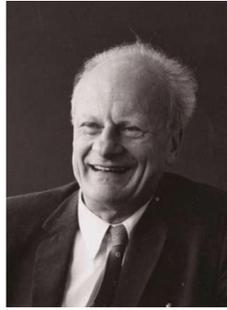
*H. A. Bethe*

図 4.6 Hans Albrecht Bethe (1906/7/2–2005/3/6)

これらの論文は相変化の理論における主要な古典の一つにランクされており、他の著者らによる続く多くの改訂版と解釈を生み出した。物理化学の分子的基礎に対するこれらとその他の記録すべき寄与が 1942 年の Kirkwood の国立科学アカデミー (the National Academy of Sciences) への選出の基礎と作った。

第二次世界大戦が、一時的ではあったが、Kirkwood の科学の方向に大きな転換をもたらした。当時の軍事的要求は爆薬の基礎的理解に大きな改善が必要であることを明らかにした。Kirkwood は 1942–1945 年国家防衛研究委員会の委員として科学研究開発事務所でそれに対処し、戦争努力に貢献した。彼は基礎研究グループのメンバーで、防衛部門の研究開発委員会の議長に対する顧問だった。Kirkwood は空気中と水中における爆音と衝撃波の定量的理論を定式化した。そのいくつかは、Cornell 大学からの同僚で、秩序-無秩序現象の論文の共著者である H. A. Bethe との共同で成し遂げられた。合衆国海軍はその貢献を認めて、1945 年 Kirkwood に価値ある市民功労賞 (Meritorius Civillian Service Award) を提供した。加えて、彼は 1947 年に大統領感謝状 (Presidential Certificate of Appreciation) を受けた。

1940 年以前に Kirkwood が研究上で最も注意を惹いた現象は、低分子量物質が関与するものと化学者によって考えられていたものであったろう。



*Raymond M. Fuoss*

図 4.7 Raymond Matthew Fuoss (1905/9/28–1987/12/1)

続いて、彼の注目は合成および生体の高分子物質に向かい始めた。この傾向は、極性高分子の誘電損失の機構を説明する R. M. Fuoss との共同研究で始まった。それは極性流体の誘電的性質についての彼の以前の研究の自然な拡張であった。Kirkwood の高分子への関心は成長を続け、後に、高分子の力学緩和、流体力学的流動、高分子溶液のレオロジー挙動の理論展開につながった。更に 1941 年、彼は、電気泳動-対流を用いて、溶液中のタンパク質の分別 (分離) のための新しい方法を工夫した。第二次世界大戦に続いて、この方法は、ジフテリアの抗毒素、ガンマグロブリンを含むいくつかの重要なタンパク質の単離、精製に、修正の上で、応用された。

1946 年は、輸送過程の基礎的な統計力学理論に捧げられた長い一連の論文の最初のものが現れたことで記録すべき年である。このシリーズの研究は、Kirkwood の思索および彼の生涯の残りの間の学生の多くの中で、主要な課題であり続けた。この研究の鍵となる要素は時間平均の分子分布関数とそれらの運動方程式の概念であった。これは、物理的測定の規定と矛盾しない、不可逆性と密接に結び付けられたどのような理論に対しても必要な成分と考えられた。続いての研究はこの観点を洗練する必要性を明らかにしたけれども、それは、Brown 運動、気相の動力学に対する Boltzmann と Enskog の式、純液体の粘度、熱伝導度、熱輸送係数の深い理解への有力な方法を提供した。更に、後の同じ包括的な形の Green-Kubo-Mori-Zwanzig の結果に先鞭をつけて、それは摩擦係数に対

する、輸送理論中の自己相関函数表記の初めての導出を導いた。

Kirkwood は 1947 年、Cornell から Cal Tech に移り、化学の Arthur A. Noyes 教授になった。彼はその地位に 1951 年までとどまった。この期間に、溶液の Kirkwood-Buff の一般理論と液体の表面張力の理論が現れた。粘度、拡散、緩和を決定する、溶液中の高分子の運動に対する Kirkwood-Riseman 理論が開発されたのもまたこの時期であった。それらの理論の最初は、分子分布函数と分子相互作用の言葉で混合物の性質を表した小さな一群の正確な表式の一つであった。それはゆっくりとのみ認められてきたが、今や、実験データの解釈を助けるのに広く用いられている。これらの最後のものは、提出された時点では、いくつかの近似が用いられているにも拘わらず、鎖の連結性と周囲の媒体の影響を含んだ高分子の分子運動の性質を最も現実的に表す式であった。それはその分野の全ての続く発展に影響を与えた。

1951 年、Kirkwood は Yale 大学での化学の Sterling 教授を受け入れ、学科長になった。彼は 1959 年に亡くなるまでそこにとどまった。1958 年彼は Yale 大学における科学のディレクターになった。1954 年から 1958 年まで、彼は国立科学アカデミーの国際部門秘書を務めた。それは、疑いも無く彼の初期の外交官への関心に訴える役であり、彼の言語の才能が役に立つ役であった。国際部門秘書として、冷戦のさなかに彼はソ連邦との科学的接触に巻き込まれた。彼は 1957–1958 年国際地球物理年の要請による協同協定の活動を監視した。

1958 年 3 月 Kirkwood は Platonía Kaldes と再婚した。二人は 1955 年 7 月に Washington D.C. で初めて出会った。彼らはともにいた数ヶ月の間、New Haven の Yale 大学のキャンパスに近い Connecticut 州の Guilford の 1962 年に建てられた古い家に住んだ。

1958 年初めに Kirkwood は癌の診断を受け、余命はざっと 1 年と推定された。彼は、残る日々を最大限活用することを決心し、増大する肉体的痛みに関わらず、科学的活動を高い水準に維持するようにした。この期間の学生と共同研究者にとって、肉体的な病と彼の知的な決意の間の葛藤を見ることはいらさらせられるものでもあり、鼓舞されるものでもあった。彼の人生のこの最後の年、彼は Chicago 大学で数週間過ごした。また、1959 年初めには Leiden 大学の Lorentz 客員教授でもあった。



図 4.8 並んでいる Kirkwood と Onsager の墓 (New Haven's Grove Street Cemetery)

闘いは終に 1959 年 8 月 9 日に Grace New Haven 病院で終わった。John Gamble Kirkwood は Yale 大学のキャンパスの隣の Grove Street Cemetery に葬られた。同じ墓地には、彼その他、二人の統計力学の巨人、Lars Onsager と Josiah Willard Gibbs が最後の眠りについている。Kirkwood と Onsager の墓は並んでいる。Onsager の墓には「ノーベル賞受賞者」と刻まれているだけであるが、Kirkwood の墓には多くの賞と勤めた地位の長いリストがあるそうである。Onsager の妻 Gretel がなくなった後、Onsager と同じ墓に葬られ、子供達が「受賞者」の後に「\*etc.」と加えたそうである。

.....

1962 年以来、Yale 大学化学科とアメリカ化学会 New Haven 支部は物理学における卓越した理論的あるいは実験的研究に対して John G. Kirkwood 賞を与えてきた。それはほぼ 2 年毎に授けられてきており、最初の受賞者は Yale 大学で Kirkwood の以前の同僚である Onsager であった。

8 巻の論文集 *John Gamble Kirkwood Collected Works* が I. Oppenheim を編集者として 1965–1968 年に Gordon and Breach Scientific Publishers から出版された。彼の 181 編の科学論文の大部分がテーマごとに以前の共同研究者の序文付きで採録されている。

文献 6 の著者、S. A. Rice と F. H. Stillinger の一人は Kirkwood の博士課程学生、もう一人はポスドクの学生だった。彼らは、Kirkwood が心

*Lars Onsager*

図 4.9 Lars Onsager (1903/11/27–1976/10/5)

のうちを直接、時にはぶっきらぼうに、話す真っ直ぐな人物で、決して意図して他を傷つけることの無かった人物であったと回想している。また、Kirkwood は共同研究者の相談に乗り、彼らの職を斡旋し、経歴を積み上げるのを助けたということである。Rice と Stillinger は、厳密な解析と、理論を有用にするための近似とのバランスを如何に取るかを、また、科学の創造、実行、評価に味を着けている重要な要素を、Kirkwood から学んだと述べている。

## 参考文献

1. Michael A. Coplan, “*Raymond Matthew Fuoss*,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
2. “*Lars Onsager - Wikipedia, the free encyclopedia*,”  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Lars\\_Onsager](http://en.wikipedia.org/wiki/Lars_Onsager))
3. Christopher Longuet-Higgins and Michael E. Fischer, “*Lars Onsager*,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
4. Stuart A. Rice and Frank H. Stillinger, “*John Gamble Kirkwood*,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
5. “*Biography of John G. Kirkwood*,”  
(<http://theor.jinr.ru/kuzemsky/kirkbio.html>)

## 5章 流変学

### 5.1 Friedrich Wilhelm Ostwald

Wilhelm Ostwald はバルト 3 国の一つ Latvia の Riga で 1853 年 9 月 2 日に生まれた。<sup>1,2,3</sup> 父は桶屋の親方 Gottfried Wilhelm Ostwald、母は Elizabeth Leukel で 3 人兄弟の真ん中であつた。Ostwald は Riga の Real ジムナジウムで教育を受けた。彼は小さい時から化学に興味を持ち、11 才の時に自分自身の花火を作つた。1872 年 Dorpat 大学 (現在、Estonia の Tartu 国立大学) に入学し、化学を学んだ。3 年後の 1875 年、最終試験を経て卒業し、彼は Arthur von Oettingen 教授の下で物理学研究所の助手のポストを得た。続いて Carl Schmidt の下で化学研究所で同様の地位を得た。Ostwald 自身、科学の訓練をこれら 2 人の教師に負っていると述べている。1878 年、Carl Schmidt の指導の下で Dorpat 大学から Ph.D の学位を得た。

1877 年、Ostwald は Dorpat 大学の無給の講師となり、続いて 1881 年 Riga の Polytechnicum の化学の教授に任命された。1880 年 4 月 24 日、彼は Helene von Reyher を娶つた。6 年後の 1887 年、彼は物理化学の教授としての Leipzig 大学の招聘を受け入れた。その後の彼の生徒の中には、Arrhenius、van't Hoff、Nernst、Tammann、Wislicenus らがいる。彼はまた Leipzig 大学物理化学教室の組織を監督した。Ostwald は、1904–1905 年の 1 学期間交換教授として Harvard 大学 (米国 Massachusetts 州 Cambridge) に赴いた短い中断を除いて、1906 年に退職するまでずっと Leipzig に留まつた。

Ostwald は Jacobus Henricus van't Hoff、Svante Arrhenius とともに現代の物理化学の創始者としての名誉を与られている。

Ostwald は 1875 年、化学親和性の問題に関連して、水の質量作用の法



図 5.1 Friedrich Wilhelm Ostwald (1853/9/2–1932/4/4)



*Old building of Riga  
Polytechnical Institute  
(now - main building of  
the University of  
Latvia)*



*Institute of Physical Chemistry,  
Leipzig University (1901)*

図 5.2 関連した大学

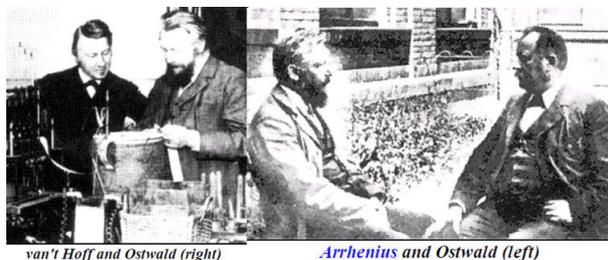


図 5.3 van't Hoff, Arrhenius と

則の研究で実験的研究を開始した。そこでは特に電気化学と化学動力学に重きをおいた。1894年、彼は触媒について最初の現代的定義を与え、触媒反応に注意を向けた。

Ostwald は特に有機酸の電導度、電解を含む電気化学の分野への貢献でよく知られている。彼はイオン解離、気体と溶液の類似性に基いた溶液理論を展開した。彼は稀釈理論で意義深い仕事をし、彼の名に因んだ稀釈律を見出した。

Ostwald はまた、現代でも用いられている溶液の粘度を測定する粘度計を発明した。

奇妙なことに、彼はその当時の最も卓越した化学者の一人であったにも拘らず、1906年まで原子論を受け入れなかった。「モル」(mole)という言葉は1900年頃 Ostwald によって化学に導入された。彼は質量グラム単位での物質の分子量として1モルを定義した。Ostwald によると、その概念は理想気体に関連したものであった。皮肉にも彼はエネルギー一元論者であって、彼のモルの概念は原子論への哲学的反対と関係していた。彼は Arnold Sommerfeld との会話で、「Jean Perrin のブラウン運動の実験で考えを変えた。」と説明した。

Ostwald はまた化学工業にも大いに貢献した。アンモニアから硝酸に変換する Ostwald 法は1902年に特許になり、工業的に重要なものになった。この方法では、アンモニアは空気と混合され、過熱されて白金触媒の上に導かれる。そこでアンモニアは酸素と反応して一酸化窒素を形成し、酸化されて二酸化窒素となる。次に水と反応し、硝酸ができる。基本的な化



図 5.4 Ostwald 経年変化

学は64年前に Kuhlmann の特許になっていたが、それはアンモニアの供給源の欠如のために1902年まで学問的興味だけの段階に留まっていた。1900年からの10年間後半に Haber と Bosch の空中窒素固定法の結果、状況は劇的に変わった。特許から6年後の1908年は Ostwald 法の発明の年とされる。その6年間は、これらの展開が Ostwald にその方法を商業化する仕事をさせた期間だったかも知れない。あるいは、それは単に特許の登録と認定の間の期間であったのかも知れない。ドイツは連合国の封鎖で硝酸塩の供給が遮断されていたので、Ostwald 法はすぐに第一次世界大戦中における大規模な化学肥料、爆薬の製造に結びついた。

1906年の退職後、Ostwald は科学の才能と組織力を発揮する新しい領域を見出した。研究と哲学の出版を続けるかたわら、彼は公共生活にも活動的に参加した。彼は中産階級の平和主義運動を支持し、教育改革に興味を持った。彼は彼の立場から、信念を持って、自然科学の分野に力を闡明する教会と断固として戦い、近代的な科学思想を広めるために闘った。彼はまた国際的言語運動にも関心を持ち、最初にエスペラントを学び、後に Idist にもなった。

1909年、Ostwald は触媒、化学平衡、反応速度の研究でノーベル化学賞を受賞した。

Ostwald は生涯の最後まで、「色」と「形」を研究し、色の科学的標準を見つける努力をした。彼は自分の絵の具を自分自身で造る情熱的な素人画家であった。彼の色理論は Albert Henry Munsell に影響されたもの



図 5.5 熟年の Ostwald

で、それは Paul Klee や、Piet Mondrian を含む De Stijl の会員に影響を与えた。

Ostwald は化学の研究に加えて極めて広い分野で非常に生産的であった。多くの哲学的著作を含めて 4 万ページもの出版をしている。その中には色についての数冊の出版物もある。

1932 年 4 月 4 日、Ostwald は Leipzig の病院で亡くなった。彼は Leipzig 近くの Grossbothen にある自宅の庭に埋葬された。彼の家は Leipzig から約 30 km の所にあり、Boltzmann が自分の家を「エントロピーの家」(Entropy House) と呼んだのに対して、Ostwald は自分の家を「エネルギーの家」(Energy House) と呼んだ。その家は現在博物館になっている。主な展示物の一つは彼が開発した顔料と染料の蒐集物である。また、温度制御されたピーカーがあって、Bunsen バーナーで加熱され、その中の液体の温度は  $1^{\circ}\text{C}$  以内に保たれている。



図 5.6 Maurice Marie Alfred Couette (1858/1/9–1943/8/18)

## 5.2 Maurice Marie Alfred Couette

Maurice Couette はフランス西部 Loire 川のほとりの Tours で 1858 年 1 月 9 日に生まれた。<sup>4,5</sup> 父 Alfred Ernest Couette は 1825 年生まれ、同じく Tours の産で、白木綿製品に特化した織物業者だった。彼は 1857 年 2 月、Marie Adélaïde Francoise Leduc と結婚した。Muarice Couette は彼らの唯一人の息子だった。Maurice Couette は Tours の Ecoles Chrétiennes de Frères によって教育を受け、1874 年 6 月に人文学 (古典学) のバカロレア (学士試験、baccalaureate) に、同じ年の 9 月に科学のバカロレアに合格し、Poitiers 行政区教育省から卒業証書を受けた。

Couette は 1876 年、Tours 中等学校 (旧制高校) で数学の上級課程 (advanced course) を取った後、続けて Poitiers の理学部から 1877 年 12 月に数学の学士号を得た。彼は 1878 年 1 月、新しく開設された Angers の (自由) 理学部に入学して物理学の学位への準備をし、1879 年 7 月に Poitiers からその学位を受けた。彼は 1879 年 1 月から 1880 年 2 月までその (自由) 理学部と共同して数学初歩の講義を行った。

1880 年、Couette は Paris 近くの Vincennes の第 12 砲兵連隊に入り、1 年間の任意兵役を終えた。彼はそれから予備役の隊員になり、1884 年に

少尉、1892年に中尉になった。

Couette は 1881 年に兵役を終えた後、Paris に落ち着いた。彼は家で数学を教えた。彼はまた Sorbonne の物理学研究所に入り、物理学の講義に出て高等教育の免状 (agrégation) の準備をした (1881–1883)。同時に彼は Stanislas 大学で試験官 (examiner) を務めた。1883 年から 1887 年まで、彼は Stanislas 大学での仕事を続けるとともに Paris 郊外 Arcueil の Ecole Albert-le-Grand で、1884 年には Paris の Ecole Sainte-Geneviève で物理学を教え始めた。彼はまた、Cercle Catholique de Luxembourg および Paris 第 13 管区の Patronage de Sainte-Rosalie の会員であった。

Couette が Jeanne Lucile Anna Jenny に会ったのはこの時期だった。彼女は 7 才年下で 4 人の子供の最年長だった。彼女の父 Auguste Jenny は Sélestat の住人だった。彼は皇帝護衛隊の騎兵将校で、Seine 軍の第 10 大隊の大佐になっていたが、1870 年 12 月 Stains の戦闘で死んだ。Jeanne Jenny は戦争孤児になったが、Paris 近くの Saint-Denis にある Maison de la Légion d'Honneur で十分な教育を受けていた。Maurice Couette と Jeanne Jenny は 1886 年 8 月 3 日 Paris 第 6 管区の町役所で法的に結婚した。教会儀式は翌日 Saint-Sulpice 教会で行った。Couette 一家は青年時代に沁み込んだ宗教的信条に従い、非常に勤勉な生活を送った。Maurice Couette の妻は 8 人の子供、5 人の男子と 3 人の女子、を産んだ。女子の一人 Geneviève は修道女になって大学を出た後、父の跡を追って古典学 (人文学) を教えた。

1887 年から Couette は、Stanislas 大学と Ecole Sainte-Geneviève での試験官の活動を続けながら、Sorbonne の物理学研究所で研究した。彼は Gabriel Lippmann の指導監督の下で学位論文の準備をした。1883 年、Lippmann は数理物理学講座の Charles Briot (光散乱の研究で知られる) の後任になり、1886 年 Jules Jamin の死で Sorbonne の実験物理学講座を引き継ぐように任命された。Lippmann は電気現象、毛管現象における初期の研究を行い、1886 年に科学アカデミーに選出された。彼は 1908 年、干渉現象に基いた写真で色を再現するための方法 (1881 年の発見) によってノーベル物理学賞を受賞した。

Couette はまた、殆ど独学のフランス人数学者 Joseph Boussinesq の下

で研究することを認められた。彼の研究は力学の多くの面、特に水力学、物質の強度を扱っていた。Boussinesq は 1886 年科学アカデミーに選出され、同じ年に Sorbonne の力学講座の地位に任命された。

1889 年の初め、Couette は学位論文「液体の摩擦に関する研究」(Studies on liquid friction) を完成し、その最終版を 1889 年 5 月末に Gabriel Lippmann に手渡した。この学位論文は公式には 1889 年 10 月 18 日に Paris の理学部の事務局 (secretariat) に登録された。その学位論文を印刷する認可は 1890 年 3 月 20 日に与えられた。1890 年 5 月 30 日の公聴会 (defence) を経て、Maurice Couette は Sorbonne の物理科学の博士を授与された。満場一致 (試験官全員白玉)、優等 (cum laude) であった。

Maurice Couette は 1890 年 2 月 25 日、Paris の自宅に私立の中学校を開設した。出席者は教養、科学のパカロレアの準備をする学生だった。その公式の認可は Paris 教育局から得られた。

Maurice Couette の経歴に大きな転換点が訪れたのはこの直ぐ後だった。彼は Angers の Catholic 大学 (UCO) の学長 Monsignor Freppel から講義するように要請された。1875 年に創設された UCO は不安定な位置にあったので、給料は魅力的なものではなかった。しかし、Couette はこの種の提供を熱望していたので、招聘に喜んで対応するのが義務であると感じた。彼はこの決定で妻 Jeanne に強く激励された。

そのようにして、1890 年 9 月 23 日、Couette は Paris の学校施設を閉めて Angers へ移った。そこで彼は次の 43 年を (自由) 理学部の物理科学教授として過ごした。彼は特に力学、電気学、光学、熱力学の講義をし、少し後には 1898 年創立の Catholic 大学農学部大学院で物理学と気象学を教え始めた。彼はまた、第一次世界大戦の間商学部大学院および Externet Saint-Maurille で、続いて私立女子中等学校 Ecole Freppel で連続講義 (講座) をした。

この時点から、Angers で彼の好きなようにできる限られた設備や家族の必要のために追求せねばならない猛烈な教師活動にかかわらず、彼の科学的活動は極端に変化した。実際、当時のフランス内には大きくなっていく対立があり、終に 1905 年教会と国との公式の分離に至った。Couette は理論と実験研究双方の論文を書き、多くの文集に貢献した。その中の例

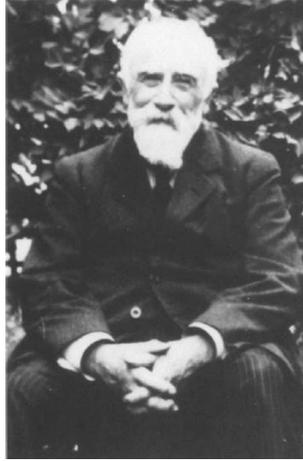


図 5.7 金婚式頃の Couette

には、電池内の浸透理論、音の伝播現象が含まれる。

Angers で特に Couette は Fernand Charron の博士研究を指導監督した。彼の学位論文「固体間の摩擦における空気の影響」は 1911 年 Paris で提出された。Fernand Charron は後に UCO の物理科学教授として Couette の後継者になった。

1888 年 Couette はフランス物理学会の会員に選ばれた。1890 年の Angers への出発の時、彼は不在会員になり、永年その立場を維持した。Catholic 教授会 (複数) の教授として彼は、少なくともある時期、Paris で行われている大学での物理の研究との接触を保っていた。

Catholic の高等教育に果たした彼の卓越した貢献と手本とすべき彼の生活スタイルを Catholic 社会が認めたことにより、1925 年、Couette は法王 Pius IX 世により聖 Gregory 大騎士団の Knight に叙任された。

Couette は 1933 年大学で教えることを断念した。その 10 年後の 1943 年 8 月 18 日に亡くなった。妻の 2 年後だった。1936 年 8 月 Angers の聖 Thomas Aquinas で祝われた Couette 夫妻の金婚式では、彼らの生活と偉大な真価を賞賛する法話が Telmesse の司教 Monsignor Costes、個人的友人の Angers の司教によって与えられた。彼の葬式には、家族、友人に加

えて 300 人以上の地域の高官が出席した。

### 「流体力学の研究」

Couette が学位論文で取り扱った課題は有名な Navier の研究に続いたものであった。1822 年、Navier は摩擦を取り入れた流体の運動を表す式を確立していた。Couette の仕事は液体の内部摩擦係数の研究であった。Couette の研究の位置付けを行う最も良い方法は、彼が 1889 年 3 月 1 日に行った口頭発表に対するフランス物理学会の Bulletin に含まれている要約を再現することである：

「Couette は、Navier が提出した式を粘性を取り入れて液体の運動を表すために、新しい実験的検証に付した。彼は二つの方法を用い、水で研究した。

一番目では、液体は二つの同心円筒の間に閉じ込められる：外筒は一樣な運動で回転する。一方、内筒は錘で動かないように固定され、その重みで筒に対する液体の摩擦偶力 (moment)  $M$  を測ることができる。装置の大きさは以下のとおりである：

外筒の半径: 14.6395 cm

内筒の半径: 14.3942 cm

内筒の高さ: 7.905 cm

外筒の回転数  $N$  が分当り 56 より低い時、比  $M/N$  は一定値を保ち、それは Navier 方程式の最も単純な特解 (particular integral) と一致している。56 rpm と 60 rpm の間では、この比は急激に増大し、その後ゆっくりとなる。127 rpm 以上、実験の限界である 150 rpm まで、 $M/N$  は近似的に  $N$  の一次函数になった。

二番目では、水は径が 0.1 cm と 1 cm の間のガラス管の中を流れる。両端の影響は音管に対する Wertheim のやり方と類似の方法で取り除かれる。 $q$  を流速、 $i$  を単位長当りの圧力差とすると、流速が管の半径に比例するある限界値  $q_1$  以下の時、流れは Poiseuille の法則に従う。 $q$  が  $q_1$  からある限界値  $q_2$  へと変化する時、比  $i/q$  は急速に増加する。 $q_2$  を越えると、比  $i/q$  は近似的に  $q$  の一次函数になる。

水平の管から流れる液体の噴流 (jet) の観測は面白い結果を投げかける。流速が  $q_1$  以下の時、噴流 (jet) は滑らかで乱れは無い。 $q_2$  以上でもまた

乱れは無い。しかし  $q_1$  と  $q_2$  の間では、噴流の様相と振幅に突然の変化、次々と素早く変化する不規則な間隔が現れる。噴流は交互に、滑らかで引き伸ばされたり、波打って縮められたりする。この実験は学会の会員の前で水銀の噴流を用いて鮮やかに繰り返された。そこでは拡大された画像がスクリーンに投影された。

結論付けると、液体の運動は二つの異なる型 (regime) を持つ。遅い運動でのみ起こる第一は Navier 方程式の最も単純な解で、近似ではなく、正確に表される。もっと速い運動で起こる第二はそれらの解には従わない。速度がある限界の間にある場合、二つの型が可能で交互に起こる。」

このように Couette は二つの実験法を用いた:

第一は、先駆者達が表した考えを利用した: G. G. Stokes は 1845 年に、Max Margules は 1881 年に、異なった速度で回転する二つの同心円筒間に流れを作り出すことを提案した。

Couette はこの方法に関連した理論計算を行った。そこでは、貧弱な同軸性や末端効果などの障害 (干渉, interference) 効果を取り入れるために最大限の注意を払った。

第二は、以前に Poiseuille(1846) が用いた構成 (装置, configuration) である細管内の流動の間の圧力差の測定を用いた。Couette は十分展開した定常流では圧力差は管の長さ按比例すること、用いられた様々な流体、管壁の材質に対して、管壁における流速が 0 であることを明確に示した。

これら二つの実験的構成に対して、Couette は層流について確立された関係が真でなくなる流速の範囲を議論した。それにより、事実上層流から乱流への転換に対応する異なる型 (regime) の存在を示した。Couette が Osborne Reynolds の論文を知ったのは学位論文の研究を終えた後だった。したがって、この型変化の理由は説明していない。彼の研究は Poiseuille に研究された管内の流れと伝統的な水力学を結びつける利点を持っている。

Couette は用いた流動装置に含まれる運動に対する方程式を注意深く組み上げ、以前の実験で犯された誤差、自分自身の実験で起こりうる誤差を正確に評価した。彼はまた、ゆっくり回転している回転体の壁近傍の流体の運動に対する困難な計算を遂行した。

同時代人、特に学位論文審査員に認められた Couette の主な真価 (merits)

は、彼が理論計算を行った細心さと巧みさであった。彼の実験法における観測と想像の大いなる力と結びついて、これらの質は、彼が学位論文の中で標準の参照データとなった結果を産み出すことを可能にした。20世紀の初め、「Couette 流動」はそのような科学研究として引用された。

Joseph Boussinesq と Gabriel Lippmann に強い印象を与えた結果は、Poiseuille が細管を用いて行った実験の繰り返しに関するものであった。Gabriel Lippmann は、Couette はガラス (磨いたもの、グリスを塗ったもの、ワニスを塗ったもの、銀塗装のもの)、銅、白色合金、パラフィンで作った管を用いた実験で観測した、壁面でのすべりが無いということを十分強調しなかったと考える慧眼を持っていた。

この結果の一つは、物理学研究所で Couette が創めた回転流動に関する研究は彼が去った後継続されなかったことである。Gabriel Lippmann の関心は電気や熱力学の現象により置かれていた。一方、Couette の研究への貢献が立証され、Couette の学位論文にしばしば引用されている Joseph Boussinesq は理論水力学における広範な課題を研究した。

### 「Couette 粘度計」

Couette が Sorbonne を去って Angers の Catholic 大学に移った時、彼は学位論文の第 1 章に記述した粘度測定を行うために用いた円筒装置を持っていった。永年の間、それは殆どの人に知られず、用いられずに分解されて倉庫に置かれていた。その装置は UCO の教授、名誉教授である Michel Brémont と Maurice Dubois によって持ち出され、磨きをかけられた。1990–1991 年の学期始めを示すためにこの大学によって組織された古い装置の展示会の折であった。

2年後の 1993 年 5 月 12 日から 15 日まで、Fontevraud の Royal Abbey にある聖 Lazare 女子修道院で高分子レオメトリーに関する国際会議が持たれた。会議を組織した Jean-Michel Pieu は Maurice Couette に関する情報をできるだけ多く集めることを望んだ。これらの教授たちの貴重な助力で、Maurice Couette の経歴を再追跡することが可能となり、彼の装置が多くの国からの大学での研究者、工業人の参加者に示された。発明者の死から 50 年後、装置の開発から 100 年以上後のことだった。

図 5.8 は元々の Couette 回転粘度計で、現在の状態の写真である。内

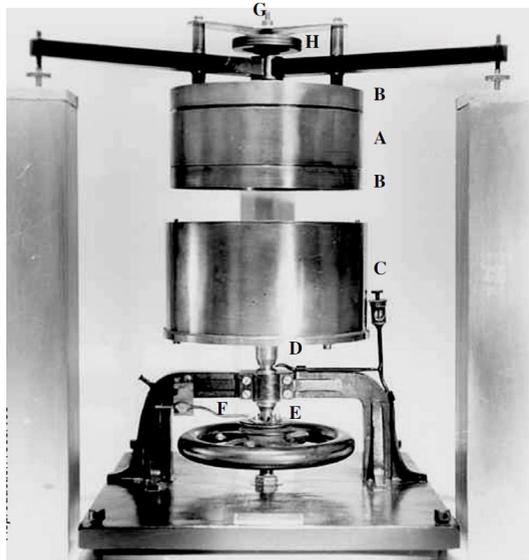


図 5.8 Couette 粘度計 (1888)

筒一保護環部は写真を取るために外筒から取り出され、上に持ち上げられている。

図 5.9、5.10、5.11 は Couette の学位論文に描かれている装置の模式図である。内筒  $s$  には保護環 (guard ring)  $g$  と  $g'$  が取り付けられ、 $C'$  と  $n$  の工夫で回転中心に保たれるようになっている。外筒は  $V$  である。

この装置は、研究所や工業界のための Paris 人の著名な精密機械メーカーであった Eugène Ducretet によって製作された。Eugène Ducretet は多くの特許を持っており、科学や工学の進歩に捧げた生涯を通して、物理学や化学 (電気、熱力学、放射線学、等) の分野における当時の最新の発見を組み込んだ多くの装置を製作した。それと同時に様々な分野で多くの紛れも無い発明をした。特に彼は 1898 年地上で操作するための最初の無線電信機を組み立てた。1908 年の彼の死後創立者の名をとった Ducretet 社は、1931 年 Thomson-Houston と合併し、Ducretet-Thomson ラジオ受信機を作った。

Couette の円筒装置は賢明で細心の設計で、様々な巧妙な仕掛けが組み

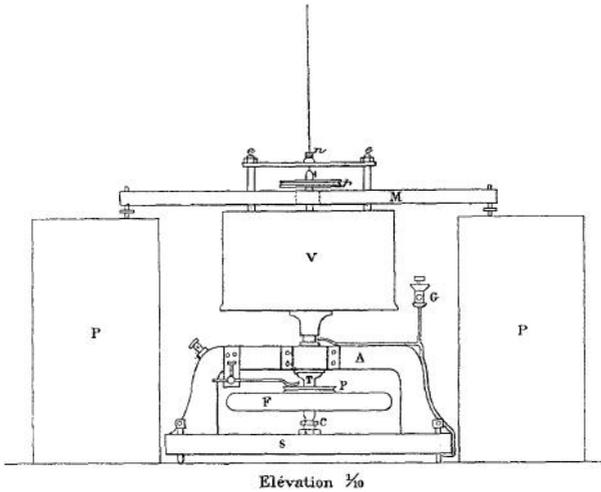


図 5.9 立面図

込まれている: 保護環 (guard rings)、高いトルクを測るためのトーションワイヤー (バネ針金) に替わる Atwood 機械プーリー、慣性ハズミ車、潤滑ベアリング、旋回不安定性に対抗し、回転部の動的な釣り合いの乱れに抵抗する芯出し機構、電氣的駆動、速度測定系などである。それらは全て独創的な特徴であり、得られた測定精度と信頼性に寄与している。Odessa の理学部の学部長 Theodore Schwedoff は 1889 年 2 月 21 日、研究のコピーを送ってくれたことで Couette に感謝の手紙を書いている。彼は実験における誤差を避けるために必要な注意を強調している。

Couette が装置を組み立て、最初の測定を始めた時期に、William Froude の甥である若いイギリス人研究者 Arnulph Mallock が Rayleigh 卿の研究室に加わった。彼は内筒と外筒のどちらでも回転させられる、類似の型の円筒装置を作り始めた。彼の最初の測定結果が 1888 年 11 月の王立学会で Rayleigh 卿によって提出された。彼らは *Proceedings* の最終版に出版される前に 2、3 の補正を行った。

Couette は学位論文の中でこれらのイギリス人のテストを参照している。彼はその装置の設計では考慮されていない釣り合いや末端効果からの問題

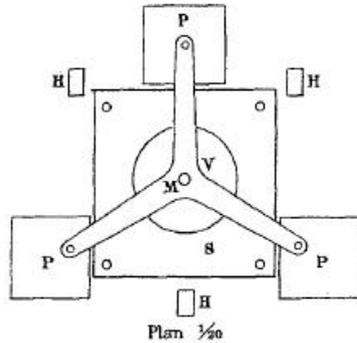


図 5.10 平面図

を分析した。7年後 Arnulph Mallock はより完全な論文を出版し、その中で 1893 年から 1895 年に行った測定を記述し、粘度測定の精度に影響するかも知れない様々な干渉効果 (障害要因、interference effects) を暗に言及した。

Mallock の装置の更なる分析が G. I. Taylor によって行われた (1923)。円筒と隙間 (gap) に選ばれた大きさから円筒底の型、支持 (suspension) 方法にわたる実験装置 (set-up) における可能な誤差の原因が全て記述されている。これらによる誤差の全ては内筒が回転する時、より深刻になる。

Couette の装置は水、油、驚くべきことに空気についての測定を行うのに用いられた。彼の結果は信頼する価値のあるもので、彼のした理論展開はそれに研究価値を加えた。

現在まで詳細の異なる様々の同軸円筒粘度計あるいはレオメータが製作されてきた。一般的に Couette が組み込んだ保護環はもはや付けられてはいない。それらの同軸円筒は全て「Couette セル」と呼ばれている。

最も大きい Couette セルは直径が約 1 m である。これは径が 1 cm 以上もある粒子の懸濁液の研究のために作られた。また、Couette セルの最も狭い間隙は  $2 \mu$  である。これは内燃機関のように高いズリの下における潤滑油の粘度を測定するために作られた。

Maurice Couette は疑いなく卓越した物理学者であり、またレオロジー

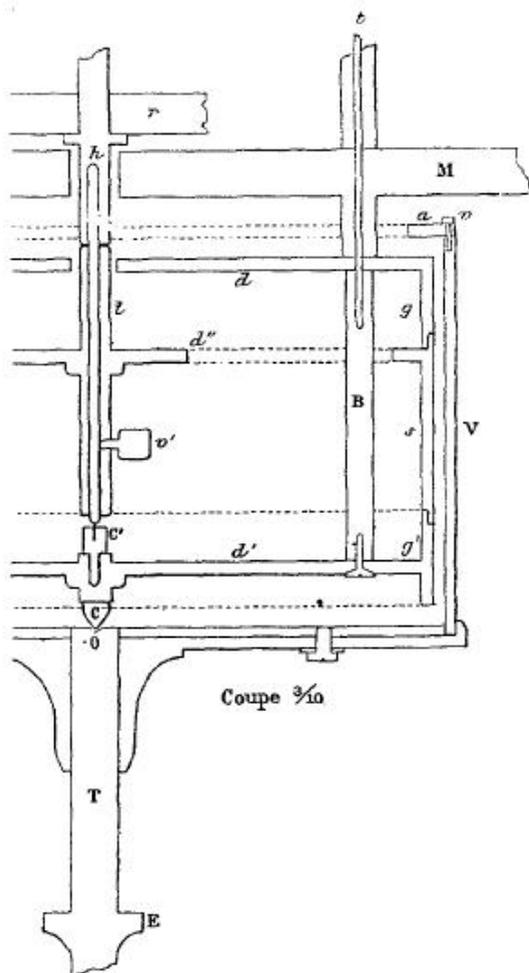


图 5.11 断面图

の創始者の一人である。彼の学位論文の序論には以下のように書かれている:

「現在まで液体の内部摩擦係数と他の物理的性質あるいは化学構造との間の関係を確立するために行われた広範な研究はそれらの法則を定式化するには至っていない。実験的な確実性や理論への正確な適合性という理由で科学に一つの位置を占めるに値する。この同じ分野で新しい研究をする前に、次の二つの疑問を注意深く調べるのが賢明であると私は感じる。

1. 内部摩擦係数は十分定義された物理量であるか？
2. その値を決定するのに従うべき規則は何か？」

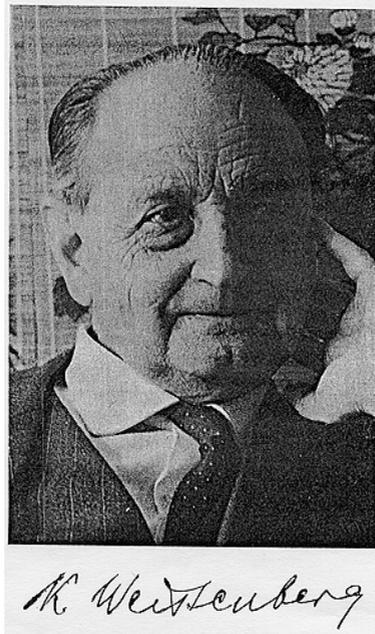


図 5.12 Karl Weissenberg (1893/6/11–1976)

### 5.3 Karl Weissenberg

Karl Weissenberg の業績と生涯については 80 歳の誕生日祝賀評論集 (essays)<sup>6,7,8,9,10</sup> と *Rheologica Acta* の記事に詳細がある。<sup>11</sup> Weissenberg は 1893 年 6 月 11 日オーストリアの Vienna で生まれた。彼は 16 才半の歳 Frankfurt/Main で大学入学資格を得る前にオーストリア、ドイツ、フランスで 14 の違った学校へいった。続いての勉強は Vienna 大学、Berlin 大学、Jena 大学で進められた。主とした専門は数学で、副主題は物理学と化学だった。また、法律と医学にも触れた。Ph.D の学位 (数学) は 1916 年 Jena 大学で授与された。彼は私講師 (Privat-Dozent) になり、後に Berlin 大学の物理学教授になった。

彼は科学に普遍的 (catholic) 興味を持ち、永く実り多い科学的経歴の間 (異常に) 多様な課題で教授職、客員教授職を保った: Berlin 大学と

Southampton 大学では物理学、Paris 大学では物理化学、New York の Columbia 大学では土木工学と工業力学、South Carolina 医学校では人間解剖学 (Human Anatomy) などである。教育活動に加えて、彼は様々な時期にドイツ、英国、アメリカ合衆国の多くの大規模の工業会社、幅広い政府機関、保健組織の科学顧問になった。

.....

Vienna 総合病院の研究者 1914-1918、Jena 大学 1918-1920、Berlin 大学 1920-1921、Berlin の Kaiser Wilhelm 化学研究所 1921-1924。

Kaiser Wilhelm 協会の科学アドバイザー 1925-1933、Berlin 大学物理学教授 1932。

Paris の Sorbonne 大学客員教授 1933-1934、Southampton 大学客員教授 1934-1940。

London の Imperial 大学の石油戦争部門の科学アドバイザー (連絡将校) 1943-1946、Manchester の英国木綿研究協会 Shirley 研究所 1940-1948、レーヨン研究協会の数学部門主任 1948-1950、Harwell、London、Cambridge を基地とする補給省の上級科学アドバイザー 1950-1958。

.....

Weissenberg の 70 を越える原著論文は時代順に数学、医学 X 線、X 線結晶学、レオロジーの多岐に亘っている。数学の論文では対称群の解析、テンソル、行列代数に新たな概念を、医学の論文では血液循環の新たな測定法、癌治療における X 線の線量測定、人体中の異物の X 線による場所特定を研究した。彼は対称群の解析についての彼の数学理論を多結晶固体の対称の分類や単結晶の分子理論に用いた。理論を実験に結び付けて、彼はあらゆる種類の固体の組成と構造の決定方法を開発した。その方法は「Weissenberg X 線ゴニオメータ」として知られる装置の設計で最高潮に達し、世界中の結晶学研究所で用いられた。1922 年 Weissenberg は Berlin-Dahlem の Kaiser Wilhelm 化学研究所で M. Polyani の研究チームに加わり、そこで約 6 年間 X 線結晶学研究に貢献した。この分野で彼に名声をもたらしたのはこの新しい X 線ゴニオメータを記述した 1924 年の論文だった。この装置は 3 次元空間における結晶構造の唯一の決定を初めて可能にした。

1929年までに Weissenberg の注目は結晶学からレオロジーの分野に向けられた。1929年、彼は R. Eisenschitz、B. RabinoWitsch とともにレオロジーにおける最初の重要な論文を投稿し、今や広く用いられている毛細管壁でのズリ速度を見出す一般的な解析方法を示した。1930年代の間に、彼はレオロジーの分野でよく知られるように成ることが運命付けられていたもう一人の人物、すなわち W. Philippoff と協同するようになった。

1933年 Hitler が権力を持つようになってきたとき、Weissenberg は難民になり、英国に住所を持ち、そこでは特に火炎放射器の燃料に例証される弾性液体に注意を向けた。これは最も生産的な時期で、多くの予期しないレオロジー現象が観測され、研究された：管流動における異常に大きい流入、流出効果、同心円筒間の Couette 流動における内筒への液の攀じ登り、平行円板間の二次流動などである。法線応力効果についての活発な研究が第二次世界大戦中英国で始まった。彼の実験結果は戦時の条件のため少し遅れて 1947 年に出版された。その研究は戦後、機密書類からはずされ、いくつかは出版された。それはいわゆる異状液体への、其処から液体レオロジーへの好奇心と興味を大いに刺激した。しかし、詳細の多くはまだ一般には知られていない。この時期のもう一つの重要な論文は 1948 年のオランダにおける国際レオロジー学会の *Proceedings* にある。そこで、Weissenberg はゴムと織物のシートを用いて流動している連続体における埋め込み座標系の回転の重要性を示した。彼はずっと以前からある種の流体は弾性的であることを推測しており、今、流線に沿っての張力の存在の推定に至った。豊富な例があった。張力の最も早い定量的評価は London の Imperial 理工科大学のポスドク学生 R. J. Russell の研究から産まれた。彼は Weissenberg の指導監督下で研究し、非常に多くの様々な型の定量的実験を行った。不幸にもそれらは 1946 年の彼の学位論文にのみ発表されている。

この時期にまた Weissenberg レオゴニオメータ (Rheogoniometer) の主要部が確立された。この第二の主要な発明の陰にある原理は、それが流動する連続体内における全立体角の回りの応力を実験的に決定することを可能にするということであった。Weissenberg ゴニオメータと同様、それは商業生産され、世界中に広まるようになった。

Weissenberg は粘度のズリ速度依存性を孤立した現象であるとは考えな

かった。彼は同じ流体が流動複屈折を示す事実に注目し、それを流動系における非等方性の証拠であると取った。彼は溶液が弾性的であると気づき、粘弾性の Maxwell 模型でそれを議論した。このように、彼は始めから非 Newton 流体のレオロジーにおける最も相互関係を持つ現象を掴んでいた。Weissenberg はそれを熱力学に基いて説明しようと試みた。このプログラムは今日でもまだ完成していない。

.....

1940年代の初め、粘性と弾性を示す物質の真のパラメータ(複数)の決定がますます重要になってきた。この時期、Merrington は濃密炭化水素がノズルから噴射されるときに回復性歪みを示すことを示した。一方、Russell と Roberts は独立に高粘度の噴流もまた弾性的性質を持つことを実験的に示した。

この時期、物質の実際の複雑さとそれらの更なる可能な解析は理解されていなかった。Weissenberg は含まれる理論的原理を掴んでいた。予備実験が Rosin、Fehling、Russell、Gardner、Nissan、Wood、Freeman、Roberts によってなされるにつれて新たなより良い装置が必要であることが明らかになってきた。測定される力学量が非等方であるときはいつでも変形中のズリ成分は異なる方向の応力の異なる値を確実にするので、ゴニオメータ(測角器測定)実験なしに流動を支配する現象の制御を得ることを想像するのは難しい。それ故、流動のゴニオメトリー(測角測定法、goniometry)は、あらゆる瞬間に空間の全ての点で全方位角の回りで、流体内の応力と歪みの分布の測定と定義できるかも知れない。

ゴニオメータパターン(goniometric pattern)で流体状物質の性質を測定するという Weissenberg の考え以前では、流動物質の解析はズリ応力と変形との関係に限られていた。Weissenberg は、一般の物質中には付加的な力が発生し、彼の理論では次の3つの基本原理の適用が要求されること、ゴニオメトリーがそれらの原理のそれぞれに重要であることを指摘した:

1. 流動物質中のあらゆる点における力の動的平衡
2. 連続性の保持

### 3. 応力-歪み関係

これらの原則は装置の基本であり、1940年代半ばに明確に確立された。その時期チームが分散したが、Weissenberg、Freeman、Russellは少なくとも現象的には理想的な装置の近似的なものである装置の予備的な開発を報告した。1948年の会議でWeissenbergはそれをレオゴニオメータ (Rheogoniometer) と名づけた。液体がズリを受ける時、ズリ応力と法線応力が存在することが示された。またズリ振動実験で、小さい振動では法線応力は小さいか無視できるが、大きな振動では法線応力の振動数はズリ応力の振動数の2倍であることが示された。

.....

#### 「ズリ振動実験」

Weissenbergの理論的研究は、液体中の弾性歪みの存在がズリ速度の増大による見かけの粘度の著しい減少をもたらすであろうことを示した。したがって、このWeissenbergの推論を検証し、流体のより完全な力学特性を決定するには、流体の弾性的性質を測定する信頼性のある方法の開発が望まれた。

Weissenbergの理論解析は、振動実験における周波数(角速度、radian/sec)は定常的層流におけるズリ速度( $\text{sec}^{-1}$ )と等価であることを示していた。角速度 $\omega$ 、振幅 $A$ の振動実験における歪み(変位) $\gamma$ は

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial r} A f(r) \sin(\omega t) \\ &= A \omega \frac{\partial}{\partial r} f(r) \cos(\omega t)\end{aligned}\quad (5.1)$$

で与えられる。ただし、 $r$ は径方向の距離、 $f(r)$ は $r$ とともに変化する振幅を表す形状因子である。したがって、振動実験における瞬間的なズリ速度は周波数と振幅の積に比例する。テストした全ての物質で、振動実験で発生する応力は課された振幅に比例するが、周波数への応答はもっと複雑であることが判明した。これはWeissenbergの考えと一致するものであった。

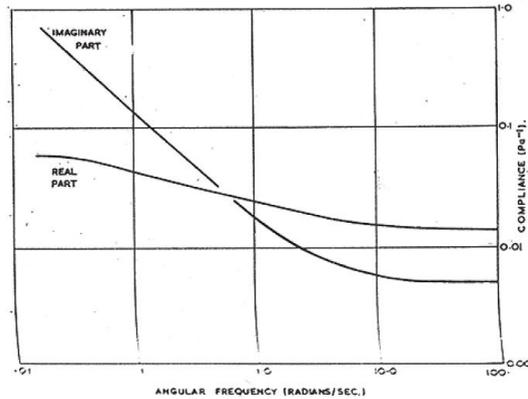


図 5.13 複素コンプライアンス

周波数応答の複雑さは流体の流動の性質を完全に記述するには多数の物質定数が必要であることを示した。そこで、一般的な型の線型モデルとして次式が仮定された:

$$\alpha_0\sigma + \alpha_1\dot{\sigma} + \alpha_2\ddot{\sigma} + \dots = \beta_0\gamma + \beta_1\dot{\gamma} + \beta_2\ddot{\gamma} + \dots \quad (5.2)$$

ここで、 $\sigma$ 、 $\dot{\sigma}$ 、 $\dots$  は応力テンソルとその時間微分、 $\gamma$ 、 $\dot{\gamma}$ 、 $\dots$  は歪みテンソルとその時間微分である。この式の時間微分に対して  $i\omega$  を代入すると、( $\sigma = \sigma_0 \exp(-i\omega t)$ 、 $\gamma = \gamma_0 \exp(-i\omega t)$  と置く)

$$\sigma[\alpha_0 + (-i\omega)\alpha_1 + (-i\omega)^2\alpha_2 + \dots] = \gamma[\beta_0 + (-i\omega)\beta_1 + (-i\omega)^2\beta_2 + \dots] \quad (5.3)$$

が得られる。この式は周波数のみの関数である複素コンプライアンス  $J^*$  ( $= \gamma/\sigma$ ) で液体の周波数応答を表すのを可能にする。物質が真の液体であるとき、 $\beta_0 = 0$  であり、低周波数では一次微分の項までが重要と考えられるので、この式は Maxwell の式に還元される。

$$\frac{\alpha_0}{\beta_1}\sigma + \frac{\alpha_1}{\beta_1}\dot{\sigma} = \dot{\gamma} \quad (5.4)$$

この式の  $\beta_1/\alpha_1$  は弾性率  $E$  であり、 $\alpha_0\beta_1$  は粘度  $\eta$  である。

図 5.13 は複素コンプライアンスの実部 (貯蔵コンプライアンス) と虚部 (損失コンプライアンス) の典型的な例である。二つの主な特徴が見られる:

1. 低周波数域では、実部は周波数に独立になる一方、虚部は周波数の逆数に比例して減少する。
2. 高周波数では、実部は幾分減少して一定となる。この領域で虚部は減少が止まり、一定となる。

このように低周波数域の挙動は Maxwell 流体の挙動に向かう。このような実験からの粘度の評価は低いズリ速度での層流実験からの粘度と同じ値を与えた。Weissenberg は層流下での Maxwell 流体の振る舞いを計算し、無次元量

$$\frac{\eta\dot{\gamma}}{E} (= \tau\dot{\gamma}) \quad (5.5)$$

が 1 のところから見かけの粘度の著しい減少が起こることを示した。(  $\tau = \eta/E$  は Maxwell 流体の持つ緩和時間である。) 調べた全ての物質に対して、振動実験から得た  $\eta$ 、 $E$ 、と見かけの粘度が低下し始めるズリ速度  $\dot{\gamma}$  を用いて、この予言は確認された。

この Weissenberg の理論予測と実験とのよい一致は、ズリ速度が増加するに連れて応力テンソルが流線方向へ回転するという Weissenberg の仮説の正しさを示唆していた。そのような回転は少なくとも一つの法線応力成分の存在を引き起こすだろう。このようにして、研究の主目的は法線応力をまず分離し、その大きさを測定する技術の開発となった。

### 「Weissenberg 効果」

Weissenberg の仮説は粘弾性流体中の応力テンソルは回復性歪みテンソルの等方的函数であるというものである。この仮説は適切な注目を受けていないように見えるが、高分子溶液や熔融体のレオロジー的性質を研究する上で現在でも意味を持っている。

法線応力の最も現実性のありそうな測定法は流線の曲がりによって引き起こされる効果を研究することだった。このとき、流線方向に作用する法線応力成分 ( $P_{11}$ ) は輪を引き締める力 (hoop stress) として働き、曲率中心に向かう圧力の増加を起こすだろう。Weissenberg 自身の提言は「もし流線が閉じた円環なら、それらの線に沿った張力は液体を絞り上げ、遠心力に逆らって内方向に、重力に逆らって上方に力を及ぼすだろう」ということである。この提言に基いた計算が Weissenberg と彼の協同研究者に

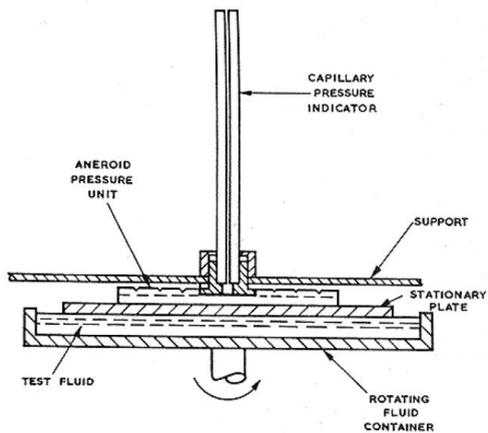


圖 5.14 平行円板型装置

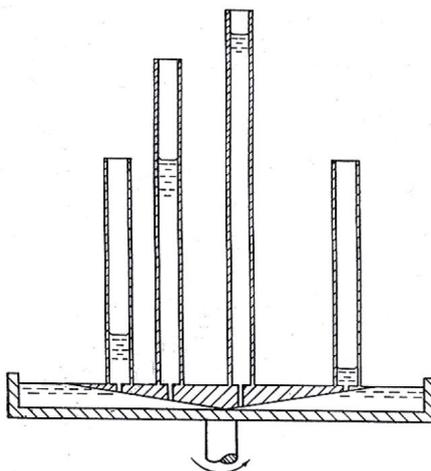


圖 5.15 円錐-円板型装置

よって行われた (Freeman と Weissenberg 1948、Russell 1946、Roberts 1952)。

仮想された効果を調べる最も単純な方法は二つの平行円板の流体にズリを加えることであった。図 5.14 はこの目的で最初に作られた装置で、初めて Weissenberg 効果を示したものである。

流線と直角方向の法線応力成分 ( $P_{22}$ ) が存在するかどうかを決定するために、円板上の動径方向における応力分布が研究された。結果の解釈を容易にするために平行円板系は円錐円板系に置き換えられた。図 5.15 がその装置で圧力分布が一連のマノメータで測られる。

もう一つの方向の法線応力成分を  $P_{33}$  とし、第一法線応力差  $N_1$ 、第二法線応力差  $N_2$  として

$$P_{11} - P_{22} \equiv N_1, \quad P_{22} - P_{33} \equiv N_2 \quad (5.6)$$

を定義すると、円錐-円板型装置に対する基礎式は

$$P_{22}(r) - P_{22}(R) = P_{33}(r) - P_{33}(R) = (N_1 + 2N_2) \ln(r/R) \quad (5.7)$$

$$P_{22}(R) + p_a = N_2 \quad (5.8)$$

$$\frac{2F}{\pi R^2} = N_1 \quad (5.9)$$

で与えられる。ここで、 $r$  は回転軸からの距離、 $R$  は円板 (円錐) の半径、 $p_a$  は大気圧、 $F$  は円錐全体に働く鉛直方向の推力である。また、 $-P_{22}(r)$  は位置  $r$  で円錐 (円板) に働く鉛直方向の圧力である。

無次元量

$$\frac{P_{11}}{E}, \quad \frac{P_{12}}{E} \quad (5.10)$$

を  $\eta\dot{\gamma}/E$  に対してプロットすることによって法線応力成分とズリ応力成分を含む一般的な関係を得ることが可能であることが発見された。図 5.16 にその関係を示す。 $\eta\dot{\gamma}/E$  が 1 より小さい時、この結果は

$$\frac{P_{12}}{E} = \frac{\eta}{E} \dot{\gamma} \quad (5.11)$$

$$\frac{P_{11}}{E} = \left( \frac{\eta}{E} \dot{\gamma} \right)^2 \quad (5.12)$$

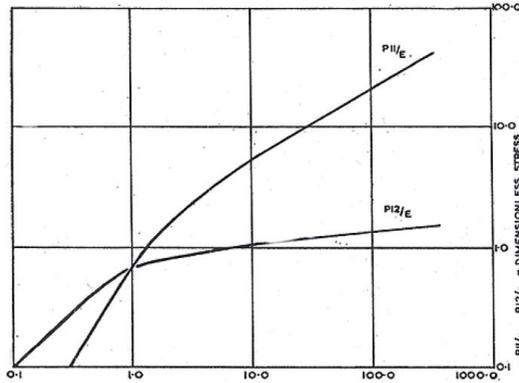


図 5.16 法線応力とズリ応力

で表される。それ故、ズリ速度が低くなるほど、 $P_{11}$  成分は急速に重要性を失い、流体挙動はますます通常の粘性液体に近づく。

Freeman と Weissenberg の観測は様々な粘弾性液体について

1. 推力  $F$  は正である。
2. 円錐-円板系でも平行円板系でも、縁の圧力  $-P_{22}(R)$  は大気圧  $p_a$  に近い。

ことを示した。これらの結果は

$$N_1 > 0 \tag{5.13}$$

$$|N_2| \ll N_1 \tag{5.14}$$

と纏められる。現在、Weissenberg 効果を示す全ての液体についてこれらの結論を確認する多くの証拠が集められている。



図 5.17 老年の Weissenberg

Karl Weissenberg はオランダで引退し、1976年に亡くなった。



図 5.18 James Gardner Oldroyd (1921–1982/11/22)

## 5.4 James Gardner Oldroyd

James Gardner Oldroyd は 1921 年英国生まれの数学者、レオロジストである。<sup>12</sup>

Oldroyd は Bradford 中等学校 (高校) に続いて Cambridge 大学 Trinity 校で教育を受けた後、Aberystwith から遠くない Aberporth の補給省で専門的経歴を始めた。1945 年彼は Berkshire の Maidenhead にある Courtaulds 基礎研究所に移った。彼はそこに 1953 年まで留まった。1946 年彼は Marged Katryn Evans と結婚した。1947 年から 1951 年まで Oldroyd は Cambridge 大学 Trinity 校の特別研究員 (Fellowship) を保ち、また文学修士 (Master of Arts) と Ph.D の学位を得た。後に彼はより高い Cambridge 大学の博士号 (Sc.D、科学博士) を得た (1963-1964)。

Oldroyd は 27 才で既に国際的名声を得ていた。1953 年、Oldroyd は応用数学の教授として Swansea 大学に移り、1965 年までその地位を保った。彼は 1955-1957 年、英国レオロジー学会の会長を、1957-1959 年 Swansea 大学理学部長を務めた。

1965年、Oldroyd は応用数学と理論物理学の教授として Liverpool へ移った。

1981年の Oldroyd の60回誕生日の際の“*Bulletin of the British Society of Rheology*”に Ken Walters と Byron Bird による、それぞれ「J. G. Oldroyd 教授一彼の第60回誕生日への感謝」、「彼の第60回誕生日の機会に James G. Oldroyd 教授へ」と題する特別寄稿論文がある。彼らはそれぞれ英国人とアメリカ人の著名な二世代のレオロジストで、彼らの論文は第一世代のレオロジストの間で Oldroyd が占める卓越さと国際的な位置に相応しい賛辞を与えている。それらはまた多くの彼の論文を引用しており、有用な情報源でもある。

引用回数を数えるゲームに意味があるかどうか疑わしいが、1965年から1981年の間に Oldroyd の論文は約910回引用されている。特に彼の1950年の論文 (*the Proceedings of the Royal Society*, **A200**, 523-541) は310回引用されており、引用頻度は減って行きそうにない。この人気の一つの理由は、優雅に表現された基本的な考えと単純な例証の組み合わせ、応用数学が関係しているであろう決断力に導かれた抽象化の過程によるものであろう。Walters は一般性と単純さの組み合わせを強調して以下のように述べる：「Oldroyd の1950年の論文は明らかに健全であり、完全に一般的である。他のものは彼がその論文で述べたことに何も加えたり、それから何かを取り去ったりしていない。単純な Oldroyd 模型はそれゆえに未だ非常に人気があり、非 newton 流体力学における新しい重要な展開に用いられている。」

Truesdell は1965年の論文集“*The Rational Mechanics of Materials*”の序文で Oldroyd の1950年の論文を評価して、「この論文は理論連続体力学の一般的な道筋 (program) を認めた最初のもので、それをやり遂げる処方を与えた最初のものである。」と書いている。また、Bird は「1950年の論文の初めの12ページは流動と変形の動力学を理解するのに要する知識の心髄を含んでおり、科学の全分野を明確、簡潔に捉えている。」と述べている。更に Metzner は「1950年の論文は多分理論レオロジーにおける最も重要な単一論文である。」と記述した。

Oldroyd は粘弾性液体の流動に繋がる基本的な研究と同様に、他の多く

の分野に貢献した。此处では二つを取り上げる：一つ目は粘度測定に関わる明らかに実的な問題で、特に管内流動における管壁の効果を取り扱った。これは1948年の第1回国際レオロジー学会で「第一世代レオロジスト」という気ままな演題で発表され、学会から「この発表を聞くのは非常に喜ばしい。」と云われた。二番目はより基礎的な熱力学の議論である。1962年、Oldroydは「流体の場合、我々は状態方程式を書き下しているときそれが熱力学の原理と矛盾しているのを未だ知らないことを認めねばならない。」と書いた。この言明は1974年と1976年の二つの論文にも繰り返され、彼はそれらの中で、不可逆過程の熱力学の現代の緊急状態では正当であるとして、可能ないくつかの方法の一つを我々にもたらしめている。これらの論文には、「実際の経験」、「限られた目的」、「ちょっとプラグマティズム的」のような語句が繰り返し現れる。

Oldroydは初めて会うと物静かで遠慮がちであり、典型的イギリス人と云える。人は彼の生来の内気さに気づくかも知れないが、それは彼がレオロジーの事柄ではずばりとものを言うのを妨げるものではなかった。

James Gardner Oldroydは1982年11月22日月曜日急死した。



図 5.19 Clifford Ambrose Truesdell III (25 才) (1919/2/18–2000/1/14)

## 5.5 Clifford Ambrose Truesdell III

Clifford Ambrose Truesdell は 1919 年 2 月 18 日アメリカ合衆国 Los Angeles で生まれた。<sup>13</sup> 彼は、1936 年に工芸 (Polytechnic) 高校を卒業後、大学に入学する前の 2 年間 Oxford で過ごし、その間ヨーロッパ各地を旅行した。そこで、彼はラテン語と古代ギリシャ語の知識を向上させ、ドイツ語、フランス語、イタリア語を上達させた。これらの言語能力は後に彼の数学と歴史の研究に価値あるものとなった。

Truesdell は California 工科大学の学生となり、そこで 1941 年に物理学と数学の学士号 (B.S.) を、1942 年に数学の修士号 (M.S.) を得た。彼は 1942 年に Brown 大学で力学の修了証書を得、1943 年に Princeton 大学から数学の博士号 (Ph.D.) を得た。1944-1946 年、彼は MIT にある放射線研究所の職員になり、1946-1948 年、Maryland 州 White Oak にあるアメリカ測量研究所の理論力学 (Theoretical Mechanics) 部門の主任に移動、1948-1951 年、Washington D.C. にあるアメリカ海軍研究所の理論力学部門の主任となった。彼は 1950-1961 年、Indiana 大学数学教室の教授であった。彼は経歴の残りを Johns Hopkins 大学で過ごした。そこでは彼

は1989年まで理論力学 (Rational Mechanics) の教授であったが、その後理論力学の名誉教授となった。

Truesdell は自身の科学的貢献や著作に加えて、二つの偉大な学術雑誌を残した。一つは1952年創刊の *Journal of Rational Mechanics and Analysis* を1957年に引き継いだ *Archive for Rational Mechanics and Analysis* で、もう一つは1960年の *Archive for History of Exact Sciences* である。

1963年、Truesdell は Coleman、Eriksen、Markovitz、Noll、Rivlin、Serrin、Sternberg、Toupin とともに自然哲学学会 (Society for Natural Philosophy) を創設した。最初の会合は1963年3月23-26日に「物質の統計理論と連続体理論」に関して Johns Hopkins 大学で持たれた。発表者は Eriksen、Grad、Jaynes、Rivlin、Toupin などであった。Truesdell の非公式の政策声明は次のようである：

「この学会はどの専門分野も学術分野も代表していない。それは二重の必要性から生まれている：それは、盲目的な専門化を中和する会話を開いたものとし、維持すること、科学的研究の質を認識することである。… 多数の短い会話は関心を引き起こすのに失敗し、知識を伝え損なう。我々は、会合のプログラムの主な機能として、より多くの人に少数の新しく重要な組織だてられた結果を聞くことができるようにすべきである。」  
年齢制限に基いた独特の機構が、会の活性を保つために内規として組み込まれたという事実にも拘わらず、この学会は1990年代にゆっくりと衰退した。

Truesdell は卓越した科学史家であった。彼は指導的権威であり、大いに称賛していた Euler の業績集 6 巻を編集した。この努力の一部として、彼は 1638-1788 年における弾性固体の理論展開の著名な専門書や Euler の業績への様々な科学的紹介を書いた。

健康を損なって数年後、Clifford Truesdell は2000年1月14日 Baltimore で亡くなった。彼の本と論文は Pisa の中心にある歴史的建物 Complesso San Silvestro の Scuola Normale Superiore に預けられている。彼が創設した二つの学術雑誌の個人的製本は Austin にある Texas 大学の Archives of American Mathematics に寄贈されている。

「科学への貢献」



図 5.20 熟年の Truesdell (1972)

Truesdell の重要な科学への貢献は、連続体力学、熱力学、弾性論、流体力学、気体運動論、統計力学、波の伝播、特殊函数の研究、混合の理論、応用力学と多岐に亘っている。

Caltech の学生だったとき、Truesdell は先生であった Harry Bateman に深い影響を受けた。彼は Bateman から 1940-1941 年に数理物理学の偏微分方程式の連続講義を、1941-1942 年に数理物理学の方法、圧縮性流体の空気力学、ポテンシャル理論の連続講義を受けた。全年度を通しての学生は彼と C.-C. Lin の二人だけだった。Bateman への賛辞の中で、彼はこれらのコースが如何に困難だったか、それについていき、演習問題をするのに如何に長い時間を費やしたかを思い起こしている。大事な課題、特に連続体力学と物理学、偏微分方程式の理論と特殊函数の使用で、それらのコースは若い研究者の確固とした基礎を形成した。Bateman は数学という科学全体を区画された機能ではなく連続体と見、純粋数学と応用数学との間に型や基準の差を見ない男であった。

1943 年の Truesdell の Ph.D. 学位論文は回転体殻の膜理論に関してであった。その課題は指導者である Solomon Lefschetz の研究とはほとんど関係がなかった。Truesdell は Brown 大学数理力学大学院にいた 1942 年の夏にそ

の研究を始めたと説明しており、彼は Bateman、Bohnenblust、Lefschetz、Prager、E. Reissner、H. Reissner、Tukey、そして特に Nemenyi 教授に感謝している。彼は共通の展開から膜理論と曲げ理論を同時に導くための形式的方法を開発し、主に Fourier 展開と冪級数の形式的操作の道具に頼って、円錐頂点における特異点状態を研究している。形式的方法の使用、特殊な運動仮説への信頼、非常に多くの特殊な問題の級数解の表現で、その研究は彼の他の研究から間違いなく孤立している。それはより高尚なゴールに向かっての出発点である。学位論文が書かれたスピードは、Truesdell が Princeton で他の活動をする時間はほとんどなかっただろうという印象を与える。しかし、彼は 1943 年の春に Alonzo Church が与えた数理論理学の大学院学生に対する初歩コースに出席しており、彼が取ったノートは Church の本の基になった。

学位論文の出版に続く数年の間、Truesdell は彼が後に大いに貢献することになった研究の方向と真っ直ぐおよび直角の分野を急襲した。1948 年の殻についての二番目の論文は、円錐頂点において膜理論で課されるべき境界条件を調べている。この期間の特殊函数と渦運動に関する彼の研究は、一般的原理の探索という特徴を持つもので、歴史的根源の深い評価と特に発見への圧倒的な衝動で、全く異なっており、その課題の論理構造を明らかにしている。

1944 年夏に Ann Arbor にいた時、Truesdell は新しい Dirichlet 冪級数

$$\phi(x, s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n^s} \quad (5.15)$$

を発見した。ここで、 $s$  は有理で、 $0 < x < 1$  である。この問題の原典に対する彼の唯一のコメントは、H. Jacobson が彼にこの函数は高分子の構造の研究で本質的役割を演じると知らせたというものである。彼はこの研究を、1944-1945 年にいた MIT および 1946 年にいた海軍測量研究所での余暇の時間に展開し、短いノートと単行本を 1948 年に出した。その中で、彼は汎函数方程式

$$\frac{\partial}{\partial z} F(z, \alpha) = F(z, \alpha + 1) \quad (5.16)$$

に基いた一般理論を開発した。これは、よく知られた特殊函数の間の見かけ上関連の無い関係を刺激し、発見し、組織化した。それらの 35 が最初

の章にリストされている。原稿にコメントし参考文献を与えた Bateman の追想に捧げられたこの本は、古典解析における Truesdell の背景に光を投げかけている点で、連続体力学とは全く異なった分野で彼は統一する方法と発見の論理的方法とに如何に惹かれていたかの例として面白い。

彼の二番目の主要な研究は渦の運動論であった。その中で Truesdell は連続媒体の運動の一分野として、いかなる動力学原理や特別なモデル無しに渦運動の理論を提出した。既に、後に構成方程式と呼ばれる、運動論、釣合いの法則、特別なモデルの厳格な分離の利点が現れていた。

1945-1952 年の短い期間に、非線型連続体力学の多くの鍵となる考えが産み出されていた。これらの年は、称賛せずにいられない開かれた討論、間違いの無い進歩、約束できる新しい方法から起こった、しかしそれに等しくある種回顧的な性質で記される興奮を吹き込んだ。それらは Truesdell の記念碑的論文「弾性と流体力学の力学的基礎」で最高潮に達した。Truesdell はその研究の背景を以下のように説明する：

「1946年私は連続体力学の基礎を初めて研究し始めた時、2、3ヶ月内で満足できるまで全分野を秩序立てた。私は速やかに説明の紀要を書いて国際会議に投稿したが、それは却下された。同じ会議に受理された論文を見て、私は無邪気すぎ、罰せられるに十分で落胆した。私は批評を受けるため、原稿を多くの専門家に送った。殆どの人はそれを認めたり返答したりして下さらなかったが、二人の返答があった。Friedrichs は私に、私が以前の研究者の仕事を過小評価していると話した。それに関する私の情報は多くの著名な教科書から引かれていたので、私は幾分まごついて、それらが引用されている原典に帰り、それからそれらの原典に引用されている原典へ、ついでまた原典へ、…、1年の間に如何に彼が正しかったか、1世紀、2世紀前に偉大な自然哲学者が面した実際の出来事を私がどれほど殆ど見ていなかったかを見出すまで、原典に戻った。」

「力学的基礎」は出版まで曲がりくねった道筋を辿った。Truesdell は説明を続ける：

「1948年12月23日、v. Mises が私に変形する物体について最近の理論の一般的解説を書くよう依頼した。私は直ちに仕事にかかり、約束の時までに、許容されたスペースの2倍内に収まるように厳しく凝縮した論文を完成した。1949年5月23日、v. Mises は最終原稿の受領を知らせて

きた。6ヶ月間原稿を持っていた出版者は3ヶ月以内にそれをタイプし直すように命じてきた。日に夜に働き、私は全てを詳細に亘るように、参考文献や、その合間に学んだことの短い記述を加えるためにその機会を捉えた。出版者は新しい原稿を8ヶ月間持っていた。その後編集者にそれが印刷工が扱えないほど多すぎる記号を含んでいること、その上、長すぎ、多すぎる式、脚注、参考文献を含んでいることを告げた。特に、最近の文献の引用のみが科学者にとって有用であり得るものだった。

私は1年半持っていた出版者からその原稿を撤回しようとしたが、彼はそれを返すことを拒絶し、突然のことにそれは結局印刷できることが分かった。再び夜に日を継いで、私は1ヶ月以内に完全なコピーと古いノートからそれを再構築し、挿入的にもっと新しい資料を加えた。」

出版の遅れは Rivlin の研究の幾分急いだ取り扱いを説明する。それは1953年と1954年の広範な修正で取り除かれた。Erickson は「力学的基礎」について以下のように思い起こしている：「それは私にとって新規に満ちており、決定的で、専門的であった。私は工学と科学における自然の局面を表すのに持ち出された様々な式に曝され、良い数学が如何にそれらを発展させるのに用いられ得るかを学んだ。しかし私はそれらの式に到達するのに用いられた理由は非常に少ししか学ばなかった。」

これらの発展の種は1945年の Reiner の影響力ある研究の中に既に撒かれていたが、それはまた、物理的、概念的、数学的詳細で深刻な欠陥を持っていた。Truesdell は海軍測量研究所の目立たない紀要の中でその考えを展開した。紀要 9487 の中で、彼は散逸函数が平均の熱力学圧力、温度、伸長テンソル、渦度、圧力、温度、と外力場の微分量(勾配)、成分のモル濃度とともに、参照温度、参照粘度、気体定数の次元を持つ量に依存すると考えている。非線型連続体力学に対して中心となった哲学を採用して、彼は応力テンソルの型を限定するために等方性の原理、テンソル的、次元的不変性の原理を用いた。

この期間における Rivlin の有限弾性と非 Newton 流体力学の研究から、非線型問題が実際に解かれ、物質の挙動についての正確で興味ある結論が生み出されることが認められるようになった。有限弾性の理論の中で Rivlin は見事に等方性と特に非圧縮性の結果を見通していた。平衡の方程式中の自由静水圧の存在は、非線型弾性物体について非線型応力-歪み曲

線よりももっと多くを伝える一般の等方的非圧縮性物質に対するいくつかの正確な解を彼が見出すことを可能にした。それらの結果の多くは歪みエネルギー関数の形に独立であった。非圧縮性 Navier-Stokes 流体から非線型領域への Reiner の一見自然な一般化で始まって、Rivlin は巧妙に粘性運動によって与えられる単純化を予見した。これらの結果は、結論が系統的な数学上の理由による仮定から流れ出す連続体力学の統一された枠組みの一部として Truesdell の「力学的基礎」の中で示された。続いての 15 年間に亘って、有限弾性と非 Newton 流体力学の分野の発展に大きく貢献したのは、Rivlin の結果のような美しい正確な結果へと導いたこの単純で明確な論理構造の存在だった。

10 何年か後まで完全には理解されていなかったが、Cauchy 応力テンソル  $\mathbf{T}$

$$\mathbf{T} + p\mathbf{I} = \alpha_0\mathbf{I} + \alpha_1\mathbf{D} + \alpha_2\mathbf{D}^2 \quad (5.17)$$

の決定要素 (determinate part) に対する構成関係式に基いた Reiner-Rivlin 流体は特殊すぎて典型的な高分子流体の流動を記述し得ないことが見出された、ただし、この式中の  $\alpha_i$  は伸長テンソル  $\mathbf{D}$  の主不変量の関数である。しかし、Rivlin の正確な解は後に Coleman-Noll による幅広い流体の収蔵品へと一般化され、粘度測定理論の基礎を形作った。

Truesdell が初めて偽弾性の理論を提出したのは「力学的基礎」の中であつた。それは後に、応力に依存する 4 次の等方テンソルを通して観測できる応力速度と速度勾配の対称成分との間の線型関係に基いた速度型の構成方程式へ発展した。

Truesdell はユークリッド幾何学のように概念的に明確で演繹的な連続体力学に対する理論の枠組みを探求した。その構造の下に横たわる原理の最初の指示が Maidenhead の Courtaulds 研究所で働いていた Oldroyd の 1950 年の重要な論文だった。1955 年、Truesdell の学生だった Walter Noll によって学位論文「固体と流体状態の連続性について」の中で、それは明確にされ、一般化され、今日まで不変に留まる形で組織された。Noll は Sorbonne で 1 年間過ごし、Bloomington に到着する前には機械技師として訓練を受け、Truesdell の密接な提携者として 1980 年代まで留まった。Truesdell は彼の研究を宣伝する機会をめったに見逃さなかった。

比較的小グループの研究者以外ほとんど知られていないが、そのグルー

プでは高い影響のあるのが、1957年と1961年のTruesdellの混合の理論 (mixture theory) についての研究である。それは元々イタリア語で出版された。これらの論文の最初のもので、彼は、流動し、拡散し、反応することが許されている均一成分の混合物の運動に対する基礎的場の方程式を確立している。その形式はこの課題の殆ど全ての続いての研究者に追隨されているようである。二番目で、彼は化学反応のない場合に適用できる構成方程式を提案している。

1955年、Truesdellは妥当な振る舞いを保証する歪みエネルギー関数の制限を決定するという問題 (Hauptproblem) に注意を呼びかけた。その問題への動機は部分的に、線型の弾性の古典理論における考察であった。ここでは、非現実的な挙動は解の存在と独自性言い換えると全ての波の速度の現実性を保証する様々の不等式を満たさない Lamé 定数  $\lambda$  と  $\mu$  に関連していた。一般的な弾性物質へのこれらの不等式の一般化とはどういうものか? 1950年代中頃には、18世紀、19世紀の力学の主要部分が失われてしまっているという Truesdell の警告にも拘わらず、Gibbsの固体についての研究は完全にはなくとも大部分忘れられていて、安定性の問題は Southwell や Hadamard の研究までしか遡って引用されなかったことを知らねばならない。1956年 Truesdell の問題にコメントして、Noll は、「歪みエネルギー関数  $\Sigma$  に対する正確な制限は多分最終的にはエントロピーの原理から導かれるだろう。一般的な連続体力学へ応用できるに十分一般的なものは未だ発見されていない。」と述べた。この予見されたエントロピー原理についての深い影響を持つ研究は4年後 Truesdell と Toupin によって、7年後 Coleman と Noll によってもたらされたが、勿論その予測は歪みエネルギー関数の制限に関しては正しくないことが分かった。最も強い形でさえも、エントロピー原理だけではどんな方法でも歪みエネルギー関数の形を制限しなかった。

これらの妥当な制限の探求は今日まで続く、歪みエネルギー関数の形を制限する不等式、安定性、と熱力学との間の関係への興味を呼び起こした。Truesdell は、もし非圧縮性の等方性物質の歪みエネルギー関数が主不変量の函数  $W(I, II)$  として表されるなら、

$$\lambda_i^2 \frac{\partial W}{\partial II} + \frac{\partial W}{\partial I} \geq 0 \quad (5.18)$$

であるという議論を与えた。ここで、 $\lambda_i$  は対応する主軸方向の伸長である。Ericksen はこの式は全ての波の速度の実現性と等価であることを示し、Baker と Ericksen はさらに進んで、この式が、全ての主伸長が等しくない場合  $\geq$  が  $>$  で置き換えられるときを除いて、主応力はいつも主伸長と同じ方向を向いているという物理的観念を訴えるのと等価であることを見出した。1963年 Truesdell と Toupin は Coleman と Noll による不等式を一般化した。それは Piola-Kirchhoff 応力  $\mathbf{T}_R$  に対する次の条件である：

$$[\mathbf{T}_R(\mathbf{F}^*) - \mathbf{T}_R(\mathbf{F})] \cdot (\mathbf{F}^* - \mathbf{F}) \geq 0 \quad (5.19)$$

常に  $\mathbf{F}^* = \mathbf{S}\mathbf{F}$  ( $\mathbf{S} \neq \mathbf{I}$ ) で、正值有限で対称である。この研究を審査して、Payne は、「これらの結果は著者らの二つの独特の定理とともに、Coleman-Noll 型の条件に向けた物質の要請としての重み、すなわち、全ての弾性物質における全ての歪みに対する応力-歪み関係の形に課されるべき要請の重みを加えている。」という意見を述べた。Truesdell は非線型理論には、歪みとともに増大する応力を表す多くの異なったもっともらしく思われる方法があることを認識した。Coleman-Noll の不等式の中に、彼はいくつかのそのような制限を意味する、全ての弾性物質が満足する条件に対する一つの候補を見た。しかしながらこの見解は間違いだった。等方性物質に対して、Coleman-Noll の不等式は、主伸長  $v_i$  の対称函数  $\Phi(v_1, v_2, v_3)$  として表される歪みエネルギー函数の凸状 (convexity) を意味しており、そのような凸状は、表面  $v_1 v_2 v_3 = 1$  の非凸状のために天然ゴムのような殆ど非圧縮性物質に対して成り立ち得ないことが容易に見て取れるからである。

科学の問題への深い洞察はしばしば最も予期しない場所からやって来る。思い起こすと、もし 1950 年代の早い時期に M. S. Wechsler, D. S. Lieberman, T. A. Read, C. B. Morrey, C. Truesdell, L. C. Young が一日一つの静かな部屋で集うことができていたとしたら、Truesdell の問題 (Hauptproblem) の意味と深みの理解に向かって長い道のりを進むことができていたことだろう。Wechsler と Lieberman は十分用意をしていたことだろう：Read の助言で、彼らは丁度 Mindlin の連続体力学のコースに出席していた。そして彼らは物質科学において最も影響力のある論文の一

つ (1953) の中で、その科目の知識を相転換の問題に応用していたであろう。その論文のどの読者も Truesdell のまがいも無い影響を見つけるだろう。その集いの日の終わりには、良い振る舞い (well-posedness) についての Hadamard の観念は非線型の整備 (the nonlinear setting) にはあまりにも限定的過ぎること、非独特性 (non-uniqueness) と非存在 (non-existence) でさえ受け入れられる挙動を構成すること、そして物質の対称性と座標軸不変性から生じるもの他には歪みエネルギー函数への基本的な制限は多分何も無いということが分かっていたことだろう。

同じ期間の間に、Morrey は準凸状の彼の条件を定式化した。エネルギーを極小化する必要条件と見られるこの条件は、厳密な形が強い楕円率である Legendre-Hadamard 条件の自然な一般化と見られてきている。Truesdell は、一方で歪みにともなう応力の増加を表す補足的な不等式に対する熱力学的説明を探しながら、正しく強い楕円率を巨視的な物質安定性の条件と見た。今日の共通の方法は、補足的な不等式を物質のある特殊な振る舞い、すなわち、平衡の滑らかさあるいはエネルギー極小化における微視的構造の欠如のような解のある種の数学的性質と関連付けることである。

Truesdell は、それ程称賛した Coleman-Noll の研究の後でさえもエネルギーを常に二次的な概念と見なしていた。彼にとって、主要な概念は応力だった。例えば、彼は一般化された Coleman-Noll の不等式と、Coleman と Noll によって以前に推し進められた歪みエネルギー函数の限定された凸状についての暗黙の条件との間の区別を強調した。彼は、20 世紀にラテン語で出版された多分唯一の真面目な科学論文の中で、歪みエネルギー函数の存在を仮定する弾性の正確な解の多くは実際はその存在を要求しないと述べた。Erickson と Truesdell の 1958 年の論文「棒と殻における応力と歪みの正確な理論」の中に、エネルギー函数は決して現れない。この影響力ある論文は、各物質点に付けられたディレクター (directors) と彼らが呼ぶ多くのベクトルと変形とによって記述された媒体中の幾何学的に正確な歪みの取り扱いを与える。それはまた、構成関係の選択に独立な、そのような媒体を通しての力の伝播の完全な議論を含んでいる。それは、その時点まで事実上知られていなかった Cosserat 理論に関する続いての研究への出発点である。

Truesdell の運動理論と統計力学の研究は一貫して連続体力学の構成方程式についてのより良い理解、より明確な形を追及したが、彼の研究は連続理論に限られていたわけではない。彼は運動理論への一つの方法を採用した、それはその理論結果を、流体のよく定義された熱力学理論からの対応する結果と直接比較することに特徴があった。彼の初期の研究 (1952) は運動理論における次元解析、特に運動理論による粘度の温度依存性の形を取り扱った。これは 1956 年の二つの野心的な論文へと続いた。最初のもものは Ikenberry との共著で、Maxwell-Boltzmann 方程式のモーメントを取ることによって得られる無限体系の式への衝突項の寄与の計算に関するものだった。二番目の論文は運動理論への Truesdell の主要な貢献を成した。相互作用の力が分子間距離の逆 5 乗によって変化する分子、すなわち Maxwell 分子に対して、彼は、一様な温度を持つ単純ズリに対応するモーメントの式の明確な解を見出した。この解は気体運動論における正確な非定常解の稀な例であるので、それは注目に値する。Maxwell 分子は全く特殊であり、その解は運動論が構成方程式に対して実際に予言するものと予言しないものとははっきりと明確にする。魅惑的な付随的情報は、その解が、事実上低密度でズリ応力を超える法線応力差を示すことである。この解は確かにもっと広く知られるべきである。

1950 年代の力学の場の理論の研究は Indiana にいた Truesdell とアメリカ海軍研究所にいた R. A. Toupin によって「古典的場の理論」に纏められ、1960 年に出版された。この記念碑的専門書はそれが含んでいるものと残したものとで面白い。Truesdell は原子理論からの場の理論の誘導の記述で始めており、これは現代のマルチスケール (multiscale) の見通しから見て特に面白い。原子理論からの連続理論の導出に関して、Truesdell は「数学的困難さは現在克服し難い」と書き、後で平衡の法則 (balance law) の言及で、「多くの教科書に与えられている力学の質点方程式からの場の理論の形式的な導出は錯覚を与えるものであり、そのような導出は連続体への直接的接近によって皮相的に与えられる付加的仮定なしには不可能である。その困難は Stieltjes 積分のような基礎的方程式の定式化で避けられる。それは本質的に Euler によってなされた。」と書いた。この論文はその学問性と実行性で譽えている運動論の取り扱いとともに、一時的と書けるかも知れない熱力学と構成方程式についての部分で特筆される。「古

典的場の理論」の出版を取り巻く年月における後者の二つの課題のかなりの進歩はこの研究の明確さに多く負っている。「古典的場の理論」は物質内外での Maxwell-Lorentz のエーテル関係式  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$  ( $\mathbf{D}$  は電気変位、 $\mathbf{E}$  は電場、 $\mathbf{B}$  は磁気誘導、 $\mathbf{H}$  は磁場、 $\epsilon_0$  は誘電率、 $\mu_0$  は透過率)の使用でもまた注目される。現代の研究者はこれを Lorentz の原子間のエーテルの存在の仮定と認識するだろう、そしてそれによって原子的な見方からこの仮説が意味する場の見方への移行の問題を予見するかも知れない。

熱力学あるいは構成理論について「古典的場の理論」で示された一時性があったとすると、それは Truesdell と Noll によって 5 年後に出版された「力学の非線型場の理論」で打破された。1967 年の批評で Pipkin は、「この本は既にこの分野の標準的参照物であり、どんな近い競争相手ももっていなさそうである。」と述べている。序論だけでも 20 世紀の科学文献の中で最も注目に値する作品の一つである。そこで、Truesdell は理論と実験の間の関係について彼の見解を述べている。

「科学の門外漢と科学哲学者は、物理理論は実験から直接推論されるという事をしばしば信じ、主張し、あるいは少なくとも希望するけれども、良い構成方程式を発見するという問題に直面する者あるいは成功している場の理論の歴史的原点を探し、発見した者は誰でもそのような偏見が如何に子供じみているかを知っている。理論家の仕事は、自然の現象の混沌 (chaos) の中に秩序をもたらし、これらの現象が能率的に、単純に記述されうる言葉を工夫することである。ここに直感の場所があり、自然は単純で優雅であって多くの偉大な成功に導いた、自然哲学者の間で共通の古い先入観がある。勿論、物理理論は経験に基かねばならない。しかし、実験は理論の後に来るものであり前ではない。理論の概念なしには、人はどの実験を行うべきか、結果を如何に解釈できるか知ることはないだろう。」

丁度「非線型場の理論」が印刷に廻ったとき、Coleman は単純物体の一般的熱力学を構築し、Coleman と Mizel に用いられた議論を一般化した。Truesdell と Toupin が「古典的場の理論」の中で定式化した Clausius-Duhem 不等式の一般形が利用された。一連の一般化は簡潔に以下で与えられる:

$$dS \geq \frac{dQ}{\theta} \quad (\text{Clausius}) \quad (5.20)$$

$$\dot{S} \geq \int_{\partial P} \frac{\mathbf{q} \cdot \mathbf{n}}{\theta} da \quad (\text{Duhem}) \quad (5.21)$$

$$\dot{S} \geq \int_{\partial P} \frac{\mathbf{q} \cdot \mathbf{n}}{\theta} da + \int_P \frac{r}{\theta} dv \quad (\text{Truesdell and Toupin}) \quad (5.22)$$

ここで、 $S$  は  $P$  の全エントロピー、 $\mathbf{q}$  は熱流束、 $r$  は放射などによるエネルギー供給である。それ自身深遠な一般化ではないが、 $r/\theta$  の存在は、 $r$  の任意の調節によってエネルギーの釣り合いが過程への制限として取り除くことができ、Clausius-Duhem 不等式の容易な開発を可能にした。後に研究者達は、その存在が理論でしばしば無視された函数の使用を、賛成と反対の立場で論争した。

この熱力学の新しい解釈を特徴づけたものは根源的な概念としてのエントロピーの使用だった。Truesdell は 1966 年の評論「自然哲学の方法と嗜好」の中で説明する：

「力学が運動と力の科学であるように、熱力学は力とエントロピーの科学である。エントロピーとは何か？ 1 世紀の間頭脳はエントロピーを他のもので定義しようと試みることに割かれてきた。力と同じようにエントロピーは定義されない対象である。もしあなたがそれを定義しようとするなら、あなたは 17 世紀、18 世紀の力の定義者と同じ運命にみまわれるだろう。あなたはあまりにも特殊な何かを得るか、あるいは円の中を走り回るかのどちらかであろう。」

1945-1965 年の期間に展開された完全に非線型の構成関係式によって成し遂げられた輝かしい成功に貢献して、Truesdell は当然、線型性の仮定に必然的に結び付けられる構成関係式への制限について懐疑的であった。不可逆過程熱力学の文献は、エントロピー生成に対する式を次の形（簡単のため、均一仮定に対して書く）で考えていた。

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \mathbf{J}_i \mathbf{X}_i \quad \text{where} \quad \mathbf{J}_i = \sum_j \mathbf{L}_{ij} \mathbf{X}_j \quad (5.23)$$

ここで、 $S$  は全エントロピー、 $\mathbf{J}_i$  と  $\mathbf{X}_i$  はそれぞれ流束と力である。この式の二番目の式は線型の構成関係を表す。Onsager は統計力学を用いて議論し、エントロピー  $S$  が状態変数  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  に依存し、力と流束が

$$\mathbf{X}_i = \frac{\partial S}{\partial \alpha_i}, \quad \mathbf{J}_i = \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} \quad (5.24)$$

で定義されるとすれば、係数  $L = (L_{ij})$  は対称関係  $L = L^T$  を満足するという結果を与えた。しかしながら、Truesdell がオンサーガー主義者と呼んだこの分野の後の研究者達は、様々の物理的に受け入れられる力と流束の選択に対して Onsager の関係  $L = L^T$  の正しさを単純に主張するのみで、 $\mathbf{X}_i$ 、 $\mathbf{J}_i$  と  $\alpha_i$  の上の関係式 (5.24) をしばしば無視した。この課題についての二次文献は恐ろしく混乱していた。大抵の著者は力と流束が如何にして選ばれるかについて何も述べなかつたので、それらは批判に曝されるままだった。Coleman と Truesdell は、式 (5.23) を保持して、それらを再定義すると  $L$  を対称行列から非対称行列に変えられることを指摘した。追加すると、Curie の論文 (1908) を間違えて引用して、同じランク (order) のテンソルのみが構成関係式を通して関係づけられようと主張するこの文献の馬鹿げた流れがある。Coleman と Truesdell は、簡単な反対例を通して、 $L$  の対称性は式 (5.23) と Onsager 関係式から出てくるのではない事を説明した。オンサーガー主義者達への Truesdell の非難は彼の “*Rational Thermodynamics*” (1984) の Lecture 7 で最高潮に達した。今日、Onsager の関係は未だ熱く議論されている。しかし少なくともいくつかのグループで、その中でそれらが証明されるかあるいは論破される良く定義された理論的枠組みの存在は Truesdell の批判に負っている。

1970 年代初期は非線型連続体力学の発展に対する整理統合の期間だった。多くの基礎的概念や理論が定式化される一方、その課題はより広い科学者のグループによる解析とその能力における進歩を待っていた。Ericksen の 1975 年の影響力ある論文「棒の平衡」を注目すべき例外として、形式への無我夢中がその課題に這い込んだ。この不毛さを強調するためであるかのように、その 10 年は Rivlin の不幸な論文「非線型連続体力学における赤い鯨と色々な確認できない魚」で始まった。この Truesdell と彼の協同者達への薄くヴェールを被った攻撃において、Rivlin は新しい研究方向への先を見ることあるいはその課題に既に存在する実際に重要な困難に面することよりも、連続体熱力学への彼らの方法への大したことのなさような批判を強調することを選んだ。

Truesdell にとって、その 10 年は大いに熱力学に捧げられた。彼は Carnot の名高い紀要 (1824) を読み直すことから始めた。彼は Carnot の研究の何処にもエンジンがゆっくりとあるいは平衡に近く運転されるとは想定され

ていなかったと強調した:

「私は熱の内的な性質、不可逆変化、内部の無秩序について論評を控える。私は何処にも熱平衡と準静的仮定を引き合いに出さない。動機付けでそれらが如何に有用であっても、それらの課題は、エンジンが這うのでなく走るのを見たい工学者にとって、理論の形式的構造の中で何の役割も演じない。例えば、「準静的仮定」は 1853 年に初めて僅かに述べられたもので、初期の研究とは無縁であった。」

彼は彼の研究を Carnot 自身の仮定に基いた: Carnot サイクルを行う物体の作り出す仕事は操作する温度  $\theta^+$  と  $\theta^-$ 、と高温で吸収される熱の函数であり、彼はこの仮説が、Carnot がそれに結ぶ付けるのに選んだ熱の熱素説に如何に独立であったかを示した。そこから彼は、吸収される熱に対する構成方程式、熱の状態方程式、Carnot の公理に基いて、古典熱力学の全てを組み上げた。循環過程の効率についての彼の取り扱いはずぐに Fosdick と Serrin によって一般化された (1975)。彼らは連続体熱力学の一般的な背景 (setting) の中で、これらの効率の評価は多かれ少なかれ Clausius-Duhem 不等式と同等であることを示した。この理論体系は熱力学第二法則への最も物理的に直感的方法の一つを与えた。

「*Archive for Rational Mechanics and Analysis*」

1951 年、Truesdell は Indiana 大学で職に付いた直ぐ後、T. Y. Thomas に数学的連続体力学と非線型偏微分方程式の解析の成長している分野に役立つ雑誌を創設するのに加わらないかと勧誘を受けた。Truesdell は動機を以下のように説明する:

「当時、連続体力学に関する論文は、数学の雑誌では応用であるとして、応用数学の雑誌では物理であるとか純粋数学であるとして、物理の雑誌では数学であるとして、他の全てでは長すぎる、高価すぎて印刷できない、誰にも興味が無いとして、却下されていた。匿名の審査員はその課題への軽蔑だけでなく、その惨めな無視を示すことにも成功した。特に力学の基礎と関連する数学に捧げる新しい雑誌を創設する時期だった。」

最も若い教授会メンバーとして Truesdell は全ての日常業務をすべきであることは同意されていた。彼は最近再婚していて、彼の妻 Charlotte が

編集助手になった。*Journal of Rational Mechanics and Analysis* の最初の巻は 1952 年 1 月に現れた。Thomas と Truesdell が編集長であった。Newton による *Principia* での導入と定義に基いて *Rational Mechanics* という語句を用いるように同僚達を説得したのは Truesdell だった。最初の号の内表紙には、対応するラテン語の語句 *Principia*、Lagrange からの引用 *Ceux qui aiment l'Analyse* … とともに次の声明が印刷された。

「*Journal of Rational Mechanics and Analysis* は、特に純粋と応用数学の間の裂け目を閉じ、古典的伝統の中で演繹的、数学的科学的として力学の原理を育成することを狙って、物理的応用を持つ数学に栄養を与える。その範囲は純粋数学の部分や力学に寄与する他の理論科学から成っている。含まれる分野には解析学の全ての分野、微分幾何学、解析動力学、弾性論、流体力学、塑性論、熱力学、相対論、統計力学がある。工学的応用、数値的研究、摂動論、等は健全な数学的理論に捧げられた論文の中での偶然的例証としてのみ受け入れられる。経験的、準経験的推測、本の解説、注意書きなどは排除される。各論文はその分野の最良の研究で至った演繹的厳密さの基準に合うものでなければならない。貢献する論文は独自の研究を含むものでなければならない。編集者は時折真の必要性に気づいた分野の解説的な論文を勧誘する。

英語、フランス語、ドイツ語、イタリア語がこの雑誌の言語である。高い解説の水準が望まれる。過度に凝縮されたあるいは難解な型で書かれた論文は印刷されない。」

1956 年 Indiana 大学数学教室内の関係が悪化し、その結果新しい教室主任は Truesdell を編集者から除き、雑誌の名を *Journal of Mathematics and Mechanics* に変えた。出版された *Journal of Rational Mechanics and Analysis* の 5 巻は多くの卓越した著者の貢献による約 4000 ページの研究を含んでおり、そのうち 500 ページは Truesdell 自身が著者である。

Siegfried Flügge の仲介に随って、1956 年 12 月 *Handbuch der Physik* の編集者 Ferdinand Springer が、Truesdell が驚き、喜んだことに、Truesdell 単独の編集の下で Springer-Verlag がその雑誌の出版を引き受けることに同意した。礼儀として、Springer の個人的代表 H. Mayerkaupp は同じタイトルを使う許可を求める手紙を Indiana 大学の学長に書いた。後者が

深刻な反対を表明した時、名前を *Archive for Rational Mechanics and Analysis* に変えることが決定された。Truesdell は古い編集委員会のメンバーに *Archive* の委員会に加わるよう招聘し、3人を除いた全員がそうする事に同意した。視野を広げ、国際的な存在を高めるために数人のメンバーが増やされた。彼はまた、次の編集委員会の編集方針の声明を用意した:

「*Archive* は編集委員会のメンバーによって書かれるかあるいは伝達された論文のみを印刷する。著者は適当なメンバーに直接論文を投稿するよう依頼する。メンバーはそれが論文の適切さの決定に至るかあるいは修正するのに助けとなる著者らと進んで対応する。一人のメンバーによって伝達された論文は、科学的アカデミーの長い伝統の形で、その論文の正しさと価値を信頼させるようにそのメンバーの名を付けられる。メンバーによって送られた論文は更なる審査を受けない。

純粹解析学への貢献は歓迎である。それらは物理的応用を持つ必要はないが、そのような応用が可能な時はそれが展開されるべきである。同様に、理論力学 (rational mechanics) の論文は解析学あるいは実用的応用に寄与する必要はないが、もしそのような関連が存在するなら、それらは説明されるべきである。*Archive* の基本的な機能は数学的原理として扱われる力学、力学に有用な純粹数学の部分に役立つことである。微分幾何学や電磁気学のような境界領域の論文はメンバーの判断で印刷されるだろう。

著者は彼らの考えを解決し、完全に説明するように依頼する。基礎的な理論についての円熟した包括的な研究を含む長い紀要は特に歓迎である。詳細についての短いノートや孤立した結果はその課題が特に重要でない限りあまり適当でない。

よい書き方というのが *Archive* の目的にとって本質的であり、すべてのメンバーは内容に相応しい形を保証することで協同するよう要請される。」

このように *Archive* を定義する性質、その科学的 content、質、精神、編集委員会メンバーの自立性、良く書くという主張、が敷かれた。

*Archive* の最初の号は 1957 年 9 月に出版された。 *Journal* から上に引用された記述は少し修正され、Newton と Langrange からの引用に Euler からの引用が加えられた。また、言語にラテン語が加えられた。しかし、そ

の印象は *Journal* からの継ぎ目の無い移行である。Truesdell の編集の下で、*Archive* は連続体力学と関連する解析学、特に偏微分方程式、変分計算、函数解析における指導的研究者が選び、それらの分野の一連の古典的論文を出版する雑誌となり、解説と活版印刷に非常に優れた標準を維持した。Truesdell は 1990 年まで編集者を続け、後は S. S. Antman が継いだ。

### 「個性と影響」

Truesdell の研究以前は、連続体力学は、複雑で混乱した記号、正確に定式化された一般原理の欠如、下に横たわる物理の定式化における数学的解析からの標準的概念の使用の失敗、非線型性に如何に直面するかへの途惑い、数学的厳密さの一般的欠如、で特徴付けられる課題であった。50 年後、一般原理の幅広い明確な理解、それらと特定の物質理論を数学的正確さで定式化する価値の認識、連続体力学の概念と哲学の科学の広い領域への普及がある。多くの有能な人々がこの動きに巻き込まれたが、それを創めたのは Truesdell だった。彼の科学的生産と指導性がそれにはずみを与えた。彼の高い人物評と妥協しない姿勢は、新しい哲学に脅かされていると感じた人々、Rivlin のように殆ど同意しているがその課題は公理系への過度の注目によって窒息させられ、あまり適切でないものにされていると感じた他の人々から、彼をかなりの批判の標的にした。一般に、Truesdell は、特に合衆国内では、広い数学と科学の社会から、彼の科学的貢献に相応しい評価を受けなかった。

Truesdell の科学における人生は強い信条に導かれていた。Erickson はそれらの信条を以下のように記述する：

1. ひとは何をしようとしても、優秀を得るように奮闘すべきである。それは、高い目標を設定し、それらを達成するために熱心に働くことを要求する。どんな価値ある努力においても、優秀さは認められ酬いられるべきである。あなたはそれを推進するためにできることをしなさい。
2. あなた自身の判定に導かれることが非常に重要である。強く持った見解は人気の無いこともありうるが、人はそれによって思い止まるべきではない。

3. 人は、小麦を覆い隠す籾殻から小麦を分けるのを助ける責任を担うべきである。
4. 他の人と意思を通じ合う技量を砥ぎなさい。全く異なった背景を持つ人々と技術的事柄を議論している場合でさえ、基本的な考えや結果を理解できるようにするのは可能であるだろう。
5. 優秀になるために最善を尽くしている能力の劣った人に寛大かつ忍耐強くありなさい。試みようとしなない怠け者は軽蔑に値する。

Ericksen は、彼が Truesdell と組織した 1961-1980 年の Johns Hopkins 大学の大学院プログラムで、以上の考えが如何に実行に移されたか思い起こしている。そこでは、連続体力学の指導的研究者の多くが参加し、訓練された。そのプログラムは大きくはなく、14 人の客員教授と上級研究員、49 人のポスドク研究者、12 人の Ph.D. 候補者であった。しかし、殆ど全ての人はそこを離れた後、良い研究をし続け、多くは後に、彼ら自身の大学院プログラムを改善するのに似かよった考えと技法を採用したことを報告した。Truesdell はできる限り広く研究助成申請を書いた。それは彼ができるどんな助けも彼らに与えて彼らが懸命に働くことを保証しながら、彼と一緒に研究する人々に彼ら自身のコースを描く機会を可能にするためであった。彼は良い例を設定するよう試み、他人がした良い研究を称賛し、不健全で趣味の悪い努力を嘲笑することで、指導した。彼は若い人に対して特に寛大で、彼らに地位や権威によって印象づけられない様に教えた。彼は個人的に、未だ大学院生であった、今や著名になった科学者に、*Archive* へ彼らの学位論文を投稿するよう勧誘した。

Truesdell の実験と計算についての見方は魅惑的である。彼が反実験であったと推測するのは無邪気すぎる。彼は、粘弾性流体の特別な理論の究極の限界を明らかにした Markovitz の実験、ズリにおける法線応力の測定をした Rivlin の実験、Stokes の関係の真実の状態を明確にした多くの人の実験を賞賛した。しかし、彼は悪い理論を永続させるために実験や物理的直感を用いるのを嘆かわしいと思った：「不健全な凝り過ぎた理論を陸揚げするために実験に訴えることは空しい儀式であり、信心深い殺人者が

犠牲者の喉をかき切る前に神の保護のために短い祈りを称えるようなものである。」しかしながら、彼は経験から導かれた概念に作用する数学は力学の古典理論の基礎を築く実験よりももっと力強い道具であると信じた。

彼は考えの無い計算を冷笑しており、その確信は時とともに固くなった：それは、*Journal* の狙いの中の彼の上述の注釈と 1984 年の彼の評論「コンピュータ：科学の破壊と人類に対する脅迫」の比較に見える。皮肉にも、計算力学は彼が展開し説明した概念、実際、連続体力学の構造を組織化したそれらの特別な概念、を用いることによって花開いた。埋め込み座標系の幅広い使用、剛体回転によって集積する誤りを避けるために様々の量の観測可能性 (objectivity) を正確に護る方法の使用が目撃される。

Truesdell は美術と音楽を深く愛し、深い知識を持っていた。彼と Charlotte の Baltimore の家 *Il Palazzetto* を訪れるのは素晴らしい美術館を訪れることであった。そこでは、彼らの友人である有名なハープ奏者 Gustav Leonhardt による独奏 (リサイタル) を含めて、大いなる質の夜会音楽会が持たれた。そこで Truesdell 一家の暖かいもてなしを受ける幸運を持った人は誰もその経験とその上品な暮らし振りを忘れなかった。力学におけると同様に、Truesdell は家庭でも独特であった。

## 5.6 Hagen - Poiseuille - Reynolds

Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen および Jean-Louis Marie Poiseuille はともに層流を発見し、Hagen-Poiseuille の法則

$$V = \frac{\pi \Delta p R^4 t}{8 \eta \ell} \quad (5.25)$$

を導いた人である。<sup>14</sup> ここで、 $V$  は流量、 $\Delta p$  は圧損、 $R$  は管径、 $t$  は流れる時間、 $\eta$  は流体の粘度、 $\ell$  は管の長さである。なお、Poiseuille は毛細管粘度計などに使われる Poiseuille 流動で知られ、粘度の単位であるポイズ、あるいはポアズ (poise) の由来になっている。

また、Osborne Reynolds は層流と乱流との境界を定める無次元の数、すなわち、Reynolds 数  $R_e$

$$R_e = \frac{\rho v R}{\eta} \quad (5.26)$$

を見出した人物である。ここで  $\rho$  は流体の密度、 $v$  は流速である。なお、彼が求めた層流と乱流の境界値  $R_{ec}$  は約 2000 である。<sup>15</sup>

「Hagen」

Hagen は 1797 年 3 月 3 日にプロシヤの Königsberg で生まれた。地方公務員の息子であった。高校の時、彼の数学教師は彼に興味を持ち、より高度の数学を紹介した。1816 年に始まって、彼は Bessel のもとで勉強し、いくらかの天文学の研究を行った。彼は 1822 年までに土地測量技師、建築技師になった。彼は、特に水力学構造に興味を持って、オランダ、フランス、スイス、イタリア、チロルを研究のため徒歩旅行した。彼は 1824 年 Königsberg のある郡で建設役人として雇われた。1826 年には Pillau の港湾調査官になり、1830 年に Berlin に移って建設に従事した。彼はまた、WilhelmsHaven の海軍軍港でも働いた。この経歴と並行して、Berlin で水力学の研究を始め、1834 年から彼は水力学、橋梁と道路建設の教師として教え始めた。1842 年彼は Berlin 科学アカデミーの会員になり、1843 年には Bonn 大学の名誉博士になった。彼は「水力学の手引き」、「統計原理」を出版するとともに、層流と乱流に関する流体力学の研究を行った。最後の日々には平板の空気抵抗を測定した。

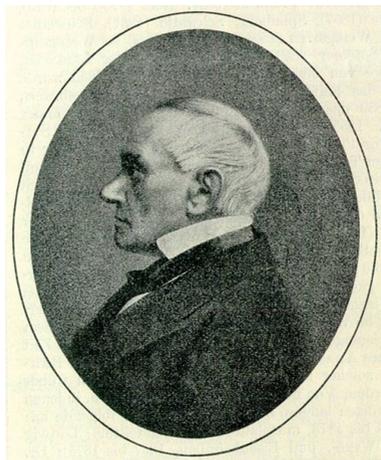


図 5.21 Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797/3/3–1884/2/3)

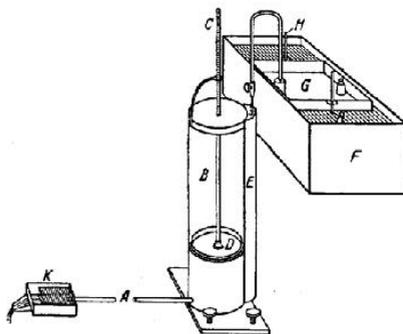


図 5.22 Hagen の装置; A: テストパイプ



図 5.23 Jean-Louis Marie Poiseuille (1799/4/22–1869/12/26)

Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen は 1884 年 2 月 3 日に亡くなった。

「Poiseuille」

Poiseuille は 1799 年 4 月 22 日 Paris で産まれた。彼は 1815 年の秋 18 才で École Polytechnique に入学し、1816 年までそこで物理学と数学を学んだ。また、彼は実験生理学に特別注目しながら医学を勉強した。1828 年、Poiseuille は D.Sci. の学位を得た。彼の博士論文の題目は「心臓大動脈の力に関する研究」であった。それに対して彼はフランス科学アカデミーから金メダルを受けた。また、もう一つの研究「静脈における血液の運動の由来に関する研究」でも賞を受けた (1832)。1839 年、彼は「毛細血管中の血液の運動の起源に関する研究」を出版した。そして 1840 年には「小さい径の管における液体の研究」についての短い報告をフランス科学アカデミーに提出した。1842 年 Poiseuille はフランス医学アカデミーの会員になった。彼は「一般医学辞書」の編者として働いた。

Jean-Louis Marie Poiseuille は 1869 年 12 月 26 日ついに亡くなった。

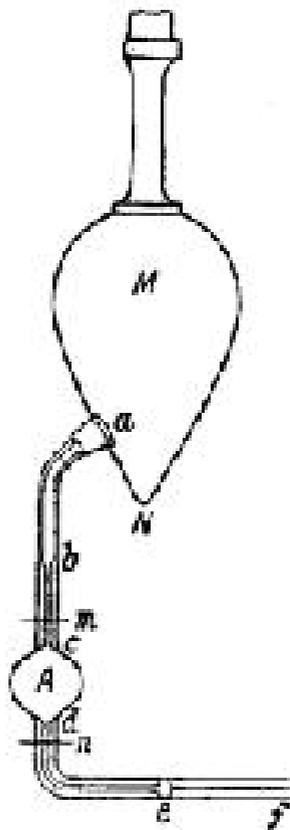


図 5.24 Poiseuille の装置; a→b→c→d→e→f: 流路



図 5.25 Osborne Reynolds (1842/8/23–1912/2/21)

### 「Reynolds」

Osborne Reynolds は 1842 年 8 月 23 日に生まれた。彼は Suffolk の Woodbridge 近く Debach の小さい農村社会で、多くの土地と資産を持つ裕福な家系の出である。彼の曾祖父と祖父は Debach-with-Boulge 教会区の牧師だった。一方、父 Reverend Osborne Reynolds は Cambridge 大学 Queens' カレッジのフェロウ (Fellow) で、息子が生まれたときは Belfast Collegiate 校の校長であり、その後 Essex の Dedham 中等学校の校長、Debach-with-Boulge の牧師になった。Reynolds の初期の教育は主にその父によって行われた。父は非常に有能な数学者であると同様、力学の事柄に深い興味を持っており、農機具の改良に関係するいくつかの特許を獲得していた。

若い Reynolds は早い時期から力学の勉強に資質と好みを示し、19 才のときに Buckinghamshire の Stony Stratford にある Edward Hayes の実習校と作業場に入った。Hayes は有名な機械技師で、農機具、蒸気機関、近海蒸気船の製作会社を運営するとともに、特権階級の家族の息子達の技術的な訓練と実用的な経験とを与えていた。Reynolds は 2 年近く見習いと

して彼のもとに留まっていた。彼自身の言葉では、この期間の間に、「私の注意は様々な力学現象に向けられた。その説明のためには数学の知識が本質的であることを、私は発見した。」そこで、彼は Cambridge 大学に行き、数学の学位を取ることに決めた。彼の Cambridge での勉強は非常にうまくいった。ただし、Reynolds はそこで力学が教えられていた方法にはそれ程うれしくはなかった。彼は力学は工学で有用で急がれるものであるよりも、主に物理学における応用を狙うべきであると考えていた。Reynolds が学部学生だったとき、数学教室の Lucasian 教授は Sir George Stokes だった。Reynolds は 1867 年に卒業し、すぐに Queens' カレッジの研究員 (Fellow) に選ばれた。それから彼は London にある Lawson と Mansergh の名声の高い土木工学のコンサルタント会社に専門の経験を積むために加わった。彼らは地方自治体の工学プロジェクトを専門に扱っており、特に水の供給、排水、下水に関わっていた。James Mansergh で仕事をして、Reynolds は公共の健康問題に関心を持っていった。それは後に短い単行本「下水ガスおよび如何に家から排出するか一家排水のハンドブック」を彼に書かせた。彼は数年経って、自分で彼自身の家に適用してそれらの有効性を示してその考えを実証する機会を得た後、その単行本を出版した。

1868 年の初め Reynolds は、12 年後に Manchester の Victoria 大学となった、Manchester の Owens カレッジに新しく設けられた土木と機械工学の講座に応募した。その職への応募の中で Reynolds は「私は物心が付いた時から、力学と科学としての力学が基くべき物理の法則とに抵抗し難い興味を持ってきた。少年時代に私は、力学の愛好者であって数学やその物理学への応用に何の業績もない父の絶え間ない導きという利点を持った。」教授への任命の調整は完全に順調に進んだわけではなかった。その職が最初に公示された後、Owens カレッジは批判に曝された。それは一部には十分魅力的な給与を提供していないという専門雑誌 *Engineering* の皮肉な記事の結果であった。最初の公示でそれ程多くない応募があり、適切な資質の何人かの候補者を含んでいたけれども、Owens カレッジはその公の批判に直面してその職に少なくとも年俵 500 ポンドを保証するという、より高い給与を提供して再公示した。これは確かに応答を強めた。事実ある段階で、当時一流であった Glasgow 大学の工学の講座を持ってい

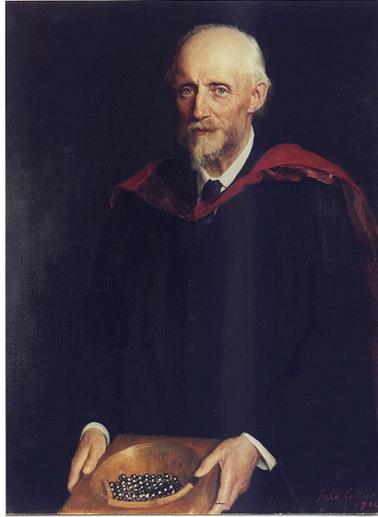


図 5.26 Osborne Reynolds

た、高く尊敬され十分定評のある W. J. M. Rankine がその職への応募に興味を示しそうに見えた。しかし、それが起こらなかった時、任命委員会は二人から成る最終選抜候補者名簿を引っ張り出した。二人のうちの一人は Osborne Reynolds だった。彼は正式に面接を受け、1868 年 3 月 26 日に任命された。その時わずか 25 才であった。Reynolds は 1868 年 9 月 29 日その地位を獲得し、数日後の 10 月 5 日に Owens カレッジの 1868-1869 年の新学期を開始する伝統的な就任演説を行った。Manchester の王立研究所に届けられたこの講義「この国の社会的条件に関して考えられる工学の進歩」は彼の最初の出版された論文であった。それは彼が見た当時の問題と、労働、富、と人類の幸福に関して工学へ向かう彼の態度との透徹した見解を与えている。その講義は何がなされる必要があるかを心に持ち、使命感とアイディアに満ちた人物としての若々しい Reynolds をはっきりと示している。Reynolds は 1905 年に引退するまで Manchester 大学の土木と機械工学の教授に留まった。

Osborne Reynolds は 1912 年 2 月 21 日 Somerset の Watcher において 69 歳で亡くなった。



図 5.27 Sir Joseph John Thomson (1856/12/8-1940/8/30)

Reynolds が Manchester に職を得た時、Owens カレッジは以前議会の地方議員の家であった Quay 街の比較的小さな建物にあった。Reynolds が教えるにしろ研究するにしろ役に立つ研究室設備は殆ど無かった。それ故始めは、彼は自宅か屋外かのどちらかのできる非常に簡単な実験を含む問題を設定するのに限られた。彼がもっと練られた実験を行うことができたのは Owens カレッジが現在の Manchester 大学の位置の新しい建物に移った 1873 年以降だった。また、彼が大規模の工学プラントでのテストを行うのが可能になる研究室設備を持ったのはずっと後だった。

1869 年 11 月、Reynolds は Manchester 文学哲学会の会員になった。そのとき、その会の会長は卓越した Manchester の科学者 James Prescott Joule であった。Reynolds が 1870 年 3 月に文学哲学会に彼の最初の論文を発表したのは Joule の激励する眼の下でであった。それは「噴水上の球の安定性」についてで、学問的と云うよりも面白い課題で、その説明は、当時に遡った時普通考えられていなかった流体力学の局面についての考えを含んでいた。この最初の論文は多くの人に追従され、非常に広い範囲の物理の問題と工学的な応用に及んだ。

彼の最も有名な学生 J. J. Thomson が後に「屋外物理学 (Out of doors Physics)」として記述したこの初期の研究の流れは、当時の Owens カレッジにおける研究室設備の欠如の観点から、研究対象の分野として特に手頃

なものであった。そのような現象についての彼の論文は彗星、太陽コロナ、地磁気、雲の電気的性質、雷に打たれた木の破裂、霧による音の破壊、大気による音の屈折、雹の形成、海を鎮める雨の効果、波を防ぐ水面の油膜の作用に関する事柄を扱っている。

今日広く認められておらず知られてさえいないけれども、この Reynolds の研究の流れは Victoria 朝の科学の社会の多くのメンバーにとってかなり興味のあるものだった。特徴的な彼の論文に、蒸発によって引き起こされる表面が受ける力、表面で起こる凝縮あるいは表面から気体の媒体への熱の移動、多孔質媒体を通しての熱に誘起された気体の移動を扱ったものがある。この最後の課題についての Reynolds の殆ど知られていない研究の結果は彼の最も長い最も独創的な 133 ページを越える論文の一つの中で提出されている。その中で、彼は理論と実験によって、圧力差は多孔質板の一方から他方への気体の流れを起こさせるだけではなく、両側の圧力が同じ時でさえ温度差を起こさせるだろうことを示した。この現象に対して、彼は「熱発散 (thermal transpiration)」という名を与えた。

気体状態の流体の運動についての理解の進歩は 1870 年代の科学の特筆すべき特徴で、James Clerk Maxwell と並んで Reynolds が単独で貢献したものの一つであった。

Reynolds は疑いなく流動、乱流に関する論文で最もよく知られている。主要な二つの論文 (1883 年論文と 1895 年論文) の他に、数編のより早い論文から彼の考えが発展してきた道筋を掴むことができる。彼は、彼の主要論文の一つ 1883 年の論文のための研究を行うずっと前に工業流体力学における乱流と熱の移送の重要性に気づいていた。その論文が現れる 9 年ほど前に、彼は先を見通した短い論文「蒸気ボイラーの熱せられている表面の範囲と作用について」を作り、その中で熱は、分子的な作用の結果としてだけでなく流れにおける渦によってもそのような表面から取り除かれることを示した。渦はより熱い流体をより冷たい流体と混合させる。彼は熱移送と乱流の状態に対する液体表面の薄膜の摩擦との間の類似性を提案し続けた。その重要性が他の人、Prandtl や Taylor によって云われ、拡張されるまでにほとんど 40 年が過ぎた。

1877 年彼は色の帯の手段で流体の運動を可視化する方法を記述した。彼

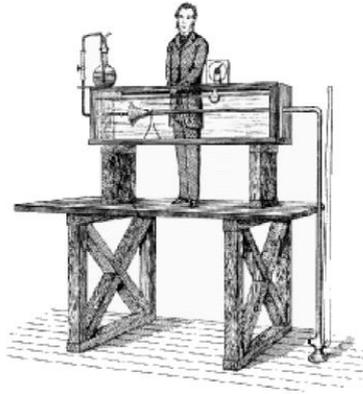


図 5.28 Reynolds の装置; 恒温槽中のガラス管に液体を流す。

は、いくつかの状況における渦巻きの線と渦巻きの環を考慮し、特に渦巻き運動に関して可視化を記述した。それと同じ可視化技術は管内の層流と乱流についての彼の研究でも再び用いられた。

Reynolds は 1880 年の British Association への発表「水面の波を壊す油の効果について」の中で、風が油膜上を吹く時、波が形成される代わりに渦が油膜の直ぐ下に作られることを指摘した。さらに、彼は渦が膜のない場合には存在しないことも主張した。この観察は、粘度がズリ流動で造られる乱流を引き起こす鍵となる役目を演じるという彼の認識を導く基礎になった。後に論文の中で、彼は、水平の管内で一方が上に他方が下にある二つの不溶性の流体はそれらを隔てる皮膜があっても無くても反対方向への流れを引き起こすという実験結果を呈示して、このことについての彼の考えを展開した。

1883 年の論文に続く年の短い論文「水の運動の二つの様式について」の中で、彼は収束していく通路と発散していく通路における流れの特徴を比較し、前者では条件は定常流作り出すのに有利であるが、後者では流動は渦や非定常になる傾向があることを指摘した。

図 5.28 は Reynolds の有名な実験装置である。朝顔状の入り口を持つガラス管が水平に水を満たした恒温槽中に置かれている。管内の流体の流れ

はよく見えるようになっている。Reynolds 自身の言葉で云うと「水の内部運動は二つの大きく区別される型の一方かあるいは他方を探る。すなわち、流体の要素はそれらの目的地に向かって最も直接的な方法で運動の線に沿って互いに従うか、あるいは最も非直接的で可能な限り波状に曲がりくねった経路で渦巻くかである。」Reynolds の染料縞による研究は、流速、管径、粘度のある領域で、前者から後者の様式 (mode) への転換が無次元パラメータの大まかに同じ値で起こることを示した。

そのパラメータの Reynolds の発見における最初の段階は、水が渦巻く傾向は温度が上昇するほど大きくなるという彼の観察であったようである。彼は、それが水の粘度が温度上昇につれて減っていくという事実と関係がありそうだと気づいた。流体運動を支配する方程式を調べて、彼は巻き込まれる力は二つの異なる型、慣性力と粘性力であると結論し、さらにそれらの項の比は平均流速と管径の積を動的粘度で割った量に関係づけられると結論した。論文で述べている：

「これは私が探していたそのものの種類の確定的な関係である。勿論式を解くことなしでは、その式は運動がどのようにその関係に依存しているか示すことなく、その関係式を与えているだけである。しかしながら、もし渦がある特別の原因によるものであったとしたら、解は渦の誕生がその変数群のある特定の値によることを示すであろうことは確かであると思われる。」

しかしながら、彼はそのようにして到達した (高い臨界値と呼ばれる) 臨界値が独特 (unique) ではなく、存在する背景の攪乱の程度に強く影響されていることを認識していた。そこで彼は二番目の一連の実験で、管の入り口で作られた高度の乱流がある Reynolds 数以下で層流に減衰する臨界値 (低い臨界値と呼ばれる) を決定し始めた。今度は違った装置で、彼は流れの様式を描写するために圧損測定を用いた。後の論文 (1895) で Reynolds はその臨界値を 1900 と 2000 の間であるとした。

Reynolds が *The Royal Society* に投稿した論文の二人の審査員はかなりの人物 Sir George Stokes と Lord Rayleigh であった。どちらも出版を大いに支持した。Stokes はタイプライター使用の先駆者であった。彼のタイプライターは大文字しか無かったらしく、審査意見は大文字のみで打た



☒ 5.29 Sir George Gabriel Stokes (1819/8/13-1903/2/1)



☒ 5.30 Lord Rayleigh (John William Strutt) (1842/11/12-1919/6/30)

れていた。また、タイプには労力を伴ったので、Stokes は最終版をタイプし直すより手書きで修正と書き込みをした。Rayleigh の審査意見は3ページに亘っていたが、語数は70以下であった：

「この論文は、長い間必要とされてきた研究、すなわち、毛細管における流動の法則と工学で使われる大口径の管におけるものとの間の転換という課題について、いくつかのよく設計された実験の報告である。私は、その結果は重要であり、この論文は *Phil. Trans.* に出版されるべきであるという意見である。

いくつかの段落で、著者は性質が十分示されていない理論的研究を参照している。*Rayleigh*」

その論文は当然出版され、続く数年に、審査員の各々は Reynolds の論文の異常な重要性を公に知らせた。まず、Lord Rayleigh は、Montreal の British Association での 1884 年の会長演説で次の賛辞を贈った：

「Reynolds 教授は、物の一つの状態から他の状態への移行を大きな成功を持って追跡し、それらの一般則の複雑な条件の下で、採用された動的類似性が Stokes 教授による粘性流体に適用できることを証明した。理論的および実験的取り扱いを悩ませる困難さに拘わらず、我々は、科学的ならびに実用的関心において2番と下らない課題のより良い理解に間もなく到達できると望むことができる。」

1885年から1890年まで Royal Society の会長を務めた Sir George Stokes はその立場で、1888年11月に、数理物理学と実験物理学での研究と科学理論の工学への応用に関して、Reynolds に学会の Royal Medal を提供した。

Reynolds は続く年月研究を続け、その広範な解析結果を 1894年5月24日 Royal Society に口頭で報告した。その後、論文は *Philosophical Transactions of The Royal Society* に投稿された(1895年論文)。その時までには彼は自分の講座を25年以上保っており、15年以上の間王立学会のフェロウ(Fellow of The Royal Society)であって、英国における指導的な工業流体力学者であった。



図 5.31 Sir Horace Lamb (1849/11/27-1934/12/4)

その時までには Lord Rayleigh は *Philosophical Transactions of The Royal Society* の編集長になっていた。彼は Reynolds の乱流に関するこの 2 番目の論文原稿を受け取ると、審査のために Sir George Stokes にそれを送った。今度は審査員の応答は非常に違っていた。長い沈黙の後、Stokes は、今や大文字と小文字を備えたタイプライターで、1894 年 10 月 31 日、「この研究は理解できない」ことを知らせる返答を送った。

Stokes はこの件は終わったものと考えたが、Lord Rayleigh は明らかに違った考えを持っていた。彼は 2 番目の審査員 Horace Lamb (後の Sir Horace Lamb) にその論文を送った。Lamb は Manchester の数学教授で 10 年前に王立学会のフェロウに選ばれていた。11 月 21 日 Lamb は長い評価を送った。冒頭の要約は次の文章である：

「この論文は、多くが曖昧で、明らかに確立していないいくつかの基礎的な点があるけれども、大いに創造的な課題についての著者の見解を含んでいるので、*Transaction* に出版されるべきであると私は考える。」

詳細な批判が 3 ページ続き、Reynolds の語句「平均的な平均運動 (mean-mean motion)」の不適切な定義やミスプリントへの不満が含まれていた。

その後、(多分) Lord Rayleigh の仲介で、二人の審査員は互いに接触し、それが Stokes に 1895 年 1 月 30 日に手紙を書かせた：

「Dear Lord Rayleigh,

...

我々は二人ともこの論文は印刷されるように、しかしまずいくつかの論評を著者に送るように言おうという気になっていると思います。前の論文には非常によい研究がありました。だからこの論文にも重要な何かがあるかも知れませんが、しかしこの論文は非常に曖昧です。このままではそれはほとんど理解されないでしょう。

Yours very truly,

G. G. Stokes」

Reynolds は審査員の評価を受け取ってその批判を明白に熟考し、2月19日に Lord Rayleigh に返答を送った。それは自然さ、すなわち、自己弁護を伴う論文の弱点を認めたことで際立った手紙であった：「議論のその部分の前置きの説明に手を抜いたことそしてそれが論文全体に広がったことを、私はその困難さに盲目であったせいであると説明できるだけです。」最初と最後から2番目の段落も Lamb のきびきびした批判と対照的に完全に対抗した長い散漫な文章で Reynolds の夢中さを明らかにしている。

二人の卓越した審査員の生ぬるい受け入れ方に拘わらず、その論文は今日流体力学の文献における強力な篝火となっている。最初の最も重要なものは流れの平均部と揺動部への分解で、それは Reynolds 応力が未知数として現れる平均運動量方程式 (Reynolds 方程式) を導いた。その解析を通して Reynolds は今日質量平均として知られるものと類似の平均を取り扱った。その論文の他の主な解析的な結果は乱流運動エネルギー方程式だった。その式について彼は、Reynolds 応力と平均速度勾配の積から成る項は平均流動から乱流への運動エネルギーの移送を表していることを観測した。この発見が当時如何に抜きんでていたかを示すものとして、より簡単であるが平均二乗温度揺らぎに対する対応する方程式が1950年代まで出版されなかったことを記すことができる。

乱流運動エネルギー方程式を調べることにおける Reynolds の目的は、乱流から層流への乗り移りが何故 Reynolds 数の特別な値で起こるのかの説明を与えることであった。実際、それは論文全体にわたって伝わってくる根本的理由であった。彼は、小さい乱れを重ね合わせた、平行板間の完

全に発達した層流を考えた。それでもって彼は水路 (channel) にわたって集積する乱流エネルギー生成速度と粘性散逸速度に対する式を得た。これらの二つの過程の相対的な大きさは Reynolds 数とともに変化し、彼は低い臨界 Reynolds 数を、全乱流エネルギー生成速度が粘性散逸速度に平衡するまでに成長した時であると識別した。彼の評価が不正確であった事は今日問題にならないと見られている。その論文は流体力学の世界が、続く数十年にわたって吸収するべき十分すぎる新規さを含んでいたのだから。

## 参考文献

1. “*Wilhelm Ostwald, Biography*,” *The Nobel Prize in Chemistry 1909*, Nobelprize.org
2. “*Friedrich Wilhelm Ostwald*”  
(<http://www.geocities.com/bioelectrochemistry/ostwald.htm>)
3. “*Wilhelm Ostwald-Wikipedia, the free encyclopedia*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm-Ostwald>)
4. “*Maurice Couette, one of the founders of rheology*”  
J. M. Piau, M. Bremond, J. M. Couette, and M. Piau, *Rheol. Acta*, **33**, 357-368 (1994).
5. “*Le Prix Maurice Couette du GFR*”  
Jean-Michel Piau and Monique Piau, *Rheologie*, **8**, 1-4 (2005).
6. H. B. Seebohm, “*Biographical Notes on Karl Weissenberg*,” in *Karl Weissenberg - The 80th Birthday Celebration Essays*  
(<http://cspcbsr2.ncl.ac.uk/bsr/weissenburg/>)
7. Hershel Markovitz, “*Some of Weissenberg’s More Important Contributions to Rheology: An Appreciation*,” in *Karl Weissenberg - The 80th Birthday Celebration Essays*  
(<http://cspcbsr2.ncl.ac.uk/bsr/weissenburg/>)
8. J. E. Roberts, “*The Early Development of the Rheogoniometer*,” in *Karl Weissenberg - The 80th Birthday Celebration Essays*  
(<http://cspcbsr2.ncl.ac.uk/bsr/weissenburg/>)
9. R. J. Russell, “*The Isolation of, and the Initial Measurements of the Weissenberg Effect*,” in *Karl Weissenberg - The 80th Birthday Celebration Essays*  
(<http://cspcbsr2.ncl.ac.uk/bsr/weissenburg/>)

10. A. S. Lodge, “*Elasticity in Incompressible Liquids*,” in *Karl Weissenberg - The 80th Birthday Celebration Essays*  
(<http://cspcbsr2.ncl.ac.uk/bsr/weissenburg/>)
11. “*Karl Weissenberg 1893 - 1976*”  
J. Harris, *Rheol. Acta*, **15**, 281-282 (1976).
12. “*James Gardner Oldroyd (1921-1982)*”  
Chris Petrie and Hanswalter Giesekus, *Rheol. Acta*, **22**, 1-3 (1983).
13. “*The Scientific Life and Influence of Clifford Ambrose Truesdell III*”  
J. M. Ball and R. D. James, *Arch. Rational Mech. Anal.*, **161**, 1-26 (2002).
14. “*Early works on the Hagen-Poiseuille flow*”  
Eckhard M. S. Hitzer, *Mem. Fac. Eng. Fukui Univ.*, **49**, 45 (2001).
15. “*Ozborne Reynolds and the Publication of His Papers on Turbulent Flow*”  
Derek Jackson and Brian Launder, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **39**, 19-35 (2007).



## 6章 拡散

### 6.1 拡散の1世紀半

以下の記述は、主として、Paris-Sud 大学の前物質科学教授 Jean Philibert によるエッセイ<sup>1</sup>に基づいている。

#### 6.1.1 Thomas Graham

拡散についての最初の系統的な研究はスコットランドの化学者 Thomas Graham によって行われた。彼は1805年 Glasgow の生まれで、彼の年代の指導的化学者と見なされていた。Graham は透析の発明者であって、彼はそれを膜を通しての拡散による分離法と定義した。彼は気体混合物中の拡散の研究を1828年から1833年にかけて行い、その結果を1831年 Edingburgh での王立学会に提出した。それらは後で1833年に *Philosophical Magazine* で出版された。その最初の文章は次のとおりである：

「気体の混和性は興味ある推察に満ちている。我々がその課題について持っている実験的情報はよく確立された事実よりすこし多い。異なった性質の気体が接触させられた時、最も重いものが最下層に、より軽いものが上層にというようにそれらの密度にしたがって配置されない。それらは互いを通して、相互に等しく自発的に拡散し、ある時間の間、本質的に混合の状態にとどまる。」

Graham は拡散についての最初の定量的な実験を行ったばかりでなく、拡散係数の決定を許す最初の信頼できる測定を行った。拡散係数の概念はこのとき未だ確立していなかった。その確立は26年後で、Fickのおかげである。時は1867年まで流れ、その年 Maxwell は Graham の数値結果から気体混合物中の拡散係数を計算した。彼の空気中における CO<sub>2</sub> の拡散

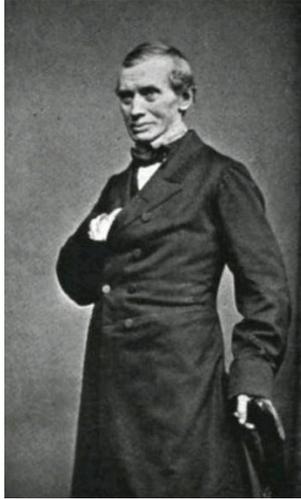


図 6.1 Thomas Graham (1805/12/21–1869/9/16)

係数は  $\pm 5\%$  で正確である。これは異常ではないだろうか。Graham のと同一の実験装置は後で 1863 年に J. Loschmidt によって用いられ、彼は 100 組の気体混合物における拡散の古典的測定を行った。

後に、Graham は液体混合物における一連の拡散実験を行い、その拡散は気体の場合に比べて 3 桁小さく、拡散速度は時間とともにゆっくりとなくなっていくことに気づいた。彼はまたパラジウムによる水素の取り込みも研究した。

### 6.1.2 Adolf Eugen Fick

1855 年、Adolf Fick は僅か 26 歳で拡散の定量的な法則を提案した。そのとき彼は Zürich の解剖実験助手であった。それらの基礎的な方程式が化学者や物理学者ではなく、生理学者によるものであることを記すのは面白いことである。ただし、Fick は大きい科学的文化を持った人物で、医学だけでなく数学と物理学にも通じていた。1856 年、彼は「医学物理学」という題の単行本を出版した。それはこの種の最初の本で、彼はその中で、



図 6.2 Adolf Eugen Fick (1829/8/3–1901/8/21)

肺の中の空気の混合、心臓の働き、人体の熱収支、筋肉収縮の機構、血液循環の流体力学などの生物物理学の問題を議論した。Fick の名前は心臓学の歴史でよく知られている。

*Philosophical Magazine* に出た Fick の論文の最初の文章は次のとおりである：

「2、3年前、Graham は水の中の塩の拡散について広範な研究を出版した。その中で彼は特に異なった塩の拡散性を比較した。しかしながら、そのような極めて価値のある広範な研究において、単次元の空間における拡散の作用に対する基本的な法則の展開が無視されているのは私にとって遺憾である。そこで、私はこの欠如を補う努力をした。」

Graham の結果について考え、Fick は拡散と熱や電気の伝導との深い類似性に気づいた。言い換えると、彼は、拡散は熱伝導に対する Fourier の法則、あるいは電気伝導に対する Ohm の法則と同じ数学的形式で表わされうるという予告的直感を持った。この類似性に沿って進み、彼は物質の流束はその濃度勾配  $y$  に比例すると置いた。比例係数  $k$  を彼は、物質の性質に依存する定数と呼んだ。Fourier の方法に従い、物質保存則とくっつけて、彼は次の基礎方程式にたどり着いた。Fick のオリジナルの表記

を用いると

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -k \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (6.1)$$

である。

Fick は彼の式の正しさを証明するのに多くの困難に出くわした。濃度対距離の2次微分は要求される精度では容易に測りうる量ではない。しかし、彼は定常状態の下で一連の実験を行うことに成功した：これらの条件の下で、数学的な解、すなわち濃度対距離は直線であるから、彼は彼の式をチェックすることができた。彼は、一方に純水を他方に塩を入れたふたつの大きな溜めを異なる長さの円筒管で繋ぎ、その中で水中の塩の拡散を測定した。Fick が明確に説明しているように、そのような場合、「測定されている時間の間に円筒管の端の断面から拡散して出る塩の量が決定された。そしてそれ故、同じ時間の間に任意の円筒断面を通過する塩の量が決定された。」さらに彼は「Graham の実験から期待されたように、 $k$  の値は温度の上昇とともに増加する。」ことを指摘した。また、彼は「この温度依存性は単純なことではない。」と付け加えた。

この時期、Graham と Fick の拡散測定は流体に限られていた。そのような測定は室温附近の温度において可能であったからである。固体中の拡散は明らかに科学者に関わりの無い課題だった。なぜなら、例えば Gay-Lussac のような著名な大科学者によって認識されていたように、そのような過程は信じられなかったからである。この信念は化学者の間での共通意見に基いたものだった。常識によると、流体中の拡散が全く自然な過程でありそうなら、対照的に固体中のそれは不可能ではないにしても、例外的でありそうに見える。しかし、固体状態拡散はこの時期の科学者によく知られていた多くの技術的な過程において起こっていた。技術的過程のみならず、いくつかの実験は拡散の兆候を示していた。多分、Robert Boyle が最初に固体状態拡散を示した研究者だろう。彼は銅貨の中における固体の重い物体（多分亜鉛）の透過を観測し、一方の側が元の色のまま他方が金色になるのを見た。Boyle は賢い実験家であった。彼は評論の中で、「顔料が沈着したのではなく、表面に色を塗ったのでもないという慎重さを確信させるために、広い間隙をコインを積み重ねて、コインの表面からかなり下まで金色が透過していることをはっきりさせた。Boyle は拡散に



図 6.3 William Chandler Roberts-Austen (1843/3/3–1902/11/22)

よって真鍮を合成するのに成功した。

### 6.1.3 William Chandler Roberts-Austen

19世紀後半に、鋼に関する冶金学研究が金属中の拡散の研究への道を開いた。しかし、定量的な測定は19世紀の極最後の年まで行われなかった。その測定はFe-Cの平衡の相図の研究でよく知られているイギリスの冶金学者 William Chandler Roberts-Austen のおかげによる。彼のフランスの友人 Floris Osmond による炭素化した鉄についての優れた単行本が、鉄の塊の中への炭素の浸透を明らかにした。他の実験は、例えば、二つの金属片を互いに圧着した時の極めて明示的な「拡散溶接」であった。

Roberts-Austen は Thomas Graham の助手から始めて、後に London の造幣局長官として彼を引き継いだから、彼が拡散に対して関心を持つのは驚くことではない。彼がこの組織の化学者、試験官であったとき、彼は高価な金属の系を研究するのに有用な良い分析道具を自由に使用できた。限界は本質的に彼が扱いうる温度範囲であった。しかし、ちょうどその時に Pt/RhPt 熱電対がフランスの物理化学者 Henri LeChatelier によって発明されたから、彼は幸運だった。Roberts-Austen は液体鉛中の貴金属

(Au、Pt、Rh)、液体錫中の Au と Ag、液体ビスマス中の Au の拡散性を測定した。試料は薄い断片に切り出され、最大荷重 0.5g で、感度が  $2\mu\text{g}$  の天秤による重量測定によって分析された。彼の拡散係数の値は現代のものと同等である。最後に彼は鉛の中への金の固体拡散を試みた。鉛の基板からの 6、7 の断片に基いて、彼は 4 つの異なる温度での熱処理後の拡散プロファイルを分析し、Fick の法則を適用して拡散係数を計算した。彼の結果は現代のトレーサー測定に匹敵するもので、正しい活性化エネルギーを持っている。今や金は鉛の中で速い拡散物質であることが知られており、Roberts-Austen が Au/Pb の系を研究に選んだのは特に幸運であった。

Roberts-Austen の書いたものの中に

「流体や固体の金属の中の活発な原子の動きについて、冶金学者によって集められた事実は、生理学者が、生命力や思考が依存する原子の動きを、最終的に測定できるだろうという希望を支持するだろう。」

がある。この大胆な文章は我々を生理学者 Adolf Fick に連れ戻す。生命や知覚は純粋に化学の問題なのであろうか？

#### 6.1.4 Albert Einstein、Jean Baptiste Perrin

拡散の基本を教えるのに 2 つの道筋がある。1 つは Fick の法則とそれらの数学的解で始まる現象論的方法で、他方は拡散粒子の酔歩を考える物理的、原子的方法である。流体中に懸濁する粒子の酔歩はスコットランドの植物学者 Robert Brown によって発見された。彼は生きている花粉から抽出された、流体中の小さい粒子が群れ動くのを顕微鏡で観察した。彼はその運動が新鮮な花粉粒子でも死んだものでも同様で、全く一般的であることに気づいた。Brown の有機および無機物質を用いた実験は、水中に懸濁した細かい粉に還元され、そのような運動はこの状態にある物質の一般的性質であることを明らかにした。Brown 運動という名が Brown の栄誉のために、流体中に懸濁する微粒子の酔歩を呼ぶために新造された。これは多分 Maxwell の気体運動論の出発点のひとつであったろう。

殆ど 1 世紀後、数学的な形の Brown 運動が Albert Einstein によって導かれた。当時の多くの科学者とは対照的に、彼は、基本的な量は粒子



図 6.4 Robert Brown (1773/12/21–1858/6/10)

の平均速度ではなく、与えられた時間におけるそれらの平均二乗移動距離  $\langle R^2(t) \rangle$  であることを、初めて理解した。軌跡 (trajectories) はそのようなもので速度は意味が無い。平均移動距離  $\langle R(t) \rangle$  は酔歩の場合 0 であり、意味のある量は平均二乗量である。Einstein は巨視的な量、すなわち拡散係数と、微視的な量、平均二乗移動距離との間の基本的関係を導くことができた。

$$D = \frac{\langle R^2 \rangle}{6t} \quad (6.2)$$

この最初の論文に続いて数ヵ月後もっと理論的な論文が出された。その中で、Einstein は懸濁粒子の並進運動だけでなく、球状粒子の回転運動も研究している。後に Einstein は化学者に歓迎されることになった「この現象の簡単な理論」を出版した。Einstein は簡単化した仮定のおかげである、彼の式の直接的な導出を提案した、それは後に最も初歩的な教科書で与えられているものである。<sup>2</sup>

一連の賢明な実験で、Jean Perrin と彼の学生達はこの関係を証明することができた。その美しい記述は 1913 年に出版された彼の本 “*Les Atomes*”<sup>3</sup> に見つけることができる。Perrin の実験に必要なものは顕微鏡と、径が数十ミクロンの微粒子の懸濁液だけである。ひとつの粒子の動きを観測し、規則的な時間間隔でその位置を測るだけでよい。

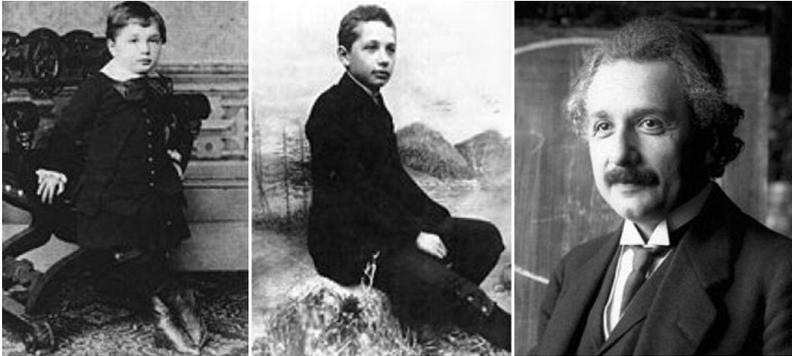


図 6.5 Albert Einstein (1879/3/14–1955/4/18)

Jean Perrin は粒子の移動が正確に無秩序の法則に従うことをチェックした。顕微鏡下での観測面である 2 次元において、 $R(t)$  の数値は Gauss の法則にしたがって分布する。Perrin によると、粒子の運動の無秩序さは確固として確立されている。簡単な実験装置で実行可能な同じ一連の実験で、Jean Perrin は全く特筆すべき結果を得るのに成功した: すなわち、Einstein の最初の論文に与えられたもう一つの関係式によって Avogadro 定数を測定することである。Einstein の関係と粘性媒体に対する Stokes の法則を結びつけて、彼は移動距離の  $X$  成分に対して

$$\frac{\langle X^2 \rangle}{t} = \frac{RT}{N} \frac{1}{3\pi\eta a} \quad (6.3)$$

を得た。ここで、 $R$  は気体定数、 $N$  は Avogadro 定数、 $\eta$  は媒体の粘度、 $a$  は粒子の径である。 $N$  に対する  $(2-3) \times 10^{23}$  という結果は簡単な実験道具による絶対的決定ということを見ると全く特筆すべきである。これらの簡単な実験は、周りに満ちていた懐疑論に対して、原子の存在の確固とした証明を与えた。Einstein の言葉は以下のとおりである:

「これらの考察と経験との一致は、Planck による放射の法則からの分子サイズの決定とともに、当時 Ostwald、Mach などと数多かった懐疑論者に原子の現実性を確信させた。これらの学者達の原子論に対する嫌悪は、明白に彼らの独断的な哲学的態度にまで辿ることができる。これは、大胆な精神を持ち、洗練された天分を持つ学者でさえも哲学的偏見によって事

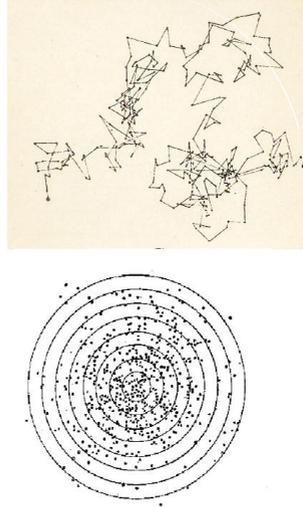


図 6.6 酔歩の軌跡と移動距離の分布 (Perrin)

実の解釈が邪魔されると云う事実の興味ある例である。」

.....

Jean Baptiste Perrin は 1870 年 9 月 30 日 Lille で産まれた。彼は École Normal Supérieure で教育を受け、1894 年から 1897 年の間、物理学の助手になった。そのとき彼は陰極線と X 線の研究を始めた。1897 年、彼は陰極線と Röntgen 線に関する博士論文で “doctor ès sciences” の学位を受け、Paris の Sorbonne 大学の物理化学の助手 (reader) に任命された。彼は 1910 年に教授になりドイツが侵入した 1940 年までその地位を保った。1940 年彼は米国に逃れ、1942 年 4 月 17 日 New York 市で亡くなった。戦後の 1948 年遺体は戦艦 Jeanne d'Arc 号でフランスに移送され、Panthéon に葬られた。

.....

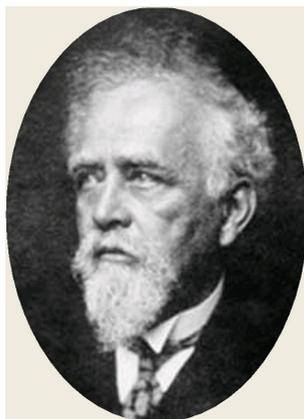


図 6.7 Jean Baptiste Perrin (1870/9/30–1942/4/17)



図 6.8 György von Hevesy (1885–1966)

### 6.1.5 György von Heresy

Fick の式や Einstein の式という強力な基礎で、固体中の拡散係数を決定する新しい実験への道が開かれた。しかし、まだよりよい実験方法が必要であった。

拡散測定における決定的な段階はもう一人の科学者、ハンガリー生まれでヨーロッパの著名人である György von Hevesy の研究であった。彼はいくつかの有名な場所で Ernest Rutherford、Henry Moseley、Niels Bohr のような科学者とともに研究した。彼は多分物理学や化学における道具として放射性トレーサーの有用性を理解した最初の人物であったろう。彼が Vienna の Radium 研究所で働いていた 1912 年、彼は Pb の自己拡散を含むいくつかの研究で放射性鉛を放射性トレーサーとして用いた。後に、Vienna、Budapest、Copenhagen で、彼は、塩類、液体や固体の鉛、野菜中における拡散を研究するのにこれらの放射性トレーサーを用いていた。1934 年の Irene と Frederic Joliot-Curie 夫妻による人工放射能の発見と Fermi による中性子活性化の後で、彼はいくつかの人工的な放射性元素を作製し、植物による燐の同化作用や鼠によるこの元素の代謝を研究した。世界大戦後、放射性トレーサーは多くの国々の多くの科学者達によって様々な方面で大いに活用された。それは多くの固体中における拡散係数の非常に正確な測定を可能にしたからである。

## 6.2 Robert Brown

Robert Brown の経歴は Brian J Ford の評論など<sup>4,5</sup> で知ることができる。

Robert Brown は 1773 年 12 月 21 日スコットランドの Montrose で産まれた。彼の父 James はスコットランド人の Episcopalian 教会派の牧師だった。父は強い独立心を持った人で、1788 年彼の教会の George<sup>3</sup> 世との同盟という決定に抵抗した。母は Presbyterian 派の牧師の娘 Helen *née* Taylor である。息子 Robert が父同様の知的強さを受け継いでいたのは明らかである。しかし、彼は父親の曲げないキリスト教の教条主義は持たなかった。少年 Brown は地域中等学校 (現 Montrose アカデミー) に入り、それから Aberdeen の Marishal カレッジに入った。1790 年一家が Edinburgh に移ったとき、彼は 4 年で退学した。次の年遅く父が死んだ。Brown は Edinburgh 大学で医学を勉強したが、植物学への興味が増し、ついに医学よりも植物学で、より多くの時間を過ごすようになった。彼は John Walker の講義に出席した。彼は単独で、あるいは George Don のような看護師達とスコットランド高地を植物採集旅行し、集めた植物について細心の植物学記述を行った。彼はまた、当時主要な英国植物学者の一人であった William Withering と関わりを持ち、彼のための蒐集をし始めた。この時期の Brown の絶頂は新種の草 *Alopecurus Alpinus* の発見で、彼の最初の植物学論文 “*The botanical history of Angus*” が 1792 年 1 月に Edingburgh 自然歴史学会で発表された。しかし彼が活着している間には印刷した論文は出なかった。

Brown は 1793 年に医学コースを退学した。1794 年遅くに彼は 21 歳で Fencibles の Fifeshire 連隊に旗手として加わり、1795 年 6 月に軍医に任命された。連隊はまもなくアイルランドに駐留した。その連隊はほとんど活動しなかったため、彼には勉強する時間が十分あった。彼は朝食までドイツ語文法を勉強するのが習慣で、食事後は昼食時まで植物学の文書を研究した。午後 1:00 から 3:00 まで患者を診た。夕刻には社交や食事に外出しない場合、彼は深夜まで科学研究を続けた。彼は長い夜の議論を楽しんだ。しかし、彼は植物標本や図書がなく、標本蒐集から遠ざけられていることにいらいらしていた。



図 6.9 Robert Brown (1773/12/21–1858/6/10)

この時期、Brown は特に隠花植物に興味を持っており、それらは彼の最初の研究課題であった。Brown は William Dickson との協同を始め、1796 年まで彼にコケの標本と記述を送った。Dickson は Brown の許しを得て、それらを彼の本の中に組み込んだ。

1800 年までに Brown はアイルランド植物学者達の間で確固として確立し、Withering、Dickson、James Edward Smith、José Correia da Serra を含む英国や外国の多くの植物学者と協同した。

1798 年 10 月若い士官である Robert Brown は連隊の徴兵のために London にいた。そこで彼は冷徹な心を持って目的を追求するスコットランド男として、著名な植物学者 Joseph Banks 卿に紹介された。Banks は 2 年以内に、現在オーストラリアとして知られている新しい領土への大規模な発見の航海を計画していた。乗船させる植物学者に対する彼の自然な選択は Robert Brown であった。Brown は Matthew Flinders 船長の下で給料 420 ポンドで航海した。この給料は当時相当な額だった。1801 年 7 月に *Investigator* 号に乗船した時、Robert Brown と Matthew Flinders の二人は 27 歳であった。広い才能をもつ芸術家かつ著名な植物イラストレーターである 41 歳の Ferdinand Bauer も乗っていた。そのほか、Kew Garden のために生きている植物や種子を集めるのが仕事の庭師 Peter Good、冶金学者として任命された鋳夫 John Allen、風景画家 William Westall、天文学者 John Crosley がいた。Crosley は航海中に病を得て喜望峰で下船し

た。Brown は Bauer と Good の上司になり、二人は Brown に対して標本蒐集をするように教育された。彼ら二人は Brown にとって熱狂的で仕事熱心な仲間になった。

*Investigator* 号は 1801 年 7 月 18 日 London を出港した。彼らは Brugio 島 (Desertas 諸島) と Madeira に短い上陸をしたが、どちらでも記すべき何も収集できなかったことに Brown は失望した。彼らは 10 月 16 日喜望峰に着き、2 週間を少し越える間滞在した。その間 Brown は高範囲の植物採集旅行をし、Table Mountain には少なくとも 2 度登った。その岬で彼が集めた植物の中に二つの新種があった。

1801 年 12 月 8 日、彼らは New Holland (現オーストラリア) の領土に着いた。彼らが着いた地点は大きな亜大陸の南西角の King George Sound だった。Brown は 3 年半、オーストラリアで集中的に植物研究をした。到着後 3 週間以内に Brown は 500 種以上の植物を蒐集した。それらの殆どは西洋の科学では未知のものだった。その後 3ヶ月間彼は Port Jackson に滞在し、もう 10ヶ月間タスマニア島に滞在した。Brown は 1805 年 5 月までオーストラリアに留まった。彼らは広範な描画や記録の蒐集物、多くの動物標本、4000 の異なる種の植物を持って、1805 年 10 月に英国に戻った。Brown は官費を提供され、その間資料を研究し、続く 5 年間で 2200 種の記述に費やした。そのうち 1700 種は以前には知られていないものであった。Brown 自身 140 の新しい属を命名した。1806 年から 1822 年の間 Brown は London のリンネン学会の書記、図書館員、管理人として奉仕した。1820 年 6 月 19 日 Joseph Banks 卿が死んだ後、彼は Soho Square の Banks の家と蒐集物を引き継いだ。その遺贈の約定は、Brown が生涯その蒐集物の面倒を見ること、および Brown の死後はそれらを新しい英国博物館へ移すことだった。しかし事態はもっと速やかに動いた。Robert Brown は 1827 年その標本の移管を受結することができた。条件は、彼らが永久に英国博物館の一部になることおよび彼が生涯これらの管理人になることであった。この処置は偉大な London 蒐集物の創設において重要なできごとであり、それ以来分類学の世界で重要となっている。1837 年英国博物館の自然歴史部門が 3 つの部分に分かれた後、Brown は植物部門の初代管理人になり、亡くなるまでそれを続けた。後任は John Joseph Bennett であった。



図 6.10 若人 Brown

Robert Brown は 1810 年、王立学会のフェローに選出された。1822 年リンネ学会のフェローになり、1849 年から 1853 年にはその会長であった。彼は 1858 年 6 月 10 日 London で亡くなった。丁度 Darwin が「適者生存」についての Wallace の論文を受け取る 1 週間前であった。Brown の死後、Darwin は進化論についての画期的な講演をリンネ学会で行う自由な日々を得ることができた。

Robert Brown は London の Kensal Green Cemetery に葬られた。

Brown は大人になってからの人生を通して顕微鏡を用いた。彼は確立した技術者 (technician) であり、異常な天与の才を持つ微視的現象の観察者であった。裸子植物の裸の胚珠を同定したのは Brown だった。(これは現代の道具をもってしても難しい観察である。) この仕事は Brown にとって計り知れないほど大きかった。彼はその観察を非常に長い論文の中にしまい込んだ。Brown は Captain P. P. King による論文に対して次の言葉を加えている:

「子房が欠如しているかあるいは不完全に形成されているかという場合が作り出されるなら、胚珠自身が直接花粉の作用に曝されていることは、受精の点に関して存在するかも知れない疑いを完全に取り除くでしょう。

そういうことが *Ephedra* や *Gnetum* の Cycadeae (蘇鉄) の構造の真実の説明であると私は信じる。」

Brown の名前がほどけ難く結びついているのは懸濁微粒子の絶え間ない攪乱の観測であった。Brown 動き (movement) として知られるその効果は 1827 年彼によって初めて気づかれた。その発見の彼自身の記述によると、彼は花の咲く植物の受精の機構の研究を続けることを計画していた。卵子 (ovum) を研究していたので、花粉の構造とめしべとの相互関係に注意を向けるのは当然のことであった。1827 年彼が注意を向けた最初の種はアメリカ種の *Clarkia pulchella* だった。彼は特に注意して花粉の粒の構造を見た。彼はそれらを開いた、すなわち裂開した葯からではなく、完全に形作られ、まだ開いている花粉の囊からとり、作業台で切り開いた。

彼は花粉粒のいくつかを水に懸濁させ、それらを細かく調べた。それらが粒で満たされているのを見るためだけだった。粒は明らかに動いていた。彼は、その動きは流体の流れや蒸発から生じているのではなく、粒自身に属するものであることに、すぐ満足した。当然の順序をおって、彼はそれらの別の説明を論駁するために注意深い実験を行った。彼が述べたことを観測したという彼の能力を疑うであろう人々の後の反対を、Brown が予期できたことをそれは示している。彼以前の研究者達がしたように、Robert Brown もここに生命の本質があるということ仮定しようとしたに違いない。彼は、生きている有機物の胚細胞の中に終わりの無い動きをうけいれることができた。科学的発見のドラマの中でよく述べられる、これは即座の説明である。その現象を見た素人の大抵は、彼らが生命自身が働いているのを見てると結論する。

Brown がそう容易には説得させられなかったことは彼の大きな名誉である。彼は生きている植物標本の中にその現象を見て、死んだ植物でもそれが維持されるかどうか見ようとした。彼は彼の論文が印刷のためのゲラ校正を通る間に、アルコール溶液中に約 11ヶ月間保存した花粉粒でも同じ現象を見たということを書いた。

Robert Brown はこの現象を見た多くの以前の研究者達の説明を読み、彼らがそれを有機的な事象、すなわち生命の機構と結びつける傾向があることを記した:



図 6.11 Brown の肖像画

「それらは、有機体の基本分子であることが最初に Buffon と Needham によって、次に注意深い Wrisberg によって、その後特に Muller によって、最近ではその原理を復活させ、詳細にそれを支持した Milne Edwards 博士によって考察された。」

Brown は、粒子を豊富に生成するあらゆる世代の岩石を含めて、明らかに生きてはいない標本について考え続けた。彼はどんな固体鉱物も、十分に細かい粉にされればその現象を示すことを結論した。彼は以前の顕微鏡学者によく知られていた課題を取り上げる際、称賛すべき客観性を示し、その生物的性質に反対し、物理的性質に対する革命的な説明を目指した。

その効果についての関心が衰えることはなかった。Albert Einstein による Brown 動き (movement) の解析は 1905 年 Boltzmann 定数の定式化を導いた。その直ぐ後、J. B. Perrin は Paris で研究出版を始めた。彼の注釈は Brown の時代以来の多くの他の研究者に亘るばかりでなく、その効果を射影 (projection) 顕微鏡学によっても示した。

近年、Brown の顕微鏡は (Brown 運動) の現象を明らかにするには十分ではなかったとする誤解がもたれている。これに対して、英国の顕微鏡学者 Brian J. Ford は 1991 年 Brown の顕微鏡を当時のまま復活させ、Brown の観測を具体的に再現した。



図 6.12 Sir George Gabriel Stokes (1819/8/13–1903/2/1)

### 6.3 George Gabriel Stokes

George Gabriel Stokes の人と業績は、Ireland の Dublin 市立大学教授 lastair Wood の記事など<sup>6,7,8</sup> から得られる。

George Gabriel Stokes の名前は数学、物理学、工学の分野で、Stokes の法則、Stokes 現象、Stokes 予想、Navier-Stokes 方程式などと幅広くよく知られている。Stokes は彼の研究人生の全てを Cambridge 大学で過ごし、1849 年から亡くなる 1903 年まで数学の Lucasian 教授であった。この高名な椅子はかつて Isaac Newton が占め、現在 Stephen Howking が占めているものである。あまり知られていないことは、Stokes が、父が Ireland の教会の牧師であった Sligo 郡 Skreen の生まれで、小さい頃そこと Dublin で教育を受けたことである。Kelvin 卿 (William Thomson) が生誕地の Belfast よりも、彼が Glasgow 大学の教授であったスコットランドと関係づけられるように、Stokes の貢献は Ireland において完全に無視されている。Kelvin は少なくとも Queen's 大学の外に銅像があるが、Stokes には生誕地に何の記念物も無い。

歴史の記録にある Stokes 一族の最初は Gabriel Stokes である。彼は 1682 年生まれで、Dublin 市 Essex 通りに住んでいた数学器具メーカーであって、Ireland の Deputy Surveyor General になった。彼が係わったものの中に、Dublin へ管で送る水の供給を確かにするための静水力学天秤

(hydrostatic balance) の使用があった。彼の曾孫 George Gabriel は最初の論文 *The internal friction of fluids in motion* でこの問題に立ち返り、与えられた量の水を決められた場所へ供給する水道の設計への応用を議論している。Gabriel の年長の息子 John は Dublin 大学のギリシャ語の欽定教授であり、年少の息子、もう一人の Gabriel は同じく Dublin 大学の数学教授であった。

この数学教授の子孫達は Ireland および国際的に重要な医学一族になった。医師 Stokes の最初は Whitley だった。彼は Dublin の Trinity カレッジの医学のフェローで、United Irishmen との彼の連携を保留された 1798 年から 1800 年の間彼のその経歴は一時的に中断した。Whitley は、様々の時期に Dublin 大学や外科医のカレッジの教授職を持っていたのに加えて、1795 年の 1 年間数学の教授でもあり、1821 年「Ireland の人口と資源の研究」(*Observations on the population and resources of Ireland*) を出版した。彼の息子 William Stokes(1804-1878) の名前は、Cheyne-Stokes 呼吸や心臓学における Stokes-Adams 症候群で医学に残されている。彼の息子 William Stokes 卿 (1839-1900) は外科医のカレッジの外科教授であった。彼の子孫達の多くは今日医学や学問分野で名声をもって働いている。

初めは数理物理学者であった George Gabriel Stokes が、偉大な叔父 Whitley のように、ヘモグロビンの呼吸作用を発見したことで数学と医学の境界を越えたことを記すのは面白い。

George Gabriel Stokes は最初の Gabriel の年長の息子 John Stokes からの子孫である。その一家の枝別れ (branch) については多くは知られていない。G. G. Stokes の論文のほとんど全ては 5 巻の数学、物理学論文集に見られるが、その中に Kelvin 卿と Rayleigh 卿による彼の科学への貢献を讃辞する追悼文がある。それにはよく引用される逸話を含めて、Stokes の個人的詳細が含まれている。それらは Bristol カレッジの数学教師から出たものようである：

「何かもっと工夫した答えが期待されていたとき、簡単な *Yes* か *No* で答えるという (後の人生で顕著になった) 彼の習慣は、彼が Ireland から英国の学校に移った時に遡るようである。そのとき、彼の兄達が彼に冗談を言って、彼が長いアイルランド語の答えをしたら学校の仲間に笑われるだ

ろうと警告した。」

1798年、John Stokesの息子でSkreenの牧師 Gabriel Stokes は Kilrea の牧師 John Haughton の娘 Elizabeth と結婚した。彼らの最初の子供 Sarah は幼児で死んだが、彼らはさらに7人の子供を得た。その中で George Gabriel は一番下だった。4人の兄の全ては聖職者になった。George Gabriel が生まれたとき、最年長の兄 John Whitley は既に20歳で、Armagh の助祭長になっていた。後に Stokes は少年時代の光景や大西洋の怒涛の音の中での散歩について楽しげに語った。論文 *On the theory of oscillatory waves* の中でさえ、数式の途中で、彼は「大西洋からの嵐の結果として西海岸に打ちつけ、砕ける波」について書いている。その論文はまた、波の現象を観測するために the Giants Causeway へ訪れたことを記録している。この非常に個人的で無口な Victoria 朝の科学者は数学的証明の途中にしばしば詩的な記述を割り込ませる習慣を持っていた。1902年の漸近級数の論文で、現在 Stokes 現象として知られていることを、「下位の項はあたかも霧の中へ入ったかのように入り、しばし視界から隠され、その係数が変化するとでてくる。」と彼は書いている。多分少年の時彼は湾の向こうの平たい頂上をもつ Benbulbin の表面が霧に覆われるのを見たのであろう。George Gabriel は Ireland 西部での躰で大いに鼓舞されたのは疑いない。彼は英国での学生時代、夏の休暇で定期的にそこへ帰った。それは鉄道の無い時代決して些細ではない運動だった。彼の両親が亡くなった後、彼はそのとき Tyrone の聖職者だった兄の John Whitley や、彼が大いに結び付けられていた Malahide にいた姉の Elizabeth Mary を、死ぬまで殆ど毎年訪問し続けた。

彼の最初の数学教師は Skreen 教会区の牧師であった。彼は George Gabriel を「教科書よりうまく、足し算をする新しい方法を自分で成し遂げた。」と記録している。彼はこのときまでに老いていた父と一緒に古典を勉強した。George Gabriel が生まれたとき父は52歳であった。1832年、彼は若い George Gabriel を最年長の兄 John Whitley と一緒に住むように Dublin へ送った。そこで彼は通学生として、Hume 通りの Dr. Wall の学校に出席し、彼の優美な幾何学の解に注意を惹かれた。Gabriel Stokes は1834年に亡くなり、未亡人と二人の娘は Skreen 教会区を去らねばならな



図 6.13 少年と青年の Stokes

かった。しかし、お金は George Gabriel が英国で学校へ行くために送られることが分かった。彼の 2 番目の兄 William Haughton は、1828 年の Cambridge 大学数学優等卒業試験 (Tripos) の第 16 代 1 級合格者で、Caius カレッジでフェローを得ていた。Bristol カレッジを薦めたのは彼であった。そこでは、Caius の名誉フェローである Joseph Henry Jerrard が校長であった。Stokes 一家の殆どが Trinity カレッジと繋がりを持っていた。Dublin の大学との繋がりには Bristol の彼の数学教師 Francis Newman という人物にある。Francis Newman は Stokes が「本を見ることなく、問題として Euclid の命題の多くを成し遂げた。」と書いた。Stokes は Newman に大きな愛着を持っていたようである。Stokes は彼について、「非常に喜ばしい沈着さと親切な作法」を持っていると記録している。

1837 年、George Gabriel Stokes は Cambridge で 3 番目に古い Pembroke カレッジ (Cambridge 大学に 30 ほどあるカレッジのひとつ) に学部学生として入った。H. P. Stokes (Stokes とは無関係) は、Stokes と同じ 1819 年に生まれた Victoria 女王は彼が大学に入学した同年に王冠に登ったが、彼は彼女より 2 年長生きしたことを指摘している。Pembroke からの優れた卒業生には、殉教者 Ridley 主教、詩人 Spencer と Gray、政治家 William Pitt がいた。学校では数学の神童であったけれども、Stokes は Pembroke の初年度では John Sykes 一人に 2 番の位置に打ち負かされた。2 年度から、彼は、当時の習慣として、非常に競争的な数学優等試験 (Tripos) のために

個人的家庭教師 William Hopkins と一緒に勉強を始めた。これらの勉強は非常に効果的で、Stokes は 1841 年最優等合格者 (Senior Wrangler)(全大学の数学 1 位) になり、Pembroke のフェローに選出された。彼の初期の研究は実験的、理論的双方にわたる流体力学の分野であった。その間、彼は非圧縮性流体の内部摩擦 (internal friction) の概念を発展させた。この研究は、同時期にフランスの文献に現れた Navier、Poisson、Saint-Venant の研究とは独立であった。Stokes の方法は弾性固体のような他の連続媒体へも応用することができた。それから彼は水中の振動する波に注意を向け、最大波高についての予想を続けて証明した。

Stokes は大陸の文献にもよく知られており、約束された若い男として名声が高く、1849 年数学の Lucasian 教授に任命された。同じ時、その講座の貧弱な基金からの彼の収入を増やすために、彼は 1950 年代を通して London の鉱山学校でも教えた。彼の卓越した研究で Lucasian 教授に任命されたけれども、Stokes はその時代に先立って彼の学生たちの福祉への関心を示した。彼は、「その大学の数学の学生誰からでも相談を受け、また助けるために個人的に準備していた。」と述べている。

以前の在職者 Babbage は一度も講義の広告をしなかったことが記録されている。Stokes は即座に、「現在の教授は静水力学の講義を始めます。」という広告をした。それは彼の人生の最後の年の 53 年後まで続いた。Stokes の手書きは酷かったので、彼はタイプライターを常用する英国で最初の一人になった。

Stokes の純粋数学の結果は主に、彼や他の人が研究していた物理の問題への必要から生じたものであった。彼は彼自身の時代の工業的応用の必要性によって大きく動かされた数学者であった。鉱山学校との結びつきに加えて、彼は永年の間、Rathmines の国際的によく知られた光学事業を運営していたレンズメーカー Howard Grubb のコンサルタントの役をした。彼はまた Trinity House の灯台照明の助言者の役もした。Stokes の業績集は鉄橋の破壊に関する微分方程式の論文も含んでいる。Tay Bridge の惨劇にしたがって、彼は Trade 委員会に鉄道構造物への風圧についての報告をした。彼の周期級数の論文は、現在 Fourier 級数として知られている、与えられた関数の展開に対する条件に関係していた。彼はまた、級数の一様収束の考えを持っていたことで榮譽を荷っている。彼の積分の漸近展開や

微分方程式の解についての主要な研究は G. B. Airy の光学の研究から生じた。彼の名前が冠されているベクトル演算についてのよく知られた定理は Stokes によるものではなく、Kelvin 卿による手紙で彼に伝達されたものであった。この混乱は、Stokes が数年後に Smith 賞の試験問題としてその定理を出したことから生じたようである。しかしながら、これには言い訳がある。Stokes は疑いなく、未発表の考えを他の人と共有することに寛大であり、特にスペクトル解析で Kelvin とアイデアを共有していた。彼の死の 2 日前 1903 年 2 月 3 日の見だしで、*The Times* は「G. Stokes 卿は著しく、全ての個人的な野望や悲しい嫉妬から自由であった。」と書いた。

Stokes は測地学の原理、音の理論の研究を続けた。後者を彼は流体力学の一分野として扱った。

彼の主要な進展は、その時 Cambridge で十分確立していた、光の波動論においてであり、彼が知覚できる非圧縮性弾性媒体として扱ったエーテルの性質を数学的に調べた。それは、彼が実験的に確かめた回折の数学理論、スペクトル解析に彼を導いた蛍光、について彼が主な結果を得ることを可能にした。彼の光に関する最後の主要論文は 1862 年に提出された複屈折の動力学理論の研究であった。この後彼の時間はますます科学や大学の管理業務に取り上げられた。

この変化の主要な理由は、1851 年彼が王立学会のフェローに選出され、直ぐ後の 1854 年にその学会の幹事 (secretary) になった事である。そこでは彼は研究論文の著者達に可能な修正と関連する研究について忠告する重要な役を実行した。学会の評議会の仲間の一人が書いている：

「George 卿の優れた特質の一つは寛大なやり方である。彼はいつも直ちに喜んで彼自身の科学研究をしばらく脇に置いておき、投稿者が彼に相談を求めた理論や実験のどのような点にも全力で集中し、完全な共感を与えた。」

彼は Kelvin 卿を含む多くの著名な科学者達にとっての共鳴版であった。彼はまた英国科学振興会 (the British Association for the Advancement of Science) においても非常に活動的であった。Kelvin を含む彼の同僚達は彼がそのような管理義務を負うのを悔やんでいた。P. G. Tait は *Nature* に抗議の手紙を書くまでに至っている：

「Stokes のような天才のきらめきが卑しい、消耗する労働に浪費されている。」

1859年 Stokes は Pembroke のフェローを空けた。彼が Armagh の天文学者 Thomas Romney Robinson 博士の娘 Mary Susannah と結婚したことで、(聖職者の養成を主目的としていた Cambridge 大学ではフェローの結婚を認めていなかった) 当時の規制により、そうするよう強いられたからである。規則が変わったことにより、彼は 12 年後フェローを再開することができ、彼の残る人生の間 Pembroke の教師を務めた。二人は Addenbrookes 病院に隣接する家にしばらくいた後、Dawning カレッジの南側に面する大きな庭園にある Lensfield Cottage に引っ越した。それは全ての意味で幸福な魅惑的住宅だった。そこで、Stokes はつつましい書斎を持ち、食糧倉庫の後ろの狭い廊下で、簡単で家庭的な道具で実験を行った。不幸にも George Gabriel と Mary の二人は悲劇に見舞われた: 彼らの二人の娘は幼児で亡くなり、Stokes 自身猩紅熱で深刻な病になった。彼らの 2 番目の息子 William George は生き延び、医師としての資格を得たが、Durham での見習い実習生の中に事故によるモルフィリンの過剰投与で 1893 年に死んだ。しかし、彼らの長男 Arthur Romney は King's カレッジを卒業して Schrewbury 学校の校長になり、末娘 Isabella Lucy は 1889 年 Lawrence Humphry 博士と結婚した。この夫妻は Lensfield Cottage に Stokes とともに住み、1899 年の Stokes の妻の死後彼の世話をした。

Stokes は疲れを知らぬ手紙の書き手で、結婚前長い (一つの手紙が 55 ページにわたる) 率直な通信を婚約者に送った。一つの手紙の中で彼は数学者達の全ての伴侶に馴染みあることになるテーマを述べている: 「彼は午前 3:00 時まで起きており、数学の問題と格闘しており、結婚後彼女はそれを許さないことを恐れている。」

Stokes は 1887 年の一般選挙で、Cambridge 大学から選出の 2 議席の国会議員の一つに自分自身を申し出た。慣習で彼の指名には反対はなかった。彼の選出は彼が会長であった王立学会のフェロー達の中に論争を起こした。何人かのフェローは二つの地位を同時に占めれば利害の摩擦を起こす可能性があるだろうことを感じていた。しかし、彼の先達 Isaac Newton がこれら大学と政治のオフィスをうまく保持していたことが指摘された。Westminster では、Stokes は保守派と一緒に座り、アイルランド問題で



図 6.14 Stokes の墓

は彼らを支持した。Stokes は議会で 3 回だけ発言したことが記録されている。

George Gabriel Stokes は 1903 年 2 月 1 日午前 1 時 Lensfield Cottage で亡くなり、Mill Road cemetery に葬られた。

### 「科学」

Stokes は James Clerk Maxwell と Kelvin 卿の二人を加えた自然哲学の三羽鳥 (trio) の内の最年長である。彼らは 19 世紀半ばにおける数理物理学の Cambridge 学派の名声に特に貢献した。

Stokes の研究は正確さと決定的なことで卓越していた。彼は、数学的解析に馴染みそうにないと思われる問題でさえ、多くの場合直ちに主要原理を確定して解を与えた。この事実は彼の数学力と実験の巧みさとを結びつけたことによっている。1840 年彼が Pembroke の彼の部屋にいくつかの簡単な物理器具を備えたときから、数学と実験とが手を携えて進み、互いに助け、チェックした。

### 「流体力学」

1842年と1843年の Stokes の最初の出版論文は非圧縮性流体の定常運動についてであった。続いて1845年に運動している流体の摩擦と弾性固体の平衡と運動に関する論文、1850年に振り子 (pendulums) の運動に対する流体の内部摩擦の影響に関する論文が出た。彼は音の理論にも貢献し、音の強さに対する風の影響を議論して、音が作り出される気体の性質によって強さが如何に影響されるかを説明した。これらの追求はともに流体力学の科学を新しい土台の上に置き、空気中に雲が浮かぶことや、水における波と波紋の鎮静かのような多くの自然現象の説明だけでなく、川と運河における水の流れ、船の表面抵抗のような現実問題の解に対する鍵を提供した。

### 「クリーブ流動」

流体の運動と粘度に関する彼の研究は粘性媒体中を落花する球の最終速度の計算を導いた。これは Stokes の法則として知られている。彼は非常に小さい Reynolds 数において、球状物体に働く摩擦力に対する式を導いた。彼の研究は落球法の基礎であり、その粘度計の中で流体は鉛直のガラス管の中で定常状態にある。サイズと密度の分かった球が液体を通して降下させられる。正しい選択であればそれは最終速度に達し、管の二つの印を通過する時間が測定される。球のサイズと密度、その最終速度、液体の密度を知れば、Stokes の法則は液体の粘度を計算するのに用いることができる。この古典的な実験では、通常異なる径を持つ一連の鋼球ベアリングが計算の精度を上げるために用いられる。同じ理論は、小さい水滴（あるいは氷の微結晶）がある臨界の大きさに成長するまで空気中に懸濁して留まり、雨（雪あるいは霰）として降り始めるかを説明する。

### 「光」

Stokes の最もよく知られている研究は光の波動論を扱ったものである。彼の光学の研究はかれの研究経歴の初期に始まった。光収差に関する彼の最初の論文は1845年と1846年に現れ、続いて1848年にスペクトル中のあるバンド（帯）に関する理論が現れた。

1849年彼は回折の動力学理論の長い論文を出版し、その中で偏光（分極）面は伝播方向に垂直でなければならないことを示した。2年後彼は厚い平板の色を議論した。

### 「蛍光」

1852年、光の波長変化に関する有名な論文で、彼は蛍光現象を記述した。彼は Fluorspar やウラニウムガラスで、それらの物質が紫外線を長い波長の可視光に変える能力があることを見た。この変換を記述する Stokes シフトは彼の榮譽のために名づけられている。この Stokes 線の派生物が Raman 散乱の基礎である。

### 「偏光」

同じ 1852年、異なる光源からの偏光の合成と分解に関する論文が現れた。1853年に金属的な反射の研究がある非金属物質によって示された。その研究は光の偏光現象のハイライトであった。1860年頃彼は積み重ねた平板から反射するの、あるいはそれらを通過する光の強度についての探求に従事した。1862年彼は複屈折に関する価値のある報告を British Association に用意した。その現象はある結晶が異なる軸に沿って異なる屈折率を示すというものである。

### 「工学」

Stokes は鉄道事故、特に 1847年の Dee 鉄橋の災害の研究に巻き込まれた。彼は Royal Commission の一員として鉄道構造物の中での鋳物の使用について調べた。彼は機関車によって橋に働く力の計算に貢献した。その橋は鋳物の桁が通過する汽車のレールを支えるのに使われていたために壊れた。鋳物は引っ張りや曲げに脆く、多くの類似した他の橋が破壊されるか強化されねばならなかった。

彼は Tay 鉄橋の災害に対する専門化立会人であったようだ。そこで彼は橋にかかる風力の影響についての証拠を与えた。その橋の中央部は 1879年 12月 28日の嵐の間に完全に破壊された。その間急行列車はその部分にいて、乗っていた全ての人が死んだ。諮問委員会は多くの専門家立会人を聴取してその橋が「貧弱に設計され、貧弱に建設され、貧弱に維持されていた。」と結論した。

彼は構造物への風圧の影響を調べる、続いての Royal Commission の一員に任命された。大きい構造物への高い風の影響は当時無視されていた。その委員会は英国中にわたって一連の測定を行い、嵐の間の風速の評価、それらが露出した表面にかかる圧力の評価を得た。

## 「その他」

Stokes の研究の全ては発表論文にあるものだけではない、多くは未発表かあるいは口頭の講義で触れられただけである。一つの良い例が分光学の理論における研究である。1871年 British Association への会長就任演説で Kelvin 卿は述べた：太陽や星の化学に対する光のプリズム的分析の応用は、1852年の夏よりも前のある時期に Cambridge 大学にいた彼に Stokes から教えられたものである。彼はその時 Stokes から学んだ理論的、実用的結論を説明した。

分光学が頼る物理的基礎や太陽と星にある物質の同定に応用可能な方法を含むこれらの陳述は、少なくとも7、8年 Stokes は Kirchhoff に先立っていたことを明らかにしている。しかしながら、この演説の数年後 Stokes は、その議論の中で一つの本質的な段階を進むのに失敗したこと、一定の波長の光が放射が単に認められるだけでなく、同じ波長の光の吸収が必要であるということに気づいていなかったことを述べた。彼は、Kirchhoff の称賛すべき発見のどの部分についても謙虚に権利を放棄した。しかしながら、イギリス人科学者達はこの宣言を完全には受け入れず、分光学の基本原理を最初に述べた栄誉を Stokes に帰している。

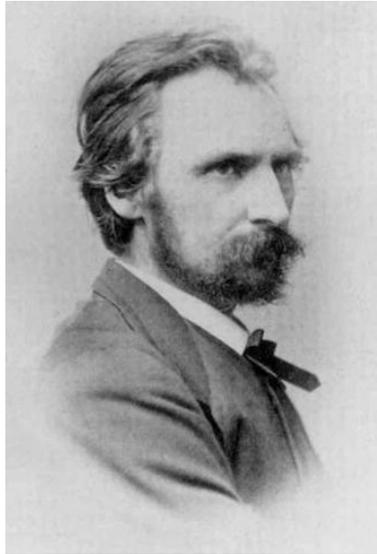


図 6.15 Adolf Eugen Fick (Zürich 時代初期) (1829/8/3–1901/8/21)

## 6.4 Adolf Eugen Fick

Adolf Eugen Fick の人生と業績は *Anesthesiology* (麻酔学) にある論文など<sup>9</sup> から分かる。

Fick は 1829 年 8 月 3 日ドイツの Kassel で成功した一家の中で生まれた。彼の父 Friedrich Fick は市庁の建築家で、その兄弟姉妹は解剖学、化学、法律に携わっていた。Fick は 9 人の子供のうちの最年少だった。彼は地域の大学進学用中等学校 (gymnasium) を出た後、Marburg 大学の入学資格を得た。そこでは彼の兄が解剖学の教授であり、もう一人の兄が法律の私講師であった。しかし、最も運がよかったのはそのとき解剖学と生理学の私講師だった彼の先生 Carl F. W. Ludwig との関係であった。彼らの連携は生涯にわたる学問的、社会的友情となった。Ludwig(1816-1895) は 200 人以上の著名な科学者の先生として有名である。彼の研究の多くは彼の生徒達の名前で出版された。彼は心臓神経網における副交感神経の神経節の一つ、腎臓の腎系球体叢のいくつかの特徴、大動脈減圧神経を記述し

た。彼は、血管中の血液の流れを測る最初の工夫の一つである stromuhr の発明でよく憶えられている。Fick と Ludwig の経歴はナポレオン戦争の後の時期に広がっている。そこでは Otto von Bismarck がドイツ諸州を統一し、隣国ロシア、オーストリア、フランスとの新しい国家関係を確立した。この連合はドイツの科学、医学、美学の黄金時代の始まりを記した。この時期の間、Fick は、全てが半径数百マイル内にある西ドイツとスイスのいくつかの大学と関係を持った。

1849年の秋、Fick は一時的に Berlin に移り、外科医 Bernard Langenbeck、神経学者 Mauritz von Romberg、内科医 Johann Schonlein のような綺羅星の講義に出た。加えて、彼は Hermann von Helmholtz、Johannes Muller、Emil Heinrich Du Bois Reymond と研究することができた。

Fick は Marburg に戻り、1851年 22歳のとき、視神経路に関する学位論文で医学博士の学位を授与された。短期間の間に彼は Ludwig に随って Zürich に行った。最初は検死解剖者としてであったが、Ludwig が Vienna へ行った後、解剖学と生理学の教授として Jpseph Moleschott の後を継いだ。しかし、旅行はまだ終わらなかった。Fick は Würzburg で同様の教授の地位を Albert von Bezold から引き継いだからである。彼は引退するまで 31年間そこに留まった。

それらの年月の間、Fick の研究の多くは Ludwig の研究と平行しており、血圧測定のためのアネロイド型マノメータや検流計 (galvanometer) を工夫した。しかしもっと重要なのは彼の研究が生理学上の概念を広めたことであった。Fick は数学期間 Würzburg の医学部長を務め、一時期は学長であった。引退後 Fick は公共の事柄で活動した。しかし、彼は 1901年 8月 21日、72歳の誕生日の後間もなく Flanders で亡くなった。

Zürich にいた間に Fick は拡散が生体組織の中での最も本質的事象の一つであることを早くに認識した。1842年、Carl Ludwig は腎臓機能についての概念を、「吸水と浸透」の一連の実験で確認しようとした。1854年、Fick は膜を通しての浸透作用による輸送と関係するこれらの語句を再定義した。最も重要な文書「拡散について」は 1855年に現れた。Fick は彼の理論がどの論争も終わらせるだろうと信じたけれども、その理論は正確な定量的実験ができなかったことで失敗であった。



図 6.16 熟年の Fick (Würzburg 時代後期)

1850年と1851年に、イギリス人化学者 Thomas Graham が広範な拡散の研究を出版し、拡散速度が温度の上昇とともに増すこと、溶液中の物質の密度に関係することを認めた。彼は、二つの気体の相対的な拡散速度はその密度の平方根に逆比例すると述べた。しかし、彼はその過程の基本的な基礎を確立することはできなかった。Poisson は毛管現象が膜を通じた拡散の理由であるとしていた。Becquerel でさえ拡散を一種の電気現象に帰した。二つの理論はまもなく捨て去られ、Brucke と Ludwig は分子的方法を展開した。

数学への性癖でもって、最後には分子物理学の目覚ましい知識の基礎に立って、Fick は「溶媒中に溶けた成分の分布は、暖かさが伝導物質中で分布する (Fourier の法則) のと同じように起こる。」と結論した。そのようにして、Fick は最後に、今日拡散の Graham-Fick の法則として知られる法則を定式化した。

「どの地点やどの時間における拡散流動の強さも、その地点とその時間での流路に関する溶液密度の微分係数に比例する。」単位時間に薄い

(tissue) シートと通って動く気体の流れの体積はシートの面積と両側の分圧に直接比例し、シートの厚さに逆比例する。」拡散定数  $D$  は気体の溶解性に直接比例し、その分子量の平方根に逆比例する。

素早い反響は、如何に拡散が麻酔剤の取り込みと分布において本質的であったか、何故肺の毛細管膜の病変が血中酸素減少を導くのか、如何に拡散が胎盤や脳における移送で本質的であるかを思い起こさせる。

心臓の出力の測定に関する Fick の貢献は、Harvey が傑作 “*De Motu Cordis*” (まえがき、序文、17章を含めて僅か 70 ページの本) を書いてから数世紀後に現れた。Leake は、Harvey は現代の生理学と医学の中心的原理を確立しただけでなく、自然科学における最も効果的な方法を示したと注釈した:

「羊や多分他の哺乳動物における血液量を排液 (drainage) によって測ることから離れて、Harvey はその循環に関して実際の測定をすることなく、彼の要点を証明するために最も効果的な方法での定量的な論法を用いた。最初に彼は一回の鼓動で心臓によって送り出される血液の量 (多分様々な動物種における心室体積から導かれた量) を考えた。それから、彼は血液量を測ったことがあったことから知っていたので、比較的短時間、例えば 1 時間に心臓によって強制排出される量はある一時に体にありうるであろう量よりもずっと多いだろうことを示した。体重の 10 分の 1 という彼の数値は妥当である。」

Harvey の後、血液循環の知識は動物や人体の解剖、注入技術、顕微鏡観察、流量計の使用から上昇した。Fick は実験データは出さなかったが、時々心臓出力を研究していた。例えば、前腕中の plethymography で決定された心室の拍動体積についての出版がある。1870 年 Fick は述べた:

「少なくとも動物において、各拍動で心臓の心室から排出される血液の量が直接決定されうる次の明白な方法に誰もたどり着かなかったのは驚きである。ある与えられた時間内に動物が空気からどれだけの酸素を吸収するか、そしてどれだけの二酸化炭素を吐き出すかを測る。実験の間に動脈と静脈の血液サンプルを採り、両方の中の酸素と二酸化炭素の含有量を測る。酸素含有量の差が、肺を通過する間に血液の各 1cc がどれだけの酸素を取り込んだかを教えてくれる。与えられた時間内に吸収された酸素の全

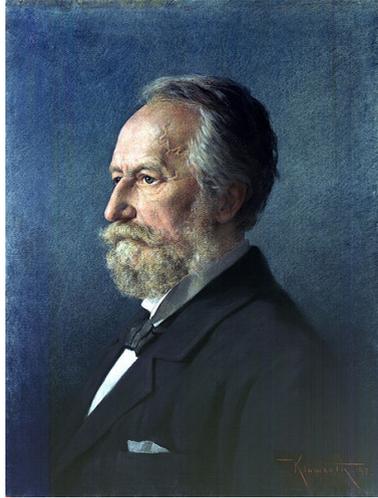


図 6.17 Fick の肖像画

量は分かっているので、その時間内に肺を通過した血液が何 cc であったか計算することができる。その時間の間の心拍数で割れば、各心拍で何 cc の血液が排出されたか計算できる。二酸化炭素の量での対応する計算は同じ値を決定し、最初の数値を確認する。」

簡単に言えば、心臓の出力は呼吸の酸素消費量を左心室と右心室の間の酸素含有量の差で割れば計算できる。すなわち、

$$\text{心臓出力 } (\ell/\text{min}) = \frac{\text{酸素消費量 } (\text{cc}/\text{min})}{\text{動脈静脈血中酸素差 } (\text{cc}/\ell)} \quad (6.4)$$

この式は Fick の間接法として知られている。その間接法において、静脈血中の酸素含有量を決定するためには気泡状の気体と吐き出した空気とを平衡させる必要があった。加えて、取り込みによって消費される酸素は間接的にのみ評価できた。動脈穿刺が結局動脈血の酸素含有量の決定に応用された。Fick の原理は他の気体、例えば  $\text{CO}_2$  (より感知しにくい気体であるけれども) をその式に代入した時にも応用できる。生理学的に定常状態が測定の間維持されねばならない。

W. F. Hamilton は述べている:

「このよく引用される Fick の文節はほとんど読まれてこなかった。何故なら、それは自明で、一度把握すれば再度注意深く読む必要がない簡単なメッセージだから。それは血液流動の定量的測定の発展における転換点であり、その中心的考えと原理から心臓の出力と組織を通しての血流との健全な測定を与える多くの様々な技術をもたらしたという理由で、よく引用されている。」

20 世紀における心臓カテーテル法の進歩の後、Fick の原理は 1930 年究極的に証明された。

Fick の式には血液流動を決定するための全ての稀釈法の原理が含まれている。一つの流れに入り出て行く物質の量と、そのような入りと出から結果する濃度差とを知れば、流れのサイズは容易に計算できる。Fick の方程式は血液流動を測定する全ての稀釈法の基礎を与えるものであり、脳、肝臓、腎臓、肺、子宮における血流についての全ての方法がそれに基いている基盤である。



図 6.18 John Warren Williams (1898/2/10–1988/3/5)

## 6.5 John Warren Williams

John Warren Williams は基礎的物理化学から抗原-抗体反応の性質にまで至る幅広い研究の関心を持っていた。<sup>10</sup> から分かる。Williams は双極子能率の測定から分子構造を推察した最初の一人であり、高分子に関心を持つようになった。

John Warren Williams は 1898 年 2 月 10 日 Massachusetts 州 Woburn で生まれた。彼の両親は二人とも Maine 州 Portland の生まれで、ずっと後で Massachusetts で始めて出会い 1896 年に結婚した。父 Charles Sampson Williams は Maine 大学の化学を卒業し、Harvard の大学院でいくらかの研究をした。母は旧姓 (née) Genevieve Allende で、Maine 州の Gorham 師範学校を卒業し、結婚前は Massachusetts の高校で教えていた。彼女は子供達に学問への尊重を沁み込ませた。Charles Williams は経歴の殆どを Connecticut 州 Hartford の旅行保険会社の化学者として費やした。Jack

(彼は John という名を好まなかった) は父の研究室で科学への初期の興味を持った。

Jack Williams は Hartford の Trinity カレッジに入ったが、彼の学部生活は第一次世界大戦の間米国海軍での短い軍務で中断された。戦後彼は Worcester 理工科大学 (Polytechnic Institute) の化学工学科に入り、1921年に学士号を受けた。彼は大学院で研究を続けることを望んだ。当時 Ph.D. の学位は化学工学では与えられなかったため、彼は化学に変更した。彼が Madison の Wisconsin 大学を選んだのは、Worcester 大学で教えていた Farrington Daniels の影響によるものだったろう。1920年、彼は Wisconsin の化学科に入った。そこで Daniels の指導下での大学院研究は、有機液体の二成分混合物の熱容量に関するものであった。彼は 1925年 Ph.D. の学位を得た。

Williams はすぐに Wisconsin の化学の助手 (instructor) に任命された。彼は、1938年教授に昇進し、全経歴を通して其処に留まり、1968年名誉教授になった。彼は 1925年 Lois Mary Andrews と結婚した。彼女は Connecticut 州 New Britain の生まれで、彼らは Hartford の高校で出会った。

Williams の最初の独立した研究は液体混合物の誘電定数の測定で始まった。物質の電気的性質への彼の関心は、Max Mason と Warren Weaver が著書「電磁場」(*The Electromagnetic Field*) で協同していた物理学と数学の教室との密接な接触で影響されたものであったろう。一つの予備的な論文の後、Williams は長い一連の研究を行い、非極性溶媒中の極性分子の溶液に対する誘電定数の正確な測定から極性分子の双極子能率を計算した。彼は Debye の理論を用い、極性成分のモル分極率を無限稀釈へと外挿した。Jack Williams は共鳴法とブリッジ法の彼自身の装置を作り、物質は注意深く精製した。1927年半ばまでに彼と学生達は 30 数個の化合物の双極子能率を決定し、いくつかの場合その結果が本質的に非極性溶媒の選択には依らないことを示した。

彼の Leipzig の研究所が双極子能率の研究における世界の中心となっていた Debye が 1927年の春に Wisconsin で講義のコースを与え、Williams の研究を知るようになった。Williams は National Research Council の奨学金を獲得し、1927-1928年の学期間海外で過ごした。殆どは Leipzig の

Debye と一緒であった。そこにおいて、また Madison に帰った後、彼は百以上の化合物の双極子能率の徹底した研究を続けた。それらにはメタン、エタン、ベンゼン、ジフェニル、シクロヘキサンの単置換、二置換誘導体が含まれていた。それらのいくつかは Leipzig の協同者によって合成されたものであった。芳香族化合物における平面性からのずれ、立体障害の影響による結合周りの制限回転や自由回転を含めて、それらの結果は結合や置換基のモーメントのベクトル和で解析された。

1927-1928 年の Williams の海外奨学金は Copenhagen の J.N.Brønsted との 2ヶ月を含んでいた。彼のそこでの研究は強電解質の活量係数に関するもので、それは後に Madison で短く続けられた。

1929 年 Williams は誘電定数の周波数依存性 (分散) に注意を向けた。Debye は粘性媒体中で回転 Brown 運動をしている球としてモデル化した分子の回転緩和時間を用いて、極性液体のいわゆる異常分散の理論を定式化していた。何人かの研究者は、極性液体のデータからこの取り扱いによって計算した球の半径が大まかには正しいが、しばしば信じ難いほど小さいことを示していた。その理論は厳密には非稀釈の極性液体よりも非極性溶媒中の極性分子の稀薄溶液に適用できるものであったから、Williams はニトロベンゼンとニトロナフタレンを溶質に、鉱物油を溶媒に選んで研究した。それらの高い粘性が分散を到達できる周波数範囲 ( $3 \times 10^7$  Hz 以下) にするだろうことを期待してのことであった。観測された分散は、溶液粘度と見積もった分子サイズから計算したよりも約 10 倍も小さい緩和時間に相当するものだった。また、多くの場合、実験的な周波数範囲はどの周波数依存性を観測するのに十分高くなかった。Williams と彼の学生 J. Lawrence Oncley は、より大きい油分子に囲まれた小さい溶質分子の回転に対する局所的な摩擦抵抗は巨視的な粘度よりもずっと小さいことを意味するのだらうという重要な結論に達した。そして、その理論の適切なテストは、溶媒が連続体と見なされるほど十分大きいコロイドサイズの極性溶質でなされるべきであると結論した。

続いて、Williams と学生達はこの目的に蛋白質ゼイン (zein)、グリアジン (gliadin)、セカリン (secalin) を選んだ。それらは 25,000-40,000 の範囲の分子量をもち、多くのたんぱく質と違って、有機溶液で用いたものと同じ方法による誘電率の測定できる十分低い電導度を持つアルコール-水混

合物に可溶である。ゼインに対して、周波数依存性は回転楕円体の長軸と短軸の周りの回転に帰せられる二つの緩和時間に対応した。楕円体のサイズは沈降と拡散から決定した分子量と無理なく一致した。このように、このサイズの溶質分子の回転に対する摩擦抵抗は溶液の巨視的な粘度を反映した。

高分子の回転運動の解析に加えて、Williams は沈降や拡散の測定によって明らかにされる並進運動に向かった。Williams の大学院生時代に、Svedberg は Wisconsin の客員教授であり、1923 年に超遠心機の原型を思いついていた。Uppsala の彼の研究室に帰った後、Svedberg は油タービン超遠心機を完成し、数年の間にたんぱく質は多分散のコロイドではなく単分散であることを示して、蛋白質化学に革命をもたらした。1934-1935 年、Williams は国際教育委員会 (International Educational Board) のフェロウとして Svedberg と一年を過ごし、超遠心法の技術と理論を勉強した。

1932 年、Warren Weaver が Rockefeller 財団の自然科学部門のディレクターになり、物理科学の技術と方法が生物化学の問題に適用される研究プログラムへの広範な支持を推薦した。このプログラムの一つの項目が米国の大学への油タービン超遠心機の設置であった。当時合衆国には一台も無かった。財団はその場所に Williams の研究室を選んだ。実際には、Wisconsin 州の側はその基金を受けるのにいくらか本意であった。Williams の同僚の何人かは間違っ、彼がそれを歓迎しているといっ非難した。最後には、寄付は承認され、1937-1937 年巨大な速度超遠心機が Madison に設置され、同じくより小さい沈降平衡測定のための電気駆動の機械が導入された。大学の権威筋はローターが爆発する危険性を心配した。離れた地下の部屋が速度超遠心機を置くために建設され、重厚な壁で化学の建物から隔離された。これと、Delaware 州 Wilmington の Du Pont 研究所の類似の機械が合衆国にこれまで設置された唯一の油タービン超遠心機であった。

超遠心機の設置後間もなく、Jack Williams は永年関心を持っていた問題、抗体の単離と抗原-抗体反応の性質の問題を取り上げた。1939 年、A.M.Pappenheimer, Jr., が Williams の研究室を訪れ、Harold Lundgen とともにジフテリアの毒素と抗毒素の分子量を測り始め、過剰の抗原中で形成される可溶性複合体の化学量論を解析した。狙いは抗原-抗体沈澱の

Marrack の格子理論に対する物理化学的枠組みを与えることだった。以前に Pappenheimer と研究していた Mary Petermann が後で Williams の研究室に加わり、彼らは抗体の活性な原型断片を単離する仕事を行った。そのような断片の存在は Parfentjiev によって特許中に述べられていた。超遠心機で、彼らは活性断片の存在を示すことができた。しかし、蛋白質単離の現代の方法は未だ無かったから、構造の解析には時期が早かった。

第二次世界大戦中、Jack Williams は幸運にも抗体への彼の関心を追求することができる研究の仕事を割り当てられた。彼は、Edwin J. Cohn と John T. Edsall によって Harvard 大学医学部に組織された人間の血漿からたんぱく質を分離するプログラムに参加した。Williams は分離したたんぱく質のサイズと純度を測定するのに超遠心機と電気泳動を用いた。彼はすぐに抗体を含んでいる  $\gamma$ -グロブリンを再分割することに興味を持った。 $\gamma_1$  と  $\gamma_2$  グロブリンは移動界面電気泳動によって観測できた。彼は Madison の生理化学教室の Harold Deutsch、彼自身の学生の何人か、特に Robert Alberty、Eugene Hess、と Louis Gosting が加わるように協力を得た。Alberty は境界拡大 (boundary-spreading) が  $\gamma_1$  と  $\gamma_2$  グロブリンの分画中に異なる等電点を持つ抗体分子が存在することを表わしていることを示すようになった。Caltech では John G. Kirkwood が等電点に応じて分子を分離することができる電気泳動対流装置を作っていた。後に、Kirkwood の学生 Richard Goldberg が Williams の研究室に来て、抗原-抗体反応における格子形成の統計理論に関する研究を行い、超遠心機理論に対する新規の貢献を成した。抗体分画と特性決定の研究が進んでいた中で、免疫学者 Michael Heidelberger が彼の息子 Charles に会うためにしばしば Madison にやって来て、Williams の研究室の頻繁な訪問者になった。

第二次世界大戦のもう一つの仕事はゼラチンの物理化学的性質を研究することであった。それは衝撃犠牲者 (shock victims) のために血漿展開剤としての使用の可能性を評価するためであった。1944 年の短い報告「ゼラチン溶液のサイズ分布」は George Scatchard、J. Lawrence Oncley、Williams、と Alexander Brown の共著だった。Williams は高分子の分子量分布を決定するための超遠心法を開発するのに深い興味を持つようになった。戦後、彼は沈降速度法 (boundary spreading) と沈降平衡法の双方を開発した。Jack Williams はたんぱく質と合成高分子を同一の研究室

で研究するのが当然と考えた。彼は高分子の物理的性質の洞察はたんぱく質の理解に有用であり、逆もまた真で、究極的に両者は一つの分野、巨大分子の物理化学の一部であると考えられるだろうことを信じた。

大戦後 Jack Williams は超遠心法の理論と手段の改良に注意を向けた。タイミングは良かった。多数の生化学者が蛋白質と核酸を研究し始めており、超遠心法は彼らの研究にとって主要な解析道具になっていた。直接駆動の Spinco 超遠心機の開発は正確で容易に操作できる機械を供給し、多くの生化学者が分析超遠心機を使い始めた。当時、たんぱく質の分子量は主に沈降速度と拡散の実験から Svedberg の式を用いて、測定された。沈降係数を正確に測定するのは容易になっていたが、同じことは拡散係数については言えなかった。Williams 研究室の Gerson Kegles と Louis Gosting は、1880 年 Gouy によって最初に観測された干渉縞 (fringe) に対する理論を与えた。干渉縞は光が拡散界面を透過する時に見られる。Gosting はそれから液体中の拡散を高度に正確な測定をするための装置を開発していった。Oxford では、Coulson、Cox、Ogston、Philpot が独立に最外郭の Gouy 縞に対する理論を得て、拡散係数の素早い測定にそれを用いた。Louis Gosting は悲劇的な若死にまで、Williams の研究グループと密接な協力関係を保った。Gosting は Gibbs 熱力学の複雑さを説明することを楽しんだ。実験と理論の双方の問題についての彼の相談は Jack Williams と彼の研究グループにとって大きな価値があった。

1950 年代の終わりに、沈降平衡が、たんぱく質の分子量を測定する手段としての沈降-拡散に置き換わり始めた。それは、それほど以前から Williams の研究グループのメンバーではなかった Kensal Van Holde と Robert Baldwin が、超遠心法に対する微分方程式の Mason-Weaver 解を使用して、溶液の短い液柱 (short column) を用いれば 2 週間でなく、1 日で平衡に到達することを示したことで起こった。1923 年の Max Mason と Warren Weaver (二人はその時 Wisconsin にいた) の沈降平衡の古典的論文は、Madison の化学教室への Svedberg の訪問に鼓舞されたものだった。

超遠心理論の主要な進展は、1954 年の日本人ポスドク研究員 Hiroshi Fujita の到着後になされた。Jack Williams は Fujita を彼の最良の発見であると考えていた。Fujita は困難な問題に対する解析解を見出すのに著しい才能を持っていた。彼にとって新しい問題の解を見出すのに唯の 1 日し

か掛からなかった。Fujita は到着して直ぐ、長い間懸案だった問題、溶質の拡散係数の濃度依存性と拡散とが絡んだ効果が如何に沈降界面の形を決定するかという問題を解いた。彼と Victor MacCosham は中間サイズの分子に対する超遠心法の微分方程式の有用な解を得た。Osaka で教授になった後も Hiroshi Fujita は Williams の研究室を定期的に訪問し続けた。彼の「超遠心法の数学理論」はこの課題の標準的作品になった。

沈降理論におけるこれらの改良は合成高分子の研究に特に重要であった。その理由は、蛋白質水溶液に比較して、分子量の広い分布、熱力学的理想性からのより大きなずれ、溶媒として用いられる有機液体のより大きい圧縮性のためである。異なる濃度とローター速度での平衡測定から、完全な分子量分布ならびに高分子と溶媒の熱力学相互作用を特徴づける第二ビリアル係数を決定することが最終的に可能になった。

Williams の研究室で、高分子物理化学における二つの重要な発見があった。1937年、Wilbur B. Bridgeman とともに彼は 14,000 までの異なる分子量を持った Poly- $\omega$ -hydroxydecanoic acid の溶液の誘電定数を測定し、分子全体の回転に対して期待される範囲で周波数依存性が無いことを見出した。さらに、双極子能率の二乗は重合度の一次の函数であった。二つの観測はそのような線状高分子の骨格結合の周りの自由回転の存在を確定した。この概念の発展の非常に初期の段階であった。1953年、Kensal E. Van Holde とともに彼は一連のポリイソブチレンの粘度と定常コンプライアンスを決定し、当時では驚くべきことに、後者が分子量には関係せず、分子量分布に関係することを見出した。これらの発見は Williams の研究室では研究課題から外れていたのもそれ以上追跡されなかった。しかし後の理論は Van Holde の結果を説明し、他の多分散高分子やブレンドの力学的性質に関する膨大な研究を刺激した。

双極子能率の研究が終わった後、Jack Williams の名前は彼の学生やボスドク研究員の研究論文には稀にしか現れなかった。一部にはこの習慣は彼の謙虚で寛大な気質を反映したものであり、また一部にはできるだけ早く学生達を独立した研究者にするという彼の政策を反映したものであった。彼は研究能力を開発する天与の才を持っていた。彼は学生達や他の協力者達の福祉に深い関心を持っており、彼らとの接触を維持し、彼らの引き続いての経歴を助けた。

1968年70歳での引退後、Jack Williams は数年ポスドク研究者との研究を続けた。大抵は沈降平衡からたんぱく質の自己会合平衡を決定することだった。87歳まで彼は化学の建物の中にオフィスを維持し、書き物をしていた。彼は90歳の誕生日の2、3週間後1988年3月5日Madisonで亡くなった。

## 参考文献

1. “One and a half Century of Diffusion: Fick, Einstein, before and beyond” *Diffusion Fundamentals*, **2**, 1 (2005).
2. “Investigations on the Theory Of the Brownian Movement,” R. Fürth Ed., Dover, (1956).
3. Jean Perrin, “*Les Atomes*,” Paris Ed., Alcan, (1936); ジャン・ペラン 著「原子」玉蟲文一 訳、岩波文庫、(1978).
4. Brian J. Ford, “Brownian Movement in *Clarkia Pollan*: A Reprise of the First Observations,” *The Microscope*, **40**, 235 (1992).
5. “Robert Brown (botanist), *Wikipedia, the free encyclopedia*”  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Robert-Brown-\(botanist\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert-Brown-(botanist)))
6. Alastair Wood, “George Gabriel Stokes 1819-1903: An Irish Mathematical Physicist”
7. “Sir George Stokes, 1st Baronet, *Wikipedia, the free encyclopedia*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/Sir-George-Stokes-1st-Baronet>)
8. “George Gabriel Stokes,” by University of St Andrews, Scotland  
(<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Stokes.html>)
9. Leroy D. Vandam and John A. Fox, “Adolf Fick (1829-1901), *Physiologist: A Heritage for Anesthesiology and Critical Care Medicine*,” *Anesthesiology*, **88**, 514 (1998).
10. Robert L. Baldwin and John D. Ferry, “John Warren Williams,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.



## 7章 熱力学

### 7.1 Jacobus Henricus van't Hoff

van't Hoff が、両親の化学の代わりに医学を取るようにと云う忠告を受け入れなかったのは化学にとって幸運であった。<sup>1,2</sup> 両親は、医者なら相当の生活することができるだろうけれども、化学者としての生活には全く不安であった。(19世紀末においても教育について保護者としての両親の態度は今日とそれほど変わらない。) van't Hoff は、内科医の父の薬局での医薬や調合に魅せられていたことによって、かなり幼いときから化学に興味を抱いていた。

van't Hoff は 1852 年 8 月 30 日オランダの Rotterdam で生まれた。彼の父の名もまた Jacobus Henricus van't Hoff で、母は Alida Jacoba Kolff である。彼は初期の教育を私立学校と 2 年間の上級公立学校で受けた。この時までには彼は既に化学物質を使った実験をし始めていた。彼はまた数学が得意であった。好きな化学の課題を勉強するために、彼は 1869 年 Delft の理工 (Polytechnic) 学校に入り、1871 年工学の卒業証書を受けた。この期間、余暇に彼は工学士として砂糖工場で仕事をした。それは退屈であることが分かり、彼はその種の仕事をせず、科学をさらに勉強することに決めた。彼は Leiden 大学で 1 年間数学を勉強した。科学への興味に加えて、彼は自然も大いに愛した。彼はよく植物採集旅行に参加し、一人であるいはしばしば手に合う仲間と長い徒歩旅行を楽しんだ。彼の興味は科学や自然に限定されず、哲学や詩にも広がっていた。実際彼は若い日々には詩を手書きするのを試みた。Byron 卿が彼のアイドルだった。

かがくの更なる知識を求めて、1872年の秋と1873年春の間彼は Friedrich August Kekule に学ぶために Bonn に行った。そこで彼は 1862年に Alexander Butterov が示唆した炭素化合物の可能な 3次元配列について聞いた

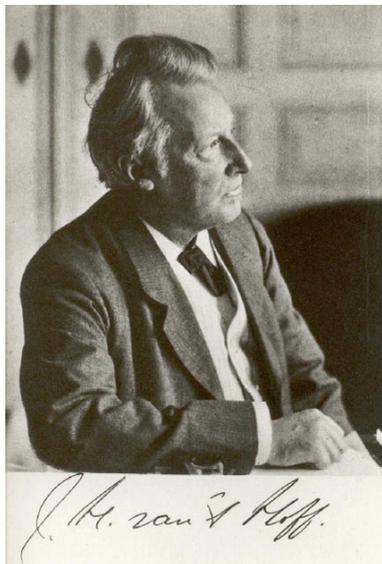


図 7.1 Jacobus Henricus van't Hoff (1852/8/30–1911/3/1)

ようである。Kekule は同じような種類の棒-球模型を用いていた。Bonn にいた間 van't Hoff は近郊の美しい山々の長い遠足を楽しんでいた。彼は Bonn から、Charles-Adolphe Wurtz と研究するために Paris へ行き、そこで Joseph Achelle Le Bel に会った。しかしながら、van't Hoff 自身の主張によると、彼はそこで光学活性は 4 つの異なった基が炭素に結合し、4 面体の角に配置されれば説明できることを、理解したけれども、4 面体炭素の 2 人の発見者はその課題について決して意見の交換はしなかった。

1874 年 van't Hoff は E. Mulder 教授の指導下で Utrecht 大学から博士の学位を得た。

1876 年彼は Utrecht の獣医カレッジの化学と物理学の講師に任命された。翌年 9 月彼は Amsterdam 大学で類似を地位を保証され、直ぐ翌年の 6 月に化学、鉱物学、地質学の教授に任命された。彼はその地位を続く 18 年間保った。

彼は 1878 年 Johanna Francina Mees と結婚し、4 人の子供を得た。van't Hoff が父と同じ名前を持っていたことは驚くべきことで興味あることであ

るが、彼の息子もまた同じ名前を持った。1884-1889年の間に彼の物理化学への主要な貢献がやってきた。彼の名声の上昇は Johannes Diderik van der Waals のような年上の重要な科学者に蔭をさすほど急速であった。

1896年、彼は Berlin 大学に名誉教授として招聘された。それはプロシヤ王立化学アカデミーの会員を伴ったものであった。毎週1時間の講義の義務があるのみだったから彼は喜んでそれを受け入れた。その条件は、医学生を含む多くの学生に基礎的な講義をし、評価する過重な仕事があり、研究時間が殆ど残らない Amsterdam とは違っていた。彼は Berlin 大学のその地位を死ぬまで維持した。

Berlin では1896年から1905年の間、Amsterdam での初期の共同研究者 W. Meyerhoffer に助けられながら、彼は海水の堆積物 (deposits)、特に Stassfurt の塩堆積物の問題を研究した。それらの堆積物は岩塩に加えてかなりの量の他の塩を含んでおり、Stassfurt や近隣の村々で多様な化学工業を起こすのを助けた。彼はそれらの堆積物についての発見を化学論文や著書として発表した。

van't Hoff が Berlin 近くの Stiglitz で1911年3月1日に結核で倒れたのは不幸であった。彼は1906年にその病気に罹ったようでサナトリウムに留まらざるをえなかった。しかし、それは研究への彼の熱意を後退はさせなかった。嘲るかのように、1908年寝たきりの間に、活性な生命における熱と仕事との関係を扱った「サナトリウムの見解」という論文を出版した。1909-1910年にはグリコシドの形成と分解における酵素の触媒としての役割の研究を出版した。それは酵素化学の始まりと信じられている。

1874年、van't Hoff は学位論文「シアノ酢酸とマレイン酸の知識に対する貢献」を提出する数週間前に、12ページの本文と1ページの図形から成るパンフレット「空間中の化学」を自費で印刷し、配布した。それは、同じ構成式を持つが反対の光学回転を与える化合物の異性を説明するためには、4つの異なる基を持つ炭素の4面体構造が必要であることを説明していた。その考えは1874年9月にオランダの雑誌に出版された。同様の概念が1874年11月に Joseph Achille Le Bel によって独立にフランスの雑誌に出版された。van't Hoff は翌年拡大版をフランス語で出版した。そ

れは、1877年 F. Hermann によって翻訳されたドイツ語版が手に入ったとき、科学界で大きな注目をあび、科学者の大御所 Johannes Wislicenus によって熱狂的に推薦された。

その提案は何人かの年上の科学者 (Ladenburg, Kolbe, Mach) による深刻な批判に出合った。それは、分子は原子が適切に配置された実際の3次元形態を持つということ、構造は単なる概念ではないという事からであった。van't Hoff はちょうど22歳、Le Bel は5歳年長で、二人とも若く、年上の科学者の見解の中で真面目に取られることに未経験であった。彼らの構造式で描かれた原子の集合としての分子の存在は当時まだ明確には受け入れられていなかった。原子仮説自身がまだ支持されていなかった。van't Hoff の立体化学と浸透圧の研究、Albert Einstein の1905年のBrown運動の論文の成功が最後には、科学界に原子や分子の物理的実在を確信させた。van't Hoff の仮説の方向での彼によって集積された証拠は強力で、それへの無視を追いやった。van't Hoff は1894年大きく拡大した第2版「空間における原子の配列」を出版した。Wislicenus が序文を書いた。

空間における化学すなわち立体化学の考えは van't Hoff の心に単独で突然起こったものではなかった。Pasteur に始まる彼以前の多くの化学者達が3次元分子構造と炭素の4面体性の考えをいくらか持っていた。光学活性化合物についての研究に基づいて、Pasteur は分子レベルでの非対称性の存在を示唆していた。しかしながら、4つの角に4つの異なる基を結合した4面体炭素のみが、非対称であり得、その鏡像に重ね合わせられず、付随する反対の光学回転を持つことを、明確に認識したのは van't Hoff と Le Bel であった。van't Hoff は更に一步を進め、エチレンとその誘導体の平面構造を提案した。それで、エチレン誘導体の異性と、2つの炭素と4つの置換基を構成する分子面に沿った対称面の存在のために光学不活性となることを説明して、van't Hoff は Le Bel を凌いだ。

その仮説にとって好ましい実験的証拠は多く、初期の抵抗はすぐに死に絶えて、当然ながら輝かしい成功を獲得した。立体化学の物語はなお成長し続けており、その分野の新しい展望が規則的に開き続けている。それは化学においてだけ重要であるのみではなく、生化学、生物学、薬の設計、分子の自己集合、など他の分野においても重要である。



図 7.2 少し若い van't Hoff

それがもたらした革命的な変化と構造化学の分野で与えた新しい方向に拘わらず、van't Hoff が得たノーベル賞は立体化学に対するものではなく、物理化学における同等の革命的発見に対するものであった。何故ノーベル委員会がこの重要な業績を除外したのかは少し謎である。1901年では、原子の物理的実在に対してまだいくらかの潜在的な反対があったせいであろうか。

1880年代初期までに、van't Hoff の関心は分子構造から分子変換へと変わった。彼は反応動力学、平衡、稀薄溶液、化学親和性、熱力学に深い興味を持った。1884年彼は「化学動力学の研究」を出版し、平衡反応への温度の効果を説明した。1885年、Le Chatelier はその関係の一般的応用を示した。それは van't Hoff-Le Chatelier 原理として知られている。

van't Hoff は反応速度定数と反応次数を得るためのグラフ的方法を開発し、van't Hoff の式として知られる、平衡定数と反応熱との関係を述べる式を提案した。彼の平衡定数に対する温度の効果の考えは Arrhenius によって1889年に更に展開され、今 Arrhenius の式と呼ばれている。Arrhenius は1888年 van't Hoff と一緒に研究した。彼らはまた動力学の分野で Ostwald とも協同した。

同じ時期 (1885 年)、van't Hoff は同僚の植物学教授 Hugo de Vries を通して、植物学者 Wilhelm Pfeffer の発見について知ることになった。それは、溶液の浸透圧の濃度と温度依存性を示すものであった。Pfeffer は以前の 1887 年に溶液濃度とともに変化する浸透圧を測定していた。Van't Hoff の鋭い知性はすぐにその秩序だった関係の意味を把握し、彼の解析的な精神は素早くその気体の法則との類似性を見出した。その考えに基づき、彼は浸透圧に対する式を導き、気体に適用できる熱力学法則が稀薄溶液に対しても同様に成り立つことを確立した。それは Arrhenius によってイオン物質に拡張された時、それらの場合に浸透圧の法則がよく成り立つためには溶液中での電解質の解離を提案することが必要になった。それは Arrhenius の電解質解離理論を導いた。この法則の結果は自然科学の分野で極めて重要である。例えば、それは多くの生物機能の基礎、凝固点降下についての Francois-Marie Raoult の結果、電解質の解離、逆浸透や化学における他の多くの現象を説明する。

van't Hoff の天才は、物理化学の基本的性質のこれら全ての発見が 1883 年から 1889 年の間のわずか数年で彼によって成されたことを考えると明らかである。彼は教授として教えねばならないという重荷の中で、それらの非常な成果を成し遂げた。実際、彼は研究のための時間が殆ど残されていないとよく不平を云い、Amsterdam を去って Berlin に移る理由の一つに挙げた。しかし、彼は本質的に理論化学者であり、それほどは実験化学者でなかったことは記しておかねばならない。彼の科学者としての偉大さは、他人によって成された膨大な量の実験的観測の中に中心的原理を見抜く人並みはずれた能力にある。それは、発表された文献から得た殆ど全ての関連する光学回転データを用いて光学活性を説明したことから明らかである。また、彼の浸透圧についてのノーベル賞受賞研究は主に W. Pfeffer、H. de Vries、Eilhard Mitscherlich の実験結果によっている。Wilder Dwight Bancroft は追悼文の中で、van't Hoff のそれについての告白を述べている。Bancroft は書いている：「van't Hoff は全人生において非常に正確な測定と云われるものを決してしなかったし、それを気にもしなかった。私は 18 年前に彼が「我々のためにその種の研究をする人々がいるのは如何に幸運なことか」と云うのを憶えている」しかし、実験家が彼の結果に隠された理論を見ることができないなら、誰もそういうこと

に対して van't Hoff をどのように非難できようか。実際、浸透圧について多くの測定をした Pfeffer も、Pfeffer がその問題を議論した Clausius も濃度や温度との関係を見ることができなかった。その一方、van't Hoff は de Vries から Pfeffer の発見を聞いたまさにその瞬間にその関係の気体の法則との類似性を見ることができた。

彼自身の研究と Wilhelm Ostwald や Svante Arrhenius のような多くの同時代人の研究から、彼は分離した化学の一分野として物理化学はそれ自身で成り立つことを理解した。Ostwald と協力して、彼は 1887 年に *Zeitschrift für Physikalische Chemie* を創設し、死ぬまで共同編集した。物理化学へのそのように多くの異常な開拓者の貢献で、彼は物理化学の父と呼ばれ、Antoine Lavoisier、Louis Pasteur、Friedrich Wöhler と並んで全時代を通しての偉大な化学者の一人と考えられている。彼は 1901 年最初のノーベル化学賞に選ばれた。

## 7.2 Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz

Helmholtz は 1821 年 8 月 31 日 Berlin に近い Potsdam で生まれた。<sup>3,4,5</sup> 父 Ferdinand は Potsdam ジムナジウムの校長で言語学と哲学の教師であり、母はハノーバー王家の婦人で、偉大なクエーカー教徒 William Penn の直系の子孫だった。Helmholtz は慣習によって学生になり、それと同時に父は彼の思考を自然現象に向けた。彼は間もなく数学の力を示したが、それは普通数学者達が受ける注意深い訓練によって育まれたものではなかった。その後の数年で、彼の注意は状況に強制されてより高い数学に向けられたと云えるかも知れない。彼の両親は貧しく、彼に純粋な科学の経歴を許すことができなかったので、彼はプロシャ軍の軍医 (外科医) になった。1842 年彼は神経節中の神経細胞の発見を告げる学位論文を書いた。これは彼の最初の研究で、1842 年から死ぬ年の 1894 年まで重要なこと無しに 1 年を過ごすことは殆ど無かった。ある場合には科学的課題に関する画期的な論文が彼のペンから産まれた。彼は 1842 年から Königsberg の生理学の教授になった 1849 年まで Berlin で生活した。Königsberg には 1849 年から 1855 年まで留まり、Bonn の生理学の教授に移った。1858 年に彼は Heidelberg の生理学教授になり、1871 年に Berlin の物理学の教授に呼ばれた。1887 年その教授職に Berlin 近くの Charlottenburg の物理工学研究所のディレクターの地位が加わった。Helmholtz は 1894 年 9 月 8 日になくなるまでそれら 2 つの地位を保った。

Helmholtz の初期の生理学の研究は Johannes Müller と一緒だった。Müller は Ernst Haeckel と Alexander von Humboldt の方向に沿った明敏な実験家、自然学者で、研究のための標本を見つけるために熱帯へ航海した。Müller はまた Schelling の自然哲学 (*Naturphilosophie*) の支持者だった。Naturphilosophie は、Schelling が、器官の各部分は全体を支えるが、生体器官の唯一の目的はそれ自身であるという Kant の主張であると取ったものから、そのきっかけを得ていた。1833 年と 1844 年の間に何回も書かれた Müller の影響力のある「人間生理学ハンドブック」は同時に生氣論、哲学、厳密な科学への彼の傾倒を示している。

厳密な実験への傾倒によって、Müller は知覚生理学の投影 (projection) 理論を論駁することができた。投影理論によれば、刺激物は直接にその応



図 7.3 Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821/8/31–1894/9/8)

答を引き起こす。すなわち、我々の神経は蝟 (wax) のように従順で、その対象物は、蝟に刻印された鍵のように、直接神経に信号を投影する。彼自身の実験室での実験と、1830 年代に Charles Wheatstone が発明した立体 (実体) 鏡によって明らかにされた両眼の視野の現象とに基いて、Müller は知覚生理学のいくつかの現象は投影理論と矛盾することを観察した。そのような現象の一つは立体鏡の両眼視野で、その中で、我々の網膜上の 2 つの像は我々が見る 1 つの像に溶け合わされる。もし像が直接感覚神経に投影されるなら、どのようにして立体視覚が可能になるのだろうか、と Müller は尋ねた。Müller はまた対象物からの像は網膜上に上下さかさまに投影されるが、我々はそれらを正しく見るという事実を引用した。投影理論はそれらの効果の説明を持っていない。

実験データに応じて、Müller は「特殊感覚エネルギーの法則」(Sinnesenergien) を造り上げた。Müller は、ラジオがある波長の音を受けるように同調されるように、各神経は特別の信号を受けるように構成されると議論した。彼はその構成を「特殊な感覚エネルギー」と呼んだ。Müller は、各網膜はそれ自身を知覚することができる、すなわち、網膜に投影されう

る点の複写すなわち網を知覚することができると議論して、立体視を説明した。Müller は眼の左と右の網膜の間には有機的な相関があることを仮定した。左の網膜上の各点は右の網膜上の一点、ただ一つの点に登録される。立体視野で見られる各点に対して、二つの網膜上の対応する点からの二つの信号は一点に投影される。

Müller の説明は網膜自身による先験的な知覚、そして先験的な理論的投影表面への二つの点の投影能力に訴える。彼は彼の理論を支えるために Kant 哲学を用いようとし、「純粹直感に近づきうる複写」によって、網膜によって知覚されうる物理的な点の先験的に複写が可能であることを Kant は述べたと議論した。

1838 年から 1842 年まで、Helmholtz は Müller のもとで医学を勉強した。1842 年から 1848 年、Potsdam で軍医として働きながら、Helmholtz は Gustav Magnus 図書館で研究するために Berlin への多くの旅行をした。これらの旅の間に、Helmholtz は Müller の研究室で研究していた時に出会った Müller の学生仲間 Emil du Bois-Reymond と Ernst Brücke と接触した。1845 年 Helmholtz は du Bois-Reymond が創設した Berlin 物理学会に加わった。その会員には Brücke と Werner von Siemens もいた。du Bois-Reymond は実験を支持するために、そして科学研究から生氣論を追放するためにその物理学会を創設した。

Helmholtz は生理学について書く際に Müller と矛盾しないように注意していたけれども、Müller 研究室や Magnus 研究室、そして後には Bonn と Königsberg の自分自身の研究室での Helmholtz の研究は特殊感覚エネルギーの原理と衝突した。Helmholtz は「標識」(sign) 理論を提案し、それによって感覚はそれらの刺激を記号化するが、それらの刺激の直接の複写ではないとした。Müller は感覚神経の生来の構成によって感覚と対象物との間の対応を説明したのに対して、Helmholtz は一連の経験、「無自覚の推定 (帰納推定)」によってその対応を造り上げると議論している。

初期の経歴において表わされた知覚の標識理論の中で、Helmholtz は心は一連の精神的調整、無自覚の帰納を行い、その経験の固有の画像を造ると議論した。Helmholtz は対象物を個別化する規範として使われる空間の位置は我々の感覚機能の解釈であり、即時の結果ではないと議論した。立体視野は、我々に単一の像として現れるかもしれないものは実際には一つ

に解け合わされた二つの像であることを示している。視覚(遠近感)は、人が月の前に指を置いた時のように、サイズを歪め得る。我々は経験を通して空間の概念を如何に解釈するかを学ぶことを Helmholtz は信じた。それは彼が空間知覚の経験理論と呼ぶものを持っていたことを意味している。Helmholtz の認識論のなかで、この理論は上述の標識理論への傾倒と共存していた。それによれば、空間の性質はただ描写の性質である。1850-1851年の Helmholtz の Ophthalmoscope の発明は彼の知覚生理学の理解に貢献した。哲学的に、Helmholtz の認識論は、描写は物理的過程で生じるが、それら対象物のコピーではなく単なる標識であるという見解に彼を傾倒させた。

Helmholtz はそれらの現象における Hermann Lotze の理論に鼓舞された。Lotze にとって、空間的に離れた神経端からの感覚は空間の意味が学ばれる様々の特定の位置付け(Localizeichen)に対応する。私の指の様々の感覚は元来相関がないが、「私の指」という概念によってそれらを互いに関係づけることができる。それは全ての感覚のデータを含む精神的位置付けの役に立つ。知覚空間は全ての可能な感覚を互いに関係づける一般的な位置付けである。Lotze の理論の有用性は、全ての心理的感覚が精神的概念上に直接地図化され、空間でさえ言葉に馴染む感覚データの解釈を構成する道具になることである。

Helmholtz の知覚生理学の解釈によると、感覚の質は我々の神経系にのみ依存し、我々は同じ対象物の変らない継続した感覚の印象を知覚することを通して、空間秩序の知識を獲得する:

「我々の指を一つの対象物の上で動かすことによって、我々はその印象がそれら自身を表わす連鎖を学ぶことができ、それらの連鎖はどの指を使うかに係わらず不変である。そのように対象物の空間配置の知識が得られる。それらのサイズに関する判定は対象物表面の部分あるいは点と我々の手との調和、あるいは網膜像の部分あるいは点と網膜との調和の観察から出てくる。少なくともある経験を持った個人の心のなかの考え独特のある奇妙な結果が、物について読み取られた空間秩序は感覚の質が我々の動いている感覚器官によって示される連鎖の中に由来するという事実から出てくる。それは赤かったり緑だったり、冷たかったり暖かかったり、香りがあったり味を持ったりするように見える。それらの感覚の質は我々の神経

系にのみ属するもので、我々の周りの空間の中に広がるものではまったくない。しかしながら、こういうことを知っていても、幻影（錯覚）は終わらない、というのはそれは一義的な基本的真実であるからである。幻影は単純に初めから空間秩序の中で我々に与えられている感覚そのものである。」

相対的な空間位置の判定の具体的な例として、Helmholtz はペンを指で掴む場合を与えている。各指はその指と相対的なペンの位置のみを感じるから、人はペンの感覚からそれが一つの位置にあるということを直接述べることはできない。ひとは、空間中で離れた2つあるいは3つのペんに指が触れたとしても正確に同じ感覚を持つだろう。そのペンが一つの位置にあるという信念はただ、指が互いに十分近く一つのペンのみが指の間に合うという知識に基いている。Helmholtz は述べている：

「皮膚の二つの違った部分が同時に触られる時、二つの異なる感覚神経が興奮するが、それら二つの神経の間の場所の隔たりは触れている二つの部分を区別すべきものとしての我々の認識、続いて二つの異なる対象物を心に抱くことに対する十分な根拠ではない。実際、その着想は状況によって変わるだろう。もし我々が二本の指でテーブルに触り、それぞれの下に砂粒を感じるなら、我々は二つの離れた砂粒があると想像するだろう。しかし、もし我々が二本の指を相対するようにしてその間に砂粒を置いたら、我々は前と同じ二つの神経に同じ接触の感覚を持つかも知れない。しかし、その状況では我々はただ一つの砂粒があると想像する。この場合、指の位置の我々の意識は精神が到達する結果に明確な影響を持っている。異なった感覚神経の間の位置の解剖学的区別を助けるものは何だろうか。ここで述べたような場合に空間における隔たりの観念を作り出すのは何だろうか。」

Helmholtz は空間中の隔たりのような感覚の性質は二つの知識源、一つは経験、もう一つは我々の感覚器官の性質からのよく基礎づけられた推測（帰納）であることを信じた。彼は我々の生理が知覚において働く方法の知識は空間の性質を説明するどの認識論にとっても本質的であると信じた。Helmholtz は知覚生理学に関して我々がより多く知れば知るほど、我々の経験に関する推定はより正確になっていくだろうと議論した。例えば、ペンを掴んだり砂粒に触れたりしている人の場合、我々の感覚器官、この場合指の神経末端、の位置を勉強することによって触っているものが単一の

対象かどうかには我々は気づく。深さの知覚や距離の知覚に必要な空間位置の区別に我々が気づくのは学んだことであり、生来のものではない。

Helmholtz の初期の研究において、知覚空間は空間中の対象物に関する我々の向きの精神的一般化である。我々は、対象が動く時、あるいは我々が対象に相対的に動く時、どの空間的性質が変わらないかを見出すことによって空間の一般的性質を学ぶ。対象の空間的に適切な性質はその対象が位置を変えても、あるいは我々が対象と相対的に位置を変えても不変に留まる性質であるという洞察は Helmholtz の後のトポロジーの研究の基礎である。

Helmholtz の「生理光学ハンドブック」の第 3 部で、Helmholtz は知覚生理学における生得論と経験論の区別を描いている。

世得論と経験論の論争における最も意義深い出来事は深みと浮き彫り (relief) の知覚を如何に説明するかにあった。投影理論は、精神が視覚刺激を解釈し、眼から供給された二つの平面画像から結合した浮き彫り画を造ると説明した。1867 年までに Helmholtz は標識理論を展開した。それによれば空間中の深みや間隔のような現象の脳の構成は学習による。この説明は Helmholtz に Ewald Hering との衝突をもたらした。

Helmholtz と Hering との論争はいくつかの特別な場合、特にいわゆる *horopter* 問題を如何に説明するかに焦点が当てられた。*horopter* とは、眼が一点に焦点を合わせるとき、その眼が対象から等距離にあると見る点のセットである。眼は *horopter* 上で、それらが眼から一定の距離の直線状にあるかのようにそれらの点を見る。しかしながら、実際には *horopter* 線は曲線である。すなわち、現実にはそれらの点は眼から等距離ではない。

単一の対象を見ているとき、対象上のいくつかの点は両方の眼を刺激するが、いくつかの点は左目あるいは右目のみを刺激する。脳はそれらの共通のあるいは別個の刺激を単一の像に溶け合わせる。脳が二つの別個の像をひとつに纏めなければならない事実は *horopter* 効果を説明する。眼が一点に焦点を合わせるとき、右目と左目は対象に関して脳に異なった入力を与える。脳は焦点の対象として、眼から等距離にあるようにそれらを表わして右目と左目からくる入力を補正する。

Hering と Helmholtz は経験的な結果すなわち *horopter* 自身についてはなく、如何に脳が二つの像をひとつに解け合わせるのかに関して同意し

なかった。Helmholtz は脳は網膜の像を無意識の推定という過程で調整すると議論する。Helmholtz は子供の脳は子供が成長するにつれて刺激に対応することを学習すること、脳は無意識に固有の経験を作り出すように、例えば網膜の不釣り合いを解けあわすように、順応することを強く主張した。

Hering は対象を単一の空間的に秩序だった像として経験する能力は人間の子供に生まれつきの特性であり、獲得されるものではないと議論した。彼は、子供達が二つの像を一つに解け合わせる能力を持って生まれずにしても、その能力は大人に成長するとき開発されるもので、学ばれるものではないと主張した。Hering は深みの知覚と立体視は、走ったり息をしたりするのと同じように、固有の肉体的能力であり、経験から学ばれるものではないと議論した。実際、Hering にとって、脳や眼が異なった入力にする順応は心臓の拍動のように自動的で不随意であった。Helmholtz は、深みの知覚と立体視は対象に対する逆の調整（順応）を要求し、それゆえ、鏡の前で髭を剃るように経験を通して学ばねばならない能力であると主張した。鏡の前で髭を剃る時、人は鏡の中での右と左を区別し、鏡の中での見かけの動きは人の体に感じる動きと反対であっても鏡に対して顔の右側あるいは左側を正しく向けるように学ばねばならない。Helmholtz は、鏡の前で髭を剃る能力は生まれつきではあり得ず、それは、鏡の中で反射は反転していることが人の環境の性質への経験による順応を要求するからであると主張した。Hering と Helmholtz の間の論争は、生理学と心理学における経験論と生得論の間のより大きな論争をもたらしたので、意義深くなった。

「生得論は、誕生の時に有機体は視覚刺激で色つきの領域の空間的に組織された列を経験するだろうという見解である。鍵となる観念は空間的に組織された視覚経験を持つための特性が生まれつきであり、学習の過程によらないということである。生得論者は、生来授けられた有機体が誕生時に視覚上の能力をがあるだろうことを主張する必要はない。というのは視覚系は更なる成長の期間の後でのみ機能するようになるからである。経験論は、大人の視覚経験に見出される少なくともいくつかの空間組織は学習の結果であるという見解である。それは空間に組織された視覚世界を読み取る能力のいくつかあるいは全部は獲得されると主張する。」

Otis と Turner は Hering と Helmholtz の間の最も著しい差は経験事実



図 7.4 Hermann von Helmholtz 男爵

についての彼らの異なった説明にあるのではないと論じる。むしろ、その差は認識論の結論における彼らのより高度の傾倒にある。もし Helmholtz が正しいと、我々の対象の性質への接近は直接ではなく、造り上げられる。初期の標識理論の中で、Helmholtz は対象の知覚は蠟への鍵の刻印のような印象ではなく、名前が人の表象であるように、それら対象の標識の記号であると論じている。Helmholtz にとって知覚と対象との間の類似の程度は、書かれた名前とその名前が与えられた物理的な人物との間の類似の程度のように遠いものかも知れない。Hering は Helmholtz の標識理論のそれら認識論的結論に精力的の反対し、我々は知覚において現実の対象に直接の接近方法を持っていると論じている。

Helmholtz 理論が Kant 主義に何処まで影響されたかの問題については論争がある。

Helmholtz は生理学について書いていたときでさえ、彼の数理物理学者としての自然な使命感は明らかであった。Helmholtz は標識理論の議論を支えるために、哲学的あるいはもっぱら経験事実のみよりも数学的な論法を用いた。彼の経歴を通して、Helmholtz の研究は二つの先入観、すなわち具体的な例と数学的理由、で特筆される。知覚生理学における Helmholtz の初期の研究は、如何に人類は対象物間の空間の関係を読み取るかの具体例を彼に与えた。それらの例は、計量幾何学と知覚している対象物間の空

間関係との相関関係を例証するのに有用であっただろう。後に、人類の知覚についてのその具体的な科学の経験を、幾何学への Riemann の方法に対する問題を述べるのに用いた。

Helmholtz の幾何学の研究は 1868 年に公けにされ、その年 Heidelberg で「幾何学の現実的基礎」を講義し、「幾何学の基になる事実について」を出版した。後者は、Helmholtz を一義的に実験科学者、生理学者と考えていた大学大衆を驚かせた。しかしながら、Helmholtz は当初は物理学者になることを望んでおり、生理学における研究の数学的結論に常に敏感であった。Riemann の研究は数学、物理学、さらには哲学に革命をもたらした。Helmholtz はその革命の広がりを認識した最初の人だったろう。実際、Helmholtz は、少し後だったろうけれども、Riemann の結果と類似の結果に至ったと述べた。Riemann の「幾何学の基となる仮説について」の出版は Helmholtz 自身の結果はオリジナルとは見なされないことを意味したけれども、Helmholtz は自分の評論の中で、Riemann ほどの卓越した数学者がこれらの問題を注目に値すると考えたことに満足していると言っている。1868 年の評論 (論文) で、Helmholtz は幾何学の基礎への Riemann の方法に対して寄与していると自分自身を見ていた。Helmholtz の表題「幾何学の基となる事実について」は Riemann の「幾何学の基となる仮説について」に対する意図的な反響 (echo) である。表題の違い、事実と仮説、は Helmholtz の方法が Riemann のものに非常に似ていたけれども、少なくとも一つの意味上の違いがあることを強調している。

「幾何学の基となる仮説について」で、Riemann は空間全体のトポロジー的性質を如何に決定するかに焦点を当てた。トポロジー的性質は変換の下で不変である、すなわち、図形が動く時同じに留まるといふ、図形の空間的性質である。Riemann は、 $n$  次元空間、すなわち、 $n$  個の連続で独立に変化する大きさの空間は一定の曲率を持っていることを証明した。しかし、それは全ての空間図形がそれらの形を変えずに空間の何処にでも移動したり回転したりできるという仮説、いわゆる「自由易動公理」の下でのみのことである。天文学の場合に対して、Riemann は観察する：

「物体が空間に独立に存在すると仮定するなら、曲率の尺度は全体的に一定であり、天文学測定から、曲率の尺度は 0 とは区別できないということが出てくる。しかしながら、もし物体が空間に独立でないなら、大きい

塊の間の関係から無限に小さい塊の関係を推論することができない。その場合、空間のどの測定しうる部分の全体の曲率は0とは区別できないとすれば、3次元でのどの与えられた点の間でも、曲率の尺度は任意のランダムな値を持ちうる。」

物体が空間に独立に存在するという仮定は、物体の性質が動いている時に不変に留まる場合のみ正しい。すなわち、物体が場所を変えるなら、それは運動であり、その物体がどの違った場所でも同じ性質を持ち続けるならその性質は変換の下で不変である。Riemannは続けて述べる：この仮定なしに天文学上やその他の測定の基礎である比較の単位、2点間の最短距離としての光線や距離測定の基礎としてのメートル棒のような剛体、は正しい測定を基礎付けられる不変の性質をもはや持たない。

「幾何学の基となる事実について」のなかで、Helmholtzは関連するが異なった問題を調べている。彼は、幾何学は我々が図形を互いに比較し、それらを測れない限り不可能であること、そして我々が測っている図形の少なくともいくつかの性質がその図形が動く時に変化しないということがない限り測定は不可能であることにRiemannに同意していた。そのような運動に対して成り立たねばならない幾何学の最も一般的な公理は何か、図形の空間的性質を保存する運動は可能であるか、Helmholtzは尋ねる。

Helmholtzはそれらの不変の性質を説明する剛体運動の考えを提出している。剛体運動は対象物の一組の性質を保存する運動である。例えば1つの球が垂直な中心軸の周りに回転する時、その運動は $x$ 軸、 $y$ 軸の周りの球対称を保存し、それゆえその特別な変換(回転)の下でそれらの対称は不変である。ある与えられた対象は変換の下で不変に留まる一群の性質と変化する一群の性質とを持っているかも知れない。すなわち、対象がある方法で動く時、それらは1つの軸の周りの対称を拡張したり失ったりするかも知れない。Helmholtzの研究の出版後、Sophus Lieは剛体運動は群を形成すると論じ、剛体運動の組を数学的群論の言葉で記述した。

Riemannが空間の一般的な性質を記述しようとしたのに対して、Helmholtzは我々の対象物の経験的な測定を説明できる最も一般的な幾何学の公理は何かと尋ねた。それらは観測される剛体運動を保存し、幾何学の基礎となる系を与える公理となるだろう。Helmholtzは幾何学のどの系(Euclidean、Lobachevskian、Riemannian)も仮定の下で可能であるという問題を研究

した。ここでは Helmholtz は初めに誤りを犯しており、ユークリッド幾何学のみが我々の現実の物理的測定を説明できると論じている。1869年4月、Eugenio Beltrami は、Lobachevskian 幾何学は我々が擬似球に住んでいるという仮定の下ではその仕事に適当でありうることを、手紙で Helmholtz に指摘した。Helmholtz は即座にその点を是認した。1870年の「幾何学公理の起源と意味について」の中で、Helmholtz は非ユークリッド幾何学は可視化できるかどうかの問題をずっと詳細に研究している。この評論(論文)は「幾何学の基となる事実について」よりも広く影響を持った。

1841年から1842年の間に、Helmholtz は Berlin での Johannes Müller との研究を終えた。Müller の実験科学の是認は彼の自然哲学 (*Naturphilosophie*) 特に生氣論への傾倒と実用的に衝突をしていた。生氣論者の理論によると、生体中に存在する力学的、物理的力に加えて、体の部分を組織としてともに働かせる生氣力 (vital force) がある。運動量 (momentum) という言葉はその信念を例証する。19世紀の初め、Ernst Heinrich Weber は、いわゆる生氣力 (vital force) は実際物理的力であると論じ、19世紀生理学の最も強調すべき問題はいわゆる生氣力を物理学の言葉で説明して生氣論を追放することであると論じた。少なくとも一つの説明によると、Müller は Weber の見解は彼自身の傾倒と矛盾していることを知っていたけれども、彼は彼の研究室で研究していた、Helmholtz、Emil du Bois-Reymond、Rudolf Virchow、Ernst Brücke らの学生への問題を設定するのに Weber からきっかけを得た。1843年、自発発生に反対する Justus von Liebig の反生氣論者の議論を支持して書かれた Helmholtz の最初の論文「醗酵と腐敗の本性」を Müller は自分自身の雑誌 *Müller's Archiv* に出版したことは、この見解を支持する証拠である。

1842年に医学の学位を得た後、Helmholtz は1843年から1848年まで Potsdam で軍医として働いた。しかし、彼は Gustav Magnus の研究室で研究するために Berlin へ度々旅行し、他の Müller の以前の学生達や Carl Ludwig と話をした。上述のように、1845年 Helmholtz は Berlin 物理学会に加わった。それは生氣論を早急に駆逐する意図で du Bois-Reymond と Brücke が創設したものだった。1845年にはまた、Helmholtz は5ヶ月間軍医としての仕事を離れ、資格試験を受けた。彼は時間を使って Berlin

の研究室で研究し、生気論への Weber や Liebig の攻撃の結論に焦点を当て続けた。

Liebig は有機体の代謝は全ての熱と力学エネルギーを作り出すかどうかという問題に注意を集中していた。もしそうなら、それらの現象を説明するのに生気力に訴えることは皮相的なことになるだろう。電流を用いた蛙の筋肉の実験を通して、Helmholtz は、蛙の筋肉が生産する熱は代謝と筋肉の作用によって説明されることを示した。彼はその結果を 1845 年に Müller の雑誌に論文「筋肉活性の間の代謝について」で発表した。1845 にまた Helmholtz は力が力学的手段で説明されるかどうかという問題はもっと一般的な応用を持っていることを悟った。生体に動力を与える無尽蔵の生気力があるとする生気論の先入観は何人かの研究者達を、力学的か否かによらず、無制限に機械に動力を与えうる無尽蔵の力がある（「永久機関」）という断定に導いた。その認識は 18 世紀の数学解析の古典、Euler、Bernoulli、D'Alembert、Lagrange についての Helmholtz の研究によって促進された。Helmholtz が後に注釈したように、18 世紀末までにそれらの数学者達は力学的な力によって駆動される永久機関は不可能であることを確立していた：

「全ての純粋に力学的な、すなわち動力に対して、全ての我々の機械や道具は力を発生させるのではなく、単にそれらに自然の力、落下する水、風、あるいは人や動物の筋肉によって伝達される力を生じさせるだけである。この法則が前世紀の偉大な数学者達によって確立された後、純粋な力学的力のみを利用する永久機関は血迷っているか悪い教育を受けた人々によってのみ探し求められた。」

しかし、熱、光、電気、磁気などの非力学的な力についてはどうだろうか。Helmholtz が、永久運動を探す代わりに、非力学的力の特性の問題を調べ始めた時、彼は、永久運動が不可能であるなら自然の力の間に成り立たねばならない関係とは何だろうかと尋ねた。

1847 年 7 月 23 日、Helmholtz は物理学会で、「力の保存」の講演をした。Helmholtz が用いている力は現代のエネルギーに相当する。Helmholtz の講演はその学会でよく受け取られたけれども、Helmholtz はそれをパンフレットとして出版することを余儀なくされた。Poggendorff があまりにも推論的である (speculative) として彼の *Annalen* への掲載を却下したから

である。

その評論の中で Helmholtz は彼の結論を次のようにまとめている:

「このメモに含まれている提議の演繹は二つの格言のいずれかに基いているかもしれない。すなわち、何であれどのような自然の体の組み合わせによっても無限量の力学的力を導出することは可能ではないという格言か、あるいは全ての自然の作用は究極的に引力あるいは斥力と云われ得るもので、その強さは力が作用する点の間の距離にのみ依存するという仮定のいずれかである。これら二つの提議が同一であることはこのメモの初めに示されている。」

Helmholtz は、全ての自然の作用はある距離にある普遍的作用によって説明されうることの証明は永久運動の反証と等価であると論じる。

1842-1843 年、Robert Mayer と James Joule がエネルギー保存原理を定式化した。彼らの研究は粒子の質量かけるその速度の二乗  $mv^2$  の保存を主張した。更に Joule と Mayer は熱と力学的仕事が相互変換できると論じた。Helmholtz は Joule の研究に頼って 3 つの結論を得た:

「力の保存原理は、もし作用している力が時間と速度に依存しないなら、系から手に入る最大量の仕事はある決まった有限量であるということの意味する。…」

Helmholtz の主な考案は二つの分野を統一し、ポテンシャルエネルギーを力学の中に組み込むことを予期させるものであった:

「解析力学の伝統においては活力 (*vis viva*) の保存が強調され、機械工学の伝統では仕事の保存が強調された。対照的に Helmholtz はその二つの等価性を強調した。意味における真の移行がもたらしたのは *Spannkraft* という語句の導入だった。張力に対して、我々は仕事の概念から程遠く、ポテンシャルエネルギーの概念に非常に近い。」

Helmholtz の研究はパンフレットの形でドイツ語で出版されたけれども、英国の科学者に素早く取り上げられて殆ど即座に英語に翻訳されて出版された。Helmholtz の研究は英国の科学者、哲学者のサークルで素早く知られるようになり、その二つの分野における彼の影響を継続するのに貢献した。

Helmholtz は、Joule、Newton、Bernoulli、Rumford を含む以前の科学者達が様々な形でエネルギー保存原理に到達していたことを評論の中で認

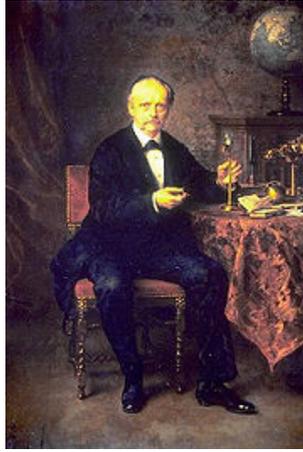


図 7.5 実験道具と Hermann von Helmholtz 男爵

めた。力学の歴史において、Ernst Mach は、ある形の Helmholtz の原理は歴史上の殆ど全ての優秀な研究者に知られていたと論じる。エネルギー保存についての道しるべ的研究の中に、Thomas Kuhn は 1830 年代からの Joule、Mayer、その他の研究を挙げ、熱と仕事は互いの間で定量的に置き換えらること、それは Helmholtz の原理の重要な成分であると論じた。Kuhn は、エネルギー保存原理の発見は一つの原理に対して何人かの科学者がともに実験的、概念的枠組みを置いた場合であると論じる。

Kuhn は Helmholtz がその原理を定式化したと主張する。Robert Purrington は、Kuhn に従って、力の全量はどういうわけか一定であるかも知れないが、それは必ずしも力や運動量のベクトルの性質をスカラーのエネルギーと区別する可能性を意味しないという広く持たれている直感があった、と見ている。「哲学序説」のなかで、Helmholtz 自身は、その評論の中の彼の仕事は新しい実験事実や完全に新しい原理を発見することではなく、むしろ「眼に見える作用」からその現象の「未知の原因」を「臨時的法則」に従って説明することであると論じている。

「科学の問題は、初めに自然の特別な過程に言及する法則を探すことそして推論から一般規則を探すことである。それらの規則、例えば光の反射や回折の法則、気体の体積に関する Mariotte と Gay-Lussac の法則、は

明らかに、それらに属する様々の現象が互いに結び付けられる一般的考え以上のものではない。それらを見つけ出すことは我々の科学の実験部分の任務である。反対に、理論部分はそれらが呈示する眼に見える作用からその過程の未知の原因を導き出そうとすることである。それは臨時の法則に従ってそれらの過程を理解しようとするのである。」

1857年、Helmholtz は「渦運動を表わす流体力学方程式の総体について」を Crelle の雑誌に発表した。Königsberger はその評論は第一級の数学者であることを証明する天才の研究であると見なしている。

Helmholtz は流体運動を記述する Euler や Lagrange の以前の数式について知っていた。Euler の式は流体を連続体あるいは場として扱った。一方 Lagrange の定式化はそれらを個別の粒子として扱った。Helmholtz は摩擦が流体の運動を著しくは変化させない流体の流動の式を与える Euler の式を取り上げた。Lagrange は、Euler の式は一般的な保存則の仮定でのみ働き、粘性力は保存的ではないから、流体の摩擦がその運動を変える粘性流体に対して Euler の式はうまくいかないと述べた。

「力の保存について」の中で 10 年ほど前に保存則を定式化していた Helmholtz はこの時点でその分野に入った。Helmholtz 自身の研究はポテンシャルの観念を流体運動に適用することに集中した。しかし粘性力はポテンシャルを持たない。Helmholtz は粘性力そのものを無視するだけでなく、ポテンシャルに訴えることなしにその問題を再定義することに決めた。彼は小さい領域の流体の渦をその領域の平均的回転あるいは円運動として定義した。その領域の境界上の各点における回転はその領域の面積で分割され、それは流体の速度の回転 (curl、カール) として数学的に記述される。単一の点における流体の渦度はベクトル量である。Helmholtz は更に二つの理想化を導入した。渦線は流体中の一点の渦度ベクトルに対する接線である。流体の一つの領域の境界上に渦線を引き、各線の周りの領域を無限に小さくすると、それらの線は渦線条 (vortex filament)、渦巻き (vortices) と呼ばれるものに収斂する。

Helmholtz はこれらの観念を用いて流体力学における 3 つの定理を証明することが出来た:

1. 元々渦 (回転) から自由である流体粒子は渦から自由なままである。

2. 渦線上の流体粒子は渦線上に留まり、それゆえ渦線は流体とともに動く。
3. 過度の強さは渦線の長さに比例する。

これらの法則は、Helmholtz のオリジナルから僅かに修正されたけれども、いまでも流体力学で使われている。Helmholtz の流体力学の研究は、彼の式が理想流体、すなわち粘性のない、完全連続体である流体を要求していることで、哲学的に意義がある。Helmholtz の式は物理学における数学的理想化の規範的例である。

1863 年 Bonn の生理学教授 Helmholtz は「音楽理論の生理学的基礎としての音調の感覚について」の中で、音波、音響学、音楽理論の開拓的研究を出版した。その中の最も意義深い発見の一つは開いた円筒管の中の音の振動の正確な数学的記述である。Helmholtz は我々が通常の生活の中で経験する雑音の記述から始めている：

「我々は、一般に雑音は素早く交替する異なった種類の音の感覚を伴っていると受け取る。例えば花崗岩の敷石上の馬車のガタガタいう音、瀑布のはね音、海の波濤、風で葉っぱがカサカサいう音を考えなさい。」

それらの雑音の素早い交替を成分の振動に分解して解析するために、Helmholtz は「Helmholtz 共鳴器 (resonator)」を組み立てた。Helmholtz は空のコルク栓を取ったワインボトルの底を取り除いて、底に膜を広げ、その膜をバンドで固定することから始めた。それから彼は端に少量の蠟を着けた一本の糸をそのバンドから吊るして膜の中ほどからぶら下げるようにした。糸が弾かれた時、ちょうど撥が太鼓を打つように蠟の塊が膜を打つ。実験事実と数学的理由に基いて Helmholtz は、膜がその厚みとサイズに応じて最も高い周波数で振動する音調である単一の音調、主調音があると論じている。実験を行うことによって Helmholtz は様々の膜の主調音を区別することができた。彼が音楽あるいは雑音を奏する時、膜の振動は音の振動成分を明らかにした。

Helmholtz はガラスあるいは金属の球あるいは円筒から成るもっと洗練された共鳴器を作ることを考えていた。その共鳴器は狭くて小さい空孔を一方の端に持ち、他の端には円形の開口を持つ。Helmholtz はその小さい

端に少量の熱い蠟を置き、それを冷まし、それからそれを彼の耳の中に挿入した。そのような共鳴器の主調音はそれ自身の構成と共鳴する耳の振動によって決定される。もし共鳴器と耳の主調音以外の音が奏でられるなら、聞き手は弱められた音を雑音を聞くが、もし共鳴器に相応しい音調が鳴っているならそれは最も力強く耳の中に鳴り響く。共鳴器を用いることは実験者に、まず共鳴器の主調音、適切な音調を決め、それから共鳴器を用いて音楽か雑音のどちらがその音を含んでいるのかを決定することによって、音楽あるいは(すなわち)通常雑音の振動成分を区別することを可能にする。

Helmholtz の典型的なことは、彼が音響学について研究していた時でさえ、音波についての彼の研究はもし数学的理論付けと実験で補間されるなら、関連する波動現象に適用できると認識していたことである。電気力学の最近の研究は電気が波動現象であることを支持した。1845年 Faraday は電気現象と磁気現象の間の関連性を示した。1856年 Wilhelm Wever と Rudolf Kohlrausch は電荷の電磁気単位と静電単位との比を発見した。もし Helmholtz が円筒管内の音の振動を記述できていれば、彼は同様の式が環状境界の周りの電気波の運動を記述するのに成功するだろうということを理論づけていたであろう。

1861年 Helmholtz は Heidelberg の自然歴史医学学会で「電荷分布の問題の変換の普遍的方法」という講演をした。Helmholtz は、Liouville への手紙で、William Thomson (kelvin 卿) が彼が得たのと同じ結果を得ていたことに気づいていなかった。しかし直ぐ後で彼はそれを告げられた。1855年に Kelvin と会い 1856年から彼と通信していた Helmholtz は 1862年の Heidelberg 学会の紀要 (Transaction) の Kelvin の先手権を認め、Kelvin に円環縁の電荷分布についての彼の結果を公表する意図があるかどうか尋ねる手紙を書いた。Kelvin は彼自身の結果で答えた。1861年と 1864年の間に James Clerk Maxwell が光はエーテル中の電磁波であるという仮説を出した。1864年 Helmholtz は英国へ旅行した。その旅行の間に Helmholtz は Kelvin、John Tyndall、George Stokes、James Joule、Michael Faraday、Thomas Huxley、Thomas Graham、Max Müller、Maxwell に会った。彼は Graham の研究室、Maxwell の研究室、Kelvin の研究室を訪問した。1860年代の終わりまでに、Helmholtz は英国における新しい電気動力学

理論の実験的ならびに理論的基礎の十分な情報を得ていた。

1870年、Helmholtzは「電気動力学理論」「静止した伝導体中の電気の運動方程式」の最初の部分をCrelleの雑誌に出版した。その中でHelmholtzはMaxwellの研究を支持したが、Wilhelm Weberの電気動力学方程式を、Weberの式は1847年のHelmholtzの保存則に矛盾する無限の運動エネルギーを仮定していることを追及して、批判した。WeberとHelmholtzは1870年代を通してその問題を論争した。次の数年に亘って、Helmholtzは「電気動力学理論」の更に二つの部分を出版し、その中でWeberに應對し、光はエーテル中の電磁波であるというMaxwellの主張を支持し続けた。HelmholtzとWeberの論争は1880年代の終わりまで決着に至らなかった。その時にはエーテル中で離れた粒子間の作用で電磁力を説明することが場の理論への道を開いた。

1880年HelmholtzはBerlinの物理学研究所のディレクターになった。1881年から1884年の間にHelmholtzは熱力学と化学過程とを記述するためにエネルギー保存則とMaupertuisの最小作用の原理とを如何に結合するかという問題に挑戦した。

19世紀に亘って、最小作用の原理の応用は物理の問題への解析動力学の方法を支配した。Lagrange力学は時間に亘る粒子系の軌跡を、系のLagrange方程式を解くことによって決定しようとした。それらの方程式は最小作用原理を用いて定式化されている。Lagrange形式において、粒子系は時間に亘っての作用を最小化する経路に従う。Lagrange方程式はデカルト座標系と同様に極座標系の系へも容易に適用できる。それがLagrange形式が19世紀中専ら採用された理由である。

Lagrange形式は粒子の力学系にうまく採用されるのに対して、それは、非常に多数の分子についての計算を含むエネルギー移動の評価には十分適していない。Hamilton形式がその仕事にもっと適している。Hamilton方程式はまた系における作用を評価するが、系の要素の運動量総体の和を用いる。最も単純な場合、Lagrangianは粒子の速度を取り扱うが、Hamiltonianは粒子の運動量を扱う。Hamiltonianは作用の初期と最終状態を与える任意の経路に亘っての函数の最小値を与える。そのように、Hamilton形式は系のとる経路を数学的な決定を与える。



図 7.6 Berlin の Humboldt 大学前の Helmholtz 像

系の運動量の Hamiltonian 表現は Legendre 変換を用いて Lagrangian から導くことができ、逆も可能である。実際、Hamiltonian はどの与えられた系に対してもちょうど Lagrangian の Legendre 変換である。それらの形式は等価であるが、熱移送の場合を含めて、Hamiltonian が優れているいくつかの場合がある。

1882 年 Helmholtz は Berlin アカデミーで「化学過程の熱力学」という講演をした。Helmholtz の講演までは、化学反応は化学物質の間の化学力あるいは親和性によって説明されてきており、化学反応の間に発生する熱で定量的に測られていた。Gustav Coriolis は 1821 年に力と距離の積として仕事の観念を明確にし、その観念は 19 世紀末までに共通して用いられるようになった。Helmholtz は講演で、親和性は化学反応で発生する熱で与えられるのではなく、むしろその反応が逆に行われる時に作り出される

最大仕事によって与えられることを立証した。しかしながら、動力学エネルギーと力学エネルギーはあらゆる場合に熱に変えられうるのに対して、限られた場合にのみ熱は動力学および力学エネルギーに変換できる。そこで、熱を含む化学過程を記述する方程式は常には逆転させられない。それらは Legendre 変換が適用できない状況であり、それゆえ Hamiltonian はその系に対して決定されえない。

特に、変数として熱を含む系に対する方程式は変数としてエントロピーを含む。エントロピーは便利でない変数で、人が温度、圧力、体積を把握するようには把握できない、制御が難しい定数である。Legendre 変換は研究者がエントロピーを含む式を、温度、圧力、体積の項でのみ表わされた式に変換することを可能にする。その Legendre 変換は特定されたある条件の下でのみ正しく適用されうる。

Helmholtz は熱とエントロピーを含む場合を説明するために「自由エネルギー」の観念を提案した。Helmholtz 自由エネルギーは  $F = E - TS$  で提議される。ここで、 $E$  はエネルギー、 $T$  は温度、 $S$  はエントロピーである。自由エネルギーの式は、熱とエントロピーに独立である量  $F$  を生じる。 $T$  や  $S$  でなく  $F$  を含む多くの式は完全に可逆であり、そこで Helmholtz の研究は Hamiltonian の多くの化学過程への適用を許した。Helmholtz は理論化学に対するただ一人の貢献者でもなく最も重要な貢献者でもなかったが、彼の 1882-1883 年の熱力学理論は、新しい理論化学の多くが頼る開拓者的研究であった。

1870 年代末までには、電気動力学の実験的基礎は確立されていたが、数学ははるかに遅れていた。Arnold Sommerfeld は彼の訓練の記憶の中で、1880 ねんだいまで、電磁気現象の法則は Newton の法則の Coulomb の一般化、Bio-Savart の一般化、Weber の一般化の扱いにくい拡張を用いて作り上げられていたことを思いだしている。さらに、電気と磁気の現象の間の関係は確立されていたけれども、電磁波の存在に対する直接的な経験的証拠はなかった。

1870 年から 1887 年の間 Helmholtz は Berlin の物理学研究所のディレクターであった。1880 と 1933 年の間に、Helmholtz の学生 Max Planck、Albert Einstein、Gustav Robert Kirchhoff、Friedrich Kohlrausch、Emil

Warburg、Walter Nernst、Max von Laue、James Franck、Gustav Hertz、Erwin Schrödinger、Peter Debye らの科学者が Berlin で研究した。

多分 Helmholtz が学生や仲間と持った最も意義のある関係は Heinrich Hertz とであった。1878 年に始まって、Hertz は Helmholtz の研究室と Kirchhoff の研究室で大学院生として研究した。1879 年 Helmholtz は電磁気力と絶縁体の誘電分極との間のなんらかの関係を実験的に確立するという、プロシャ科学アカデミーのための賞問題を設定した。Hertz はその問題に非常に興味があったけれども、1879 年彼はそれを脇に置いて他の研究を続けた。1880 年彼は卒業し、Helmholtz の助手の地位を得た。1886 年から、Hertz は Karlsruhe の彼自身の研究室で、彼自身が認めるように Helmholtz の賞問題に促進された、今や有名な実験を行った。それはラジオ波の存在を示した。Hertz は即座に、彼の進展と結果を Helmholtz と詳細に議論した。

Hertz の実験とそれらの結果は最終的に Helmholtz と Wilhelm Weber の間に論争を引き起こすことになった。それらの結果の中には電磁気は一種の遠隔作用であるという Helmholtz の見解の死があり、遠隔作用の見解の場の理論での置き換えがあった。それは物理学史における主要な転換点の一つであった。Hertz は電磁波の存在に対する経験的証拠を明らかにしたから、電気動力学の源はもはや我々の視野から隠された作用物の中に探されるべきではなく、周囲の媒体中に見出されるべきであった。Helmholtz は、電磁気はエーテル中の波であるという Maxwell の見解を支持していたけれども、彼は遠隔作用という手段で波の伝播を説明した。Hertz は電磁波が当時エーテルであると信じられており、後に場として考え出された媒体中の摂動であることを示した。もっと重要なことは、Hertz は彼の経験データに基いて、電磁波の伝播をそれらの波自身の相互作用から直接説明したこと、それゆえ、遠隔作用に訴える必要はなかったことであった。

Hertz の結果は Helmholtz の理論と対立していたけれども、Helmholtz は Hertz が 37 歳で死ぬまで絶えることなく熱狂的に彼の経歴を支えた。1888 年、Helmholtz は彼の生涯にわたる協同者 Werner von Siemens によって一部創設された Berlin の物理学と工業技術のための研究所 (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) の創設ディレクターを引き受けた。

Helmholtz の人生は普通の意味では何事もなかった。彼は2度結婚した。一度目は1849年、二度目は1861年であった。Helmholtz は単純であるが洗練された嗜好を持ち、高貴な立ち居振る舞いと幾分厳粛な作法を持つ男であった。彼の人生は最初から最後まで科学に捧げられたもので、彼は19世紀の最も重要な人物の一人に数えられる。Hermann von Helmholtz は1894年9月8日 Berlin 近くの Charlottenburg で亡くなった。

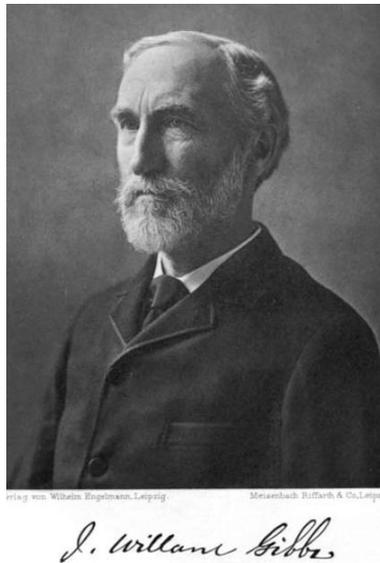


図 7.7 Josiah Willard Gibbs (1839/2/11–1903/4/28)

### 7.3 Josiah Willard Gibbs

Josiah Willard Gibbs は 1839 年 2 月 11 日 New Haven で生まれ、1903 年 4 月 28 日同じ町で死んだ。<sup>6,7</sup> Gibbs は、フランスとドイツで勉強し、すぐ続いて教師の経験をした留守の期間を除いて全生涯を通して New Haven に住んだ。だから彼は特に New Haven と Yale 大学の知性と同一視された。彼の父も Yale 大学の教授会メンバーだった。Gibbs は初期の勉強を Hopkins Grammar School(大学進学準備の中等学校)で続けた。彼はこの学校から 1854 年カレッジに入り、1858 年ラテン語と数学の優等賞で学士号を得た。卒業後 5 年間彼は彼が選んだ分野で勉強を続け、1863 年博士号を受け、Yale カレッジの教師 (tutor) の任命を受け入れた。彼の学位論文の表題は「平歯車の車の歯の形について」だった。彼が 2 年間ラテン語を教え、その地位を維持していた 3 年目と最後の年に自然哲学を教えたことは、彼の当時の好みが生かされていなかったとか、それらが二つの思考分野に分かれて分散していたとか、考えさせられるものではない。それ

はむしろ、全ての優秀な卒業生は学部生が学ぶどんな科目も等しく教えることができるという高等教育機関におけるかつての条件の奇妙な例証と見られるべきである。任期の最後に彼は勉強のためにヨーロッパに行き、1866-1867年の冬を Paris で、続く年を Berlin で過ごした。1868年には Heidelberg にいた。そして1869年に彼は New Haven に帰った。2年後彼は Yale カレッジの数理物理学の教授の任命を受け、死ぬまでその地位を保持した。

この新しく創設された講座の最初の年、Gibbs はたった2人の生徒を持った。2人とも今や Yale 大学の教授で、アカデミーの会員である。この小さなクラスの研究の選択において、彼は先例や生徒の表わす好みには断固として束縛されなかった。ここから彼の教育の特徴は彼の科学的発展の現状を示すものとして特に興味がある。彼が選んだ教科書は Poisson の *Traité de Mécanique* であり、Fresnel や Cauchy の研究が最もよく引用された。彼の講義はかなりの期間、回折、偏光に関する Fresnel の理論と反射の一般的法則に限られていた。しかしそれは非常に興味のある波の一般的取り扱いへと続き、続いての章で、水の波や全反射の場合の境界における光の波のような様々の型の波に応用された。その長い期間の後で、彼の生徒の一人が彼からその研究を本の形で出版するという条件付約束を奪い取った。彼がそうする適当な時期を見出せなかったのは嘆かわしいことである。しかし、複雑折の力学的説明における克服し難い困難がその時彼の心にそれらの困難さそのものを強要し、後に彼を光の電磁理論の強力な支持へと導いた方向に彼の注意を向けたことは殆ど疑いがない。1871-1872年のこの期間に Gibbs 教授が物理光学の領域に主とした関心を示しており、彼の外からの靈感はドイツからよりもフランスの哲学者の学派から引き出されていたのは確かである。

続く1872-1873年 Gibbs 教授はポテンシャル理論に関する Clausius の小さい研究を講義の基礎に選んだ。それは、彼がすぐに著しい方法で拡張することになる研究をした物理学者の書き物を知ることになったことを示しているから、記録に値する事実である。彼が Connecticut アカデミーで熱の力学に関する最初の論文を提出したのは1873年の4月と5月であった。それは全期間に亘る彼の高名を確立した。その論文「流体の熱力学の

グラフ的方法」の直の対象は Clausius によって導入されたエントロピーの概念の稔多さを示すことであった。

そのような並外れた知的才能を持ち、物理科学への思考がそれほど深遠な人間が、彼の研究結果を十分な完成に至るまで出版する望みを示さないのはあまり特異なことではない。しかしこの画期から彼の死まで、物理科学ならびに数学にした重要な彼の論文の継続した貢献なしに経過した年は殆どない。Gibbs 教授の名前が現代の文献にそれほど登場しないのは、彼の同時代人の何人かが彼の多産性について誤った意見を持っていたことに原因があるのだろう。しかし彼の業績集を調べるとそのような印象は一掃されるだろう。彼の研究のあらゆる課題が扱われている包括的な完全さおよび彼の長い論文の絶対的な範囲は広範で系統的な工業を意味している。

彼が数理物理学の研究者としての異常な力量の証拠を出版で世界に与えたのは Gibbs 34 歳の 1873 年だった。その年二つの論文が Connecticut アカデミーの紀要に現れた。一つ目の表題は「流体の熱力学におけるグラフ的方法」で、二番目は「物質の熱力学的性質の表面による幾何学的表現方法」であった。それらに続いて 1876 年と 1878 年に偉大な論文「不均一物質の平衡について」が出された。それは一般にそして正しく、物理科学に対する彼の最も重要な貢献であり、疑いなく 19 世紀の素晴らしい科学活動の最も偉大なそして最も不朽の記念碑であると考えられている。このシリーズの最初の二つの論文は、三番目に幾分蔭を射されているけれども、それ自身熱力学理論への顕著な、価値のある貢献である。それらは多くの直接的方法で有用で肥沃であることを示しているのに加えて、それら無しで三番目がどのように書かれてきたかを理解するのが困難である。論理展開でその三つは非常に密接に関係しており、前の論文でまず前進をもたらした方法が三番目の中に続いて用いられている。

Gibbs 教授は、多くの偉大な研究者の役に立った力学的モデルよりも想像への助けと表象として採用した幾何学的図解を用いる傾向があった。そのような力学モデルは、それらが表わす現象と完全に対応することはめったに無く、Gibbs 教授の厳密な論理への傾向はそのずれが彼にとってモデルの有用性を明らかに破壊するようなものであった。したがって彼は通常彼の式の幾何学的表現に頼った。彼が用いたこの方法はもっと容易であり力強かった。彼が熱力学の研究で、その時までには広範囲に用いられていた

唯一のものである体積-圧力ダイアグラムを利用したのは、多分この傾向による。彼が興味を持ったどんな課題についても彼の研究の完全さに気づいている人々にとって、彼の最初の論文がなんらかの有用である機会を持っていそうにみえるあらゆる異なったダイアグラムの注意深い研究であったことは驚くことではない。彼がその論文で最初に記した新しいダイアグラムのうちで、ある観点で最も単純なものはエントロピーと温度が座標軸に採られているものである。その中で、よく知られた体積-圧力ダイアグラム中と同様、どのサイクルの仕事あるいは熱もその平面のどの部分の面積にも比例する。多くの目的にとってそれは古いダイアグラムよりもはるかに明確であり、蒸気機関の研究で最も重要な実用的応用を見出した。しかしながら、Gibbs 教授が最も注目したダイアグラムは体積-エントロピーダイアグラムであった。それは、物体がする仕事やそれが生じる熱よりも、物体の性質が研究される時多くの利点を与える。この優位性の主な理由は、体積とエントロピーは二つとも物質の量に比例し、一方圧力と温度はしないことにある。共存状態の表現は特に明確である。多くの目的にとってこの方向で得られるものは仕事と熱のメモリの変化によって損なわれるものを補って余りある。例えば、固体、液体、気体が共存する3重点を適切に表わしうる一定メモリのダイアグラムはない。また、混乱無しに、水のように極大の密度を持つ物質の状態を表わしうるものはない。多くの場合に体積-エントロピーダイアグラムは明確さと便利さにおいて優れている。

2番目の論文で、熱力学におけるグラフ法の考察は3次元のダイアグラムに拡張された。James Thomson が既に体積-圧力ダイアグラムに第3の座標軸として温度を立てることによってこの拡張を行っていた。それら3つは初步的な考察から最も単純に表面を与える、すぐに認められる量であるが、いくつかの理由で、座標軸がそれほど知られていない熱力学量であるものよりも便利でもなく、結果に乏しい。事実、もしある物体の体積、エントロピー、とエネルギーの間の一般的関係が知られているなら、体積、圧力、と温度の間の関係はすぐに微分によって演繹されうる。しかし逆は真ではなく、前者の関係の知識は物質の性質について後者の知識よりもっと完全な情報を与える。したがって、Gibbs は3つの座標軸として体積、エントロピー、エネルギーを選び、名人芸でそれから結果する表



化学平衡の条件を研究する仕事に近づいた道筋であったのは殆ど疑いが無い。その仕事は彼がそのような途方もない方法で成し遂げ、物理科学に大きい利益をもたらす運命にあったものであった。

最初の二つの論文の中の化学的に均一な物質についての議論で、そのような物質はそのエネルギーが一定に保たれ、そのエントロピーが増加しないなら平衡にあるという原理がしばしば利用されていた。第3の論文の頭に、著者は Clausius の有名な宣言 “*Die Energie der Welt ist constant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu*” を置いた。彼は熱力学の二つの法則から導かれた上の平衡条件は普遍的に応用できることを示すように進んだ。そのため、一つまた一つと制限を注意深く取り除いた、まず最初は物質は化学的に均一であるということであった。その重要な解析段階は、基本的な微分方程式中の変数として、不均一物体の成分の質量を導入することだった。そのエネルギーのそれらの質量に関する微分係数は示強性量である圧力と温度と全く類似の方法で平衡条件に入ることが示される。それらの係数はポテンシャルと呼ばれる。均一物質と類似のものが常に利用され、解析過程は幾何学者が3次元幾何学を  $n$  次元に拡張する際に用いるのと似たものである。

その出版が化学史における最初の重要な出来事であったのは一般に認識されている。事実、M. Le Chatelier の言葉で、Lavoisier に造られたのと比較しうる重要な化学の新しい部門を創設した。しかしながら、その価値が一般的に知られるには長い年月がかかった。この遅れは、その数学的形式と厳密な演繹過程が誰にとっても読むのが難しかったこと、それが最も係わりを持つ実験化学の学生達にとって特にそうであったことに、大いによっている。1870年代半ばでは、その論文の簡単な部分でさえ、十分な数学の知識をもった僅かの化学者のみが読めるだけだった。それゆえ、この論文で始めて明確に述べられた偉大な多くの自然法則は、無視されていた間に、他の人々によって、しばしば理論的考察から、もっとしばしば実験によって発見されるということが起こった。しかし、現在、その方法と結果の偉大な価値は物理化学の全ての学生達に十分認識されている。1891年それは Ostwald 教授によってドイツ語に翻訳され、1899年 Le Chatelier 教授によってフランス語に翻訳された。その原典の出版からそんなにも長い時が経過したけれども、二つの場合の卓越した翻訳者は、その仕事をし

た主な理由として、歴史的興味ではなく、それが議論し、まだ実験的に解決されていない多くの重要な問題を与えている。その定理の多くは既に基本的帰結の実験的研究に対する出発点あるいは指針として既に役立っている。「相律」の名の下で行くような他のものは、単純で論理的な方法で、もっと見かけは複雑な実験事実を分類し、説明する役に立っている。一方、触媒、固溶体、半透膜と浸透圧の作用の理論のような他のものは、以前には神秘に見え、稀に説明できた多くの事実が実際には熱力学の基本法則の簡単な、直接的な、必然の帰結であることを示した。いくつかの成分が非常に少量だけ存在する混合物の議論において、その理論は先験的に可能である限り遠くまで持っていられる。当時実験事実の欠如の下で書かれたその論文は、全くの一般性の中で、van't Hoff によってその後に見出された高名な法則を述べることを許さなかった。しかしその法則は Henry の法則の一つの直接的帰結として気体の溶液に対して異なって述べられており、著者の裁量でその事実は更なる拡張を許さなかったけれども、彼は、それらの式で表わされる法則は非常に一般的な応用を持っている多くの指示があると注釈している。

そのような帰結の結果を含む研究が物理科学の学生達の間に深遠な称賛を引き起こしたのは驚くことではない。しかし、それらの結果よりも顕著で、科学にもっと役立ったのは、それらが到達された方法であった。それらは物質の組成に関する特別な仮説やなんらかの単純な仮定によるのではなく、全体の体系が非常に高い可能性を持つある経験法則の真実に直接よっている。どんな方法でもこれらの論文に具体化された結果を得ることは偉大な業績であった。それらがそのように論理的厳格な方法で到達されたことはまた驚きと称賛のより大きな原因であった。そしてそれがその研究に、形式と重要性において、独創的な性格の研究においてしばしばは見出されない実行の確かさと保証の高さを与えている。

Gibbs 教授は、数理物理学特に電磁気学を学生に講義するとき、近年の多くの物理学者が感じていたように、物理の多くの部門で扱われる多かれ少なかれ複雑な空間関係が便利で明確に表わされるベクトル代数が望ましいと感じていた。そしてその望みは、数学的方法の優雅さと簡明さの向かう彼の自然な傾向のために彼の中で特に活発であった。彼は、Hamilton

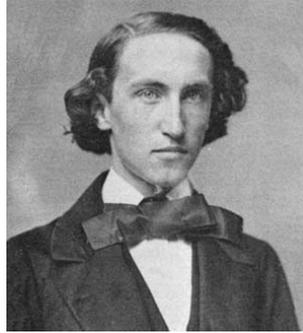


図 7.9 若い Gibbs

の四元数の体系の中には、彼の必要に適する道具を見出さなかった。その点で、実用的な目的のために、その課題のより簡単でより直接的な取り扱いを好んで、その美しく論理的完全さに拘わらず、四元数解析をもっともっと拒否する傾向を持つように見えた他の研究者と経験をともにした。1881年と1884年 Gibbs 教授は彼の学生達が使うために、彼が展開したベクトル解析の非常に簡潔なパンフレットを個人的に印刷した。このパンフレットはその課題に特に興味のある人々の間にある程度広まった。その体系の展開で、著者は Grassmann の *Ausdehnungslehre* と一般に multiple 代数の課題を深く研究するようになった。それらの研究は死に至るまで彼に興味を抱かせ続け、彼はしばしば、彼の知的活動の他のどれよりも multiple 代数の研究により多くの喜びを持てると述べた。彼の四元数の拒絶と現代代数の創始者と考えられている Grassmann の主張の支持は、幾分異論のある性質のいくつかの論文となり、それらの殆どは *Nature* のコラムに現れた。物理研究のための道具として彼の体系の有用性が彼自身と彼の生徒達の 20 年間の経験で証明されたとき、Gibbs 教授はいくらかしぶしぶながらではあるが、元来のパンフレットよりももっと拡張した形で公式に出版することに同意した。彼はそのときもう一つの研究に全く専念していたので、その出版の処理を準備する仕事は彼の学生の一人 Dr. E. B. Wilson に委ねられた。非常にうまくいった彼のその仕事の完遂は彼に、その課題に関心のある全ての人の感謝を受ける資格を与えた。

Gibbs 教授のベクトル解析の彼の体系を出版することへの躊躇は彼自身の心の中の有用性に関するなんらかの疑いから生じたものではなく、それがもっと広く用いられるべきであるという望みからであった。それはむしろ、それが数学へのオリジナルな貢献ではなく、他の人々の研究の特別な目的への適用である、という感覚によっていそうである。その仕事の多くの部分についてそれは勿論必然的に真実である。著者がベクトル解析の目的に役立ったのは、むしろ方法の選択と表示の体系化によってであった。しかし、それが進めた線形のベクトル函数とダイアチクスの理論の取り扱いにおいて、顕著な進歩がなされ、それはベクトル解析のより限定された分野でのみならず一般に multiple 代数のより幅広い理論においても重要になった。

Gibbs 教授は天文学の問題のいくつかにベクトル解析を応用することに興味を持ち、そのような応用の例を論文「3つの完全な観測からの楕円軌道の決定について」の中に与えた。この論文に展開された方法はその後3つの観測からの Swift 彗星の軌道の計算に W. Beebe 教授と A. W. Phillips 教授によって応用された。それはその方法の非常に決定的なテストであった。彼らは、Gibbs の方法が Gauss と Oppolzer の方法を凌ぐ顕著な利点を持っており、引き続き近似の収斂はより速く、解に対する基礎方程式を用意する労力はより少ないこと、を見出した。

1882年と1889年の間に、ある点で光の電磁波理論とその様々の弾性理論との関係に関する5つの論文が *American Journal of Science* に現れた。それらはエーテルと物質との関係に関する特別の関係の完全な欠如で顕著であり、物質の構成に関して為された唯一の想定はそれが光の波長に比べて細かい粒であるが、無限に細かい粒ではなく、それはある方法でエーテル中の電气流束を攪乱するということであった。単純さと直接性が彼の熱力学研究を思い起こさせる方法で、著者はそれらの論文の最初に、完全に透明な媒体の場合に、その理論が色の分散を説明するのみならず、色の分散をを決定する小さい量を見捨てることなしにどの特定の波長に対する Fresnel の複屈折の法則への道筋をも示した。彼は2番目の論文で、円偏光と楕円偏光が更に高次の量を取り込むことによって説明されること、それらはそれ以外のどの知られている現象の説明をも掻き乱さない

ことを示すことに進んだ。3番目の論文で彼は非常に厳密な方法であらゆる程度の透明度の媒体中の単波長の光の一般的方程式を推定し、Maxwellのものとは幾分違った式に到達した。それらは電氣的に測定できる誘電率や電導度を顕わには含まず、それゆえ元々述べられた理論が出くわしたある(特に金属反射に関する)困難を避けた。物体の分子構成について我々が知っているものより一致する観点が、観察される事実と反対である部分を含むことなく、実験によって証明される月並みの理論の部分を与えることが明らかにされた。C. S. Hastings 教授の1888年のいくつかの実験(それは Iceland 方解石の複屈折がどの以前の証明をも凌駕する正確さで Huyghens の法則に合うことを示した)が再び Gibbs 教授に光学理論のその課題を取り上げさせた。一つの論文が、著しく簡単な方法で初歩的な考察から、その結果と分散の事実の一般的な性質は電氣の理論と厳密に一致すること、その一方当時提案されていたどの弾性理論もそれらの実験結果と調和しないことを示した。数ヵ月後、無限に圧縮しうるエーテルについての William Thomson 卿の理論の出版で、この理論もまた取り入れてその比較を補足することが必要になった。その方程式と完全に均一で透明な媒体に対する表面条件は形式上電氣理論のそれらと同一で、同等の直接的方法で複屈折媒体に対する Fresnel の組み立てに導き、反射および回折光の強さに対して正しい値を導くので、それは他の弾性理論を襲う克服できない困難を被らない。しかし Gibbs は細かい粒状の媒体の場合、Thomson の理論は不自然な仮説を強制することなしに分散について知られている事実を導かないこと、金属反射の場合に同様の困難を被ることを示した。他方電氣理論について、仮説を工夫することは強いられず、ただ電氣の科学で与えられた法則を応用するのみであり、我々が光の運動を電氣と見なさない限り媒体の電氣的性質と光学的性質の間的一致を説明するのは困難であると云えるだろう。電氣的理論を除いて全ての他の理論を排除するすべての議論の中で、これらの論文は現在の研究者が知っている最も単純な、最も哲学的な、そして最も決定的なものを与えた。それらの中で進められた考察は、Hertz の実験的発見がそのような議論を永遠に不必要にした時点でさえ、その理論を確固として確立するのに十分であったように見える。

彼の最後の研究「統計力学における基本原理」の中で、Gibbs 教授は彼

の最初期の出版と密接に結びついたテーマに戻った。それらの中で、彼は経験によって与えられるとして受け入れられている熱力学の法則の結論の展開に関わった。この科学の経験的な形式において、熱と力学エネルギーは、勿論ある制限つきで相互に交換できる二つの区別される量と見なされているが、本質的には多くの重要な面で違っている。原因の統一へ向かう強い傾向に一致して、それら二つのものを同じ範疇に置こうとする多くの試みがあった。事実、熱は、全ての感得される物質がそれで作り上げられていると想定される微小粒子の純粋に力学的なエネルギー以上の物ではないこと、動力学を超える熱の法則は、任意の物体中の膨大な数の力学系の結果であり、その数は極めて大きく人間の観測には、ある平均と最確の効果のみが受け取られることを示した。多くの初歩的な本と大衆的な解説の中の「熱は分子運動の様式 (mode) である」という独善的な主張に拘わらず、それらの試みは完全には成功しておらず、19世紀の化学史上の人物の一人 Kelvin 卿によってその失敗は目立たせられた。そのような研究は、動力学理論の結果と観測とを比較するために、膨大な自由度を持つ系の力学を取り扱わねばならず、その過程は統計的性格を持つに違いない。そのような進め方の困難さは Maxwell によって一度ならず指摘された。彼は、Gibbs 教授がしばしば引用した通信の中で、数学の他の分野での能力に問題のない人々によって、そのような設問では深刻な誤りが為されてきたと述べている。

統計力学の原理と過程が確固とした確かな基礎を与えたのはその課題の困難さと他の知られている方法では到達できない結果の深遠な重要性という理由で、この上ない結果であった。それが成就されたことは疑いがなく、Maxwell が云う誤りの繰り返しに対して将来言い訳をすることは殆どないだろう。更に、Lagrange の研究が普通の力学に場合にしたように、その課題の全ての将来の学生の仕事をより容易にする定理が発見され、やり方が工夫された。

その本の大部分は、理論熱力学の問題を特に参照することなしにその課題のその一般的な発展を問題にしている。第12章の終わりで、著者はそのような問題を攻撃するのに、以前のどの研究者が持っていたのよりもっと完全な武器を手を持っており、最後の3つの章でその勝利を収めた使用は、彼が考えていたような純粋に力学的な系が人間の知覚に対して全



図 7.10 壮年の Gibbs

ての観点で、我々が実際に熱力学において出会うものと類似の性質を表すだろうということを示している。誰も最も熱中した喜びなくして第 13 章を理解して読むことはできない。熱力学のよく馴染みのある式が一つまた一つと、純粋に力学的な系の考察からと見えるように、殆ど自発的に現れる。しかし、彼がその成功でよりも、彼の研究の限界と不完全さで印象付けられていたであろうことはその著者独特のものである。彼は注意深く述べる：「しかし、自由度の数が巨大である時に得られる結果が熱力学の一般法則とよく一致するなら、その一致は興味があり、意味があるだろうが、我々はそれらの法則に関して自然の現象を説明したということからは未だ遠くにいることははっきりと述べられるべきである。というのは、自然の場合と比較して、我々の考えている系は理想的に単純であるからである。我々の唯一の仮定は我々が有限数の自由度の保存系を考えていることであるけれども、これは自然の物体に関する限り、仮定し過ぎであるように見える。熱力学のどの完全な系においても確かに無視されるべきでない放射熱の現象と、原子の結合と関連する電気的現象とは、有限数の自由度の仮説が物体の性質の説明に対して不適當であることを示している様である。」これは疑いなく真であるけれども、物理学のどの部門でも自然の現象がここで望ましいと示されている完全さで説明されたことはないことも

また思い起こされるべきである。電気の理論、光の理論において、そして力学それ自身においてさえ、ある現象のみが実際には単独で決して起こらないと考えられている。現段階の知識に於いて、そのような部分的説明は得られうる最良であり、加えて、理論熱力学のその問題は歴史的に常にその方向で見られてきた。

方法と結果において、その研究はその課題についての以前のどの取り扱いよりももっと一般的であった。それは、どういう意味でも気体運動論の取り扱いではなく、得られた結果は物質のある一つの形の性質でもなく、全ての形に同様に属する熱力学の一般方程式である。これは、系が力学的であって Lagrange あるいは Hamilton の式に従うことを除いて、考えられている系の力学的性質に関して何も仮定されていない仮説の一般性と対応する。この観点で、Maxwell の取り扱いが電磁気学に対してしたことを、それは熱力学に対してしたを考えられるだろう。Gibbs は熱の力学的説明を与えようとしたのではなく、そのような説明が可能であることを示すことに彼の仕事を限定したということができる。

Gibbs が応用力学でふたつの面白い発明をしたことが知られている。一つは鉄道車両のブレーキでそれは特許になった。もう一つは、どの先駆者のものよりも不安定さを大きく修正したある型の调速機である。それは Sheffield 科学学校の機械工作室 (machine shop) で作られ、物理学科の収集品として価値ある道具を構成している。それらの出来事は、発明者が成功する実験家に必要な全ての精神的資質を持っていたことを示すのに全く十分である。そしてそれは読者に、何故彼の出版のどれも彼自身の実験的研究に基いた演繹を含んでいないのかという事に関して奇異感を与えるに十分である。疑いなくその理由は、彼は一時期激しい実験研究と記録に従事しており、彼が彼の哲学的演繹をそれに基く定量的データを供給する豊富な資料を既に手にしていたという事実に見出される。それが欠けていた時には、彼自身の努力で欠乏物を供給できる彼の能力を親友の誰も疑わない。彼が光の弾性理論の難解な解析に携わっていた時、圧縮性の波が見かけ上存在しないことからくる非常に重大な困難を回避する可能な方法のように見えるものを彼は発見した。しかしながらその一時的説明は、決して見られないか、少なくとも記録されていない特別な反射でのある現象の発

生を含んでいた。そのような否定的な証拠が決定的であるようには見えなかった。彼は、彼の観測が探す証明を与えるという見込みで、自分自身の手でその目的に完全に適合するように装置を作った。その理論に対するどんな参照も彼の書いたものの中には無く、この作者 (Hastings) 以外に誰もその装置を見たものも無く、それが設計された実験を誰も見たことは無い。

Yale 大学の教授会メンバーとして、Gibbs 教授は教育者としての彼の仕事に常に興味を示し、時々独創性より少なくない印象的な意見の中で理にかなっていることを示した。彼とは異なる人々に対して完全に懇篤な態度で、彼は異常にはっきりした論理と称賛すべき言葉遣いで彼の見解を表現するのに決して躊躇しなかった。彼の同僚の最も厳しい批判は、彼の見方が非常に幅広く、重要な問題に関する彼の意見は完全に考え抜かれておいて裁判官であるので、彼がしばしば本質的な弁護人 (支持者) を欠いているということだった。提案した活動の道筋での彼の好みはいつも明白であった。しかし、彼は違った道筋の利点に対して決して盲目ではなく、彼は自分自身とするのと同じ腹藏なさで同僚とその件を議論するのに駆り立てられているように見えた。物理の領域において真実を追求する彼の知的方法を知っている人にとって、彼がカレッジの教授会の管理上の仕事を正確な科学の部門と見なしたことは明白であった。高い学問的榮譽に対する候補者の功績について意見を言うのが義務となったとき、彼はいつも親切であった。彼は自分自身の高すぎる業績を持っていたので、学生の知的欠陥について厳しい判定を楽しむことが出来ないように見えた。少なくとも彼の後半生において、幸運にも彼はカレッジの避けられない懲戒の仕事とあまり関わらなかった。しかし、彼は要請された時、彼の傾向はいつも寛容の側に立って誤りをよく犯した。

それほど裁判官的な気質の男が業務の非常な成功者であったことを知ることは読者を驚かせるだろう。科学にとって幸運なことに、大学における彼の地位はその事実を目立たせるようなものではなかった。さもなければ彼は、彼の自覚と持ち前の謙遜から見て、彼の科学的追及と深刻に干渉しうだろう仕事に呼ばれたかも知れない。しかしながら、彼は New Haven の Hopkins Grammar School の業務に対する評議員としての役目を与え

られた。彼は永年の間、植民地時代から続いてきたその基金の会計係として活動した。

Josiah Willard Gibbs は学者の間で長く卓越していた家族の一員であった。彼は、1658 年に Boston にやって来た Warwickshire、Honington の Henry Gibbs 卿の 4 番目の息子 Robert Gibbs の子孫であった。Robert Gibbs の孫の一人 Henry Gibbs は 1747 年、Massachusetts 州 Province の書記官 Josiah Willard の娘 Katherine と結婚した。国中のいろいろな場所にいるこのカップルの子孫のうち、6 人以上が Josiah Willard Gibbs の名を持っている。父の側では、6 人の大学卒業生の途切れない線を見出すことができる。そのうち 5 人は Harvard の卒業生で、Samuel Willard 大統領、その息子 Josiah Willard、Yale の卒業生である (父)Gibbs 教授の曾祖父、祖父、と父である。彼の母の先祖にはもう二人の Yale の卒業生があり、その一人 Rev. Jonathan Dickinson は New Jersey カレッジの初代学長だった。

Gibbs は決して結婚せず、妹と Yale の図書館員の義兄弟と一緒に子供時代の家に生涯を通して住んだ。Gibbs は New Haven で亡くなり、Grove Street Cemetery に葬られている。

## 参考文献

1. “*Jacobus Henricus van’t Hoff*, *Wikipedia, the free encyclopedia*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/>)
2. G. Nagendrappa, “*Jacobus Henricus van’t Hoff*, *A Short Biographical Sketch*,”  
*Resonance*, May, 21 (2007).
3. “*Hermann von Helmholtz*”  
(<http://www.nndb.com/people/445/000072229/>)
4. “*Hermann von Helmholtz*” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*  
(<http://plato.stanford.edu/entries/hermann-helmholtz/>)
5. “*Hermann von Helmholtz*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann-von-Helmholtz>)
6. Charles S. Hastings, “*Josiah Willard Gibbs*,” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
7. “*Josiah Willard Gibbs*, *Wikipedia, the free encyclopedia*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/Josiah-Willard-Gibbs>)



## 8章 高分子科学

### 8.1 倉田道夫先生

倉田道夫先生は1925年2月23日の東京生まれで、1947年東京工業大学を卒業し、恩師の田村幹雄先生の京都大学移転に従って大学院は京都大学に進んだ。<sup>1</sup>1952年京大工学部講師となり、1954年8月には助教授に、1962年8月には京都大学化学研究所教授になった。その後組織改変などで京都大学化学研究所の高分子構造部門、材料物性基礎部門の教授となり、1986年には京都大学化学研究所所長を務めるようになり、1988年慣習にしがって退官した。倉田先生の学問的経歴については自伝的書き物がある。<sup>2</sup>以下の殆どはその和訳で、文中の「私」はKurataであり、「我々」はKurataらを意味する。

1945年9月1日、連合国への日本の降伏後僅か2週間で、東京工業大学で数学の助教授 Yasuji Hayakawa は量子力学の自主コースの講義を始めた。私はその大学の1回生だった。彼は波動方程式の導出における de Broglie と Schrödinger の考え方と水素原子の取り扱いについて話した。このコースは多くの学生達に熱心に出席され、10月半ばに終了した。学長 Koroku Wada 博士は戦時カリキュラムを保留して、翌年4月に強制されるであろう大学の刷新計画に入った。その時「量子力学の数学的基礎」と題する Hiraku Toyama(遠山啓)の自主コースが学生グループの熱烈な要請で始められた。Toyama もまた数学の助教授であった。彼は基礎的な定義、集合論と群論から始め、徐々に群表現、エルミート行列の固有値問題などへと進んだ。彼はほぼ200人の学生に対して5ヶ月間毎週3時間あるいは4時間話した。(筆者は講義後 Kurata が家で纏めた綺麗なノートを拝見したことがある。)その講義の一部は彼自身によって「無限と連続」と題する岩波新書の中に再現されている。学生の目に映った彼の姿は、いま



図 8.1 倉田道夫先生 (1925/2/23–2004/9/10)

文芸評論家としてよく知られている、同期の Takaaki Yoshimoto(吉本隆明)による本の中に生き生きと記述されている。(吉本の言によると、「倉田さんは僕と違って学者です。」「倉田さんの奥さんは東工大のマドンナで、倉田さんはすうっともっていった」ということである。)

Toyama 講義に加えて、私は物理の助教授 Norio Kawai のセミナーに加わり、Slater の理論物理学の入門書を学んだ。そのように、戦後の非常に早い時期に、私は幸運にもそれらの熱心な教師から現代物理化学の基本理論を学んだ。

1946年4月、Wada 改革と呼ばれる過激な変化が東工大の教育、研究体制に導入された。講座制は実際にいわゆる研究室制に置き換えられた。簡単に言うと、その改革は、教授1、助教授1、助手2から成る典型的な講座が二つの研究室に分けられ、それぞれが教授あるいは助教授1、助手1から成るといようなものだった。新制度は科学と教育の要求に対応して新しい研究単位を進めるのに適しているように見えた。そのようにして、いくつかの新しい研究室が、生物学、工業経営学、経済学と文学までもこの分野に設置された。手短には、Wada 変革は、蔵前高専から、過去60年続いた科学に中心を置く現代的大学へと向かう動きを刺激することだった。英語名 TIT はそのとき決定された。

私が最初に属したコースは燃料化学であった。この種の細部門は Wada 変革の後応用化学のコースに統合され、私は半年間、以前よりもより基礎へと変化した新しいカリキュラムを楽しむことが出来た。

私は Mikio Tamura 教授の指導の下で卒業研究をした。彼の研究は光化学と液体状態物理の分野だった。後者で、彼は分子会合による水の粘度増大の理論的論文をちょうど出版していた。それゆえ私は研究課題として液体の粘度を選び、扱いやすい問題を見つけるといふ曖昧な望みを持っていくつかの古典的文献を読み始めた。それらの文献は Albert Einstein の有名な学位論文 *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* と C. Andrade の論文 *A Theory of the Viscosity of Liquids* だった。

1年後私は Ansrade 理論に基いて私が 2 成分液体混合物の粘度に対して導いた式を含む報告を提出して東工大を卒業した。その式は、H. Landolt と R. Börnstein が *International Critical Tables* と *Physikalisch-Chemische Tabellen* に集積した実験データをよく一致した。

Tamura の奨めで私は 1947 年 10 月に東工大の大学院に入り、学位論文の研究を始めた。私は文部省の東工大奨学金を授与されていた。半年後、Tamura は京都大学に移動した。私は、化学会の年会で溶液粘度の研究を発表し、それを「物性論研究」に出版した後、1948 年 6 月彼に従って京都へ移った。東工大の学生部長 Ryonosuke Yamada 教授は私が東工大学生としての仕事を京都でし遂げることを許した。

物性論研究は東京 (-1948)、大阪 (1949-1956)、京都 (1957-1961?) の物理学者の仲間が編集する日本語で書かれた謄写版刷りの化学物理誌で、1949 年以来最初は季刊で、続いて月間で出されていた。物性論研究は審査なしに編集されたので、投稿論文の出版には 1ヶ月しかかからなかった。

Tamura と私はその粘度に関する英語の論文を京都で準備して *Journal of American Chemical Society* に投稿した。しかし、編集者は提案した式

$$\begin{aligned} \eta(\text{solution}) = & (1-x)(1-\phi)\eta(\text{solvent}) + x\phi\eta(\text{solute}) \\ & + 2[(1-x)(1-\phi)x\phi]^{1/2}\eta^* \end{aligned} \quad (8.1)$$

の半経験的性格のために出版を却下した。ここで、 $x$  は与えられた溶液中の溶質のモル分率、 $\phi$  は体積分率、 $\eta(\text{so-})$  は so-の粘度、 $\eta^*$  は濃度に独立な定数である。この定数は溶質と溶媒分子間の相互作用を表わす相互粘性

と名づけられた。上の式の重率因子の特別な形  $x\phi$  は Andrade 理論から出てきた。

2成分液体混合物の場合には、 $\eta(\text{solvent})$  と  $\eta(\text{solute})$  の双方とも直接測定できる。そこで、我々は様々の濃度の  $\eta(\text{solution})$  の観測値から  $\eta^*$  を得ることができ、 $\eta^*$  のばらつきからこの式の正しさを評価できる。このようにして、我々はこの式が水とアルコールの混合物を含む多くの溶液に適用できると結論した。

固体溶質を液体溶媒に溶かして得た2成分溶液の場合、 $\eta(\text{solute})$  は直接測定できない。しかし、上の式が適用できるなら、二つの複合変数、 $[\eta(\text{solution}) - (1-x)(1-\phi)\eta(\text{solvent})]/x\phi$  と  $2[(1-x)(1-\phi)/x\phi]^{1/2}$  の間のグラフで直線を得ることができ、 $\eta(\text{solute})$  と  $\eta^*$  を同時に決定できる。そこで、Tamura は東工大の大学院生 Susumu Sata にナフタレンのベンゼン溶液について測定を行うよう頼んだ。様々の温度で評価した仮想的な  $\eta(\text{solute})$  は熔融ナフタレンに対する実験曲線の延長線上に正確に位置した。これは溶液粘度の長い外挿が溶質の不溶性領域を超えてまで効果的であることを示した。その結果は1950年8月物性論研究に、二つの英語論文、その一つは液体-液体でもう一つは固体-液体溶液の論文は *Bulletin of the Chemical Society of Japan* に1952年に出版された。

溶液の蒸気圧の半経験的研究を終えた後、私は溶液の表面張力の統計熱力学へ進んだ。格子模型を用いることによって、分子の分率が表面からの距離の関数であると考えられる2成分溶液の大正準分配関数を構築した。その濃度分布は系を熱力学平衡にするように決定された。1950年6月に物性論研究に出版されたその結果はすぐに九州大学の Shu Ono 教授に認められた。それから我々は正則溶液の表面張力の理論を、1951年1月物性論研究に、そして1951年10月 *Journal of the Physical Society of Japan* に展開した。我々の多層吸着理論によって得られた表面張力と表面の成分過剰量は単層吸着理論に対する対照的な Gibbs の式と矛盾しなかった。

これらの研究に基いて、私は棒状分子の溶液に対する表面張力の理論とアルコール-水溶液の表面張力を見積もる実用的方法を展開した。私の学位論文は、溶液の粘度、蒸気圧、表面張力の半経験理論から成っている。

京都の高分子物理の若い研究者達の間で相互の意見交換を促すために京

都高分子談話会が結成されたのは1950年の秋だったと想う。その元々のメンバーはアルファベット順に Hiroshi Fujita, Hiroshi Inagaki, Hiemichi Kawai, Akio Nakajima, Yasunori Nishijima, Shigeharu Onogi, Ei Teramoto, Misazo Yamamoto、と私だった。我々は1ヶ月に1度会合を持ち、よく一人か二人のメンバーの多くは未完の研究を聞いた。私の記憶では、Teramoto と Yamamoto から、1951年を通して続いた高分子鎖の両端間距離に対する排除体積効果についての彼らの研究を5、6回聞いた。彼らは物性論研究に7報の報告を出版し、そのうちの1951年11月の第6報で、一次摂動理論の有名な係数  $4/3$  が記録されている。

それらの日々の中で、Ryoichi Kikuchi が1950年3月物性論研究と1951年5月 *Physical Review* に、イジング強磁性体の秩序-無秩序転移についての改良された理論を提出した。彼の方法は、系の自由エネルギーが対(pair)よりも大きいスピンの基本的クラスターに関係する変数に関して極小化されるので、クラスター変分法と呼ばれた。Tatsuo Watari と協同で、私はKikuchiの元々の方法とは違った、配位因子の構築方法を展開し、1951年4月と10月物性論研究に出版した。それらの論文はKikuchiとの協同研究を導き、それは1953年3月 *Journal of Chemical Physics* に出版された。この論文で、我々はBetheとKikuchiによる近似的な分配函数と、厳密な分配函数の高温および低温展開とを詳細な比較に基いたBethe格子の概念を提案した。Bethe格子は仮想的な格子で、そのどの部分も樹状構造を持ち、三角形、四角形などのどんな閉じたセルを含まない。この型の格子上でのみ、Bethe理論は厳密な結果を与えた。

上に述べた格子統計の観点からは、高分子溶液のFlory理論はBragg-Williams近似に相当し、一方Huggins理論はBethe近似に相当する。しかしながら、それら二つの理論は実際上混合エントロピーに対して同じ式を与えた。言い換えると、それらは溶液の熱力学的性質に対する鎖の固さや枝分かれの記述には有効ではなかった。Watariと私はKikuchi近似に対応する鎖状高分子溶液の改良理論を展開した。その試みは成功し、1952年11月物性論研究に、1955年6月 *Journal of Chemical Physics* に報告された。我々は、浸透圧の第2ビリアル係数に対する鎖の固さと分枝影響についての観測結果、Flory-Huggins相互作用パラメータ  $\chi$  に対する高分子濃度の影響についての観測を表わすことができた。

国際理論物理学会議が1953年9月18-23日京都で持たれた。Section Bの18日午後のセッションは高分子に充てられ、其処での発表者はJ. G. Kirkwood、Akira Ishihara、P. J. Flory、Ei Teramotoであった。彼らはそれぞれ、粘弾性、ゴム弾性、排除体積効果の熱力学的観点、排除体積効果の数学的観点を話した。Floryは、彼が同じパラメータの組で分子内と分子間の相互作用問題の定式化を成し遂げたことを強調した。摂動理論に加えて、Teramotoは鎖状問題を3つの型、酔歩型、生成鎖型、実在鎖型に分類する考えを説明した。その中で実在鎖型のみが排除体積効果を生じる。その考えは結合数20までの2次元正方格子鎖の大きさの完全な数え上げによって支持された。私はTeramotoが結合数15かそこらに達した時にそのプロジェクトに加わった。それが私のこの効果の研究の出発点であった。Floryは非常に親切で、その会議の詳細な報告を1954年1月*Journal of Polymer Science*に書いた。最近の報告によると、56人の外国からの参加者のうち15人が1993年までにノーベル賞受賞者になった。

その時小林物理研究所のディレクターであったShoten Oka教授が日本における高分子物理の研究の思いやりのある総説をその会議の要約(abstract)書に出している。其処では61報の論文が1941-1950年にリストされ、122報が1951-1953年7月にリストされている。

Tamuraが引き継いだ講座は工業化学科第6講座で、其処では長年写真化学の研究が行われていた。当時工学部には4つの化学科、燃料化学、繊維化学、化学工学、我々の工業化学があり、約120名の学生が毎年入学していた。Tamuraはそれら全ての学生に物理化学を教え、同時に限られた数の学生に写真化学を教えていた。大学教師が一人で物理化学をカバーするのはますます難しくなってきたから、Tamuraは日本における最後の一人であったかも知れない。彼はすぐに学生に人気のある教師になった。それで、Tamuraの指導下で卒業研究をするのを望む学生数は1949年4月1人、1950年2人、1951年4人、1952年8人のように急速に増えた。更に、もう3人の学生が新しい教育制度の下で1952年第6講座にやってきた。それらの学生の大抵は工業界に職を見つけたが、1951年のHisashi Odaniと1952年の新制度の3人の学生は卒業後も第6講座に留まった。

最初の5年間1948-1953年は、Tamuraは自分自身を写真感度を研究す



- |                |                |                |               |                |
|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
| 1. 内山栄三 (28)   | 18. 藤田道夫 (62)  | 35. 井田利雄 (32)  | 52. 辰島信孝 (60) | 69. 池原正一 (62)  |
| 2. 那須金太郎 (21)  | 19. 梶野一 (64)   | 36. 野田浩平 (32)  | 53. 辻 敏 (67)  | 70. 平 知雄 (62)  |
| 3. 岩崎寿一郎 (25)  | 20. 鹿岡良通 (43)  | 37. 金吾宗忠 (36)  | 54. 山田 繁 (64) | 71. 橋本修造 (62)  |
| 4. 倉田道夫 (62)   | 21. 矢野邦之 (69)  | 38. 小田島河雄 (30) | 55. 北見五郎 (62) | 72. 小畑雄司 (62)  |
| 5. 佐井 明 (45)   | 22. 小沢泰吉 (63)  | 39. 松下和正 (41)  | 56. 相田 繁 (62) | 73. 平野博雄 (62)  |
| 6. 田村先生 (62)   | 23. 甲崎司郎 (41)  | 40. 金井源次 (37)  | 57. 山田正三 (71) | 74. 小川忠徳 (62)  |
| 7. 今 道         | 24. 豊田昇嘉夫 (41) | 41. 本山武博 (34)  | 58. 河合五規 (74) | 75. 河口英樹 (62)  |
| 8. 小谷 寿 (67)   | 25. 倉田道夫 (62)  | 42. 本田 凡 (40)  | 59. 池上真平 (62) | 76. 田中 敏久 (62) |
| 9. 小村英知 (67)   | 26. 武山浩之 (62)  | 43. 西田清吉 (40)  | 60. 木村隆一 (62) | 77. 田中 隆久 (62) |
| 10. 岩田 一 (67)  | 27. 中川清邦 (62)  | 44. 折原隆巳 (61)  | 61. 杉江 彰 (62) | 78. 太田伴一 (62)  |
| 11. 岩田 一 (67)  | 28. 河合智 敏 (62) | 45. 折原隆巳 (61)  | 62. 藤田直之 (61) | 79. 門脇三司 ( )   |
| 12. 内山 敏彦 (62) | 29. 小畑山二郎 (62) | 46. 北村周治 (62)  | 63. 小林辰裕 (60) | 80. 御橋博幸 ( )   |
| 13. 松本武夫 (62)  | 30. 崎本 泰 (62)  | 47. 大村茂光 (62)  | 64. 坪 亨 (62)  | 81. 堀田道博 ( )   |
| 14. 栗本英之 (62)  | 31. 遠藤 政 (62)  | 48. 森野元次 (62)  | 65. 寺田行雄 (62) | 82. 村 七郎 (62)  |
| 15. 藤原信一 (62)  | 32. 橋本修造 (62)  | 49. 平野 達 (61)  | 66. 松本博之 (62) | 83. 松島正洋 (62)  |
| 16. 藤崎野次 (62)  | 33. 根本国隆 (62)  | 50. 今井 政夫 (71) | 67. 松本博之 (62) | 84. 金田英治 (62)  |
| 17. 植田文彦 (62)  | 34. 杉本元成 (62)  | 51. 工田康雄 (62)  | 68. 松原正博 (62) | 85. 石原武夫 (62)  |
|                |                |                |               | 86. 早川 武秀 (62) |

図 8.2 1972 年田村幹雄先生退官記念

るのに捧げた。彼は、1953年の国際理論物理学会の丁度すぐ前の写真感度の付属 (satellite) シンポジウムで、「写真乳剤における染料による減感機構」に関する理論を提出した。そのシンポジウムで、彼はまた、「室温で沈澱法で作製された臭化銀多結晶フィルムにおける光伝導性」について報告した。それは電子工学をよく知っていた助手の Masaaki Kaga によって行われたものだった。

1952年4月私は教官として採用され、1954年8月工業化学科の助教授に昇進した。

1950年4月に卒業した最初の学生 Koichiro Iwasaki はポリビニルアルコール溶液について固有粘度の実験研究をした。私は、彼が我々の講座内のセミナーで排除体積効果の Flory 理論のついて話したのを憶えている。前述のように私は半年後に京都高分子談話会に加わった。Odani は最初私と一緒にアルコール-水溶液の表面張力の研究をした。1962年の卒業後、彼は高分子フィルムによる低分子物質の吸収の実験研究を開始し、農学部水産学科の Fujita、Akira Kishimoto と協同して、硝子状高分子による蒸気の段階的微小吸収に関する研究を成し遂げた。その結果は1959年 *Bulletin of the Chemical Society of Japan* に、1960年 *Journal of Physical Chemistry* に出版された。

1953年に卒業した3人の学生の中で、Hiroshi Hada は卒業後すぐ助手として雇われ、写真感度の研究に従事した。彼は1972年 Tamura の後継者になった。

Sin'ya Hayashi と Isamu Nagata は工学研究科に入った。Hayashi は2年間私と一緒に高分子溶液の格子模型理論について研究し、それから化学工学科の助手になった。後に彼は神戸大学の教授に昇進した。

Nagata は最初写真化学の研究に従事し、それから3成分溶液の気-液平衡の理論的および実験的研究に変わった。彼は化学工学の分野で成功し、若くして金沢大学の教授になった。

1954年 Koichiro Nakanishi が大学院に入った。彼は我々のグループで高分子試料を合成した最初の人間で、Akio Nakajima の指導の下で様々な分子量のポリビニルアルコールを合成し、その高分子の部分体積の正確な測定を行った。彼は体積が濃度の増加とともに単調には変化せず、ある特定の濃度で尖点型の極小を持つことを見出した。尖点の位置から分子

の大きさを見積もるという考えは1956年10月物性論研究に提出された。Nakanishi、Nagata、Tamura、と私はまた、ノルマルパラフィンとイソパラフィンの物理定数を評価するための学術論文を1960年4月 *Journal of Chemical and Engineering Data* に出し、アルケン炭化水素について1961年 *Bulletin of the Chemical Society of Japan* に発表した。Nakanishi は1965年から京大で物理化学の教授をした。

第3回レオロジーシンポジウムが1953年の国際会議の2ヵ月後の11月18-19日京都でもたれた。Tamuraと私の二人は其処に出席して、Tsurutaro Nakagawa が Weissenberg 効果を話すのを聞いた。彼は重合油についての研究の呈示の中で、その効果がズリをかけた油に発生する弾性の明白な証拠であることを示した。

Tamura と私は第1回レオロジーシンポジウムは見逃したけれども、第6講座で研究する問題を探すために第2回シンポジウムに出席した。数が増える学生達を受け入れるために、我々は実験研究のための大きいテーマを見つけ、紙や硝子器具の代わりに長持ちする装置を研究室に備えなければならなかった。我々は粘度の問題で出発していたから、レオロジーは第1番の選択であった。しかし、粘弾性、必然的に線型、は我々が京大においてさえ遅れを取っていたから、あまり魅力的ではなかった。ともかく Weissenberg 効果は我々にとって待ち焦がれていた慈雨に見えた。

他方、Yamamoto は絡み合いの網目模型を用いて高分子濃厚溶液のレオロジー的性質の理論を展開していた。非 Newton 粘度についての Inagaki との協同論文から出発して、彼は1952年以来物性論研究に6つの論文を出版していた。彼は当然その効果に興味を持ち、さまざまな型の装置における圧力分布を計算した。1954年11月の物性論研究に見られるように、その結果は円錐-円盤型の装置で J. E. Roberts によって得られた実験データを確認した。それは第2法線応力差が第1法線応力差に比べて無視できることを示していた。

時期を得て、Tamura は1955年に卒業したばかりの Tadao Kotaka に、その効果を測定するために平行円盤型の装置を組み立てるよう示唆した。Kotaka は京都技術科学館(現近畿発明センター)と大阪市工業試験所の援助でそれをした。装置の性能は素晴らしく、我々は早くも1956年7月物

性論研究にそれを発表することができた。

円錐円盤型に比べて平行円盤型の利点は取り扱い、特に試料室の幅 (gap) の調整の容易さであった。しかし、もし第2法線応力差が第1法線応力差に比べて無視できなかつたら、その効果は平板上に観測される圧力分布の解析を複雑にする。幸運にも、上述のようにそれは通常の高分子溶液の場合ではなかった。

そこで Kotaka は、ポリスチレンのデカリン溶液、メチルセルロース水溶液、Na カルポキシメチルセルロース水溶液の第1法線応力差とズリ応力の測定を行い、それらの溶液の回復歪を評価することができた。更に、観測されたズリ応力と回復歪との間の関係に基いて、彼はポリスチレン溶液はズリにおいて Hooke の法則に従うが、セルロース誘導体溶液は非 Hooke 的であると結論した。その結果は 1956 年 10 月物性論研究に、1959 年 *Journal of Applied Physics* に出版された。

高分子濃厚溶液の粘度  $\eta$  が分子量の 3.4 乗に比例することは 1955 年に既に確立していた。しかし、定常コンプライアンス  $J_e$  の分子量依存性については確固とした情報は得られていなかった。我々は分子鎖の間の絡み合いの本質を明確に理解するには  $J_e$  のその依存性を確立することが不可欠であると考えた。

レオロジーにおけるゴニオメータ測定のための新しい機械が私のマサチューセッツ工科大学への出発直前 1959 年夏に、文部省の交付金で設置された。Kotaka と彼のグループはポリスチレンのトルエン濃厚溶液について、ズリ応力と第1法線応力差の広範な測定を実行し、1年後、得られたデータを Cambridge の私に送ってきた。その実験で我々は、高流動型の市販試料の分別物 5 つ、熱重合の 2 試料、Na 触媒重合の 4 試料を用いた。郵便による注意深い議論の後、我々は上の 3 つのグループの内の 4 試料のデータに基いて定常コンプライアンスは分子量に独立であると結論した。我々は、第1のグループに低分子量の残渣の存在を、第2番目には枝別れの可能性を認めた。その論文は最初 *Journal of Applied Physics* に投稿され、その後 1962 年に *Rheologica Acta* に出版された。それでもなお、Tobolsky と彼の共同研究者の有名な論文に先立っていた。

1953 年の国際会議後、可能な配位の完全な数え上げによる排除体積効

果の研究は Teramoto と Riichiro Chujo によって角度  $90^\circ$ 、鎖長 8 までの 3 次元単純立方格子鎖に対して続けられていた。最大鎖長 8 は短すぎると想われるかも知れない。しかし、可能な配位の数 は 64770 で、それは角度  $90^\circ$ 、鎖長 20 の、以前の 2 次元正方形格子の鎖に対する 47128 よりさらに大きい。二つの計算、生成型と実在鎖型、の間の本質的な違いに関する議論が強化された。実在鎖の両端間距離の分布関数が極大を経た後、急に 0 に落ちるのに対して、生成鎖のそれは Gauss 函数のように徐々に落ちていくことが明らかにされた。それらの結果は 1954-1955 年物性論研究に、1955 年 11 月 *Journal of the Physical Society of Japan* に出版された。

両端間距離に対する Teramoto の摂動理論は Hiromi Yamakawa と私によって、平均二乗回転半径  $\langle S^2 \rangle$ 、浸透圧の第 2 ビリアル係数、固有粘度を含む高分子稀薄溶液の直接測定できる性質に、拡張された。それらの摂動理論の適用範囲は排除体積パラメータ  $z$  で  $\pm 0.15$  の狭い範囲に限られていたけれども、我々は真珠の首飾り鎖の二つのモデルパラメータ、有効結合長  $a$  と有効セグメント径  $b$  を決定でき、それらは上の 3 つの性質に関する実験データと合致した。例えば、 $\Theta$  温度 308K で、分子量 3 百万のポリスチレンのシクロヘキサン溶液に対して、上の  $z$  の範囲は 303-311K で、 $a$  と  $b$  はそれぞれ 16 Å、7 Å と評価された。固有粘度の  $\langle S^2 \rangle^{3/2}$  に対する比は一定ではなく、温度上昇とともに減少することが示された。これらの結果は 1956 年 5 月-1957 年 6 月物性論研究に、1958 年 1 月 *Journal of the Physical Society of Japan* に、1958 年 5 月 *Journal of Chemical Physics* に出版された。上と同じ期間に、摂動理論が米国の B. H. Zimm、W. H. Stockmayer、M. Fixman、A. C. Albrecht によって、またソヴィエト連邦の O. B. Ptitsyn と Yu. Ye. Eisner によって展開された。我々の研究は高分子物理学者の国際的な社会に認められ、Stockmayer と私は 1959 年 Wiesbaden における *IUPAC Symposium über Makromoleküle* に招待された。その摂動理論とそれに関連する理論は高分子溶液の二定数理論 (*two-parameter theory of polymer solutions*) と呼ばれた。

Yamakawa は 1954 年 4 月に工学研究科に入り、Ichiro Sakurada 教授の指導下で修士のための実験研究を始めた。普通よりも早くその研究を終えて、彼は私の部屋に現れ、第 2 ビリアル係数の新理論の可能な定式化について話した。彼によると、彼は Sakurada とその友人達によって設定され

た科学者達に対する特別な講義で、1953年に2度 Flory を聞いたことで鼓舞されたということであった。ともかく、時宜を得た彼との邂逅は私のためになった。

1959年大きなお金が Tamura と我々と同じ学科の第7講座の教授 Junji Furukawa の提案した「立体規則性高分子の物理的性質」の研究プロジェクトに文部省から授与された。彼は自分でも絡み合いの網目理論を提出しており、しばしば京都高分子談話会に出ていた。彼は様々な種類のイソタクチックポリスチレン試料を用意した。我々は前述のレオメータと光散乱光度計を設置していた。

1956年から大学院生であった Hiroyasu Utiyama は、それらの試料の光散乱測定を行い、普通の処理が平方根平均二乗回転半径の負の値に導くような異常な角度依存性を見出した。この異常性は各高分子セグメントの光学異方性に帰せられ、Furukawa 試料の高い規則性の証拠を提供した。

京都高分子談話会の中で、Nishijima は早くに Brooklyn へ、Fujita は1954年と1958年に Leiden と Madison へ、Teramoto は1956年 Evanston へ、Inagaki は1957年 Mainz へ、1958年、Nakajima は Ithaca に Kawai は Amharst に行った。大抵は1年もしくは2年だった。

二つの手紙が、マサチューセッツ工科大学と Dartmouth カレッジでの最も刺激的で人間的に好ましい Stockmayer 教授との協同に私を導いた。最初のものは、親切にも Evanston からの帰還後すぐに私の望みを Stockmayer に伝えた Teramoto の手紙だった。二番目は1958年10月に私が受け取った Stockmayer の個人的同意であった。彼はまた高等研究大学院での Alfred P. Sloan 外国人ポスドク奨学金に関する書類を私に送ってきた。

私は妻と、1959年9月から18ヶ月間 Cambridge に、1961年3月から6ヶ月間 Hanover に滞在した。私は4報の論文を書き、Wiesbaden と Montreal での IUPAC 高分子化学シンポジウム、Cleveland でのアメリカ化学会の会議、New York 科学アカデミーによってもたれた「高分子系の熱力学と力学」に関する会議に出席した。

Wiesbaden から帰った後、私は高分子鎖の楕円体モデルを用いて両端間膨張因子  $\alpha$  の閉じた形の式、Kurata-Stockmayer-Roig の式を得た。排除体積パラメータ  $z$  の大きい値に対して、この式は  $\alpha$  の3乗が、有名な Flory の式の5乗の代わりに、 $z$  に比例することを予言した。この研究は4月の

アメリカ化学会で発表され、1960年5月 *Journal of Chemical Physics* に出版された。

次の研究は5月に開かれる New York 科学アカデミーの会議のために為され、1961年1月その年報に出版された。格子統計に化学結合を上まわる数の分子内セグメント接触を導入して、私は、Bethe 近似の枠組み内で、以前の理論と同等の収穫を得ることができた。

3番目と4番目の論文は、一つは短くもう一つは長いもので、両方とも固有粘度と分子量の関係の解析に Kurata-Stockmayer-Roig の式を応用するものだった。1つの図を含む4ページから成る3番目の論文は1962年 *Reports on Progress in Polymer Physics in Japan* に出版され、31の図をもつ117ページの4番目は1963年 *Fortschritte der Hochpolymeren-Forschung* に出版された。

( $z$  が正の領域の Kurata-Stockmayer-Roig の式の振る舞いは、1955年の論文中の Fixman の二つの式の双方の解とよく一致する。私はその時その数値解は知っていたが、1962年2月に Stockmayer からの手紙を受け取るまで  $\alpha^3 = 1 + 2z$  という解を知らなかった。)

その仕事は図書館で固有粘度  $[\eta]$  と分子量  $M$  の実験データを引き写すことで始まった。(Fixman の式を用いて話をすると、) 私はそれぞれの系について  $[\eta]/M^{1/2}$  を  $M^{1/2}$  に対してプロットしてデータ点の直線性を確かめ、最後にその直線の切片と勾配から二つの定数  $K$  と  $B$  を評価した。 $K$  は高分子の非摂動広がり、そこから立体因子  $\sigma$  あるいは特性比  $C_\infty$  に関係づけられ、一方  $B$  は高分子と溶媒との相互作用の効果を表わす。 $\Theta$  条件の下では  $B$  は消え、我々は単に  $[\eta]_\Theta/M^{1/2} = K$  を得る。

Flory によれば、同じ高分子媒体中の1本の高分子鎖は非摂動状態にあるから、 $\sigma$  あるいは  $C_\infty$  の決定は熔融高分子の様々な性質の明確な理解にとって本質的である。 $\sigma$  値の集積への私の関心は粘度解析の広い適応性によって深められた。例えば、私は、良溶媒中  $25^\circ\text{C}$  の1959年の Schulz と Horbach のデータから、ビスフェノール-A-ポリカーボネイトに対して、 $\sigma = 1.10$  をみいだした。その値は1967年の  $\Theta = 170^\circ\text{C}$  での Berry、Nomura、Mayhan のデータに基く  $\sigma = 1.18$  と同等である。大きい  $z$  でのその方法の欠点は  $M$  が数百万の領域の実験データが欠如していたために隠されていた。



図 8.3 倉田先生古稀祝賀会の部分的集合写真 (1995 年 9 月 16 日)

Hanover で、私は長い論文「長い鎖状分子の固有粘度と非摂動広がり」を書くことに集中し、Montreal での IUPAC Macro でその要点を発表した。このシンポジウムのすぐ後、私は Hanover から京都へと出発し、Stockmayer にその長い論文の豊富な材料を残した。彼は適度に修復し、鎖の固さなどの有用な議論を加えて、真面目にそれを完成させた。

1962 年、私は化学研究所の教授に任命され、助手として Utiyama と 2、3 人の大学院生を連れて移動した。以前の学生でその時東工大の学生だった Masaaki Fukatsu が 1948 年に私がしたようにすぐに私の研究室に参加した。その研究所には Inagaki もまた 1960 年に教授に任命されていて Kotaka が彼の研究室に呼ばれた。日米高分子セミナーが 1965 年に京都で開催され、1966 年には IUPAC Macro が東京と京都で開催された。IUPAC Macro の後、Stockmayer は日本学術振興会の援助で 2ヶ月間東京教育大学と京都大学に客員教授として滞在し、「高分子動力学」の一連の講義をした。1968 年には国際レオロジー学会が京都でもたれた。

私は Fukatsu と共同して理論研究をした。それは彼の 1966 年の時宜を失った突然の死で終わったけれども、…。我々は線状高分子の第 2 ビリアル係数に対する閉じた近似式の誘導、分子パラメータでの分枝高分子、環状高分子の流体力学的性質の記述に対する理論を出版した。

1963 年から Tamura が退官した 1972 年の期間に 32 人の大学院生が私の研究室で研究した。その中で 27 人が工業界に職を得、5 人が大学に職を

見つけた。Kazuyoshi Iwata は単独で格子模型高分子鎖の Brown 運動の理論的学位論文を成し遂げた。他の全ての学生は教育スタッフ Odani(1966-)、Utiyama(1962-)、Fukatsu(1964-1966)、Kunihiro Osaki(1967-)、Norio Nemoto(1968-)、Yoshisuke Tsunashima(1969-) の指導の下で実験研究に従事した。

この期間の最初の 2 年間、溶液グループは、市販の光散乱光度計を用いて様々の高分子のコンフォーメーションの性質を研究した。それらには、前述のイソタクチックポリスチレン、ポリオキサイド、ポリメチルメタクリレート、ポリメチルブタクリレートがある。残る 8 年間に、Utiyama と Tsunashima は  $9^\circ$  から  $150^\circ$  の角度で日常的測定ができる自家製の光散乱光度計を作った。彼らはポリ- $\alpha$ -メチルスチレンについて正確な測定を行った。

日本では初めて Inagaki と Hidematsu Suzuki は良溶媒中のポリスチレンについて 7 百万までの広い分子量範囲に亘って  $[\eta]$  の注意深い測定を行い、 $M^{1/2}$  に対してプロットした  $[\eta]/M^{1/2}$  が  $M$  が百万を越えて増大するに連れて直線から下にずれ始めることを見つけた。この研究は日米セミナーで発表され、そこで Thomas G Fox が私に、Berry の未発表の光散乱データもまた Kurata-Stockmayer-Roig 式よりも Flory 式に有利であることを知らせてくれた。また、もう一つのグループ Mitsuru Nagasawa、Ichiro Noda、Tadaya Kato、Teruo Fujimoto は、 $9.5(\Theta)$  から  $100^\circ\text{C}$  の温度範囲、 $M$  が  $4 \times 10^4$  から  $7.5 \times 10^6$  の範囲で *trans*-デカリン中の単分散ポリ- $\alpha$ -メチルスチレンについて光散乱と固有粘度の研究を行った。彼らは 1970 年に  $M$  が百万より低くない限り、粘度膨張因子は 5 乗型の式に従うと結論した。

膨張因子に対するよりよい閉じた式を見つけようとする様々の理論的試みが 1960 年代末に為された。私は Lax、Barrett、Domb によって見出された漸近式  $\alpha^5 = 3.44z$  に強い印象を受けた。

1983 年、私は科学情報研究所から、1963 年に出版された我々の長い論文が科学引用指数 (Science Citation Index) のデータから最も引用された文書の一つであると認定されたという知らせを受けた。この論文につけた Mark-Houwink-Sakurada 定数と非摂動広がり表は 1966 年以来 J. Brundrup と F. H. Immergut によって編集された *Polymer Handbook* に

含まれてきている。

Tamura 研究室のレオメータは期待どおり長持ちし、10 年間に 10 人の学生がそれで遊んだ。私が Hanover から帰った時、Toshiro Masuda は様々の溶媒中でのセルロース誘導体の研究を殆ど終えており、Kunihiro Osaki は定常ズリ中の複素剛性率を測っていた。その測定は同心円筒系でなされ、そのうちの外筒に定常回転と正弦振動との合成運動が与えられる。その測定自身は成功であったが、ズリ速度と周波数の測定範囲は二つの運動の交叉効果のために狭かった。そこで我々はこの研究をやめた。

その時 Osaki はポリ-*cis*-ブタジエン、ポリスチレン、ポリメチルメタクリレート、トリニトロセルロースの溶液で、第 2 法線応力差は第 1 法線応力差の 10% よりも小さいことを確認した。この研究は Coleman と Noll の理論に基いたもので、平行円盤系の法線応力の測定と、Couette 型レオメータでの動的剛性率と定常ズリ応力の測定との比較測定であった。

1963 年、John D. Ferry 教授が米国科学使節として京都大学を訪れ、非常に高粘度の溶媒中における高分子稀薄溶液も粘弾性に関する N. W. Tschoegl との最近の研究の講義をした。Ferry は親切にその溶媒を我々に送ってくれた。それは必然的に分子レオロジーに向かっていた我々の高分子溶液のレオロジー研究にとって実に効果的であった。Ferry は日本レオロジー学会 10 周年記念で、「レオロジー研究は、他の実験情報源からの物質構造についての情報が力学挙動と結び合わされない限り、実際には完全ではない。だから構成方程式のパラメータが物理的意味を与えられている。」と話した。

Osaki, Kannji Kajiwara, Kazumasa Matsushita, Yoshiyuki Einaga は粘度と定常コンプライアンス  $J_e$  の分子量  $M$  と濃度  $c$  への依存性からレオロジー的相図を与えた。十分絡み合った相では、 $J_e$  は  $c^{-3}$  に比例し、 $M$  には独立であった。

Einaga, Shin-ichi Kimura, Osaki が大変形下での高分子濃厚溶液の応力緩和を測定するのに成功したのは 1971 年であった。彼らは時間  $t$  がある値  $\tau_k$  より長いところで歪依存緩和弾性率が次式のように分離できることを発見した。

$$G(t, \gamma) = G_0(t)h(\gamma) \quad (8.2)$$

ここで、 $G_0(t)$  は時間  $t$  の関数である普通の緩和弾性率、 $h(\gamma)$  は歪  $\gamma$  の普遍的関数である。Osaki はその時 Madison にいたので、私は短い論文を *Polymer Journal* に書いた。同じ年の秋、私は Nagasawa が組織した第 19 回レオロジー討論会で講演した。其処では Yamamoto がもう一人の講師であった。私は非線型粘弾性の実験的局面について話し、彼は理論的局面について話した。

(このとき、筆者は倉田先生に最近の文献を集めるよう依頼された。その数はかなりになった。先生は予め「…の 2、3 の研究」という演題をつけておられた。当日、演題を見ると「…の 23 の研究」になっており、項目もきちんと 23 あった。)

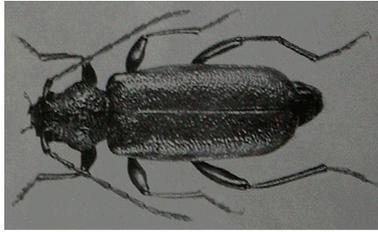
当時東工大の教授であった Toshio Hata の札幌のセミナーで、私は Yamamoto と彼の同僚達に翌年夏に会った。Yamamoto は 1973 年 5 月 14 日急性肺炎のため日野市の石塚病院で彼岸に去った。

倉田先生は<sup>3</sup> 田村研究室の古き良き思い出として、

「田村先生は口癖のように学生に向かって「教えることがない」と言っておられたが、昨今のように学問や技術の進歩が速いと、ことにその思いが身にしみる。考えてみれば、「教えることがない」と言うことは、教師と学生の間、研究者と研究者の関係に移すと宣言するのに等しい。私は、田村先生が口でそう言われるだけでなく、いかに大きな自由度を弟子たちに与え、そしてたとえば私が非線型粘弾性というテーマに行き着いたとき、いかにしっかりとそれを受け止めてくださったか」と想起されている。

倉田先生には二つの趣味があった。その一つはカミキリ蟲の蒐集、もう一つは俳句である。いずれも趣味といえば叱られそうな程、専門家の域に達したものであった。

カミキリ蟲については、670 種と云われる日本産の種の殆どを網羅し、外国産を含めて 2000 種のコレクションは見事なものである。一度、「カミキリ屋になると、その前線の北上に随って日本列島を沖縄から北海道まで行くから、1 年を棒に振るものだ」と言われたことがあるが、先生が経歴の中で 1 年を棒に振られたかどうかは判らない。1968 年 8 月 12 日には静



*Palaeocallidium kuratai*

図 8.4 倉田先生発見のカミキリ蟲の新種

岡県の南アルプスの二軒小屋で新種を採集しており、通例で Kurata の名が冠されている。また、専門誌にそれに関する論文がある。

晩年の倉田先生は殆ど俳人といった生活ぶりだった。俳号は「風花」で、辻田克己宗匠の主宰誌「幡」に(義務として?)毎月10句を投句されていた。

「春眠の戸を貝ほどに開けしまま」 風花

の一句が飯田蛇笏の「俳句歳時記」に収められている。

倉田道夫先生は2004年9月10日、京都市西京区大枝西新林町の自宅で急死された。突然の病(虚血性急性心不全)であった。その日は「幡」への投句の締切日であったようで、句作のためか自宅近郊の西山を散策されて帰宅された、その夜のことだった。



図 8.5 Wallace Hume Carothers (1896/4/27–1937/4/29)

## 8.2 Wallace Hume Carothers

Wallace Hume Carothers は 1896 年 4 月 27 日米国 Iowa 州 Burlington で産まれた。<sup>4,5</sup>

彼の父方の祖先はスコットランドの血統で、アメリカ独立戦争の以前に Pennsylvania 州に住みついた。彼らは農民で職人であった。彼の父 Ira Hume Carothers は 1869 年 Illinois 州の農場で生まれ、19 歳のとき田舎の学校で教えていた。後に彼は商業教育の分野に入り、45 年間教師としてその仕事に従事、Iowa 州 Des Moines の州都商業大学 (Capital City Commercial College) の副学長を務めた。Wallace Hume Carothers はその家系の最初の科学者だった。

母方の先祖はスコットランドーアイルランドの家系で、彼らもまた大部分農民、職人であった。彼らは音楽をおおいに愛した。これは Carothers が持っていた音楽への強い興味と称賛を説明する。彼の母、Iowa 州 Burlington の Mary Evalina McMullin は彼の初期の人生で、力強い影響と指導を及ぼした。

Wallace Carothers は 4 人の子供の最年長だった。彼には 1 人の弟 John

と2人の妹 Isobel、Mary があった。彼の教育は Iowa 州 Des Moines の公立学校で始まった。両親は彼が5歳のときその町に引っ越していた。ここでは彼は真面目な生徒として知られていた。1914年彼は North 高校を卒業した。成長途中の少年として彼は勉学と同様遊びにも熱意を持っていた。彼は道具や機械類を楽しみ、多くの時間を実験することに費やした。彼の学業は完全さに特徴があった。高校の学友は、彼が復唱するよう要求された時、彼の答えは注意深い準備がしてあったことを示していたと証言する。課題を未完のままに残したり、不注意なやり方でしたりしないということは、彼の習慣であった。一つの課題をし始めるということはそれを完遂するということであった。

Carothers は1914年の秋に父の圧力で父が副学長であった州都商業大学 (Capital City Commercial College) に入り、1915年7月に会計学と秘書学の課程を卒業した。平均よりもかなり短期間であった。彼は科学コースを追うために1915年9月に Missouri 州 Tarkio にある Tarkio 大学 (Tarkio College) に入った。それと同時に商学科の助手としての地位を受け入れた。彼は2年間その職を続けた後、入学時から化学が専門であったにも拘わらず、英語の助手になった。世界大戦の間、化学科主任の Arthur M. Pardee 博士は他の研究所に呼ばれており、Tarkio 大学は化学に完全な知識を備えた教師を保証することができなかった。Carothers はその前に提供された全ての化学のコースを取っていたので、その研究所を引き継ぐように任命された。彼は僅かな肉体的欠陥で兵士としては拒絶されていたから、3(junior)–4(senior) 回生の間その職を務めるのは自由であった。彼の4回生 (senior) の間に、彼のクラスに4人の化学を専門とする4回生がいて、彼らの全てが後に国内あるいは国外の大学 (university) で研究し、博士号の仕事の完遂したのは面白いことである。今日彼らは、学部生として彼らが Carothers による鼓舞と指導力に多くを負っているという事実を表明している。

Carothers は大学に入るとすぐに化学と物理学に興味を持ち、それは続いた。彼は学業成就で速やかに級友を引き離れた。学生として彼は円熟した分別を示し、いつも級友から例外的人物と見なされていた。課題に拘わらず彼はいつもクラスの中で最も聡明な学生であった。彼は教育費用の大部分を自分で稼ぐ経済的必要があった。しかし、彼はいつも他の学生達と

付き合う時間を持った。平均的学部生の騒々しい熱狂には殆ど関心を示さなかったが。大学 (college) での最後の2年間、彼は時間とエネルギーを自由に与えた多くの学生オフィスの仕事をした。

科学の学士号を得て1920年にTarkio大学を離れ、彼はIllinois大学の化学科に入学した。彼はそこで1921年の夏に教養学修士になる要件を満たした。Tarkio大学での以前の彼の教師がその当時South Dakota大学の化学科主任をしており、分析化学と物理化学のコースを扱う若い教師を望んでいた。彼がCarothersに1921–1922年の学期間その地位を保証したのは幸運であった。Carothersは彼の学位研究を完成するのを可能にする十分な予算が保証されるという意図のみを持ってSouth Dakotaへ行った。しかし、彼のコースの注意深く適切な準備、および彼の指導下の学生達の世話は彼が非常によい化学の教師になりうることを示した。彼は静かで几帳面な研究者かつ学者であり、講師として力強くはなかったが、学生達との接触では注意深く系統的だった。彼は常に割り当てられた仕事に適切な準備を要求し、大部の学生の業績を得ることができた。

教師の仕事と同時に彼はいくつかの独立の研究問題を展開し始めた。彼は特に価電子についてのIrving Langmuirの1916年の論文に興味を持ち、それが有機化学において持つ意味合いを研究することを望んだ。その考えを追求して彼は実験室研究を行い、それは彼の最初の論文として*Journal of the American Chemical Society*: “*The Isosterism of Phenyl Isocyanate and Diazobenzene-Imide.*” に報告された。まだ学生であった間に出版された彼の第二の独立論文は“*The Double Bond.*” についてであった。その中で彼は実行可能な基礎にたった有機化学への最初の明白で確固とした電子理論の応用を呈示した。彼は二重結合の電子特性を記述した。本質的に彼の議論にはそれ以来この特別な課題について書かれた全てが含まれていた。

かれの経歴におけるこの段階でも、教えることは彼の得意ではないことは明らかだった。文字通り彼は予備の時間の全てを彼が興味を持つようになった研究課題に費やした。South Dakotaで新しく見つけた彼の多くの友人達は、彼の研究への絶え間ない刻苦勉励から幾分でも彼をリラックスさせようと試みた。しかし効果はなかった。彼は、研究室のなかで研究の価値があるとして彼に起こった多くの事柄に突き動かされているように見

えた。

彼は 1922 年 Ph. D. の学位を完成するために Illinois 大学に帰り、1924 年それを受けた。彼の主要な研究は有機化学であった。Roger Adams 博士の指導下での学位論文は、「白金酸化物、白金黒でのアルデヒド類の触媒還元について、および様々な有機化合物の還元におけるこの触媒の推進物と毒の効果について」であった。彼の副専攻 (minor) は物理化学と数学であった。彼は彼のコースの全てとかれの初期の業績を特徴づける研究において同じ輝きを披瀝した。有機化学に特化していたけれども、彼は物理化学者達によってその分野を主専攻とするどの学生よりもより広範な物理化学の知識を持っていると考えられていた。1920–1921 年の間彼は 1 学期間無機化学の助手の職を、1 学期間有機化学の助手の職を持った。1922–1923 年彼は研究助手であり、1923–1924 年 Illinois の化学科によって提供されていた最高位の賞である Carr Fellowship を受けた。これらの 2 年間彼のセミナー報告は彼が化学の課題を広範に把握していることを示した。彼の学生仲間達が彼の助言と助けを求めた頻度は彼の卓越した能力を示していた。卒業時には彼はスタッフに、これまで博士の学位を受けた最も輝かしい学生の一人と考えられた。Illinois 大学化学科におけるスタッフのひとつの空席は 1924 年秋に彼を有機化学の助手として任命することを可能にした。その職で、彼は 2 年間異常な成功を続け、有機定性分析と 2 つの有機実験コース、一つは医学進学生のためのもの、もう一つは化学の学生用のもの、を教えた。

1926 年 Harvard 大学は有機化学の助手を必要とした。国内の様々な大学からの候補者を注意深く探した結果、Carothers が選ばれた。その新しい地位で、彼は最初の年実験有機化学のコースと構造化学の上級コースを教え、2 年目には初等有機化学の講義と実験指導をした。

Harvard 大学の学長 James B. Conant は Carothers が助手であった当時有機化学の教授であった。彼は Carothers について次のように云う：

「Carothers 博士が Harvard にいたのは全く短すぎた。化学科のメンバーだった短期間の間に彼は同僚と学生との両方に大きな印象を与えた。彼は大きなクラスに非凡な初等有機化学を提供した。彼は科学の会合においてさえ公に話すことをいつも嫌っていたけれども、彼の気後れは教室



図 8.6 寛いている Carothers

においては消えているようにみえた。彼の講義は秩序だっており、興味深く、その僅かだけが化学の経歴を辿る計画を立てていた学生集団によって熱狂的に受け取られた。研究において、Carothers 博士は当時でさえ、後の研究を特徴づける高度の独創性 (originality) を示していた。彼は踏み固められた道筋や有機反応の普通の解釈では決して満足しなかった。重合と高分子量物質の構造に関する彼の最初の考察は彼が Harvard にいた時に始まった。de Pont 社の研究所の重要な地位を受け入れての教授会からの辞職は Harvard の損失であり、化学の得点 (gain) であった。Wilmington での新しい条件の下で、彼は大抵の大学の研究室では困難あるいは不可能であろう規模で研究を行う便宜を持った。しかしながら、大学にいる我々はいつも何時の日にか彼が大学の研究に帰ってくるだろうという希望を心に抱いている。彼の死で、工業界の化学と同程度に大学の化学も厳しい損失を被った。」

1928 年、du Pont 社は中央研究所、Delaware 州 Wilmington の the Experimental Station で基礎研究の新しいプログラムに乗り出す計画を完成させていた。Carothers は有機化学の研究を主宰するよう選ばれた。彼が

大学の地位を去るという決定は困難なものだった。最初彼は「私は能力が減退するノイローゼを患っており、そちらではここよりももっと深刻なハンデキャップになるでしょう。」と言って du Pont 社の申し出を断った。この告白にも拘わらず、du Pont 社の執行責任者 Hamilton Bradshaw は Harvard に行き、Carothers に決心を変えるように説得した。彼の初任給は月額 500 ドルで、それに比べて Harvard での月額は 267 ドルであった。

新しい地位は研究のみを要求し、訓練された研究者達を助手として提供した。それは大学生生活の自由を賄って余りあり、彼は受け入れた。その時から死ぬまで彼の成し遂げたことは数多く、意義深いものであった。彼は手がけたそれぞれの問題における重要な点を認識する稀な資質を持っており、彼の結果を最も明らかで正確なやり方で呈示する異常な能力は、明確さと理解へと導いた。それら 9 年間に彼は有機化学の理論と商業的に重要な物質に導く発見とに対して多くの主要な貢献を成し遂げた。du Pont 社の化学ディレクター Elmer K. Bolton 博士は Carothers について次のように書いている：

「du Pont 社が化学部門の中で有機化学の基礎研究のプログラムに乗り出した時に、Carothers 博士はその活動を指揮するように選ばれた。それは Harvard 大学と Illinois 大学から最も高い推薦を受けたからで、将来の発展に対して異常な可能性を持っていると考えられたからであった。彼の指揮の下に彼自身が選択した問題について研究する訓練を受けた優秀な化学者の小集団が置かれた。9 年間にわたって繰り広げられた彼の研究の結果は傑出した科学的興味のあるものであり、商業的に重要な基本的な新しい展開の基礎を置いたような会社にとって大きな価値があると考えられたものであった。

Carothers との付き合いで、我々は彼の知識の広さと深さにいつも感銘を受けた。彼は彼の直属の指揮下の人々に創造的的刺激と指導を与えただけでなく、応用研究に従事する部門の化学者達にも彼の知識を自由に与えた。加えて、彼は聡明な実験者であった。彼の個人的な特質に関して、彼は控えめで、欠点と言ってよいほどにでしゃばらない、不平を言わない、疲れを知らぬ研究者であった。彼は自分の研究に深く埋没していて、彼の協同者達に大いに尊敬されていた。しかしながら、彼は精神状態を患ってい



図 8.7 Carothers の冷延伸

た。それは後年悪い健康状態となって現れ、最良の医学的忠告や治療、友人や協同者の絶え間ない努力に拘わらず次第に悪くなっていった。彼の死は化学特に化学部門にとって大きな損失であった。私の判断では、彼は du Pont 社がこれまでに雇用した最も輝かしい有機化学者の一人であった。」

Carothers は 1928 年 2 月 6 日 du Pont Experimental Station で研究を始めた。Emil Fischer 博士が達成した質量 4200 を越える分子量の高分子の合成が彼の最初のゴールだった。1928 年夏までに Carothers は Ph. D. 化学者と 2 人のコンサルタント、彼の学位指導者 Rper Adams 博士と Illinois 大学時代での有機化学の教師 Carl Marvel 博士から成る小さいスタッフの研究室を立ち上げた。これらのトップの科学者が働く研究室は “Purity Hall” として知られるようになった。1929 年夏までに “Purity Hall” が 4000 を越える分子量の高分子を造れなかったのは落胆であった。

1930 年 1 月 Elmer K. Bolton 博士が化学部門の副化学ディレクターになり、Carothers の直属の上司となった。Bolton は 1930 年中に実際的な結果を出すよう望み、その望みはかなえられた。Bolton は合成ゴムを作るという目的を持って、アセチレン高分子を調べるように Carothers に頼んだ。1930 年 4 月 Carothers のスタッフの一人 Arnold M. Collins 博士クロロプレンを単離した。その液体は重合してゴムに似た固体物質を生成し

た。この生成物は最初の合成ゴムで今日ネオプレンとして知られている。

同じ年、Carothers のチームのもう一人のメンバー Julian Hill 博士が 4000 を越える分子量のポリエステルを作る試みの研究を再開した。彼の試みは間もなく大きな成功を収め、彼は約 12000 の分子量の合成高分子を作り出した。この高分子量はその熔融高分子を延伸して繊維状紐にすることができた。スーパーポリエステルを科学者達に書かれた最初の合成絹がこのようにして造り出された。

ポリエステル類とポリアミド類は段階成長 (step-growth) で形成される縮合重合高分子の例である。Carothers は段階成長重合の理論を考え出して、平均重合度をモノマーの高分子への変換率 (収率) に関係づける Carothers の式を導いた。その式は高分子量に対して非常に高い収率が必要であることを示す。

彼はまた分子蒸留器中、減圧下でグリコールと酸を結合させて強く弾性のある合成繊維を作った。不幸にもその繊維は商品化されなかった。それは熱水中でねばねばした塊に戻ったからである。Carothers は数年間高分子の研究を投げ出した。

1931 年 Carothers は Whiskey Acres として知られるようになった Wilmington の家に 3 人の du Pont の科学者とともに引っ越した。だから彼は世捨て人ではなかった。しかし彼のウツ状態はルームメイトが参加する全ての活動を彼が楽しむのをしばしば妨げた。親しい友人 Frances Spencer への手紙で彼は言った: 「化学以外の私の経験について報告することは多くは無さそうです。私は今 3 人の学士達と田舎に住んでいます。彼らは社交に気が向いていて、全員山高帽子と白いネクタイを着けて出かけて行きましたが、私は昔の習慣でむっつりと家で座っております。」この時点から、Carothers は常に時計の鎖につけた青酸化物のカプセルを持っていた。

Carothers は彼の高い人物評を維持するのに必要な公の演説を嫌っていた。友人 Wilko Machetanz への 1932 年 1 月の手紙で彼は述べている: 「私は休暇中 New Haven まで行き、有機シンポジウムで講演をした。それはかなりよく受け取られたが、その前の週にはそれが台無しになるに違いないという予想があってその場合に対する私の神経を鎮めるためにかなりの量のアルコールに頼る必要があった。私の神経質さ、不機嫌さ、精神の

動揺は時間が経つに連れて悪くなっていく。飲酒に頻繁に頼ることは何の永久的な改善ももたらさない。たった今は1932年は私にとってかなり暗そうである。」

1932年 Carothers が雇われたときの合意が Bolton 博士によって修正された。“Purity Hall” は「我々の研究の究極の対象と会社の利益とのより密接な関係を効果的にする」ことに今や焦点を当てるだろう。本質的にそれは予算が純粋研究から実用研究に移されることを意味した。Carothers は自分自身を巧みな商用研究者とは見ていなかった。彼は基礎研究は du Pont の利益に矛盾しない2つか3つの案件に限るということを提案した。

この時期 Carothers の個人的生活は忙しかった。彼は既婚の夫人 Sylvia Woore と不倫の関係を持っていた。彼女は1933年夫との離婚の書類を交わした。同じ時、彼は彼の両親の家計の問題に悩んでおり、彼らを Wilmington に連れてくることを計画した。この引越しから情緒的に派生する物事について考えることなしに、彼は Experimental Station から約10マイルの Aden に家を買ひ、両親と一緒にそこへ引っ越した。彼はその時37歳だった。両親とのかかわりは間もなく緊張状態になった。彼は今や独身になった Sylvia Moore と未だ逢っていた。勿論彼の両親はその関係に強い不承認を示した。家庭内に漂う緊張感を見て、両親は1934年の春に Des Moines へ戻った。

1934年 Carothers は再び繊維に注意を向けた。今やそのチームはグリコールをアミンに置き換え、ポリアミドと呼ばれる型の高分子を作った。それらの物質はグリコール類を用いて形成されたポリエステルよりもずっと安定であった。ポリアミドが水素結合を通して結晶領域を形作る能力はそれらに力学的性質の向上をもたらした。したがってそれらは日常の用途に対して実用的な合成絹を作るかもしれない。彼の研究は多くの新しいポリアミドの発明という結果になった。このプロジェクトの実験室の仕事は W. R. Peterson と Coffman の両博士によって行われた。後に Gerard Bercher 博士がその研究に割り当てられた。

Carothers が消えたのは、ナイロンの最終的な発明に先立つこの生産的な研究期間、1934年の夏であった。彼は仕事に来ず、誰も彼の居場所を知らなかった。彼は Baltimore の John Hopkins 大学と関連する小さな精



図 8.8 Carothers (最初に Nylon を重合した Jullian Hill の娘と)

神医学診療所 Phipps Clinic で見つかった。明らかに彼は酷いうつになったので、Baltimore まで運転し精神科医に相談した。その医者は彼を診療所に入れた。

診療所から開放されてすぐ後、Carothers は du Pont に復帰した。Bolton は Carothers に実行可能な繊維に至るであろうポリアミドについて研究するように指示した。Berchet はその仕事のための実験室員になった。1935年2月28日彼は半オンスの高分子を作った。それはポリアミド 6-6 と標識された。これが最終的にナイロンとなる物質だった。それは高融点のために研究するのが難しかった。しかし Bolton はこのポリアミドを商業的に開発する一つとして選んだ。彼は George Graves 博士を Carothers と一緒にそのプロジェクトで働くように選んだ。最終的に Graves はポリアミドプロジェクトのリーダーとして Carothers に取って代わった。加えて、多くの化学者と化学工学者がポリアミド 6-6 を実行可能な商業製品に洗練する為に働いた。

Carothers の人気は急速に広まった。彼の同僚のみならず世界中の化学者によって彼の助言が絶え間なく求められた。1929年彼は *Journal of the American Chemical Society* の Associate Editor に選出された。1930年に

は *Organic Syntheses* の編集者になった。彼はアメリカ化学会の有機部会の会合に活発に参加した。彼は様々な化学グループの前で話すようにしばしば招待された。1935年彼は John Hopkins 大学の夏のコロッキウムで「高分子および重合理論」の講演をした。同じ年彼は London の Faraday Society でも同じ課題で話した。彼の論文はその課題についての最も卓越した呈示の一つと考えられた。彼の業績は 1936年4月30日の the National Academy of Sciences への選出によって認められた。彼はその組織によって選出された工業界初めての有機化学者であった。1928–1937年の間いくつかの大学の地位が彼に提供された。しかし彼は彼に業績への機会を与えた会社に最後まで留まることを選んだ。

人生の極めて初期に彼は書物への好みを示した。「ガリバー旅行記」が少年を魅了した時から、「マークトエインの本」、「エジソンの人生」を通して、英文学の巨匠まで、彼は偉大な読者だった。彼は何か価値ある訓練の下で獲得したであろう歌声を持っていた。特に音楽における技術的訓練をしたのではないけれども、彼は巨匠達の愛好者で、彼らの作品の多くの使い込まれたレコードの蒐集物をもっていた。

Carothers は情緒的で、寛大であり、謙虚であった。彼は愛すべき個性を持っていた。人々のグループの中では彼は寡黙であったけれども、個人と対した時彼は輝かしい会話者で、すぐに彼の幅広い教育を開陳し、現代の生活の全ての問題についての情報の広い蓄積、政治、労働問題とビジネスの批判的分析、それと同様音楽、美術、哲学を話した。繊細な肉体でもって彼は極度に敏感な性質で周期的なうつ病に悩んでいた。それは彼が年を取っていくに連れてますます深刻になった。

1936年2月21日、Carothers は Delaware 州 Wilmington の Helen Everett Sweetman と結婚した。彼女の父 Willard Sweetman は会計士で、母は Bertha Everett だった。その家族は英国－ウェールズ人の血統であった。彼は彼女とは 1934年以來デートをしていた。Carothers 夫人は 1933年に Delaware 大学で化学の学士号 (Bachelor) を受けていて、1933–1936年の間デュボン (du Pont) 社の化学部門の特許部に雇われていた。

National Academy of Sciences に選出されたという榮譽にも拘わらず、1936年6月まで Carothers はうつを断ち切ることができず、彼を仕事から

妨げた。6月始め彼はやむを得ず、高名な精神病院 Pennsylvania Hospital の Philadelphia 研究所に入った。そこでの彼の精神科医は Kenneth Appel 博士だった。1ヵ月後彼はその研究所を出て友人達と一緒に Tyrolean Alps へハイキングに行くのを許可された。その計画は彼が Roger Adams 博士、John Flack 博士と2週間昼間のハイクをすることだった。彼らが去った後、彼は留まり続け、誰とも、彼の妻とも話すことなく、一人でハイキングを続けた。9月14日彼は突然 Experimental Station の彼の机に現れた。それ以来 Experimental Station で如何なる実際の仕事も行うとは期待されなかった。彼はしばしば訪問した。彼は妻の要請で再び Whiskey Acre に住み始めた。彼は名声にも拘わらず達成感を感じることができず、アイデアも枯渇したと感じていた。

1937年1月8日妹 Isobel が急性肺炎で亡くなった。彼は、Clara、Lu、Em の三人組 (trio) の Lu としてラジオで名声を博していた妹 Isobel (Mrs. Isobel Carothers Berolzheimer) を特に熱愛していた。彼女の死は彼によるめくような衝撃を与えた。彼は彼女の喪失と決して完全には妥協できなかった。Wallace と Helen Carothers は彼女の葬式に出席するために Chicago へ旅行し、その後埋葬を見るために Des Moines へ行った。彼はなお彼の精神科医 Appel 博士に会うために Philadelphia へ旅行した。その精神科医は Carothers の友人に Carothers は自殺を考えており、彼のケースではそれがありうると告げた。

1937年4月28日 Carothers は Experimental Station へ働きに行った。次の日の29日彼は Philadelphia のホテルの部屋でレモンジュウスに青酸カリを溶かしたカクテルを飲んで自殺した。酸性溶液に青酸化合物を溶かすと毒性の速度と効果を高めることを知っていた。遺書は残さなかった。

彼の死後7ヶ月経った1937年11月27日に娘 Jane が産まれた。

### 「科学研究」

Carothers の初期の科学研究は *isosterism* についての Langmuir の概念の有機化合物への拡張であった。彼はイソシアナート (isocyanate) と azoimide の場合にそれが成り立つことを示した。二重結合の反応は電子理論で解釈された。それ以来その見解は広く認められた。

彼の次の努力は“*negativity*”の概念だけでは有機ハロゲン化物の相対的な反応性を説明できないということを示すのに費やされた。彼は一連のアミン類の塩基性の強さを測った。アルカリーアルキル類の熱分解についての彼の研究は、最も単純な有機陰イオン類の固有の性質に光を投げかけた。

彼が徹底した研究をする位置にあった最初の分野はアセチレン高分子とそれらの誘導体だった。手に入れることができたビニルアセチレンとジビニルアセチレンで、彼はこれらの物質の詳細な研究を完成させた。モノビニルアセチレンに塩化水素を付加してクロロプレンと呼ばれる 2-chloro,1,3-butadiene を生成することが可能であるのは彼の発見である。この物質は構造的にイソプレンと類似しているが、数百倍も早く重合し、以前に知られていた全ての合成ゴムよりもっと優れた生成物を導く。それは延伸した時繊維状配向し、応力から開放された時瞬間的に無定形状態に戻るというゴムの奇妙な性質を示す最初の合成物質であった。脂肪族炭化水素や大抵の化学試薬に対する対抗性で、それは天然ゴムよりも確固として優れていた。さらに、それは太陽光に対してゴムよりも大きな対抗性を持っている。Carothers の研究は du Pont 社の他の化学者や化学工学者による、広い工業的用途を見つける商業製品、ネオプレンとして市場に出される製品の開発に対する基礎を敷いた。

しかしながら、これらの実用的な結果は理論的結果に比べてそれほど重要ではなかった。研究の途中で、クロロプレンの多くの類似物や同族体が作られ研究された。それらの挙動は、ジエンの化学構造とゴムの先駆体としての適合性との関係に光を投げかけた。それらの化合物からの様々な高分子の形成と特性についての基礎的な情報が明らかにされ、それらの構造が明確にされた。ビニルアセチレンの反応性と生成物が形成される機構が詳細に研究された。1,4 付加と  $\alpha,\gamma$  再配列に新しい光が投げかけられた。この分野での彼の研究はアセチレン化学への基礎的貢献であった。

Carothers の最も顕著な科学的業績は線状高分子の研究だった。1928年2月14日に Cornell 大学の John R. Johnson 博士への手紙の中で、Carothers は彼が以前に重合と高分子に対して与えた注意深い考えと研究とを示す記述をしている。それは以下の如くである：

「私が研究を始めようとしている問題の一つは高分子量の物質をうまく処理しなければならないことです。私はこの問題を合成の側から攻撃したい。一部は高分子量で分っている組成の化合物を合成することになるでしょう。Fischer の記録 4,200 を打ち負かすのは全く可能であるように見えます。それを為すのは満足です。ここでは最新で最も強力な道具でそのような物質を研究する便宜が間もなく手に入るでしょう。」

問題のもう一つの面は物質  $x\text{Ax}$  と  $y\text{By}$  の作用を研究することになるでしょう。A と B は 2 価のラジカルで、 $x$  と  $y$  はお互いに反応できる官能基です。A と B が十分短い場合、そのような反応は多くがこの方法で合成されてきた単純な環 (リング) を導くでしょう。それらが長い場合、小さい環の形成は不可能になります。だから反応の結果は大きな環あるいは端の無い鎖のどちらかに成るでしょう。どの反応が起こるかを見つけ出すことができるでしょう。ともかくその反応は高分子量で分っている結合を含む物質の形成に至るでしょう。出発物質として、手に入れられる限り多くの 2 塩基脂肪酸、グリコール類、ジアミン類などが必要になります。もし貴方がそれらの型の化合物の何らかの新しい供給源をご存知なら、それを教えて貰えれば嬉しいです。」

これらの最初の考えは重合の分野における一連の 31 報の論文の出版で最高潮に達した。それらの中で、彼は縮合重合の一般理論と、それまでこの無組織だった分野での使用に適した論理的で系統的な専門用語を提案した。彼の理論の意味するところはポリエステル類、炭化水素類、ポリアミド類、ポリ無水物を取り扱う一連の実験研究によって例証された。それらの研究は高分子量物質の化学構造と物理的性質を関係づける実験材料を与え、セルロースのような天然の高分子の構造に対して今日一般に受け入れられている見解と合う証拠を提供した。それらの研究の中で、新しい手法—分子蒸留—が化学反応の伝播に応用された。

この研究で原理的に新しい一つの方法が多員環化合物の合成のために開発された。いくつかの全く新しい型を含む非常に多数の多員環化合物が合成された。それらの化合物のあるものは麝香に似た香りを持っているか、さもなければ性質が真性の麝香に類似していた。これらの新しい多員環化合物の一つは工業的応用を見出した。大量の実験材料が環形成の容易さと



図 8.9 戦後強くなったもの

化学構造との関係に関する重要な推論を可能にした。彼の寄与は多員環化合物の分野にとって主要なもので、その分野は有機化学において重要さが増していく分野であった。

彼は、構造的にセルロースや絹と類似の高分子を作る方法を研究し、非常に多数のものを合成した。それらの物質は天然繊維に匹敵する強度、配向度、柔軟さを持った最初の完全な合成繊維を構成した。それらの研究は構造、繊維としての性質、他の物理的性質の間の関係に対する理論の展開を可能にした。その研究は輝かしいもので、そのような高分子に対する近年の理解における最も重要な助けであった。この情報と製造方法の僅かな変化による高分子の物理的・化学的性質の変化は、最も確かな工業的応用が利く広範な物質の説明を可能にした。

この研究に基いた結果として、既に du Pont 社の化学者と化学工学者による商業的な展開がなされていた。1938年10月28日、du Pont 社は Delaware 州 Seaford にナイロンと呼ばれる新しい織物用糸を生産するプラントを建設するだろうという声明を出した。その費用は八百万ドルを越えた。それはタンパク質に似た化学構造を持つ繊維形成合成高分子アミドから成っていた。極端な強靱さ、強度、繊維や剛毛、シートのような様々の形に成型される特異な能力で特徴づけられるものであった。絹やレイヨ

ンよりももっと極端に細い単繊維を紡ぐことができる。ナイロンの最も重要な用途の一つは、高度の縫りをかけた糸からの繊細なメリヤス類(靴下)の製造である。この新しい製品で作られた靴下は極端に薄く、高弾性、高強度で、綻びに対するより良い対抗性を持っている。他の用途は縫い物用糸、ニット製品、刷毛用(歯ブラシ用)剛毛、ラケット用紐、漁業用網、細幅織物、ドレス織物製品、ヴェルヴェット、プラスチック類、などである。

## 参考文献

1. “倉田道夫一, *Wikipedia, the free encyclopedia*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/>)
2. Michio Kurata, “*Reminiscences of a Polymer Physicist,*”  
*Report on Progress in Polymer Physics in Japan*, **37**, 1 (1994).
3. 倉田道夫, 「大学での研究利点を生かす」, *高分子*, **33**, 300 (1984).
4. Roger Adams, “*Wallace Hume Carothers,*” in *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, The National Academy Press, Washington, D. C.
5. “*Wallace Carothers, Wikipedia, the free encyclopedia*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/Wallace-Carothers>)

## 9章 電磁気学、統計熱力学

### 9.1 James Clerk Maxwell

James Clerk Maxwell は極めて卓越した理論物理学者である。<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> 参考文献<sup>1</sup> は多くの往復書簡を含み、詳しい伝記を公開している。最も主要な仕事は電磁気学の確立にあるが、同時に気体分子運動論、熱力学、色理論、弾性体力学、幾何学においても重要な業績がある。それらの業績は参考文献<sup>7</sup> に纏められている。また、多くの詩も残している。<sup>8</sup>

#### 9.1.1 生涯

James Clerk Maxwell はよく知られたスコットランド人一族である、Midlothian における Penicuik の Clerk 家の子孫だった。その家系は 16 世紀まで辿ることができる。初代の准男爵はスコットランドの議会で勤めた。彼の長男は学識の或る男で、スコットランドにおける Exchequer の男爵であった。後の時代、一家のメンバー Eldin の John Clerk は海戦で敵の戦線を打ち破る新しい方法を工夫したという栄誉を主張した。その工夫は Rodney 卿によって 1782 年にフランス軍を捕獲した闘いで採用されたと云われる。その海軍戦術家の息子、もう一人の John Clerk は洞察力に富んだ法律家で、治安裁判所の長官になった。彼は気の利いた皮肉な言葉で、Edinburgh の同時代人の間で抜きん出ていた。

James Clerk Maxwell の父は John Clerk といい、Penicuik の George Clerk 卿の兄弟であった。Maxwell 嬢との結婚を通して Clerk 家に入ってきた Kirkcud-brightshire、Middlebie にある田舎の土地 1500 エーカー (6.1 km<sup>2</sup>) を相続する際に彼は Maxwell という苗字を付けた。その不動産に付けられていた条件 (約定) の一つが所有者は Maxwell でなければなら



図 9.1 James Clerk Maxwell (1831/6/13–1879/11/5)

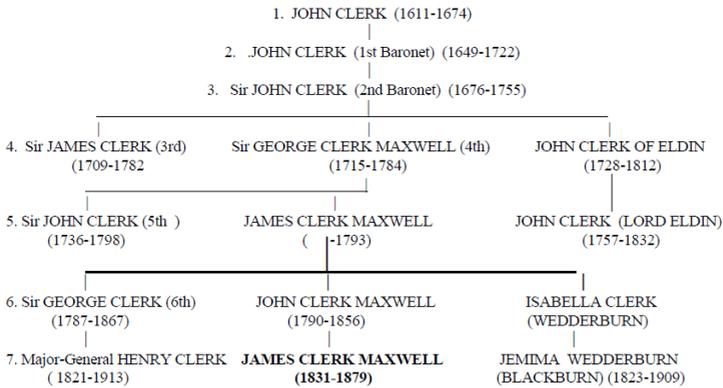


図 9.2 Maxwell 家の家系図<sup>9</sup>

ないということであった。Maxwell 家は貴族院の一員だった。(第 2 代准男爵 John Clerk の兄弟 William Clerk が Agnes Maxwell と結婚して娘 Dorothea を儲けた。John Clerk 卿の息子 George がその従妹 Dorothea と結婚し、Maxwell 家の不動産を相続したがその際 Maxwell の名を付けて Clerk Maxwell を名乗った。) John Clerk Maxwell が榮譽に到達できるエネルギーと精神力を持っていたということではできない。事実、彼はのんきだったが、抜け目が無い知性的な男だった。彼の最も特筆すべき性質は完全な誠実さと極端に慈悲深かさであった。彼は法学と科学の追及に啓発的興味を持っていて、本質的に実用的な精神の傾向があった。大学を離れる時、彼は法律に専念していて、スコットランド勅選弁護士に任命された。しかし、彼はその職業でなんら大きな成功を収めていそうにない。とにかく、田舎での静かな生活は彼の妻や彼自身に多くの魅力を提供したので、弁護士業での彼の見込みを容易に放棄する気にさせた。彼は Northumberland にある N.Charlton の Robert Cay の娘 Frances と結婚していた。彼女は強い良識と意志の強い性格とを持った婦人であった。

彼らが Edinburgh を離れた後で家庭を持った田舎の家は John Clerk Maxwell 自身が設計し、彼の土地に立てたものだった。Glenlair と名づけられたその家は素晴らしい景色に囲まれていた。中でも Urr 川は岩と森の堤を持ち、主要な魅力を作っていた。

James Clerk Maxwell は 1831 年 6 月 13 日 Edinburgh の India 街 14 番で産まれた。

Maxwell の両親は彼らが 30 代の半ばまで出会わなかったし結婚しなかった。それは当時異常なことだった。James Clerk Maxwell が生まれたとき母 Frances は 40 歳に近かった。彼らはそれ以前に娘 Elizabeth を儲けたが、彼女は幼児の時亡くなった。従って James は彼らの唯一の子供であった。

James が幼い時一家は Middlebie の Glenlair へ引っ越した。彼が子供時代の大部分を過ごしたのは Glenlair だった。その心地よい場所における、あらゆる種類の健康的な環境の下でその子供 (Maxwell) は堅固で勇敢な少年になっていった。勉強してなった早熟の賢さは無かったが、彼はなお将来の知的な強さの兆候を示さないでもなかった。彼の周りの現象の原因



図 9.3 Maxwell の生誕地 (Edinburgh)

と関係を調べようとする精神は顕著だった。彼が卓越するようになった後で、彼が子供としてした質問は彼の年代にとって異常な考え深さを示していたことが想い出された。

3歳までに動いたり、光ったり、音を立てたりする物には何にでも疑問を持った：「何が起こってるの？」(“What’s the go o’ that?”) 彼の父が出した義理の兄妹 Jane Cay への手紙に加えられた1節で、彼の母はこの生まれながらの詮索好きを書いている：

「彼は幸せな男です。気候が温和に成るに連れてますます発達しています：彼は扉、鍵、鉤で大きな仕事をします。「どうするのか見せて」(show me how it doos) とは決して口からは言いません。彼はまた、流れや呼び鈴の線の隠された道筋を探求します。水が池から出てくる道、線が壁を通して、…」

Maxwell は読み書きができるようになると、読んだり詩や短い物語を作ったりするのを楽しんだ。彼はまた屋外の活動を楽しみ、優秀な泳ぎ手、潜り手、巧みなアイススケーターになった。幼い時でさえ彼は非常な記憶力を示した。8歳で彼は Milton の長い樂句や典礼詩篇 (Psalm 176 の詩) を完全に朗読することができた。彼は詩篇集の殆どどの樂句に対する章や詩でもすぐ与えることもできた。

幼い少年の能力に気づいて、彼の母 Frances は James の初期の教育に

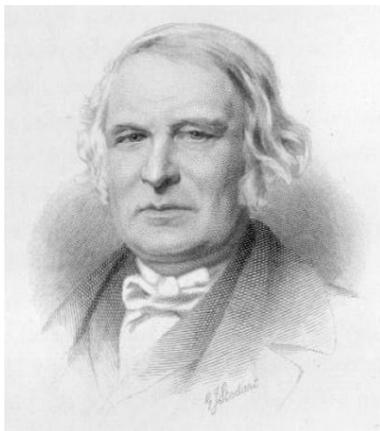


図 9.4 Maxwell の父 John Clerk Maxwell



図 9.5 幼い Maxwell(1834 年、母 Frances Cay と)



図 9.6 赤ん坊の Maxwell



図 9.7 Maxwell の育った家 (Glenlair)



図 9.8 Glenlair(1880 年頃)



図 9.9 Glenlair の前の牧歌的な見晴らし (現在)

責任を負った。ヴィクトリア朝時代にはそれは大いに家庭の主婦の仕事であった。しかし彼女は腹部の癌の病気になった。不成功の手術のあと 1839 年 12 月に死んだ。Maxwell は僅か 8 歳だった。James の教育はそれから John Maxwell と彼の義妹 Jane によって監督された。二人とも Maxwell の人生に枢要な役割を演じた。彼の公式の学校教育は 16 歳の家庭教師の指導下で始められたが、うまくいかなかった。John Maxwell が息子を教育するのに雇ったその若い男については、彼がより若い James を厳しく扱い、彼をのろまでわがままでであると小言を言ったという意外、殆ど知られていない。John Maxwell は 1841 年 11 月その家庭教師を解雇し、しばらく考えた後高名な Edinburgh Academy に James を送った。彼は学期間は Edinburgh の叔母 Isabella Wedderburn の家に泊まりこんだ。そこには彼の描画への情熱を鼓舞してくれた年長の従妹 Jamima がいた。彼女自身有能な芸術家だった。

Edinburgh Academy は大学入学準備学校で、教育は数学、自然哲学、ラテン語、ギリシャ語、倫理学、古典学に重きを置いていた。

父の田舎の土地で孤独に育った 10 歳の Maxwell は学校にはうまく合わなかった。第一学年は満員で、彼は 1 年年長の第二学年に加わるように強いられた。彼の癖と Galloway(スコットランド南西部) 訛り他の少年達に粗野(下品)な印象を与えた。最初に学校に着いたとき手作りの靴とガウン状の上着を身に着けていたことから“Daftie”というあだ名が付けられた。しかし、Maxwell はそのあだ名を決して不愉快には思わなかったようで、長年不平もなくそれを持ち応えていた。彼が Lewis Campbell や Peter Guthrie Tait とであった時、その学校での孤立は終わった。その二人の少



図 9.10 Maxwell 坊や



図 9.11 ヴァイオリン演奏を不思議そうに眺める Maxwell



図 9.12 Maxwell の少年時代 (洗い桶を漕いで家庭教師から逃げる Maxwell)

年は同じ年で、彼ら自身著名な学者になり、生涯の友人になった。

彼の小学校時代の面白い出来事は Campbell 教授の本<sup>1</sup>に与えられている。Campbell は Maxwell の学校友達で、後の人生における親友、絶え間ない文通者であった。Maxwell という人物を知る特権をもつ人々は彼が初めて学校に現れたときのその少年 (Maxwell) に対する Campbell の描像にすぐに気づくだろう。流行というよりも役に立つ手作りの衣服、日常的な学業 (宿題) を初めてした際の彼の意図や困惑を伝えようとする素朴な語り口と奇妙に古風でしかししばしばユーモアのあるやり方、級友達の手のかかる様々の試練の下でのスパルタ的振る舞いを、それは示す。さらに、その少年 (Maxwell) が周囲に馴れ、彼の精神力が彼にとって相応しいものとした学校での位置を速やかに占めたこと、一方彼の表面的なエネルギーは機械の考案や幾何学の作図、歌謡詩を読んだり作曲しようとしたりすること、父にグロテスクに練り上げた縁取りや描画で飾り立てた手紙を送ることに、個人的に喜びを見出していたことをそのスケッチが如何に正確であるかを人々は感じるだろう。

Maxwell は早い年代で幾何学に興味を持ち、正規の教育を受ける前に正多角形を再発見した。しかしながら、彼の才能の多くは気づかれぬまま、彼の 2 年次に学校の聖典伝記賞 (scripture biography prize) を受けたにも拘わらず、学業は芳しくないままに止まった。13 歳で、彼は学校の数学賞メダルを、英語と詩で一等賞を受けた。

彼の学校時代における記録すべき一つの出来事はある種の楕円類を描く



図 9.13 Maxwell の学んだ学校 (Edinburgh Academy)



図 9.14 Maxwell(12 歳頃)

機械的方法の発明だった。その方法の説明は Edinburgh 王立学会の *Proceedings* に印刷されており、彼の出版の最初のものになっている。その課題は著名な James Forbes 教授によってその学会に紹介された。Maxwell はその業務には若すぎると想われた。彼は 14 歳であった。その教授は Maxwell の展開に最初に大きな興味を持った。もう一人の学校仲間であった Tait 教授は、楕円についての論文が書かれたとき、Maxwell は少しのユークリッドと代数を越える数学の教育を受けてはいなかったと述べている。

1847 年 Maxwell は Edingburgh Academy を離れた。

その同じ年 Maxwell は 16 歳で Edingburgh 大学に入り、3 学年間そこに留まった。最初の学期の後 Cambridge 大学に出席する機会があったが、Maxwell はむしろ Edingburgh で学部の全課程を成就することに決めた。彼は Phillip Kelland の数学、James Forbes の自然哲学、Gregory の化学、William Hamilton 卿の論理学と形而上学、Wilson(Christopher North) の道徳哲学の各講義に出席した。Hamilton 卿の講義は彼に強い刺激を与え、彼の嗜好であった思索への愛を鼓舞したが、期待されるように彼の主要な献身を得たのは自然哲学の教授であった。Forbes ほどの優れた人間が若い熱心な弟子達に自然に奮い起こさせた熱狂は個人的な愛着の感情を喚起した。その教授は彼の側でも彼の生徒に特別の関心を持ち、彼の精巧な装置で研究するという異常な特権を彼に与えた。

その実験研究がどのようなものであったか、当時書かれた弾性固体についての彼の論文を熟読すると想像することができる。その論文の中で、彼は光学への応用における彼の理論からの推論を検証するという見解でなされたいくつかの実験を記述している。Maxwell は次の状況によってこの課題の研究に導かれたように見える。彼は叔父 John Cay に連れられて、その名を冠する偏光プリズムの発明者 William Nicol に会い、Nicol によって偏光器中の焼きなましていないガラスの色を見せられた。それは Maxwell に偏光の法則を研究し、偏光子と検光子が単純なガラスの屈折媒体である粗い偏光器を組み立てるという刺激を与えた。この器具で、彼は焼きなましていない(歪が残っている)ガラスの色の帯を得ることができた。彼はそれらを水彩画で紙に写し、Nicol に送った。この単なる少年によって為された実験における意欲的な試みが当然 Nicol によって称賛されたことを見るのは喜ばしいことである。Nicol は直ちに彼のプリズムを 2、3 個彼に



図 9.15 Edinburgh 大学

プレゼントすることによって彼を勇気付け、彼に喜びを与えた。

Maxwell は Edinburgh での授業をそれほど厳しい強制的なものとは思わなかった、そして彼は大学での自由な時間と Glenlair の家に帰ったときは特に自分自身で個人的な勉強に耽ることができた。大学ではとりわけ物理と哲学を勉強した。家では彼は実験室を持ち、間に合わせて作った化学や電磁気の器具で電磁気学や化学についての多くの実験をした。彼が主に夢中になったのは偏光の性質だった。彼はゼラチンのブロックを作り、それに様々な応力をかけ、Nicol に貰った一対の偏光プリズムでゼリーの中にできる色の縞を観察した。Maxwell は物体の中の応力分布を決定する手段である、光弾性を発見した。

18 歳の年、Maxwell は Edingburgh 王立学会の会報 (Transaction) に二つの論文を出した。「弾性固体の平衡について」と題する一つの論文は 1850 年 Edingburgh 王立学会で発表された。それは Maxwell がその学会で発表した 3 番目の論文になっている。それは彼の後の発見「ズリ応力によって粘性液体中に作り出される一時的複屈折」の重要な基礎となった。1 番目は既に述べた。「転がっている曲線の理論 (The Theory of Rolling Curves)」と題する 2 番目の論文は 1849 年個人教師の Kelland によって呈示された。このときもまた Maxwell は若すぎるから演壇に立って自分で発表することはできないだろうと考えられた。

これらの努力をすることができた 19 歳の青年は稀なる独創性と持続する実行力を天から授けられていたことは明らかである。しかし彼の並外れた自己集中は彼に孤独と隔離の習慣へと導いた。その傾向は彼の語り口

と振る舞いの風変わりさを確固としたものにした。彼ははにかみやで、見知らぬ人にはよそよそしく、彼の発言は中身も自分を表現する方法においてもしばしば不明瞭だった。多くの婉曲で予期しない隠喩を繰り返し押し付けた。実際には最も人付き合いが良く、社交を好みさえしたけれども、彼は本質的に無口で遠慮がちだった。Campbell は、そこでは避けるのが難しいと分っていた社交的交わりのために Maxwell が Cambridge での経歴をもっと早くに始めなかったのが悔やまれると考えている。しかしながら、Forbes 教授の器具を使う機会を失って、それにより彼が初期の科学的訓練のおそらく最も価値ある部分を棄てたかどうかは疑問である。

もともと Maxwell は父の弁護士の職業を継ぐべきだと考えられていた。しかしその意図は、彼の嗜好が確固として科学の方向にあることが明らかになるとすぐに取り止められた。このことは、Maxwell の科学と数学の能力を知っている我々によって奇妙に見えるかもしれない。しかし当時科学は約束しうる確かな経歴ではなかったことを想い起こさねばならない。科学に巻き込まれた大多数の人は別の独立した収入源を持ち、聖職者のメンバーであった。事実、科学に引き込まれた人々は科学者とは呼ばれず、自然哲学者と呼ばれた。当時殆どの大学は教授会にただ一人の自然哲学の教授を置いていたのみであった。しかしながら、Edinburgh 大学での3年後ついに Maxwell に父は彼が Cambridge 大学に行くことに同意した。それによって Maxwell はスコットランドを離れて Cambridge に向かった。最初 Cambridge 大学の最も古いカレッジである Peterhouse カレッジで学部の日々を開始し、1850年10月彼は Peterhouse に住み始めた。しかし彼は第一学期間 (the Michaelmass Term) だけそこに住み、同じ年の12月14日 Trinity カレッジに引っ越した。この移動は多分学校長 William Whewell の友人であった Forbes 教授の影響だろう。Peterhouse は小さいカレッジで、大学院の奨学金 (fellowship) の予算が限られていた。ところが Trinity カレッジはずっと大きく卒業後奨学金を得るのがより良い機会を与えていた。Trinity は科学でよい評判をもっていて、科学以外の多くの分野でも優れていた。それは Maxwell の広い興味と能力の範囲とよく合った。

Trinity では彼は Cambridge Apostles として知られるエリートの秘密結社 (elite secret society) に選ばれた。

彼の Cambridge コースに対する予備的訓練は普通の型とはずいぶん離れたものであったことは容易に想像される。実際しばらくの間彼の勉強の計画について現実には何の制限も無かった。他の学業を止めさせてしまう程心を奪われてしまうことは無かったけれども、彼の心は科学へ向かう自然な傾向に従うままにされた。彼はスポーツマンではなく、実際いわゆるスポーツは彼にとって不快だったけれども、彼は田舎の生活を大いに好んだ。彼は良い乗馬の名手であり、水泳が得意であった。

Maxwell は詩の愛好者であっただけでなく彼自身詩人であった。しかし彼は自分の真の天命は科学であって、それらの詩作の努力を単なる気晴らし以外のものとは決して見做さなかった。既にうまくいった努力で刺激された科学への献身、哲学的問題を熟考する傾向、英文学特に英国の詩への執着、特異な強さと純粋さで心に植えつけられたそれらの嗜好は若い Maxwell が Cambridge の経歴を始めた基本的財産であったと云えるかもしれない。これに加えて、彼の科学的読書は既に広範囲で様々であった。彼はそんなに若い人間にとっては真に広範囲な大量の知識を持ってきた。しかしそれはきちんとした彼の個人教師にとってぞっとするほど無秩序の状態であった。

Maxwell の学部での経歴には特に記すべき特徴は何も無かった。より系統的な勉強に都合がよいように、彼の個人的な思索は幾分か将来に取っておかねばならなかった。しかし彼の心は後の年月の研究に向かって堅実に熟しつつあった。Trinity カレッジの学生として、彼が日常接触するようになった人々の中に、その大学で最も輝かしく最も洗練された若い人々が何人かいた。学生 (Scholar) のテーブルの和やかな仲間同士では Maxwell の快いユーモア話が喜んで演じられ、一方 Apostle クラブのもっと選ばれた同人サークルではお互いの教養形成をした。彼は通常の大学コースの線を越えた課題についての評論で、彼の思索への嗜好を演習する場を見出した。それらの評論の作文は疑いなく Maxwell の科学の著述の特徴の一つである文芸的仕上げの基礎を敷いた。

Maxwell の性格のこれらの覗き見は彼が全くの内気さで彼自身の能力に確信を持っていなかったのではないことを我々に信じさせるかも知れない。それはまた Trinity カレッジの校長故 Thompson 博士が与えた説明からも見える。彼は Maxwell がそのカレッジへの移動の許可を個人的に訴



図 9.16 Cambridge 大学時代の Maxwell(1855 年、色コマを持つ)

えてきた時の教師 (Tutor) だった。彼は内気で自信の無い青年のように見えたが、1 束の論文を出して、「多分これらは私が貴方のカレッジに入るのに相応しくないことはないことを示すでしょう」と言って Thomson 博士を驚かせた。

彼は Peterhouse の高名な William Hopkins の生徒になった。Hopkins は数学の天才を育てるのに成功していて、最優等卒業生製造者 (senior Wrangler maker) というあだ名を持っていた。彼の下で勉強コースはより系統的になった。一つの驚くべき特徴が彼の同時代人達によって述べられている。課題が与えられた時いつでも彼は図形 (diagrams) に頼った。彼の仲間の学生達は一連の解析によってもっと容易にその問題を解くことができたのであるが。このやり方の多くの例証は彼の著述から採ることができる。しかし真実はそれが彼の科学の疑問に対する心理的な態度のただの一面であった。そういう面が彼に記号や数式を信頼することの代わりに一つの明確な考えからもう一つの考えへと進んでいくようにさせた。

学部時代に Maxwell が出版した数理科学への貢献は殆どなく、あまり重要ではない。しかし彼は規定の Cambridge コース以外の領域で彼の研究

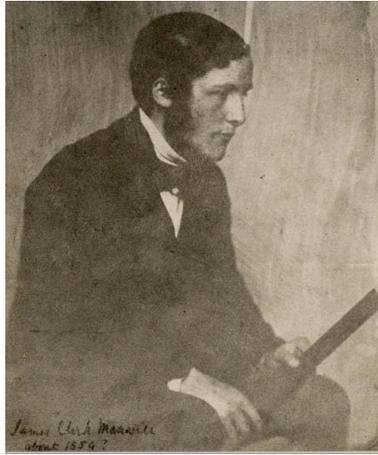


図 9.17 Maxwell(23 歳?)

を行う時間を見出した。Stokes 教授 (Sir George Gabriel Stokes) の講義には常連の出席者だった。弾性固体についての論文から、彼は Cambridge に入る前に Stokes の著述のいくつかを知っていたことがうかがえる。1850 年以前に Stokes は流体力学と光学に対する彼の最も重要な貢献を出版していた。そして大学で Maxwell の 9 年上級であった W. Thomson 卿は、他の目立った研究の中で、熱伝導と静電気との間の数学的類似に特に注目していた。彼がその実験研究を注意深く研究した Faraday ならびにこれらの人たちが彼の心に力強い指導的影響を及ぼしたのは疑いがない。

1854 年 1 月 Maxwell の学部の経歴は終わった。彼は第二位優等生 (second Wrangler) だったが、より正確な Smith 賞 (the First Smith's Prize) の審判では第一位 (first Wrangler) の Edward Routh と第一位を分け合った。Maxwell は卒業後も Trinity に残ることを決め、fellow 職に応募した。1855 年 10 月彼は Trinity の Fellow に選ばれ、カレッジの講師の一員になった。通常よりも早かった。

彼は Trinity の Fellow 職の試験で課せられた束縛から解放されるや否や即座に元来の研究に向こう見ずに飛び込んだ。彼が取り扱うのを渴望していたいくつかの疑問があった。まず最初に彼は純粹に幾何学的問題であ



図 9.18 Cambridge 大学の Trinity カレッジ

る、曲げによる表面の変容についての研究をやり遂げた。次の 1855 年 3 月彼はこの論文を Cambridge 哲学学会に提出した。今回は Maxwell 自身が講義を行った。この時期、彼は色の混合の定量的測定と色盲の原因への探求に着手した。学部生の中に彼は電気の研究に対する時間を見出していた。これは既に実りをもたらし、その課題についての彼の重要な論文、Faraday の力線に関する論文という結果になった。

1855–1856 年に出版された論文の数とその重要さはその期間の彼の刻苦勉勵の証拠物件である。それらの労働と熱狂して入ったカレッジの講義の準備とで、彼の心は完全に占められた。彼は水力学と光学の講義ならびに試験用紙を準備するよう依頼されていた。その仕事は適していた。彼は多くの価値ある友人達を形成し、彼をその大学に執着させる多彩な科学的、文学的興味を持った。それにも拘わらず、Aberdeen にある Marischal カレッジの自然哲学の講座が空席になったとき、Maxwell は候補者の一人になった。この経過は多分彼の父の望みに従って取られたのであろう。なぜならスコットランドのカレッジの長い夏休みは一年の半分を連続して彼が父と一緒に Glenlair で住むのを可能にするだろうから。彼はその教授職を獲得したが、彼をそれに応募するのを急がせた親切な意図は彼の父の死で打ち砕かれた。父は 1856 年 4 月 2 日に Glenlair で、Maxwell の選考結果を知らずに亡くなった。にも拘わらず Maxwell は Aberdeen の教授を受け入れ、1856 年 11 月 Cambridge を去った。



図 9.19 Maxwell(30 歳)

Trinity の講師から Aberdeen の教授への変化が思慮深いものであったかどうかには疑問がある。利点は実験室を持つことと長い連続した夏の休暇だった。主に比較的若くて訓練のない少年から成る演習教室、力学と物理学の基礎の労働は Maxwell が特に適したい仕事ではなかった。他方 Trinity のような大きいカレッジには学部の学生達の間、その大学の最も前途有望な若い数学者の幾人かを持ち、彼が前もって自分で導いたものを教えることによって、彼の独創的天才と広範な知識を評価できる学生を持つことに失敗することは在り得ないだろう。

1856 年 Maxwell は Marischal カレッジで自然哲学の教授としての義務に入った。25 歳の Maxwell は Marischal の他のどの教授よりも 10 歳半若かったが、教室主任としての新しい責任に従事し、シラバスを工夫し講義を準備した。彼はその地域の労働者カレッジでの週 1 度の講義を含めて、週 15 時間の講義を自分自身に課した。彼は学年の 6ヶ月間を Aberdeen に住み、夏の間を父から相続した Glenlair で過ごした。

1857 年彼はそのカレッジの校長 Reverend Daniel Dewar と友人になり、彼を通して彼の娘 Katharine Mary Dewar と出会った。彼らは 1858 年 2 月に婚約し、1859 年 6 月 2 日 Aberdeen で結婚した。その結果として彼



図 9.20 Maxwell 青年

は Trinity カレッジの Fellow を止めた。しかし後に彼は Cayley と同じ時に名誉 Fellow に選ばれた。Katharine についてはあまり知られていないが、Maxwell より 7 歳年上だった。

1856–1860 年彼はなお色の感覚の課題に活発に従事していた。その研究で彼は色の箱 (colour-box) として知られている巧妙な実験道具での新しい測定法という貢献をした。彼の能力と時間との最も深刻な消費は土星の環の安定性についての研究でなされた。それは 1857 年に判定される Adams 賞論文に対する試験官によって選ばれた課題で、次のように広告された:

「この問題は環の系が正確にあるいは非常に近似的に土星と同心で、その赤道面の廻りに対称に配置されているという仮定、および異なる仮説が環の物理的構成に関してなされうという仮定で取り扱われるだろう。(1) それら(環)は剛体である; (2) それらはえきたいであり、部分的に気体である; (3) それらは物質的に密着していない多量の物体から成っているということが想定されるかもしれない。この問題は力学的な安定性の条件がこの惑星と環との間の相互の引力と運動によって満たされるかどうかをこれらの仮説を個々に確かめることによって答えられると考えられるだろう。

また、明るい環と最近発見された暗い環の両方の出現がどの仮説によって最も満足に説明されるかを決定する試みが為されることが望ましい。そして現代と以前の観測との比較から起こったと想定される形の変化が帰せられるべき何らかの原因を示すことが望まれる。」

ここでは Maxwell は提案された理論を導き出す際に膨大な量の労力を費やし、次の結論に達したことを述べるだけで十分である：「存在しうる唯一の環の系は無限量の結合していない粒子から成るもので、粒子はそれらのそれぞれの距離に従って異なった速度でその惑星の周りを廻っている。それらの粒子は一連の狭い環の中に配置されているかも知れないし、もしくはお互いに不規則に動き回っているかも知れない。最初の場合、系の崩壊は非常にゆっくりしたものだろう 2 番目の場合、もっと速いだろう。しかしその過程を遅らせるかも知れない狭い環の中での整列に向かう傾向があるかもしれない。」

衛星の環の中で起こる振動波を扱っているこの研究の一部は巧妙な機械装置によって例証され、Edinburgh 王立学会で展示された時大きな称賛を浴びた。この論文は賞を保証した上に、科学者達の間にもその著者の大きな信用を得た。それは George Airy 卿によって彼がこれまで見てきたもっとも素晴らしい数学の物理への応用の一つであるとして分類された。

全体として見かけ上規則的で一様となっている土星の環を形作っているのは粒子の不規則な運動であるという示唆が為されたが、それは Maxwell を気体の動力学理論の研究に導いた。それに対する彼の最初の貢献は 1859 年 British Association で発表された。それに近い年、Bernoulli の理論が Herapath、Joule、Clausius によって復活され、彼らの書いたものが Maxwell にその課題に注目を引かせただろうということを心に留めて置かねばならない。

1860 年 King's カレッジと Marischal カレッジは現在 Aberdeen 大学として知られる一つの機関に統合された。そこで新しい自然哲学の講座が創られ、King's カレッジの前の教授で Maxwell より年長者だった David Thomson の任命によって占められた。物理学者として Maxwell とは比較にならないけれども Thomson 教授は非凡な人物だった。彼は特異な性格と教授会の管理に優れており、二つのカレッジの融合をもたらすのに優れ



図 9.21 机に向かう Maxwell

ていた。彼はまた称賛すべき講師、教師で、スコットランド北部における科学教育の水準を引き上げるのに多くのことを為した。避けられないことではあったが、理事達によって為されたその選択は Maxwell は教師として失敗したということを見せかける効果を持った。しかしながらそのような意味合いを支持する証拠は無さそうである。逆にカレッジの彼の最後の学期で彼の教室に出席した学生の数から判断すると彼は教授として非常に人気があったようである。このことは彼がその後間もなく London にある King's カレッジの自然哲学および天文学の教授に選ばれたという事実によって実証される。

Maxwell は Edingburgh 大学の Forbes 教授の後釜に応募したが成功せず、その席は Tait にいった。しかし代わりに London にある King's カレッジの自然哲学の教授が与えられた。1860 年夏に罹った天然痘による殆ど死にかけた危篤状態から回復した後、Maxwell は妻 Katherine とともに南の London に向かった。彼の回復は Katherine 献身的な看護のおかげであった。

その新しい任命は彼に彼自身の科学の分野の人々、特に Faraday とのより多くの接触をもたらすという利点を持っていた。Faraday は Maxwell



図 9.22 Maxwell 夫妻 (1869 年)

より 40 歳年長で毫碌の兆候があり、二人の関係は密接とは書き得ないが、彼らはお互いの才能を強く尊敬しあっていた。Faraday の電気の研究と Maxwell 自身の研究とは密接に結びついていた。1862–1863 年彼は絶対的尺度で電気抵抗を決定し、電気測定を満足すべき基礎の上に置くために British Association の委員会によって組織された実験に参加した。W. Thomson 卿による計画で King's カレッジの実験室で行われた実験で、二つの長い一連の測定が年を継いで行われた。最初の年、研究メンバーは Maxwell、Balfour Stewart、Fleeming Jenkin であり、2 年目は Charles Hockin が Balfour Stewart の代わりになった。この委員会の仕事は報告書の形で British Association に伝達され、後に Fleeming Jenkin によって 1 冊の本として再出版された。

Maxwell は 1860 年から 1865 年まで King's カレッジの教授であった。彼の人生のこの期間は彼の最も重要な論文を生産したことで際立っている。色についての 2 番目の論文が 1860 年に現れた。それは彼の世界初の天然色写真という結果となった。同じ年、気体の動力学理論に関する彼の最初の論文が出版された。1861 年には物理的力線に関する論文が来て、1864 年に電気に関する偉大な論文—電磁場の動的理論—が来た。彼は 1861 年



図 9.23 Maxwell 夫妻の油絵 (作者不詳)

の論文で電磁場の性質を調べ、磁束の微少な回転しているセルから成っている電磁誘導の概念的モデルを提示した。1862年に出版された論文の最初では静電気学と変移電流を論じ、最後の部分では磁場内での偏光面の回転を取り扱った。1865年には彼は気体の動的理論に専念していたに違いない。何故なら二つの重要な論文が次の年に現れたからである。最初は気体の粘性についての Bakerian 講義で、次は気体の動的理論に関する論文であった。その中で彼は現在次元解析として知られる、物理量を定義する体系を提案した。

そのように多くの価値ある研究の生産と、その年の9ヶ月間彼の注意を要求する教授職の義務が合わさって引き起こした心の歪が、1865年ついに彼が彼の講座を辞任して田舎に引退することで解決するという際に彼に影響したようである。このすぐ後彼は深刻な病になった。回復すると彼は気体の動的理論についての研究を続けた。続く2、3年の間彼は Gelnair で静かな隠遁生活をおくった。生活の変化は British Association の会合で毎年 London へ行くことと、1867年のイタリア旅行であった。彼はまた数回 Cambridge の数学の卒業試験 (Mathematical Tripos) の第一次試験官 (Moderator) をし、冬にはその大学で数週間の居住を必要とする公職をし

た。それらの年の間の彼の主な仕事は今日有名な電気と磁気の本 (treatise on Electricity and Magnetism) の準備だった。それは 1873 年に出版された。彼はまた 1871 年に出版された熱についての本を書いた。

1871 年 Maxwell はしぶしぶながら田舎での閑居を止め、新しい経歴へ入るよう説得された。最近に Cambridge 大学は特に熱、電気、磁気の課題の育成と教育のために、物理科学の教授職を創設していた。その目的を促進するために、大学の理事 Devonshire の第 7 代公爵 (the 7th Duke) は寛大にも研究所を建設して必要な器具を備えた。Maxwell はそのように作られた新しい講座を占め、その研究所の立ち上げを指揮監督するように招聘された。彼は初代 Cavendish 物理学教授になった。

創設者に因んで名づけられたその Cavendish 研究所は 1874 年まで実際の研究用には完成しなかったが、現在偉大な物理学者を輩出した大学の立派な中心となっている。その年の 6 月それはその理事によって形式的に大学に寄贈された。建物自身といくつかの部屋の整備は主に Maxwell 自身によって素晴らしく設計された。しかし器具の蓄積はその理事の寛大な意図よりも少なかった。この欠点は、最良の製作者によって作られ、Maxwell が自分で指示した改良を加えた器具のみを入手するという彼の切望に帰せられねばならない。そのような欠点は取り除くのに時間がかかったが、その後大いに解消され、器具は必要な場合常に在庫に加えられた。

Maxwell が行った主な仕事の一つは、その大学の試験で良い位置を占めた後彼の生徒になった若い教養学士を指揮監督、指導することだった。特質を持った幾人かの生徒がその教授 (Maxwell) の指導の下で価値のある実験を行った。しかしながらその数は最初少なかったことを認めねばならない、しかしそれは多分長年の伝統から予期されることであったろう。Maxwell はそれらの生徒達に非常に親切で助けとなった。彼は彼らと長い会話を持ち、彼の心の蓄積を彼らに開き、彼らが何を試みるべきで何を避けるべきかヒントを与え、彼らを悩ます実験場のトラブルに対する巧妙な処方箋を常に用意していた。彼の生徒の一人によると、いつも楽しく教訓的なこれらの会話はそれ自身豊富な教育で、どの教師によってもめったに与えられない感謝すべき愛情によって生徒達の心に入っていた。

講座の義務を果たす傍ら、Maxwell は大学の一般業務の遂行、特に数学と物理学の勉強コースの調整に活発に参加した。



図 9.24 Cavendish 研究所

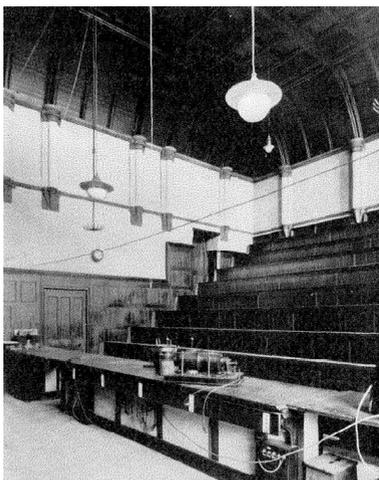


図 9.25 Maxwell の講義室 (Cavendish 研究所、Cambridge)

Maxwell が数学卒業試験 (Mathematical Tripos) の試験官 (Moderator) として Cambridge に戻った 1866 年に先立つ数年間、その大学の研究は大学の塀の外で進んでいる大きな科学的動きとの接触を失っていた。最も流行している課題のいくつかは今の世代にとって殆ど興味がなく、熱、電気、磁気のような知識分野卒業試験 (Tripos) から除かれている一方、科学的興味や実際の成果で実りのない数学的瑣末なことに卒業候補者達は時間とエネルギーを浪費しているという声高な不満が聞かれ始めた。Maxwell は温かく改変への動きに入っていた。1866 年とその翌年の彼の疑問によって彼はその試験に新しい命を吹き込んだ。彼は 1873 年に導入された新しい仕組みの輪郭をひくことに活発に参画した。とりわけ彼の書いたものによって、彼は大学の若手メンバーに力強い影響を及ぼし、今実行されてきているその変革を引き起こすのに大いに役立った。

Cambridge での最初の 2、3 年間 Maxwell は電気と磁気についての彼の偉大な本に最後の手をいれ、出版社に渡すことで忙しかった。その本は 1873 年に出版された。それに先立つ 2 年間それは彼の注意の大部分を占めていたようである。というのはその期間に彼が出した 2、3 の論文は主にその内容の一部になる課題に関係しているからである。この出版の後彼の科学誌への貢献はより多くなった。そのうち気体の動的理論にかんするものが多分最も重要である。彼はまた非常に多くの短い論文と、*Nature* と *Encyclopaedia Britannica* に現れた総説を書いた。それらの評論のいくつかは科学的課題の魅力的な解説であり、いくつかは同時代の著者の批判で、その他は同じ研究分野の研究仲間の短い称賛の伝記である。

彼が長く従事し、非常に興味があることが分かったけれども多くの労力を要した仕事は、伯爵の子息 (Hon.) Henry Cavendish 卿の電気の研究 (“Electrical Researches”) の編集だった。1879 年に出版されたこの仕事は Cavendish の人気を増大する効果を持ち、鋭敏な物理学者が電気の理論で、特に電気量の測定で為したことは疑いのない進歩であることを明らかにした。その本には多彩な価値或るノートが豊富で、それらは Cavendish の見解と結果を現代 (その当時) の理論と方法の光で検証している。特に価値のあるのは電導体とコンデンサーの電気容量の決定に応用された方法である。Cavendish 自身その課題で数学的および実験的性格のかなりの巧みさを示していた。

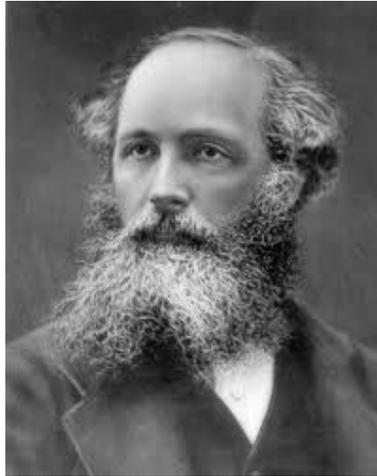


図 9.26 Maxwell(40 歳)

Cavendish の論文との関係で Maxwell が行った仕事の重要性はそれらへの彼の序文からの次の抽出で理解できるだろう:

「Cavendish は物体の電荷についての彼の実験の完全な記述を用意しており、綺麗な複製を書くという労苦さえ取っていたけれども、そしてこの全てが 1774 年以前に為されたように見え、彼は 1781 年まで電気の実験をし続けて 1810 年まで生きたけれども、彼は自分の原稿を自分で持ち続け、それを決して出版しなかったという事実を説明するのは幾分困難である。

Cavendish は出版よりも研究をより大事にした。彼は彼自身以外の誰も認めず、気づいてさえいない困難を綺麗にするために最も労力の要る研究を行った。彼の追及の結果は、成功した時には、彼にある程度の満足を与えたことを我々は疑うことができない。しかし普通の科学者達の場合一般に彼らの結果の出版を保証するような発見を他の人々に伝えようという欲求は彼には起こらなかった。Cavendish のそれらの研究が如何に完璧に他の科学者達に知られないままに留められたかは電気の外伝によって示されている。」

自分自身を 1 世紀前の物理学者の位置に置き、彼の実験の正確な意味を確



図 9.27 Maxwell の終の棲み処

かめることは幾分困難なことであると考えられるだろう。しかし Maxwell は最高度に興奮してその仕事に取り掛かり、彼自身を Cavendish のやり方と完全に同一化することに成功した。彼は、Cavendish が彼の時代以来為されてきた電気科学における発見のいくつかを既に予期していたことを示した。Cavendish は電気容量 (Electric Capacity)、比誘導電流 (Specific Inductive Capacity) の概念をつくり、測定した最初の人であった。彼はまたオームの法則を予想していた。

Cavendish の論文集が整理されたのは Maxwell が電気と磁気についての自分の本の新版の準備に取り掛かるよりも早くはなかった。しかし不幸にも 1879 年の夏季に彼の健康が衰えた。彼が彼の田舎の家の爽やかな空気へ帰った時、彼は間もなく回復するだろうという希望が抱かれた。しかし彼は夏の数ヶ月を通して改善の兆しなく細々と生きながらえた。彼の

精神力は徐々に沈んで行った。彼は最後に彼の古い学生仲間 Sanders 教授に、2、3 週間以上は生きられないだろうと告げられた。最後の頼みの綱として、彼がお気に入りの内科医 Dr Paget の世話になるために、彼は 10 月 Cambridge に連れ戻された。しかしながら彼の病気には何も為されなかった。痛みを伴う病気の後、彼は 49 回目の年 48 歳で 1879 年 11 月 5 日死んだ。母と同じ歳、同じ腹部の癌であった。Maxwell はスコットランドの Galloway にある Douglas 城の近く、Parton Kirk に葬られた。

Maxwell は彼の力の全盛のときに、彼が発展に多くを捧げた科学教室が新規の発見で日々拡張されていた時期に、そのようにして断ち切られた。彼の死は科学にとって、大学にとって償いのない損失と悔やまれた。彼の友好的な性質は彼の天才が称賛されたのと同じ程度に例外なく尊敬された。

### 9.1.2 科学

James Clerk Maxwell の論文は参考文献 7<sup>7</sup> に纏められている。

#### 色理論

今日 James Clerk Maxwell は電磁気方程式で最も知られているが、生存中は色の知覚の研究でより知られていた。Newton が色理論を展開した最初であった。彼はプリズムを使って色を虹状のスペクトルに分解し、白色はそのスペクトルの色全ての組み合わせである事を示した。彼はまたどの色もスペクトルの色を正しい比率で混合することによって得られうると仮定した。しかし美術家は一般に彼らが望む色をたった 3 つの色 (普通赤、黄、青) の顔料を混ぜることで得ていた。19 世紀の初期、英国人医師で物理学者の Thomas Young は人間の眼はそれぞれが特別の色に感受性を持つ 3 つの受容体 (receptor) を含有していると仮定した。彼はまた、頂点に原色を置いた三角形で色を表すという考えを示唆したが、その考えを追及していくことはしなかった。Maxwell は Edingburgh 大学にいたとき (1848–1850) Forbes 教授の研究室で色の研究を始めた。彼らはどんな色も 3 原色の混合で得られうだろう事を示そうと試みた。3 つの色付けをし

た扇形を持つ円盤を回転することで、様々な色が造り出された。円盤が十分速く回転した場合、眼はそれらの色を分離することができず、円盤は一様な色であるように見える。彼らは赤、黄、青で色付けした扇形を用いて白色を得ようと試みたが、それら3つの色のどのような組み合わせも白色を造り出さなかった。彼らはまた緑を得ようとする試行で黄と青の扇形を用いた。彼らが驚いたことには、でてきた色はくすんだピンクであった。Maxwell は間もなくそれらの食い違いの理由を見つけ出した。色付きの光を混合すると絵の具顔料を混ぜ合わすのとの間には基本的な違いがある。絵の具顔料はある色を吸収する傾向があり、人は吸収されなかった複数の色から成る色を見る。だから、絵の具顔料の混合は引き算の過程である。しかし、色付き光の混合は足し算の過程である。Maxwell は赤、緑、青の扇形に行き着いたとき、彼は白色とその他の様々な色を造ることができた。彼はまたどのような3つの色も、それらの色の組み合わせとして白色が得られさえすれば、原色として用いられうることを示した。

Maxwell は後で回転円盤を改良し、中心により小さい扇形付き円盤を付け加えた。そうすることで彼は円盤の中心部と外側の色を容易に比較することができた。この工夫は普通 Maxwell の独楽(コマ)と呼ばれる。Maxwell は黒の扇形を加えることによって内部(中心部)あるいは外側の色ならびに強度を変えることができた。例えば様々な白色の強度(灰色)は黒と白の扇形を使って得ることができた。

Maxwell は、色が純粋に観察している対象の物理的性質ではなく、それは光が眼で如何に処理されるかにも依っていることに気づいた。彼は眼が3つの型の色センサーを持っているに違いないという Young に同意した。しかしながら彼は、それらのセンサーの各々の一つの色に最も感度が良いけれども、それらは近い色にも低い程度には感度があると信じた。Maxwell はまた、ある色は少なくとも一つの色原色の負の量を持つことによってのみ調合されうるということに気づいた。彼はそれを彼のコマを用いて、内部あるいは外部の円盤上で調合されるべきその色を原色の一つと組み合わせ、それから円盤の他の部分で残る2つの原色の組み合わせを調製することによって達成した。

色コマは有用であったけれども、手に入る紙の色は比較的少数に限られることに Maxwell は気づいた。彼はプリズムの組み合わせを用いてスペク

トルの色を作り出す色箱 (color box) を考案した。複数のプリズムがスペクトルの色を空間に拡げ、望む色とその量が正確に検定された調整スリットで制御された。複数の色が一連の鏡とレンズで組み合わせられた。彼はこれらの箱を使ってずっと正確な測定値を得ることができた。彼はまた混合した色とそれらの波長とを関連付けることができた。非常に多数の物質の測定値をとって、彼は一般的な型の色盲の原因を決定できた。色盲の人々は3つの色受容体 (receptor) の1つ、通常赤の受容体が欠けていた。彼は網膜を見るための最初の光学器具を発明しさえした。Maxwell はまた最初の天然色写真を作り出したという栄誉を荷っている。彼は赤、緑、青のフィルターを用いて写真を撮った。彼はそれらの写真を同じフィルターを用いて投影して写真を組み合わせた。

色知覚への Maxwell の最大の貢献は、色とそれらの組み合わせを記述する数学モデルの展開である。Maxwell は3原色を平面状の3つの点、三角形の頂点で表わした。彼はその三角形の面にはない原点を選んだ。任意の色は三次元空間中の点で表わされる。各点は原点からその点へのベクトルを持っている。Maxwell モデルでは、色は力のベクトルが力学で組み合わせられるのと同じように組み合わせられる。任意の色に関連するベクトルは3原色に関連するベクトルの線型結合で表わされる。色に関連するベクトルは方向と大きささを持っている。その方向はそのベクトルの延長が色三角形の面と交叉する点で決定される。この交叉する点を彼は色の「質」と呼んだ。一つの色に関連するベクトルの長さとその「質」点に関連するベクトルの長さとの比は色の「量」と呼ばれた。「質」は色の陰りあるいは淡さの尺度で、「量」は強度の尺度である。

### 気体分子運動論

Maxwell がもし科学に対する他の貢献をしていなかったとしても、気体の運動論についての彼の研究はあらゆる時代の最も偉大な物理学者の一人として彼を確立させていたであろう。彼は物理に統計法則を導入した最初の人物であった。それは統計力学、熱力学、量子力学などの分野に統計の使用をもたらした。気体の運動論は18世紀の数学者 Daniel Bernoulli の研究に始まる。彼は気体はあらゆる方向に動いている多数の粒子から成ると提案した。加えて彼は期待によって表面に及ぼされる圧力はそれら

粒子の衝撃によること、熱は単にそれら粒子の運動エネルギーであることを仮定した。その理論は他の人々によって発展し、期待の性質の多くがそれを基礎にして説明された。しかし未だなお説明されねばならない主な困難が一つあった。その理論が常温で発生する圧力を記述するためにはそれらの粒子は非常に速く動かねばならない。そうすると何故気体はそんなにもゆっくり拡散するのだろうか。例えば、一部屋を通しての匂いのスピードは遅い過程である。1859年 Maxwell はドイツ人物理学者 Rudolf Clausius の論文を読んだ。彼は拡散の遅い速度は粒子間の数多い衝突によっていると提案した。その論文は Maxwell にその課題への興味を起こさせた。Maxwell は標準的な Newton 力学を用いて全ての運動と衝突とを記述するのは不可能であることを認識した。そこで彼は速度分布に対する統計法則を導いた。彼はある任意の座標系に関する3つの成分で各粒子の速度を表わした。その粒子の速度はその3つの成分の二乗の和の平方根になるだろう。彼は速度の3つの成分は統計的に独立で、各成分は同じ確率分布を持つと仮定した。その分布を彼は Gaussian すなわち正規分布に採った。粒子速度の分布  $f(v)$  はそれ故次式となる:

$$f(v) = Av^2 e^{-\alpha v^2} \quad (9.1)$$

この分布は速度の Maxwell 分布あるいは Maxwell-Boltzmann 分布として知られている。Maxwell はその運動理論の定式化を、予期しない結果すなわち気体の粘度は圧力と密度の双方に独立であるということを導くために用いた。同じことは熱伝導に対しても真であった。それらの結果を彼は後で実験的に確かめた。Maxwell の研究は Ludwig Boltzmann という若いオーストリア人物理学者を鼓舞し、彼は Maxwell とともに気体の運動論をさらに発展させた。

### Maxwell の悪魔

「maxwell の悪魔 (demon)」は、Peter Tait の本「熱力学」の原稿を査読のために受け取った Maxwell が Tait に受け取りを送った際の手紙の中で現れた仮想的な人物に対して、Maxwell の友人 William Thomson (Kelvin 卿) によって与えられた名前である。この仮想的創造物は熱力学第二法則

(この法則の結果の一つは仕事の消費なしに冷たい物体から熱い物体へ熱が移動することはありえないということである。) にからむ思考実験での主役である。Maxwell 自身の言葉によるこの思考実験は次のとおりである:

「さて A と B を隔壁で仕切られた 2 つの容器 (部屋) として、それらに衝突したり並進したりして攪乱状態にある弾性分子を入れて置こう。A と B の中の粒子の数は等しいが、A のなかの粒子が最大の運動エネルギーを持っているとしよう……。私は、A の中にはあらゆる大きさの速度があり、B の中でも同じであるが、速度の二乗の和のみが B の中よりも A の中の方が大きいことを示した。いまひとつの分子が……隔壁中の穴を通り抜けることを許され……どんな仕事も失われたり獲得されたりしなかったらそのエネルギーのみが一方の容器から他方へ移されるだろう。

さてある特定の人物 (being) を想定しよう。彼は単純な検査で全ての分子の経路と速度を知っており、質量のないスライドを使って隔壁中の穴を閉じたり開いたりすること以外何の仕事もできない。彼にまず A の中の分子を見させ、ひとつが B の中の分子の平均二乗速度よりも小さい二乗速度でやって来るのを見たら、穴を開けてそれを B に行かせる。次に彼に B の中の分子を観測させ、速度の二乗が A の中の平均二乗速度よりも大きい分子が穴の方向にやってきた時スライドを引いて A の中へ行かせる。その他の全ての分子に大しては穴は閉じたままにして置く。

そのとき A と B の中の分子の数は最初と同じであるが、A の中のエネルギーは増加し、B の中のエネルギーは減少する。熱い系はますます熱くなり、冷たい系はますます冷たくなるが、なお何の仕事もなされておらず、ただ非常に知覚の鋭い器用な人物の知性が採用されただけである。」

これは物理における思考実験の最初の例である。Maxwell の意図は第二法則に反証することではなく、その法則が統計的正確さのみをもっているもので、個々の分子には適用できないことを示すことにあった。

## 電磁気学

Maxwell の最も偉大な科学上の業績は確かに電磁気学の一般理論の展開とその理論を電磁波の存在の予言に使ったことであつた。この業績は何

時の時代についても最高の物理学者の一人として彼を Newton や Einstein と並び立たせている。Maxwell の発見に導く多くの電気と磁気に関わる重要な発展があった。1784 年 Charles-Augustin de Coulomb は二つの小さい荷電物体の間の引力あるいは反発力はそれらの間の距離の逆二乗で変化することを発見した。1799 年 Alesandro Volta は連続した電流源を供給する塩水中の鉛と銀の電池を開発した。1820 年 Hans-Christian Oersted は電線中の電流が近くの羅針盤 (compass) の針を偏向させることを観測した。Oersted の発見を聞いて 1 週間もしないうちに、André-Marie Ampère はフランス科学アカデミーに論文を提出して、この現象のより完全な取り扱いを与え、2 本の電線を通る並行電流は、電流が同方向なら互いに引き合い、逆方向なら互いに反撥することを示した。その次の年 Michael Faraday はこれらの結果に基いて電気モーターの原型を作った。1827 年 Ampère はコイルに流れる円環電流はそれらコイル間の距離の逆二乗で変化する引力あるいは反発力を持つ磁石として振舞うことを示した。1831 年 Faraday は電線の環を通して変動する磁束はその電線に電流を発生させることを発見した。Faraday はその結果を発電機の製作に用いた。Maxwell の生存中に多くの科学者が電気と磁気の一般理論を定式化しようと試みていた。電荷間あるいは磁極間の力は、質量間の重力による引力に対する Newton の法則に類似した逆二乗則に従うので、大抵の研究者達は遠距離力モデルでこの瞬間的な作用に近づこうとした。Newton 自身は、離れた物体がそれらの間に何の明確な繋がりもなしに瞬間的に相互作用できるという事実困っていたというのは面白い。彼はかつて云った:

「重力が、一つの物体が真空を通して離れたもう一つの物体に何の仲間もなしに作用するというようなものであることは、… 私にとって全く馬鹿げたことである。有能な思考を持つ人は誰もそんな罫に嵌まることはできないだろうと私は信じる。」

しかしながら、彼はその方法を用いて惑星や他の物体の運動を予言することに非常な成功を成し遂げたから、科学者達はすぐにその哲学的困難を忘れ去ってしまった。Ampère と Weber は Maxwell の時代で多分最も影響力のあった二人の科学者で、電気と磁気への遠距離アプローチで Newton 作用に関わっていた。しかし、Faraday は違った考えを持っていた。彼は

力が離れたところで瞬間的に現れることを信じられなかった。彼はその中間の間に何かが起こっているに違いないこと、力は磁極あるいは電荷の間を伝達されているのに違いないと考えた。彼は紙の上に撒かれた鉄くずが紙の下の磁石で形成する図柄に非常な感銘を受けた。彼はそれらの粒子で形成された線を力線 (*lines of force*) と呼んだ。

Faraday は空間を通して作用する電場と磁場の考えを導入した。彼はこれらの場の相互作用を通じて力が伝達されると感じた。Faraday は数学の訓練を受けていなかったため、彼の考えは科学界には受け入れられなかった。しかしながら、Maxwell はそれらの考えに好奇心をそそられ、それらを数学的基礎の上に置くことを試みた。このトピックスを扱った彼の最初の論文は「Faraday の力線について」と名づけられた。彼はコピーを Faraday に送った。Faraday は誰かが彼の考えに興味を持ったことを喜び、次の返事を送った：

「貴方の論文受け取りました。大変ありがとうございます。私は、貴方が哲学的真実への興味からそれをやったことを知っていますから、貴方が力線に力線について言及したことに対して大胆にありがとうございますと言っているのではありません。しかし貴方はそれが私に感謝すべき研究であること、そしてそれが私に考え続ける大いなる元気付けを与えることを考えているに違いありません。私はその課題に関係して為された数学の力を見て驚かされました。そしてその課題がそんなにもよく支持されることを訝しく思いました。この郵便でもう一つの論文を貴方に送ります。貴方がそれに対して何を言うかと考えています…」

Maxwell は London にいた間 Faraday と多くの会話をもち、この年若い科学者に大きな尊敬を育んだ。Faraday は Maxwell という力量を持った若い科学者が彼の考えに関心を持ったことに嬉しくなった。

1861 年 Maxwell は「物理的力線について」と題する 2 部から成る論文を *Philosophical Magazine* と *Journal of Science* に提出した。この論文のさらに 2 つの部分が 1862 年に加えられた。その論文で彼は球状の遊び車で離されたちっぽけな回転セルの網目を含む概念的な弾性モデルを開発した。そのモデルで彼は電気と磁気について知られている全ての振る舞いを複製することができた。しかし Maxwell はこのモデルが単に類推であり、

現実の機構を表わしてはいないことを知っていた。事実、Maxwell は実際の機構が我々の把握できる能力を超えているかも知れないと覚っていたようである。その弾性モデルを洗練するかわりに、彼は暗箱的 (black-box) 方法に向かった。そこでは背後にある機構よりも、結果としての力 (場) の間の数学的関係により多くの強調が為された。彼はとうとう電場と磁場に基いたモデルを開発することができた。それを現在我々は Maxwell 方程式と呼んでいる。それらの式の誘導において Maxwell はベクトル解析の発展している分野に大いに頼った。実際 Maxwell はベクトルの微分演算子の一つに “curl” (rotation) という新語を付けた。Maxwell はもともと電気と磁気のポテンシャルを含む 8 つの式で彼の結果を述べたが、Oliver Heaviside が後にそれらをよく知られている 4 つの式に圧縮した。

$$\operatorname{div}\mathbf{E} = 4\pi\rho \quad (9.2)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (9.3)$$

$$\operatorname{curl}\mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (9.4)$$

$$\operatorname{curl}\mathbf{B} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{J} + \frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (9.5)$$

ここで、 $\mathbf{E}$  は電場ベクトル、 $\mathbf{B}$  は磁気誘導ベクトル、 $\rho$  は自由電荷密度、 $\mathbf{J}$  は電流密度である。“div” という語は発散の略称で、ベクトル場が平均してある点から内側あるいは外側を志向する傾向の尺度を与える微分演算子を表わす。もし発散が正なら、その点に源が存在することを示す外向きの傾向がある。発散が負なら、その点に吸い込み口 (sink) があることを示す内向きの傾向がある。発散が 0 のとき、その点には源も吸い込み口もないことを示す。“curl” という語はベクトル場がある点の廻りに巻きつく傾向の尺度を与える微分演算子を表わす。その符号は巻きつく向きが時計回りかあるいは反時計回りかを示す。1 番目の式は Gauss の法則と呼ばれ、点電荷に対する Coulomb の逆二乗則の一般化である。2 番目の式は磁気の発生点源や消滅口がないことを述べる。磁力線は決して 1 点で発生したり終わったりしない。常に閉じたループを形作る。3 番目の式は磁気誘導についての Faraday の法則を述べたものである。4 番目の式は電流による磁気類似の力に対する Ampère の法則を述べており、それに Maxwell の

主要な貢献である付加項を含んでいる。この式中の付加項（第二項）は変移電流と呼ばれ、変動する磁場が電流を生成するのと類似の方法で、変動する電場によって発生させられる電流を表わしている。Maxwell はこれらの式に現れる定数  $c$  が測定された光の速度に非常に近いことを示した。Maxwell はこれらの式を用いて  $E$  と  $B$  双方の波動方程式を導いた。それらの結果で Maxwell は電磁波の存在を予言し、光がそのような波であることを想定した。電磁波は電場と磁気誘導はの双方を含んでいるは特筆しておくべきである。純粋な電波あるいは磁気の波は存在しない。さらに、全ての電磁波は光の速度で進む。Maxwell によって加えられた変移電流の項はこれらの結果の導出に決定的である。変移電流が測定されていなかった時でも Maxwell はそれらが存在するに違いないと感じていた。アメリカ人物理学者 Henry Rowland は 1875 年この付加項を直接測定した。Heinrich Hertz が光以外の電磁波を作り、測定したのは Maxwell の死後 8 年の 1887 年だった。Maxwell 方程式は、Newton の法則が力学で演じているのと類似の役を電磁気学で演じている。Newton の法則は Einstein の相対性理論で修正されねばならなかったが、Maxwell 方程式は不変に留まっていることは面白い、事実、Maxwell 方程式は Einstein の相対性理論への主要動機の 1 つであった。Faraday によって導入され Maxwell によって洗練された場の概念は今や物理のあらゆる分野で重要な役を演じている。1873 年 Maxwell は 2 巻の有名な本「電気と磁気の専門書」(“*A treatise on Electricity and Magnetism*”) を出版した。

## 熱力学

1873 年 Josiah Willard Gibbs は彼の最初の熱力学の論文「流体の熱力学における図形的方法」(“*Graphical Methods in the Thermodynamics of Fluids*”) を出版し、その中で Gibbs は物体の状態を表わすためにエントロピーと体積の 2 つの座標を用いた。同じ年後で出された 2 番目の論文「物質の熱力学の性質の表面の手段による幾何学的呈示の方法」(“*A Method of Geometrical Representation of the Thermodynamic Properties of Substances by Means of Surfaces*”) の中で、Gibbs は 3 番目の座標、物体のエネルギーを付け加えた。

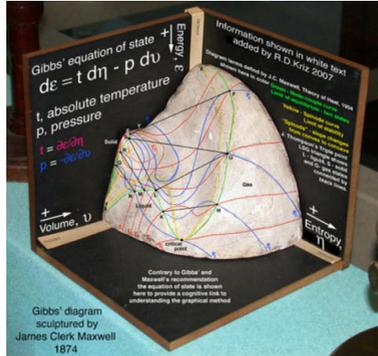


図 9.28 Maxwell の 3D 熱力学表面の彫刻 (1874)

Maxwell は 1873–1874 年頃 Gibbs のグラフの論文 2 報を受け取った。Maxwell は Gibbs の幾何学的方法に非常に惹かれたので、冬中を費やして水のエネルギー—エントロピー—体積表面に対するモデルを作った。Maxwell の“熱力学表面”は水を対象として物質の理論的な様々の存在状態、気体、液体、固体、臨界状態を、エントロピー ( $x$  軸)、体積 ( $y$  軸)、エネルギー ( $z$  軸) のデカルト座標系上にマップした有名な 3 次元石膏彫刻である。多くの方はそれを「Maxwell の熱力学表面」といい、Maxwell はそれを「Gibbs の熱力学表面」といい、他の人はそれを「水の彫像」という。

Maxwell はその像を 3 個 (6 個ともいう) 造り、そのうちの 1 つを Yale 大学の Gibbs に送った。それは現在 Yale 大学物理学教室の外の陳列ガラス棚に展示されている。他の 2 つは Cambridge 大学に残され、現在 Cavendish 研究所の博物館に保管されている。



図 9.29 Ludwig Eduard Boltzmann (1844/2/20–1906/9/5)

## 9.2 Ludwig Eduard Boltzmann

Maxwell の生涯と科学に関する事柄はこの章末に掲げる文献<sup>10, 11, 12, 13</sup>から知ることができる。

Ludwig Boltzmann は 1844 年 2 月 20 日オーストリア帝国の首都ウィーンで生まれた。彼は 3 人の子供のうちの最年長だった。彼の父 Ludwig Georg Boltzmann は帝國および王室税務官であった。ベルリンからウィーンへ移ってきた祖父は時計職人だった。母 Katharina Pauernfeind は Salzburg の出身だった。Boltzmann は子供時代安全、豊かで快適な生活を送った。彼は初等教育を彼の両親の家で個人的な家庭教師から受けた。彼は上部オーストリアの Linz の高等学校に入った。Boltzmann は勤勉で、例外的な 1 つの学期と除いて常にクラスの最優等生であった。若者として彼の興味は文学、蝶の蒐集、音楽に広がっていた。短期間の間彼は有名な作曲家 Anton Bruckner にピアノを習った。Boltzmann が 15 歳のとき、父が亡くなった。

Boltzmann は 1863 年からウィーン (Vienna, Wien) 大学で物理学を勉強



図 9.30 Boltzmann の生家 (Wien3 区 Landstrasser Hauptstrasse 62)

し始めた。教師の中には、初めて分子のサイズを測定した Josef Loschmidt、輻射が物体の温度に依存する法則を発見した Joseph Stefan、Andreas von Ettingshausen、と Jozef Petzval がいた。Boltzmann に Maxwell の研究を紹介したのは Stefan であった。Stefan は Boltzmann に電気に関する Maxwell の論文のいくつかを与え、彼が英語を勉強するのを助けるために英文法の本を与えた。この期間の間 Boltzmann の主要な指導者だった Loschmidt と Stefan は彼の親密な友人になった。大学のキャンパスから離れた個人の家にある、彼らが働いた研究室には器具が乏しかった。後に Boltzmann はよく言った:「我々は十分な考えを持っていた。我々の唯一の心配事は実験器具だった。」 Boltzmann は 1865 年に最初の論文「伝導体の球上の異なる点間の電気抵抗について」を出版した。

Boltzmann は Stefan の指導の下で研究し、1866 年 PhD の学位を得た。彼の学位論文は「気体の動力学理論について」であった。同じ年、彼は気体の動力学理論についての最初の論文「熱力学の第二法則の力学的意味について」を出版した。1867 年彼は私講師 (Privatdozent) になった。学位を得た後もう 2 年間 Boltzmann は Stefan の助手として働いた。次の年、Boltzmann は「物質の質点の間の熱運動エネルギーの等分配の研究」という論文を出した。その中で彼は気体試料中の何兆もの分子の間にエネルギーが分布する方法を表現することを試みた。



図 9.31 Wien 大学 (1365 年創立)



図 9.32 Wien 大学玄関左側、中央、右側の回廊



図 9.33 Wien 大学物理学科の学生達 (前列左から 4 番目 Boltzmann、1866 年)



図 9.34 Boltzmann と履歴書 (1868 年)

1869 年 25 歳で、Boltzmann は Styria 地方にある Graz 大学の数理物理学の正教授に任命された。1869 年彼は 5、6ヶ月間 Heidelberg 大学で過ごし、Robert Bunsen や Leo Königsberger と一緒に研究した。それから 1871 年には彼は Berlin 大学で Gustav Kirchhoff、Hermann von Helmholtz とともにいた。Helmholz と研究している間に彼は物質の光学的性質と電気的性質との間の重要な関係を実験的に明らかにした。その関係は、Helmholz がゆるぎない支持者であった Maxwell 理論を確認するものと見られた。Boltzmann はまた、Ganz の同僚 August Toepler の実験室を大いに利用した。

1872 年運動理論についての自分の取り扱いを研究していた Boltzmann はその計算で分子の大きさを考慮した論文を出版した。「気体分子の間の熱的平衡に関する更なる研究」と題するその論文で、彼は初めて、運動している分子の間の速度分布を表す関数が満足しなければならない数学的条件を表わす式を書いた。Maxwell も類似の式を導いていたので、それは今日 Maxwell-Boltzmann の式と呼ばれている。この式を応用して、Boltzmann は気体における熱伝導、拡散、粘度の性質を説明することができた。同じ年、彼は彼の式を用いて期待の運動理論で熱力学第二法則を説明しようと試みた。この命題の彼の最終表現は H 定理 (theorem) と呼ばれている。

Loschmidt は後で Boltzmann の発見に反対した。何故ならそれは基本的に不可逆過程が可逆過程の結果であることを示しており、エネルギー保存則を破るからである。彼はまた、Boltzmann の仕事は運動理論に対する重力場の影響を考慮していないと指摘した。Boltzmann は、見かけ上



図 9.35 婚約中の Boltzmann と Henriette(1875 年)

の矛盾は含まれている統計的確率によるものであると云って自分の理論を擁護した。後の論文で彼は気体への重力の影響の問題を解決した。

1873 年 Boltzmann は数学の教授としてウイーン大学に加わった。Graz 大学の物理学研究所のディレクターとして Toepler の後を継いだ 1876 年まで、彼はそこに留まった。後者の地位は Ernst Mach に打ち勝って得た。

女性がオーストリアの大学に許可されるずっと前の 1872 年、Boltzmann は Graz で野心的な数学と物理学の教師 Henriette von Aigentler に逢った。彼女は非公式に講義を聴講する許可を拒絶されていた。Boltzmann は彼女に抗議するように勧め、彼女はそうして、成功した。彼女は長い髪、眼の青い魅力的な女性だった。1876 年 7 月 17 日 Ludwig Boltzmann は Henriette と結婚した。彼らは 3 人の娘と 2 人の息子を持った。

Boltzmann は Graz に戻って実験物理学の講座を占めた。Graz での彼の学生の中には Svante Arrhenius と Walther Nernst がいた。Boltzmann は Graz で 14 年の幸福な年月を過ごした。彼が自然の統計の概念を発展させたのは其処でであった。



図 9.36 Graz 大学での Boltzmann の同僚 (前列中央 Boltzmann、後列左端 Nernst、後列左から 3 人目 Arrhenius)



図 9.37 Boltzmann 青年 (1875 年)



図 9.38 Boltzmann の家族 (1886 年)

1877 年 Boltzmann は確率と熱力学第二法則との間の関係をさらに明確にすることを試みた。彼はエントロピーと確率の関係を示す式を導入した。彼は、力学は熱力学の法則の完全な説明をすることができないと考え、確率の尺度を導入した。これらと J. Willard Gibbs が探求した類似の概念とが統計力学の分野に対する基礎を形作った。

1880–1883 年の間に Boltzmann は彼の統計的方法を展開し続け、気体における摩擦と拡散を説明する理論の洗練を続けた。

1885 年彼は帝國科学アカデミーの会員になり、1887 年に Graz 大学の学長になった。1888 年彼はスウェーデン王立科学アカデミーの会員に選出された。Heinrich Hertz が Maxwell の予言した電磁波を発見したのは大体この時期であった。この発見に鼓舞され、以前の彼の電磁気の研究を思い起こして、Boltzmann はラジオ波についての展示を工夫し、その課題について講義した。1889 年 Boltzmann の長男 Ludwig が盲腸炎を患って死んだ。これは Boltzmann にとって大きな悲しみの原因となった。

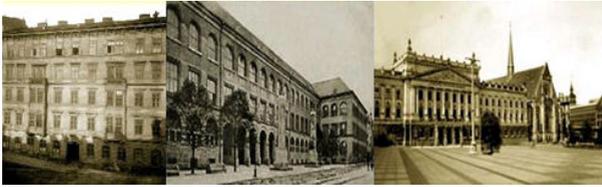


図 9.39 Boltzmann の関わった大学 (左 Wien 大学物理学科 (1900 年頃)、中 München 大学 (1890 年頃)、右 Leipzig 大学 (1900 年頃))

1890 年 Boltzmann はドイツの Bavaria にあるミュンヘン (munich、München) 大学の理論物理学の教授に任命された。師の Joseph Stefan が亡くなり、1893 年彼はウイーン大学理論物理学教授としてその後を継いだ。

Boltzmann は晩年、続く 15 年の多くを自分の理論を防御するのに多大の努力を払った。当時の科学界は二つの陣営に分かれていた。1 つは原子の実際の存在を擁護するもので、他方はその理論に反対するものである。Boltzmann は原子理論の擁護者で、1894 年彼は 2 つの異なる立場が論争した英国科学推進協会の会合に出席した。

1895 年、Georg Helm と Wilhelm Ostwald は 1895 年の Lübeck の会合で、エネルギー論への彼らの見解を表明した。彼らは物質ではなくエネルギーを宇宙の主要成分として見た。しかしながら、Boltzmann の見解はその論争で彼の原子理論を支持する他の物理学者達の間では勝利を得ていた。

彼はウイーン大学の同僚の何人か、特に Ernst Mach を信用しなかった。Mach は 1895 年科学哲学と科学史の教授になった。そのため、1900 年 Boltzmann は Wilhelm Ostwald の招きで Leipzig 大学へ移った。Mach が不健康のせいで引退した後、Boltzmann は 1902 年の秋ウイーン大学に復帰した。彼の学生には Karl Przibram、Paul Ehrenfest、Lise Meitner が含まれている。

1903 年ウイーン (Vienna) 大学では、Boltzmann は物理学を教えるだけでなく、哲学についても講義し始めた。実際、彼は、「帰納科学の歴史と理論」という課程に対して以前は Ernst Mach によって占められていた自然哲学講座で、「自然科学の方法と一般理論」と名づけた大学課程を教え



図 9.40 Boltzmann 一家の Wien での住居

た。Boltzmann の自然哲学についての講義は非常に人気があり、当時かなりの注意を惹いた。彼の最初の講義は大いなる成功であった。最も大きい講義室がそのために選ばれていたにも拘わらず、人々は階段を含めて全ての通路まで立っていた。学生、助手、教授、婦人までもがやって来た。会場のホールは銀製の篝火の小枝で飾り立てられ、彼は熱狂的な喝采を受けた。全ての新聞がこの出来事を報じた。彼の郵便受けは賛成 (同意) の手紙で一杯になった。Boltzmann の哲学講義の大きな成功のため、皇帝陛下が彼を宮殿の宴会に招待した。彼は皇帝 Franz Joseph 唯一人を聴衆として講義さえした。皇帝は Boltzmann に「朕は貴方の帰還を嬉しく思う。貴方の講義をどれ程の群集が聞いたのか」と言った。

人生の晩年において、Boltzmann は健康状態が悪かった。彼の健康は科学的な敵対者との絶え間ない論争で病んでいた。彼の眼は読むことに問題を起すほど悪化していた。彼は科学論文を読んでもくれる婦人を雇わなければならなかったし、彼の論文原稿は彼の妻が書いた。加えて、彼は夜は強い喘息の発作と、喉、胸部の疾患を患っていた。さらに、彼は過重労働による重い頭痛に苦しめられていた。しかしながら、Boltzmann は決して健康には考慮を払わず、科学研究のためにそれを犠牲にしていた。

Boltzmann は落ち込んだ気分と高揚した、誇大妄想的、あるいはいらした気分とが素早く交替することに曝されていた。人々の集まりにおいてさえ、彼は時々、打ち破ることができそうにない、長い憂鬱な沈黙に耽ることがあった。診断されていないが精神分裂の兆候のようであった。



図 9.41 Boltzmann の有名な墓 (Wien 中央墓地)

60歳の誕生日、彼自身は冗談に、彼の気質（神経）の速い揺れ（起伏）を、彼が Mardi Gras（告解火曜日）と Ash Wednesday（聖灰水曜日）の間の夜に生まれたという事実に由来するものだと注釈した。彼は創造力を失うことを恐れていたと伝えられる。Meitner は、Boltzmann に近い人々は彼の深刻なウツの発作と自殺の試みに気づいていたと述べている。

夏季休暇で Trieste に近い Duino に妻と一番下の娘と一緒にいた間の 1906 年 9 月 5 日、ウツに襲われている間に Boltzmann は首を吊った。9 月 8 日、華麗な葬儀が営まれ、当時の多くの優れた科学者が参列した。ウィーン市とその人々はそこに住んだ天才を誇りにしており、彼らは彼に相応しい埋葬地を探す努力をした。彼はウィーン中央墓地 (Viennese Zentralfriedhof) に葬られた。墓石には Gustinus Ambrosi が作製した白大理石の美しい Boltzmann の胸像があり、また彼の偉大な科学業績を表わす式  $S = k \cdot \log W$  の刻銘がある。

## 参考文献

1. Lewis Campbell and William Garnett, “*The Life of James Clerk Maxwell*”, NacMillan and Co., 1882 (Digital Preservation, 1997; 2nd Ed., 1999).  
(<http://www.sonnetsoftware.com/bio/maxbio.pdf>)
2. George W. Benthien, “*James Clerk Maxwell - His Life and His Faith*”, 2009.  
(<http://gbenthien.net/Maxwell/Maxwell.pdf>)
3. “*James Clerk Maxwell, Wikipedia, the free encyclopedia*”  
(<http://en.wikipedia.org/wiki/James-Clerk-Maxwell>)
4. “*James Clerk Maxwell - Definition*”  
(<http://www.wordiq.com/definition/James-Clerk-Maxwell>)
5. “*James Clerk Maxwell*”  
(<http://www.mlahanas.de/Physics/Bios/JamesClerkMaxwell.html>)
6. “*Maxwell’s thermodynamic surface - Encyclopedia of Humanthermodynamics*”  
(<http://www.eoht.info/page/Maxwell’s+thermodynamics+surface>)
7. “*The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*”, Ed., by W. D. Niven, Cambridge University Press, 1890, (Dover, New York, 1965).  
(<http://www.archive.org/details/scientificpapers01maxw>)
8. “*James Clerk Maxwell - poems -*”  
([www.PoemHunter.com](http://www.PoemHunter.com) - The World’s Poetry Archive), 2004.  
(<http://www.strangebeautiful.com/other-texts/maxwell-poems.pdf>)
9. David O. Forfar, “*Origins of the Clerk (Maxwell) Genius*”, in *James Clerk Maxwell Foundation*  
(<http://www.clerkmaxwellfoundation.org/>)

10. “*Ludwig Boltzmann, Wikipedia, the free encyclopedia*”  
〈<http://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig-Boltzmann>〉
11. “*Boltzmann, Ludwig, from New World Encyclopedia*”  
〈<http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Ludwig-Boltzmann>〉
12. Ali Eflekhari, “*Ludwig Boltzmann (1844-1906)*”  
〈<http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00001717/02//Ludwig-Boltzmann.pdf>〉
13. “it Boltzmann’s Work in Statistical Physics”  
〈<http://plato.stanford.edu/entries/ststphys-Boltzmann>〉

## 10章 附録

### 10.1 レーリー卿 (Lord Rayleigh)

寺田寅彦 (「青空文庫」より)

レーリー家の祖先は一六六〇年頃エセックス (Essex) 州のモルドン (Maldon) 附近に若干の水車を所有して粉磨業 (こなひきぎょう) を営んでいた。一七二〇年頃ターリング (Terling) に新しく住家を求め、その後 Terling Place の荘園を買った。その邸宅はもとノリッチ僧正 (Bishops of Norwich) の宮殿であった。その後ヘンリー八世の所有となったこともあった。その時の当主ジョン・ストラット (John Strutt) は Maldon からの M. P. として選出された。この人の長子は早世し、次男の Joseph Halden Strutt (一七五八 一八四五) が家を継いだ。彼は陸軍大佐となり王党の国会議員となり、Duke of Leinster の娘の Lady Fitzgerald と結婚した。これがここに紹介しようとする物理学者レーリー卿の祖父である。勲功によって貴族に列せられようという内意があったが辞退したので、爵位はその夫人に授けられ、夫人からその一人息子の John James Strutt (一七九六 一八七三) に伝えられた。これが最初の Lord Rayleigh となった訳である。Rayleigh は附近の小都市の名で、口調がいいというだけの理由でこの名を採用したものらしい。彼は Clara Elizabeth La Touche Vicars と結婚して、Langford に住んでいた。ここで John William Strutt が生れた。これがすなわち物理学者のレーリー卿である。

レーリーの血筋に科学的な遺伝があるとすればそれはこの外戚のヴィカーズ家から来ているらしい。すなわち外戚祖父とその兄弟は工兵士官であり、また外戚祖母の先祖にも優れた砲工兵の将官が居た。また祖母 Lady Fitzgerald は有名なボイル (Robert Boyle) の兄弟の裔だそうである。

一八四二年の十一月十二日に John Willam を生んだときに母は年わ



図 10.1 Lord Rayleigh (1842/11/12–1919/6/30)

ずかに十八歳であった。そうしてこの子はいわゆる七月子(ななつきご)として生れたのである。三歳になるまで物が云えなかった。しかし物事にはよく気がついて、何でも指さして「アー、アー、アー」と云った。そうして「あれはお家です」、「犬です」という返事を聞かないうちはなかなか満足しなかった。祖父の大佐がこの子を始めて見たときに「これはよほど利口か、それとも大馬鹿だ」と云った。それはこの児の頭蓋骨の形を見てそう云ったものらしい。

生れて二十箇月後に階段から転がり落ちて、頭に青や黒の斑点が出来た。その後も海岸の波止場から落ちて溺れかかった事もあった。また射的をしている人の鉄砲の筒口の正面へ突然顔を出して危うく助かった事もあった。大きくなるに従って物を知りたがり、卓布にこぼれた水が干上るとどうなるかなどと聞いた。内気でそして涙脆く、ある時羊が一匹群に離れて彷徨っているのを見て不便(ふびん)がって泣いたりした。記憶がよくて旧約全書の聖歌を暗誦したりした。環境には何ら科学的の刺戟はなかったが、塩水に卵の浮く話を聞いて喜んで実験したり、機関車二台つけた汽車を見てその効能を考えたりした。伯母に貰った本で火薬の製法を知り、薬屋でその材料を求めて製造にかかっているところを見付かって没収

された話もある。

一八五二年すなわち十歳のとき学校へ入るために Eton に行ったが、疱瘡に罹りまた百日咳に煩わされたりした。それで Wimbledon Common にあった George Murray という人の私塾のような学校に入って、そこで代数や三角や静力学初歩を教わったが、その頃からもう彼の優れた学才が芽を出して師を感嘆させた。同時にいたずら好きの天分をも発揮して、ガスパ管内に空気を押し込み、先生の祈祷が始まると燈火が自然に消えるという趣向を案出し実行した。その頃彼の父は彼に農業の趣味を養うために郷里で豚を飼わせ、その収入を彼の小使銭に充てた。この銭は多くは化学材料を買うために費やされ、ある時は燐で指を焼いた。後年ケルヴィン卿が化学会の晩餐演説でこの事を引合に出し、レーリー卿は十二歳のときに燐で指を焼いたそうだが、自分は八十二歳のときに全く同じ火傷をしたと云った。

十四歳のとき Harrow に入ったが、二年級になってから胸の病を得て退学した。生命もどうかと氣遣われたが幸いに快癒したので今度は Rev. G. T. Warner の学校に入ってそこで四年間の修業をした。その間に一度 Cambridge の Trinity College におけるある Minor Scholarship の試験を受けたが失敗した。師の Warner は「今度はいけなかったが決して二度とは失敗しまい」と云った。その頃の彼の悪戯の傑作は、Milton の sonnets をそのまま自作のような顔をして田舎新聞に投書したことである。勿論新聞は夢にも知らずにそれを掲載した。

十五歳の頃から写真を始めてかなり身を入れてやった。その外の娯楽は乗馬、クリケット、フットボール、クロケー、射的などであった。その頃彼は休暇の度に近親の年上の誰かに淡い恋をしたが、次の休暇には前の恋人はすっかり忘れて、また別の初恋をするのであった。またある時は若い婦人に扮装して午餐会に現われ、父の隣席に坐って一座を驚かせた。

いよいよ Cambridge に入った。貴族の子弟であるので、Fellow Commoner として入学した。しかし極めて質素な生活をしていた。ここで有名な Routh の下に厳しい数学的訓練を受けた事が、後年の彼のために非常に有益であったことは彼自身も認めている。その頃彼はよく長椅子に凭《もた》れてぼんやりしていることがあった。友人には、面白い作り話を考えているんだと云ったが、実は数学の問題を考えていたらしい。彼は生

涯喫煙はしなかった。

一八六四年の秋には Sheepshanks Exhibitioner に選ばれた。これは大変な名誉なことであったが、これについて母に送った手紙には「試験官が私の書いたナンセンスに感服したのは可笑しい」とあった。この秋から彼は始めてストークスの光学の講義に出席し、特にその講義でやって見せる実験を喜んだ。ストークスの考え方や表現の仕方がすっかり気に入ってしまった。そのうちに Mathematical Tripos の試験が近づいた。彼の伯母が心配して師のラウスに見込みを聞いたら、ラウスは「He'll do.」と答えたそうである。

在学中の彼は試験官の銘々の癖をよく吞込んで、例えばトドハンター先生の出す問題を予知したりした。ある試験官は「ストラットの答えは多くの書物よりもいい」と云った。

一八六五年の正月に彼は遂に Senior Wrangler の栄冠を獲た。その表彰式に彼の母も参列したが、人々は「我が Senior Wrangler の姉君」のために万歳を三唱した。実際母は彼よりただ十八歳の年長者であったのである。彼の郷閭(きょうりょ)の人々のうちには彼の学者として立つ事が彼の Lord としての生活と利害の相反することを恐れるものもあった。この学位を得た後に二人の友人とイタリア旅行をしたが、美術見物には大した興味がないようであった。

一八六五年の四月に初めての講演をした。ひどく「はにかみや」であったのでこの時の演説はよく聞き取れないくらいであった。しかし晩年はかなり講演がうまくなり、政治演説なども相当有効にやってのけるようになった。

自分の研究をする自由は得たが、実験を始めようとしても器械や道具が手に入れられなかった。定性分析のコースを一学期やらせてもらったくらいのものであった。しかし読物には事を欠かなくてマクスウェルの電磁気論(一八六五)や、マクスウェル及びヘルムホルツの色の研究、それからストークスやウィリアム・タムソンの主要な論文を読み、傍らまたミルの論理学や経済論を読んでいた。

一八六六年二十四歳で Trinity の Fellowship を獲た。その頃の友人の中には George Darwin も居たが、違った方面の友では Arthur Balfour すなわち後の首相バルフォア卿と親交を結んだ。これが彼の生涯に大き

な影響をすることになったのである。

一八六七年の八月に始めて大西洋を越えてアメリカの旅をした。帰ってみると彼の郷里ではチフスが流行していたので家族とともに五マイル離れた Tofts へ転地し、父のレーリー卿がただ一人 Terling に止まっていた。これが動機となって後にこの荘園内にあった「白鳥池」を利用して水道工事が出来、これが後に水力学の実験に利用されるようになったのである。

その頃彼は国会議員として政治生活に入るように彼の父その他からも勧められた。政治に対する興味はかなりあったが国会議員として立つ事は好まなかった。そうしてテートやマクスウェルなどと文通をしながら研究をしていた。またチャールス・ダーウィンとも知合になった。後年彼の書いたものの中にこんなことがある。「一八七〇年にダーウィンと一緒にあったとき、あるアメリカ人からよこした手紙のことを話した。それは『失礼ですが貴方の顔が著しく猿に似ているという事実が貴方の学説をひどく左右したのだと思います』というのであった。」

一八六八年の米国旅行から帰ってから、彼は自分の実験に着手した。ルムコルフコイル、グローヴ電池、無定位電流計、大きな電磁石、タムソンの高抵抗ガルヴァなどを買入れた。最初にやった実験は、電流計の磁針が交流でふれることに関するものであって、その結果は同年の British Association で報告している。その外の実験は色に関するものや、電気感応と惰性とのアナロジーなどに関するもので、これに関するマクスウェルとの文通が保存されている。

一八七一年に、ケンブリッジに新設されたキャヴェンディッシュ講座に適当な人を求める問題がおこった。その時レーリーからマクスウェルに送った手紙を見ると、ウィリアム・タムソンは決定的に辞退したから、是非ともマクスウェルが就任してくれるようにと勧誘している。その手紙の中でこう云っている。「この地位に望ましい人は、ただ講義をするだけの先生ではなくて、実験に体験をもった数学者で、そうして若い学者達の活動を正しい道に指導することが出来る人でなければならない。」マクスウェルは遂に承諾して最初の Cavendish Professor となった。その年にタムソンがヘルムホルツに送った手紙によると、もしマクスウェルが断ったら、この椅子はレーリーに廻るのであったらしい。

この年にマクスウェルの紹介で、共鳴に関する彼の論文が Phil. Trans.

に出た。この論文が評議会を通過したことを告げたのは、ソリスベリー卿であった。「この間評議会で君の破れ徳利が出たよ」と云ったそうである。これが音響に関するレーリーの研究の序幕となったのである。彼が音響の問題に触れるようになった動機は、ある先生から是非ともドイツ語を稽古しろと勧められ、その稽古のためにヘルムホルツの *Tonempfindungen* を読んだのが始まりだそうである。この最初の研究実験はターリングの邸宅の古いグランドピアノの上で行われたのである。

色の研究をしているうちに、空の色の影響に気が付き、それから、空の色そのものの研究に移り、ついに有名な  $\lambda^{-4}$  の方則に到達した。そうしてクラウジウスやティンダルの説を永久に否定してしまった。

これより先、一八六九年にロンドンで彼の学友アーサー・バルフォアの二人の姉妹エリーノア (Eleanor) とイヴリン (Evelyn) とに紹介され、その後しばしば出遭う機会があった。イヴリンは音楽を好んでいたので、レーリーはヘルムホルツの書物を貸してやり、それが二人に共通の興味ある話題を提供した。その頃彼はソリスベリー卿の実験室を訪れて磁気に関する実験を見せられたりした。その時母に送った手紙に「あんなに不器用では実験家として成効しそうもない」と云ってこの政治家の余技を評している。この頃またグラドストーンにも会った。そうしてこの大政治家の能力と独創的天分とに感服すると同時に、科学的考察力の欠乏を認めた。グラドストーンは雪が長靴の革を滲透する特殊な力があるということを手張した。レーリーは、それは靴の上部にかかった雪が靴の中へ落ち込むのだと云って説明したが、結局どうしても了解を得ることが出来なかった。

一八七一年の五月にイヴリン・バルフォアと婚約し、七月十九日に結婚式を挙げた。大学における fellowship は未婚者のみに許されるという規則であったので、結婚と同時に大学との縁は切れることになった。これは「将に来らんとする私の生活の転機の暗黒面だ」と云った。新婚旅行の途次にエディンバラの British Association に出席し、そこで始めてウィリアム・タムソンやテートと親しく言葉を交わした。旅行後ターリングに帰って秋と冬を送った。その間に彼等の新家庭を営むべき Tofts (Little Baddow における邸宅の名) の工事を監督するため毎週二、三度は新郎新婦 | 駒を並べて出かけて行った。

一八七二年正月ケント州の Bedgebury の親戚の宅で泊っているうち

に劇烈な熱病 (rheumatic fever) に罹り、一事は心許ない容態であった。関節と肺とを冒されたのであった。幸いに治癒したが、急に年を取ったように見えた。

Tofts の新居に実験室を造ろうと考えてマクスウェルの知恵を借りたりしたが、結局ここにはわずかに四箇月くらいしか居ないことになった。ここでは主に廻折格子を写真で複製する実験をやったのである。後年この家の後継者はこの実験室を玉突き室に改造したそうである。

病後の冬の寒さを避けるためにエジプト旅行に出掛けた。夫人の姉エリーノアも同道した。その頃はまだ珍しかったスエズ運河を見、屋気楼に欺されたりして、カイロに着き、そこから小船に乗ってナイル河を遊った。南京虫や蚤、蚊に攻められながら、野羊の乳を飲み、アラビア人のコックの料理を食って、一八七二年の十二月十二日から翌年三月中旬にわたる単調な船住いをつづけた。この退屈な時間を利用して彼はその名著 *Theory of Sound* の草稿を書いていた。午前中は大抵キャビンに籠ってこの仕事に没頭していた。しかしすっかり戸口を締め切って蠅を殺してしまってから仕事にかかる必要があったのである。義姉のエリーノアはレーリーの机の前に坐って彼から数学を教わっていた。どんな面白い見物があっても午前中はなかなか上陸しようとしなかった。午後にはデッキへ出てエジプトコーヒーをすすりながら、エジプトロギーをひやかしなどした。

帰途はギリシアからプリンデイシ、ヴェニスを経て一八七三年五月初旬にロンドンに着いた。そうしてアーサー・バルフォアの近頃求めた No.4 Carlton Gardens に落着いた。これが晩年までも彼のロンドンでの定宿となり、ほとんど毎年数週ないし数月をここに送ることになったのである。

旅から帰った翌月、すなわち六月十四日に彼の父のレーリー卿が死んだ。これは彼にとって大きな悲しみであったのみならず、父の遺産の管理という新たな責任が彼の科学的生活の前途を妨げはしないかという心配があった。

一八七三年の秋に新しきレーリー卿となった彼はトフツの邸から父祖の莊園ターリングに移った。それまでは石油ランプを使っていたのをガス燈にし、また実験用の吹管や何かを使用するために、新たに自家用のガス発生器を設備した。その他には客間にあったオルガンを書斎に移したくら

いで、外には別に造作を加えるようなことはしなかった。晩年に到るまで、彼はこの旧宅に手を入れることは容易に承諾しなかった。そうして彼の幼時の思い出のかかっている家具の一つでも取除けることを許さなかった。

この年に彼は F. R. S. に選ばれた。そうして一八七四年から一八七九年までは平穩にターリングの邸で暮していた。一八七四年の夏頃始めていわゆる心霊現象 (spiritualistic phenomena) の研究に興味をもつようになった。それはクルックス (W. Crookes) がこの方面の研究に熱心であったのに刺戟されたものらしい。彼は、もしこれらの現象が本当であれば、それはあらゆる他の科学的発見よりも遥かに重要であると考えたのであった。しかし色々の実験に立合ったりした結果は彼を失望させた。もしそうでなかったら、彼はおそらく生涯をこの方面の研究に捧げたかもしれないということである。しかし彼が最後までこの方面の興味を捨て切れなかったことは、彼の死んだ年一九一九年に心霊現象研究会の Presidential Address をやっているのを見ても分るであろう。何事も容易に信じない代りに、また疑わしいものでも容易には否定しないのが彼の特長であった。

一八七五年に上院で演説をさせられた。それは衛生問題に関することであつたが、云いたいと思うことは皆口止めされて結局何も云うことがなくて困つたと云ってこぼした。これはソリスベリー卿が彼を政治界へ送り出す初舞台としてやらせたらしいのであるが、当時既にレーリーの心は科学の方へ決定的に傾いていた。一八七六年には動物虐待防止法案の修正を提出した。一八七二年にはグアドストーンから大学の財政に関する調査委員会の一員となることを勧められた。一八七七年大学令の改正委員が選ばれた時も、彼は仲間に入れられた。旧師のストークスもその員に加わっており、わざわざアイルランドから出かけて来たが、会議中ただの一語も発せず坐っていたそうである。レーリーも会議にはあまり熱がなかったと見えて、ある人が彼にある科学上の問題を話しかけたとき、それは午後の委員会のときにゆっくり考えてみようと言つた。この点「職務不忠実」であつたのである。

一八七五年八月、ブリストルの大英學術協会に出席中に郷里から電報で呼びかえされた。彼の長子で現在のレーリー卿たる Robert John Strutt が生れたのであつた。

一八七五年から七六年にわたる冬の数箇月間ビーチャム・タワー ( Beau-

champ Tower) というエンジニアを助手として水力学の実験をした。この人は有名なフルード (William Froude) の弟子であった。前に述べた「白鳥池」を利用して水力実験室を作り、色々の形の穴から水を流出させるときの孔内の圧力分布を測ろうというのであった。この実験はその後にマロック (Arnulph Mallock) が完成し、而してレーリーの理論的の計算と一致する結果を得た。

一八七六 七七年の冬には、やはりフルードの弟子で、また親戚であった前記のマロックを助手として液体力学の実験をした。不思議なことにはこの時やった実験のことをすっかり忘れてしまって、四十一年後になって同様な実験をやることの提案をしている。

タワーやマロックのような、自分で独立の研究の出来るような人は彼の助手としてはあまり適当でなかった。それで一八八〇年までは全く助手なしで独りで実験していた。しかし後ではやはり助手のなかった事を悔いた。

一八七六年の Cambridge Mathematical Tripos の試験には補助試験官に選ばれた。その試験問題の討究のために試験官仲間をターリングに招待したが、そのためにソリスベリー卿とディスレーリーとの和解の饗宴という歴史的のシーンに出席する機会を逸した。レーリーの出した試験問題 (Coll.Pap.,1,p.280) にはオリジナルな点があった。問題が急所に触れていてただの elegant academic exercise ではなかった。

一八七三年にレーリーが家督を相続した頃は農業も相当有利であったが、一八七四年に外国貿易の頓挫した影響から、引いて農民の窮迫を来し、従って地主の財政も極めて不利になった。一八七九年から翌年へかけては小作人がだんだん土地を返上して来たので、地主は自作するより外途がなくなった。この財政の困難ということが、レーリーをしてケンブリッジの教授としての招聘に応じさせた主要な原因であったと云われている。

相続後の家政は大概、書記や執事や代言人に任せてあって、彼自身は大審院の役をつとめるだけであった。家作の修理などを執事がすすめてもなかなか受入れなかった。

農業に関する知識は相当にあって、人工肥料の問題にも興味があり、この点では却って旧弊な執事等より進取的であった。

弟の Edward Strutt が大学卒業後農事に身を入れるようになったの

で、一八七六年に家産全部の管理を弟に一任し、生涯再び家事には煩わされなくてもいいようになった。この時弟のエドワードはわずか二十二歳であったのである。吾々はこのエドワードに感謝したい気がする。

一八七七年の春はマデイラへの航海をした。昔夫人の父が肺病でここに避寒に行き亡くなったのである。その時の乗船にケルヴィンの羅針盤が三台備えてあった。タムソンはレーリーに手紙をやって、どうかこの器械を見て意見を聞かせてくれと頼んだ。その手紙に添えて彼の測深器の論文も送るとある。マデイラの断崖で気流の実験をして鳥の飛翔の問題を考えたりした。帰途プリモースに上陸し、そこからフルードの船型試験室を訪問した。レーリーはフルードの才能と人柄を尊敬していた。二人の行き方はどこか共通なところがあった。最も簡単な推理によって問題の要点を直進するところが似ていると、今のレーリー卿が評している。

一八七八年の五月に王立研究所 (Royal Institution) で色に関する講演をした。十月二日には次男の Arthur (後に海軍士官) が生れた。一八七八-七九年には王立研究所の評議員を務めた。

一八七七年に彼の Theory of Sound の初版がマクミラン (Macmillan) から出版された。一八七三年のナイル旅行の船中で稿を起したのが、足かけ五年目に脱稿したのである。書いて行く間に色々の新しい問題が続出する、それを一々追究してはその結果を別々の論文で発表していた。この著書の草稿は Mathem. Trip. の試験答案の裏面を利用して書いたのであった。ヘルムホルツは『ネーチュラー』誌上にこの書の紹介を書き、この書は正にタムソン テートの『物理学』に比肩すべき名著であると云った。タムソン テートの書物が遂に完結せずに入った一つの理由は、レーリーのこの書とマクスウェルの『電磁気学』が出て、それで大体書くべきことは尽されたからというのであった。これはタムソン自身の言明したことである。ヘルムホルツもまた出版者もこの『音響論』の第三巻を書くことを勧め、自分でもその気はあったが、遂に書かずに了った。しかし再版のときに色々な増補をした。

レーリーの初期の研究の中で、かなり永い間の手しおにかけて育て上げたものの一つは、廻折格子の問題と分光器の分解能 (resolving power) に関する問題とであった。初めは大きく画いた格子を写真で縮写しようと試みたがうまく行かなかった。しかしその研究の副産物としていわゆる

zone plates (光を集中する円形格子)を得た。しかし、別に発表するほどの珍しいこととも思わなかったらしい。それから四年後にソレー (Solet)、七年後にウッド (R. W. Wood) がこれについて論じたので世に知られたが、レーリーのやったことは誰も知らない。

当時の格子と云えばナベルト (Nabert) の作ったガラス製のものしかなかった。オングストレームの太陽スペクトルの図版もこれで取ったのであった。レーリーは縮写に失敗した後 (一八七二) このガラス格子を写真種板に直接に重ねて焼付けることを試みたらすぐ成效してたいそう嬉しかった。粒の粗い今のゼラチン乾板ではおそらく不成功であったであろうが、タンニン、蛋白、塩化コロジオンを使う古い方法が丁度適当であったのである。また重クローム酸ゼラチン法を用いて著しい結果を得た。そうして透明な棒の生ずる光波位相の反転に気付いた。この考えは後に発展して階段格子 ([e'chelon grating]) となったのである。

その後アメリカでローランド、マイケルソン、アンダーソン等によって優秀な金属製格子が作られ、またソープ、ウォーレス (Thorpe & Wallace) のセルロイド鋳型などが出来て、レーリーの転写は実用にはならなくなった。しかしレーリーの貢献はこの研究から導かれた分光器の分解能に関する理論的研究であった。今から見れば誰でも気の付きそうなこの問題に当時まだ誰も気が付いていなかったのである。レーリーは五年かかってこの研究を完成し、格子のみならず、プリズムの場合をも補足した。これらの結果を纏めて *Phil. Mag.* に出したとき "I wonder how it will strike others. To me it now seems too obvious." と私信の中に書いている。これも一つのコロンバスの玉子であろう。

一八七九年の十一月五日にマクスウェルが死んだので、ケンブリッジではキャヴェンディッシュ講座の後任者が問題となった。ウィリアム・タムソンは到底引受ける見込がなかったので、人々の目指すところはレーリー卿であった。タムソンはレーリーに手紙を書いた。「自分は生涯グラスゴーを離れられない因縁がある。貴方が引受けてくれれば誠に喜ばしい。しかし教授の職に附帯したうるさい仕事のために研究が出来なくなるという心配があれば、また適当な後任者の出来るまで当分の間だけ引受けるというのだったら、むしろ御断りになる方がいいと思う」という意味のことを忠告した。万事控え目なストークスは一切黙っていた。

当時レーリーの家の財政は前述のようにかなり困難な状態にあった。相続当時計画していたような大規模な研究室を作り、数人の有給助手をおくような望みは絶えてしまった。こういう環境の下にレーリーは遂に就任を承諾した。そうして一八七九年十二月十二日にこの名誉な椅子に就いた。

当時のキャヴェンディッシュ研究室はかなり貧弱なものであった。日常の費用はマクスウェルの小使銭から出るような始末であったので、レーリーは取敢えず研究資金の募集にかかった。先ず自分で五〇〇ポンド、当時の名誉総長デヴォンシャヤー公が五〇〇ポンド出した。その他の寄附を合計して一五〇〇ポンドを得た。また教授のポケットにはいる学生の授業料もこの方につぎ込むということにした。

学生に一般的な初歩の実験を教えるという案を立てたが、その頃まだ学生用の器械などは市場になかった。幸いにジェームス・スチュアルト教授の器械工場の援助を得て、簡単に安いガルヴァなどを沢山作らせることが出来た。

マクスウェルから引継いだ助手は、事務家ではあったがあまり役に立たなかった。それが間もなく死んだので後任者を募集したときに出て来たのがジョージ・ゴルドン (George Gordon) であった。もとリヴァプールの船工であっただけに、木工、金工に通じていたのみならず、暇さえあれば感応コイルを巻いたり、顕微鏡のプレパラートを作ったりするような男であった。田舎弁で饒舌り立てるには少し弱ったが、しかし大変気に入って、これがとうとう終りまでレーリーの伴侶となったのである。レーリーの立派な仕事の楽屋にはこの忠実な田舎漢のかくれていた事を記念したい。

レーリーは器械が役に立ちさえすれば体裁などは構わなかった。それでゴルドンがいよいよ最後の「仕上げ」にかかる頃には、早速召し上げて行って使った。

マクスウェル付きの demonstrator が辞任したあとヘグレーズブルックとショー (R.T.Glazebrook & W. N. Shaw) が就任した。この二人の手を借りて学生の実験演習の系統的なコースを設立した。この、現在我国の大学でもやっているような規則正しいコースがケンブリッジに無かったのである。このコースを書物に纏めたのがすなわち Glazebrook & Shaw : Practical Physics である。感じ炎の実験などがあるところにレーリーの面影が出ている。

レーリーの最初の講義は「物理器械使用法」で、次は「湿電気 (galvanic electricity) と電磁気」であった。当時まだ galvanic electricity などという語が行われていたのである。聴講者はただの十六人であった。この数は彼の在職中あまり変化はなかった。当時の思い出を書いたシジウィック夫人 (レーリー卿夫人の姉エリーノア) の記事に拠ると「彼が人々の研究を鼓舞し、また自分の仕事の援助者を得るに成效した所以は、主に彼の温雅な人柄と、人の仕事に対する同情ある興味とであった。彼はこの教授としての仕事を充分享楽しているよに見えた。「彼の特徴として、物を観るのに広い見地から全体を概観した。樹を見て森を見通すような心配は決してなかった。」「いつでも大きな方のはしっこ (big end) をつかまえてかかった。」「手製の粗末な器械を愛したのも畢竟同じ行き方であった。無用のものは出来るだけなくして骨まで裸にすることを好んだ。」

ナイルの河船でレーリーから数学を教わったエリーノア嬢は、その後シジウィック夫人となつてからはケンブリッジに居を構えていた。そうしてレーリーの在職中は絶えず彼の研究の助手となつて働くことを楽しみとされていた。することが綿密丹念で手綺麗で、面倒な計算をチェックしたり、実験の読取りを記帳し、また自分でも読取りをやった。レーリーの論文にこの婦人と共著になったものがいくつかある。

就任当時は従来やりかけていた「水のジェットに対する電気の作用」などをやっていたが、そのうちに彼の頭の中では大規模の仕事の計画が熟しつつあった。すなわち電気単位の測定を決定的にやり直すことであった。先ず最初にオームの測定にかかった。一八六三 六四年にマクスウェルその他の委員によって設定された B. A. 単位はその後コールラウシュ、ローランド、ウェーバー等の測定で十二パーセントの開きを生じていたのである。この仕事にはアーサー・シュスターが加担し、シジウィック夫人も手伝った。B. A. の方法によって一八八一年に得た結果は、これと同時にグレイズブルックが他の方法でやったものとよく一致した。またこの結果が熱の器械的等量の電氣的測定の結果と器械的測定の結果との齟齬を撤回したので、ジュールはたいそう喜んだ手紙をレーリーに寄せた。しかしレーリーはこれだけでは満足せずに、更にロレンツ (Lorenz) の方法によってやり直しをして、その結果を確かめた。結局三年かかって得た彼の結果は、その後多数の優秀な学者によって繰返された測定によつても事実

上なんらの開きを生じなかった。

次にはアンペーアの測定にかかった。この際クラーク電池の長所を認めていわゆるH型のものを工夫した。レーリーの定めたこの電池の e. m. f. の価もその後の時の試煉に堪えたのである。

電気単位に関する国際的会議のいきさつはここには略するが、この問題に関してレーリーの仕事が重要な要石となったことは明らかである。

彼の指導を受けていたジェー・ジェー・タムソンが引続いて e. s. u. と e. m. u. との比を測定することにかかった。タムソンの仕事ぶりを見ていたレーリーは、"Thomson rather ran away with it." と云って一切をこの若者の手に任せてしまった。後進の能力を認めこれに信頼することの出来ない大御所的大家ではなかったのである。

ケンブリッジ在職中の私生活も吾々にはなかなか興味がある。ここでもソリスベリーの別荘に住んでいた。講義のない日の午前はたいてい宅で仕事をしていた。昼飯の時には子息のためまた自分の稽古のために、なるべく仏語で話すことを主張した。それから二頭の小馬をつけた無蓋馬車をレーリー男爵夫人が自ら御して大学へ出勤し、そこで午後中、時には夜まで実験をやった。午後のお茶は実験室内の教授室で催され、夫人と姉のシジウィック夫人もしばしば列席した。茶瓶の口が欠けていたので夫人が新しいのと取換えようと云ったが、「これでも結構間に合う」と云って、そのままになった。夕食前の数分間には子供部屋をおとずれている彼を見かけた。一八八〇年七月には三番目の子息のジュリアンが生まれた。その年の八月にはスコットランドに旅してアルジル公の客となり、ヨットに乗って「長湖」に浮んだり、公爵の子供の時に見たという狐火 (will-o'-the-wisp) の話に興味をもったりした。

一八八一年三月に Trinity の Honorary Fellow になった。マクスウェルの後を継いだのである。丁度ヘルムホルツも学位を受けに来合せて夫婦連れで二晩泊った。「ヘルムホルツは対話ではさっぱり要領を得なかったが、しかし彼は very fine head をもっている」と評した。

一八八二年サザンプトンにおける大英学術協会では Section A の座長をつとめた。その時の座長の演説の中に物理学者の二つの流派、すなわち実験派と理論派との各自の偏見から来る無用の争いを誡めた一節は、そのまま現代にもあてはまるべきものである。会のあとでプリモースへ行っ

てそこで始めて電話というものを実見した。そして何よりもその器械の簡単さに驚いた。「これは確かに驚くべき器械である。しかし大した実用にはなりそうもない」と云っているのは面白い。

一八八二年十月に発熱性のリウマチスに罹って数週間出勤が出来なかった。丁度この時に王立協会から恩賜賞 (Royal Medal) を貰ったが受取りに出ることが出来なかった。実験室ではグレースブルックとショーが引受けていて時々病床へ何かの相談に来た。加減のいい時は小説『岩窟王』を読んでいた。二、三年後長子と散歩していたときにこの話をして聞かせた。そしてこの主人公の復讐はクリスチャンとしてはあまりひど過ぎると云った。

病後の冬休みにはイタリアへ転地し、フロレンス近くのバルフォア家の別荘に到着した。ピサの傾塔やガリレーの振り子よりも彼を喜ばせたものはその浸礼堂の円塔の不思議な反響の現象であった。

この病気は時々再発の気味があったので、再び転養のためにホンブルク (Homburg) に行った。そこで毎午前はマクスウェルの色の図に対する面倒な対数表計算をやった。夫人が一々驗算をした。レーリーはこういう計算はあまり得意でなかったのである。ホンブルクからハイデルベルクへ行ってクインケ (Quincke) を訪ねた。ク教授は新醸のワインを取出して能書きを並べた。スイス行を思い立ってムルレン (Murren) まで行ったら病気が再発して動けなくなった。四日目に少しよくなったので、四人昇の椅子にのって山を下り一路ケンブリッジに帰った。それで次のクリスマスの休暇にはバス (Bath) に行き温泉療養をすることになった。浴槽の中で掌を拡げたまま動かすと指が振動する現象を面白がった。その時に浮んだ考えが三十年後の論文となっている。

一八八四年カナダのモントリオールで大英学術協会が開かれたときにレーリーが会長に選ばれた。当時彼は四十二歳、こんなに若くて President になった例は珍しかった。彼は承諾はしたが、しかしその Presidential Address が苦になり、その予想にうなされ、そうしてひどく悄気 (しよげ) たりした。アーサー・バルフォアは手紙で彼を激励した。「科学と英国と貴族とを代表しなければならない」と云い、また眼前の政治的危機に対するカナダ新聞界の判断は、レーリーの印象によって左右されるだろうと云ったりした。ケベックまでの航海中のある夜口バート・オースチンが

ナンセンス科学演説をやった。レーリーはたいそう感心し、また乗客のあるものがそれを本気に受取っているのを見て嬉しがっていた。

いよいよ彼の座長演説をやる日に、入場券を持たずに会場へ行って門番と押し問答をやった。この時の演説の一部は科学者の教育問題に触れ、古典的死語に代えるべき仏独語の効能を述べている。また、科学はマテリアリズムに導く、という一般的謬見を排し、計算や実験では解けない”higher mysteries of being”のあることを暗示した。この会のエキスペジションで彼はインディアンの国土を見舞い、シカゴで始めて電車を見、またマイケルソンやローランドと親しく言葉を交わし、またエジソンの有名な昼寝を驚かした。ケルヴィンの有名な Baltimore Lecture の一部にも顔を出した。これについてレーリーが後に息子にこんな話をした。「実にあの講義は驚くべき芸当だった。午前講義を聞いていると、たった今、朝食のときに吾々の話していた問題がもう講義の種子になっているのを発見することがしばしばあった。」また母への手紙にもこの講義が「例のタムソン式で、つまり情熱的で、取り止めもなく声を出しながら考えるという行き方」であったと評している。

カナダから帰るとすぐケンブリッジへ辞表を出した。在職五年間に出した論文の数は六十余あった。「あの調子で永くはとても続けられなかった」というのが後年の述懐であった。

郷里ターリングに引上げてから、自分の研究室の準備にかかった。厩の二階の物置を二つに仕切って一方を暗室とし、壁と天井を、煤とビールの混合物で塗った。この室の両窓にヘリオスタートを取付け、ここへ分光器その他の光学器械を据え付けた。片方の仕切りにはテプラーポンプや附属のマノメーターなどを置いた。後にアルゴンの発見されたのはこの室であった。感応コイルの第一次電路をピストルで切る実験もここで行われた。この室と煉瓦壁を隔てた一室が寝室であって、この隔壁に穴をあけて音響学実験の際に便利ようにした。実験室の階下が工場で、その隣室の「学校部屋」に棚を吊って薬品をならべた。ここで、液体運動の実験が行われ、また写真現像も出来た。彼の書齋は無頓着にいつでも取り散らされ、大きな机の上は本や論文でおおかた埋められてほんのわずかの面積だけが使われていた。机の片隅には彼が元服祝に貰った鶯色の革函が載っており、これに銭と大事な書類がしまっていた。右手の書架には学生中のノート

ブックがあり、ストークスの講義の筆記もその中にあった。自著『音響学』が一部、これは紙片にかいたノートがいっぱい這入っていた。彼が何かたいそう熱心に読んでいると思ったら大抵自分の書いたものだと言って家族達はよく笑った。室の照明は私設ガスタンクのガスによって、儉約と保守的な気分と面倒がりとのために電燈設備をしないでしまった。

雑誌類は人に貸さなかった。ケルヴィンが Phil. Mag. を借りようとしたときも許さなかった。古い包紙やボール函や封筒なども棄てずにとっておいて使った。

地下室の物置部屋へ行く隧道が著しい反響を示すことは彼の『音響学』に書いてある。この隧道の一端で、水面による干涉縞の実験や、マイケルソン干渉計の実験が行われた。

ターリングでやろうと計画していた研究の一つは、主要なガス元素の比重を精密に測定してブラウト方則を試しようというのであった。これは何でもないのでなかなかの大仕事であった。レーリーの手一つでは間に合わないので、ケンブリッジの助手前記のゴールドンを呼び寄せた。彼は家族を挙げてターリングの邸内に移り、死ぬまでここでレーリーの片腕となって働いた。村人は時々「旦那様の遊戯部屋」の「実験室」についてゴールドンに質問し "That ain't much good, is it?" などと云った。

ガス比重測定は、一八四五年レニョー (Regnault) の発表したもの以来誰もやらなかった。レーリーはレニョーの実験における浮力の補正に誤りのあることに気付いたので、もう一度詳しくやり直す必要を感じたのである。

地下室の中に作った天秤室の空気を乾かすのに、毛布を使ったりしたところにレーリーの面目が現われている。二つのガラス球の容積の差を補正するために添えたU字管に、眼に見えぬくらいの亀裂があったのを気付かないでいたために不可解な故障が起って、ほとんど絶望しかけたとき、珍しい低気圧がやって来て、その時の異常な結果からやっとこの故障の原因が分ったというような挿話もあった。

酸素対水素の比重に関する最初の論文を出したのは一八八八年で、つまりこの仕事をはじめてから三年の後である。その後の一八八九年と一八九二年に出た。結果の比は一五・八八二であった。水素の純度について苦心していたとき、デュワー (Dewar) はスペクトル分析をすすめた。そ

れに関するレーリーの手紙に「スペクトロスコピーの泥沼に踏込むことになっても困るが」と書いてある。

この頃『大英百科全書』の第九版の編輯が進行していた。これにレーリーの「光学」と「光の波動論」が出ることになった。彼の原稿があまり専門的であった上に予定の頁数を超過するので編輯者の方から苦情が出た。そのために一部を割愛して後に”Aberration”と題して『ネーチャー』誌に掲載した。後日彼は、あるアメリカの農夫が『百科全書』を買ってAからZまで通読しているという噂をして「私の波動論をどう片付けるか見ものだ」と云った。

一八八四年にレーリーは王立協会の評議員をつとめたことがあった。その後当時の幹事ストークスが会長になることになったので後任幹事の席があき、それにレーリーが推挙された。色々の雑務をなるべく他の人にやらせるからという条件で彼を説き伏せた。主な仕事は論文の審査であった。彼は四十年前の審査員に握り潰されていた論文反古の中から J. J. Waterston という男の仕事を掘出し、それがガス論に関するジュール、クラウジウス、マクスウェルの仕事の先駆をなしていることを発見して、これを出版し、同時に隠れたこの著者の行衛を詮索したりした。この奇人は数年前行衛不明になっていた。

協会の集会に列席する以外は大抵ターリングに居て書信で用を足した。そうして一八九六年まで十一年間この職をつとめた。協会幹事として彼はウィラード・ギブスの酬われざる貢献を認めこれを表彰したいと望んだが、化学方面の評議員が「あれは化学じゃない」と云って承知せず、ケルヴィン卿までも反対した。レーリーはこう云ってこぼした。「ケルヴィンは、自分の考えがいろいろあるからだろうが、それならそれで、ちゃんとそれを発表すべきだと思う。」しかしずっと後になって最高の榮譽と考えられるコプリー賞牌が授与されることになったのである。それ以前にギブスがレーリーに送った手紙に「自分でもこの論文は長過ぎるのが難だと思う。しかしこれを書いたときは、自分のためにも読者のためにも、時間の価値など考えなかった」とある。

王立協会幹事在職中に色盲検査法に関する調査委員会の委員長をつとめた。一方ではこの期間に彼は政治界の嵐に捲込まれ、郷里で演説をしたり、弟の立候補の声援運動を助けたりした。義兄弟のバルフォア、当時

のアイランド政務総監がターリングへ遊びに来た時は護衛の警官が十二人もついて来たりした。スコットランドへ旅行して鶯色をした泥炭地の河水の泡に興味を感じて色々実験をしたのもこの時代のことであった。

家産の管理を引受けた弟のエドワードは始めは月給を貰っていたが、後には利益配当の方法によった。小麦が安くなったので、乳牛を飼い始め、一八八五年に十二頭だったのが一九一九年レーリーの死んだ年には八〇〇頭の牝牛と六十人の搾乳夫が居た。ロンドン中に八箇所の牛乳配達店をもっていた。王立美術協会の絵画展覧会に彼の肖像が出品された時に、観客の一人が「三四二号、ロード・レーリー、アー、あの牛乳屋か」と云っているのを聞いた友人があった。ある時は営業上の事で警察へ呼ばれたが、出頭しなかったので五ポンドの罰金を取られた。

酸素と水素の比重を定めた次の仕事は当然窒素の比重を定めることであった。その結果がアルゴンの発見となったのは周知の事実である。空気から酸素と水素を除いて得たものと、Vernon-Harcourt 法で得たものとのわずかな差違を見逃さなかったのが始まりである。彼はその結果を『ネーチュラー』誌に載せて化学者の批評と示教を乞うた。そうしてあらゆる方法で、あらゆる可能性を考慮して、周到な測定を繰返した後に、結局空気から得たあらゆる窒素と化学的に得られるあらゆる窒素とが、それぞれ一定のしかも異なる比重をもつという結果に到着した。その間に彼は、昔キャヴェンディッシュが自分と同じ道のあるいていたことを知って驚いたりした。ラムゼーが同時に同じ目的の研究を進めていることが分ったが、喧嘩にはならないで、二人は手を携えて稀有ガス発見の途を進んで行った。「空気中の新元素アルゴン」と題する論文が王立協会で発表されたのは一八九五年の正月であった。これと一緒にこのガスの性質に関するオルツェウスキーとクルックスの論文も出た。同時に、この新元素に対する疑惑の眼も四方から光っていたために色々な不愉快も経験しなければならなかった。後年彼は「この仕事で得たものは愉快よりもむしろ苦痛の方が多かった」とつぶやいていた。しかし模範的に周到な注意によって築き上げた結果は、時の試練に堪えて、あらゆる懐疑者は泣寝入りとなった。アルゴンに次いで他の稀有ガスが発見された。今日我帝都の夜を飾るネオンサインを見る時に、吾々はレーリー卿の昔の辛苦を偲ぶ義務を感ずるであろう。

一八九四 九六年に『音響学』の第二版が出た。これに増補された交

流に関する章の一節は、十年ほど前に大英学術協会に提出したものであるが、その時どうした訳か出した論文原稿に著者の名が抜けていた。審査委員はつまらぬ人の寄稿だと思って危うくこの論文を落第させようとした。しかし著者の名が判ってから、早速及第ということになったのである。

一八九五年に彼は再び心靈現象の実験に携わったが、やはり失望する外はなかった。この年の八月には Dieppe で疲労を休めた。その時母への手紙に "I suppose however that one's brain has a chance of recruiting itself." と書いた。

一八九七年に王立研究所 (Royal Institution) の自然科学教授になった。前任者ティンダルが病気でやめたその後を継いだのである。主な仕事は毎年復活祭の前の土曜の午後六回の講演をするのと、その外に一回金曜の晩専門的な研究結果の講演をするだけであった。講義には色々の実験をやって見せるのでその助手には例のゴルドンが任命された。ここの設備は極めて貧弱で、例えば標準抵抗一つさえなかった。午後の通俗講演の聴衆三百人ほどの中には専門家も居れば素人も居た。彼は一枚の紙片に書いた覚え書によって講演し、実験をやって見せる時にはちょっと手品師のような所作をして聴衆を喜ばせたりした。一八九九年このインスティテューションの創立百年記念式にはトーマス・ヤングの業績について講演した。レーリーが深くヤングに私淑していたであろうということは、二人の仕事の一体のやり口を比較すれば自ずから首肯されるであろう。レーリーの持っていたヤングの『自然科学講義』(一八〇七)は鉛筆でつけたしるしがいっぱいである。一九〇五年にこの椅子を去ったが、その後も一九一〇年と一九一四年に金曜の講演をつとめた。

ターリングにおける日常生活を紹介する。朝九時家族が集まって祈祷、寝坊して出ないものは睨まれた。それから朝飯まで書齋で書信の開封。朝飯中は手紙を読むか、さもなくば大抵黙っていたが、子供等には冗談を云ったり一緒に騒いだりした。朝飯後書齋で手紙の返事、十時に助手のゴルドン出勤、その日の仕事の打合せ、午前中は大抵読書か書きもの、Phil .Mag. か Ann. d. Ph. が来ると安楽椅子で約半時間それに目を通してから書棚へ入れる。書卓で実験の結果の計算、数式の計算または論文原稿執筆、途中で時々安楽椅子へ行って参考書を読んだり紙片へ鉛筆で何か書きながら黙想したり、天気の良い日は温室や庭を行ったり来たりして、

午前中一、二度実験室をのぞいて何かと指図をする、昼飯前三十分くらい子供や孫に数学の教授、詰込主義でなくて子供等を自然に導くというやり方であった。昼飯時に午後のプランをきめた。例えば夫人と馬車でドライブする相談、何時にどこへ行くというような事でも必ず先ず相手に意見を出させ、あとから自分の説を出すのが彼の流儀であった。食後新聞を一通り読む。新聞を熟読するのが彼の生涯の楽しみの一つであった。昼飯後コーヒーを出す習慣が始まった頃、どうもだんだん世の中が贅沢になって困ると云い云いコップを手にした。午後の散歩には農園を見巡る事もあった。豚とその習性に興味があった。夏は散歩の代りにローンテニスもやった。かなりうまかったが、五十歳後は止めてしまった。実験室で一、二時間仕事をしてからお茶になる。一杯の茶が有効な刺戟剤であった。仕事の難点が一杯の茶をのんでしまうとするすると解決するという事も珍しくなかった。お茶の後、ことに冬季はよく子供達と遊んだ。ポンチの漫画を見せたり、また Engineering 誌の器械の図を見せたり、また「ロンドンを見せてやる」と称して子供に股覗きをさせ、股の間から出した腕をつかまえて、ひっくり返す遊戯をした。しかし子供の不従順に対しては厳格であった。「子供を打擲するのはいやなものだ、あと一日気持が悪い」と云った。六時に実験室へ行って八時まで仕事。着物を更えて晚餐、食後新聞、雑誌、小説など。トランプもやった。若いうち就寝前の一時間を実験室か書卓で費やしたが、晩年はやめた。そうして、十一時から十二時頃までは安楽椅子でうたた寝をしてから寝室へ行くという不思議な癖があった。

煙草は生涯吸わず、匂いも嫌いであった。音楽は好きであったが深入りはしなかった。政治上の談論に興味があった。

ターリングの家の来訪者名簿には、内外の一流の学者の名前の外に英国一流政治家の名前も見える。

一八九二年にはソリスベリー卿の懇請でエセックス州の名誉知事 ( Lord Lieutenant ) を引受けさせられた。一九〇一年ボーア戦争後、軍隊組織に関する新しい職責が加わったので辞職した。その時の辞表が一枚の紙片に鉛筆で書いたものであったので当局者は苦い顔をしたそうである。彼はその頃色鉛筆を愛用していた。

一八九五年にはトリニティ・ハウス ( 海事協会 ) の学術顧問に聘せられた。かつてはファラデー、ティンダルの務めた職である。一八九七

九一三年の間、しばしば所属のヨット、イレネ号に、国王や王子その他のいわゆる Elder Brethren と一緒に乗込んで燈台の検分をしたり、燈光や霧報 (fog-signals) の試験をした。これには色や音に関する彼の知識が役に立ったのである。

国民科学研究所 (National Physical Laboratory) の設立が問題となって調査委員会が出来たときにレーリーが議長に選ばれ、いよいよ設立となったときには副委員長となった。研究所長にグレイズブルックが推挙されたのは、レーリーの考えから出たに相違ない。この創立に際して中心人物となるにはレーリーは最も適任であった。科学者の側からも信頼されると同時に政府側の有力者、また貴族の間に信用が厚かったからである。

一九〇三年に「肝油事件」というのが起った。それは所長が知人から頼まれて肝油の分析をしてやった、その分析表が訴訟事件の証拠物件となり、分析業者や化学者の団体から抗議が出てだいぶ面倒な問題になったのである。これが動機となって研究所の存在理由に関する質問が議会に出たりしたが、これに対する答弁には同所で出版された論文集二巻が役に立った。その後もこの研究所の財政問題などで心を煩わすことが多かったようである。純粋な自由研究と政府の要求に応ずるような功利的研究との融和塩梅も最も痛切な困難であつたらしい。一九一九年彼の死ぬる少し前に辞表を出し、間もなくグレイズブルックも停年で退職した。

一八九七年頃レーリーは自分の仕事が少しだれ気味になるのを自覚した。それで気を変えるために休暇の必要を感じた。一八九八年の初めにインドのプナー (Poonah) で皆既日蝕が見られるというので思い立って十月末にコロボ行の船に乗って出掛けた。インドでは到るところで歓迎されたが、それは貴族としてであって、彼を迎えた人達は彼の科学上の仕事などは全く知らないように見えた。彼はインド魔術を面白がり、夫人がいろいろの、彼から見ると無駄な買物をするのを気にしたりした。

一九〇〇年軍務局で爆発物調査委員会が設置されたとき、レーリーが委員長に選ばれた。彼の好みにはあまり合わないこの仕事を、彼は愛国的感情から引受けたと云われている。無煙火薬の形を管状にする方が有利であるということを論じた論文が全集の第五巻に出ているのはこういう機縁に因るのである。

一九〇一年には Chief Gas Examiner (ガス受給に関する監督局長

官)に任命され、ガス法規修正案の調査会の議長となり、また訴訟問題の判定に参与したりした。この職には死ぬまで停まっていたのである。

一九〇一年にロンドンのチューブ地下鉄道が開設されたが、このために家が振動して困るという苦情が出たので、政府はそのために調査委員を設け、レーリーが委員長になった。色々実験の結果モーターの取付けに適当な弾条をつけただけで、この問題は容易に解決された。

青年時代に手をつけた「空の青色」に関する問題が、二十六年後の一八九九年に現われた論文で取扱われている。空気分子自身による光の分散によって青色が説明され、それから分子数が算定される事を示した。

永い間レーリーの手足となって働いて来たジョージ・ゴルドンが一九〇四年の暮に病死した。それから一年ほどは助手なしであったが、子息すなわち現在のレーリー卿が休暇で帰っているときは父を助けてガラス吹きや金工をやっていた。一九〇五年に新しい助手 J. C. Enock を得たが、この人は一九〇八年にターリングを去った。

一八七六年頃から音の方向知覚の問題に興味を感じていたが、一九〇六年に到って、両耳に来る波の位相の差がこの知覚に重要な因子であることをたしかめた。

一八九九年に彼の全集の第一巻が出た。この巻頭に聖歌の一節 "The works of the Lord are great, ....." を刷るつもりであったが、出版社の秘書が云いにくそうに「これでは、ひょっとすると、Lord すなわち貴方だと読者が思うかもしれませんが」と注意した。なるほどというのでこの句は別の句に移した。

全集の終りの第六巻は彼の死んだ翌年に出た。論文の総数四六六である。彼の論文のスタイルはコンサイスで一種独特の風貌がある。数学的論文と純実験的論文とが併立しているのも目に立つ。彼はまた論文の終りに短い摘要を添えるのが嫌いであった。理由は、摘要だけ見たのでは実験の内容にはないものまでも責を負わされる虞があるというのであった。

彼は自分でもしばしば言明したように、全く自分の楽しみのために学問をし研究をした。興味の向くままに六かしい数学的理論もやれば、甲虫の色を調べたり、コーヒー茶碗をガラス板の上に滑らせたりした。彼にはいわゆる専門はなかった。しかし何でも、手を着ければ端的に問題の要点に肉迫した。

彼自身は楽しみにやっていますが、学界はその効績を認めない訳には行かなかった。一九〇二年エドワード王が Order of Merit を設けた時に最初に選ばれた十二人の中にレーリーの名も入っていた。ケルヴィンやキチナー將軍や画家のワッツなども顔を並べていた。また一九〇四年にはノーベル賞を受けた。一九〇五年には王立協会の会長に選ばれたが、五年の期限が満たない三年後に辞任した。その理由は、長い海外旅行をしたいというのと、少し耳が遠くて困るというのと、外国語がよくしゃべれないので外国人との交渉に不便だということであった。一九〇八年ケンブリッジで名誉総長デヴォンシャー公が死んで、その椅子がレーリーに廻って来た。就任式の仰々しい行列は彼にいささか滑稽に思われたようであった。見物人の群衆の中に交じった自分の息子を発見した時、眼をパチパチとさせて眼くばせをした。そういう心持を眼で伝えたのである。この時の記念としてレーリー賞の資金が集められた。彼はまた大学財政の窮乏を救うためにカーネギーを説いたり、タイムス紙を通して世間に訴えたりした。一九〇九年のダーウィン百年祭はレーリー総長の司会で行われたが、その時の彼の追懐演説に現われたダーウィンの風貌は興味が深いものであった。また一九一一年に出た著作権修正案が大学の権利を脅かすものであったので、総長レーリーは上院で反対演説をした。

レーリーは前から南洋の島々を見たいという希望をもっていた。一九〇八年の冬の間に南アフリカへ遊びに来ないかという招待を、時の南アの長官セルボーン卿から受けたので、そのついでに南洋へも廻る気が出かけた。しかしケープからシドニーへの荒い旅路は遂に彼の南洋行を思い止まらせた。アフリカでキンバーレー、ヴィクトリア滝を見てプレトリアへの途上赤痢に罹り、その報知はロンドンを驚かせた。それからナタル、ザンジバルをも見舞った。アフリカ沿岸航海中に深海の水色について色々の観察をした。その結果を一九一〇年に発表した。彼の説は後にラマン等の研究によって訂正された。この旅行の帰途ナポリでカプリの「ろうかんどう」をも見物したのであった。

南ア旅行から帰ったときは、病後のせいもあったが、あまり元気がなかった。もう仕事をする気力がなくなったのではないかという気がした。それでも帰るとから水の色に関する実験をぼつぼつ始めた。この頃から以後は全く実験助手なしであったから仕事は思わしく進まなかった。従って

自然に数学的な方面の仕事に傾いて行った。彼は六十七歳になったが研究の興味も頭脳の鋭さも、少しも衰えなかった。ただ全く新しい馴れぬ方面の仕事に立入る気はなくなっていた。ある時彼の長子が「科学者も六十過ぎると、役に立たないばかりか、むしろ害毒を流す」と云ったハクスレーの言葉を引いて、どう思うかと聞いたら、「それは、年寄って若い人の仕事を批評したりするといけない事になるかもしれないが、自分の熟達した仕事を追究して行くなれば別に悪い事はあるまい」と答えた。

一九二二年の暮にレーリーの末男が死んで、幸福な彼の晩年にも一抹の黒い影がさした。一九一三年の春は肋膜炎を病んだ。そのとき「もう五年生きていたいのだが」と云った。一九一四年ルムフォード賞牌を受けたときに、人への手紙に「私の光学上の仕事が認められたのは嬉しい。あれは外の仕事よりも一層道楽半分にやったのだが」と書いている。

大戦中ターリングは軍隊の駐屯所となった。ある時はツェペリンの焼け落ちるのが見えたり、西部戦線の砲声が聞こえたりした。音響学における彼の深い知識は戦争の役に立った。飛行機や潜航艇の所在を探知する方法について絶えず軍務当局から相談を受け、また一方では国民科学研究所と航空研究顧問委員会の軍事的活動の舞台でも主役を勤めていたので、その頃の彼の書斎は机の上も床の上もタイプライターでたたいた報告書類などで埋まっていた。

レーリーの航空趣味は久しいものであった。子供の時分に燈火をつけた紙鳶を夜の空に上げて田舎の村人を驚かし、一八九七年には箱形の紙鳶を上げ、糸を樹につないだまま一晩揚げ切りしておいたこともあった。一八八三年には鳥の飛翔について、『ネーチャア』誌に通信を寄せた。これがリリエントールの滑翔の研究を刺戟したことは本人からレーリーに寄せた手紙で分る。ライト兄弟もまたレーリーの影響を受けたらしい形跡がある。一九〇〇年マンチェスターでの講演では飛行機の原理を論じ、ヘリコプテルや垂直スクリューにも論及した。それで航空研究顧問委員会が組織されたときに彼が委員長になったのも偶然ではない。航空研究に関して彼の極めて重要な貢献は「力学的相似の原理」(Principle of dynamical similarity)の運用であった。これがなくてはすべての模型実験は役に立たないのである。短い論文ただ二つではあったが、これがこの方面の研究の基礎となった。

レーリーが公衆の面前に現われた最後は心靈学界の会長就任演説（一九一九）をした時であった。この演説も全集に収められている。

一九一七 一八年の冬頃からどうも脚が冷えて困ると云ってこぼしていた。一九一八年の夏は黄疸で二箇月寝込んだ。彼は自分の最後の日のあまり遠くないのを悟ったらしかった。それでもやはり仕事を続け、一九一八年には五篇、一九一九年には七篇の論文を出した。

一九一八年の暮バキングム宮で大統領ウィルソンのために開かれた晩餐会に列席した。明けて一九一九年正月の国民科学研究所の集会に出た時に所長の重職を辞したいと申出たが、一同の強い勧誘で一先ず思い止まった。その時のついでに彼はインペリアルカレッジの実験室に長子をおとずれた。丁度その時子息が実験していた水銀燈を見たときに、彼は、干涉縞のは写真を撮って、それで光学格子を作るという、自分で昔考えた考察を思い出した。しかしターリングの設備では実行が出来ないのであった。それで、次にロンドンへ来た折に二人で一緒にやってはどうかという子息の申出を喜んだように見えた。それから帰宿の途中、地下鉄の昇降器の中で卒倒したが、その時はすぐに回復した。

一九一九年五月十八日の日曜、例の通り教会へ行ったが気分が悪いと云って途中で帰宅し、午後中ソファで寝ていた。翌朝は臥床を離れる元気がなかった。五月二十七日と二十八日は好天気であったので、戸外の美しい日光の下でお茶に呼ばれるために、二階からやっと下りて来た。六月一日長子が週末で帰省したときに、自分はもう永くはないが、ただ一つ二つ仕上げておきたいことがあると云った。六月二十五日には「移動低気圧」に関する論文の最後の一節を夫人に口授して筆記させ、出来上がった原稿を Phil. Mag. に送らせた。六月三十日には少し気分がよさそうに見えた。晩餐後ミス・オーステンの小説『エンマ』を読んでいた。しかし従僕が膳部を下げにはいって見ると、急に心臓麻痺を起していたので、急いで夫人を呼んで来た。それから間もなくもうすべてが終ってしまった。

葬式はターリングで行われた。キングは名代を遣わして参列させ、その他ケンブリッジ大学や王立協会の主要な人々も会葬し、荘園の労働者は寺の門前に整列した。墓はターリング・ブレースの花園に隣った寺の墓地の静かな片隅にある。赤い砂岩の小さな墓標には "For now we see in a glass darkly, but then face to face." と刻してある。その後ウェストミン

スター・アベーに記念の標石を納めようという提議が大学総長や王立協会会長などの間に持出され、その資金が募集された。標石の上の方には横顔を刻したメダリオンが付いている。レーリーの私淑したと思われるトーマス・ヤングの記念標と丁度対称的に向き合っている。除幕式は一九二一年十一月三十日、ジェー・ジェー・タムソンの司会の下に行われた。その時のタムソンの演説はさすがにレーリー代の仕事に対する簡潔な摘要とも見られるものである。その演説の要旨の中から、少しばかり抄録してみる。

「レーリーの全集に収められた四四六篇の論文のどれを見ても、一つとしてつまらないと思うものはない。科学者の全集のうちには、時のたつうちには単に墓石のようなものになってしまうものもあるが、レーリーのはおそらく永く将来までも絶えず参考されるであろう。」

「レーリーの仕事はほとんど物理学全般にわたっていて、何が専門であったかと聞かれると返答に困る。また理論家が実験家かと聞かれれば、そのおのおのであり、またすべてであったと答える外はない。」

「彼の論文を読むと、研究の結果の美しさに打たれるばかりでなく、明晰な洞察力で問題の新しい方面へ切り込んで行く手際の鮮やかさに心を引かれる。また書き方が如何にも整然としていて、粗雑な点が少しもない。」「優れた科学者のうちに、一つの問題に対する『最初の言葉』を云う人と、『最後の言葉』を述べる人とあったとしたら、レーリーは多分後者に属したかもしれない。」

しかし彼はまたかなり多く「最初の言葉」も云っているように思われる。

(附記) 以上はほとんどすべて Robert John Strutt すなわち現在のレーリー卿の著書”John William Strutt, Third Baron Rayleigh”から抄録したものである。ここでは彼の科学的な仕事よりはむしろこの特色ある学者の面目と生活とを紹介する方に重きをおいた。近頃の流行語で云えば彼は代表的のブルジョア理学者であったかもしれない。しかし彼の業績は世界人類の共有財産に莫大な寄与を残した。彼はまた見方によれば一種のディレクタントであったようにも見える。しかし如何なるアカデミックな大家にも劣らぬ古典的な仕事をした。彼は「英国の田舎貴族」と「物理学」との配偶によってのみ生み出され得べき特産物であった。吾々は彼の生涯の記録と彼の全集とを左右に置いて較べて見るときに、始めて彼の真

面目が明らかになると同時に、また彼のすべての仕事の必然性が会得されるような気がする。科学の成果は箇々の科学者の個性を超越する。しかし一人の科学者の仕事が如何にその人の人格と環境とを鮮明に反映するかを示す好適例の一つを吾々はこのレーリー卿に見るのである。



図 10.2 1905 年 (奇跡の年) の Einstein (特許事務所にて)

## 10.2 アインシュタイン (Einstein)

寺田寅彦 (「青空文庫」より)

—

この間日本へ立寄ったバートランド・ラッセルが、「今世界中で一番えらい人間はアインシュタインとレニンだ」というような意味の事を誰かに話したそうである。この「えらい」というのがどういう意味のえらいのであるかが聞きたいのであったが、遺憾ながらラッセルの使った原語を聞き洩らした。

なるほど二人ともに革命家である。ただレニンの仕事はどこまでが成効であるか失敗であるか、おそらくはこれには誰にもよく分らないだろうが、アインシュタインの仕事は少なくとも大部分たしかに成効である。これについては世界中の信用のある学者の最大多数が裏書をしている。仕事が科学上の事であるだけにその成果は極めて鮮明であり、従ってそれを仕遂げた人の科学者としてのえらさもまたそれだけはっきりしている。

レニンの仕事は科学でないだけに、その人のその仕事の遂行者として

のえらさは必ずしも目前の成果のみで計量する事が出来ない。それにもかかわらずレニンのえらさは一般の世人に分りやすい種類のものである。取扱っているものが人間の社会で、使っているものが兵隊や金である。いずれも科学的には訳の分らないものであるが、ただ世人の生活に直接なものであるだけに、事柄が誰にも分りやすいように思われる。

これに反してアインシュタインの取扱った対象は抽象された時と空間であって、使った道具は数学である。すべてが論理的に明瞭なものであるにかかわらず、使っている「国語」が世人に親しくないために、その国語に熟しない人には容易に食いつけない。それで彼の仕事を正当に理解し、彼のえらさを如実に評価するには、一通りの数学的素養のある人でもちょっと骨が折れる。

到底分らないような複雑な事は世人に分りやすく、比較的簡単明瞭な事の方が却って分りにくいというおかしな結論になる訳であるが、これは「分る」という言葉の意味の使い分けである事は勿論である。

アインシュタインの仕事の偉大なものであり、彼の頭脳が飛び離れてえらいという事は早くから一部の学者の間には認められていた。しかし一般世間に持て囃されるようになったのは昨今の事である。遠い恒星の光が太陽の近くを通過する際に、それが重力の場の影響のために極めてわずかに曲るだろうという、誰も思いもかけなかった事実を、彼の理論の必然の結果として鉛筆のさきで割り出し、それを予言した。それが云わば敵国の英国の学者の日蝕観測の結果からある程度まで確かめられたので、事柄は世人の眼に一種のロマンチックな色彩を帯びるようになって来た。そして人々はあたかも急に天から異人が降って来たかのように驚異の眼を彼の身辺に集注した。

彼の理論、ことに重力に関する新しい理論の実験的証左は、それがいづれも極めて機微なものであるだけにまだ極度まで完全に確定されたとは云われないうちかもしれない。しかし万一将来の実験や観測の結果が、彼の現在の理論に多少でも不利なような事があつたとしても、彼の物理学者としてのえらさにはそのために少しの疵もつかないだろうという事は、彼の仕事の筋道を一通りでも見て通った人の等しく承認しなければならない事であろう。

物理学の基礎になっている力学の根本に或る弱点のあるという事は早

くから認められていた。しかし彼以前の多くの学者にはそれをどうしたらいいかが分らなかった。あるいは大多数の人は因襲的の妥協に馴れて別にどうしようとも思わなかった。力学の教科書はこの急所に触れないように知らん顔をしてすましていた。それでも実用上の多くの問題には実際差支えがなかったのである。ところが近代になって電子などというものが発見され、あらゆる電磁気や光熱の現象はこの不思議な物の作用に帰納されるようになった。そしてこの物が特別な条件の下に驚くべき快速で運動する事も分って来た。こういう物の運動に関係した問題に触れ始めると同時に、今までそっとしておいた力学の急所がそろそろ痛みを感じずようになって来た。ロレンツのごとき優れた老大家は疾くからこの問題に手を付けて、色々な矛盾の痛みを局部的の手術で治療しようとして骨折している間に、この若い無名の学者はスイスの特許局の一隅にかくれて、もっともっと根本的な大手術を考えていた。病の根は電磁気や光よりもっと根本的な時と空間の概念の中に潜伏している事に眼をつけた。そうしてその腐りかかった、間に合わせの時と空間を取って捨てて、新しい健全なものをその代りに植え込んだ。その手術で物理学は一夜に若返った。そして電磁気や光に関する理論の多くの病竈はひとりでに綺麗に消滅した。

病源を見つけたのが第一のえらさで、それを手術した手際は第二のえらさでなければならない。

しかし病気はそれだけではなかった。第一の手術で「速度の相対性」を片付けると、必然の成行きとして「重力と加速度の問題」が起って来た。この急所の痛みは、他の急所の痛みが消えたために一層鋭く感ぜられて来た。しかしこの方の手術は一層面倒なものであった。第一に手術に使った在来の道具はもう役に立たなかった。吾等の祖先から二千年来使い馴れたユークリッド幾何学では始末が付かなかった。その代りになるべき新しい利器を求めている彼の手に触れたのは、前世紀の中頃に数学者リーマンが、そのような応用とは何の関係もなしに純粋な数学上の理論的の仕事として残しておいた遺物であった。これを錬え直して造った新しい鋭利なメスで、数千年来人間の脳の中にへばり付いていたいわゆる常識的な時空の観念を悉皆削り取った。そしてそれを切り刻んで新しく組立てた「時空の世界像」をそこに安置した。それで重力の秘密は自明的に解釈されると同時に古い力学の暗礁であった水星運動の不思議は無理なしに説明され、光

と重力の関係に対する驚くべき予言は的中した。もう一つの予言はどうか分らないが、ともかくも今まで片側だけしか見る事の出来なかった世界は、これを掌上に置いて意のままに任意の側から観る事が出来るようになった。観者に関するあらゆる絶対性を打破する事によって現出された客観的実在は、ある意味で却って絶対なものになったと云ってもよい。

この仕事を仕遂げるために必要であった彼の徹底的な自信はあらゆる困難を凌駕させたように見える。これも一つのえらさである。あらゆる直接経験から来る常識の幻影に惑わされずに純理の道筋を踏んだのは、数学という器械の御蔭であるとしても、全く抽象的な数学の枠に万象の実世界を寸分の隙間もなく切りはめた鮮やかな手際は物理学者としてその非凡なえらさによるものと考えなければならない。

こういう飛びぬけた頭脳を持っていて、そして比較的短い年月の間にこれだけの仕事を仕遂げるだけの活力を持っている人間の、「人」としての生立ちや、日常生活や、環境は多くの人の知りたいと思うところであろう。

それで私は有り合せの手近な材料から知り得られるだけの事をここに書き並べて、この学者の面影を臆気にでも紹介してみたいと思うのである。主な材料はモスコフスキーの著書に拠る外はなかった。要するに素人画家のスケッチのようなものだと思って読んでもらいたいのである。

## 二

アルベルト・アインシュタインは一八七九年三月の出生である。日本ならば明治十二年卯歳の生れで数え年四十三（大正十年）になる訳である。生れた場所は南ドイツでドナウの流れに沿うた小都市ウルムである。今のドイツで一番高いゴチックの寺塔のあるという外には格別世界に誇るべき何物をも有たないらしいこの市名は偶然にこの科学者の出現と結び付けられる事になった。この土地における彼の幼年時代について知り得られる事実は遺憾ながら極めて少ない。ただ一つの逸話として伝えられているのは、彼が五歳の時に、父から一つの羅針盤を見せられた事がある、その時に、何ら直接に接触するものもない磁針が、見えざる力の作用で動くのを見て非常に強い印象を受けたという事である。その時の印象が彼の後年の仕事にある影響を与えたという事が彼自身の口から伝わっている。

丁度この頃、彼の父は家族を挙げてミュンヘンに移転した。今度の家は前のせまくるしい住居とちがって広い庭園に囲まれていたので、そこで初めて自由に接することの出来た自然界の印象も彼の生涯に決して無意味ではなかったに相違ない。

彼の家族にユダヤ人種の血が流れているという事は注目すべき事である。後年の彼の仕事や、社会人生観には、この事実と思い合せて初めて了解される点が少なくないように思う。それはとにかく彼がミュンヘンの小学で受けたローマカトリックの教義と家庭におけるユダヤ教の教義との相対的な矛盾 因襲的な独断と独断の背馳《はいち》が彼の幼い心にどのような反応を起させたか、これも本人に聞いてみたい問題である。

この時代の彼の外観には何らの鋭い天才の閃きは見えなかった。ものを云う事を覚えるのが普通より遅く、そのために両親が心配したくらいで、大きくなってもやはり口重であった。八、九歳頃の彼はむしろ控え目で、あまり人好きのしない、独りぼっちの仲間外れの観があった。ただその頃から真と正義に対する極端な偏執が目立った。それで人々は「馬鹿正直 (ピーダーマイアー)」という渾名を彼に与えた。この「馬鹿正直」を徹底させたものが今日の彼の仕事になるうとは、誰も夢にも考えなかった事であろう。

音楽に対する嗜好は早くから眼覚めていた。独りで讃美歌のようなものを作って、独りでこっそり歌っていたが、恥ずかしがって両親にもそれは隠して聞かせなかったそうである。腕白な遊戯などから遠ざかった独りぼっちの子供の内省的な傾向がここにも認められる。

後年まで彼につきまとったユダヤ人に対するショーヴィニズムの迫害は、もうこの頃から彼の幼い心に小さな波風を立て初めたらしい。そしてその不正義に対する反抗心が彼の性格に何かの痕跡を残さない訳には行かなかったろうと思われる。「ユダヤ人はその職業上の環境や民族の過去のために、人から信用されるという経験に乏しい。この点に関してユダヤ人の学者に注目して見るがいい。彼等は論理というものに力瘤を入れる。すなわち理法によって他の承諾を強要する。民族的反感からは信用したくない人でも、論理の前には屈伏しなければならない事を知っているから。」こう云ったニーチェのいがいがしい言葉が今更に強く吾々の耳に響くように思われる。

彼の学校成績はあまりよくなかった。特に言語などを機械的に暗記する事の下手な彼には当時の軍隊式な詰め込み教育は工合が悪かった。これに反して数学的推理の能力は早くから芽を出し初めた。計算は上手でなくても考え方が非常に巧妙であった。ある時彼の伯父に当る人で、工業技師をしているヤーコブ・アインシュタインに、代数学とは一体どんなものと質問した事があった。その時に伯父さんが「代数というのは、あれは不精もののずい計算術である。知らない答を $X$ と名づけて、そしてそれを知っているような顔をして取扱って、それと知っているものとの関係式を書く。そこからこの $X$ を定めるという方法だ」と云って聞かせた。この馴れた、しかし要を得た説明は子供の頭に眠っている未知の代数学を呼び覚ますには充分であった。それから色々の代数の問題はひとりで楽に解けるようになった。始めて、幾何学のピタゴラスの定理に打つかった時にはそれでも三週間頭をひねったが、おしまいには遂にその証明に成効した。論理的に確実なある物を捕える喜びは、もうこの頃から彼のうら若い頭に滲み渡っていた。数理に関する彼の所得は学校の教程などとは無関係に驚くべき速度で増大した。十五歳の時にはもう大学に入れるだけの實力があるという事を係りの教師が宣言した。

しかし中等学校を卒業しないうちに学校生活が一時中断するようになったというのは、彼の家族一同がイタリアへ移住する事になったのである。彼等はミランに到着した。そこでしばらく自由の身になった少年はよく旅行をした。ある時は単身でアペニンを越えて漂浪したりした。間もなく彼はチューリヒのポリテクニクムへ入学して数学と物理学を修める目的でスイスへやって来た。しかし国語や記載科学の素養が足りなかつたので、しばらくアールウの実科中学にはいつていた。わずかに十六歳の少年は既にこの時分から「運動体の光学」に眼を付け初めていたという事である。後年世界を驚かした仕事はもうこの時から双葉を出し初めていたのである。

彼の公人としての生涯の望みは教員になる事であった。それでチューリヒのポリテクニクムの師範科のような部門へ入学して十七歳から二十一歳まで勉強した。卒業後彼をどこかの大学の助手にでも世話しようとする者もあったが、国籍や人種の問題が邪魔になって思わしい口が得られなかつた。しかし家庭の経済は楽でなかつたから、ともかくも自分で働いて

食わなければならないので、シャフハウゼンやベルンで私教師を勤めながら静かに深く物理学を勉強した。かなりに貧しい暮らしをしていたらしい。その時分の研学の仲間に南ロシアから来ている女学生があって、その後一九〇三年にこの人と結婚したが数年後に離婚した。ずっと後に従妹のエルゼ・アインシュタインを迎えて幸福な家庭を作っているという事である。

一九〇一年、スイス滞在五年の後にチューリヒの公民権を得てやっと公職に就く資格が出来た。同窓の友グロスマンの周旋で特許局の技師となって、そこに一九〇二年から一九〇九年まで勤めていた。彼のような抽象に長じた理論家が極めて卑近な発明の審査をやっていたという事は面白い事である。彼自身の言葉によるとこの職務にも相当な興味をもって働いていたようである。

一九〇五年になって彼は永い間の研究の結果を発表し始めた。頭の中にいっぱいたまっていたものが大河の堤を決したような勢いで溢れ出した。『物理年鑑』に出した論文だけでも四つでその外に学位論文をも書いた。いずれも立派なものであるが、その中の一つが相対論の元祖と称せられる「運動せる物体の電気力学」であった。ドイツの大家プランクはこの論文を見て驚いてこの無名の青年に手紙を寄せ、その非凡な着想の成效を祝福した。

ベルンの大学は彼を招かんとして躊躇していた。やっと彼の椅子が出来ると間もなく、チューリヒの大学の方で理論物理学の助教授として招聘した。これが一九〇九年、彼が三十一歳の時である。特許局に隠れていた足掛け八年の地味な平和の生活は、おそらく彼のにとっては意義の深いものであったに相違ないが、ともかくも三十一にして彼は立って始めて本舞台に乗り出した訳である。一九一一年にはブラーグの正教授に招聘され、一九一二年に再びチューリヒのポリテクニクムの教授となった。大戦の始まった一九一四年の春ベルリンに移ってそこで仕事を大成したのである。

ベルリン大学にける彼の聴講生の数は従来のレコードを破っている。一昨年来急に世界的に有名になってから新聞雑誌記者は勿論、画家彫刻家までが彼の門に押しよせて、肖像を描かせろ胸像を作らしてくれとせがむ。講義をすまして廊下へ出ると学生が押しかけて質問をする。宅へ帰ると世界中の学者や素人から色々の質問や注文の手紙が来ている。それに対して一々何とか返事を出さなければならないのである。外国から講演をし

に来てくれと頼まれる。このような要求は研究に熱心な学者としての彼には迷惑なものに相違ないが、彼は格別厭な顔をしないで気永に親切に誰にでも満足を与えているようである。

彼の名声が急に揚がる一方で、彼に対する迫害の火の手も高くなった。ユダヤ人種排斥という日本人にはちょっと分らない、しかし多くのドイツ人には分りやすい原理に、幾分は別の妙な動機も加わって、一団のインシュタイン排斥同盟のようなものが出来た。勿論大多数は物理学者以外の人で、中にはずいぶんいかがわしい人も交じっているようである。これが一日ベルリンのフィルハーモニーで公開の弾劾演説をやって無闇な悪口を並べた。中に物理学者と名のつく人も一人居て、これはさすがに直接の人身攻撃はやらないで相対原理の批判のような事を述べたが、それはほとんど科学的には無価値なものであった。要するにこの演説会は純粋な悪感情の表現に終ってしまった。気の永いインシュタインもかなり不愉快を感じたと見えて、急にベルリンを去ると云い出した。するとベルリン大学に居る屈指の諸大家は、一方インシュタインをなだめると同時に、連名で新聞へ弁明書を出し、彼に対する攻撃の不当な事を正し、彼の科学的貢献の偉大な事を保証した。またインシュタインは進まなかったらしいのを、すすめて自身の弁明書を書かせ、これを同じ新聞に掲げた。その短い文章は例の通りキビキビとして極めて要を得ているのは勿論であるが、その行文の間に卑怯な迫害者に対する苦々しさが滲透しているようである。彼に対する同情者は遠方から電報をよこしたりした。その中にはマクス・ラインハルトの名も交じっていた。

その後ナウハイムで科学者大会のあった時、特にその中の一日を相対論の論評にあてがった。その時の会場は何となく緊張していたが当人のインシュタインは極めて呑気な顔をしていた。レナードが原理の非難を述べている間に、かつてフィルハーモニーで彼の人身攻撃をやった男が後ろの方の席から拍手をしたりした。しかしレナードの急き込んだ質問は、冷静な、しかも鋭い答弁で軽く受け流された。

レナード「もし実際そんな重力の『場』があるなら、何かもっと見やすい anschaulich) 現象を生じそうなものではないか。」

インシュタイン「見やすいとか見やすすくないとかいう事は時代とともに変わるもので、云わば時の函数であります。ガリレーの時代の人には彼の力

学はよほど見やすすくないものだったでしょう。いわゆる見やすい観念などと称するものは、例の『常識』『健全な理知』(gesunder Menschenverstand)と称するものと同様にずいぶん穴だらけなものかと思えます。」

この返答で聴衆が笑い出したと伝えられている。この討論は到底相撲にならないで終結したらしい。

今年は米国へ招かれて講演に行った。その帰りに英国でも講演をやった。その当時の彼の地の新聞は彼の風采と講演ぶりを次のように伝えている。

「……。ちょっと見たところでは別に堂々とした様子などはない。中背で、肥っていて、がっしりしている。四十三にしてはふけて見える。皮膚は蒼白に黄味を帯び、髪は黒に灰色交じりの梳《くしけず》らない団塊である。額には皺、眼のまわりには疲労の線条を印している。しかし眼それ自身は磁石のように牽き付ける眼である。それは夢を見る人の眼であって、冷たい打算的なアカデミックな眼でない、普通の視覚の奥に隠れたあるものを見透す詩人創造者の眼である。眼の中には異様な光がある。どうしても自分の心の内部に生活している人の眼である。」

「彼が壇上に立つと聴衆はもうすぐに彼の力を感じず。ドイツ語がわかる分らぬは問題でない。ともかくも力強く人に迫るある物を感じる。」

「重大な事柄を話そうとする人にふさわしいように、ゆっくり、そして一語一句をはっきり句切って話す。しかし少しも気取ったようなところはない。謙遜で、引きしまっていて、そして敏感である。ただ話が佳境に入ると多少の身振りを交じえる。両手を組合したり、要点を強めるために片腕をつき出したり、また指の端を唇に触れたりする。しかし身体は決して動かさない。折々彼の眼が妙な表情をして瞬く事がある。するとドイツ語の分らない人でも皆釣り込まれて笑い出す。」

「不思議な、人を牽き付ける人柄である。干からびたいいわゆるプロフェッサーとはだいぶ種類がちがっている。音楽家とでもいうような様子があるが、彼は実際にそうである。数学が出来ると同じ程度にヴァイオリンが出来る。十分な情緒と了解をもってモザルト、シューマン、バッハなどを演奏する……。」

私が初めてアインシュタインの写真を見たのはK君のところであつた。その時に私達は「この顔は夢を見る芸術家の顔だ」というような事を

話し合った。ところがこの英国の新聞記者も同じような事を云っているのを見ると、この印象はいくらか共通なものかもしれない。実際彼のような破天荒の仕事は、「夢」を見ない種類の人には思い付きそうに思われない。しかしただ夢を見るだけでは物にならない。夢の国に論理の橋を架けたのが彼の仕事であった。

アメリカのスロツソンという新聞記者のかいた書物の口絵にある写真はちょっとちがった感じを与える。どこか皮肉な、今にも例の人を笑わせる顔をしようなところがある。また最近にタイムス週刊の画報に出た、彼がキングス・カレッジで講演をしている横顔もちょっと変っている。顔面に対してかなり大きな角度をして突き出た三角形の大きな鼻が眼に付く。

アインシュタインは「芸術から受けるような精神的幸福は他の方面からはとても得られないものだ」と人に話したそうである。ともかくも彼は芸術を馬鹿にしない種類の科学者である。アインシュタインの芸術方面における趣味の中で最も顕著なものは音楽である。彼の弾くヴァイオリンが一人前のものだという事は定評であるらしい。かなりテヒニークの六《むつ》ヶしいブラームスのものでも鮮やかに弾きこなすそうである。技術ばかりでなくて相当な理解をもった芸術的の演奏が出来るらしい。

それから、子供の時に唱歌をやったと同じように、時々ピアノの鍵盤の前に坐って即興的のファンタジーをやるのが人知れぬ楽しみの一つだそうである。この話を聞くと私は何となくボルツマンを思い出す。しかしボルツマンは陰気でアインシュタインは明るい。

音楽の中では古典的なものを好むそうである。特にゴチックの建築に譬えられるバッハのものを彼が好むのは偶然ではないかもしれない。ベートーヴェンの作品でも大きなシンフォニーなどより、むしろカンマーミュージクの類を好むという事や、ショパン、シューマンその他 | 浪漫派の作者や、またワグナーその他の楽劇にあまり同情しない事なども、何となく彼の面目を想像させる。

絵画には全く無関心だそうである。四元の世界を眺めている彼には二元の芸術はあるいはあまりに児童に近いかもしれない。万象を時と空間の要素に切りつめた彼には色彩の美しさなどはあまりに空虚な幻に過ぎないかもしれない。

三元的な彫刻には多少の同情がある。特に建築の美には歎美を惜しま

ないそうである。

そう云えば音楽はあらゆる芸術の中で唯一の四元的のものとも云われない事はない。この芸術には一種の「運動」が本質的なものである。ただその時とともに運動する「もの」と空間とが物質的でないだけである。

文学にも無関心ではないそうである。ただ忙しい彼には沢山色々のものを読む暇がないのであろう。シェークスピアを尊敬してゲーテをそれほどに思わないらしい。ドストエフスキー、セルバンテス、ホーマー、ストリンドベルヒ、ゴットフリード・ケラー、こんな名前が好きな方の側に、ゾラやイブセンなどが好かない方の側に挙げられている。この名簿も色々な意味で吾々には面白く感じられる。

(ゴットフリード・ケラーとはどんな人かと思って小宮君に聞いてみると、この人(一八一九 一八九〇)はスイスチューリヒの生れで、描写の細かい、しかし抒情的気分に富んだ写実小説家だそうである。)

哲学者の仕事に対する彼の態度は想像するに難くない。ロックやヒュームやカントには多少の耳を借しても、ヘーゲルやフィヒテは問題にならないらしい。これはそうありそうな事である。とにかく将来の哲学者は彼から多くを学ばねばなるまい。ショーペンハウアーとニーチェは文学者として推賞するのだそうである。しかしニーチェはあんまりキラキラしている (glitzernd) と云っている。

彼が一種の煙霞癖をもっている事は少年時代のイタリア旅行から芽を出しているように見える。しかし彼の旅行は単に月並な名所や景色だけを追うて、汽車の中では居眠りする亜類ではなくて、何の目的もなく野に山に海浜に彷徨するのが好きだという事である。しかし彼がその夢見るような眼をして、そういう処をさまよい歩いている間に、どんな活動が彼の脳裡に起っているかという事は誰にも分らない。

勝負事には一切見向かない。蒐集癖も皆無である。学者の中で彼ほど書物の所有に冷淡な人も少ないと云われている。尤も彼のような根本的に新しい仕事に参考になる文献の数は比較的極めて少数である事は当然である。いわゆるオーソリティは彼自身の頭蓋骨以外にはどこにも居ないのである。

彼の日常生活はおそらく質素なものであろう。学者の中に折々見受けられるような金銭に無関心な人ではないらしい。彼の著者の翻訳者には印税の

かなりな分け前を要求して来るといふような噂も聞いた。多くの日本人には多少変な感じもするが、ドイツ人という者を知っている人には別にそう不思議とは思われない。特に彼の人種の事までも取り立てて考えるほどの事ではないと思われる。

夜はよく眠るそうである。神経のいらいらした者が、彼のような仕事をして、そしてそれが成効に近づいたとすればかなり興奮するにちがいない。勝手に仕事を途中で中止してのんきに安眠するという事は存外六ヶしい事であるに相違ない。しかし彼は適当な時にさっさと切り上げて床につく、そして仕事の事は全く忘れて安眠が出来ると彼自身人に話している。ただ一番最初の相対原理に取り付いた時だけはさすがにそうはゆかなかつたらしい。幾日も喪心者のようになって彷徨したと云っている。一つは年の若かったせいでもあろうが、その時の心持はおそらくただ選ばれたごく少数の学者芸術家あるいは宗教家にして始めて味わい得られる種類のものであったろう。

### 三

アインシュタインの人生観は吾々の知りたいと願うところである。しかし彼自身の筆によらない限りその一斑をも窺う事はおそらく不可能な事に相違ない。彼の会話の断片を基にしたジャーナリストの評論や、またそれの下手な受売りにどれだけの信用が措けるかは疑問である。ただ煙の上がる処に火があるというあまりあてにならない非科学的法則を頼みにして、少しばかりの材料をここに紹介する。

彼の人間に対する態度は博愛的人道的のものであるらしい。彼の犀利な眼にはおそらく人間のあらゆる偏見や痴愚が眼につき過ぎて困るだろうという事は想像するに難くない。稀に彼の口から洩れる辛辣な諧謔は明らかにそれを語るものである。弱点を見破る眼力はニーチェと同じ程度かもしれない。しかしニーチェを評してギラギラしていると云った彼はこれらの弱点に対してかなり気の永い寛容を示している。迫害者に対しては常に受動的であり、教えを乞う者にはどんな馬鹿な質問にでも真面目に親切に答えている。

智能の世界においての貴族である彼は社会の一員としては生粋のデモクラットである。国家というものは、彼にとってはそれ自身が目的でも何

でもない。金の力も無論なんでもない。そうかと云って彼は有りふれの社会主義者でもなければ共産党でもない。彼の説だというのに拠れば、社会の祝福が単に制度をどうしてみたところでそれで永久的に得られるものではない。ただ銘々の我慾の節制と相互の人間愛によってのみ理想の社会に到達する事が出来るというのであるらしい。

勿論彼は世界平和の渴望者である。しかしその平和を得るためには必ずしも異種の民族の特徴を減却しなくてもいいという考えだそうである。ユダヤ民族を集合して国土を立てようというザイオニズムの主張者としてさもありそうな事である。桑木理学博士がかつて彼をベルンに尋ねた時に、東洋は東洋で別種の文化が発達しているのは面白いといったような事を話したそうである。この点でも彼は一種のレラチヴィストであるとも云われよう。それにしても彼が幼年時代から全盛時代の今日までに、盲目的な不正当なショーヴィニズムから受けた迫害が如何に彼の思想に影響しているかは、あるいは彼自身にも判断し難い機微な問題であろう。

桑木博士と対話の中に、蒸気機関が発明されなかったら人間はもう少し幸福だったろうというような事があったように記憶している。また他の人と石炭のエネルギーの問題を論じている中に、「仮りに同一量の石炭から得られるエネルギーがずっと増したとすれば、現在より多数の人間が生存し得られるかもしれないが、そうなったとした場合に、それがために人類の幸福が増すかどうかそれは疑問である」と云ったとある。ただこれだけの断片から彼の文化観を演繹するのは早計であろうが、少なくとも彼が「石炭文明」の無条件な謳歌者でない事だけは想像される。少なくとも彼の頭が鉄と石炭ばかりで詰まっていない証拠にはなるかと思う。

彼はまだこれからが働き盛りである。彼が重力の理論で手を廻さなかった電磁気論は、ワイルによって彼の一般相対性原理の圏内に併合されたようである。これが成効であるとしても、まだ彼の目前には大きな問題が残されている。それはいわゆる「素量 (クアンタム)」の問題である。この問題にも彼は久しい前から手を付けている。今後彼がこれをどう取り扱うかが何よりの見ものである。エジントンの云うところを聞くと、一般相対原理はほとんどすべてのものから絶対性を剥奪した。すべては観測者の尺度による。ただ一つ残されたものが「作用 (アクション)」と称するものである。これだけが絶対不変な「純粹の数」である。素量説なるものは

取りも直さずこの作用に一定の単位があるという宣言に過ぎない。この「純数」がおそらくある出来事の「確率(プロバビリティ)」と結び付けられるものであろうと云っている。これに対するアインシュタインの考えは不幸にしていまだ知る機会を得ない。ただ彼が昨年(1952年)の五月ライデンの大学で述べた講演の終りの方に、「素量説として纏められた事実があるいは『力の場(フェルド)』の理論に越え難い限定を与える事になるかもしれない」と云っている。この謎のような言葉の解釈を彼自身の口から聞く事の出来る日が来れば、それは物理学の歴史でおそらく最も記念すべき日の一つになるかもしれない。

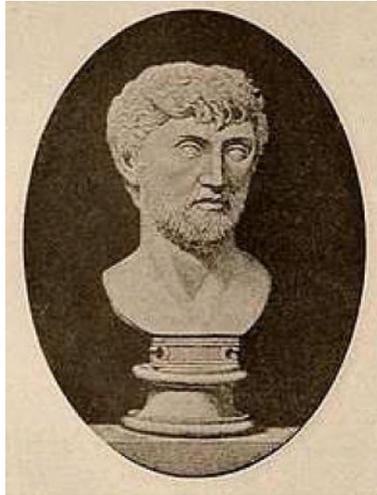


図 10.3 Titus Lucretius Carus (Ca. 99BC–Ca. 55BC)

### 10.3 ルクレチウス (Lucretius) と科学

寺田寅彦 (「青空文庫」より)

緒言

今からもう十余年も前のことである。私はだれかの物理学史を読んでいるうちに、耶蘇紀元前一世紀のころローマの詩人哲学者ルクレチウス(紀元前九八 五四)が、暗室にさし入る日光の中に舞踊する微塵の混乱状態を例示して物質元子の無秩序運動を説明したという記事に逢着して驚嘆の念に打たれたことがあった。実に天下に新しき何物もないという諺を思い出すと同時に、また地上には古い何物もないということを痛切に感じさせられたのであった。

その後には私は友人安倍能成君の「西洋哲学史」を読んで、ロイキッポス、デモクリトス、エピクロスを経てルクレチウスに伝わった元子論の梗概や、その説の哲学的的意義、他学派に対する関係等について多少の概念を得る事ができた、と同時にこの元子説に対する科学者としての強い興味を刺激された。しかしてこの説の内容についてももう少し詳しい知識を得た

いという希望をもっていたが、われわれのような職業科学者にとっては、読まなければならない新しい専門的の書物があまりに多いために、どうも二千年前の物理学を復習する暇がないような気がして、ついついそのままになっていたのである。

ところが、昨年の夏であったか、ある日丸善の二階であてもなくエヴリーマンズ・ライブラリーをあさっているうちに

Lucretius: Of the Nature of Things. A Metrical Translation by William Ellery Leonard.<sup>1</sup>

というのが目についた。そうして旧知の人にめぐりあったような気がしてさっそく一本を求め、帰りの電車の中でところどころ拾い読みしてみると、予想以上におもしろい事がらが満載されてあるように感ぜられた。それからあちらこちらの往復に電車で費やす時間を利用してともかくも一度読了した。その後ある物理学者の集会の席上で私はこの書の内容の梗概を紹介して、多くの若い学者たちに一読を勧めたこともあった。

ことし（一九二八）になって雑誌ネチュア（四月十四日発行）の巻頭紹介欄に

Munro's Lucretius. Fourth Edition, finally revised.

に関するダルシー・タムソンの紹介文が現われた。それによると、この書の第二巻目はマンローの詳細なる評注に加うるに、物理学者のダ・アンドラデ（E. N. da C. Andrade）の筆に成るルクレチウスの科学的意義に関する解説を収録してあるということであった。それでこれを取り寄せてその解説を読むと同時に、また評注の中の摘要をたよりにしてもう一度詳しく読み返してみた。しかして読めば読むほどおもしろい本であるという考えを深くした。

マンローの注は、もちろんラチンの原文を読まんとする人のために作られたものであって、自分のような古典の知識のないものにとっては大部分はいわゆるねこに小判である。しかし原詩の十行あるいは三十行ごとに掲げた摘要は便利なものである。

マンローの第三巻はこの人の対語訳で、同じものがボーンのポピュラー・ライブラリーの中にも出ているそうであるが、自分はまだこの訳を読んでいない。

思うにルクレチウスを読み破る事ができたら、今までのルクレチウス

研究者が発見し得なかった意外なものを掘り出す事ができはしないかと疑う。それほどにルクレチウスの中には多くの未来が黙示されているのである。

アンドラデの解説によると、近代物理学の大家であったケルヴィン卿もまたルクレチウスの愛読者であった。すなわち卿の一八九五年のある手紙の一節に「このごろ、マンロー訳の助けをかりてルクレチウスを読んでいた。そして原子の衝突についてなんとか自分流儀の解釈をしてみようと思っただいぶ骨折してみたが、どうもうまくできない」と言っている。

ルクレチウスの黙示からなんらかの大きな啓示を受けた学者の数は、おそらく少なくはなかったであろう。アンドラデによると、ニウトンの原子に関する説明を読めば、彼がルクレチウスを知らなかったと想像する事はできないということである。ロバート・ボイルも直接に、またガッセンディを通じて間接にルクレチウスに親しんだ事が明らかである。また微粒子の雨によって重力を説明せんとしたル・サーージュはその論文に〔*Lucre'ce newtonien*〕という表題をつけたくらいである。この説が後にケルヴィンによってさらに追求された事はよく知られた事である。ケルヴィンのほかにクラーク・マクスウェルやティンダルのごとき大家もまたルクレチウスに注意を払ったという事実があるそうである。それはとにかく、このような形跡を物理学史上に残さないで、しかも実際ルクレチウスから大きな何物かを感じた物理学者化学者生物学者がどれだけあったかもしれないということは、この一巻を読了したすべての人の所感でなければならない。それだけ多くの未来に対する黙示が含まれているのである。今から百年前にこの書を読んだ人にはおそらく無意味な囁語のように思われたであろうと思うような章句で、五十年前の読者にはやっと始めてその当時の科学的の言葉で翻訳されたであろうと思われるのがある。それどころか十年前の物理学者ならばなんの気なしに読過したであろうと思う一句が、最新学説の光に照らして見ると意外な予言者としてわれわれの目に飛び込んで来るのもあるようである。

私がルクレチウスを紹介した集会の席上で、今どきそういうかび臭いものを読んで、実際に現在の物理学の研究上に何かの具体的の啓示を受けるとい事がはたして有りうるであろうかという疑いをもらした人もあった。この疑いはあるいは現代の多くの科学者の疑いを代表するものである

かもしれない。しかし私は確かにそれが可能であると信じる一人である。もちろん科学者の中にはいろいろの種類の性質の人がある。暗示に対する感受性の鋭敏なたちの人と鈍感なたちの人とがある。解析型クラシカル型の人多く後者に属し、幾何型ロマンチック型の学者は前者に属するのは周知の事実である。暗示に対して耳と目を閉じないタイプの学者ならば、ルクレチウスのこの黙示録から、おそらく数限りない可能性の源泉をくみ取る事ができるであろう。少なくともあるところまで進んで来て行き詰まりになっている考えに新しい光を投げ、新たな衝動を与える何物かを発見する事は決して珍しくはあるまいと思うのである。

要するにルクレチウスは一つの偉大な科学的の黙示録である。そのまま現代の意味における科学書ではもちろんありうるはずがない。もしこの書の内容を逐次に点検して、これを現在の知識に照らして科学的批判を試み、いろいろな事実や論理の誤謬を指摘して、いい気持ちになろうとすれば、それは赤ん坊の腕をねじ上げるよりも容易であると同時にまたそれ以上におとなげないばかげた事でなければならない。

近着の雑誌リリュストラシオンに「黙示録に現われたる飛行機と科学戦」と題する珍奇な絵入りの読み物がある。ヨハネの黙示録の第九章に示された恐ろしい蝗の災いを欧州大戦における飛行機にうまく当てはめておもしろく書いてある。これもやはり一種の黙示である。しかしいかほどまでに蝗の記述が戦闘飛行機に当てはまってもそれは決して科学的の予言とは名づけ難いであろう。しからばルクレチウスの黙示もまたこれと同じような意味の黙示に過ぎないであろうかと考えてみると、自分には決してそうは思われぬのである。ヨハネは目的の上からすでに全然宗教的の幻想であるのに反して、ルクレチウスのほうは始めから科学的の対象を科学的精神によって取り扱ったものである。彼の描き出した元子の影像がたとえ現在の原子の模型とどれほど違っていようとも、彼の元子の目的とするところはやはり物質の究極組成成分としての元子であり、これの結合や運動によって説明せんと試みた諸現象はまさしく現在われわれの原子によって説明しようと試みつつある物理的・化学的現象である。

意味のわからない言葉の中からはあらゆる意味が導き出されることは事実である。狡猾なる似而非予言者らは巧みにこの定型を応用する事を知っている。しかしルクレチウスは彼の知れる限りを記述するに当たっ

て、意識的にことさらに言語を晦渋にしているものとは思われない。少なくとも訳文を見ただけではそうは思われない。多くの場合にわれわれは彼の言わんと欲するところをかなりの程度まで確かに具体的に捕えうように思う。こういう点でもルクレチウスの書は決して偶然的予言と混同さるべき性質のものではない。

私は今ルクレチウスを紹介せんとするに当たってまずこの点に誤解のないように、わざわざ贅言を費やす必要を感じる。しかしルクレチウスの書の内容を科学的と名づけるということについては多くの異論があるに相違ない。特に現在のいわゆる精密科学の学徒から見れば到底彼らの考える科学の領域に容れることを承認し難いものと考えられるに相違ない。

問題は畢竟科学とはなんぞや、精密科学とはなんぞやということに帰着する。しかしこの問題は明らかに科学の問題ではなく従って科学者自身だけでは容易に答えられない問題である。私も今ここでこのむつかしい問題の考察を試みる考えはないのであるが、ただ現在の精密科学の学生たちの多くが、この問題にあまりにはなはだしく無関心であることは事実である。彼らは高等学校から大学へ来て各自専門の科学の部門の豊富な課程に食傷するほどの教育を受けるのであるが、いまだかつてどこでも科学とかなんとかいう事についての考察の端緒をも授けられないのである。その結果はどうであるか。たとえば物理学の課程を立派に修得し、さらに大学院に入り五年間の研究の成果によって学位を得た後においても、何が物理学であるかについて夢想だもしないという事が可能となるわけである。もっともこれはその人が立派な一人前の物理学者となるためには少しも妨げとはならない事も事実である。それは日本人とはいかなるものかを少しも考えてみることなしに立派な日本人でありうると同じ事である。それでこの学者が自分の題目だけを追究している間は少しの不都合も起こらないのであるが、一度こういう学者たちが寄り合って、互いに科学というものの本質や目的や範囲に関する各自の考えを開陳し合ってみたら、その考えがいかに区々なものであるかを発見して驚くことであろうと思う。甲が最も科学的と思う事が乙には工業的に思われたり、乙が最も科学的と考えることが甲には最も非科学的な遊戯と思われたりするという意外な事実が見つかるであろう。

丙は数理の応用が最高の科学的の仕事だと考えている間に、丁は実験

や測定こそ真に貴重な科学の本筋であると考えているのを発見するであろう。もっともこのようにめいめいの見解の相違する事は、必ずしも科学の進歩に妨げを生じないのみならず、あるいはかえってむしろ必要な事であるかもしれない。しかし今ルクレチウスに科学の名を与えるか与えないかという問題となると、前述の見解の相違の結果が明瞭に現われて来るのである。

現在の精密科学の方法の重要な目標は高級な数理の応用と、精緻な器械を用いる測定である。これが百年前の物理学と今の物理学との間に截然たる区別の目標を与えるのである。それで考え方によっては物理的科学的進歩すなわち応用数学と器械の進歩であるかのごとき感じを与えるのである。今もしこの二つの目標に準拠してルクレチウスを批判し採点するとすればどうであろう。これはいうまでもなく全然落第でありゼロである。なんとなれば全巻を通じて簡単な代数式一つなく、またなんらの簡易な器械を用いていかなる量を測定した痕跡もないからである。

しかし、今一方に数理と器械を持たない赤手のルクレチウスを立て、これと並べて他方に数学書と器械を山ほど積み上げた戸棚を並立させてよくよくながめて見るのもおもしろい。ルクレチウスは素手でもかくも後代の物理的科学的基礎を置いたことは事実であるのに、頭脳のない書物と器械だけでは科学は秋毫も進められないのである。

この明白なる事実は不幸にして往々忘れられる。数学と器械が、それを駆使する目に見えぬ魂の力によって初めて現わし得た偉大な効果に対する感嘆の念は、いつのまにか数学と器械そのものに対する偶像的礼拝の心に推移しようとする傾向を生ずる。そういう傾向は特に現代のアカデミックな教育を受けた若い学生の間にも多いのみならず、また西洋でも二三流以下の学者の中にもかなり存在するように見える。この迷信の結果は往々はなはだしく滑稽な事になって来る。きわめて不適當あるいは誤った考えを前提としてそして恐ろしくめんどろな高等数学の数式を取り扱い、その解式が得られると、その数式の神秘的な力によって、瓦礫の前提から宝玉の結果が生まれるかのような気がしたり、またその計算がむつかしくめんどろであればあるほど、その結果の物理的価値が高められるかのごとき幻覚を生ぜしめることもまれではないようである。しかし数学の応用は畢竟前提の分析である。鉛を化して金とする魔力はないのである。同じように立派

な高価な器械を使えば使うほど何かしらいい結果が得られるというような漠然たる予感もやはり器械に対する一つの迷信である。いかに良い器械でも下手に使えば、悪い器械を上手に使うよりも悪い結果を得る例も少なくない。もっとも有りきたりの陳腐な方法を追求する場合には、器械の良いほど良い結果を得られるのは普通である。しかしほんとうな意味での新しい独創的研究をするのに市場に売り古されて保証の付いているほど陳腐な器械ばかり寄せ集めてできたためしはおそらくないであろう。

もっともこう言ったからとて私は、定石的数学応用の理論や既成的の方法器械によるルーティン的の実験測定の仕事の価値を少しでもけなそうとするものではない。そういうのが無数に寄せ集まってこそ、初めて現在のごとき科学の壮麗な殿堂が築き上げられたということは毫も疑う余地のないことである。

しかしいかに建築材料だけが立派に堆積されてあってもそれだけでは殿堂はできない。殿堂の建設には設計者のファンタジーが必要である。

科学の殿堂と言っても、その建設はもちろん家屋の建築とはわけがちがう。家屋の建築は設計者の気随になる。必要な建築学上の規則に抵触しない限りはあらゆる好きな格好のものを設計してもよいはずである。しかるに科学のシステムの設計はそう勝手にできるものではない。相手がすでに与えられた自然界である。たとえば空中を落下する石塊をわれらの意志の力で止めるわけには行かない。それで、しいて科学の系統の建設を建築にたとえようとすれば、それは数限りもない種々な所定条件のどれにもうまく適合するような家を造り上げるという事である。そういう建築、そういう系統が究極的にはたしてできうるかどうか。それはルクレチウスの時代にもよくわからなかったと同様に現在においてもわからないことである。しかしそれができるといふ信念のもとに努力して来た代々の学者の莫大な努力の結果がすなわち現在の科学の塔である。

科学の高塔はいまだかつて完成した事がないバベルの塔である。これでもうだいたいできあがったと思うと、実はできあがっていないという証拠が足元から発見される。職工たちの言葉が混乱してわからなくなる。しかし、すべての時代の学者はその完成を近き将来に夢みて来た。現在がそうであり、未来もおそらくそうであろう。

このおそらく永遠に未完成であるべき物理的科学の殿堂の基礎はだれ

が置いたか。これはもちろん一人や二人の業績ではない。しかしその最初のプランを置き最初の大黒柱を立てたものは、おそらくルクレチウスの書物の内容を寄与したエピキュリアンの哲学者でなければならない。人はアリストテレスやピタゴラスをあげるかもしれない。前者は多くの科学的素材と問題を供し後者は自然の研究に数の観念を導入したというような点で彼らもまた科学者の祖先でないとは言われない。しかし彼らの立っていた地盤は今の自然科学のそれとはむしろ対蹠的に反対なものであったように見える。形而上学的の骨格に自然科学の肉を着けたものという批評を免れることはむづかしい。しかしそういう目的論的形而上学的のにおいをきれいに脱却して、ほとんど現在の意味における物理的科学的の根本方針を定めたものはおそらくエピクロス派の人々でなければならない。彼らは少なくとも現在の科学の筋道あるいは骨格をほとんど決定的に定めてしまったとも言われる。後代の学者はこれに肉を着け皮を着せる事に努力して来たようにも見られる。

この大設計は決して数学や器械の力のできるものではなくて、ただ哲人の直観の力によってできうるものである。古代の哲学者が元子の考えを導き出したのは畢竟ただ元子の存在を「かぎつけた」に過ぎない。そして彼らが目を閉じてかぎつけた事がらがいよいよ説明されるまでには実に二千年の歳月を要したのである。

真理をかぎつける事の天才はファラデーであった。しかし彼の直観の能力に富んでいたという事は少しも彼の科学者としての面目を傷つけるものではなかった。彼がもし真理に対する嗅覚を恥としたのであったら、十九世紀の物理学の進歩はたぶん少なからず渋滞をきたしたに相違ない。

ファラデーはしかし彼の直観を周到嚴重な実験の吟味にかける事を忘れなかった。この事がなかったら彼はおそらく十九世紀の科学者であり得なかったに相違ない、ところでデモクリトス、エピクロス、ルクレチウスはたしかにファラデーのような実験はしなかった。そういう意味では彼らは明らかに科学者ではあるまい。しかしもし彼らとその驚くべき直観の力を具有してしかしてガリレー以後に生まれ、ファラデーの時代に生まれたと仮定したらどうであろう。

もっともルクレチウスを科学者と名づけるか、名づけないかというような事は実はどうでもよい事で、またどうでも言える事である。しかし私

のここで問題とするところは、現代の精密科学にとってルクレチウスの内容もしくはその思想精神がなんらかの役に立ちうるかということである。ルクレチウスの内容そのものよりはむしろ、ルクレチウス流の方法や精神が現在の科学の追究に有用であるかどうかということである。

科学上ではなんらかの画紀元的の進展を与えた新しい観念や学説がほとんど皆すぐれた頭脳の直観に基づくものであるという事は今さらに贅言を要しない事であるにかかわらず、昔も今も通有な一種の偏狭なアカデミックの学風は、無差別的に直観そのものを軽んじあるいは避忌するような傾向を生じている。これは日本やドイツばかりには限らないと見えて米国の学者でこの事を痛切に論じたものもあった。これは科学にとって自殺的な偏見である。近代物理学に新紀元を画した相対的原理にしても、素量力学や波動力学にしても、直観なしの推理や解析だけで組み立てられると考える事がどうしてできよう。私はアインシュタインやド・ブローリーがルクレチウスを読んだであろうとまでは思わないが、彼らの仕事に最初の衝動を与え幾度か行き詰まりがちの考えに常に新しい活路を与えたのは、私に言わせれば彼らの頭の中にあるルクレチウスのしわざである。決して彼らの図書室に満載された中のどの物理学書でもないのである。

しかし何もアインシュタインやブローリーらのごとき第一流の大家だけには限らない。ほとんどいかなる理論的あるいは実験的の仕事でも、少しでも独創的と名をつく仕事が全然直観なしにできようとは到底考えられない。「見当をつける」ことなしに何事が始め得られよう。「かく」ことなしにはいかなる実験も一歩も進捗することはあり得ない。うそだと思う人があれば世界の学界を一目でも見ればわかることである。

ケルヴィンやマクスウェルがルクレチウスを読んだのはなんのためであるかはよくわからない。しかし彼らがこの書の中に彼らに親しい何かを感じたには相違ないと想像される。実際ルクレチウスに現われた科学者魂といったようなものにはそれだけでも近代の科学者の肺腑に強い共鳴を感じさせないではおかないものがある。のみならず、たとえ具体的にはいかに現在の科学と齟齬しても、考えの方向において多くの場合にねらいをはずれていないこの書物の内容からいかに多くの暗示が得られるであろうかという事はだれでも自然に思い及ばないわけには行かないであろう。

原子素量の存在、その結合による物質の構成機巧、物質総量の不滅、

原子の運動衝突と物性の関係、そういうようなものが予想されているばかりでなく、見方によっては電子のようなものも考えられており、分子格子のごときものも考えられている。またおそらくニュートンが直接あるいは間接に受けついただと思われる光微粒子説でも一時全く忘れられていたのが、最近にまた新しい形で復活して来たのは著しい事である。また彼が生物の母体から子孫に伝わると考えた遺伝の元子のようなものが近代の生物学者の考える遺伝素といかによく似たものであるか。そういう事を考えてみる。十九世紀二十世紀を予言した彼がどうしてきたべき第二十一世紀を予言していないと保証する事ができようか。今われわれがルクレチウスを読んで一笑に付し去るような考えが、百年の後に新たな意味で復活しないとだれが断言しうるであろうか。

私は自分の頭になんらの「考え」をもたない科学者がかりにあるとして、そういう人がルクレチウスを百ぺん読んでなんの役にも立とうと思わない。女学校上がりの若い細君が料理法の書物を読むような気でこの詩編のすみずみまで捜したところで、すぐ昼食の間に合いそうな材料は到底見つからない。そういう目的ならば、ざらにある安い職業的料理書を見て、完全なる総菜料理を捜したほうがいいのである。

しかし多くの科学の探究者はそれでは飽き足らないであろう。その当代のその科学の前線まで進んで来て、そこでなんらかの自分の仕事をしようとしている人たちは、眼前の闇黒な霧の中にある何かの影を認めようとあせっているのである。そうしてその闇の底に何かしら名状のできない動くものの影か幻のようなものを認めるように思う。しかしそれが何であるかははっきりわからない。そういう状態が続いているうちに突然天の一方から稲妻のような光がひらめいて瞬間に眼前のものゝ正体が見える。それからいよいよその目的物を確実につかむまでにはもちろん石橋をたたいてそこまで歩いて行かなければならない。行ってみると、それは実体のない幻影であって失望する事ももちろん往々ある。しかしこの天来の閃光なしには彼らは一歩も踏み出す事はできない。

今もルクレチウスが現代の科学者にとって有効に役立つとすれば、それはまさにこの稲妻の役目をつとめうる点である。たとえば化学的分子の立体的構造を考えていた化学者や渦動原子の結合を夢みていた物理学者にはルクレチウスの曲がったり角立ったりした元子は必ずなんらかの

暗示を与え得たであろうと思われる。のみならずたとえば最近にポーアが  
ネチュア誌上に出した

The Quantum Postulate and Atomic Theory.

と題する興味ある論文を読んだ後に、ルクレチウスの第一巻を開いて、

Even time exists not of itself; but sense

Reads out of things what happened long ago,

What presses now, and what shall follow after:

No man, we must admit, feels time itself,

Disjoined from motion and repose of things.

という詩句を玩味してみると、いかに最新の学説に含まれた偉大な考えが  
その深い根底においてこの言葉の内容と接近しているかに驚かざるを得ない。  
もしルクレチウスの sense を「実験観測」と置換し、また彼の motion  
and repose を E 等で置換すればこれはまさにポーアの所説となるので  
ある。もちろん私はポーア、ハイゼンベルヒらがルクレチウスを読んで暗  
示を得たとは思わない。しかし彼らの考えが識域の下においてまさに発酵  
しようとしている際に彼らがもし偶然この詩句に逢着したとしたら、そし  
て彼らの心の窓が啓示の光に対して開放されていたとしたら、おそらく彼  
はデスクをたたいて立ち上がり、「ユーレーカ」を叫んだのではあるまい  
か。これはもちろん私の想像でありドラマであるが、そういう場面が、い  
つかどこかで起こり得ないとは保証し難いことである。

暗示の閃光が役に立つためにはもちろん見るべきものに直面して両眼  
をあけていなければならないのである。それで科学の既得の領土に隠居し  
て、虎の子の勘定でもして楽しんでいるような人にはこの書はなんにもな  
らない。また戦線の夜の野原の中を四つんばいになってしかも目かくしさ  
れたままで手探りで遺物を拾得しようとしている「落ち穂拾い」にもこれ  
は足しにならない。要するに私がかかりに、「科学学者」と名づける部類の  
人々には役に立たないが、「科学研究者」と名づけるべき階級の人々には、  
このルクレチウスは充分に何かの役に立つであろうと信じるのである。

一方において私は若い科学の学生にこの書の一読をすすめてもよいと  
思うものである。学生たちは到底消化しきれないほどの栄養を詰め込まれ  
て知識的胃病にかかっている。人は決して澱粉蛋白質脂肪だけで生きて行か  
れるものではない。ビタミンが必要である。ビタミンだけでは生きて

行かれないが、しかしビタミンを欠いた栄養は壊血病を起し脚気症を誘発する。実際現代の多くの科学の学生はこれとよく似た境遇にありはしないかと心配される。そういう学生にとってルクレチウスが確かに一種のビタミンの作用を生じうるであろうと考えるのである。

以上長々しい前置きによって私は多くの読者の倦怠を招いたであろうと思う。しかし多数の読者を導いてこのルクレチウスの花園に入るべき小径の荆棘を開くにはぜひともこれだけの露払いの労力が必要であると思った。それほどに現代科学のパベルの塔の頂上に住むわれわれは、その脚下にはるかな地上の事を忘れていたと思ったからであった。

これから私はルクレチウスの内容についてきわめて概略ながら紹介を試みようと思う。

もちろん私は哲学史については何も知らないものであるからこの書の所説の哲学史的の意義などはよくわからない。またどこまでがデモクリトス、エピクロスの説で、どこからがルクレチウスの独創によるか、そういう考証も私の柄ではない。私はただ現代に生まれた一人の科学の修業者として偶然ルクレチウスを読んだ、その読後の素朴な感想を幼稚な言葉で述べるに過ぎない。この厚顔の所行をあえてするについての唯一の申し訳は、ただルクレチウスがまだおそらく一度も日本の科学者の間にこの程度にすら紹介されなかったという事である。

ルクレチウスに関するあらゆる文献、内容に関する詳細の考証、注釈はマンローに譲りたい。

以下ルクレチウスと私の呼ぶものは、必ずしもローマの詩人ルクレチウス・カールスをさすのではなくて、かの書に示された学説の代表者を抽象してそれをさすものである事を承知した上で以下の解説を読んでもらいたいと思うのである。

—

ルクレチウスの第一編は女神ヴィナスに呼びかけた祈りの言葉で始まっている。これはあらゆる神と宗教とを無視し否定せんとする彼にふさわしからぬようであるが、実はこの彼のヴィナスは「自然」とその「生成の方則」をさしているように思われる。そう思って読むと彼の言葉が生きて来るようである。それからヴィナスに訴えて、どうかその愛人たる軍神

マルスが、自分のこの詩を書く邪魔をしないように心配してくれと頼んでいる。これもシーザーやポンペイの活躍していた恐怖時代のローマの片すみで静かに科学の揺籃をつづっていたこの人の心境をうかがわせるに足るのである。

要するにこの冒頭は詩編の形式を踏襲するために置かれた装飾のようであるが、これもまた彼の全巻をおおう情調の前奏曲として見るとおもしろいのである。

次に名はさしてないがロイキッポスあるいはエピクロスの礼賛の言葉が出て来る。そしてこのギリシアの賢人が宗教の抑圧のために理知の光をおおわれていた人類に始めて物の成立とその方則を明示した功績をたたえている。そうして今自分がこのギリシア人の発見した真理の教えを伝えんとするに当たって、自分の母語ラテンがあまりに貧しいものであるとこぼしている。しかしせいぜい骨折って「物の中心の隠れた心核を見るためのかなたよりの光」を伝え、物の最初の胚芽たる元子について物語ろうというのである。

そういう事を自分が論ずるのは神を冒瀆するものと思われるかもしれない。しかしそれよりももっと冒瀆的な事をしばしば犯すものは実は宗教自身である。そう言って、イフィゲニアの犠牲の悲惨な例をあげ、犠牲の罪悪である事、その罪悪を犯させるものはすなわち宗教である事、そういう事になるのは畢竟人間が死を恐れるためであるが、死が何物であるかをほんとうによく知りさえすれば、そんな恐怖もなくなり、従って宗教が罪を犯す事もなくなる。こう言って後に論ぜんとする靈魂非不滅論の伏線をおいている。わずかにこれだけ読んでも彼がいかにえ抜きの徹底した自然科学者であるかがわかっておもしろい。現代の職業的科学家のうちには科学家の着物を着た迷信家がたくさんあるのに、二十世紀前に生まれて、エレクトロンの何であるかも知らなかったローマの詩人に、この徹底した科学者魂を発見するのはいささか皮肉である。

そうして彼は次の数句を歌う。

This terror, then, this darkness of the mind,  
Not sunrise with its flaring spokes of light,  
Nor glittering arrows of morning can disperse,  
But only Nature's aspect and her law,

この句は後にもしばしばリフレインとして繰り返さる。私はこの四句をどこかの科学研究所の喫煙室の壁にでも記銘しておいてふさわしいものであると思う。

この次の二句は

Which, teaching us, hath this exordium:

*Nothing from nothing ever yet was born.*

迷信から来る精神の不安を除くべき魔よけの護符はすなわち「物質不滅の方則」である、というのである。もちろん彼は彼の物質元子論から出発して、結局それから靈魂の可死を論ぜんとするのではあるが、彼のここに言うエキソルディアムは、おそらくもう少し一般化して「自然科学的世界観」をさすものと解釈しても、たぶん彼の真意を離れる恐れはあるまいと考えるのである。

現在の物理学における物質不滅則、原子の実在はだれも信ずるごとく実験によって帰納的に確かめられたものである。二千年前のルクレチウスの用いた方法はこれとはちがう。彼はただ目を眠りふところ手をして考えただけであった。それにかかわらず彼の考えが後代の学者の長い間の非常の労力の結果によって、だいたいにおいて確かめられた。これははたして偶然であろうか。私はここに物理学なるものの認識論的の意義についてきわめて重要な問題に逢着する。約言すれば物理学その他物理的科学的系統はユニークであるや否やということである。しかし私は今ここでそういう岐路に立ち入るべきではない。ただルクレチウスの筆法を紹介すればよい。

今日の科学の方法に照らして見れば、彼が「無より有は生じない」という宣言は、要するに彼の前提であり作業仮説であると見られる。もっとも、無から有ができるとすれば、ある母体からちがった子が生まれるはずだといったような議論はしているが、これらは決して証明ではあり得ない事は明らかである。さて、有から有が生じるとすれば、そこに有の種子を仮定する必要を生じて来るのであるが、この種子の考え方においてエピキュリアンはその先輩同輩に対して実に比較にならぬほど進歩している、あるいはむしろ現代の原子観に肉薄した考え方をしている。これも厳密な推理から得た結果ではなくて、結局は直観で透視したものであろう。ルクレチウスは正直な態度で *Thus easier 'tis to hold that many things have*

primal bodies in common ( as we see the single letters common to many words ) than ought exists without its origin. と言っている。そしてここに述べられたアルファベットが寄り集まっているいろいろな語を作るように、若干の異種の原子がいろいろに結合しているいろいろのものを作るという彼の考えはほとんど現在の考え方と同様である。のみならずおもしろい事には現在われわれは原子の符号にアルファベットを用い、しかもまたいろいろの物質をこれら符号の組み合わせで表わすのである。これは全然ルクレチウスの直伝である。

そういう元子を人間が目で見ることができないからといって、その実在を疑ってはいけない。たとえば、風は目に見えないけれどもあらゆる作用をするのではないかと論じている。すなわち作用によって物理的実在を規定するのである。この数行を読んで私は十九世紀末に行なわれた原子の実在に関するはげしい論争を思い浮かべざるを得なかった。また物理学における「アンスロポモρφイズムからの解放」を唱えたプランク一派の主張や、また一方最近に至って、直接可測的のもの以外の実在性を否定しようとする新素量力学の先駆者らの叫びを思いくらべて、いかにこの問題が古いものであるかを知り得たのである。

目に見えぬ実在の他の例としては彼はなお、香気や湿気などをあげている。また物体の磨滅の現象からも、目に見えぬ微小部分が存するゆえんが引証されている。

元子によって自然を説明しようとするのに、第一に必要となつて来るものは空間である。彼はわれわれの空間を「空虚」( void ) と名づけた。「空間がなければ物は動けない」のである。彼の空間は真の空虚であつてエーテルのごときものでない。この点もむしろ近代的であると言われよう。

物質原子の空間における配置と運動によってすべての物理的・化学的現象を説明せんとするのが実に近代の少なくとも十九世紀末までの物理学の理想であつた。そして二十世紀の初めに至るまでこの原子と空間に関するわれわれの考えはルクレチウスの考えから、本質的にはおそらく一歩も進んでいないものであつた。近年に至って原子は電子とプロトンによって置き換えられ、ごくごく最近に波動力学の出現によってこれら物質的素量に関する観念に始めて目立った変化をきたしつつある。また一方相対性理論の発展によって、いわゆる空間に属する考えもまたこの素朴な状態を離

れて来たのである。しかし現在においても普通の大多数の具体的問題は依然として昔のままの空間および原子で間に合っているのである。

さて、次に、物質は原子と空虚の混合であるという考えから物の有孔性や、比重の差違の生じる事を述べている。音響もまた原子の発散によるものと考えから、音が壁を通過するのも壁の原子間に空隙があるからだと言って説明している。これは今の学生の答案として見れば誤謬である。しかし実際壁の原子間に空隙《くうげき》が少しもなく、従って完全剛体であったら、音のエネルギーは通過し得ないであろう。そういう意味ではこれもやはりほんとうである。ルクレチウスはその次に水中における魚の運動や、また物体の衝突反発の例をあげて空虚の説明に用いているが、この解説は遺憾ながら今の言葉に翻訳し難いように見える。

次には、空間と物質とが「それ自身に存在する」ただ二つのものであって、それ以外に第三のものはないという事を宣言している。その意味はすでに前述のごとく器械的力学的自然観の基礎として現代に保存されたものと同義である。これは物の作用や性質やまでも物体視せんとするストア派の学者に対する手ごわい論難として書かれたものであるらしい。そしてそれはまた今の物理の学生たちがあたかもあたりまえの事であるように教わり、またそう思っただけで一度も疑ってみる事すらしなかった事である。これも皮肉な事である。今の学生の頭が二千年前の詩人よりも劣っているのか、それとも今の教育法が悪いのかそれはわからない。

ここで注意すべきもう一つの事は、「時間」なるものがやはりそれ自身の存在を否定されて、物性や作用などと同部類のいわゆる偶然的な、非永存的のものに見なされている事である。これも一つのおもしろい考え方である。十九世紀物理学の力学的自然観は、すべての現象を空間における質点の運動によって記載しようとした。そのために空間座標三つと時間座標一つと、この四つの変数を含む方程式をもってあらゆる自然現象の表現とした。後に相対性理論が成立してからは、時もまた空間座標と同様に見なされ取り扱われるようになったが、時というものの根本的な位地を全然奪おうとした物理学者はなかった。しかしもともと相対性理論の存在を必要とするに至った根原は、畢竟時に関する従来の考えの曖昧さに胚胎しているのではないかと考えられる。時間もそれ自身の存在を持たないと言ったルクレチウスの言葉がそこになんらかの関係をもつように思われる。「物

の運動と静止を離れて時間を感じる事はできない」という言葉も、深く深く考えてみる価値のある一つの啓示である。彼は「運動」あるいは速度加速度にともかくも確実なる物理的現象、可測的現象としての存在を許容して、時間のほうをむしろ従属的のものと考えているかのように見える。この考えははたしてそれほど価値のないものであろうか。

普通力学の問題において、運動方程式が完全に解かれた場合には、すべての質点の各位置における速度、加速度、運動量、あるいはエネルギーのごときものが、それぞれ時の函数として与えられる。逆に、たとえ常に単義的ではないまでも、この後者の数値が与えられれば、それから時間がこれらの函数として与えられうるのである。またおもしろい事には可逆的週期運動の場合にはかくして得られる「時」は単義的に決定されない。しかして実際そういう運動のみの世界には物理学的に非可逆の時が存在しないのである。そこで私は一つの夢のようなものを考えさせられる。われわれは時の代わりに或る何かのエネルギーあるいは「作用」のごとき量を基本的のものとしてこれを空間と対立させる事によって、新しき力学的系統を立て直す事は不可能であろうか。そうする事によっていろいろの現代の物理学当面の困難が解決されうる見込みはないものであろうか。少なくともルクレチウスの言葉はこういう問題を示唆するもののように思われる。

次に彼は論じて言う。元子からいろいろの硬さのものが造られるが、元子自身は完全に剛体であると考えなければならない。なんとならば、元子が柔らかいものであれば、これはその中に空虚を含んでいる。しかるに空虚と元子と対立すべきその元子の中に空虚が含まれているわけには行かない。where'er be empty space, there body's not; and so where body bides, there not at all exists the void inane. である。ここで私は思い出す。かつて分子や原子の「弾性」という事が問題になった事がある。可触的物体の「弾性」を説明するために持ち出された分子や原子に、可触的物体と同じような「弾性」を考えようとするこの方法論的の錯誤あるいは拙劣さが、今このルクレチウスの言葉によって辛辣に諷せられているとも見られない事はない。

ともかくも物質元子に、物体と同様な第二次的属性を与える事を拒み、ただその幾何学的性質すなわちその形状と空間的排列とその運動とのみによって偶然的なる「無常」の現象を説明しようとしたのが、驚くべく

近代的である。そしてまさにこの点で彼が、彼の駁撃を加えているヘラクリトス、エンペドクレス、アナクサゴラスの輩をいかにはるかに凌駕しているかを見る事ができよう。そして現在においても科学者と称するものの中に、この三者の後裔が、なおまれには存在している事を彼によって教えられるのである。

元子は恒久的な剛単体 solid singleness でなければならぬ。そして微小ではあるが有限の大きさをもたなければならぬという事を証明しようと試みている。剛体でなければ、それから剛体が作り得られないであろう。恒久的なものでなければ、恒久に無常なこの世界を補充 replenish する事ができないであろう。またもし大きさが有限でなければ、物質は無限に分裂しうる、従って過去無限の年月の間に破壊し分解されたものが再び合成し復旧されるためには無限大の時を要し、結局何物も成立し得ないというのである。これは明らかにボルツマンの学説の提供する宇宙進化の大問題に触れていることを見のがす事はできない。なおこの議論の根底には後に述べる時の無窮性の仮定が置いてある事はもちろんである。

私は近代物理学によって設立された物質やエネルギーの素量の存在がいわゆる経験によった科学の事実である事を疑わないと同時に、またかくのごとき素量の存在の仮定が物理学の根本仮定のどこかにそもその初めから暗黙のうちに包含されているのではないかということをししばしば疑ってみる事がある。われわれが自然を系統化するために用いたった思考形式の機巧(メカニズム)の中に最初から与えられたものの必然的な表象を近ごろになっておいおい認識しつつあるのではないかという気がするのである。ルクレチウスは別にこの疑問に対してなんらの明答を与えるものではないが、少なくとも彼は私のこの疑いをもう少し深く追究する事を奨励するものように見える。

For, lo, each thing is quicker marred than made;  
 という句がある。これを試みに熱力学第二方則の最初の宣告と見るのも興味がありはしないか。

彼はなお、もし物質に最小限がなければ、最小なものでも無限を包蔵し、従って微分と総和の区別がなくなるという哲学者流の議論をしている。このあたりの議論はおそらく科学者にはあまり興味が無いであろう。哲学的のスケプチシズムに対しては何かの意味はあるかもしれないが、わ

れわれにはたいして直接の必要のない議論である。なんとならば、科学は畢竟「経験によって確かめられた臆断」に過ぎないからである。われわれはここではただエピキュリアンのこれらの驚くべき偉大なる臆断を嘆美すればよい。

ルクレチウスは、かようにして、彼のいわゆる元子の何物であるかを説明した後に、エピキュリアンに対立した他の学説に対して峻烈な攻撃を加えているのである。万物が火より成るとか、地水火風から成るとか、また金は金、骨は骨と、いわゆるホメオメリアより成るとか、そういう考えから来る困難を列挙し、また一方では自説に対するこれら他学派の持ち出すべき論難に対して勇敢に応戦している。しかし、要するに、これは、彼の元子説特に元子に第二次的属性を付与する事が不穏当であるという前提の延長であるが、しかしそれはまた今の物理学が当然の事として採用しているところである。この条を読んでいると、今の物理学者がもし昔のギリシアの学者たちと議論したとしたならば、必ず言いそうな事が数々見いだされておもしろい。

この論議の中に、熱は元子の衝突運動であるという考えや、元子排列の順序の相違だけで物の変化が生じるというような近代的の考えも見えている。

そこで、ルクレチウスは言葉を改めていう。自分はミューズの神のインスピレーションによって、以下さらに深く真理の解説をしようとする。しかしこういうめんどろなむつかしい事がらを説くには、「詩」の助けをかりなければならない。苦い薬を飲ませるには杯の縁に蜜を塗らなければならない、と言っている。

さて、それから、空間には際限がないという事を論ずるのであるが、これは、「先には先がある」というだけの事であって、これはアインシュタインの一般相対性理論の出るまでは、素人も科学者も同様に考えて来た素朴的観念であって別に珍しい事はない。

次には物質総量が無限大である事を説いている。もし無限大の空間にただ有限の物質があるとしたら、物質はすべてその組成元子に分解し尽くして、もはや何物も合成され得ず、従って何物も存在し得ない。なんとならば、物質世界の保存には「かなた」からの不断の補充を要する。それには無限の物質素材を要するというのである。これは、後に述べるように、

彼の考える「元子の雨」が無際涯の空間の果てから地上に落下しつつある、という前提が頭にあるからの議論である。ルクレチウスが今の科学に照らして最も不利益な地位に置かれるのは、彼がここで地を平面的に考え、「上」と「下」とを重力と離れて絶対的なものと考えている事である。それで彼はこの条下で地の球形説に対して、コロンバス時代の坊さんの唱えそうな反対説を唱えている。しかし無限の空虚の中にかかにしてある「中心」が存在し、かつ支持されうるかという論難は、ニウトン以前の当時の学者には答えられなかったであろうのみならず、現在においても実は決して徹底的には明瞭に答え難いものである。それほどにこれらの問題は宇宙の構造に関する科学上の問題の急所に触れている。物質的宇宙の限界、その進化の諸問題について、われわれが知り得たと思っている事は今日でも実はまだきわめてわずかである。

この物質量の無限大を論ずる条下に現われているもう一つの重要な考えがある。元子が集合して物を生ずるのは、元子の混乱した衝突の間に偶然の機会できあがるものであって、何物の命令や意志によるのではない。そういう偶然によって物が合成されうるためには無限の物質元子の供給を要するというのである。この「偶然」の考えも実に近代の原子説の根底たる統計力学の内容を暗示するように見える。偶然のみ支配する宇宙ではエントロピーは無際限に増大して死滅への道をたどる。これと呼び帰して回生の喜びを与えるべき別の「理」はないものであろうか。ボルツマンやアーレニウスは、そういうプリンシプルの夢を書き残した。しかしこの夢はまだだれも実現し得ない。この問題に対してなんらかの示唆を与えるものは

.....  
 It is *preserved*, when once it has been thrown  
 Into the *proper motions*, .....

という言葉である。これは言い換えると、偶然の産物に或《あ》る「選択の原理」が作用する事を意味する。この選択を行なう魔物は何であるか。これについては彼は何も述べていない。しかしそういうものの存在をここで暗示しているものと見るのははたして不倫であろうか。マクスウェルのデモンはあるいはまさにその一つの魔物ではあり得ないか。

## 二

第二巻においてルクレチウスは元子の運動の状況や、その形状や結合の機巧等を前よりも詳しく具体的に記述しているのである。

例によって冒頭には、富貴権勢は幸福の源泉でなくて、かえって不幸の種である。ただ理知による真理の探究が真の心の平静を与えるものだという意味の前置きがある。そして前にあげた四行のリフレインが再び繰り返されている。

元子は結合するが、その結合は固定的ではなく、不断に入れ代わり、離れまた捕われる。eternal give and take である。しかしその物質の総和は恒久不変であると考え。ここの考えは後代の物質不滅説を思わせる事はだれも認めるであろうが、また見方によっては、たとえば溶液分子のようなものの化学的平衡を思わせる何物かを含んでいるからおもしろい。

元子は互いに衝突する。その速度は一部は固有のものであり、一部は衝突によって得るものである。衝突の結果はいろいろである。ある元子はその複雑な形状のために互いに引っ掛かって結合して剛い物を造るが、あるものは反発して柔らかい物質となりあるいは全然離れ合ってしまう。これは言わば固液気三態の原子構造の説明と見られる。

元子が集まって微小な物体を作り、それが集まって、またそれより大きいものを作り、順次に目に見える物ができあがるというのである。これも原子から微晶、微晶から多晶金属の組成、あるいはまたコロイドから有機体の生成等の機巧と相通じる考えである。

日光に踊る微塵の有名な譬喩の出て来るのはこの条である。私のおもしろいと思ったのは、元子の寄り合っできる細粒が、不可視的元子の衝突によって動かされて、粒全体としての運動を生ずるという考えが述べてあることである。それがちょうどブラウン運動の記述に相当する事である。

元子が動いているのにその組成物体が静止しているように見える事のあるのは何ゆえか。それはわれわれの「知覚には限界がある」からである、と言って、遠い小山に緑草をあさる羊の群れがただ一抹の白い斑にしか見えないという、詩人らしい例証をあげている。この知覚の限界という事を延長させれば、「観測の限界」という最近の物理学の標語になるのである。

元子の速度はいかに大きいものであるか。太陽が出ると一瞬時に世界は光に包まれる。この光の元子は空虚を通るのではなく、物質の中を通って来るのかかわらず、これほどに早いものであるとすれば、空虚を飛び行く場合の速度はさらに大きなものでなければならないと論じる。

ここで光の速度という観念、また真空と物質の中との速度の相違という事が想像され意識されている。

次に元子説の反対者が「神の意志」を持ち出すのに対する弁駁が挿入されているが、これと本文との連絡がよくわからないとマンローも述べている。しかしあるいは元子が一種の自然方則に支配されている、その記述に移らんとするための前置きとも見られない事はない。すなわちその次に彼はすべての物質は自分の力では「上方」には上らないという方則を持ち出すのである。

見かけの上から「上」に浮かぶものはいろいろあるが、それは別に働力のためであると考えている。これもストア派に対する反対だそうである。

この考えからすると、すべての元子は皆「下」にまっすぐに落ちる。その場合いかにして元子相互間の衝突が可能となるか。この困難を切り抜けるために持ち出された一つの今から見て奇抜な考えは、この元子のおのおのはその直線的並行落下の途中で、ある不定な時、不定な場所において、おりおり、きわめて少しその経路を曲げるというのである。

しかし各種元子の中で、重いのと軽いのとで各自の落下速度がちがうとすれば相対距離が変化するから相互の衝突が起こりうるのではないかという人があるだろう。しかしそれは誤っている。なんとならば、真空中では抵抗がないから、すべての元子は同速度で落下するからである、とルクレチウスは断言している。彼がおそらくなんの実験にもよらずしていかにしてこの落体に関するアリストテレスの誤謬を認め得たかはわからない。そして想像すれば空気中と水中とにおける落体の偶然な観察が彼の直覚を誘発したかもしれない。

元子が互いに衝突するために物が生成し変転するという考えと元子が同速度で並行に動くという考えとの矛盾を融和するために持ち出されたこの原子の偶然的任意的偏向を一転して「自由意志」の存在と結び付けようとしている。これがはなはだ注目すべき考えである。

彼は人間や動物に自由意志なるものの存在を無条件に容認する。さて

彼の元子論に従ってすべての元子が自然方則によって直線落下をつづけるか、あるいは少なくともなんらかの確定的の方則によって支配されているならば、すべての世界の現象は全然予定的に進行するのみであって、その間になんら「自由」なる意志の現われうべき余地はないのである。しかし一方で意志の存在を許すとすれば、これはどこからは入り込んで来るか。徹底的物質論者である彼はそういうものを物質以外の世界から借用して来るという二元論的態度はどうしてもとれなかった。従って当然の必要から彼は意志の根元を彼の元子に付与したのである。

この考えは一見はなほだ非科学的に見えるであろう。当時でもキケロによって児戯視されたものである。しかし今の科学のねらいどころをどこまでも徹底させて生物界の現象にまでも物理学の領土を拡張しようとする場合には、だれでも当然に逢着すべき一つの観念である。私はかつて雑誌「思想」の昭和二年九月号に出した「備忘録」の中で、生命の起元に関する未熟な私見を述べた際に、生命の胚子は結局原子そのものに付与するのが合理的であるという考えを述べておいた。これは、数年前、同種元素の原子に個性の存在を暗示したウィリアム・ソディの説に示唆されてから考えた事であったが、今になって考えてみるとこの私の考え方は全然ルクレチウスのこの考えを、知らずに踏襲したものとも言われるのである。

自然の漸進的死滅を救うべき「選択原理」の有無について前章に述べた事をここで再び繰り返し考えてみると、私はこのルクレチウスの元子の任意志的偏向のうちに、その求むる原理の片鱗のごときものを認めうるのではないかと思うのである。

さて元子の形状や大きさはどんなものかという説明に移る前に、これらの元子の種別の多種多様である事を述べている。この種別に関しては、現今では有限数の元素を区別するが、同一元素のすべての原子はすべて同等であるごとく考える。もっとも化学の方面では炭素原子の種々の化合価を有するものを区別し、またスペクトルの物理では同元素原子の種々の素量的状態を区別するが、そういう変態はどの原子にも共通に可能と考えるから、結局同元素原子には個性を認容していないことになる。しかるにルクレチウスの言葉から判断すると、人間がめいめいに異なるごとく、羊と羊とが異なるごとく、全く同一なる元子の一つもないと考えているらしい。すなわちウィリアム・ソディの暗示したごとく原子の個性を認める事に相

当する。この現代科学の考え方とちがった考え方をしたのは、いかなる必要もしくは動機によるかわからないが、しかし前述の元子の自由意志の考えとは、かなりまでよく融合しうるものであることを注意しておきたい。

元子には大きさの種類がある。たとえば雷電の火の元子は薪炭の火の元子よりも微小であるから、よく物を透す力がある。光は提灯の羊角を透るが雨ははね返される。これも光と水の元子の大きさの差による、というような例があげてある。

次には元子の形状の差違を述べている。酒は流れやすいのに油が流動しにくいのは、後者の元子が「曲がりもつれ合っている」ためであると考えている。すなわち液体粘度の差を原子の形状から説明しようというのであるが、この問題は現在においても実はまだ充分には解決されていないものである以上、われわれは軽卒に彼の所説を笑う事はできない。

われわれの官能を刺激する光、音、香、味は、いずれもおのおの目的物から飛来する元子による一種の触覚であるという考えである。そして、すべてわれわれに快い感覚を与える光音香味の元子は丸くなめらかであり、不快に感ぜらるるものの元子は角があり粗鬆であるとする。暑さと寒さの元子はいずれも刺がある。その刺のある様子がちがうというような考えである。これらはもちろんかなり勝手な想像ではある。しかしたとえば芳香属の有機化合物に共通なる環状分子構造のことなどを考えてみると、少なくとも嗅覚味覚のごとき方面で、将来このような考えがなんらかの意味で確かめられないとは保証し難いように思われる。音や光でさえも、音波の形が音色を与え、光波の波長の大小が色彩を与える事を考えると、今より百年後の生理学の立場から見てあるいはルクレチウスの言葉を適当に翻訳する事ができるようになりはしないか。不規則に角立った音波は噪音として聞かれ、振動急速な紫外線は目に白内障をひき起こす。その何ゆえであるかは完全には説明されていないではないか。いわんや光の量子説の将来は未知数である。現に光の網膜に対する作用が光電現象であるとかないとかいう議論が行なわれつつある。もしそうであるとすれば、その場合の光は結局素量的であって、すなわち光の元子である。その波の量子エネルギーを定める振動数はある意味での量子の「形」とも見られるのではあるまいか。

それはとにかくすべての感覚を、器械的現象に引きならしてしまおう

としているところに、われわれはルクレチウスの近代科学的精神の発現を認めなければならない。

次には、固体元子は曲がりあるいは分岐しているのに対して液体の元子は丸くなめらかであるとしている。これも、一方に結晶体の原子格子の一小部分を考え、他方に液体の分子集合の緩やかな状態を考えれば、ある度まではあっているとされる。煙や火の元子は尖鋭な形をもっているが、もつれ合っていないと言っているのはよくわからない。また海水のごときは水の円滑な元子の間に塩の粗面的な元子が混合しているが、地下で濾過されれば、水だけが通過すると言っている。これらもおもしろい、一概に笑ってしまわれなところがある。

元子の形状は多種多様であるが、しかしその種類の数は有限である。もし無限の種類があるとすれば、その一種としてわれわれは無限に大きな形態をもった元子もあるとしなければならないという議論が述べてある。この議論はそのままでは科学者には了解し難いものである。しかし今かりに次のような言葉に翻訳してみると彼の言葉がいくぶんか生きて来るように思う。すなわち彼は形の変化は、形を定める「部分」の錯列 (パーミュテーション) によって生ずると考える。そしてその「部分」に有限な大きさを考えるとすれば、無限の種類を生ずるためには結局無限大の大きさのものの生ずる事を許容しなければならないことになるのである。この考えはある点において現代の原子内部構造の予想として見る時に興味が深い。すなわち原子はその核の周囲をめぐる電子を一つずつ増すことによって一つの物質から他の物質に移って行く。すなわち原子数を増して行く。もしも元素の種類が無限に多様にあるとすれば、原子数、あるいは原子量の無限大な物質原子が存在する事になるはずである。しかし実際にそんなものはない。すなわち原子の「形」の種類には制限があるのである。

.....these primal germs

Vary yet only with *finite tale of shapes*.

この言葉が現代の原子模型をいかに適切に表わすものであるか。また言う

.....

Betwixt the two extremes: the things create

Must differ, therefore, by a finite change,

.....

これは寒と熱との間の段階の素量的推移を述べた言葉で、言わば温度の素量説として述べた言葉である。しかしこれはまたきわめて徹底的な一般的素量説の標語としても見られる。しかして現在洪水のごとく物理学の領土を汎濫しつつある素量の觀念の黙示のごとくにも響くのではあるまいか。

元子の種類が有限であるという考えと、最初の元子個性説とは一見矛盾するように見える。しかしこの矛盾ははなはだ貴重な矛盾であり、実は無機界の科学と生物界の科学との矛盾である。そうしてこの矛盾を融和することこそ、未来の科学の最も重大な任務でなければならない。

元子の種類は有限であるが、各種元子の数は無限である。これは物質総量の無限大という前提から来る当然の帰結である。

これら無数の元子はその運動の結果として不断に物を生成し、また生じた物は不断に破壊され、生成と破壊の戦いによって世界は進行する。生のそばには死、死のそばには生があるのである。この考えにはいわゆる「平衡」の觀念が包まれている。

物の性能が複雑であればあるほど、その物の組成元子は多種多様である。われらの母なる地のごときものはその最も著しいものである。彼女はあらゆるものの母であるからである。そのために昔のギリシア人はこの地を人格化して神と祭り上げてしまった。しかしそれは譬喩である。地はただの無生の物質の集合に過ぎない。

動植物は地から食物をとって生長する。従って彼らの中には共通な元子が多分に包まれている。しかし共通な元子からできても、その元子の結合のしかたや順序によって異種の物ができる。あたかも種々に異なる語に共通なアルファベットがあるようなものである。

しかし元子の結合のしかたにある定則があつて、勝手放題なものではできない。そのために生物はその祖先の定型を保存し、できそこないの妖怪はできない。すなわちここで初めて遺伝の問題に触れている。

そういう事がどうしてできるか。それは動植物が摂取する食物の中で、各自に適当なものは残存し、不適当なものは排出されるからである。すなわちここにも「選択の原理」の存在を持ち出している。これと同じ事は無機界にも行なわれている。すなわち元子の結合にはある定まった方則

が支配している。そのおかげで個々の一定の物質が区別されると考えるのである。これも化学におけるあらゆる方則全体の存在を必要とする根本原理を述べたものと見られる。

次にはすでに前にも述べたごとく、元子に可触的物体と同じような二次的屬性を付与する事の不都合を詳述している。たとえば元子に色があるとしては、同じものの色の变化することを説明し難い。色の变化は元子の排列順序の変化あるいは元子の交代によって説明せられうると言っている。これもはなはだ近代的である。

色は光あって始めて生じるものであると言っているのも正しい。暗中では色の見えぬ事、照らす光によって色のちがって見える事が引証されている。有色物質を粉末にすると次第に褪色するという事実が引用されているのもおもしろい。つまり、彼の考えではいっそう細かく分割して元子まで行けば無色になると言うつもりらしく読まれる。しかしここにいう色彩とそれが目を刺激する元子との関係はよくわからないのが遺憾である。

光が当たって色を生ずるのは光の元子の衝突し方によるもので、そのしかたの差は物質元子の形状によると述べてある。これはある程度まで近代的に翻訳する余地があるかと思われる。

同様に元子は香も味もなく、声も発せず、また熱くも冷たくもない。そういう変わりやすい無常なる二次的屬性が永遠不変なるべき元子にあるはずがない。

色のないものから色が生じるように、感覚のない土から蚯蚓が生まれる。草や水が牛馬に変わる。同じ元子が混合排列のしかたや運動のしかたによっていろいろのものできる。ここで彼は生物がいかにして無機物から生じうるかを説明せんと試みている。後条で精神の元子を論ずるのであるからここでそういう議論は必要がなさそうにも思われるが、しかしここでは心や精神と切り離して感覚を考えているらしい。それはとにかく、感覚を有するものの素成元子は感覚を有すべきだとする事は必要としない。むしろありとするほうが不合理だとする彼の所説にはかなり重要な意義を含蓄しているように思われる。結局はこれもやはり前にたびたび繰り返した、物質と生命との間の「見失われた鎖環」に関する考察の一端である。平たく言えば、もし元子が生物のごときまとまった感覚をもつとしたら、その集合したものがいかにして一つのまとまった感覚を持ちうるかとい

う考えであると読まれる。

その次に、生物がはげしい衝撃を受けると肉体と精神との結合が破れて後者が前者の孔から逃げ出すというような考えから、苦痛や快樂の物質的説明を試み、「笑いの元子」などというものは無いと言ったりしている。このへんの所説はしかし私の今の立場から詳説すべき範囲外にあるからすべて省略する事とする。

これらの所説は畢竟するに人間靈魂非不滅論に導くべき前提としてルクレチウスのかなり力こぶを入れているところであるらしく見える。

以上の所説のごとくにして造られた世界には、同じようなものがたくさん共存するという考えから、われわれのと同じ世界が、他にもいくつも存在するであろうという考えが述べてある。これも一つの卓見であると言われよう。さように限りなき宇宙を一人の力で支配する神様はないはずだということへ鋒先を向け、そして例の宗教の否定が繰り返される。

この条下にこの世界の誕生、生長、老衰、死滅に関することも述べられている。これらを省略して直ちに第三巻に移ろう。

### 三

第三巻の要項とするところは、人間精神の本性を論じこれもまた物質的な元子より成るものであることを論じ、それから靈魂は死滅するものであるという事を「証明し」最後に死の恐るるに足りない事を結論するのにある。

これらの所論はルクレチウスの哲学的の立場からすれば最も重要な役目を務めるものであろうが、今の私の立場から見るとあまりに現在の科学の領域を逸出した問題である事はやむを得ない。もっとも今から百年二百年後の精神物理学者が今の私のような立場でこの巻を読めばあるいは、この巻において最も興味ある発見に出会うかも知れないという事は想像し得られる。しかし私としてはこの巻をきわめて概括的な、主としてマンローの摘要による紹介だけで通過しなければならない。これらの所説の哲學史的の意義については他の哲學書に譲るほかはない。

冒頭には例によってエピクロスにささげた礼賛の言葉がある。そうして、あらゆる罪惡を生むものは死の恐怖である。もし、精神というものの

本性を明らかにさえすれば、死は決して恐ろしいものではなくなるであろうから、これからその説明を試みようというのが前置きである。

まず心 (*mind, animus* or *mens*) は他の学者の説くごとく人体の調和原理でもなく生命原理でもなく、ちょうど頭や足が人体の部分であると同様の意味において人体の「部分」であるに過ぎない。その証拠には肉体が病気で心は幸福でありうるし、心が悪くても健康でありうる。ちょうど足が痛んでも頭は平気でありうると同じである。

同様に精神 (*soul, anima*)] もやはり人体の一部で全体の調和ではない。からだの部分を取り去っても、生命は持続する。これに反して「熱と空気の粒子」がほんのわずかに逸出すると死んでしまう。これから考えると生命持続のためにはある特別な要素が必要だという事がわかる。しかしそれは人体に含まれている元素であって、全体の調和原理でもなんでもない。

ここで心と精神 *animus* と *anima* をルクレチウスがどう考えているかという、両者は相互に関連したものであるが、心は支配者として胸の中枢なる心臓に座し、精神は全身に分布して心の命令に従うものとしてゐる。私の読み得たところが誤りでなければ、彼のいわゆる心は脳に相当し、精神は全身に広がる知覚ならびに運動神経に相当するように見える。そう思って読むと彼の言葉が了解しやすくなるのである。

心の衝動によって精神が刺激され、これが肉体を動かす。物質的肉体を動かすものはまた、物質でなければならない。ゆえに精神、従って心もまた物質的のものでなければならないと論ずる。これは彼の唯物観の当然の帰結であり、またおそらく現代の多くの物理的生理学者の暗黙のうちに仮定しつつある事でなければならない。

精神は物質であるとすれば、それはやはり物質的原子より成るはずである。ただし心や精神の元子は非常に微細でその速度は非常に大なるものでなければならない。なんとなれば考えの速さは何よりも早い。そして人が死んでも、少なくとも見かけの上で、大きさも重量も変わらない。あたかも酒の気の抜けたようなものである、というのである。ルクレチウスはもちろん神経の伝播速度の実際などは知らなかったが、ともかくも考えの速さという事を物質的なるある物の速度で置換した。

人間の息を引き取る前とあとにおける体重を比較しようとする学者は今おそらく一人もないであろう。しかし徹底的なる現代科学的精神から

すれば、この実験を遂行せずして始めから結果を断定する事は許されないであろう。

精神を組成するものは、「精」、「熱」、「空気」、とそれに第四のある「名のない者」とである。この第四の者は最細最微にしてかつ最も急速度のもので、これが感覚の基になるものであり、これが害せられると生命はなくなると説き、またこの四つのものが混合してある一つの全体を成すと云っている。

人間や動物の性情性質の相違はこの熱と精気と、空気との含有の割合によって生ずる。たとえば獅子は熱を、鹿は空気また精気を多く持っている、という筆法である。

精神は肉体によって結合され、さらに肉体を生かす。両者いずれか一方を引きはなせば両者は破壊され生命は滅びる、また両者の相対的運動によって感覚が生じる。肉体の元子と精神の元子とが一つずつ対になっているというデモクリトスの説は誤りである。後者の数は前者に比してはるかに小さい、と論じる条がある。

これらの考えを基にしてルクレチウスは、精神は肉体の死とともに死滅するものであるという彼の信条を「説明」するためにおよそ二十八箇条をあげて彼の雄弁を發揮するのである。しかしこれを逐条ここで述べることは私の任務でないのみならず、いたずらに読者の倦怠を買うに過ぎないであろう。ただその一箇条として各種の生物に特有な性状の親から子へ遺伝する事実に論及し、そして心もまた「定まれる種子」を有する事を仮定しなければこの現象は説明し難いと言っているのは注目すべきである。またもし靈魂なるものが肉体へ突然入り込んで来るものであるとすると、一人の子供がまさに出産しようとする際には、いくつもの靈魂が産婦の枕もとに詰めかけて、おれがおれがと争うであろうと言っているのは読者をしておのずから破顔微笑させるものがある。

さて、靈魂が母体とともに死滅してしまうとすれば、死は少しも恐ろしくなくなってしまう。ローマが勝とうがカルタゴが勝とうが、靈肉飛散した後の我れにはなんのかかわりもない。たとえわが精神の元子は元子として世界のどこかに存在していても、肉を離れて分解した元子はもはや「我れ」ではない。もっとも、現に我れを構成していたすべての元子が、測るべからざる未来において、偶然に再び元のとおりに結合して今の我れ

と同じものも作るような事はあるかもしれないが、その再生した我れが、前生の我れを記憶していようとは思われない。

死後に自分の死を悲しむべき第二の我れは存しないからわが死は我れにとって悲しみでない。死とともに欲望も死ぬるから、だれも、満たされなかった望みに未練を感じずるものはない。そしてたとえせいぜい幾年生き延びたところで永遠の死に対してはその余命は無に等しい。

死後に行くと言われる地獄は、実は目前の欲の世界である。これをのがる唯一の道は万物の物理の研究である。

私はこのエゴイストの哲学についてはなんらの批評の言葉も持ち合わせない。しかし私は、現代においてももしも腹わたの奥底までも科学的にできあがった科学者がいたとしたら、少なくとも彼の死に対する観念だけは、よほどこれと似たものでありはしないかを疑うものである。

以上彼の所説中で今の物理学者にとって最も興味あるものと思わるるのは、いったん成立して後に分解し離散した多数元子のある特定の集団が、たとえほとんど無限の時間の後であるとしても、再び元どおりに復活しうる機会を持つという考え、しかもそれはなんらの神の意志にもよらずして単に統計学的偶然の所産として起こりうるという考えである。これを読んだ多くの物理学者はボルツマンがそのガス論の第九十章に書き残した意味深きなぞを思い出さないわけには行かないであろう。

もう一つの注目すべき事は、この巻のみに限らないが、一般に元子の大きさが小さければ小さいほどその速度が大きいという考えが黙認されているらしく見えることである。いかなる根拠あるいは機縁によってこういう観念が生じたかはもちろん不明であるが、ともかくもこれは後代のガス論に現われたエネルギーの等分配の方則を少なくとも質的に予想するものと見れば見られるという事である。

私は思う。直観と夢とは別物である。科学というものは畢竟「わかりやすい言葉に書き直した直観」であり、直観は「人間に読めない国語でしるされた科学書の最後の結論」ではないか。ルクレチウスを読みながら私はしばしばこのような妄想に襲われるのである。

ちなみにわが国の神官の間に伝わる言い伝えに、人間の靈魂は「妙に円き」たまであるという考えがあるそうである。この事を私は幸田露伴博士から聞いて、この条の心や精神の元子と多少でも似た考えがわが民族の

間に存した事を知り奇異の感に打たれたのである。これはギリシア語のテュモスが国語のタマシイに似ていると同じく、はたして偶然であるか、そうでないか全くわからない。

#### 四

第四巻に移るに当たって、私は以上の三巻を取り扱って来た私の紹介の態度と方法に多少の変更を加える必要を感じる。

以上紹介したところによって、私はルクレチウスの根底に存する科学的精神の一般的諸相と、彼の元子説のおもなる前提ならびにその運用方法の概念だけを不完全ながら伝えることができたように思う。以下の三巻に現われるこれらの根本的なものは、多く述べきったものの変形であり敷衍であるとも見られる。

また一方、以下各巻に現われる具体的な自然現象の具体的説明となれば、これらはそのままでは当然現在の科学に照らした批判に堪えうるものではない。

そういうわけであるから、これ以後も従前のごとく逐条的詳細の紹介解説をするとすれば、それはあまりにしばしば無用な重複に陥り、またあまりにわずらわしき些末の詮索に墮するばかりではないであろう。たとえそれは読者の寛容を得るとしても、編集者から私に与えられた紙数には限りがある。

それで、私にはなるべく重複を避けながら、主として科学的に興味あるべき事ごらゝを、やや随意に摘出しながら進行しようと思う。

第四巻の初めにおける重要題目は物体が吾人の視官によって知覚される機巧に関するものである。アリストテレスやピタゴラスらは、目から発射するある物が物体を打つために物が見えると考えたのに反して、この著者が物体から飛来する何物かが目を刺激するのであると考えた点は、ともかくも一歩だけ真に近い。しかしその物体から来るものは今日の光線でも光波でもなくて「像」と名づける薄膜状の物質である。これはあたかも蛇の皮を脱するごとく、物体の表面からはがれて、あとからあとからと八方に飛び出す。その速度は莫大なものである。これが目を打つと同時にわれわれはその物体の形と色を知覚する。この像が鏡に衝突すると、反射し、そして「裏返し」になって帰って来る。物の距離の感ぜられるのは、像が

飛んで来る時に前面の空気を押して目におしつけるためである。そのために鏡に映ったものは、鏡の後ろにあるように距離が感ぜられるというような解説がある。

反射角と入射角と等しいという意味の言葉もある。水中に挿入した櫂の曲がって見える事は述べてあるが、屈折の方則らしいものは見いだされない。また数多の鏡による重複反射の事実にもともかくも触れてある。

表面の粗なる物体にこの「像」が衝突した場合には、この薄膜の像が破れてしまうから、映像を生じないという説明や、また遠方の物体が不鮮明に見えるのは長く、空中を飛行する間に無数の衝突を受けて、像のどがった角が次第につぶれてしまうからであるという光の拡乱の説明は、やや近代的なものを含んでいる。

知覚が与えるものは常に正しくても、その判断の誤りから錯覚を生ずると言っているいろいろの例もあげてある。そしてこれに続いて自然の認識の基礎となるべきものはしかし結局吾人の感覚にほかならないという感覚論的方法論の宣言がある。これは後にマッハの一派によって展開されたものの先駆をなすものと見られる。そしてプランクらの「感覚からの開放」という言葉が彼らの意味では正当であるとしても、われわれはこのルクレチウスの所説もまた同時に真理として認容しなければならない。いかに人間が思い上がって見たところで、五官を封じられてしまって、そうして物理学の課程を学ぶ事がどうしてできるであろうか。

音響はやはり一種の放射物であるが「像」のようなものとは考えられていないらしい。そして音の散乱、反射というようなものも、どうか論じてある。おもしろいのは音の回折の事実を述べてある所に、ホイゲンスの原理に似た考えが認められる。すなわち一つの音から次の音が生まれる。ちょうど一つの火花から多くの火花が生まれるようだと言っているのである。そして、光は影を作るが音は影を作らない事に注意を向けている。

私は昔ある場所の入学試験の問題として、音波と光波の見かけの上の回折の差を証明する事を求めたが、正解らしい要点に触れたものはまれであった。多くの学生らは教科書に書いてない眼前の問題はあまり考えてみないものと思われる。そして教わったものなら、どんなめんどろな数式でも暗記していて、所問に当たろうが当たるまいが、そのままに答案用紙に書き並べるのである。二千年前のルクレチウスのほうがよりよき科学者で

あるのか、今の教育方針が悪いのか、これも問題である。

香や味の問題その他生理学的の問題の所説は全部略する。ただこの条に連関して人間の生活官能は人間の用途のために設計して作られたものではなくて、官能があって後にその用が生まれるものであると言って、目的論的自然観に反対する所論のある事を注意しておきたい。

巻末に性愛を論じた部分の中に遺伝素に関する考えが見いだされる。この考えはよほどまで具体的に現代の遺伝学説に近似するものであって、この事はすでに近ごろのネチュアーの寄書欄で注意した人もあったくらいである。

## 五

第五巻の初めにおいて、ルクレチウスは、さらに鋒先を取り直して彼の敵手たる目的論的学説に反抗している。そうして神を敬遠して世界と没交渉な天の一方に持ち込んでいる。世界が神の所産でないことは世界の欠点だらけなことからもわかると論じている。これをソクラテスが神は善なるゆえに世に悪はない、と言ったのと比較すると、両者の立場の相違がよくわかる。一は公理から演繹し一は事実から帰納するのである。この点からもルクレチウスのほうが自然科学的である。

そうして世界の可死を論じるために水や空気や火の輪廻を引用して種々の地文学的の問題に触れている。また地質学上の輪廻にも暗示を投げている。その記述の中には当然地震や津波も出て来る。

最も興味あるは宇宙の生成に関する開闢論的(コスモゴニカル)考察である。元子的渾沌の中から偶然の結合で分離析出が起こるという考えは、日本その他多くの国々の伝説と同様であるが、それを元子論的に見た点のはなはだ近代的であることは前述のとおりである。

地が静止しているというための彼の説明は遺憾ながら有利に翻訳し難いものである。

次には星の運行の原因を説明するものとして、四つばかりの可能なオルターネティヴを列挙している。この説明の内容はとにかくとして、この後においても彼はしばしば当面の問題に対して可能であるべき説明をできる限り列挙せんと努めているのは注意すべき彼の科学的方法である。彼は言う。これらのもののいずれが、この「われわれの世界」で原因となっ

ているかは確実にわからない。しかし宇宙間に存する「種々の世界」は種々に作られているから、これらの原因のいずれもが、どこかの世界には行なわれているかもしれない。ただこの世界でその中のどれが行なわれているかを断言する事は、自分のように「要心深く歩を進める人間」のすべき事ではないと言っている。

この方法論は、実は、はなはだ科学的なものである。彼の考えを敷衍して言えば、経験によって明確に否定されないすべての可能性は、すべて真でありうることを認容してかからねばならないというのである。この事は意外にもかえって往々にして現時の科学者によって忘却される。精密という言葉、量的という標語を持ち出す前にまず考えなければならない出発点の質的のオルターネティヴが案外にしばしば粗略に取り扱われる。その結果は、はなはだしく独断的に誤れる仮定に基づいたためんどうな数学的理論がひねり出されたりするような現象が起こる。そういう意味でルクレチウスのこの態度は、むしろ今の科学者に必須なものと考えなければならぬ。

この態度で彼は太陰太陽の週期の異なる理由、昼夜の長短の生ずる理由、月の盈虚、日月の蝕の原因等に関する説明の可能なものを多数に列挙している。これらの説明はそのままには今日適用されないとしても、彼のいうごとく「どこかの他の世界」では適用しうるものを包有している。たとえば盈虚や蝕の説明の中に、近代に至って変光星の光度の週期的変化の説明として提出された模型が明示されてあったりするのは、決して偶然ではなくて、むしろ当然の事である。すなわちこの世界で適用しなかった一つのものが他の世界で適用されるにほかならない。将来においても、このへんの彼の所説の中のある物が、前衛に立って戦う天体物理学のある行き詰まった考えの中に、なんらかの暗示の閃光を投げ込むこともありうるであろうと思われる。

開闢論、天体論の次には、この世界における生物の発進進化の解説が展開されている。まず植物が現われ、次に現われた最初の動物は鳥であった。これは天涯から飛来したものではなくやはり地から生まれた。それはちょうど現に雨や太陽の熱によって肥土から虫が生まれるように生まれたものであると説く。これは近代物理学の大家が、生命の種子を天来の発生物に帰せようとしたつたない説をあざけるようにも聞こえる。人間も初め

のうちはやはり地から生まれ、そうして地の細孔から滲出する乳汁によって養われていた。しかしその後、地にだんだん老衰して来たから、もう産む事をとうにやめてしまったというのである。これは確かに奇説である。しかし彼の学説から見ればそれほど不都合ではあるまい。

ここで地の老衰を説いた後に

〔For lapsing ae&cons change the nature of〕

The whole wide world, and all things needs must take

*One status after other*, nor aught persists

For ever like itself. ....

と歌っている。これは、ある意味から、自然方則の変遷を考えているものとも見られる。科学の方則ははたして永劫不変のものであるか。これはきわめてまれにしか持ち出されなかった問題である。私の知る限りではただアンリー・ポアンカレがその晩年のエッセーにおいて論じたものである。これはもちろんわれわれの科学だけからは決定し難いものであるが、しかしまた科学者の全然忘却してはならない問題であろう。

最初のうちはいろいろの片輪者や化け物が生まれた。しかしそれらは栄養生殖に不適當であるためにまもなく絶滅したと言って、ここに明らかに「適者生存の理」を述べている。残存し繁栄した種族は自衛の能力あるものか、しからざれば人間の保護によるものであると付け加えている。そして半人半獣の怪物が現存し得ざるゆえんを説いているのである。

次には原始人類の生活状態から人文の発達の歴史をかなり詳しく論じている。これらの所説を現在学者の所説と比較してみてもおそらく根本的にはいくらか違わないのではないと思われる。たとえば火の発明の記事は現に私の机上にある科学者の火に関する著書の内容そのままであり、言語の起源に関する考えは、近代言語学者中の最も非常識なる説よりも、もう少し要を得ている。

冶金、紡織、園芸の起源や、音楽、舞踊の濫觴までもおもしろく述べてある。神の觀念が夢から示唆され、それが不可解不可能なるすべての事情の持ち込み所に進化するという考えももらされている。そして結局宗教の否定が繰り返さるのである。

第六巻では主として地球物理学的の現象が取り扱われている。これは現在の気象学者や地震学者、地質学者にとってかなりに興味あるものを多分に包有し提供している。しかしここでこれらの詳細にわたって紹介し評注を加えることはできない。私はもし機会があったら、他日特に「ルクレチウスの地球物理学的所説」だけを取り出してどこかで紹介したいという希望をもっているだけである。

彼が雷電や地震噴火を詳説した目的は、畢竟これら現象の物質的解説によって、これらが神の所業でない事を明らかにし、同時にこれらに対する恐怖を除去するにあるらしい。これはまたそのままに現代の科学教育なるものの一つの目的であろう。しかし不幸にして二十世紀の民衆の大多数は紀元前一世紀の大多数と比較してこの点いくらかも進歩していない。たとえば今のわが国の地震学者が口を酸くして説くことに人は耳をかそうとしない。そうして大正十二年の関東地震はあれだけの災害を及ぼすに至った。あの地震は実はたいした災害を生ずべきはずのものではなかった。災害の生じたおもなる原因は、東京市民の地震に対する非科学的恐怖であったのである。科学は進歩するが人間は昔も今も同じであるという事を痛切に感じないではいられない。同時に今の科学者がルクレチウスから科学そのものは教わらなくても、科学者というものの「人」について多くを教わりうるゆえんをここにも明らかに認めうると考えるのである。

雷電の現象についてもやはり種々の可能な原因を列挙している。その中に雷雨の生因と、雲および風の渦動との関係が予想されているのがおもしろい。また雷鳴の音響の生因について種々の考えがあげてあるが、この問題については現在でもまだ種々の異説があるくらいである。この方面の研究に没頭せる気象学者にとっては、この一節は尽きざる示唆の泉を与えるであろう。

また風が速度のために熱するという事も考えられている。圧縮によって熱の種子が絞り出されるという言葉もおもしろい。これらはガス体の熱力学の一部の予言とも見られる。

雷電の熱効果、器械的效果を述べる中に、酒壺に落雷すると酒は蒸発してしまつて壺は無事だというような例があげてある。これなどは普通の気象学書には見えないことであるが、事実はどうかか私にはわからない。

雷電の火の種子が一部は太陽から借りられたものであるとの考えも正

鵠を得ていると言われうる。

電火の驚くべき器械的效果は、きわめて微細なる粒子が物質間の空隙を大なる速度で突進するによるものと考えは、近年のドルレーの電撃の仮説に似ている。またこのルクレチウスの記述には、今の電子を思わせるある物もある。電火によって金属の熔融するのは、これら粒子の進入のために金属原子の結合がゆるめらるるといっているのも興味がある。

雷雨の季節的分布を論ずる条において、寒暑の接触を雷雨の成立条件と考えているのも見のがすことができない。

竜巻についてもかなり正しい観察と、真に近い考察がある。

雲の生成に凝縮心核を考えているのは卓見である。そして天外より飛来する粒子の考えなどは、現在の宇宙微塵や太陽からの放射粒子線を連想させる。

次に地震の問題に移って、地殻内部構造に論及するのは今も同じである。ただ彼は地下に空洞の存在を仮定し、その空洞を満たすに「風」をもってしたのは困るようであるが、この「風」を熔岩と翻訳すれば現在の考えに近くなる。彼はまた地下に「川」や「水たまり」を考えている。これは熔岩の脈やポケットをさすと見られる。この空洞の壁の墜落が地震を起こすと考える。このままの考えは近年まで残存した。重いものの墜落の衝動が地に波及するという考えも暗示されている。

「地下の風」の圧力が地の傾動を起こし震動を起こすという考えが、最近のマグマ運動と地震の関係に関する学説を連想させる。

津波の記事の加えられているのは地震国たるギリシア・ローマの学者にして始めてありうるものであろう。

次には大洋の水量の恒久と関係して蒸発や土壌の滲透性が説かれている。

火山を人体の病気にたとえた後に、物の大きさの相対性に論及し、何物も全和に対しては無に等しいと宣言している。

また火山の生因として海水が地下に滲透し、それが噴火山の根を養うという現代でもしばしば繰り返される仮説もまたその端緒をルクレチウスに見いだすことができるのである。

ナイルの洪水の問題についても四箇条のオルターネティヴがあげてある。この四箇条などは、おそらく今でもどこの川について地文学者のだ

れかが月並みに繰り返しつつあるものと全然同様である。

次には毒ガス泉や井戸水の問題がある。井水の温度に関する彼の説明は奇抜である。

その次に磁石の説が来るのは今の科学書の体裁と比較して見れば唐突の感がある。ただし著者のつもりは、あらゆる「不思議」を解説するにあるのであって、科学の系統を述べているのでないと思えばよい。

磁石の作用を考えている中に「感応」の観念の胚子、「力の場」「指力線」などの考えの萌芽らしいものも見られる。しかし全体としての説明は不幸にして今の言葉には容易に書き直されないものである。

終わりには「病氣」に関する一節があって、そこには風土病と気候の関係が論ぜられ、また伝染病の種子としての黴菌のごときものが認められる。

最後にアゼンスにおける疫病流行当時の状況がリアルな恐ろしさをもって描き出されている。マンローによればこれはおもにツキジデスを訳したものだそうであり中には誤謬もあるそうである。これは医者を読んだらさだめておもしろいものであると思う。この中には種々多様の悪疫の症状が混合してしるされているそうである。この一節はいわゆる空気伝染をなす病氣の実例として付け加えられたものであろう。

この疫病の記述によってルクレチウスの *De Rerum Natura* は終わっている。これはわれわれになんとなく物足りない感じを与える。ルクレチウスはおそらく、この後にさらに何物かを付加する考えがあったのではないか。私はこの書に結末らしい結末のない事をかえっておもしろくも思うものである。実際科学の巻物には始めはあっても終わりはないはずである。

## 後記

ルクレチウスの書によってわれわれの学ぶべきものは、その中の具体的事象の知識でもなくまたその論理でもなく、ただその中に貫流する科学的精神である。この意味でこの書は一部の貴重なる經典である。もし時代に応じて適当に釈注を加えさえすれば、これは永久に適用さるべき科学方法論の解説書である。またわれわれの科学的想像力の枯渇した場合に啓示の霊水をくむべき不死の泉である。また知識の中毒によって起こった壊血症を治するビタミンである。

現代科学の花や実の美しさを賛美するわれわれは、往々にしてその根幹を忘却しがちである。ルクレチウスは実にわれわれにこの科学系統の根幹を思い出させる。そうする事によってのみわれわれは科学の幹に新しい枝を発見する機会を得るのである。

実際昔も今も、科学の前衛線に立って何か一つの新しき道を開いた第一流の学者たちは、ある意味でルクレチウスの後裔であった。現在でもニエルス・ボーアやド・ブローリーのごときは明らかにその子孫である。彼らはただ現時の最高のアカデミックの課程を修得したルクレチウスにほかならないのである。

エネルギー不滅論の祖とせらるるロベルト・マイアーは最もよくルクレチウスの衣鉢を伝えた後裔であった。しかし彼は不幸にしてその当代の物理学に精通しなかったために、その偉大なる論文は当時の物理学界からしりぞけられた。しかして当時の学界へのパスを所有していた他のルクレチウスの子孫ヘルムホルツによって始めて明るみになるようになった。

現代の科学がルクレチウスだけで進められようとは思われない。しかしルクレチウスなしにいかなる科学の部門でも未知の領域に一歩も踏み出すことは困難であろう。

今かりに現代科学者が科学者として持つべき要素として三つのものを抽出する。一つはルクレチウスの直観能力の要素であってこれをLと名づける。次は数理的分析の能力でこれをSと名づける。第三は器械的実験によって現象を系統化し、帰納する能力である。これをKと名づける。今もしこの三つの能力が測定の可能な量であると仮定すれば、L S Kの三つのものを座標として、三次元の八分一(オクタント)空間を考え、その空間の中の種々の領域に種々の科学者を配当する事ができるのである。

ヘルムホルツや、ケルヴィンやレイノルズのごときはL S Kいずれも多分に併有していたものの例である。現存の学者ではジェー・ジェー・タムソンがこのタイプの人であろう。ファラデーや現代のラザフォードやウードのごときはL K軸の面に近く位している。ボルツマン、プランク、ボーア、アインシュタイン、ハイゼンベルク、ディラックらはL S面に近い各点に相当する。ただL = 0すなわちS Kの面内に座する著名の大家を物色する事が困難である。あるいはレーリー卿のごときは少なくともこの座標軸面に近い大家であったかもしれない。

ゾンマーフェルトやその他の数理物理学者はS軸の上近くに座するものであり、純実験、純測定の大家らはK軸に羅列される。これらは科学の成果に仕上げをかける人々である。そうして科学上のピュリタニズムから見て最も尊敬すべき種類の学者である。

しかるにL軸の真上に座する人はもはや科学者ではない。彼らは詩人である。最善の場合において形而上学者であるが最悪の場合には妄想者であり狂者であるかもしれない。こういう人は西洋でも日本でも時々あって科学者を困らせる。しかししたいの場合彼らの言う事は科学者の参考になるあるものを持っている。すなわち彼らはわれわれにLの要素を供給するのである。

もちろん座標中心の付近には科学者の多数が群集していて、中心から遠い所に僅少の星が輝いているのである。

以上の譬喩は拙ではあるが、ルクレチウスが現代科学に対して占める独特の位地を説明する一助となるであろう。

誤解のないために繰り返して言う。ルクレチウスのみでは科学は成立しない。しかしまたルクレチウスなしには科学はなんら本質的な進展を遂げ得ない。

私は科学の学生がただいたずらにL軸の上にもみ進む事を戒めたく思うと同時に、また科学教育に従事する権威者があまりにS K面の中にもみ学生を拘束して、L軸の方向に飛翔《ひしょう》せんとする翼を盲目的に切断せざらん事を切望するものである。

最後に私はこの一編の未熟な解説が、ルクレチウスの面影の一側面をも充分正確に鮮明に描出することを得なかったであろうことを恐れる。そうしてこの点について読者の寛容をこいねがうものである。

ルクレチウスを読み、そうしてその解説を筆にしている間に、しばしば私は一種の興奮を感じないではいられなかった。従って私の冷静なるべき客観的紹介の態度は、往々にしてはなはだしく取り乱され、私の筆端は強い主観的のにおいを発散していることに気がつく。また一方私はルクレチウスをかりて自分の年来培養して来た科学観のあるものを読者に押し売りしつつあるのではないかと反省してみなければならない。しかし私がもしそういう罪を犯す危険が少しもないくらいであったら、私はおそらくルクレチウスの一巻を塵溜の中に投げ込んでしまったであろう。そうしてこ

の紹介のごときものに筆を執る機会には生涯来なかったであろう。

[注釈：ルクレチウスの atom を現代の原子と区別するためにかりに元子と訳する。]

ちなみに故日下部四郎太博士が十年ほど前に「時の素量について」という意味の題目で一つのおもしろい論文を東京数学物理学学会に提出した事があった。私は今その内容を記憶しないのを遺憾とする。この論文はしかしなぜか学会の記事には載らなかった。あまり変なものだということでどこかで握りつぶされたというわけもある。そういうわけのありうるほどにオリジナルなものであったのである。しかし今読んでみたら案外変ではないかもしれないと思う。日下部博士はルクレチウスの要素を多分に持った学者であったのである。なおエピキュリアンが時を素量的のものと考えたという事を何かで読んだことがあるが、ルクレチウスの中で明白にそう言っているのは私には見当たらなかった。またラスウィッツの「原子論史」によると、アラビアのムタカリムン（[Mutakallimu-n]）と称する一派の学者は時を連続的と考えないで、個々不連続な時点の列と考えている。しかしてやはり人間感覚に限界のあるという事で、この説の見かけ上の不都合を弁護しているそうである。これも注意すべき事である。

## 参考文献

1. Lucretius, “*On the Nature of Things*”, translated by Williams Ellery Leonard  
(<http://classics.mit.edu//Carus/nature-things.html>)  
ルクレティウス、「物の本質について」、樋口勝彦訳、岩波文庫、1961.

## 索引

- Arrhenius .....159  
 Einstein ..... 233, 429  
 Alfrey .....89  
  
 Wieland ..... 4  
 Williams ..... 261  
  
 Austen ..... 231  
 Ostwald .....157, 159, 160  
 Oldroyd ..... 185  
 Onsager 123, 126, 133, 153, 155  
  
 Kirkwood .....148, 153  
 Carothers .....71, 335  
  
 Gibbs .....300, 307, 310  
  
 Couette ..... 162, 165  
 Guth ..... 37, 38, 40  
 Kuhn ..... 8, 9, 26, 27  
 Kuhn,Hans .....28  
 倉田道夫 ..... 318, 322, 330  
 Graham ..... 227  
  
 Schulz .....85  
  
 Staudinger ..... 3, 12  
  
 Stokes ..... 218, 244  
 Stockmayer .... 100, 101, 103  
  
 Zimm .....105, 108, 113  
  
 Truesdell ..... 188, 189  
  
 Debye... 41, 42, 44, 45, 47, 48  
  
 Doty .....93  
 Tobolsky ..... 21  
 Thomson ..... 215  
  
 Hagen .....210  
 Pauli ..... 26  
 Huggins ..... 85  
  
 van't Hoff ..... 159, 272, 274  
 Fischer ..... 4  
 Fick .....229, 255, 259  
 Fuoss ..... 115, 151  
 Fox .....70  
 Brown ..... 232, 239  
 Flory ..... 68, 85  
  
 Baekeland ..... 2  
 Bethe ..... 151

- Hevesy ..... 237  
Perrin ..... 4, 235  
Helmholtz · 278, 285, 290, 296
- Poiseuille ..... 210  
Pauling ..... 26  
Boltzmann ..... 389
- Mark ..... 4, 14  
Marvel ..... 23  
Mayer, M.G. .... 88  
Mayer, J.E. .... 87  
Maxwell ..... 351
- Meyer ..... 4
- Lamb ..... 221
- Lucretius ..... 443
- Reynolds ..... 212, 213  
Rayleigh ..... 218, 401
- Weissenberg ..... 174, 184