

– WATSON’S HISTORY OF SCIENCE –

ワトソン科学史



はじめに

本書は東京大学教養学部にも所属している著者が、2014年度夏学期の月曜2限に開講されていた橋本毅彦教官の「科学史」を受講した際に作成した試験対策プリント（通称：シケプリ）である。ただし、シケプリとは称しつつも、実際には授業内容よりも若干余分な内容が+αされたものとなっている。

したがって、本書を単なる試験対策のために利用するならば、その内容をすべて把握する必要はまったくない。基本的にすべての“角が丸い箱”（コラムとプロフィール）を読み飛ばし、本文だけを授業中ないしは電車の中でも流し読みしていただければ十分だろう。その上で、各章の章末につけたまとめを活用して学んだことを確認し、過去問で演習を行う、というのが著者の想定する本書を利用した最も効率的な試験勉強法である。

一方、この冊子を手にして読者が、単純なる得点稼ぎの道具とすることを目的とするのではなく、真に学問的に科学史に興味を持っているとすれば、著者にとってこれほどの喜びはない。そういった読者は是非、興味の赴くままにこの冊子を読み込んでもらいたい。本文を読むだけでも科学史の概要が理解できるように編集を行ったつもりだが、それに加えて随所に配置したコラムやプロフィールも合わせて読んでもらえれば、読者にとってより面白い事実を発見できるものと確信している。

2014年度版の時代錯誤社『教員教官逆評定』では、橋本毅彦教官の「科学史」が下記のように紹介されていた。授業に対しての評価は当然、賛否両論あるようだが、何よりも著者が注目したのは「理系の教養」という部分であった。せつかく駒場キャンパスにて“教養”を学ぶのであれば、著者は点数以外の何かを得るべきであると考えている。そして、それは著者だけがもつ気概ではないと信じている。

教員名	授業名	鬼仏度	評価方法	単位	得点	試験	出欠	手間	説明	熱意	推薦
橋本 毅彦	科学史	大仏	期末	B	B	B	A	A	A	B	A
○スタンダードな科学史 ○良い人 ○教科書があればラストどうにかなる ○理系の教養 ○暗記ゲー ×教科書があれば講義に出なくて良い ×板書ないに等しいぐらい少ない ×眠い ×歴史やってる ×暗記ゲー ■教科書は買うべき ■最終授業で試験 ■世界史選択者が有利だと思う ■出席すれば優くる											

どのような目的をもつにせよ、何らかの意図をもって本書を手にした読者にとって、本書が各自の目的を遂げる一助となることを願ってやまない。

2015年3月
著者しるす

目次

はじめに	3
コラム一覧	8
プロフィール一覧	11
第 1 章 ギリシャの自然学	
1.1 ミレトス学派の自然哲学者たち	13
1.2 ピタゴラスと彼の弟子たち	16
1.3 パルメニデスの難問	18
1.4 アリストテレスの自然学体系	19
1.5 アリストテレスの宇宙論	23
第 2 章 中世の科学	
2.1 古代ギリシャの自然科学の発展	25
2.2 アラビア科学	27
2.3 12 世紀ルネサンス	29
2.4 アリストテレス哲学 vs キリスト教神学	32
2.5 タンピエの譴責以降の自然学研究	34
第 3 章 中国の科学	
3.1 中国科学の特徴と概念	37
3.2 中国における天文学とその発展	39
3.3 三大発明と遠洋航海の禁止	45
第 4 章 コペルニクス革命	
4.1 プトレマイオスの天文学	47
4.2 コペルニクスの地動説	49
4.3 ティコ・ブラーエとヨハネス・ケプラー	52
第 5 章 機械論的自然観	
5.1 ガリレオと地動説	59
5.2 粒子論的自然観の提示	62
5.3 デカルトの機械論的自然観	66

第 6 章	ニュートンの総合	
6.1	近代西洋科学とニュートン	69
6.2	ニュートン力学の誕生	70
6.3	ニュートンの錬金術研究	76
6.4	ニュートン力学のフランスにおける受容	78
第 7 章	化学革命	
7.1	フロギストンによる燃焼理論	81
7.2	ラヴォアジエの新しい燃焼理論	86
7.3	ドルトンの原子論	89
第 8 章	数学的実験物理学の誕生	
8.1	熱の正体	93
8.2	ラプラスの自然像	95
8.3	偏光現象の発見	97
8.4	フレネルの光波動論	99
8.5	電流の磁気作用	101
8.6	熱運動説とエネルギー保存則	104
第 9 章	古典物理学の誕生	
9.1	電磁気の研究	107
9.2	電磁気学理論の成立	112
9.3	相対性理論の誕生と古典物理学の完成	114
第 10 章	有機化学の誕生	
10.1	化学の教育と研究	119
10.2	科学と技術の相互交流	123
10.3	世界を席卷するドイツの化学工業	126
第 11 章	現代物理学の誕生	
11.1	アインシュタインの相対性理論	131
11.2	エネルギーの量子仮説	133
11.3	量子力学の誕生と発展	136
第 12 章	原子物理学と原爆開発	
12.1	原子物理学の発展	143
12.2	原爆開発と科学者の苦悩	147
12.3	戦後の原爆	151
第 13 章	宇宙と自然と科学	
13.1	宇宙の構造	155
13.2	自然の歴史	156
13.3	戦後の科学	161

付録 A	2014 年度期末試験問題	166
付録 B	科学史に登場する研究機関	169
付録 C	科学史年表	175
あとがき		181
参考文献		183
図の出典		187
索引		189

コラム一覧

第1章 ギリシャの自然学

科学史の起源	13
ギリシャの七賢人	15
ピタゴラス音律	17
ソクラテス以前の哲学者	19
古代ギリシャの教育機関	22

第2章 中世の科学

ユークリッド幾何学	26
アラビア人の名付け方	28
ヨーロッパ中世の大学	31
科学史とキリスト教	33
ヨーロッパ中世の技術革新	35

第3章 中国の科学

陰陽五行説と八卦説	38
日本の暦	40
候風地動儀	43
紙の発明	45

第4章 コペルニクス革命

インドの科学	48
科学出版の偉大な年	51
錬金術	53
ルネサンスと科学	56

第5章 機械論的自然観

ガリレオと測量技術	60
三原質説と医化学	63
初期の学会	64
最初の統計学者	67

第6章 ニュートンの総合

プリンキピア	71
王立協会	72
ニュートンの光学研究	75
錬金術の歴史	77

第 7 章 化学革命	
18 世紀に発見された物質	84
ユージオメーター	86
ラヴォアジエの天秤とガスメーター	88
さまざまな元素	90
第 8 章 数学的実験物理学の誕生	
氷熱量計	94
エコール・ポリテクニーク	98
光の速度	100
電気と磁気	102
エネルギー説	104
第 9 章 古典物理学の誕生	
電池の発明	109
研究方法の国による差異	110
19 世紀の技術革新	113
元素の整理	115
第 10 章 有機化学の誕生	
リービッヒの実験室	120
ケクレの夢	124
ドイツの化学企業	125
薬学の歴史	127
戦争に利用された化学	128
第 11 章 現代物理学の誕生	
ノーベル賞	132
原子と電子	134
ブルバキの数学	138
シュレディンガーの猫	141
第 12 章 原子物理学と原爆開発	
コンピュータの誕生と発達	144
マンハッタン計画の徹底した秘密保持	148
原爆と日本	150
数学の限界	152
第 13 章 宇宙と自然と科学	
化石の成因	156
進化論の誕生	157
プレートテクトニクス	160
細胞説	162

プロフィール一覧

第1章 ギリシャの自然学

001	タレス	14
002	ピタゴラス	17
003	デモクリトス	18
004	ソクラテス	19
005	プラトン	19
006	アリストテレス	22

第2章 中世の科学

007	アルキメデス	26
008	フワーリズミー	27
009	ハイヤーム	28
010	ビュリダン	34

第3章 中国の科学

011	董仲舒	40
012	張衡	42
013	朱熹	43
014	郭守敬	44

第4章 コペルニクス革命

015	プトレマイオス	48
016	コペルニクス	50
017	ブラーエ	53
018	ケプラー	56

第5章 機械論的自然観

019	ガリレオ	59
020	トリチェリ	60
021	パラケルスス	62
022	ポルタ	63
023	ベーコン	64
024	デカルト	66
025	ホイヘンス	67

第 6 章	ニュートンの総合	
026	ニュートン	70
027	フック	72
028	ハレー	73
029	ライプニッツ	78
第 7 章	化学革命	
030	ベッヒャー	82
031	シュタール	82
032	ボイル	84
033	ブラック	84
034	プリーストリー	85
035	ラヴォアジエ	88
036	ドルトン	90
037	アヴォガドロ	91
第 8 章	数学的実験物理学の誕生	
038	クーロン	95
039	ラプラス	96
040	ゲーリュサック	97
041	フレネル	100
042	エルステッド	101
043	ビオ	102
044	アンペール	103
第 9 章	古典物理学の誕生	
045	ファラデー	108
046	ボルタ	108
047	ケルビン卿	110
048	マクスウェル	112
049	ヘルツ	113
050	マイケルソン	114
051	メンデレーエフ	116
第 10 章	有機化学の誕生	
052	リービッヒ	119
053	ホフマン	122
054	パーキン	122
055	ケクレ	124
056	バイヤー	125
057	エールリヒ	127
058	秦佐八郎	128

第 11 章 現代物理学の誕生

059	アインシュタイン	131
060	キルヒホッフ	133
061	ヴィーン	134
062	プランク	135
063	レントゲン	136
064	ベクレル	137
065	キュリー夫妻	137
066	ラザフォード	139
067	ボーア	139
068	シュレディンガー	140

第 12 章 原子物理学と原爆開発

069	湯川秀樹	143
070	フェルミ	144
071	フランク	150
072	ラッセル	151

第 13 章 宇宙と自然と科学

073	ダーウィン	157
074	ウェーゲナー	159
075	ワトソン	162

編集上の留意点

1. 全体のおおまかな流れは教科書（参考文献3）に準拠した。
2. 人物の表記は必ずしも教科書にはしたがわず，なるべく一般的なものを採用した。
3. 最低限把握すべき重要な内容は本文に集約した。また，それらをさらに簡潔にしたものを各章末にまとめとして掲載した。その他のさらに細かく興味深い内容はコラムやプロフィール内に収録した。
4. 参考文献は，本来なら逐一明記することが望ましいが，本文が文献情報だらけになると読みづらくなるだろうことが予想されるため，巻末にその一覧を付すのみとした。また，掲載した図の出典も巻末に付しておいた。
5. 読者の便宜を図るため，巻末にいくつかの付録と索引を付した。

第1章

ギリシャの自然学

いかなることも、偶然には起こりえない。
— デモクリトス

1.1 ミレトス学派の自然哲学者たち

古代の人々

- * 古代の人々は日蝕や地震などの自然現象を神のお告げだと受け止めた。
ex. 地震・日蝕＝神の怒り, 雷＝ゼウスの武器, 噴火＝ヴルカヌスのしわざ¹⁾ etc.
cf. 「地上の万物はオケアノスとテテュスによって創られた」(ホメロス)
- * 滅多に経験できない珍しい自然現象には、超自然的な理由を用いた説明がなされた。

ミレトスの自然哲学者

- * タレス … ギリシャの政治家, 哲学者。
それまでの自然現象に関する神話的説明に代わり, 自然現象の原因を, 論理的な考察を用いて自然界の中に求めた。著作は残っていない。
→タレス以降, ミレトスで活躍した哲学者の派閥をミレトス学派と呼ぶ。
- * アナクシマンドロス … ギリシャの哲学者, ミレトス学派。
「万物の根源」を意味する原理 (arkhē) という語を哲学に導入した最初の人物²⁾。人類で初めて科学書を書いたとされているが, 現存していない。
- * アナクシメネス … ギリシャの哲学者, ミレトス学派, アナクシマンドロスの弟子。
タレスの一元論を発展させ, ミレトス学派の完成者となる。後の原子論者や自然学者に大きな影響を与えた。虹を神のわざではなく自然現象として説いたことは有名。

コラム 科学史の起源

現在に伝わる「科学の歴史」に関する最古の文献は、新プラトン派の哲学者プロクロスが5世紀に書き著した『プロクロスの摘要』と呼ばれる文章である。これは『ユークリッド原論第I巻の註解』という本の冒頭に付されたもので、ユークリッド以前の幾何学の発展過程が淡々と綴られている。もちろん、そこで行われたのは歴史的事実を場所と時系列の順に記述

1) ヴルカヌスはローマ神話に登場する地底の神。彼は鍛冶屋であり、火山の火や煙はその仕事場から出るものとされた。

2) アナクシマンドロス自身は原理を具体的に提示するのではなく「無限のもの (to apeiron) ^{ト・アペイロン}、無規定のもの (to aoriston) ^{ト・アオリストン}」であるとし、一切の有限者の規定性の根底にあると主張した。

したということに過ぎず、現代の科学史のように1つの学問としての体裁をなすものではないが、見方によっては、科学史の起源は古代ギリシャにあると言うこともできるだろう。

一般に、学問としての科学史は18世紀のヨーロッパで成立したと言われている。しかし、そのヨーロッパでも実に17世紀に至るまで科学の歴史に関する叙述自体がほとんどなされなかったことを考えると、当時のギリシャがいかに先進的であったかを見て取ることができる。

なお、科学史の歴史については著者のブログ『0番染色体』で詳しく取り扱っているので、興味のある読者はぜひ訪れてみて欲しい。

<http://0-chromosome.hatenablog.jp/entry/2015/03/18/195834>

Profile 001 タレス (Thalēs, B.C.624 ~ B.C.546 頃)

古代ギリシャの政治家、哲学者。ピュシオロゴイ（自然哲学者）の先駆者であり、「哲学の父」と呼ばれる。七賢人の一人ともされる。

タレスは原理（^{アルケー}arkhē）を水に求め、他の一切の事物はすべて水より自然に生じると説いた。伝承によれば、天文学を創始したほか幾何学を導入し、「円が直径によって2等分される」などいくつかの定理を発見したという。また、^{プシユケー}霊魂（Psychē）を宇宙全体を動かす原動力と捉えていたらしい。

プラトンは俗事にわずらわされずに研究に没頭する哲学者の典型をタレスに認めたが、アリストテレスはタレスを実際的な才覚の持ち主として紹介している。

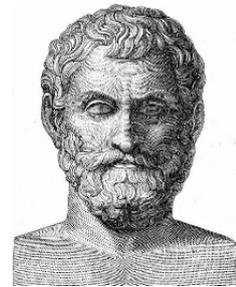


図 1.1 古代ギリシャ

コラム ギリシャの七賢人

前7～前6世紀に、その思想と言葉でギリシャ社会の模範的人物と仰がれた7人の哲学者・政治家をギリシャの七賢人と呼ぶ。最古の七賢人に関する言及はプラトンの『プロタゴラス』に見られ、それ以降4世紀頃までに七賢人に数えられた者は二十数名に及ぶ。紀元前1世紀末の歴史家ディオドロスや2世紀の旅行家パウサニアスによる七賢人は次の通り。

表 1.1 七賢人の一例

名前	活躍都市	立場
タレス	ミレトス	哲学者
ピアス	プリエネ	僭主 ¹⁾
ピッタコス	ミュティレネ	僭主
クレオプロス	リンドス	僭主
ソロン	アテネ	立法者
キロン	スパルタ	民選長官
ベリアンドロス	コリントス	僭主

ここで7という数は七数崇拝に基いており、社会的あるいは政治的な活動や業績において卓越した人物を政治的混乱に悩まされ続けた後世の人々が理想的人物として選定したと考えられている。したがって文献により七賢人は異なっているが、タレス・ピアス・ピッタコス・ソロンの4人はほぼ確定している。七賢人の逸話や格言は、ギリシャ人の精神的支柱として伝承された。

■ 万物の根源の探求

- * ミレトス学派の哲学者たちは原理（^{アルケー}arkhē）と呼ばれる「万物の根源」の探求を行った。
→タレスは水、アナクシメネスは空気、ヘラクレイトスは火が原理であるとした（表 1.2）。
- * 科学者たちは、それまでの神話的説明から離れ、科学的探求を求めた。

表 1.2 古代ギリシャの一元論

名前	万物の根源	主張
タレス	水	物質は蒸気・水・土の三形態で存在する。
アナクシメネス	空気	あらゆる物質は空気の濃度変化によって生じる。
ピタゴラス	数	数は物質的実態として空間的な広がりをもつ。
ヘラクレイトス	火	流転と抗争が万物の根源であり、火はその象徴。

¹⁾ ポリス（都市国家）で貴族と民衆の抗争を利用して、非合法に政権を占有した独裁者。僭主政は古代ギリシャの貴族政と民主政の過渡期に現れた政治体制で、巧みな政策によって民衆を指導しポリスの発展に貢献した例も多い。

1.2 ピタゴラスと彼の弟子たち

ピタゴラスの主な功績

* ピタゴラス … ギリシャの哲学者、数学者。

イタリア南部のクロトンで宗教・政治・哲学を志すピタゴラス教団を作り様々な活躍をした。

◇ 万物の根源は数であると主張。

◇ ピタゴラス音律の発明。

1, 2, 3, 4 の四数で構成される比例関係を活用し、音階の高さを定める。

→ピタゴラスは天文現象や自然界の現象に単純な比例関係や調和的關係を見出そうとした。

◇ ピタゴラスの定理（三平方の定理）の発見。

「直角三角形において、直角である頂角の対辺の長さの平方は他の2辺の平方の和に等しい」ことを発見したとされる¹⁾。

ピタゴラス考案と言われる証明

3辺の長さが a, b, c ($c > a \geq b$) であるような直角三角形を考える。図形の位置を組み替えることにより、下の 図 1.2 と 図 1.3 の黄色い部分の面積は等しい。

$$\therefore a^2 + b^2 = c^2$$

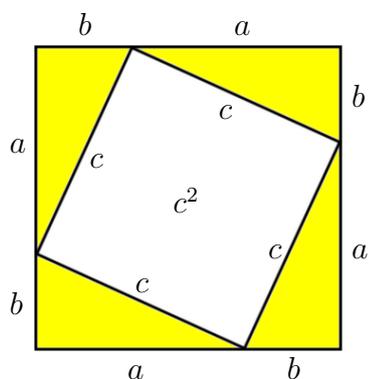


図 1.2 ピタゴラスの定理 (a)

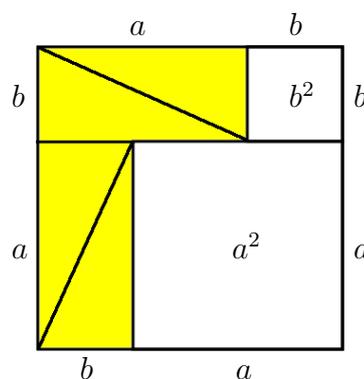


図 1.3 ピタゴラスの定理 (b)

◇ 直角二等辺三角形の斜辺の長さ $\sqrt{2}$ から、無理数と不可共役的な比例関係を発見²⁾。

* ピタゴラス以降の数学的知識は、ユークリッドの『原論』に集大成。

→少数の公理から様々な定理が演繹的に導かれる整然とした体系。

👉 p.26 **コラム** ユークリッド幾何学

* このような知識を対話と論証によって求めていこうとする態度はギリシャ自然学の大きな特徴。

→ギリシャの民主的な体制と深く関わっていると考えられている。

¹⁾ ピタゴラスの発見以前に、古代バビロニアや古代エジプトなどで知られていたとする説もある。

²⁾ 正確には、ピタゴラスの死後に弟子の手によって発見されたと言われている。不可共役量の存在は「万物の根源であるはずの数では表せない量がある」ことを意味するため、発見した弟子はピタゴラス教団の刺客によって暗殺され、この事実は永く秘密に付されたなどとする伝説も存在するが、信憑性はない。

Profile 002 ピタゴラス (Pythagoras, B.C.624 ~ B.C.546 頃)

古代ギリシャの哲学者、数学者。生涯と学説は確証しがたい。

18歳のとき、オリンピックのレスリングで賞を得た。ピタゴラスはエーゲ海に浮かぶサモス島の出身で、タレスのもとに学んだと言われる。その後、エジプトやバビロニアを訪れてバビロニア数学の知識も得た。エリスとスパルタで教鞭をとったあと、40歳でマグナ・グラエキアに移住した。その地のクロトン（今のイタリア南部）で宗教・政治・哲学を志すピタゴラス教団を設立した。ピタゴラス教団の人々は、魂の輪廻の理論と数は万物の根源であるという信念をもつことで最もよく知られている。教団の人々は神秘主義と数占いに多くの時間を捧げる一方、規則的な幾何学的パターンに点を配置することによって、多角数を初めて描写した。恐らく、彼らは模様を描くのに小石を用い、そうすることで多角数の基本的な性質を導いていた。不幸なことに、彼らは数の神聖化という強迫観念に取り憑かれていたために聖アウグスティヌスを刺激してしまい、利益を得るために様々な虚言を繰り返していた者たちと数学者を同一視させるきっかけを作ってしまった。

三平方の定理をはじめ三角形の内角の和が2直角に等しい証明、正五角形の作図法、大地の球形説提唱など数々の功績がピタゴラスに帰せられている。また、ピタゴラス音律を発明し、すぐれた音楽家であったとも伝えられている。



コラム ピタゴラス音律

3:2の周波数比の関係にある音程をもとに紀元前500年頃に作成された音律は、鍛冶屋で互いに響き合って快い音色を出すハンマーの音を聞いたピタゴラスによって発案されたという伝説があり、これをピタゴラス音律という。

この音律はディトノスと呼ばれる不協和音を有しているため現代では平均律に取って代わられているものの比較的完成度が高く、平均律ともかなり近いことは表1.3からも明らかであろう（なお、centというのは半音の1/100を表す単位）。

ここではこれ以上細かな音楽論について触れることはしないが、ピタゴラス音律に関してより専門的なことに興味のある読者は参考文献15などを読んでみるとよいだろう。

表 1.3 ピタゴラス音律

階名	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Ti
対 Do 比	1	9/8	81/64	4/3	3/2	27/16	243/128
Do との差 (cent)	0	204	408	498	702	906	1110
La との差 (cent)	-906	-702	-498	-408	-204	0	204
平均律との差 (cent)	-6	-2	2	-8	-4	0	4

1.3 パルメニデスの難問

パルメニデスの哲学

- * パルメニデス … ギリシャの詩人、哲学者、エレア学派の代表。

パルメニデスの難問

ものは〈ある〉か〈あらぬ〉かのどちらかである。〈ある〉ものはどこまでもあり、〈あらぬ〉ものはどこまでもあらぬ。〈あらぬ〉ものは知ることも語ることもできない。

→生成・消滅・変化・運動を否定、変化一般の不可能性を主張。

パルメニデスの影響

- * エンペドクレス … ギリシャの哲学者、宗教家、政治家、シチリア人。
自然界には火・空気・水・土の四元素（^{リゾーマタ}rizomata）が存在し、それら自体は変化しないがそれらが組み合わされることで自然界の多様な存在が生み出されると主張。
- * デモクリトス … ギリシャの自然哲学者。
自然界の物質はそれ以上分割できない存在である原子（^{アトモン}atomon）で構成されており、原子それ自体は永遠に変化しないが、位置や組み合わせが変化すると主張（原子論）。
→彼の主張は一見パルメニデスの難問に応答しているように見えるが、問題があった。

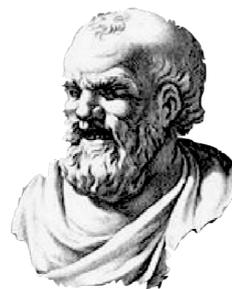
原子論の欠陥

不変な存在である原子と原子の間に何があるのか？ そのすき間には、原子が存在しない。原子が運動し配置を変えるには、すき間が必要。すき間はいかなる原子も存在しない真空のはずである。この真空が〈あらぬ〉ものに相当するが、〈あらぬ〉ものが〈ある〉というのは、矛盾している。

Profile 003 デモクリトス (Democritus, B.C.460 ~ B.C.370 頃)

古代ギリシャ最大の自然科学者。師レウキッポスが唱えた原子論を大成させた。トラキアの出身だが、オリエントを旅行し、学問は多方面にわたる博識者だった。快活な性格であったと言われ、「笑う哲学者」とも呼ばれる。

万物の根源は等質不変で分割不能な原子（^{アトモン}atomon）であるとし、原子はすべて同質であるが、形や大きさとその配列が異なることにより、異質で多様な物質ができると説いた。



1.4 アリストテレスの自然学体系

ソクラテスのパルメニデスに関する解答

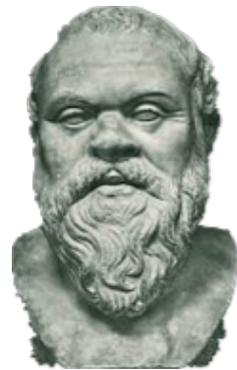
- * ソクラテス … ギリシャの哲学者。著作は残っていない。
- * プラトンの著作『パルメニデス』において、目に映る世界の背後に存在するアイデア (idēe) が不変の世界として存在すると解答。
cf. プラトン … ソクラテスを敬愛し、その著作のほとんどが彼を中心とする対話篇。

Profile 004 ソクラテス (Sōkrátēs, B.C.469 ~ B.C.399)

ギリシャの哲学者。主にアテネで活動し、その生涯を善性の探求に捧げた。前半生についてはほとんど何もわかっていないが、後半生(特に晩年)はプラトンやアリストテレスらによる記述から知られる。著作は残されていないため、その学説は主としてプラトンの対話篇によって伝わっている。

アリストテレスは学問の基礎としての帰納法と概念的定義を打ち立てたことをもってソクラテスの二大功績と認めている。

ソクラテスは問答により相手の無知を自覚させる方法でソフィストらを批判し、客観的真理の存在と知徳の合一を説いた。しかし、彼の努力はアテネの市民に受け入れられず、70歳のときにアニュトスらに告訴されて死刑判決を受け、毒を仰いで死亡した。

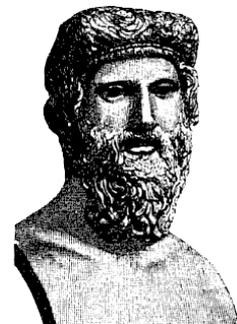


Profile 005 プラトン (Platōn, B.C.428 ~ B.C.347)

古代ギリシャの哲学者。アテネに生まれ、若い頃からソクラテスと交流を持った。最も正義の人と信じていたソクラテスの不条理な死と、当時の政治情勢に対する失望から哲学の道に入ったとされる。

プラトンの功績の第一は学問における方法の重要性の認識とその確立であり、第二はこの方法を基礎とした形而上学と倫理学の確立である。また、存在論的には感性的世界と思惟的世界を区別するアイデア論を形成し、ソフィストに対抗した。

彼は、諸国を旅する中で数度にわたってイタリアやシチリア島を訪れ、ピタゴラス教団とも接した。アテネに戻ったのちは学園アカデメイアを創立し、真に理想国家の統治者たるべき人材の養成を図った。



コラム ソクラテス以前の哲学者

ソクラテスが「哲学の方向を自然の研究から倫理的なものへと転じさせた」という見方は哲学史では極めて一般的である。そのため初期ギリシャ哲学（B.C.600～B.C.400頃）に属する哲学者たちは一括してソクラテス以前の哲学者（Pre-Socratic Philosophers）と呼ばれる。

彼らの共通点としては、世界およびその内部ではたらく力の起源と現状を合理的に説明しようとしたことが挙げられる。

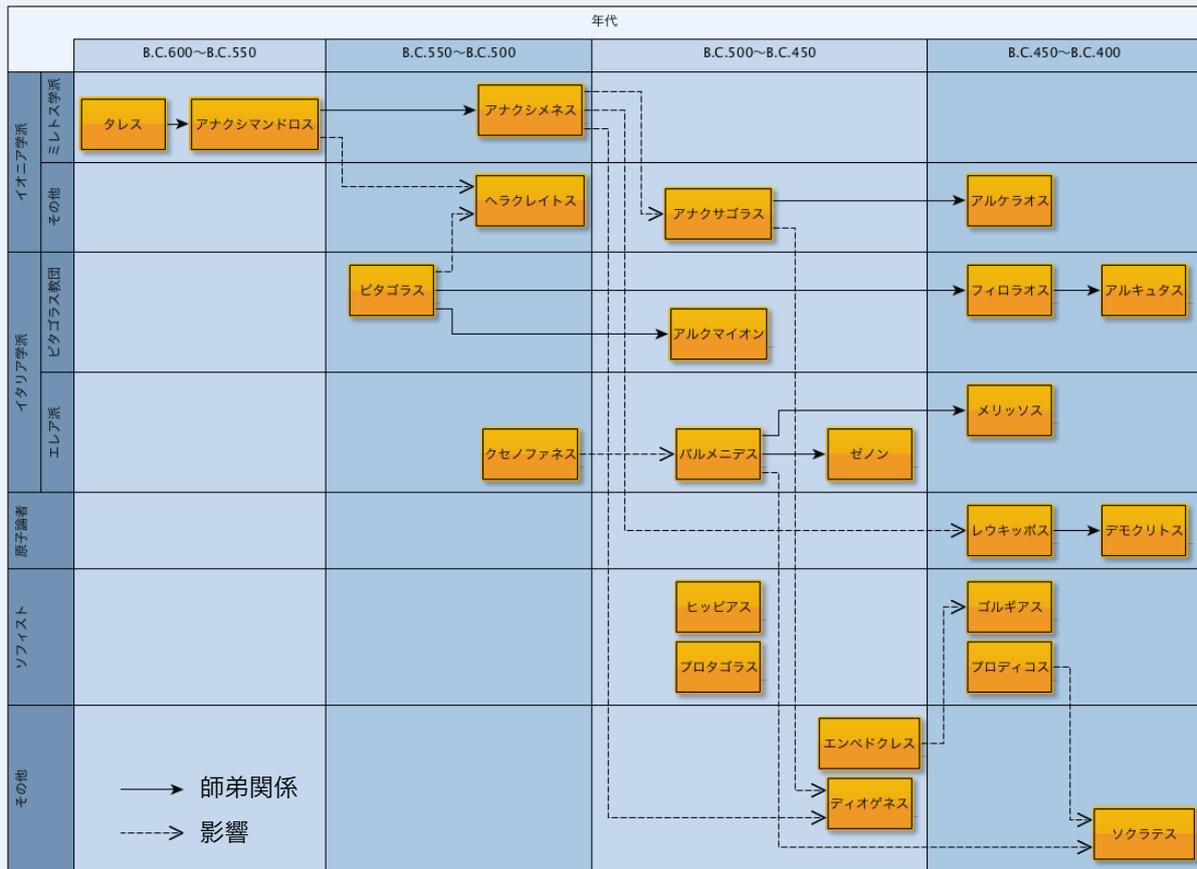


図 1.4 ソクラテス以前の哲学者の系譜

■イオニア学派 イオニアは小アジアの海岸に位置した古代ギリシャの植民地で、先進のオリエント文明の影響を受けて文化が発達し、哲学発祥の地となった。この地から出た哲学者たちをイオニア学派と呼ぶ。中でも、存在するものの普遍的本質を追求し、原理から諸元素が導出されるという一元論を構成したタレスに端を発する一派はミレトス学派と呼ばれる。

■イタリア学派 イタリア半島南部を拠点とする古代ギリシャ哲学の一派がイタリア学派である。イオニア学派が専ら感覚に依拠した議論（自然哲学）を行ったのに対し、イタリア学派は数学や論理に依拠した議論（数理哲学）を行ったことを特徴とする。

イタリア学派は2つの大きな勢力を含む。1つはピタゴラスが創設したピタゴラス教団で、清浄な生活と学問の研鑽を目的とし、厳しい戒律と固い団結を有していたと言われる。もう

1つはエレア学派で、存在のあらゆる有限な規定性や変化を否定し、無規定で変転しない純粹な存在のみを認める一元論を唱えた。

■ソフィスト 前5世紀頃から、アテネを中心として当時のギリシャ世界を遍歴し、授業料を取って百科全書的学識一般、特に弁論術を教授する知識人たちが現れるようになった。彼らを総称してソフィストと呼ぶ。ソフィストの弁論術は何よりも説得を目的とするものであったため、客観的真理の問題や倫理的価値の基準などは顧みられない傾向にあった。

■ アリストテレスの哲学

- * アリストテレス…ギリシャの哲学者。プラトンの愛弟子。アレクサンドロス大王の教師。
- * 学問の対象となる知識を、以下の2種類に分類した¹⁾。
 - ◇理論的知識：神学、数学、自然学（第二哲学）etc.
 - ◇実践的知識：倫理学、政治学etc.
- * 物質は四元素（火・空気・水・土）からなると考えた。
→それぞれの元素に本性があるとした。ex. 土の本性：地球の中心に向かうこと
- * 変化は可能態（デュナミスdynamis）から現実態（エネルゲイアenergeia）への移行であると主張。
 - ◇可能態：未だ目に見える形では存在していないが、
いつか目に見える形で現れる能力が備わっている状態 ex. 少年の髭
 - ◇現実態：姿が目に見える状態
- * 変化を量の変化・質の変化・位置の変化の3種類に分類した。このうち、位置の変化（運動）はさらに次の2種類に分類された。
 - ◇自然運動：自然の本性にしたがう運動
 - ◇強制運動：外部の力により、自然の本性に逆らって行われる運動

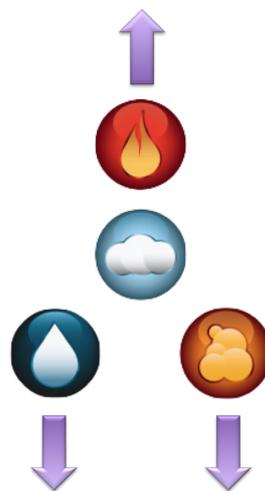


図 1.5 物質の本性

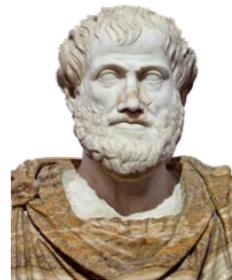
¹⁾ アリストテレスは数学は〈不変のもの〉を対象とする学問、自然学は〈変化するもの〉を対象とする学問と考えていた。したがって、「数学の物理学への応用」といったことはアリストテレスの自然学体系においては認められなかった。

Profile 006 アリストテレス (Aristotelēs, B.C.384 ~ B.C.322)

ギリシャの哲学者。マケドニアの出身で、17歳のときにアテネのアカデメイアでプラトンに学んだ。その後、一旦マケドニアに帰り、アレクサンドロス大王を教育した。B.C.335に再びアテネに戻ってきてリュケイオンを設立、逍遥学派を始めた。

アリストテレスは政治、文学、倫理学、論理学、博物学、物理学などほとんどあらゆる学問領域を対象として分類および総括を行った。特に、動物の分類と発生学的研究は優れているとされる。一方で、重力を否定したり、デモクリトスの原子論に反対したりするなど、物理的学説などには実験を伴わなかった欠陥が現れている。数学面では、形式論理学を大成して初等幾何学にみられる三段論法をほぼ完成させた。

その著作としては一連の哲学的考察をまとめた『形而上学』や諸ポリスの国制研究の一端をなす『アテネ人の国制』などがある。



コラム 古代ギリシャの教育機関

古代ギリシャにおける青少年の教育については、ポリスによる干渉はまったく存在せず、各家庭か私立の学校に依存して行われていたという説もあるが、一部の資料には公立学校が存在していたことを示す記述もあり、少なくとも初歩的な教育を行う公的機関は広く分布していたと考えられている。当時の初歩的な教育というのは、読み書きや音楽、体練術あるいは社会生活を送るための道徳教育などがその中心にあったようである。また、教育には当然各ポリスの特色を表しているものも含まれ、例えばスパルタでは軍事訓練に重きが置かれていたということは有名であろう。

一方、古代ギリシャには一部の偉大な科学者らによって創設され、より高度な教育を実施する機関も存在し、特に以下のようなものがよく知られている。

■アカデメイア B.C.387にプラトンによってアテネの西郊外に開設された。哲学を中心として数学や音楽、天文学を重視した高度な教育が行われ、アリストテレスを始めとする数々の偉人を輩出した。529年にローマ皇帝ユスチニアヌスに解散を命じられるまで約900年間も存続した。

■リュケイオン B.C.335にアリストテレスによってアテネのアポロ・リュケイウス神殿の近くに設立された。アリストテレスは歩廊ペリパトスを歩きながら弟子たちと哲学や学問に関する議論をしたと伝えられており、そのためにアリストテレスらの学派をペリパトス学派や逍遥学派と呼ぶ。アカデメイアと同様、ローマ皇帝ユスチニアヌスの命により6世紀に閉鎖された。のちに“リュケイオン”は多くの国で学校を指す用語として用いられるようになった。

1.5 アリストテレスの宇宙論

地上と宇宙の物質

- * 地上の物質は四元素の組み合わせで生成されると主張。 cf. エンペドクレス
- * 一方、生物は四元素と何種類かの^{プシュケー}靈魂（Psyche）から成ると考えた。
 - ◇ 植物＝植物的靈魂（成長を司る）
 - ◇ 動物＝植物的靈魂＋動物的靈魂（知覚と運動を司る）
 - ◇ 人間＝植物的靈魂＋動物的靈魂＋理性的靈魂（精神活動を司る）→後に、植物・動物・人間の間でプシュケーの区別は基本的にはないと思なすようになった。
- * 宇宙を構成するものは、第5元素エーテルであるとした。

宇宙像

- * アリストテレスは「月蝕の際、地球の影が円形に映る」ことや「水平線の向こうからやってくる船はマストから姿を現す」ことから地球が球形であることを認識していた。
- * 宇宙は、地球の周りを取り囲む55の天球から成ると考えた。
 - その構成要素がエーテル（本性は円環的運動）であるとした。

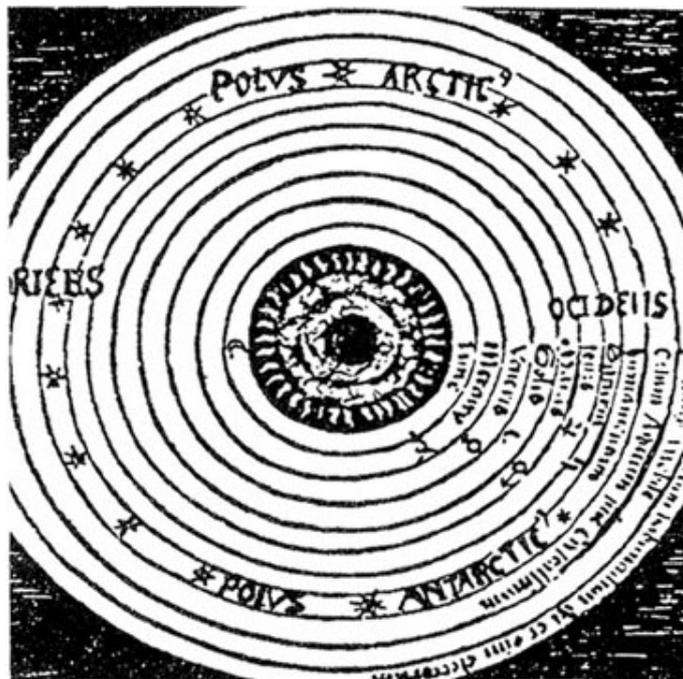


図 1.6 アリストテレスの宇宙像

第 1 章のまとめ

- (1) 古代の人々は自然現象を神話的に説明したが、ギリシャの自然哲学者たちは万物の根源アルケー（原理）を定め、合理的（科学的）に説明しようとした。
- (2) パルメニデスは「〈ある〉ものはあり、〈あらぬ〉ものはあらぬ」（パルメニデスの難問）として、変化一般の不可能性を主張。
- (3) パルメニデスの難問が後世に与えた影響は大きく、多くの哲学者が回答を試みた。
- (4) アリストテレスは次のようなことを考えた；
 - ・ 物質は四元素から構成されている。生物の場合はこれに霊魂が加わる。
 - ・ 四元素には本性が備わっている。運動には自然運動と強制運動がある。
 - ・ 学問は理論的学問と実践的学問に分けられる。
 - ・ 天球が地球の周りを囲んでおり、地球と天球の間にはエーテルが存在する。
 - ・ 地球の外部には別の世界はない（世界の単一性）。

第2章 中世の科学

生きる、それは自分の運命を発見することである。
— アルキメデス

2.1 古代ギリシャの自然科学の発展

古代ギリシャの自然科学

- * 古代ギリシャにおける自然哲学はエジプトの都市アレクサンドリア¹⁾で発展した。
- * アレクサンドリアにムセイオンという図書館兼研究所が設立され、ギリシャ各地の書物の蒐集や歴史・科学の研究が行われるようになる。
→ユークリッド（エウクレイデス）の大著『原論』やプトレマイオスの『アルマゲスト』などが模範的な教科書として登場。

表 2.1 古代ギリシャの科学者たち

名前	主な業績
アリストタルコス	ピタゴラス派の地球回転説を支持し、地動説（太陽中心説）を唱えた。
アルキメデス	アルキメデスの原理としてこの原理を発見した。
エラトステネス	地軸の傾きや子午線の長さを正確に測定した。地図や暦の作成も行った。
プトレマイオス	アレクサンドリアで天文観測を行い、天動説を展開（☞ 4.1 節）。
ヒッパルコス	地球から月までの距離を計算。また、恒星の等級を決定。
ヘラクレイデス	地球回転説を支持。太陽をめぐる金星や火星の運行を記述。
ユークリッド	19世紀まで初等幾何の標準的な教科書とされた『原論』を著した。

ギリシャ自然哲学の衰退

- * ローマ人は科学や哲学よりも実用的な技術²⁾や医術を重視した。
→手を使う作業を卑下し、議論と思索に基づく学問を重視したギリシャ人とは対照的。
- * 紀元前1世紀頃から、ローマ帝国が地中海世界を支配するようになる。
→ギリシャ自然で生まれた自然科学の研究は停滞、やがて衰退していく。
- * ローマ帝国の没落後は、哲学と科学研究の中心が東に移っていった。
ex. コンスタンティノープル、シリア、アラビア etc.

¹⁾ アレクサンドロス大王は B.C.334 ~ B.C.323 にかけて各地に同名の都市を建設しているが、ここでのアレクサンドリアはエジプト遠征直後の B.C.332 にナイルデルタの西端に建設された都市、ヨーロッパと東方との海上交易の中心地として発展し、ギリシャ・ローマ時代を通してローマに次ぐ大都市として繁栄した。

²⁾ ローマの先進技術としては、コンクリートの発明や大規模な建造物あるいは上水道などの建築技術などが有名。

コラム ユークリッド幾何学

ユークリッドの『原論』では、冒頭で23個の定義と5つの公理、そして5つの公準が述べられ、これらを出発点として幾何学の議論が展開されている。それらの公理や公準に基づく幾何学を一般にユークリッド幾何学という。

今日しばしば「幾何学の公理」と呼ばれているものは、『原論』における5つの公準にあたり、具体的には次のような内容である。

1. 2つの点は線分で結ぶことができる。
2. 線分は直線にいくらでも延長できる。
3. 任意の点を中心とした任意の半径の円を描くことができる。
4. 直角はすべて互いに相等しい。
5. 2つの直線 l, l' が他の直線 l'' と交わってできる交角 α, β が $\alpha + \beta < 180^\circ$ を満たすならば、 l と l' とは交角 α, β のある側に延長すると必ず交わる。

5番目の公理は後世、論議の的となったが、この公理を満たすものをユークリッド幾何学、満たさないものを非ユークリッド幾何学と呼んで区別される。

一方、5つの公理は「全体は部分よりも大きい」など数学全般に成り立つ命題である。

これらの公理系には不備があり、ドイツの数学者デイビット・ヒルベルトは19世紀にその不備を補い完全な公理系の上にユークリッド幾何学を構築した。しかし、それまでに知られていた幾多の定理を、こうした限られた数の公理・公準から論証によって証明し、一つの巨大な論証体系にまとめ上げたユークリッドの功績は大きく、後世の科学者の良き手本となった。

Profile 007 アルキメデス (Archimedes, B.C.287 ~ B.C.212 頃)

古代ギリシャの数学者、発明家。当時、学問の中心的都市であったアレクサンドリアに学んだのち、帰郷してシラクーザ王ヒエロン2世の保護の下で研究に勤しんだ。

入浴中に浮力に関するアルキメデスの原理を発見し、「エウレーカ、エウレーカ（発見した、発見した）」と叫んだという伝説や、この原理を発見した際に「我に支点を与えよ。されば地球をも動かさん」と述べたという言い伝えはあまりにも有名である。

幾何学においても、円周率の値が $220/70$ と $223/71$ の間であることを示したほか、曲線で囲まれた図形や曲面の面積を取り尽くし法で計算し、様々な定理を発見している。

さらに、アルキメデスは軍事技術においても優れており、第2次ポエニ戦争では彼が考案した反射鏡や起重機がローマ軍を大いに苦しめ、シラクーザの陥落には3年を要した。しかしついにシラクーザが陥落したとき、ローマ兵により殺害され、その人生を終えた。



2.2 アラビア科学

代数学

- * アル・フワーリズミー… アラビアの数学者，天文学者，インド数学をイスラム数学に導入。
 - ◇代数学の書『アル・ジャーブルとアル・ムカーブルの書』を著したことで知られる。
 - アル・ジャーブル：方程式の両辺が正になるように移項する操作。
 - アル・ムカーブル：同類項を集めて整理する操作。
 - 三部構成：①代数学，②幾何図形に関する代数的方法，③遺産配分法¹⁾
 - ◇アル・フワーリズミーはアルゴリズム (algorithm, 算法) の語源であり，アル・ジャーブルはアルジェブラ (algebra, 代数学) の語源である²⁾。

Profile 008 フワーリズミー

(Muhammad ibn Mūsā al-Khwārizmī, 780 ~ 850 頃)

フワーリズミーはアラビアの数学者，天文学者，780年頃バグダートで生まれたと言われるが，その生涯について詳しいことはわかっていない。アッバースのカリフ・マームーンの宮廷に占星術師として仕え，初等代数学とインド・アラビア記数法に関する書物を著した。前者はバビロニア，ヘレニズム，ヘブライおよびインドの数学の影響を受けており，実用的な主題を扱っている。12世紀にラテン語に訳され，その表題の一部“al-jabr”からアルジェブラ（代数）という言葉が生まれた。

この他，彼は天文表も作成しており，彼の天文学書にはアラビア語による最初の正弦表と正接表が記されている。



シリア・ギリシャ文献の翻訳

- * アル・マームーン… アッバース朝のカリフ。
 - バグダードに知恵の館を設立し，シリア・ギリシャ文献の翻訳を命じる。
- * これらの翻訳された学術文献をもとに，数学・天文学・医学・哲学など各領域で独創的な研究を行う科学者がアラビア世界に登場（表 2.2）。
 - こうした流れは，学問に関心をもつ支配者の登場に起因して始まった。
- * イスラム世界はギリシャ語を使用する地域を支配下において，ギリシャで発展していた学問を積極的に利用したが，ヨーロッパでは哲学がキリスト教に合わないと言われ，ギリシャ文化は排斥されがちだった。

¹⁾ イスラム教では，コーランの教えにより親族への遺産配分の仕方が明確に規定されており，それを厳密に履行する必要があった。

²⁾ 「アル〇〇」という形をもつカタカナ語にはアラビア語由来のものが多い。 ex. アルコール，アルカリ，アルファルファ etc.

表 2.2 アラビア科学の主な業績

学問分野	内容
数学	三角関数に関する公式発見（後に天文学に応用）。インドから数字・十進法・0 の概念が伝来。
医学	イブン・シーナー（アヴィセンナ）が『医学典範』 ¹⁾ を著す。
化学	錬金術（アルケミー）が誕生し、化学的知識を蓄積。
哲学	イブン・ルシュドがアリストテレス哲学の注釈書完成。
地理学	モロッコ出身のイブン・バットゥータが『三大陸周遊記』を著す。
天文学	暦法や航海技術が発達 ²⁾ 。オマル・ハイヤームがジャラーリー歴を作成。

コラム アラビア人の名付け方

アラブ世界の人々の名前には元来は「姓」というものがなく、本人名の後に父名・祖父名を列記するのが基本である。相手が王族や首長一族の場合には、父名、祖父名の前にそれぞれ「息子」を意味する bin, ibn あるいは ben などを入れて親子関係を表すこともある（民間人の場合にはこのような表記法が使われる例はそれほど多くない）。また、女性の名前の場合は、本人名と父名の上に「娘」を意味する bint を入れて親子関係を表す（これも主に王族や首長一族の場合）。部族制であるアラブ社会では、部族名やそれから派生した氏族名に定冠詞“al”をつけて父祖名の後におき、出身部氏族を明らかにすることも少なくない。これは、特に大部族や名門氏族の出であることを示す場合に多く使われる。

また、アラブの国々では結婚して男児が生まれた人に対し、生まれた子供の名前を使って、たとえば「スライマーンの父親」(Abu-Sulaiman) や「サイードの母親」(Umm-Said) などと呼ぶことがごく一般的に行われる。

なお、本人名・父名・祖父名を列挙するのがアラブ人名構成の基本であるが、それではしばしば長くなり過ぎてしまうので、日常の用に際しては祖父名を省略することが多い。祖父が著名人である場合には、祖父名を残し父名を略すこともある。

Profile 009 ハイヤーム (Omar Khayyám, 1048 ~ 1131 頃)

オマル・ハイヤームはペルシャの詩人、科学者。在世中は詩人としてより科学者として著名で、セルジューク朝の保護を受けて天文学分野で活躍し、グレゴリオ暦をも凌ぐ正確さをもつジャラーリー暦の制定に参加した。一方、余暇にペルシャ語で詠んだ四行詩集『ルバイヤート』が19世紀中頃にイギリスの詩人によって評価されて以来、世界的に最も有名なペルシャ詩人という地位も築いた。



¹⁾ 古代ギリシャ・ローマの医学者であるヒポクラテスやガレノスの医学理論を解説。中世ヨーロッパで医学の教科書として利用される。

²⁾ 「祈りを捧げる時間と方向を定めたい」「洋上での位置認識をしたい」という動機が暦法や航海技術の発達を後押しした。

2.3 12世紀ルネサンス

アラビアで継承発展されたギリシャ学問

- * 十字軍・東方貿易・レコンキスタ・ビザンツからの亡命者などの影響で12世紀の西ヨーロッパで農業生産量が増大し、都市が経済的・文化的に活況を呈す。
→ゴシック様式が流行、学問の教育と研究を行う大学が各地に誕生。
- * スペインのトレドやシチリアのパレルモでアラビア・ギリシャ語文献のラテン語翻訳が進む。
→イスラム世界からヨーロッパ世界へ科学的知識が伝わっていった。 cf. 大翻訳時代

表 2.3 12世紀ルネサンスで活躍した翻訳者たち

名前	出身地	主な訳書
ヘラルド	クレモナ	プトレマイオス『アルmagest』(アラビア語)
ヘルマン	カリンティア	ユークリッド『原論』(アラビア語)
アデラード	バース	フワーリズミー『天文表』(アラビア語)
ロバート	チェスター	フワーリズミー『代数学』(アラビア語)
ジャコモ	ヴェネチア	アリストテレス『分析論』(ギリシャ語)



図 2.1 12世紀のアラビア世界とヨーロッパ世界の境界地域

大学

- * 大学は多くが教会や修道院の附属学校であったが特許状によってギルド的な自治が行われた¹⁾。
- * ラテン語の文献（写本）を教科書として使用。
- * 専門学部 … 神学部・法学部・医学部の3つ。
 - ◇ 神学部：キリスト教神学の研究。
ただし、神学の主張はアリストテレスの哲学を使って論証されることが多かった。
 - ◇ 法学部：ユスチニアヌス法典（ローマ法大全）の研究が中心。
各地域で実際に運用されている法はあつかわれなかった。
 - ◇ 医学部：ヒポクラテス・ガレノスなど、ギリシャ・ローマの医学書が講義された。
- * 学芸学部 … 現在の教養学部のようなもの。専門学部への進学準備。
 - ◇ 学生は自由学芸七科と呼ばれる基礎科目を学んだ。
 - 言語に関する3科目：文法・修辞学・論理学
 - 数学に関する4科目：算術・幾何学・音響学・天文学
 - ◇ 特に論理学は上級学部である専門学部で議論を進める際に用いられた作法や形式をその内容としていたため、重視された。

当時の議論の進め方

1. ある問題の提示。
2. それに対する第一の解答の提示。
3. その内容の吟味・論駁。
4. さらに、第二・第三の解答を吟味・検討・論駁。
5. 最後に自分の解答を提出。



図 2.2 ボローニャ大学における 1350 年代の講義風景

¹⁾ 例えばボローニャ大学は、教師と生徒が神聖ローマ帝国内に、学問上の理由で旅をする場合、どの地を訪れても皇帝の保護下に置かれるなどの特権を有した。

コラム ヨーロッパ中世の大学

中世ヨーロッパにおいて、大学とは学生と教師の団体のことであった。したがって、当時の大学は校舎をもたず、教会の施設などを借りて授業をした。また、団体の在り方も様々で、例えばボローニャ大学は学生団体が強力で教師を雇うというかたちをとったのに対し、パリ大学では教員団体が強力で学生が教師に弟子入りするというかたちをとった。

表 2.4 中世以前の大学略史

年号	出来事
972 年	エジプトで最古の大学アズハル大学が完成
1076 年	イタリアでサレルノ大学が設立（医学部が有名）
1119 年	イタリアでボローニャ大学が設立（法学部が有名）
1150 年	フランスでパリ大学が設立（神学部が有名）
1167 年	イギリスでオックスフォード大学が設立
1158 年	フリードリヒ 1 世がボローニャ大学に初めて特許状を与える (ローマ教皇もすぐにこれに倣った)
1224 年	フリードリヒ 2 世がナポリ大学を自ら創設
1229 年	ローマ教皇がトゥルーズ大学を創設

■学生 当時の大学生には 20 歳前後の人が多かったが、現在でいえば中学生くらいの年齢から 50 代まで様々な年齢の学生がいた。また、女性が大学に入学できるようになったのはずっと後のことであり、当初は男子学生ばかりであった。入学試験はなかったが、誰でも入れるものではなく、最低でもラテン語ができる必要があった。当時はそもそも初等教育という制度がなかったため、大学に入学が認められた学生は、裕福な家に生まれ、家庭教師からラテン語を学んだ者や、貧しい家に生まれ教会などが慈善活動の一環としてつくった塾でラテン語を学んだ者たちであった。13～14 世紀の大学の学生名簿を調べた学者によると、おそらく約 20 %が貧しい家の出身、20～40 %が聖職者の家庭出身、残りは富裕な市民や一部は貴族の家庭出身であったという。大学でマイスターやドクトルなどの資格を取ると、貴族と同様のあつかいになったため、中世の大学は貧しい人々の上昇移動の通路になっていた。

当時の学生たちは借家で共同生活をするのが多かったため、地元の篤志家が学生たちのために家屋を無料で開放することもあった。こうした学生の共同生活の場はコレギウム (collegium; college の語源) と呼ばれた。入学試験はなかったが、学位を取るのは大変困難であった。今日のように、4 年間で必要な単位を取れば卒業という考え方はなく、学位論文を書き、公開の口頭試問を受け、出席した教授全員の投票でドクターやマイスターなどの教授資格が認められることが所謂“卒業”に相当した。熱心な学生でも卒業するまでに 6～8 年はかかったという記録もある (学位にまで到達する学生は 1/10 もいなかった)。

■教師 大学が設立され始めた当初の大学教員は、学生からの月謝で生計を立てていた。その後、市や領邦国家が自分たちの大学をつくるようになると、給料制が普通となり、市や領邦国家の予算で教員が採用されるようになった。また、授業は正講義と副講義に分かれており、週に 1 回、教授による正講義がおこなわれ、これには学生は必ず出席しなければならな

かった。正講義の内容をわかりやすく解説するために、副講義がおこなわれていたが、これはバチラーと呼ばれる学生から選ばれる教師見習いが担当した。

■就職 大学にとどまって教師になる学生以外は、法学部からは当時の都市や国家の官吏や法律家、神学部からは聖職者、医学部からは都市や国家の医師（医官）になった。ただし、医学部の学生の就職口は案外少なかったと言われる。これは中世社会では、民間では、ギリシャの医学を修めた医師よりも、理髪師や産婆などが兼業した民間医療の方が信用されていたからである。

学位を取れなかった学生にも貴族や富裕な市民の秘書・執事・家庭教師などの就職口があった。ラテン語が公用語の社会で、ラテン語が使える、学識のある学生にはそれなりの需要があったようだ。

2.4 アリストテレス哲学 vs キリスト教神学

アリストテレス著作群の普及

- * アリストテレスの翻訳文献は、学芸学部で教科書として重宝される。
ex. 『分析論』『自然学』『天体論』『生成消滅論』 etc.
- * しかし、読解が進むにつれアリストテレス哲学とキリスト教神学の教義との間に齟齬が発生。
→哲学者と神学者とが異なる見解を持ち、それぞれ異なることを生徒に教え始める。

哲学者と神学者の対立

- * アリストテレス哲学者とキリスト教神学者の反目はパリ大学で激化していった（表 2.5）。
- * エチエンヌ・タンピエが219の「誤った」命題を選定（タンピエの^{けんせき}譴責）。
→それらの命題を主張した者は教会から破門されることになる。
→「哲学は神学の婢」となった。

表 2.5 対立の経過

年号	出来事
1210年	パリ大学でアリストテレスの著作の購読が禁止される
1255年	アリストテレス著作の購読禁止が一旦解除される (以後、対立が深刻化)
1270年	13の命題がキリスト教に反する「誤った」命題として選定
1277年	タンピエの譴責

■ タンピエの譴責

- * パリ司教エチェヌ・タンピエが教皇ヨハネ 21 世の命で神学者と協議して選定。
- * 譴責された主な自然科学的命題には次のようなものがあった。
 - ◇ 真理の二重性 … 哲学者は自然的原因，神学者は超自然的原因に基づき議論をする。
→ 神学の真理と別の哲学的真理が存在するはずがない。神学的真理が真理である。
 - ◇ 世界の永遠性 … 世界が永遠に存在し続けること。
→ 聖書には神による天地創造と最後の審判が明記されている。したがって、世界が過去から将来にわたって存在し続けるはずがない。
 - ◇ 世界の単一性 … 神は複数の世界を創造できないこと。
→ アリストテレスによれば、地球を中心とする「地球系」の外側には世界が存在しない¹⁾。
しかし、神は絶対的能力をもっているので、世界の外に別の世界を創造することもできる。
 - ◇ 神による天体の直進運動の不可能性 … 神は天体を直進運動させることはできない。
→ アリストテレスによれば、天体が直進運動するとその後は真空になるが、彼は真空を否定していた。しかし、神は全能だから、その気になれば天体を直進運動させることも、真空を生み出すこともできる。
- * キリスト教の教義に反する命題とともに、神の絶対的能力を制限する命題も否定された。
- * タンピエの譴責は哲学者の知的活動の^{たが}箍となるが、逆にアリストテレス哲学を超えるきっかけを与えるものでもあった。

コラム 科学史とキリスト教

中世以降、キリスト教はヨーロッパ全体に広まり、その歴史に大きな影響を与えてきた。これは科学史についても例外ではなく、キリスト教は科学にも絶大な影響をもたらしてきた。

まず、初期のキリスト教は少なからず科学の発展の妨げとなった。そもそもキリスト教が広まってからの 1000 年間は、多くの人々がまもなく世界は終焉を迎えると信じており、天地万物がどのように動くかといった研究が行われる雰囲気ではなかった。また、キリスト教の人生観では、現世についての知識は死後の生の助けにならないと考えられていたことも科学の発展を抑制した。すべての自然の成りゆきは神聖な目的を持っているとする聖アウグスティヌスの教えは、こうした自然観に強く影響を及ぼし、象徴や寓意が自然現象を説明するために利用された。その結果、科学は異教と結び付けられ、テオフィロス司教によるアレクサンドリアの図書館の破壊やキュリロス司教による数学者ヒュパティアの殺害を引き起こした。一方、医学はキリスト教徒たちが病人を助けることは義務だと考えていたため、こうした暗黒時代にもある程度の進歩を続けた。特に、9 世紀のサレルノにおける医学教育は高度であり、中世後期における科学の復興につながった。

その後もキリスト教は、タンピエの譴責やガリレオの宗教裁判、進化論の攻撃などで知られるように科学の進歩を抑制するようにはたらしめたが、一方で率先して科学研究を推進した事実も多く、促進・抑制の両方向に強い影響を及ぼした。

¹⁾ 宇宙の中心に向かって自然運動する「土」や「水」の運動方向が決定できなくなるから (⇒ 1.4 節)。

2.5 タンピエの譴責以降の自然学研究

ジャン・ビュリダンの自然学

- * ジャン・ビュリダン… パリ大学学芸学部教授。講義ノートが後世に伝えられる。
- * 講義ノート『自然学問題集』で「神は真空を作れる」と主張。
→タンピエの譴責の枠組みを逸脱することなく、アリストテレス哲学を精緻化する。
- * 一方、ビュリダンの議論の中には、アリストテレス哲学の弱点を見事に突く論題もあった。

飛んでいく石の孕む問題

石を投げるとき、手に持って速度をつけている最中は強制運動を受けている。しかし、手から離れて飛んでいくとき、石は自然運動しているのか、強制運動しているのか。前者の場合、石はまっすぐ下に落ちていく。強制運動の場合、石を運動させているものは何なのだろうか。

- ◇アリストテレスの解答：前方の空気が後方に回り込み、物体を後ろから押しやり。
- ◇ビュリダンの反論：砥石はごろごろ回転するが、空気に押されているわけではない。
先端も末端も尖った槍を空気は押すことができるのか。
→ビュリダンはインペトゥス（勢い）という概念を提唱。
「インペトゥスとは、磁石によって鉄に込められた性質が鉄を磁石の方に動かすといわれるように、そのインペトゥスが込められた物体を動かす本性をもつ性質である。」
石が投げられたとき強制運動させる動力源は、手から石に込められたインペトゥスであると主張。アリストテレスの基本概念を保持したまま、新しい概念を提示。
cf. 近代力学の「慣性」の概念（☞6.2節）

Profile 010 ビュリダン (Jean Buridan, 1300 頃 ~ 1358)

フランスの哲学者。1328年および1340年にパリ大学の学長を務めた。穏健な唯名論者で、1340年に極端なオッカム主義の断罪に寄与した。精緻な論理学研究を展開し、また自然学の分野でも優れた研究を残した。

力学ではインペトゥスの概念を導入して近代力学への道を開いたとされる。生涯を通して学芸学部で活躍し、アリストテレスのほとんどすべての著作について〈注解〉や〈問題集〉を著したが、唯名論的な傾向のために一時期禁書となった。

また、ニコル・オレームやザクセンのアルベルト（等速運動とそれ以外の運動の区別した）のような逸材を育成し、後にパリ学派と呼ばれる学統の創始者となった。



1) このような「ある性質の強度は、相反する性質に取り囲まれた結果として増強され得る」とする駆動方式をアンチベリスタシスと呼んだ。

- * 講義ノート『天体・地体論問題集』で地球の自転について言及。

地球は自転している

地球よりはるかに巨大な天球が回転していると考えるより、地球の方が回転し天球が静止していると考えの方が妥当ではないのか。

→しかし、結局「地球は静止している」と結論。

その他の自然学

- * トマス・ブラッドワーディン… オックスフォード大学神学教授。cf. オックスフォード学派
 - ◇ 運動の速度は動力と抵抗の比で決まるとするアリストテレスに理論を数学で巧みに表現。
 - ◇ 「一様に一様でない運動」（等加速度運動）に関する規則を発見する。
- * 中世哲学者による自然学研究は、タンピエの譴責という籜をはめられ、厳格にキリスト教神学という枠内に制限されながら、アリストテレス自然学における問題点を細部まで検討し、その自然学体系を乗り越えてさまざまな可能性を考察し、加えていく豊かさをもっていた。

コラム ヨーロッパ中世の技術革新

ヨーロッパ中世の社会では、古代ギリシャ以来の自然科学が衰退してしまった一方で、奴隷制の廃止と商業発展に伴う職人の発生により、技術の面では著しい発展を遂げた。水車や歯車、風車などの装置は古代の間に発明されたものであるが、これらのものが大規模に使用されるようになったのは中世になってからのことである。

11世紀、イギリスがイングランドにはおよそ5,000の製粉所があったと言われている。ここでは、樹皮を砕いたり皮を^{なめ}鞣したりするのに水車が用いられた。やがて水車は、鍛冶場のハンマーやふいごを動かすのにも利用されるようになった。鉄鉱石を還元するための溶鉱炉も大型化した。これにより数種類の炭素鋼や鑄鉄が生産されるようになったようだが、科学発展の遅れていた当時のヨーロッパでは炭素含有量の正確な意味が理解されることはなかったらしい。また、農業分野では1000年頃に鉄製の^{すきざき}鋤先が用いられるようになった。農業の効率化が進むにつれて農業生産量が増加するようになるとヨーロッパの富は増大していくことになり、商業はますます発展していった。

工学や建築などの技術もローマ帝国時代以来の大成長を遂げた。石材を用いた大規模な構造物を建造する技術が培われると、その後何世紀にもわたって発展することになる中世の大寺院が建設された。こうした技術は、市民の利用する公会堂や橋のような公共構造物にも応用されていくことになった。

なお、こうした技術の多くは中国においてより早い時期から技術の進歩が進んでいたとされている（詳しくは次章で扱う）が、実際にどの発明が中国から伝播したものであるのかを判別することは、多くの場合不可能なようである。

第2章のまとめ

- (1) 9世紀のアラビアはフワーリズミーを筆頭に数々の科学者を輩出。
- (2) 知恵の館を中心に、シリア・ギリシャ文献のアラビア語翻訳が進められた。
- (3) アラビアで探求されたギリシャ学問は、十字軍・東方貿易・レコンキスタなどによって西ヨーロッパ世界に流入した。
- (4) トレドやパレルモなどでアラビア語文献のラテン語翻訳が進められた。それらは優れた教科書としてヨーロッパの大学で使用された。
- (5) 大学での議論が進むうちにアリストテレス哲学とキリスト教神学の間には齟齬が生じる。
→タンピエの譴責で以下の命題が詰責される。
真理の二重性、世界の永遠性、世界の単一性、神による天体の直進運動の不可能性。
- (6) ジャン・ビュリダンはいんぺとゥスの概念を提唱し、アリストテレス哲学に対抗した。

第3章 中国の科学

謂ふなかれ、今日学ばずとも来日ありと。
— 朱熹

3.1 中国科学の特徴と概念

中国科学の特徴

- * 中国科学では、特に天文学が発達していた。
 - ◇天文台で天文現象の観測を行い、正確な暦を作成。
 - ◇一方、中国では宇宙構造についての議論はほとんどなされなかった。
→宇宙構造の解明を目指したヨーロッパ科学とは対照的。
- * 中国では天文学以外にも古来から多くの科学技術が萌芽したが、それらはいくまでも実用的な次元での探求に留まり、それ以上の形而上的考察はほとんど行われなかった。
- * ヨーロッパ科学は中世において低迷したが、中国科学は近代まで持続的に成長した。

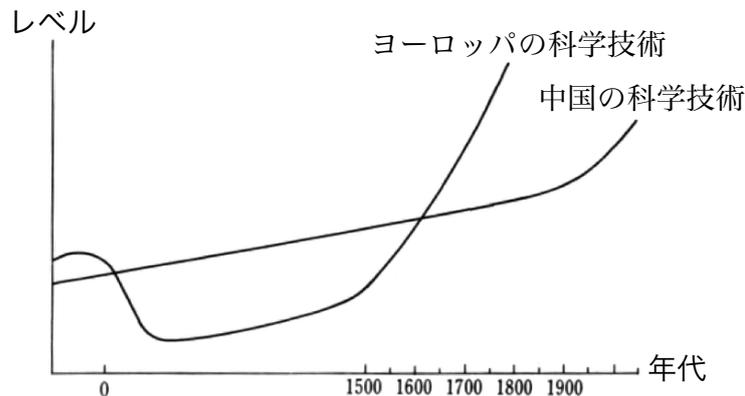


図 3.1 ニードム・グラフ

自然の基本的なとらえ方

- * 中国では、古来より独特の世界観が浸透していた。
- * 陰陽五行説 … 陰陽説と五行説が結合した中国特有の世界観。天文学や医学に影響を与えた。
 - ◇陰陽説：宇宙の現物事象を陰と陽の働きによって説明する二元論。
 - ◇五行説：万物の根源を木火土金水の五元素におく自然論的歴史観。
- * 気 … 物の存在、活動などを説明する中国哲学上の概念¹⁾。
古代の中国哲学は人間の生死や生物の四季に応じた盛衰変化を水蒸気や人間の息に類比される極微な物質“気”の集散によって説明しようとした。

¹⁾ ここでは新字体で「気」と表記しているが、本来は「气」と書き、水蒸気をかたどった文字である。この概念自体は非常に複雑でわかりにくいものであるため、本書ではあまり深く立ち入らないことにする。

コラム 陰陽五行説と八卦説

中国の陰陽説と五行説は、宇宙万物の本質を解釈しようとした最初の試みと密接な関係があると言われている。すなわち、それらは殷や周の時代に醸成を開始した。その後、封建制が成立する戦国時代に入ると、陰陽説と五行説はほぼ完成をみることになる。こうした素朴な唯物主義の自然観は古代の唯物主義哲学の基礎であると同時に、古代自然科学理論の礎ともなっていた。

西周の時代の末期には“気”の思想が誕生した。これは、物質は“気”からなると主張し、陽気と陰気の対立矛盾がを用いて自然現象を解釈するものである。例えば、天気は陽気に属しており、上昇する性質をもつ。これに対して地気は陰気に属し、沈降する性質をもつ。これらの陰陽二気が上下に対流することによって、万物が生成するとされた。古代の中国人たちは、この陰陽二気が調和しなければ、自然界に災異が発生すると考えていたらしい。周の時代に三川と呼ばれる地域（現在の陝西省中部）で大地震が起こったが、これは「陽気が正しい地位を失って、陰気に閉じ込められた」結果であると説明された。

一方、五行説に関する詳しい論述は『尚書』の洪範篇などに見られる。それによれば、五行とは第一に水、第二に火、第三に木、第四に金、第五に土であるという。そして、水は「ものを潤す」性質（潤下）、火は「燃え上がる」性質（炎上）、木は「曲げたり直線状にしたりできる」性質（曲直）、金は「形が変化する」性質（従革）、土は「植物を育てる」性質（稼穡）を持つなどとされていたようだ。また、五行説は単に“元素”を論じるのみに留まらず、例えば味覚については、潤下の味は鹹（塩からい）、炎上の味は苦（にがい）、曲直の味は酸（すっぱい）、従革の味は辛（からい）、稼穡の味は甘（あまい）などと関連付けられていた。

なお、五行説はしばしば西洋の四元素説などと比較されるが、その特徴は“金”を五行のうちに含めていることだという。このことから、当時の中国では金属が人々の社会生活の中で重要な役割を演じていたことがうかがい知れる。実際、西周時代の人々は金・銀・銅・錫・鉄などを広く利用していたと考えられている。五行説の“金”はこれらの金属を抽象化した概念であり、こうした例は世界でも他に類を見ない。

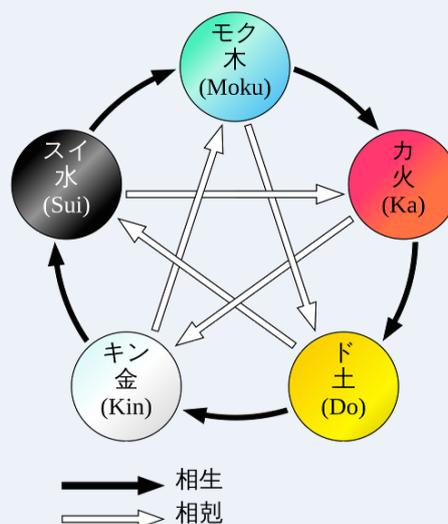


図 3.2 五行説

ところで、中国では陰陽五行説の発展と同時に、八卦説も登場する。これは西周の時代に誕生したものであるが、その後も長きにわたって発展し続けた。この八卦とは8つの記号、すなわち乾☰・坤☷・震☳・巽☴・坎☵・離☲・艮☶・兌☱のことをいう。この8つの記号はそれぞれ天・地・雷・風・水・火・山・沢を象徴し、陰と陽の二爻の3重の排列から成り立っている。八卦を上下に重ねることによって六十四卦を作ることができ、この六十四卦は各卦六爻から成ることから計三百八十四爻である。この六十四卦三百八十四爻に基いて森羅万象を解釈するのが八卦説（易学）である。八卦説は、陰と陽の異なる排列によってあらゆるものを構成し、陰と陽の排列の変化によって万物の変化を導くという思想を内包している。

3.2 中国における天文学とその発展

■ 暦の作成

- * 中国において、天文学は暦の作成と密接に関わりながら発展。
 - 天文観測は国家事業であり、暦法は重要な法典とみなされた¹⁾。
 - ◇太陰太陽暦：季節を一巡する1年と、月の満ち欠けに対応する1ヶ月との組み合わせ。
 - ただし1年が12ヶ月ではやや短いため、13ヶ月の年を適宜挿入する。
 - ◇置閏法：19年に7回、閏月を設ける。紀元前5～6世紀頃に確立。
 - また19年という周期を“1章”と数えることから章法とも呼ばれる。
 - のち5世紀にはさらに改良され、破章法²⁾と呼ばれるようになった。
- * 前漢以降、日蝕・月蝕・五星の運行が暦に併記されるようになる。
 - 暦法の1年や1ヶ月が農業に結びつくのに対し、これらは占星術と結びつく。

表 3.1 主な中国暦

暦名	王朝	採用年	特徴
三統暦	前漢	前104年	現代に伝わる最古の中国暦。1年を365.25016日とする。
乾象暦	後漢	223年	月の遅疾に関する知識が暦の計算に取り入れられた。
景初暦	魏	237年	日蝕や月蝕の開始時刻の推算法が確立された。
大明暦	宋	510年	391年に144の閏月をおく破章法が採用された。
大業暦	隋	597年	日蝕に関する予測精度が向上した。
麟徳暦	唐	665年	はじめて進朔を導入。日本では儀鳳暦という名で67年間使用された。
大衍暦	唐	729年	中国僧一行が作成。吉備真備によって日本にも輸入され、約100年間使用された。
宣明暦	唐	1136年	唐代では大衍暦に並ぶ優れた暦とされる。日本では823年間使用された。
授時暦	元	1281年	王恂や郭守敬らが作成。歴代の中国暦法の中で最も精密優秀と言われる。
時憲暦	清	1645年	中国最後の公式な太陰太陽暦。西洋天文学の知識を取り入れて作成。

¹⁾ そのため、皇帝代替りの際にはしばしば改暦が行われた（太陽暦採用までに48回）ほか、属国では中国の暦が強制的に施行された例もある。

²⁾ 章法にはかかわらず、太陽年と朔望月の長さを独立に定める方式。

コラム 日本の暦

暦は中国から朝鮮半島（百済）^{くだら}を通じて飛鳥時代の604年に日本に伝来したと言われている。その後、暦は朝廷が制定し、大化の改新（645年）で定められた律令制では、中務省^{なかつかさ}に属する陰陽寮がその任務にあっていた。そして平安時代以降、暦は賀茂氏、天文は安倍氏が世襲で担当することになる。日本の暦も太陰太陽暦であったため、暦の制定は極めて重要な意味をもっており、江戸時代に至るまで国家権力によって厳重に管理された。

このように当局によって制作された暦には、季節や年中行事、日ごとの吉凶などの情報が付加された具注暦（のちに簡略化された仮名暦なども登場）という形で配布され、明治時代に太陽暦が施行されるまで人々に活用されていた。

占星術

- * 天人合一説…天と人とは道を媒介にして一つながりであるとする中国の世界観の1つ。
→董仲舒は『天人感応論』で、人には天が投影していると主張。
- * 天人相関説…天と人との密接な関係があり、相互に影響を与え合っているとする儒教思想。
古来より、中国では「天界の現象は地上の人間社会の在り方や行く末を反映しており、天体を観察することにより人間社会の予兆を占うことができる」と考えられていた。
cf. 「天は象を垂れ吉兆を表す」「仰ぎて天文を観て、屈んで地理を察する」（『易経』）
→占星術は、特に春秋戦国時代の乱世に重要視された。
- * 中国において占星術¹⁾は国家の行く末を占う重要な行事であった。
→占星に関する情報は国家機密として扱われた。

Profile 011 董仲舒 (Dong Zhongshu, B.C.176 ~ B.C.104)

前漢中期の代表的儒学者。孔子の流れを汲む公羊学を修め、景帝のとき博士となった。次代の武帝が儒教による教学体制を整える際には賢良対策を献じ、中国2000年の官学の方法を定めたとされる。こうした董仲舒の政術は樹下の仁義・礼制の文化主義に則っていた。

彼は、宇宙の秩序の根本を「天」に求め、自然現象は陰陽二元の気の交錯によって起こり、社会現象は自然変化に同類感応するものとして、これを現実の政事の決裁や時務にも応用した。ただし、董仲舒のこうした神学は人々の自然法則への探求心を押さえ込み、科学技術の発展を著しく阻害した。



¹⁾ 英語では、訳語が「占星術」となる単語が2つある。中国における占星術はこのうちのアストロロジーにあたるものである。

① ホロスコープ (horoscope) : 個人の出生の期日や時刻からその人の運勢を占う

② アストロロジー (astrology) : 社会全体の運勢に関わる天界の出来事を占う

■ 素朴な宇宙論

- * 中国における古典的な宇宙論は主に以下の3つであった。
 - ◇ 蓋天説：平面の大地の上に、天蓋が傘のようにして覆っている。
 - ◇ 渾天説：天空は球場であり、その中央に水に浮かぶ大地がある。
 - ◇ 宣夜説：天には形体というものがなく、虚空である。
 →いずれにしても、ギリシャ人の宇宙認識に比べれば素朴なもの。
- * 張衡… 後漢の文学者、科学者。渾天儀を発明。渾天説を説いた『靈憲』を著す。
- * 梁の武帝は学者を集め、両者の優劣を討論させる（6世紀）。
 - 学者は渾天説を支持したが、皇帝が自らの信じる蓋天説を最終的に擁護。
 - 以降、宇宙論をめぐる論争は不毛なものとして学者たちはみなすようになる。

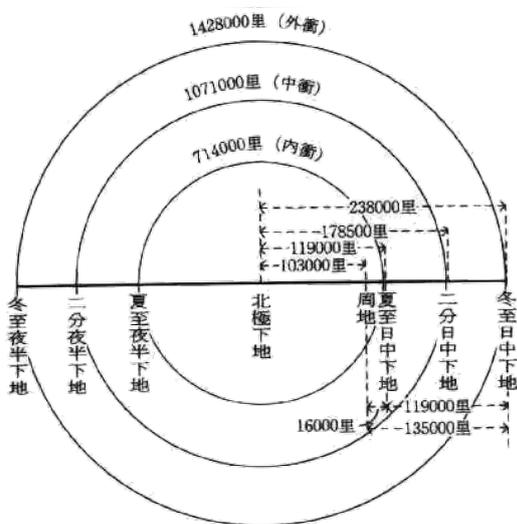


図 3.4 蓋天説

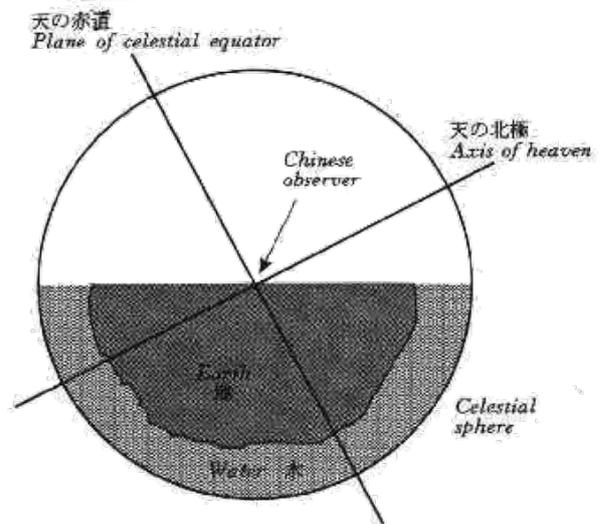


図 3.5 渾天説

Profile 012 張衡 (Zhang Heng, 79 ~ 139)

後漢の文学者、科学者。南陽郡西鄂県に生まれ、安帝に召されて郎中となり、侍中から河間相となって治績をあげ、のちに尚書に移ってまもなく没した。

科学のみならず広く学問に通じており、若い時から特に文名が高かった。10年の歳月をかけて作った『西京賦』『東京賦』や『思玄賦』などの詩で知られる。地理学の研究も行ない、地形図を制作している。この地形図は数百年にわたって利用された。

天文・暦算にも詳しく、再度にわたって太史令を務めた。天体観測に用いる道具、渾天儀以外にも候風地動儀と呼ばれる今日で言う地震計のようなものも発明した。また、円周率について研究し、 $\pi = \sqrt{10} \approx 3.162$ を採用したことも知られている。



* 朱熹 … 朱子学を大成した南宋の儒学者。宇宙構造の探求も行う。

朱熹の宇宙論

1. 地球の周りにいくつかの天球が存在
2. 気という物質が天を構成し、それが高速で回転して9つの層を形成
3. 陰陽五行説が通底

Profile 013 朱熹 (Zhu Xi, 1130 ~ 1200)

南宋の儒学者。宋以降の中国および日本の思想界に圧倒的な影響を及ぼした。地方官としての治績にも優れたものがあるが、本領はあくまでも壮大な理気の説をもとにしたその思想にある。すなわち、程顥・程頤・張載などの北宋道学を集大成し、人性論や道德論はもちろん、宇宙論までもを覆う理気の思想を完成させた。

朱熹の宇宙論では、宇宙天地に貫徹する一理があるとし、それを「無極而太極」（無極であるとともに太極）とし、太極の運動が陰陽二気を発動させ、五行に展開して世界を形成するとした。理は一つのみで物質的な気にも貫徹しており人間もこの体系の中にいるが、人間は心性をもつことで他の存在とは区別されるものであり、理の視点から見ると心は性と情に分けられると説いた。



コラム 候風地動儀

張衡の活躍した後漢中期には比較的大きな地震が頻発したため、彼は地震にも強い関心を寄せ、世界で最初の地震計・候風地動儀を発明した。その内部には都柱という倒立型の振り子が格納されており、地震が発生すると周囲の八龍のうちの一つの口が開いて小銅珠が蛙の口へと落ち、大きな音を立てて観測者に地震発生 の時間と方向を知らせる。



図 3.6 候風地動儀

授時曆

- * 朱熹の考える造曆の在り方は次のようであった。
 - ◇ 精密な天体観測に基礎づけられるべき。
 - ◇ 自然の理¹⁾の究明に基礎づけられるべき。
 - よって、天文台での精緻な観測が肝要とされた。
- * 南宋から元に改曆の勅令が下る。
 - 委員会結成。この委員会に朱熹の弟子や孫弟子が加わった。
- * 郭守敬… 委員会に加わった朱熹の弟子の一人。都水監²⁾。数学に秀でた官僚。
 - ◇ 郭守敬は次のようなことに挑戦した。
 - ① 正確な天文観察器具の製作（渾天儀などの改良、ノーマンの建設）。
 - ② 冬至の日時の正確な決定
 - ③ 太陽と月の不均一な運動に対して、補間法を採用。
 - ④ 新しい数学的技法の利用。
- * こうして、1280年に新曆授時曆が誕生した。
 - 授時曆は翌年から正式に施行され、全国に300万部頒布された。
- * 様々な技術や組織が結集された曆法は、近代以前の中国科学最大の成果。

Profile 014 郭守敬 (Guo Shoujing, 1231 ~ 1316)

元の科学者。水利と算術に秀で、水利工事を多く引き受けて1271年に都水監に就任する。彼は唐来渠や漢延渠の修復など重要な水利工事も担当し、見事な成果を上げた。こうした事業の中で現代でいう「海拔」の概念をはじめて考案したと言われている。水利事業を行う中で郭守敬が行った地形測量の中には、現在の学者も賞賛するような精度のものも含まれている。



1276年以降、王恂らと共に改曆事業に従事し、授時曆の完成に貢献した。なお、授時曆は当時の中国に伝わってきたばかりであったイスラム系天文、曆法の影響や刺激を受けて作成されたものであり、彼が独自に開発した簡儀や仰儀など13種の儀器を始めとする諸装置にもアラビア天文学の影響が見られる。

また、郭守敬は天文観測家としても名高く、恒星位置の観測や大規模な測地事業も組織した。すなわち、北京や成都など27の地点に観測所を設けて当地の緯度を測量し、西沙諸島から北極圏付近まで10度ごとに観測所を設けて夏至の日影の長さや昼夜の長さを測量した。さらに、一連の天文定数についても精密な測量を行ったことで知られる。

郭守敬はその生涯に多くの書籍を著し、『授時曆経』『立成』『転神選択』『上中下三曆注式』等を上進した。一方、郭守敬自身の業績は『元史郭守敬伝』などに記録されている。

¹⁾ 今日概念でいう「パターン」。宇宙万物の本性・性質のことを指す。

²⁾ 河川、港湾、堤防、運河など水利事業に関わる一切を管轄する役職。五監の一つ。

3.3 三大発明と遠洋航海の禁止

三大発明

- * 中国科学において、製紙法・火薬・羅針盤の発明は三大発明¹⁾と呼ばれる。
→いずれも、ルネサンスの頃までには中国から西洋へと伝わる。
- * こうした発明は、高度に発達した中国の科学技術の象徴と言える。

コラム 紙の発明

中国の正史『後漢書』に「蔡倫が麻や魚網、樹皮から紙を製作して時の皇帝に献上し、褒め称えられた」という主旨の記述があることから、紙は長らく 105 年に蔡倫の手で発明されたと考えられていた。しかし、現在では紙は前漢時代から存在し、蔡倫はその改良者であるというのが通説となっている。

その蔡倫が改良した製紙法はおおよそ次のようなものであったと考えられている。

1. 原料（麻など）を切り刻み、流水の中で洗う。
2. 草や木片を燃やし、その灰を濾して灰汁を採る。
3. はじめに処理した原料を灰汁の中で煮る。
4. 石臼で搗き、繊維を水洗いする。
5. 繊維をかき混ぜ、紙料液（原質）を得る。
6. 紙漉き器で紙料を漉きあげる。
7. 乾燥させ、紙漉き器から引き剥がす。

こうした製紙法は中国からイスラム世界へと伝わり、12 世紀以降にヨーロッパへ広がってその後の世界に大きな影響を与えることになった。

遠洋航海の禁止

- * 鄭和… 明の宦官、武將、イスラム教徒。
大船団²⁾を組織し、アラビア半島やアフリカ東岸に計 7 回渡航。
→ヨーロッパに半世紀ほど先駆けて「大航海時代」が幕を開けたかに見えた。
→しかし、1436 年に海洋渡航用船舶の建造が禁止され、大航海は中止される。
- * 遠洋航海が禁止された主な理由は、以下のようであると言われている。
 - ◇ 鄭和をめぐる派閥争い。cf. 鄭和はムスリム
 - ◇ 国内の運河網の発達により海上輸送の必要がなくなった。
 - ◇ 軍事的脅威は辺境地域にあり海軍に力を入れる必要はなかった。

¹⁾ ジョゼフ・ニーダムはこの 3 つに印刷技術を加えて、四大発明と呼んだ。

²⁾ 宝船と呼ばれた大型の商船（長さ 150m、幅 62m）約 60 隻で構成され、乗員も二万数千人に上った。

第3章のまとめ

- (1) 中国における天文学は、暦の作成や占星術という実学的応用のために行われた。
- (2) 天文学研究は国家政策として行われ、天文学者や占星術師は官僚機構に組み込まれた。
→民間人による天文学研究は禁止され、天文学研究の成果は国家機密であった。
- (3) 中国には蓋天説（大地は平面）や渾天説（大地は球状）などの素朴な宇宙論があった。
→梁の武帝が学者の意見を無視して自らの支持する蓋天説を主張。
→結局、中国では蓋天説が定着。それ以降学者たちは宇宙論の探求を放棄。
- (4) 朱熹は宇宙論を考察。陰陽五行説に基づき、“気”が宇宙を構成しているとした。
- (5) 郭守敬は様々な技術や知識を結集し、授時暦を作成した。

第4章 コペルニクス革命

太陽の運動と見えるものは、じつはすべて地球の運動である。
— ニコラス・コペルニクス

4.1 プトレマイオスの天文学

コペルニクス以前の天文学

- * 17世紀までの西洋天文学はアリストテレスの同心天球説の問題点¹⁾を修正したプトレマイオス天文学（＝幾何学的天文理論）とアラビア天文学を軸としていた。
- * これらは天文学の教科書『サクロポスコ』で扱われ、大学で講義されていた。

プトレマイオス天文学

- * 惑星は順行（西から東）と逆行（東から西）を繰り返す²⁾がその理由は長い間謎であった。
→プトレマイオスは主著『アルマゲスト』において、円を巧みに組み合わせることで説明。
- * 周転円・離心円・エカントという3つの新たな幾何学的概念を提示。
 - ◇周転円：地球を中心とする導円上を動く一点を中心とする円軌道（周転円）上に惑星が存在。
 - ◇離心円：地球が円軌道の中心の位置からずれている。
 - ◇エカント：離心円の中心に対して地球と対称な点をエカントと定義。
→エカントに対して離心円の軌道上を惑星や周転円の中心が等しい角速度で回転するとした。
- * しかし、プトレマイオスはエカントの論的根拠や周転円の科学的機構については言及せず。
→彼にとって、天文学は星の位置を説明し、予測するための“道具”に過ぎなかった。

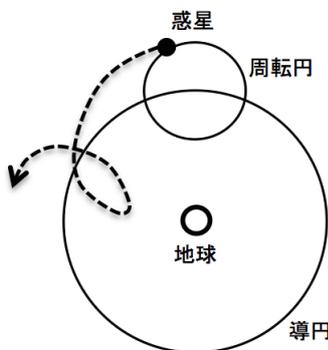


図 4.1 周転円

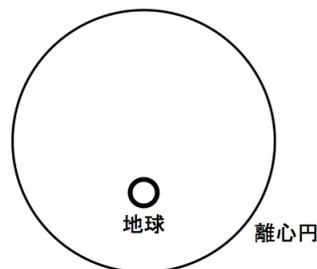


図 4.2 離心円

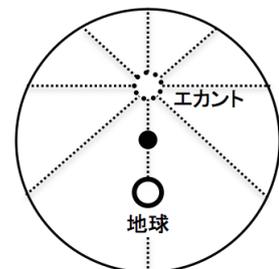


図 4.3 エカント

¹⁾ 古代ギリシャの時代から天体と地球の距離が一定でないことは知られていたが、同心天球説でこれを説明することは不可能であった。

²⁾ もともと惑星という言葉は、このように「彷徨う星」であったことから作られたものである。

Profile 015 プトレマイオス (Claudius Ptolemaeus, 83 ~ 168 頃)

2 世紀頃に活躍したギリシャの天文学者、数学者、地理学者、占星術師。英語圏ではトレミーとも呼ばれる。アレクサンドリアで天文観測を行い、彼以前の天文学研究の集大成『アルmageスト』を著した。この本は以降何世紀にもわたって天文学の標準的な教科書として使用され「トレミーの 48 星座」が定着するきっかけとなった。また、ヒッパルコス星表を改良して 1000 以上の恒星を含む星表を作成した。



一方、幾何学者としても優れていたとされ、三角法の研究や精密な弦の表の作成、射影幾何学、空間の次元論、平行線公理などの研究で知られている。特に、「トレミーの定理」には彼の名が残されている。

さらに、地理学者としての業績には大著『地理学便覧』から知られており、地中海沿岸諸国各地の経緯度を定めた地図を作成したほか、地図の円錐射影法や天体観測に基づく補正法などを示し、後世に長く影響を与えた。

その他にも光の屈折理論を扱った光学研究や力学の研究、さらには音楽の研究に至るまで幅広い分野で業績をあげたとされている。

コラム インドの科学

インド文明は、その宗教的な性格のために、科学の発達は世界の他の地域と比べてそれほど目立たない。しかし、インドの学問は 3 つの分野で卓越している。それは、言語学・数学・天文学である。

仏教哲学によれば、宇宙は一定の周期で破滅と再生を繰り返す。インド数学はこの宇宙的サイクルの思想とヒンズー教の教えから影響を受け、比較的早い時期から極めて大きな数字に対して関心を寄せることとなった。したがって、インド数学は代数的なものとなり、特にバビロニア代数の影響を強く受けた。一方で、幾何学にはほとんど関心が払われなかった。インド人は数の表現にゼロを含む 10 進法を発明し、全世界に影響を与えたことはよく知られている。

古代インドの天文学は主として暦の計算に関わってくる。暦計算は初期には宗教的な儀式のために必要とされ、太陽と月の運動を基礎としたものであった。惑星の運動についてはそれほど関心が払われなかった。後に、バビロニアや古代ギリシャの理論が伝わるようになり、インド天文学に影響を与えた。

また、インドでは医学も早くからの発達を遂げていた。紀元前 3 世紀には病院や薬草園が存在したとされている。インド医学は病気の治療を行うのみならず、その予防や衛生などもその根幹をなしていた。健康は、空気・火・水という 3 要素のバランスで維持されるものと考えられ、人体について言えば、呼吸・胆汁・粘液がそれらに該当した。こうした考えは、当時の西洋医学の四体液説とも通じる部分がある。

4.2 コペルニクスの地動説

コペルニクスによる地動説の発見

- * ニコラウス・コペルニクス … ポーランドの天文学者、地動説の研究を行った。
- * スウェーデンのウプサラ図書館に『ウプサラ・ノート』と呼ばれる研究ノートが残されている。
 - ◇ウプサラ・ノート＝アルフォンソ表¹⁾＋三角関数表＋白紙 16 枚
 - ◇15 枚目の裏に各惑星の運動を表現する数値が記されている。
 - － 上段：各惑星の離心円と周転円の大きさ。
 - 離心円の上に周転円を 2 つ重ねあわせた構造。
i.e. イブン・アッ・シャーティルの惑星運動論を改造した宇宙像。
 - － 下段：各惑星に対して離心円の大きさが一定に揃えた状態で周転円の大きさを計算。
 - 各惑星の円軌道の中心が、それぞれ地球から一定の離心値だけ離れた同一の位置（ここに太陽があると推定）に置かれる。
i.e. 惑星を引き連れた太陽が地球の周りを回転する宇宙像（地動説に近づく）。
- * コペルニクスは地動説にたどり着く以前にプトレマイオスの天文学を深く研究し、それを基礎として地動説という理論を導き出した²⁾。
- * 1510 年、コペルニクスは地動説に基づいて惑星の運動を解説した『コメンタリオルス（要項）』を著し、興味をもった天文学者らの間で写本により広まる。



図 4.4 16 世紀の北ヨーロッパ

¹⁾ 13 世紀に、カスティール王アルフォンソ 10 世の命によって 11 世紀に作成された天文表（表 4.1）、惑星の位置が正確に記されている。

²⁾ コペルニクスは当初、エカントをなくして古代ギリシャで理想とされた一様円運動のみから天体の運動を説明しようと試みていた。

Profile 016 コペルニクス (Nicolaus Copernicus, 1473 ~ 1543)

ポーランドの天文学者、行政官、司祭。クラクフ大学とボローニャ大学、さらにパドバ大学に学び、当時存在したほとんどすべての学問を修め、教会法で博士の学位を取得した。イタリア滞在中にルネサンスの新プラトン主義思想の息吹に触れ、古典学や天文学に関心を抱くようになったとされる。また、医学の知識もある程度身につけた。



ギリシャやローマの古典を通じて、イタリアでの学生時代より太陽中心説の着想を得ていたと言われるが、生涯をかけてその数学的精緻化に努力を重ねた。宗教上の懸念もあり、有名な地動説を述べた『天球回転論』の全編が刊行されたのは彼の死の直前の1543年のことであった。

18世紀の哲学者カントは、発想を180度変えることによって物事の新たな曲面が切り拓かれることを比喩的に「コペルニクスの転回」と呼んだ。

『天球回転論』の意義とその内容

- * 1539年、ゲオルク・レティクス¹⁾がコペルニクスを訪問し、学んだことを『第一解説』を著す。
→コペルニクスにも著作出版を勧め、執筆活動を開始させる。
→コペルニクスは1543年、『天球回転論』²⁾を亡くなる直前に完成。
- * 第1巻は地動説を様々な角度から擁護する弁論の書。
 - ◇「太陽が美しい神殿の王座を占める宇宙の精神（支配者）である」と表現。
→ルネサンスの太陽礼賛思想（ヘルメス主義思想）の影響と考えられている。
 - ◇「地球が自転するなら地上の物体は遠心力により吹き飛ばされるのでは？」という問に対し、「地球が自転するとき地上の物体も地球とともに回転し、それは物体の本性にしたがう自然運動によるのだ」と返答。
- * 第2～6巻で太陽・月・各惑星の運行に関する詳細な幾何学的説明が天文数値とともに展開。
→天文学を十分に修めた専門家向けの内容となっていた。
- * 『天球回転論』にはコペルニクス本人の序文のほかに、もう1つ別の序文が存在した。

『天球回転論』の「もう1つの序文」

この著作は「地動説」という仮説を、単に観測とよく合致する計算上の道具として提示しており、そもそも天文学者の任務とはそのような観測と計算をすることだ。

- これは神学者アンドレアス・オシアンダーが無断掲載したものであった。
- コペルニクスの意図に反する序文が無断掲載されたことにレティクスは憤慨。
- しかし実際、大学の天文学者の間ではこの現実主義的解釈にしたがってコペルニクスの理論を計算の道具として受け入れる傾向があった（∵宇宙の構造理解は哲学者の職分だから）。

¹⁾ 本名はゲオルク・ヨアヒム・フォン・ラオヒェン。ヴィッテンベルク大学（ドイツ北東部）で天文学を教えていた。

²⁾ 『天球の回転について』と表記されることも多い。内容は、全6巻からなる本格的な天文学専門書であった。

コラム 科学出版の偉大な年

1543 年は人々の世界観を大きく変える革命的な本が 2 冊も出版された偉大な年である。

そのうちの 1 冊は、もちろんコペルニクスの『天球回転論』で、コペルニクスが他界する直前に数百部が出版された。もともと、出版者側の立場からすると、この本は失敗であったと伝えられている。すなわち値が張りすぎて、売れ行きも遅々としたものであった。第 2 版が 1566 年、第 3 版が 1617 年に増刷されているが、そこまでで絶版となってしまった。

1543 年に出版され、世界を変えたもう 1 冊の本はアンドレアス・ヴェサリウスの『人体の構造』である。この本の特長は、正確な解剖図が多用されていることである（それらの図は主に画家シュテファン・フォンカルカーによるもの）。それ以前の書籍では図式がほとんど欠如しており、仮に図が掲載されていたとしてもかなり不正確なものであった。医学書などに、優れた解剖学者の手でなされた人体の解剖図が数多く掲載されるようになったのは、まさにこの本にならったことである。

コペルニクスは弾圧を恐れ、死ぬ直前まで『天球回転論』を出版しなかったが、ヴェサリウスは 30 歳にも満たないときに出版を決意した。しかし、現代から見ればコペルニクスの判断のほうが賢明であったといえる。ヴェサリウス以前の医者はガレノスの学説を受け継いでいた。ヴェサリウス自身もこの伝統の中で医学教育を受けていたが、彼が実際に解剖を行って目にしたのはそれとは大きく異なっていた。彼は、自分の手で実物を目にしたときこの伝統を拒絶したが、古い考えの医者たちはヴェサリウスを「死体泥棒」と罵り、これを公然と批判した。そのためにヴェサリウスはその後ほとんどまともに研究を行うこともできなくなってしまった。

ヨーロッパの天文学者や医者たちが、古い権威を捨てて真実を求めるようになるまでには、1543 年以降に、もう数十年の歳月を必要としたのであった。

道具主義的科学観

* エラスムス・ラインホルト … ドイツの天文学者。

コペルニクス理論を参考に「プロシア表」（天文表）を作成し、グレゴリオ改暦で採用される。

→彼は優秀な天文理論としてコペルニクスの理論を利用したが、地動説の信奉者ではなかった。

* 地動説を便利な計算の道具とみなす考え方は、その後数十年にわたって標準的な見解となった。

表 4.1 様々な天文表

名称	作成者	出版年	特徴
ハーキム表	アリー・イブン・ユヌス	10 世紀	過去 200 年分の観測データを利用して作成された。
トレド表	アッ・ザルカーリー	11 世紀	ラテン語版がヨーロッパで 16 世紀まで使用された。
アルフォンソ表	アルフォンソ 10 世	1270 年	トレド表を改良したかなり正確な天文表。
プロシア表	エラスムス・ラインホルト	1551 年	コペルニクス理論に基いて作成された。
ルドルフ表	ヨハネス・ケプラー	1627 年	従来表の 30 倍の精度を持ち、地動説を裏付けた。

4.3 ティコ・ブラーエとヨハネス・ケプラー

ブラーエの天体観測

- * 16世紀後半，自然学として天体構造論に取り組む天文学者が登場。
→彼らは大学ではなく，宮廷付きの天文学者であった。
- * ティコ・ブラーエ…デンマークの天文学者，デンマーク領スカニアの貴族の子，地動説は不支持，コペルニクスの中間的折衷説¹⁾をとる。
cf. ブラーエは1574年にコペルニクスを「天文学を再興した第二の-ptレマイオス」と称えた。
- * デンマーク王の支援を受けてヴェン島²⁾にウラニボルグ天文台を建設。
→従来の「断続的な天文観測」ではなく，二十数年の長期にわたる「継続的な天文観測」を実施。
→大型の観測装置や種々の補正技術を用いた精密な天文観測（「肉眼観測の限界」と称される）。
- * デンマーク国王の死後（1597年），ブラーエはウラニボルグを離れ，プラハへ赴き神聖ローマ皇帝ルドルフ2世に謁見，そこで新しい天文表の作成にあたる。
→このとき助手として雇われたのがケプラーであった。

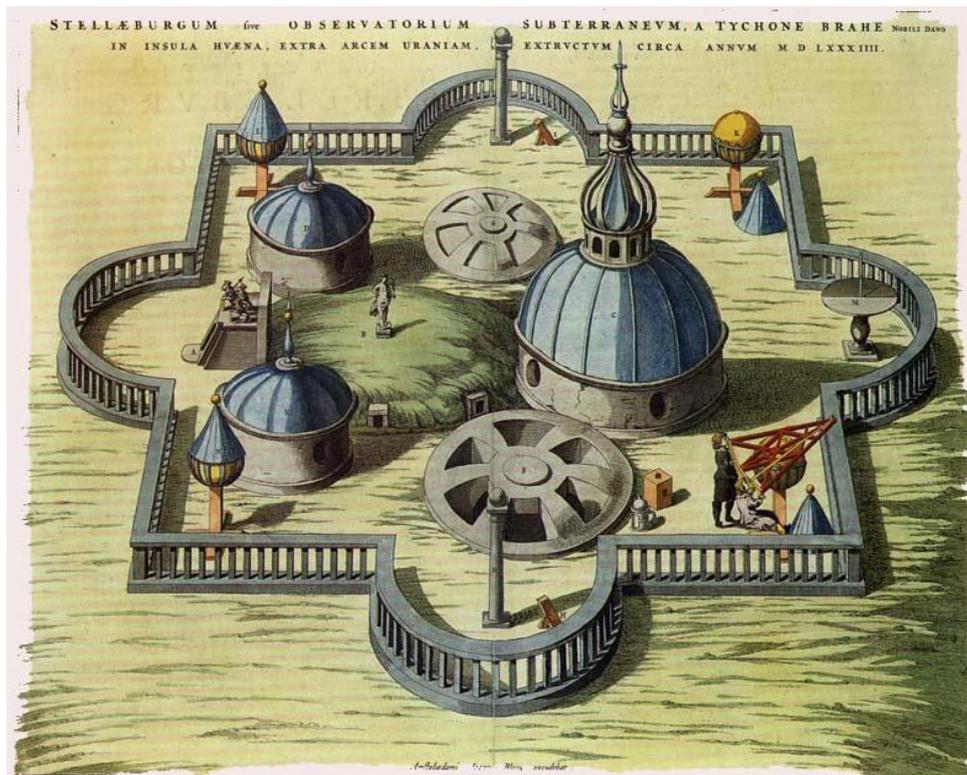


図 4.5 ウラニボルグ天文台

1) 太陽の周りを惑星が回り，惑星を引き連れた太陽が静止した地球の周りを回るとした。この説はケプラーやガリレオによる地動説の確証後も長く人気を博した。

2) コペンハーゲンの沖合い約10マイルに位置する小島。ウラニボルグ ステルネボルグ
「天の城」，「星の城」と呼ばれる2つの観測所の他に，天体暦を発行するための印刷所なども備えていた。それは，まさに一大天文研究所というべきものであった。

Profile 017 ブラーエ (Tycho Brahe, 1546 ~ 1601)

デンマークの天文学者。デンマーク領スカニアの貴族の家に生まれ、はじめは政治家を目指してコペンハーゲン大学やライプチヒ大学で法律と哲学を学んだ。しかし、その後ヨーロッパを広く旅行し、その間に収集した天文観測器具を用いて既存の星表の不備を正す意図で観測活動を開始し、1572年のカシオペア座の超新星を発見、天文学の分野で有名となった。

天文学的实力を認められたブラーエはデンマーク王の援助を得てヴェン島にウラニボルグ天文台を建設した。その大規模な観測装置と組織的な共同研究は今日のビッグサイエンスの先鋭とさえ例えられる。太陽系諸天体の精密観測や800近い恒星の位置決定など、ブラーエがこの天文台で行った観測の水準は極めて高度なものであった。特に、1577年の大彗星接近の際この現象が月よりも遠いところで起きていることを証明し、従来の「天上界の普遍性」に対する信仰に大きな一石を投じた。

デンマーク王が死去すると、ブラーエは新しく即位した王とは折が合わず、デンマークを去って神聖ローマ帝国のルドルフ2世の庇護下でプラハに新しくステラボルグ天文台を建設し、観測を続けた。



コラム 錬金術

錬金術は極めて古いもので、キリストの誕生以前にすでに行われていたらしい。また、その歴史は非常に長く、人数こそ少ないとしても今でもなお錬金術師は存在している。

錬金術の最盛期は9世紀の初めから17世紀半ばぐらいまでで、上は王族や皇帝、下は鍛冶職人や織物職人まで実に幅広い身分の人間がこれに従事した。さらにはベーコンやブラーエ、ニュートンといった有名な科学者さえ錬金術に深い関心をもち、その研究に取り組んだ。

錬金術の本性には二つの側面がある。そのうちの一つは表向きの顕教的な面で、「賢者の石」と呼ばれる卑金属（鉛・錫・銅・鉄・水銀）を貴金属（金や銀）に変える力をもつ物質をつくる試みに関係している。この「賢者の石」はときに「エリキサ（錬金薬）」や「ティンクトゥラ」とも呼ばれ、人間を不老長寿にする力をもつと信じられていた。一方、この「賢者の石」は神の恵みや恩寵によってのみ得られるとの信条が、錬金術の秘教的なもう一つの面を形成した。この秘教的な錬金術は次第に発展して一つの教義体系となっていた。

錬金術を意味する英語のアルケミー（alchemy）という語はアラビア語で「技芸」を意味するアルキミア（alkimia）に由来するものである。アル（al）はアラビア語の冠詞であるが、後半のキミア（kimia）の語源については二つの説が唱えられている。そのうちの一説は、古代エジプトを指す呼び名ケム（kmt または chem）から派生したと主張する。この言葉は「黒い土地」を意味し、黄褐色の砂漠の砂と対照的なナイル川を縁取る黒い堆積土のことを指しているとされる。もしこの説を採用するのであればアルケミーは「エジプト人の技芸」という

意味になる。実際、古代エジプトでは錬金術研究が盛んに行われていた。一方、キミアは金属の「溶融」を意味するギリシャ語キマ (chyma) に由来するという説もある。実際の錬金術は、多くの場合まさに金属の溶融という操作を伴うのでこの説にも一定の説得力がある。いづれにせよアルケミーはアラビア語由来であることは確実で、このことは中世初期の錬金術が主にイスラム教徒によって行われていたことを暗示している。なお、「化学」を意味する英単語ケミストリー (chemistry) はアルケミーを語源にもつ。

キリスト誕生よりも前の数千年の間に、人類は着色合金やガラスの製造の術を手に入っていた。しかし、こうした職人が行う操作には今日とは大きく異なる部分がある。すなわち、この時代の職人が行う工程には、宗教的もしくは魔術的な行為が伴っていることが多かった。これは、古代の人々が金属・鉱物・植物・惑星・太陽と月・神々との間には関連があると考えていたからに他ならない。のちの錬金術師たちの工芸にも、占星術的進行に対して行う必要のあった儀式の影響を受けることになった。そのため錬金術書の中にはしばしば数秘術が登場したり、金属を表すのに惑星が象徴的に用いられたりしている。

また、古代ギリシャ以降の錬金術はアリストテレスの影響も色濃く受けることになる。アリストテレスの四元素説では、各元素はどの元素にも変容可能であるとされた。このことが、それ以降の錬金術師にとって、卑金属を貴金属に変換できることの根拠となったのである。アリストテレスはさらに、金属や鉱物の生成について諸見解を述べており、それらが錬金術師の思考を方向づけるきっかけとなった。すなわちアリストテレスは、互いに関係する二つの“蒸発物”の存在を仮定した。それらが物質的なものと考えられていたのか、精霊的なものと考えられていたのかは今のところはっきりしないが、一方の蒸発物は霧状で、他方は煙状であるとされた。アリストテレスによれば霧状の蒸発物は太陽光線が水に降り注いだときに生成し、冷たく湿った性質をもつ。一方の煙状の蒸発物は太陽光線が乾いた大地に降り注いだときに生成し、暑くて乾いた性質をもつとされた。これら二つの蒸発物には金属と鉱物がそれぞれ対応し、各々が「土」の元素の中に閉じ込められると金属や鉱物が生成するとアリストテレスは主張する。錬金術師たちは、こうした考えのもとに「賢者の石」を作り出すべく苦心を重ねた。

しかし、こうして繁栄した錬金術の流れも王立協会などによる調査が進んだのちには、学術的な科学団体からは認められなくなってしまった。特に、1661年にボイルが出版した『懐疑的な化学者』は錬金術への死刑執行令状に等しかった。その中で彼は、アリストテレスの四元素説が正当でないことを主張し、あらゆる錬金術的憶説を根本から断ち切ってしまった。こうして、錬金術の諸理論はそれ以降の科学に対しては何の意味ももたないものとなったが、錬金術師が導き出した実用的な化学知識はその後の科学的化学の基礎となった。

表 4.2 有名な錬金術用具

名称	説明
ケロタキス	金属をのせたパレットの下で硫黄や水銀を熱して還流し、金属処理を行う装置。
ペリカン	再蒸留を行うための特殊な二重還流器。形状が鳥のペリカンに似る。
レトルト	蒸留や乾留に用いられる頸の曲がったフラスコ。

なお、より詳細な錬金術の歴史については p.77 のコラムを参照されたい。

ケプラーの探求

- * ヨハネス・ケプラー… ドイツの天文学者。ティコ・ブラーエの弟子。
 - ◇コペルニクス地動説の信奉者。
 - ◇プラハに来る前に『宇宙の神秘』¹⁾を出版、太陽から惑星までの距離の比例関係を説明。
 - ◇ブラーエと同様、大学に所属していなかった。
 - 積極的に宇宙の構造の理解を主張した。
- * ブラーエの観測記録をもとに惑星軌道の真の幾何学的形状の決定に取り組む。
 - 火星に焦点をあてる（∵火星に関する実測値と理論算出値の差が一番大きかった）。
- * プトレマイオスのエカントを自然科学的に再解釈。
 - 「エカント付近ではゆっくり動き、遠くでは速く動く」
 - ⇒「太陽の遠くではゆっくり動き、近くでは速く動く」
 - ケプラーはその理由を『宇宙の神秘』でアニマ²⁾と表現された太陽のもつある種の力が惑星に作用し、「距離に反比例する速さで惑星を押し進める」（距離の法則）からだと推測した。
 - 「距離の法則」はのちに「面積速度一定の法則」へと修正される。
- * 上記の法則を火星に当てはめる³⁾と、太陽-火星直線が描く面積が観測値と不一致。
 - 「距離の法則」に基づく「面積一定の法則」を一旦捨て、軌道を微修正すると楕円になった。
 - これに「面積一定の法則」を重ねると、見事に一致した（「楕円軌道の法則」の発見）。
- * 以上の成果を『新天文学』にまとめ、1609年に出版した。
 - さらにその10年後には、音楽における和声理論に依拠しつつ「調和の法則」も発見した。

ケプラーの法則

第一法則（楕円軌道の法則）

惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描く。

第二法則（面積速度一定の法則）

太陽と惑星を結ぶ直線（動径）は、等しい時間に等しい面積を描く。

第三法則（調和の法則）

惑星と太陽の平均距離 a の3乗は、惑星の公転周期 P の2乗に比例する。

（注）実際の発見順序は、第二法則が先で第一法則が後である点に気を付けよ。

- * ケプラーは、当初は太陽から発せられる磁気などという怪しげな概念を頼りにしていたものの、それはのちの地動説確立においては、周転円や離心円といった伝統的な概念よりも信頼できる案内役であった。すなわちケプラーは天文学は自然学に基礎づけられるべきと考えていた。
 - 天文学と自然学を乖離^{かいり}させる伝統的な学問論に則り、地動説を単なる計算の道具とみなしたアンドレアス・オシアンダーらに対し、ケプラーは自然学と統合された新しい天文学の構築を目指した。ただし、その自然学は古典的な自然学や近代的な自然学とも異なるケプラーの時代独特の自然学であった。

1) 原書名は *Mysterium cosmographicum*。教科書『〈科学の発想〉をたずねて』では“宇宙誌の神秘”と訳されているが、日本で出版されている翻訳本（大槻真一郎・岸本良彦訳、工作舎）では『宇宙の神秘』となっている。

2) 1600年に英国のウィリアム・ギルバードはアニマを磁氣的な力だと推測した。cf. 『磁気論』

3) 火星の軌道は離心円とされ、太陽は中心から離れた位置に置かれて計算された。

Profile 018 ケプラー (Johannes Kepler, 1571 ~ 1630)

ドイツの天文学者。チュービンゲン大学に入って神学を志したが、ミハエル・メストリンの影響で天文学に転じた。ケプラーはこの頃、既にコペルニクス主義者となっていた。その後、オーストリアのグラーツにあるルター派の高等学校で数学教師を務めていたが、宗教上の問題からこれを辞めて、1600年にブラーエの助手となった。翌年、ブラーエの死を受けてその跡を継ぎ、観測記録に基づく宇宙体系の組み直しに取り掛かり、現在ケプラー星と呼ばれている新星を発見した。



ケプラーの天文学研究は、ブラーエの残した膨大で精密な観測データに基づきながら、それと適合する幾何学パターンを探り当てるというものであった。はじめ彼は周転円や離心円など典型的なプトレマイオスの理論を利用しようとしたが、思ったようにうまくはいかなかった。そこでケプラーはアプローチの仕方を変更し、惑星の軌道が円ではなく楕円だとうまくいくことに気づき、有名なケプラーの法則を発見する。こうした成果は、『新天文学』や『世界の調和』といった著作で発表された。

ケプラーの成果はのちのニュートンによる万有引力理論に重要なヒントを与えたほか、地動説確立にも大きく貢献した。また、望遠鏡の理論研究などを通じて近代的光学理論の基礎を築いた功績も大きい。

コラム ルネサンスと科学

ルネサンスといえば、科学というよりはむしろ芸術や文学と結び付けられることがほとんどであるが、科学もまたこうした流れの影響を強く受けている。

そもそも、ルネサンスの始まりの目安の一つはトルコ人がコンスタンティノープルを制圧した1453年5月29日とされている。この日、ギリシャ語に堪能で古い書物をラテン語に翻訳する能力をもつ学者の多くがギリシャ語古典の写本を持って西方へと逃げた。あるいは14世紀のヨーロッパではペスト流行による人口減少で人手不足に悩んでいた。そこで発展するようになったのが機械装置と商業活動で、これも科学を推進する原動力となった。また、1440年頃にヨーロッパで活字印刷が再発明されたことの科学への影響も無視できない。

実はそれ以外にももう一つ、見落とされがちだが科学へ大きな影響を与えたものがある。それは、新大陸や東洋を冒険した探検家たちがもたらした、それまで知られていなかった動植物に関する知見である。その影響は、まず人々の食卓に並ぶ食材の急速な変化として現れたが、より長期的にはリンネの分類体系誕生のきっかけともなった。

もちろん、ルネサンス期の芸術家、中でもとりわけ画家による科学への貢献も決して小さいものではない。透視画法の発明や人体解剖図の製作などは芸術と科学の双方にとってとても意義深いものであった。ルネサンス期の人物として最も有名なレオナルド・ダ・ビンチは優れた芸術家であったと同時に、科学者であり発明家であり技術者でもあった。

第4章のまとめ

- (1) コペルニクス登場以前は、プトレマイオス天文学が主流であった。
→周転円・離心円・エカントという3つの概念を用いた幾何学的天文理論。
- (2) コペルニクスは『ウプサラ・ノート』のアルフォンソ表を用いて太陽から（地球を含む）各惑星への距離の比を算出。
- (3) コペルニクスは『天球回転論』で自らの考えをまとめる。
→アンドレアス・オシアンダーが無断掲載した「もう1つの序文」がコペルニクス理論を単なる計算の道具と位置づけた（その後も深遠な宇宙構造論とはみなされず）。
- (4) ティコ・ブラーエの精緻な天体観測記録を基にケプラーが研究を行い、距離の法則を経て面積速度一定の法則、楕円軌道の法則、調和の法則の順にケプラーの法則を発見した。

第5章

機械論的自然観

より良いものが見つかるまで、良いものを手元に残しておきなさい。
— パラケルスス

5.1 ガリレオと地動説

ガリレオの主な功績

- * ガリレオ・ガリレイ … イタリアの天文学者，物理学者，哲学者。
- * 振り子の等時性と落下の法則（落下距離は落下時間の2乗に比例）を発見。
- * 新発明の望遠鏡で木星の衛星¹⁾を発見し，月の表面・金星の満ち欠け・太陽の黒点を観測。
→以上の成果を『星界の報告』²⁾に著し，メディチ家のコジモ2世に献上。

Profile 019 ガリレオ (Galileo Galilei, 1564 ~ 1642)

イタリアの物理学者，天文学者。医学を修めるべくピサ大学に学ぶ。ユークリッドやアルキメデスの著作を通して，数学や力学へと関心が移ったが，学資不足のため1585年，学問半ばにして大学を去った。ガリレオはこのときまでには天動説を信奉するようになっていた。

その後まもなくして比重や重心の研究などで頭角を現し，ピサ大学の数学講師やパドバ大学の数学教授などを歴任した。ガリレオはこの頃から既にさまざまな著作を残しているが，重要なものは1610年に出版した『星界の報告』である。この著作で名声を得たガリレオは，大公付哲学者としてフィレンツェへと移った。

ガリレオが望遠鏡による諸観測や太陽中心説を公然と支持し始めた頃，カトリック教会は反宗教改革の困難な時代にあった。そのため，教会はガリレオの活動を危険視し，1616年に警告を発することになった。しかし，ガリレオは1632年に『天文対話』を発表してこの禁を破り，翌年宗教裁判にかけられて地動説の破棄を命じられ，フィレンツェ郊外に軟禁されてしまった。晩年には失明し，不遇のうちに死去した。

彼は若い頃アルキメデスの行った物理現象の数学的表現に感銘を受けたが，アリストテレスの著述には数学が欠如していると感じ，これを批判した。その後，ガリレオは力学をはじめとする自然現象に数学および思考実験の方法を用いて迫り，これを検証するという方法をとったが，このことは新しい自然科学の方法の確立に大きく貢献するものであった。



¹⁾ イオ，ガニメデ，エウロパ，カリストの4つ。現在では，木星の衛星は全部で16個知られている。

²⁾ これはガリレオの著作の中ではほぼ唯一ラテン語で書かれたものであった。それ以外の著作はほぼ当時は俗語のイタリア語で書かれており，このことが教会によるガリレオ弾圧に拍車をかけたとも言われている。

コラム ガリレオと測量技術

17世紀以前は、様々な量を正確に測定する術がほとんどなかった。それでも長さや質量に関してはそこそこの精度で測定が行われていたが、天秤の有用さは科学者にはあまり理解されておらず、主として貨幣鑑定師の間で利用されていた。時間に関しては間隔が十分に長い場合に限り測定が可能であった。しかし、温度や流体の圧力に至っては、これを数値的に測定することはまったく不可能であった。

ガリレオはこうした状況を一変させた人物の一人だった。まず彼はまだ16歳の若輩であった1581年に振り子の等時性を発見した。この発見により、17世紀末までには優れた振り子時計が製造されある程度正確に時間を計ることが可能になった。また1586年には水圧天秤の考えを発表し、さらに1592年にはサーモスコープと呼ばれる温度をはかる原始的な装置をはじめ作り出した。これは現代の気体温度計のようなものであったが、大気圧の影響を受けやすくそれほど精度が良いものではなかったため、17世紀を通してより実用的な温度計へと改良され、1714年にファーレンハイトの手によって近代的な液体温度計の形になった。加えて気圧計の発明へ導いたトリチェリの研究を示唆したのもガリレオであった。ガリレオの望遠鏡が天体望遠鏡の製作を刺激し、その結果として測微計（マイクロメーター）が考案されたという流れもある。測量に本格的に望遠鏡が用いられるようになると、角度の正確な測定を行うための副尺（ヴァーニア）の開発が促されることになった。

これらの計測装置は、ガリレオの存命中には科学研究に利用できるほど正確なものとはならなかった。しかし1642年に彼が没して以降、これらの諸装置は近代科学の隆盛にあたって重要な役割を演じていくことになったのである。

Profile 020 トリチェリ (Evangelista Torricelli, 1608 ~ 1647)

イタリアの物理学者、数学者。ファエンツァのイエズス会の学校で数学と哲学を学び、卒業後はローマでガリレオの弟子のカステリに師事した。1638年にトリチェリは投射体の運動の問題についての研究を発表したが、この著述がガリレオの目にとまり、以降、失明した晩年のガリレオの秘書をしながら指導を受け、力学・光学・流体に関する研究を行った。特に、一端を閉じた管と水銀によってトリチェリの真空を作ったことは有名。これによりガラス管内の水銀柱が大気の重さと釣り合いの状態にあることが実験的に証明され、17世紀の自然研究に大きな刺激を与えた。さらに、同じ年に液体の流速に関するトリチェリの定理も発見している。そのほかに物体系の釣り合いに関する法則や回転放物面の研究も知られる。



トリチェリ自身の研究テーマとしては数学、その中でもとりわけ放物線やサイクロイド曲線をはじめとする幾何学に関するものが多く、それらの業績は1644年の『幾何学集』にまとめられている。また、望遠鏡の改良や大型レンズ製作などの技術的な貢献もある。

ガリレオの地動説

- * 木星の衛星を発見したことで、地球だけが衛星をもつ特別な惑星でないことを証明。
→地球を特別な天体として扱う天動説は誤りであり、地動説が正しいと確信する¹⁾。
- * 地動説を自然科学的に基礎づけることが目的で『天文対話』²⁾を著す。
→宗教裁判にかけられ、地動説の放棄と自宅軟禁を命じられる。
◇内容：サルヴィアチ（ガリレオの代弁者）がサグレド（良識ある市民）の前で、
シンプリチオ（天動説論者）の主張を次々と論駁^{ろんぱく}していく。

サルヴィアチとシンプリチオの討論例

シンプリチオの批判

地球が東方向に回転しているのなら、塔の上から落とされた物体は塔の真下に落ちずに、落下の最中に地球の回転をこうむり、少し西側に着地するはずだ。しかし、落とされた物体は塔の真下に落ちていく。よって地動説は誤っている。

サルヴィアチの解答

帆走する船のマストの上から落とされた物体は、船が動いていてもマストの付け根に落ちるはず。そのことは実験をせずとも、次の事例を考えれば明らかである。すなわち、球が斜面を下るときには、その転がる速度は徐々に速くなる。逆に斜面を登っていくときは、その速度は徐々に遅くなる。では、水平な面ではどうなるかというところ、加速も減速もしないだろう。海を進む帆船は、水平面を転がる球と一緒に、マストの上の物体は、船の動きとともに動き続ける。これは地球の自転にも当てはまる。

- * ガリレオは実際に実験するよりも思考実験を多用することを好んだ。
∴庶民を含む、多くの人に読んでもらうことを前提としたから。

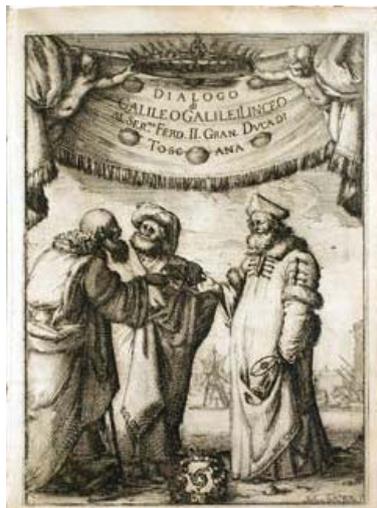


図 5.1 『天文対話』表紙

¹⁾ ガリレオはのちに太陽の黒点も発見して太陽さえもが完全な天体でないことを知り、ますますこの確信を強めることになる。

²⁾ 原書名は *Dialogo sopra i due massimi del mondo, Tolemaico e Copernicano*。これを直訳するならば『ポトレマイオスとコペルニクスの二大世界体系についての対話』となる。

5.2 粒子論的自然観の提示

魔術的自然観

- * パラケルスス … スイスの医師，錬金術師。本名はテオフラストゥス・ホーエンハイム。4種類¹⁾の体液のバランスが崩れることによって病気になるとする古代ギリシャ以来の医学理論に反逆し，体内に外部から何らかの種子が入ることによって病気になると考えた。
→人に備わる生命力が，種子から成長した物質を純粋物質と不純物に分け，後者を排出する。
- * パラケルススは同様の過程が地面の下や錬金術の実験室で起こっていると推測。
→錬金術は医療技術として役立つと考えられた。このような錬金術を医化学と呼ばれた。
→こうした考えは当時や後世の医者たちに大きな影響を及ぼした。ex. 武器軟膏
- * また，パラケルススは天体と人体の臓器とは対応関係があると考えた。
→星と地下の鉱石や地上の様々な物体あるいは地上の様々な物質同士の間，種々の影響作用がはたらいっているという自然観が知識人の間で広まる。
→そのような影響作用を及ぼすものとして，反感関係と共感関係があるとされた。
- * ジャンバティスタ・デラ・ポルタ … イタリアの自然哲学者。
反感共感関係をうまく利用して人間に役立てることを「魔術」と呼んだ²⁾。
→ルドルフ 2世に^{しょうへい}招聘され，世界各地から珍奇な物品や生物を蒐集して珍品陳列室に並べる。
→後世の博物館の原型となる。
- * フランシス・ベーコン … イギリスの哲学者。帰納法を提唱。
様々な自然界の事物の記録を蒐集し，その知識を利用して人間に有用な事物を生み出していくという自然魔術の思想を受け継ぎ，それを実験研究のプログラムという形で後世に遺した。
→自然魔術の思想は，ベーコンによって近代的な実験科学の方法論と思想に変容された。

Profile 021 パラケルスス

(Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim, 1493 ~ 1541)

スイスの医師，錬金術師。ローマの名医ケルススを超越するという意でパラケルススと名乗った。医化学の祖といわれる。イタリアに留学して医師の資格を得た後，その反逆精神から各地を放浪して学び，伝統にとらわれない独自の研究を行った。主著は『大外科学』。

彼の理論は多分に錬金術的・占星術的であったが，病院を体液の不調和とみなしたそれまでの考え方から脱却し，局所的に病変が起こり，それが体液の循環を阻害するという新しい病理感をもった。

1527年，バーゼル大学で医学の講義を行ったが，疾病治療に関する独自の理論や方法を展開して伝統を無視したため反対者の攻撃を受け，翌年教職を追われてしまった。



1) 血液・胆汁・黒胆汁・粘液の4種。そのバランスは四季の変化や気候風土などから影響を大きく受けるとされた。

2) 魔術には、「自然界に存在する様々な事物を神の世界に消化させるような魔術」（自然魔術）と「悪魔の世界に投げ落とす魔術」（秘儀的魔術）の2種類があるとされたが，ここで言う魔術は前者を指している。

コラム 三原質説と医化学

中世の錬金術師たちは硫黄と水銀があらゆる金属の原質であり、この2種類の原質の相互作用によって変化がもたらされるとする二原質説を信奉していた。パラケルススはこの2つの原質では不足だとして、塩を第三の原質として付け加える三原質説を唱えた。彼は、この三原質によってすべての物体の錬金術的変成を説明できると主張した。この物質界の三原質は、天上界の三位一体説や人体を構成する三原理（生命精気・靈魂・身体）と一致していることから、パラケルススは大宇宙（マクロコスモス）と小宇宙（ミクロコスモス）すなわち天界と人体、あるいは実験室での物質の変成の間には照応関係があると考えた。

パラケルススによれば、金属鉱石は天界からの種子が地面の中に入り込み、地下において成長することによって生成される。そして錬金術師の仕事は、こうして生じた鉱石から純粋な金属を抽出する作業だとした。彼はこの純粋物質と不純物をより分ける技術を人体に対して適用すれば、病気の治療を行うことができると考え、錬金術を医療技術に役立てるようになった。このような錬金術は医化学と呼ばれ、当時や後世の医者に大きな影響を与えた。



図 5.2 大宇宙と小宇宙

Profile 022 ポルタ (Giovanni Battista della Porta, 1535 ~ 1615)

イタリアの自然哲学者、劇作家。ナポリの小貴族の家に生まれ、青年時代にヨーロッパ各地を遍歴した。太陽光線の熱効果を初めて発見し、農業・光学・化学など多分野で様々な考察を行う。

ポルタは「秘密の学会」と呼ばれる会合を自宅で主宰して、自然に生起する種々の事柄を披露しあったり議論したりした。そして、その成果を主著『自然魔術』にまとめ、自然現象を支配するための技術として魔術を論じた。

彼はさらに、当時の生活を多くの喜劇作品に描いた劇作家としての顔も持っていた。



コラム 初期の学会

中世に科学が発展しなかった理由の1つに、ほとんどの人が新しい発見について知る術を持たなかったことが挙げられる。当時のヨーロッパにはまだ印刷技術が存在せず、科学に関する情報を収集・登録し、広めるための組織も存在しなかった。

科学分野の学会が最初に登場したのは17世紀のことである。この時期、イタリアではポルタによるアカデミア・セクレトルム・ナチュラエ（秘密の学会）や、既に存在していた文学分野の学会を模範とするアカデミア・デイ・リチェンリなどのような最初の学会が設立されるようになった。後者には、かのガリレオもその会員の1人として名を連ねていた。

しかし、これらの学会は長続きはしなかった。前者は1560年に創設されたが、まもなく宗教裁判によって解散させられてしまった。また、後者もその活動はそれほど長続きせず（ただし後に復活し、以降現在まで続いている）、1630年にフィレンツェで設立されたアカデミア・デル・チメントにその役目を引き継いだ。

こうした学会設立の流れは、やがてヨーロッパ全土へと広がっていった。フランスでは1666年に科学アカデミーが設立され、フランスのみならず海外からも著名な科学者たちが集まった。外国人会員として特に有名なのはオランダのホイヘンスやデンマークのレーメル、イタリアのカッシーニなどの顔ぶれである。また、有名なイギリスの王立協会は1660年に設立された。王立協会は設立以来存続し続けている学会の中では最も古い科学学会である。

表 5.1 初期の科学学会

設立年	学会名	設立地	特徴
1560年	アカデミア・セクレトルム・ナチュラエ	ナポリ	最古の学会
1603年	アカデミア・デイ・リンチェイ	ローマ	ガリレオが活躍
1630年	アカデミア・デル・チメント	フィレンツェ	実験研究を重視
1660年	王立協会	ロンドン	今日まで継続する最古の学会
1666年	科学アカデミー	パリ	コルベールにより創設

Profile 023 ベーコン (Francis Bacon, 1st Viscount St. Alban, 1561 ~ 1626)

イギリスの法律家、政治家、哲学者。ケンブリッジ大学に学んだ後、パリに渡ったが父親の死を受けて帰国し、国会議員などの政治活動に入った。1621年に汚職のために公職を退き、以降著述に専念した。

彼は自分の学説を思弁や伝統ではなく信頼できる情報に基づくものにしたいと考え、アリストテレスの『オルガノン』に代わるものとして、『新機関』を著し、演繹法に対して帰納法を提唱した。

その他の業績として、ユートピア物語『ニュー・アトランティス』を著したことで知られる。その中で彼は、科学の目的は「人間帝国の領域を拡大し、すべての物事を可能にすることに役立つこと」としている。



粒子論的自然観

- * ガリレオ・ガリレイは、彼が 1623 年に出版した著書『贗金鑑識官（サジアドーレ）』¹⁾の中で、「彗星は月下界で生じているか、天界で生じているか」を議論。
→自然の規則性は数式で表されなければならないという、近代的な考え方を示す。
- * また、ガリレオは同書で共感・反感といった概念を斥け、魔術的自然観を一蹴。
→物体に特有の性質を想定し、機械論的自然観を提示。
 - ◇ガリレオは物質の性質を 2 種類に大別できるとした。
 - 第一性質：物体から引き離して物体を想像できない性質 ex. 形, 大きさ etc.
 - 第二性質：物体自身ではなく近くする人間の側に属する性質 ex. 色, 味, 匂い etc.
 - ◇その上で、それらの性質を用いて具体的な現象を説明した。
 - 物体の形状に由来する感覚²⁾は、土の元素の性質に由来する。
 - 味は、微粒子の運動とそれに対する舌の知覚に起因する。
 - 音は、空気の振動によって鼓膜の軟骨が動かされる。
- 感触・味・匂い・音などの性質を土・火・水・空気の四元素に関連させる。
i.e. 種々の第二性質を第一性質に置換。
- * 「自然学の中から各種の性質を追い出し、粒子の形や速さからあらゆる自然現象を説明する」潮流を粒子論的自然観と呼ぶ。
- * つまり、ガリレオは数学（形や速さ）と自然学（音など）を峻別するアリストテレスの考え方に対して、両者を融合する考え方を提示した。



図 5.3 ヘール・ボップ彗星

1) 「本物と偽物とをはっきりと見分けて、自分のほうが正しいことを示そう」との意味でこのようなタイトルがつけられたと考えられている。ただし、この本の内容は彗星が大気中の水蒸気によって太陽光が屈折・反射させられる結果だと主張するガリレオと彗星が月よりも遠い所にある天体だと主張する数学者グラッソの論争をまとめたものであり、誤っているのはガリレオの方であった。

2) いわゆる「感触」のこと。ex. 硬さ（柔らかさ）、滑らかさ（粗さ） etc.

5.3 デカルトの機械論的自然観

機械論的自然観

- * ルネ・デカルト … フランスの哲学者。
ガリレオが散文的に語った自然観を、一つの整合的な哲学体系にまとめる。
- * 『精神指導の規則』で書物の権威に頼ることなく、独力で確実な拠り所を求めることを宣言。
→ 確実なこと = 「直観的に明晰判明なこと」(思考の規則) cf. 「我思う、ゆえに我あり」
 - ◇ 精神と物質とを厳格に区別 (物心二元論)。
 - ◇ 物質固有の性質は延長 (空間的広がり) であると主張。
→ ガリレオが、第一性質だけを物体の性質だと規定したことへの対応。
 - ◇ 精神の本質は思惟であるため、精神的活動は機械的に説明できない。
→ 松果体が精神と物質とを結びつけると考えた。
- * また、デカルトは彼の理論に共鳴したクリスティアン・ホイヘンスらと渦動宇宙論¹⁾を提唱。
→ 重力現象を太陽や地球の周りを高速回転する微細粒子で説明する。
- * デカルトは様々な著作の中で機械論的自然観を実践した。
 - ◇ 『気象学』: 友人に尋ねられた幻日現象²⁾や雲・雨・虹などが生じる理由を説明。
 - ◇ 『宇宙論』: 宇宙は3種類の元素からなるとする。
 - ① 第一元素 (超微細, 火の元素に相当), ② 第二元素 (微小, 空気の元素に相当), ③ 第三元素 (小さい, 土の元素に相当) という大きさと重さだけが異なる元素を想定³⁾。
 - これらの元素は妨げるものがなければ、無限に直進運動するとした
i.e. アリストテレスの説く熱冷乾湿の性質を払拭し、慣性の原理を確立。
 - ◇ 『人間論』: 人間を土の元素からできあがったロボットと想像。
→ 人間の身体的・精神的な活動のほとんどを物質粒子の運動と組み合わせによって説明。

Profile 024 デカルト (René Descartes, 1596 ~ 1650)

フランスの哲学者、数学者。1612年にラフレーシュのイエズス会系の学院を出て、1616年までポアティエ大学で法学を修めた。1618年にオランダに行き志願将校としてオランダ軍に入り、1619年の冬に幾何学に基づく万学統一の靈感を得たとされる。翌年、軍籍を離れてヨーロッパ各地を転々とし、1629年以降オランダに隠遁して哲学研究に没頭した。主著『哲学の原理』はニュートンにも影響を与えた。

1633年には『宇宙論』を書き上げていたが、ガリレオ裁判の報を耳にして出版は中止した。その後、多数の書籍を出版する。平面座標やアルファベットによる数式の表記法を考案するなど数学への貢献も大きい。最期はスウェーデンで永眠。



1) 世界は物質で充満しており、物質を構成する粒子が衝突して生み出す渦巻きが天体運動や重力を作り出すとする理論。

2) 空に複数の太陽が見える現象。太陽光が、太陽の周囲にある氷の粒でできた雲によって屈折することで起こる。

3) 例えば、デカルトは空気の粒子が衝突し、その欠片が火の粒子となり高速で運動することによって発火すると思った。

Profile 025 ホイヘンス (Christiaan Huygens, 1629 ~ 1695)

オランダの物理学者、天文学者、数学者。ライデン大学とブレダ大学で法律、数学、自然哲学を学んだ。若い頃から曲線の求積などの数学上の業績で頭角を現し、微積分学の形成に貢献した。兄のコンスタンチンと共に望遠鏡を改良し、1655年に土星の衛星の1つタイタンを発見、さらに土星の輪を同定した。

1656年に振り子時計を完成させ、振り子の力学を研究した。1673年に出版した主著の『振り子時計』では衝突論や縮閉線（特にサイクロイド曲線）の研究や円運動の遠心力理論、重力理論など貴重な研究成果を発表した。

1678年、衝撃波の伝播に関するホイヘンスの原理を主体とする光の波動説を展開し、特に結晶の複屈折現象の解明に注力した。



コラム 最初の統計学者

1660年に王立協会が発足したときの構成会員は、科学者・医者・貴族・法律家・公務員・文筆家などであった。発足から2年後、ある商人（具体的には、生地屋）を会員に加えるかという問題が生じ、会員たちは後援者のチャールズ2世にうかがいを立てた。これに対し王は、その商人の入会を勧め、さらに今後も彼のような商人の入会を認めるべきだと答えた。

その生地屋とはジョン・グラントで、1662年に『死亡表についての自然的政治的考察』という有名な本を出版した人物である。1563年以来、ロンドンの教区教会の庶務係は埋葬された人々の記録をつけていた。記録が付けられ始めた当初はほんのわずかな情報しか掲載されなかったが、次第にそれらの死亡表は埋葬者の死因についての詳細が記載されるようになった。そして1625年からは死亡表の内容が年度別に整理されて出版されるようになり、人々は主にゴシップになりそうな風変わりな死亡例を求めてこれを購入した。それに対し、グラントは死亡表からゴシップよりももっと有益な情報が得られるはずだと考えて1604年から1661年の死亡表をすべて入手して分析し、その結果を先述の本として出版したのである。

グラントはこの分析から、今日では周知の事実となっているが当時としては目新しい統計的事象を発見した。すなわち、グラントは「男性の方が女性より出生数が多く、女性は男性よりも長生きする。疫病の流行等が起こらない限り毎年の死亡者の人数はほぼ一定である」ことに気付いた。グラントはさらに「男性の方が寿命が短いので、結婚適齢期までには男女はほぼ同数となる。したがって、一夫多妻制の認可は不要である」とも記している。

こうした彼の功績の中で最も重要なものは、寿命表の発案である。これは、ある年齢の人間があと何年生きられるかを示すもので、このような情報を基にして最初の生命保険会社がおおよそ40年後に設立された。また、彼は当時200万人と考えられていたロンドンの人口を、様々なデータから38万4千人と見積もり、限られた量の統計情報から全体に関する推測が可能であることも示している。

第5章のまとめ

- (1) ガリレオは地動説を自然学的に基礎づけるために思考実験を多用し『天文対話』を著す。
→宗教裁判にかけられ、処刑される。
- (2) また、ガリレオは魔術的自然観を否定し、機械的自然観を提示。
→第一性質と第二性質をすべて第二性質に置き換えた（粒子論的自然観）。
- (3) デカルトは『精神指導の規則』で独自に確実な拠り所を求めることを宣言。
→物心二元論・延長・松果体などのことを考える。
- (4) また、デカルトは渦動宇宙論を提唱し、重力現象を粒子論的に説明した。

第6章 ニュートンの総合

宇宙には同一のデザイナーのしるしがある。
— アイザック・ニュートン

6.1 近代西洋科学とニュートン

西洋近代科学の系譜

- * 17世紀前半までに、コペルニクスに始まる近代科学はその基本となる成果を挙げてきていた。
 - ◇コペルニクス：地動説を提唱した。
 - ◇ケプラー：楕円軌道を発見し、惑星運動論を築き上げた。
 - ◇ガリレオ：落下運動の法則や円慣性を発見した。
 - ◇デカルト：慣性原理を提唱した。
- * これらの成果を見事に統合し、一つの理論体系に組み立てたのがニュートンである（図 6.1）。
- * こうした一連の科学の大規模な変革を科学革命（Science Revolution）¹⁾という。

ニュートンの主な功績

- * アイザック・ニュートン…イギリスの数学者、物理学者、天文学者。
 - ◇流率法：微分法を考案。のちに、逆演算である積分法も発明。
 - ◇光の色彩理論：プリズムを用いた実験が知られる。🔊 p.75 **コラム** ニュートンの光学研究
 - ◇重力の理論：遠心力を定式化し、月の運動に適用。

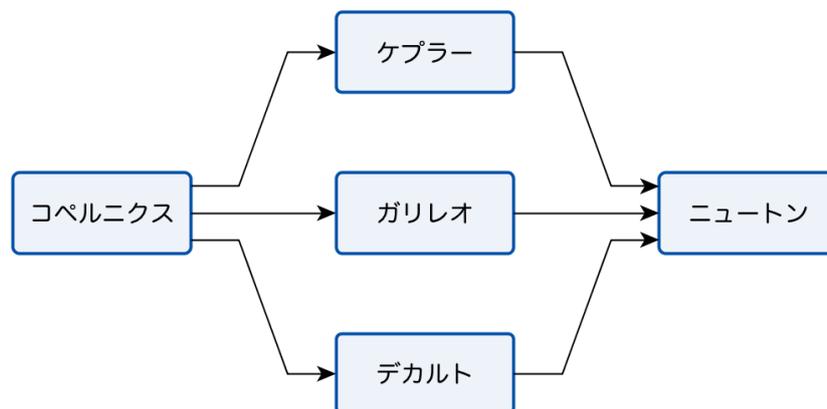


図 6.1 西洋近代科学の系譜

¹⁾ この科学革命はバタースフィールドの科学革命や17世紀科学革命とも呼ばれる。「科学革命」はもう1つ別の概念（クーンの科学革命）を指し示すことがあるため、こちらの科学革命を英語表記する場合には Science Revolution と単語の頭を大文字にして区別する。

6.2 ニュートン力学の誕生

万有引力の発見

- * 1665 年から 1667 年にかけてケンブリッジはペストの流行に巻き込まれた。
 - ニュートンは故郷ウルソープに疎開し、実家の小部屋に籠もって研究に熱中。
 - 『哲学原理』（デカルト）や『天文対話』（ガリレオ）などを読み、のちの業績の基礎となるアイデアを次々と生み出していった。
- * 1679 年、光学研究に専念していたニュートンはロンドン王立協会の書記ロバート・フックから協会機関誌への寄稿を依頼される。
 - ニュートンは継続的な寄稿を断ったが、フックと書簡で議論。
 - 万有引力の概念・距離の 2 乗に反比例する力と楕円軌道との関係を把握。
 - しかし、これらの発見をフックも含め誰にも明かさず。
- * エルモンド・ハレーがニュートンを訪問。
 - 距離の 2 乗に反比例する力で引かれる物体の軌跡を質問すると、ニュートンは楕円と即答。
 - 驚いたハレーはニュートンに書物に著して体系化することを提案。
 - 1687 年、『プリンキピア（自然哲学の数学的諸原理）』出版。

Profile 026 ニュートン (Sir Isaac Newton, 1643 ~ 1727)

ニュートンは農家に生まれ、恵まれない少年時代を送った後、叔父の助力で 1665 年にケンブリッジ大学を卒業した。同年、ペストが流行し一時帰郷した。この間に二項定理や微分法を発明したほか、光と色の性質に関する研究や反射望遠鏡の発明で功績をあげ、さらに万有引力の基本的着想を得たと言われる。1667 年にケンブリッジに戻り、師アイザック・バローをついでルーカス数学教授に就任した。その後、国会議員や造幣局長を歴任し、大学を辞めた。1705 年にはナイトの称号を授かる。



『プリンキピア』を 1687 年に公刊したことは、近代の数学的自然科学のモデルとして科学史上最大の功績と言われている。一方、1672 年に発表した「白色光は種々の色光が混成したものであり、各単色光はそれぞれの物質に対して一定の屈折率と反射能を有する」という考えは、従来の光学概念を根底から変えたばかりでなく、彼の錬金術研究と結びついて自然物体の色を通して物体の微細構造を解明しようとする試みにつながった。

また、彼は薄膜干渉色の数学的研究（ニュートンリングの研究として知られる）から光の周期的性質を明らかにし、さらに光と物質あるいは物質粒子間の相互作用を中心に捉えて光学・化学現象の研究を発展させ、大著『光学』にまとめた。その巻末に付された「疑問」は、実り豊かな問題提起として 18 世紀後半の科学者に対し、実質的には『プリンキピア』よりも大きな影響を与えたとさえ言われる。晩年は王立協会の会長として多くの優れた弟子を育てるとともに、神学や聖書年代学の研究にも没頭した。

コラム プリンキピア

物理学における最も偉大かつ飛躍的な前進は一見したところ異なっている現象が実は同一の基本的原理に帰せられることを発見したときに起こる。そのような統一のうち最大のものの1つを成し遂げたのがニュートンである。彼は、物体の地表への落下・月の地球をめぐる運動・惑星の太陽をめぐる運動・さらに彗星の風変わりな軌道をただ1つの法則、すなわち万有引力の法則で説明されることを最初に示したのである。

ニュートンが『プリンキピア』の原稿を用意したのは1680年代のことであるが、彼自身はその20年も前にこのアイデアの着想を得ていた。晩年になって、ニュートンが語ったところでは、彼はリンゴが木から落ちるのを見て、月も地球に向かって落ちてよいのではないかと不思議に思ったのがそのきっかけであったらしい。1666年に円運動を研究し、計算により重力の逆2乗性を導いた。

しかし、1666年からしばらくの間、ニュートンの関心は光学と化学に向けられた。1679年になってフックが重力の逆2乗性の証明を求めてきたことからニュートンは再び惑星の運動に関心を抱くようになる。ただし、ニュートンはこのときフックに自らがかつて行った計算を示さなかった。やがて1684年に王立協会書記官のハレーに促されてやっと、ニュートンはこの業績を出版することを決意した。その後2年半の間にニュートンは『プリンキピア』を執筆した。このときニュートンはすべてをラテン語で書いた。また、彼は早くから微積分の理論を発展させていたが、この本では当時の慣習にしたがって物理学の問題を議論するのに古いユークリッド幾何学を用いている。

ハレーはニュートンから送られてきた原稿の各章を編集して印刷の監督を行ない、そのために2人の職人を雇った。さらに、その頃の王立協会には充当できる資金がなかったため、ハレーはこの印刷にポケットマネーをあてたりもした。こうして、質量・運動量・力・空間といった基礎概念の定義にはじまり、惑星や衛星の運動・落下運動・投射体を定量的に説明した大著『プリンキピア』が、やっと1687年に出版されることになったのである。

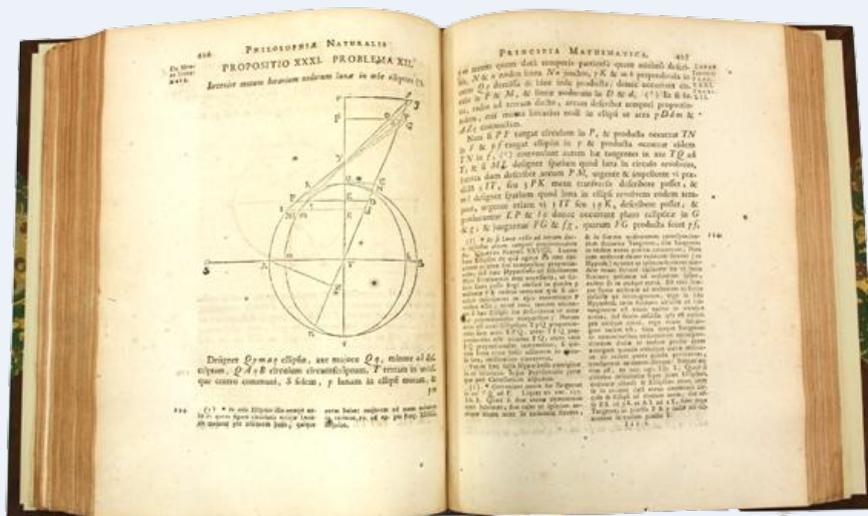


図6.2 『プリンキピア』の1ページ

Profile 027 フック (Robert Hooke, 1635 ~ 1703)

イギリスの自然哲学者、物理学者。優れた発想と実験の才能をもち、その活動は広範かつ多彩であった。オックスフォード大学に学び、王立協会の実験主任や書記として実験哲学の推進に尽力した。1665年からはグレシャム・カレッジ幾何学教授も務める。

ボイルの助手時代には、ボイルとともに真空ポンプの改良に着手し、それをを用いて空気の諸性質を研究、とりわけ大気圧の高度による変化を明らかにした業績は大きい。また、1660年には弾性体の伸びに関するフックの法則を定式化し、その知見をもとにゼンマイ時計を考案した。さらに顕微鏡の取り扱いにも優れ、コルク片の観察から植物細胞の存在を発見した。

振り子の運動を利用して重力が測定できること、地球・月の共通重心が太陽のまわりの楕円軌道を描くこと、重力が距離の2乗に逆比例することなどを示唆し、ニュートンの『プリンキピア』執筆へのきっかけを与えた。光学でも、薄膜に現れる色（干渉現象）の研究によって光の周期性を明らかにした功績は大きい。重力・光の問題をめぐることはニュートンと長く論争した。



コラム 王立協会

1645年何人かの科学者からなるグループがグレシャム・カレッジの天文学教授フォスターの家で非公式に会合をもつようになった。7年後にフォスターが他界すると、ルックがその仕事を引き継ぎ、毎週の会合が続けられた。1657年にはルックが幾何学を教え始め、レンも同校の天文学教授に25歳の若さで就任した。以降、このグループはルックとレンの講義のあとに週2回会合を行うようになった。その中には、ブランカーやウィルキンズ、ボイルなどがいた。3年後の1660年11月28日、グループはその会合を学会として組織することを決定した。ブランカーが初代会長となり、その数日後、当時のイギリス国王チャールズ2世によって学会が承認された。かくして、王立協会（ロイヤル・ソサイエティ）が誕生した。

王立協会は、以降今日まで続いており、現存する世界最古の学会となっている。また、1664年に発刊したその機関誌『王立協会報』（*Philosophical Transactions*）は現存する最古の科学定期刊行物である。

表 6.1 王立協会の主な歴代会長

代	任期	氏名
1	1662年～1677年	ウィリアム・ブラウンカー
12	1703年～1727年	アイザック・ニュートン
32	1890年～1895年	ウィリアム・トムソン
43	1925年～1930年	アーネスト・ラザフォード

Profile 028 ハレー (Edmund Halley, 1656 ~ 1742)

イギリスの天文学者。ロンドンの富商の息子として生まれ、数学・天文学に興味を持って16歳でオックスフォード大学に入学。1676年に惑星運動には関する論文を発表した。セントヘレナ島（アフリカ大陸の西側、大西洋上）に天文台を設けて南天の恒星を観測し、1701年に最初の地磁気図を発表。その後、オックスフォード大学天文学教授やグリニッジ天文台第2代台長を務めた。

彗星の研究は特に有名で、ニュートンの理論に基づいて彗星の軌道を算出し、周期彗星の存在を予言した。ハレーはニュートンを直接訪ねて楕円軌道の可能性を教示されたが、そのとき14歳年長のニュートンと意気投合し、師弟の間柄以上の友好を結んで彼の力学原理を出版するよう懇請し、1687年に『プリンキピア』の公刊に漕ぎ着けた。彼自身も1705年には『彗星天文学概要』を出版している。晩年は月の観測に従事するかたわら、古典数学書の編集にも尽力した。

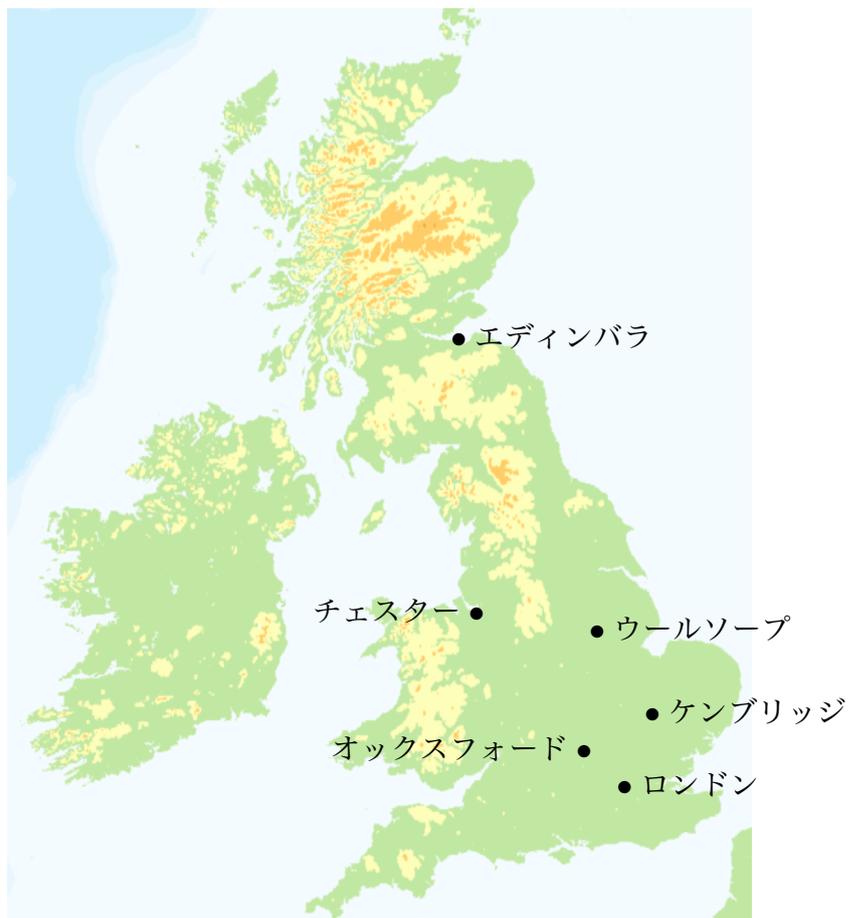


図 6.3 近代以降のイギリス

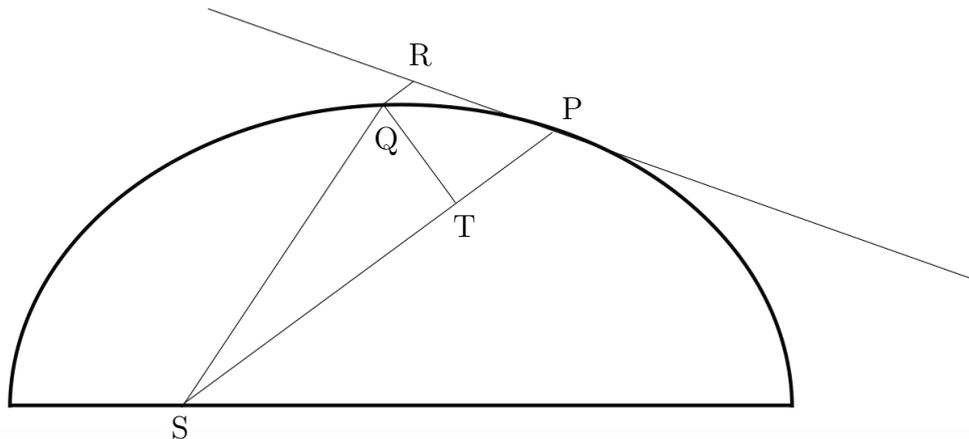
ニュートン力学の体系化

* 『プリンキピア』は全3巻からなる。

◇ 第1巻：運動力学

重力の理論とケプラーの惑星運動の法則との等価性を解説する書の中核。冒頭にニュートン力学の基本法則を提示し、面積速度一定の法則、楕円軌道の法則を幾何学的に証明。

楕円軌道の法則と重力の逆2乗性の証明



P から楕円上の Q まで移動する際にかかる重力は、P が接線上を R まで移動し R から Q まで落下させる重力と等しい。P から Q まで移動するのにかかる時間は、面積速度一定の法則により、 $\triangle SPQ$ の面積に比例する。Q から SP へと降ろした垂線の足を T とすると、

$$\triangle SPQ \approx \frac{1}{2} SP \times QT$$

である。一方、落下距離 QR はガリレオの落下法則により、

$$(\text{落下距離}) \propto (\text{重力の大きさ}), (\text{落下時間})^2$$

であることから、重力を f とすると、

$$QR \propto f \times (SP \times QT)^2$$

となる。したがって、

$$f \propto \frac{QR}{SP^2 \times QT^2}$$

楕円に対して、 QT^2/QR は常に一定であることが示されるので、

$$f \propto \frac{1}{SP^2} \times \frac{1}{k} \Rightarrow f \propto \frac{1}{SP^2}$$

以上より、重力は太陽から惑星までの距離の2乗に反比例する。□

◇第2巻：流体力学

天体に働く重力の逆2乗性と矛盾することを根拠に、デカルトの渦動宇宙論の論駁を図る。
cf. デカルトは当時の科学者にとって、挑戦し乗り越えるべき大きな存在だった。

◇第3巻：実践編

運動力学・重力の理論を太陽系の各惑星に適用し、観測値との関係を吟味。

- * ニュートンは万有引力の概念を、自然界の物体を構成する小さな粒子から、惑星に至るまですべてのものに適用した。しかし、デカルトの後継者は、この考えは魔術的自然観の復活であるとして、当初は万有引力を受け入れなかった。

コラム ニュートンの光学研究

ニュートンはニュートン力学の提唱者という物理学者の顔で広く知られているが、光学についてもいくつかの重要な業績を残している。

ニュートンが行った光学実験の中で、特に有名なものはプリズムを用いて1666年に行われた実験である。彼は、プリズムを通った白色光が作り出す色帯が、全長に対して幅がかなり短くなることの原因を突き止めるために下の図のような装置を作成した。すなわち、窓Fを通して室内に侵入した太陽光（白色光）を最初のプリズムABCによって単色光に分解し、さらに2枚の板を挟んで2つ目のプリズムabcには1種類の単色光しか入らないように工夫した。この装置を用いると、プリズムABCを少しずつ回転させることによって、各単色光が2つ目のプリズムabcによってどの程度屈折させられるかを調べられるというわけである。

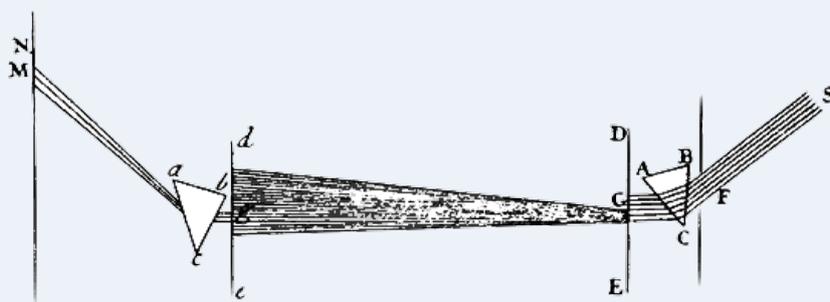


図6.4 プリズムを用いたニュートンの実験

この実験で、ニュートンは紫色の光線が赤色の光線よりもずっと上方に像を結ぶことに気づき、光の色によって屈折率が異なることを見出した。

その後さらにニュートンは、いったん分散させた光をレンズとプリズムで再合成すると白色光に戻ることを実験によって確かめた。これらの結果から、彼は白色光が均一な光ではなく多くの異なった色の光線が交じり合っていることを発見し、プリズムを通った白色光が細長い色帯を形成するのは各色光線の屈折率がそれぞれ異なることに起因すると結論づけた。ニュートンはこの色帯をスペクトルと名付けた。ニュートンのこの研究が、古代からの謎であった虹の色を説明するものであったことは言うまでもないだろう。

6.3 ニュートンの錬金術研究

最後の錬金術師としてのニュートン

- * ニュートンはヘンリー・モア¹⁾の影響を受けていたため、デカルトに批判的であった。
- * 錬金術にも興味を持ち、一時は炉と化学薬品を用い自ら実験を行った²⁾。
→すべての粒子間に作用する万有引力の発見につながる。cf. 共感、親和性（魔術的自然観）
- * 自らが発明した流率法（微分法）の逆の計算である積分法を用いて、粒子間の引力を物体全体にわたって足し合わせる計算方法を発明。
- * ニュートンのもう1つの主著『光学』の末尾に31個の「疑問」を列挙。

ニュートン著『光学』の「疑問」(抜粋)

1. 物体はある距離において光線を曲げることができるのではないか。
6. 黒い物質は、光を反射せず内部に取り込むのではないか。
8. すべての不揮発性物質は、強く加熱すると光を発するのではないか。
9. 火は光を大量に発するほど熱せられた物質ではないか。
12. 視覚は、光線によって網膜が振動させられて生じるのではないか。
19. 光の屈折は、エーテルの密度差によって起こるのではないか。
28. 光は圧力や運動ではないのではないか。
29. 光の正体は発火物質から放出される微小な物質ではないか。

→不可秤量物質の存在仮定（☞ 8.2 節）など、後世の科学者に大きな影響を与えた。



図 6.5 光学実験をするニュートン

1) イングランドの哲学者、神学者、ケンブリッジ大学のプラトン主義思想家の1人、ニュートンはその空間論に影響を受けたと言われる。

2) イギリスの経済学者ジョン・ケインズは、オークションで入手したニュートンの未出版の手稿中に錬金術に関する記述を発見し、ニュートンを「最後の錬金術師」と呼んだ。

コラム 錬金術の歴史

錬金術は単なる誤った化学というわけではなく、化学に大きな貢献をもたらした。それでも、世間的には錬金術は魔術的で神秘的に見えた。錬金術は紀元前6世紀以降に中国の道教とギリシャのピタゴラス学派から始まったと言われている。錬金術知識が発展して西方に伝わるにつれ、道教の化学物質に関する考えとピタゴラス学派の数の神秘説が結びついていった。

もう1つの錬金術の伝統はエジプトのゾシモスのような香料や薬品で死体に防腐処置を施す人の流れを受け継いでいる。なお、ゾシモスは現存する最古の錬金術知識の要約の1つを書いた人物である。本格的な錬金術は古代ギリシャのアリストテレスの物質理論とエジプトの経験的技術をもとに、1～3世紀頃アレクサンドリアで起こったと考えられている。

中国では、初期の錬金術師たちは不老長寿をもたらす生命の霊薬エリキサ (the elixir of life) を探していた。そして、彼らは馬王堆の死体保存のような驚くべき仕事をいくつか成し遂げた。彼らは紀元前186年頃、ある女性の遺体を硫化水銀を含む茶色の液体とメタンガスで気密された二重の棺桶に入れて埋めておいた。この棺桶は2000年以上経った後に発掘されたが、その際の遺体の肉体には目につくような劣化はなく、ほんの1週間前に死んだ人のようであった。

中国の錬金術がインド人に伝わると、錬金術の知識はむしろ病気の治療法としてインド人たちの興味を引くことになった。そして最終的には東の中国から来た考えとピタゴラス学派から伝わったアレクサンドリアの錬金術の伝統は、アラビア人によって結び付けられることになる。こうして成立したアラビア人の錬金術では占星術の影響が大きく、化学反応は惑星の影響によって起こると考えられ、数秘学や容器の形でさえもが化学反応を決定する要因と考えられていた。また、不老長寿の薬エリキサと賢者の石の概念が結びついたのもこの時期のことと考えられている。実際、「エリキサ」という語を最初に用いたのは8世紀のアラビア人錬金術師ゲーベルである。彼の著作はあまりに卓越していたので、以降多くの錬金術師が自分の著作をゲーベルの名で書くこととなった。特に、12世紀のある有能な化学者の1人は「にせゲーベル」として有名になった（その正体はスペイン人だと言われている）。

ルネサンス期のヨーロッパは、より実体のあるアラビア科学とともに錬金術を取り入れ、16世紀にはヨーロッパでも錬金術が盛んに行われるようになった。パラケルススは外科医としても化学者としても成功した錬金術師である。彼の業績には、亜鉛についての最初の記述や石炭の採掘が肺の病気を引き起こすことの発見、苦痛を和らげるためのアヘン使用などがある。また、パラケルススは「私は賢者の石を発見した。だから永遠に生きるだろう」と公言していた。しかし、実際には彼は50歳のときに泥酔して滝に落ちて死んでしまった。パラケルススの後継者リバヴィウスは1597年に『アルケミア』という最初の化学書を出版した。彼は錬金術師であったが、科学者としても優れていたのである。

錬金術の伝統は18世紀まで生き続けた。ニュートンも晩年は賢者の石の発見のために多くの時間を費やしたとされており、一説には、彼は実験中の水銀中毒により発狂してしまったとさえ言われている。最終的には、ラヴォアジエが化学についての科学的見解を18世紀後半にとりまとめ、2000年も続いた錬金術の伝統は、ほぼその幕を閉じることになった。しかしその飽くなき探究精神と高度な実験手法は、現代の科学にも脈々と受け継がれている。

6.4 ニュートン力学のフランスにおける受容

抵抗するフランスの科学者たち

- * フランスにはデカルト信奉者が多かったため、万有引力はなかなか受容されず。
→デカルト流の機械論的自然観に基づき、重力は粒子の渦動によって生じると主張。
- * 特に、地球の形についてのニュートンとフランス科学者の主張は対立していた。
 - ◇フランス科学者
微粒子の回転は地球の自転と同じ方向に回転するものが多いから、地球上の重力は極地方より赤道地方の方が大きい。 *i.e.* 「地球は縦長」と主張¹⁾。
 - ◇ニュートン
万有引力により、地球には一様の重力が生じる。しかし、自転による遠心力があるため赤道付近が膨らむ。 *i.e.* 「地球は横長」と主張。
- * フランス学士院は、ペルーとラップランド²⁾に調査団を派遣。
→緯度差 1° に対する子午線の長さが高緯度ほど大きいことを発見。
→ニュートンの理論が正しいと結論（地球はいわゆる回転楕円体）。
→フランスでもニュートン力学が全面的に受容される。
- * ニュートン力学はデカルトやライプニッツの解析学によって表現され、解析力学に発展。
→パリの王立天文台では組織的に極めて精密な観測が行われたが、その観測結果は解析力学による計算結果と完璧に合致していた。 *cf.* ラグランジュ『解析力学』
- * 18C 末まで、ニュートン力学は宇宙をほぼ完全に説明する理論として、科学の模範とされた。

Profile 029 ライプニッツ (Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646 ~ 1716)

ドイツの哲学者、数学者、政治家、外交官。12 歳のときにほとんど独学でラテン語を習得し、1661 年にライプチヒ大学に入学、法学と哲学を学ぶ。1666 年にアルトドルフ大学で法学博士を取得。1700 年にベルリン科学アカデミーを創設し、初代総裁となる。

1667 年からマインツ選帝侯に仕え、外交顧問と図書館長を兼任して政策の立案などを行い、1672 年にパリ派遣される。以降 1676 年に死ぬまでハノーバー侯に仕えたが、晩年は不遇であった。

科学分野では様々な功績があるが、中でもニュートンとは独自に確立した微積分法が有名。同時代の多くの知識人と活発に書簡を交わして学問の統一・体系化を目指した。また、今日の論理学における形式言語を考案し、2 進法を数学的に確立した。東洋哲学にも関心を寄せ、バロックの知の巨人と称されることもある。彼の哲学はのちにウォルフによって変形・体系化されて普及し、ドイツ啓蒙主義の主潮であるライプニッツ・ウォルフ学派を形成した。



¹⁾ 1700 年や 1718 年にフランス科学アカデミーが行った（不正確な）測定が、この結果を支持していたという背景もある。

²⁾ ノルウェー北部から白海までの沿岸地帯。現在のフィンランド・スウェーデン・ロシアを含む地方。

第 6 章のまとめ

- (1) ニュートンは自らの大成した力学体系を『プリンキピア』にまとめる。
→フランスでは地球回転楕円体説が実測によって証明されるまで受容されず。
- (2) ニュートンには、それ以外にも流率法（微分法）の発明・光彩理論・重力の理論などの功績がある。
- (3) ニュートンを皮切りに、コペルニクスの地動説・ケプラーの惑星運動の法則・ガリレオの物理学など、それまでのすべての要素を総合・体系化する科学革命が起こる。

第7章 化学革命

同じ日時計でも、日影にあれば何の役にも立たない。
— ベンジャミン・フランクリン

7.1 フロギストンによる燃焼理論

旧来の燃焼理論

- * 燃焼に関する仮説は、古代ギリシャの時代から様々な科学者によって唱えられてきた。

旧来の燃焼理論

アリストテレス：四元素の1つである火の元素が、火の現象を引き起こす。

→古代・中世の多くの科学者がこの考えに立脚。

デカルト：小さい微粒子がきわめて速く運動することにより炎が生じる。

ニュートン：炎は赤熱する発散蒸気である。

- * 燃焼理論の確立こそ、科学史における次のステップであった。

フロギストンの起源

- * ヨハン・ベッヒャー… ドイツの化学者、医者。
四元素の1つ「土」を「油性の土」と「石性の土」のに区分し¹⁾、前者が消散することで燃焼が起こると主張した。また、彼は可燃性を表現するために「フロギストス」という語を用いた。
- * ゲオルグ・シュタール… ドイツの化学者、医者。ベッヒャーの弟子。
ベッヒャーの唱えた「油性の土」をフロギストン²⁾と名付け、その理論を体系化。
 - ◇炭にはフロギストンが大量に含まれ、燃焼すると少量の灰しか残らない。
 - ◇金属を火に入れると煨燃^{かしよう}がおこり、金属灰が形成される。
 - ◇空気はフロギストンのある一定量しか吸収できない。この量が飽和し、物質がフロギストンを放出できなくなると、燃焼は終わる。
∴ 密閉した容器に入れるとじきに火が消えてしまう。
 - ◇密閉した容器に小動物を入れると、じきに倒れてしまう。
∴ 呼吸は燃焼と類似の現象であり、動物の体内からフロギストンが排出されるから。
- * フロギストンの概念を用いた理論は18世紀に支配的理論となる。
→多くの化学者がこの説に囚われてしまい、化学の進歩が遅れる要因となった。

¹⁾ 教科書には2種類しか登場しないが、実は、ベッヒャーは「土」を3種類に分けた。その3種とは、実質を担う「石性の土」、色と燃焼を担う「油性の土」、そして形・臭い・重さを担う「流動性の土」である。

²⁾ フロギストンは「燃焼の素となる元素」の意、日本語では「燃素」と呼ばれることもある。

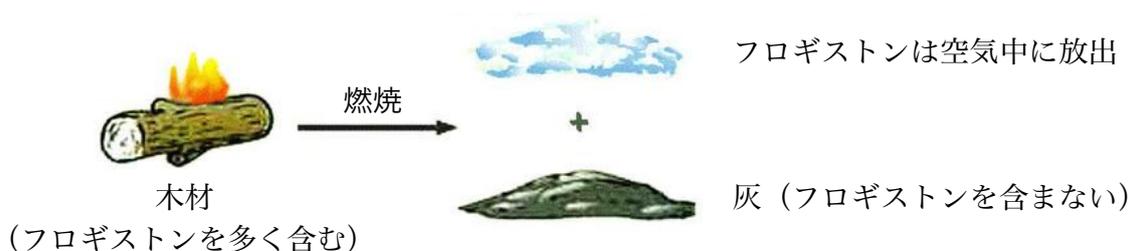


図 7.1 フロギストン説

Profile 030 ベッヒャー (Johann Joachim Becher, 1635 ~ 1682)

ドイツの化学者、医者、経済学者、冒険家。若い頃は家が貧しく、家計を助けなければならなかったが、その苦境の中で諸国を遍歴して独学し、多くの書物を著した。やがては皇帝顧問官の令嬢と結婚し、彼は将来を嘱望される地位に就くことができた。

植民と交易に興味を持ち、1666年にはマインツ大学の教授としてライン・ドナウ運河を作ってオランダなど低地地方と交易する必要性(重商主義)を説いた。その後、ウィーンで商業会議所顧問を務める。

やがてイギリスに渡ってオーストラリアへの紡績工業移植に従事する傍ら、鉱物その他の物質の本質の研究に熱中し、1669年に『地中の自然学』を著した。このうち、燃焼の本質に関する彼の理論は弟子シュタールのフロギストン説形成に大きな影響を与えた。

そのほか、アルコールと硫酸からエチレンガスを生成する方法や石炭からコークスおよびタールを生成する方法を発明したこと、海砂から金を抽出したことなど多数の業績がある。



Profile 031 シュタール (Georg Ernst Stahl, 1660 ~ 1734)

ドイツの化学者、医者。イエナ大学で医学を修め、23歳で講師となった。1687年からワイマール侯侍医を務めた後、1694年にハレ大学の医学・植物学・生理学・薬学教授となる。このとき、彼は内科向けの教科書を書いた。さらに1716年にプロイセンのフリードリヒ・ウィルヘルムの侍医となってベルリンに定住するようになる。

化学者としてはフロギストン説を打ち立てた他にも、酸・塩基・塩の区別を確立し、その後の化学思想に深い影響を与えた。また、氷酢酸を初めて作った人としても知られる。

一方生物については、生命過程に特有のものとしてアニマ(精神)の存在を想定する独特の理論(生氣論)を展開した。すなわち、アニマが去ると死が起こり、出血や発熱はアニマのもつ障害除去法の1つであると説いた。



■ 固定空気とフロギストン

- * ロバート・ボイル … イギリスの化学者、王立協会代表。
1661年『懐疑的化学者』¹⁾の中で空気には3つの種類の成分が含まれていると考えた。
 - ◇ 純粋な空気の成分
 - ◇ 土・水・植物・動物から蒸発（発散）される蒸気の成分
 - ◇ 地磁気や光などからなる成分
- * スティーブン・ヘールズ … イギリスの生理学者、化学者、医者。
空気の成分のうち、鉱物・植物・動物に多く取り込まれるものがあることを指摘。
→これを「固定空気」と名付ける。
- * ジョセフ・ブラック … イギリスの物理学者、化学者。
マグネシア・アルバ（炭酸マグネシウム, $MgCO_3$ ）や石灰石（炭酸カルシウム, $CaCO_3$ ）から生じる特有の気体を発見（表 7.1）。
→ヘールズにならい、これを「固定空気」と呼ぶ。
- * 動物の吐息や木炭の燃焼によって生じる空気にも、石灰水を白濁させる性質があったことから、固定空気にはフロギストンが含まれていると考えられた。
→フロギストンを含む空気は、植物がフロギストンを取り込むことで再び浄化されるとした²⁾。
- * ジョセフ・プリーストリー … イギリスの化学者、バーミンガムで活躍、非国教徒。
 - ◇ ソーダ水の発明：固定空気を水に溶かす。
 - ◇ 硝石空気の実験：硝石空気と様々な空気を水上で反応させると、反応による空気の減少分が空気的良好度を示していることを発見。
 - ◇ 硝石空気を用いて空気の良し悪しを調べる装置を制作し、ユージオメーターと命名する³⁾。
 - ◇ ユージオメーターを使った実験：水銀灰を加熱すると放出される気体を発見。
→この空気が最も高い良好度を示したので「フロギストンを欠いた空気」であると考えられ、脱フロギストン空気と命名される。

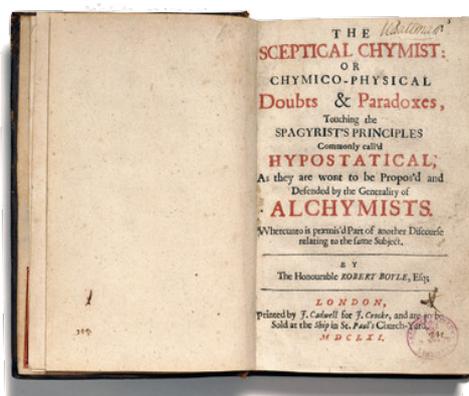


図 7.2 『懐疑的化学者』表紙

1) アリストテレス主義者・パラケルスス主義者・化学者（粒子論者）とその他2人（ホスト役と一般人）による対話の形式で書かれた書物。その中でボイルは、化学者は仮説は立てられても実証は不能だと主張。
2) 18世紀の自然科学者たちは、このようなフロギストンという燃焼の素の循環に、自然の中の摂理と経済性を見出した。
3) これによって、ネズミなどの生物を使った生物実験に頼らずとも、空気の良し悪しを量的に判定できるようになった。

Profile 032 ボイル (Robert Boyle, 1627 ~ 1691)

イギリスの化学者、物理学者。近代化学の祖と呼ばれる。
貴族の家に生まれ、ヨーロッパに遊学。1664年に帰国し、「見えざる大学」と呼ばれる学者グループの中心となり、自然研究における実験の重視を唱える「新哲学」の発展に専念する。後に、このグループが中心となってロンドンの王立協会が設立された。彼自身は姉の邸宅に立派な実験室をもち、数人の使用人や弟子とともに研究を行った。

1654年に共和制下のオックスフォードに移住し、助手のロバート・フックと共に真空ポンプの改良に着手、1659年に完成させた。以降、これを用いて真空中での落体の実験を行ったり、音の伝播への空気の寄与を証明したりした。1662年には気体の圧力と体積に関するボイルの法則を発見した他、多方面にわたる物理学上の研究をなし、数々の功績をあげた。

また、化学にも強い関心を寄せ、混合物と化合物の概念、酸とアルカリの実験的識別手段、金属の煅焼を始めとする燃焼、呼吸など後半な実証研究を通して、自己の粒子論・機械論を展開した。これにはアメリカの錬金術師ジョージ・スターキーの影響もあるとされている。一方で、こうした主張がキリスト教と矛盾しないと主張し、その主張をさらに推進すべく、死後に「ボイル講演」が設立された。



コラム 18世紀に発見された物質

18世紀の化学者は、物質が起こす反応によって明示される化学成分が化学分類の鍵になるということに気付いたため、急激に既知の物質を増やすことに成功した。特に、鉱酸（塩酸、硫酸、硝酸）の1つと石灰に含まれるアルカリ土類などを反応させて作ることでできた塩類は多くの物が発見された。

また、17世紀までは気体は反応とは無関係なもののみなされ研究の対象とされていなかったが、ハールズが気体用水槽を発明するとこの状況は変化した。以降、ブラックやプリーストリーなどの活躍によって多くの気体が次々と発見されていった。

表 7.1 気体の発見

発見年	発見者	発見者の命名	現在の名称
1775年	ジョセフ・ブラック (英)	固定空気	二酸化炭素
1766年	ヘンリー・キャベンディッシュ (英)	可燃性空気	水素
1772年	ダニエル・ラザフォード (英)	フロギストン化空気	窒素
1772年	ジョセフ・プリーストリー (英)	酸の空気	塩化水素
1772年	ジョセフ・プリーストリー (英)	硝石空気	一酸化窒素
1774年	カール・ヴィルヘルム・シェーレ (独)	脱フロギストン塩酸	塩素
1775年	ジョセフ・プリーストリー (英)	脱フロギストン空気	酸素

Profile 033 ブラック (Joseph Black, 1728 ~ 1799)

イギリスの化学者、医者。グラスゴー大学で医学や自然科学を学んだ後、1751年にエディンバラ大学に移り、医学の勉強を続けた。卒業後は一旦グラスゴー大学の化学講師を勤めてから同大学の医学教授となった。

「固定空気」の分離同定とその諸性質に関する研究と潜熱の理論を確立した功績が知られている。ジェームズ・ワットとも親しく、ブラックの潜熱理論はワットの凝縮蒸気機関の発明に大きな影響を与えたと言われている。

また、ブラックはアルカリの研究でも知られている。彼のこの研究は、膀胱結石の治療法探索から始まったものである。当時は麻酔薬や消毒薬がなかったため外科手術が大変危険なものであり、患者を傷つけない穏やかな方法で膀胱結石を溶かす方法が求められていた。

その他にも、比熱の概念考案をはじめとする多数の業績がある。しかし、著作の数は少なく、死後に彼の講義ノートを基に出版された『初等化学講義』ほか数編の論文が知られている程度である。



Profile 034 プリーストリー (John Boynton Priestley, 1733 ~ 1804)

イギリスの化学者。急進的非国教徒の牧師。織物職人の家に生まれ、はじめは牧師の道を歩む。その後、語学教師となる。1764年に2000名に及ぶ歴史的人物の『伝記図表』を完成させて法学博士となった。1774年にヨーロッパ旅行をし、この間にラヴォアジエと知り合った。彼の政治的立場は彼の宗教と同様、当時としては非正統的で急進的であった。彼は民主主義者であり、フランス革命を支持した。当時のイギリス政府は民主主義を破壊活動とみなしていたため、プリーストリーはこのために目をつけられることになり、1791年には政府に扇動された暴徒たちに自宅に侵入され、実験室を始め家屋内を破壊してしまった（バーミンガム暴動事件）。これを機に彼はイギリスを離れ、民主主義に共鳴する者が多いアメリカへ逃れた。

生涯を通じて大小100以上の著作を残しているが、そのほとんどが神学に関するものである。それ以外に、プリーストリーの有名な化学的業績を出版した『種々の空気についての実験と観察』（全3巻）や『自然哲学のさまざまな部門に関連する実験と観察』（全3巻）、優れた科学史書『電気学の歴史と現状』などがある。

酸素の発見をはじめとして、種々の重要な機体の単離固定を行ない、気体化学の発展に貢献したが、伝統的なフロギストン説に最後まで固執したため、理論の面ではそれほどの業績を上げられなかった。



コラム ユージオメーター

プリーストリーが実験に用いたものは、種々の円筒や瓶、台所用具、物質を過熱するための銃身、そして用途に合わせて制作された極めて簡素な器具だけであった。プリーストリーの友人ウエッジウッドは、彼のために陶磁器で実験器具を制作した。こうして作られたプリーストリーの実験機器類は、大変簡素な設計でありながらもかなり機能的なものが多かった。

プリーストリーのユージオメーター（気体の良度を測定する器具）は、一端が開いたただの瓶であった。彼は硝空气（現在の一酸化窒素）を水上で大気空气と混合すると体積が減少することを見出し、その体積減少をユージオメーターで捉えることにしたのである。それまでの実験では、彼は呼吸に適した空气の良度を測定するためにネズミを利用していたが、これにより実験動物を苦しめる必要がなくなったのでプリーストリーはとても喜んだという。

なお現代のユージオメーター（水電量計）は水の電気分解によってできる酸素および水素の混合気体の体積から、流れた電気量を求める装置であり、プリーストリーのそれとは若干異なる実験装置である。

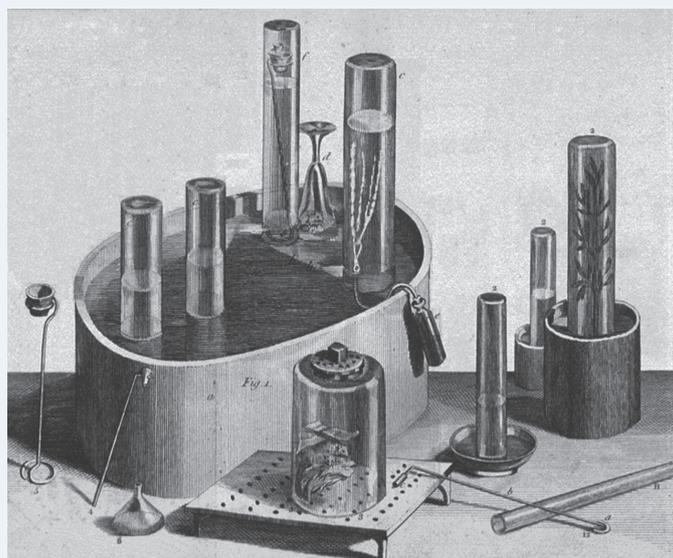


図 7.3 プリーストリーの実験器具

7.2 ラヴォアジエの新しい燃焼理論

フロギストン理論の問題点

- * フロギストン理論の最大の欠点は、金属が煅燃するときに重量が増加することであった。
→フロギストンは金属の外に放出されるはずだが、金属の重量が増加する理由が説明できず。
- * 様々な意見が提出されたが、決定的な打開策にはならなかった。
 - ◇フロギストンは負の質量をもつのではないか。
 - ◇煅焼の際に別の元素が入り込むのではないか。

ラヴォアジエの燃焼理論

- * アントワーヌ・ラヴォアジエ … フランス科学アカデミー会員。化学者。
1772 年から燃焼に関する定量的¹⁾かつ組織的な研究を開始した。
 - ◇リンや硫黄が燃焼により質量を増加することを実験的に発見。
→まわりの空気が燃焼物質に取り込まれる (=「固定される」) ため。
 - ◇燃焼物質と結びつくのは固定空気であると推測。
 - ◇1774 年にプリーストリーとパリで会談し、脱フロギストン空気について語り合う。
→燃焼によって吸収される空気は脱フロギストン空気であると気づく。
(「呼吸にたいへん適した空気」や「空気のもっとも純粋な部分」と呼ぶ)
→これらは酸に含まれていることを発見、酸素と呼ぶようになる。
- * 物質が燃焼するとき、物質からフロギストンが逃げていくのではなく、物質の成分と酸素が結合して、その結合物が気体として大気中に散っていく。
 - ◇煅燃：金属と大気中の酸素が結合し、そのまま金属にとどまる (∴質量増大)。
 - ◇呼吸：大気から酸素を取り込み、体内である物質と酸素を結合させ、その気体を吐き出す。
→近代的な科学理論の根底となる。
- * 科学アカデミー内の委員会で、酸素以外の単純物質の名称も定める。ex. 水素、窒素、炭素
 - ◇塩類には組成により金属と酸の 2 つの部分から成る名称を与えた。cf. リンネの二命名法
 - ◇酸部分の語尾によって含有される酸素の量がわかるようにした。
ex. 亜硝酸カルシウム (calcium natrite), 硝酸カルシウム (calcium natrate)→1787 年に『化学命名法』にまとめる。cf. 『化学元素要論』
→こうした体系的な命名法は、新たな物質の発見にも役立った。
- * しかし、ラヴォアジエの燃焼理論はなかなか受け入れられず (フロギストンの理論に固執)。
→ラヴォアジエの化学理論が受容されるのは、もう一世代後のことであった。
- * ラヴォアジエは、政治面ではアンシャン・レジームを支えた²⁾。
→1794 年、断頭台 (ギロチン) で処刑される。

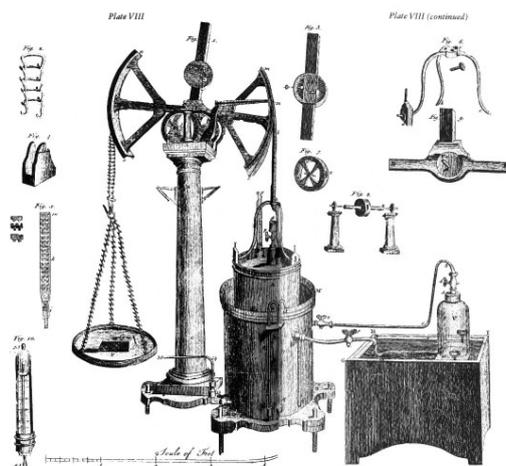


図 7.4 ラヴォアジエのガスメーター

1) 不可秤量物質の概念が一般的であった 18 世紀には、彼のとった方法はとても独特なものであった。

2) 王立科学アカデミーの特権ある正会員であり、徴税請負人でもあった。さらに、彼は火薬に関する膨大な研究をはじめ、国家のために多くの科学的な研究も行った。

Profile 035 ラヴォアジエ (Antoine-Laurent de Lavoisier, 1743 ~ 1794)

フランスの化学者、役人、弁護士の家に生まれ、大学では法律を学ぶ。在学中から地質学者ゲタルの地質調査に同行し、科学への関心を深めていく。1766年、市街の照明施設に関するパリ科学アカデミーの懸賞に応募し、注目を集めた。その後、科学アカデミーの会員となり、1787年には幹事長に就任する。また、国家の徴税請負人となり、1772年には貴族の称号を買収する。フランス革命後は革命政権下で度量衡改正委員となるが、旧体制に深く関与していたためやがて逮捕投獄され、ギロチンにかけられて処刑されてしまった。同じフランスの天文学者ラグランジュは、「彼の頭を切り落とすのは一瞬だが、彼と同じ頭脳を持つものが現れるには100年かかるだろう」とその才能を惜しんだという。



ラヴォアジエの化学研究は厳密な定量実験の裏付けを基に、既知の様々な現象が説明できる体系的な理論を打ち立て、近代科学の基礎を形作るものであった。その中でも特に顕著な業績を挙げるのであれば、伝統的要素観の下で長く信じられていた水の土への転換説を決定的に否定したことや燃焼に関するフロギストン説を否定して、新たに燃焼が酸化であることを見出したことなどがある。また、水の組成の決定や質量保存の法則の定式化もその大きな功績である。

コラム ラヴォアジエの天秤とガスメーター

天秤は、ラヴォアジエの実験室で最も重要な器具であった。化学において天秤を用いること自体は目新しいことではなかったが、ラヴォアジエの新しいところは天秤を標準化の道具として用いたことである。彼は、どんな化学反応も反応前後で総重量が等しくなることを示すために天秤を利用した。この目的のため彼は2種類の天秤を使い分けた。日常用のものは実験が正しく行われたことを確かめ、反応の全過程を追跡するのに十分な測定結果を与えるものであった。もう一方の天秤は現在でも作られていないぐらいの精度をもつ、特注の精密天秤である。ラヴォアジエは「化学の有用性と正確さは、実験の前後における成分と生成物の重量測定に完全に依拠する。このためにはどんなに精密であっても精密すぎるということはない」と述べて、食費までもをつぎ込んで驚くほど精密な天秤を手に入れた。ただし、実際のところこの天秤は彼の実験に必要な精確さを大幅に上回っていた。そのためラヴォアジエの新しい化学は、必要以上に高価で大袈裟な装置を要求するビッグサイエンスとなった。

また、ラヴォアジエはこの精密天秤よりもさらに高価な化学装置を所有していた。それはガスメーターという気体の流れを一定に調節して送流した気体の量を計測する装置である。この装置は史上最も高価な化学装置であったと言われている。この装置は化学革命の要となる気体化学の出現とともに実験的に必要な道具となったものであるが、さきほどの精密天秤と同様、実際のラヴォアジエの実験には不必要なほど過剰に精密で高価なものであった。

7.3 ドルトンの原子論

原子論の提出

* ジョン・ドルトン… イギリスの自然学者。

著書『化学哲学の新体系』の中で原子論を提唱する。また、分圧の法則を視覚的に説明。

* 17世紀の機械論的自然観登場以来、物質の粒子論的概念から遠ざかっていた¹⁾化学者たちは、ドルトンの原子論という新たな粒子論的自然観に基づいて、空気と燃焼の研究を基礎においたラヴォアジエの化学理論をさらに発展させる。

→化学組成と原子量の問題²⁾が、19世紀の化学者の課題となる。

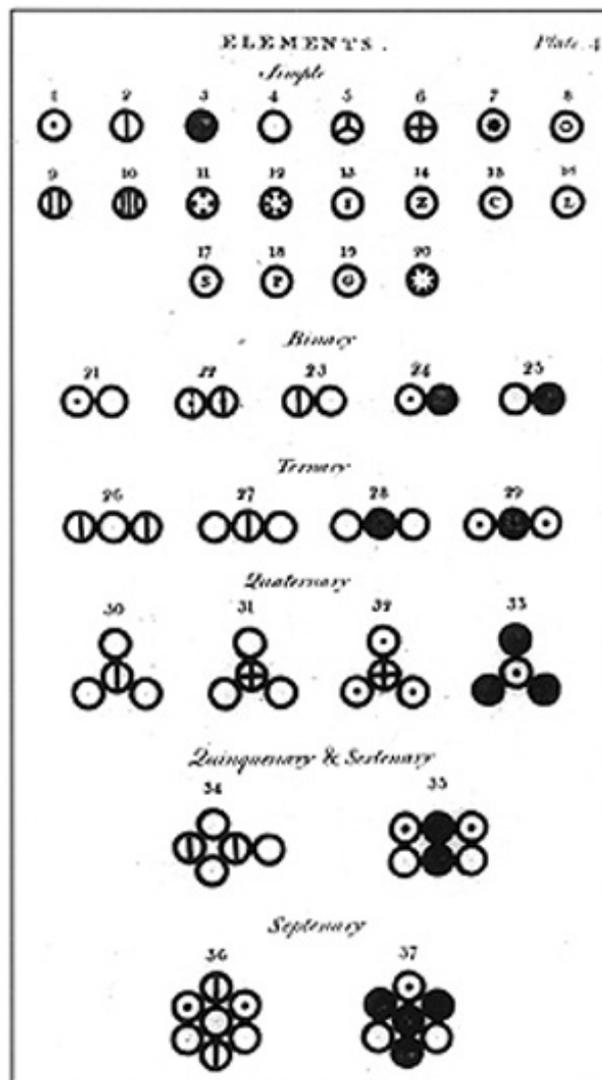


図 7.5 ドルトンの描いた原子や分子

¹⁾ ラヴォアジエをはじめとする化学者たちは「これ以上分解できない物質」である元素と究極の粒子としての原子を結びつけることができなかつたため、原子を想像の産物にすぎないものと捉えていた。これに対しドルトンは、異なる化学元素の究極原子を重量の違いによって区別することで化学理論に原子を持ち込もうとした。

²⁾ ドルトンは「同じ原子同士は互いに反発するため二原子分子はありえない」や「2種類の元素の間に1種類の化合物しか知られていないとき(原則として)その分子は両元素の原子1つずつから成る」など、いくつか誤った仮定をしていた。

Profile 036 ドルトン (John Dalton, 1766 ~ 1844)

イギリスの化学者、物理学者。実家が貧しく、卒業したのは小学校のみであとは独学した。12歳で塾教師となり、15歳で学校の教師、のちマンチェスター・ニューカレッジで数学と物理学を教える。1799年以降は個人教授をしながら自らの研究を行った。

主著『化学の新体系』に発表した有名な原子分子仮説および原子量の概念は、ドルトンの生涯にわたる気象学研究とそれに関連する気体研究と深く結びついていると言われるが、プールの定比例の法則、ドルトン自身が定式化した倍数比例の法則、ラヴォアジエの元素概念をより根源的に総合するものであった。

ドルトンの考えた気体モデルは、単体気体をすべて単一原子から成るとしたり、化合物の分子を構成する原子数に恣意的な仮定を設けたため正しい原子量を得られなかったりと限界はあったが、近代化学の礎を築き、アヴォガドロの重要な研究を触発して現在でも用いられている原子量・分子量の値を導き出す出発点となったその意義は大きい。

また、ドルトン自身が色盲であったため、彼はこれを研究材料のひとつとした。そのため、色盲のことをドーリズムと呼ぶこともある。



コラム ささまざまな元素

元素説は古代ギリシャの時代には既に唱えられていたものであるが、それらは多分に形而上学的で、必ずしも実践的な理論と同等に語れるものではなかった。18世紀になると、こうした状況は変化した。

ラヴォアジエにとって、実験的な証拠以外のものに基礎をおくような化学理論はまったく無意味であって、彼よりも前の人々が提起していた種々の元素説は、まさにそうしたものであった。そこで彼は「これまでに分解されたことのないもの」を単一物質の定義とし、自らの元素表を作り上げた(表 7.2)。ただしラヴォアジエは、当時未分解であったものがいずれ分解される可能性を認識しており、自らの元素表が暫定的なものであることを強調していた。実際、光・カロリック・ライム・バリタの4つは現在では元素として扱われていない。

表 7.2 ラヴォアジエの元素

分類	元素
普遍物	光, カロリック, 酸素, 窒素, 水素
非金属	硫黄, リン, 炭素, 塩酸基, フッ酸基, ホウ酸基
金属	アンチモン, 銀, ヒ素, ビスマス, コバルト, 銅, スズ, 鉄, モリブデン, ニッケル, 金, 白金, 鉛, タングステン, 亜鉛, マンガン, 水銀
土	ライム, マグネシア, バリタ, アルミナ, シリカ

ラヴォアジエに続く科学者たちは彼の「元素」を分解することを懸命に試みた。こうした努力は実を結んで新元素の発見につながることもあれば失敗することもあった。新元素発見の試行を最も成功させた者の1人はイギリスのデーヴィである。彼は、ボルタ電池を用いてさまざまな物質の電気分解を行い、いくつかのアルカリ土類金属とハロゲンを発見した。これらの業績は重大だったが、よきニュートン主義者として自然の単純性や極少数の究極元素を探し求めていたデーヴィ自身にとっては皮肉な結果でもあった。

分子説の登場

- * 19世紀初頭、ゲーリュサック（気体反応の法則を発見）などの研究により、ドルトンの原子論だけでは説明のつかない現象が多く発見される。
→原子論を補う新たな理論が必要とされた。
- * アメデオ・アヴォガドロ…イタリアの物理学者、化学者。
物質をつくる基本粒子である原子と物質がその固有の性質を失わない最小の粒子としての分子を明確に区別する分子説を1811年に提唱。
 - ◇それぞれの気体は、いくつかの原子が結合した分子から成る。
 - ◇同温・同圧の下で同体積の気体は、種類に関係なくすべて同数の分子を含む。→発表当時は実験的証拠が不足しており、登場後約50年間は化学界から無視され続けた。
→やがて種々の実験から分子の存在が裏付けられ、分子説の正しさが証明された。

Profile 037 アヴォガドロ

(Conte Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e Cerreto, 1776 ~ 1856)

イタリアの物理学者、化学者。大学では法学を専攻し、卒業後は弁護士となるが、24歳のときに物理学と数学の研究を始めた。1809年からヴェルチェッリ王立大学の物理学教授を務めた後、1820年以降は長年にわたってトリノ大学の数理物理学教室の教授を務めていた。

1811年に分子説を提唱した。このうちの「すべての気体は等温等圧のもとで同体積中に同数の粒子を含む」という主張は特にアヴォガドロの法則として知られている。この仮説によって、アヴォガドロは気体反応にあずかる諸気体の堆積が簡単な整数比をなすこと（気体反応の法則）を説明し、また水素・酸素・窒素などの気体が二原子分子から成ることを導いた。しかし、この説は1858年にカニッツァーロによってその意義が正しく理解され、1860年のカルルスルーエの国際原子量会議にて紹介されて広く認知されるようになるまで、約半世紀間影響力を持たなかった。のちに分子の実在性が証明されると、分子説は化学教育の最初に必ず取り扱われる基本法則の1つにまでなった。



第7章のまとめ

- (1) ベッヒャーは四元素の一つ「土」を、「油性の土」と「石性の土」に分類。
- (2) シュタールは「油性の土」をフロギストンと命名。
- (3) ヘールズは固定空気（物質の中に固定された空気）の概念を提唱。
- (4) ジョセフ・ブラックはマグネシア・アルバや、石灰石から生じる特有の気体が固定空気であると説明。また、動物の吐息や物質の燃焼で生じる空気にも固定空気が含まれていることから、「固定空気」にはフロギストンが含まれているとする。
- (5) ジョセフ・プリーストリーにはソーダ水開発・ユージオメーター発明・脱フロギストン空気発見といった業績がある。
- (6) ラヴォアジエは燃焼した後、フロギストンが空気中に出ていくにも関わらず物質の質量が増加するのは、物質に空気中から「固定空気」が結合するからだを説明。
→プリーストリーとの対談後、結びつくのは脱フロギストン空気であると訂正。
→この空気を「酸素」と命名（∴ 燃焼＝物質と空気中の酸素が結びつく現象）。
- (7) ラヴォアジエはまた、『化学命名法』で種々の単純物質の名称を定める。
- (8) ドルトンはラヴォアジエの理論を継承し、原子論を確立。

第8章

数学的実験物理学の誕生

自然の深い研究こそ、数学上の発見の最も豊かな源泉である。

— ジョセフ・フーリエ

8.1 熱の正体

熱運動説

- * ガリレオは著書『賈金鑑識官』の中で、「熱は粒子の運動である」と言及した。
- * ボイルやニュートンも物質の運動であると考えていた。
→17世紀は熱運動説が主流を占めていた。cf. 熱は摩擦という“運動”により生じる。
- * しかし、18世紀になると科学者たちは熱運動説を疑い始める。

契機となった実験

1. 同体積で同温度の水と水銀をガラス瓶に入れ、同じ熱源で熱する。
→温度上昇は水銀の方が早い。
2. 同体積で温度の異なる水と水銀を混合する。
→水に近い温度で平行になった。

→水より水銀の方が密度が13倍も高く、構成粒子も重い。もし熱が運動であるなら、水銀の方がすぐに温まるわけがなく、保持できる熱の量も水より多いはずであるため、熱運動説では説明不可能だと考えられた。

熱物質説

- * ジョセフ・ブラックは熱運動説に代わる理論として、熱物質説を提唱した。この説によって、「水蒸気→水→氷」と変化する際の熱の保存を説明できたため、多くの科学者が支持。
→ブラックは状態を変化させるが、温度を変化させない熱の在り方を潜熱と呼んだ。
- * ラヴォアジエはこの熱物質にカロリック（熱素）という名称を与え、粒子はカロリックと結合することで熱を帯びると説明。
👉 p.90 **コラム** さまざまな元素
- * 科学者らはこの説に基いて化学実験や熱の定量的実験を行う。

表 8.1 カロリック説に基づく主な実験

実施年	実験者	概要
1783年	ラヴォアジエ & ラプラス	水熱量計を用いた共同実験で、熱量保存則を示した。
1801年	ドルトン	気体の膨張率が同温下で気体の種類によらず一定の値をとることを発見。
1806年	ゲーリュサック	気体の比熱を求め、潜熱の概念を支持した。

コラム 氷熱量計

ラヴォアジエが熱の定量の研究に共同研究者としてラプラスを誘ったが、このことは当時若手の研究者であったラプラスにとっては非常に光栄なことであった。こうして始まった彼らの共同研究の成果は 1783 年に王立科学アカデミーに提出された。この共同研究は化学と物理学の融合を象徴する出来事であるとともに、不可秤量物質の定量化という観点でも非常に画期的であった。2 人の科学者はともに精密測定法の探求に携わったため、こうした時期に実験器具製作者たちは、それまでに先例のない正確さをもつ装置を次々と生み出していった。

しかし、こうして制作された実験器具のうち氷熱量計として知られる器具は実際にはあまり正確と言えるものではなかった。ただし、概念的には非常に洗練されたものであったのもまた事実である。これは、入れ子になった 2 つの容器の中に、さらに蓋のついた容器が設置された構造をもち、熱容量を測定したい試料を最も内側の容器内に入れて使用する（中では 2 つの溶液を混合するなどして化学反応を起こす）。熱容量を測定するためには、その外側の 2 つの容器に氷を入れてしばらく放置する。最も外側の容器に入っている氷は徐々に溶けていくが、氷が残っているうちは 0 度のままの状態が維持されるため、それより内側の容器を外部から熱的に絶縁できる。したがって、外側から 2 番目の容器の氷は試料からのみ熱を受ける（カロリックが移動する）と考えられ、その溶けた水を下の容器で受けて重さをはかることで、試料がもっていた熱の量を測定できるという原理である。

この氷熱量計から得られたデータは、ラヴォアジエの天秤から得られるデータやラプラスが『天体力学』で用いた天文データの精度と比べるとそれらは粗雑とさえ言える精度であった。それでも氷熱量計によって得られたデータはラヴォアジエが拒絶したフロギストン説に代わる熱力学の定量化を宣言することには成功した。さらに、この研究成果によってラプラスはラヴォアジエの新しい化学体系を大いに支持するようになったのである。

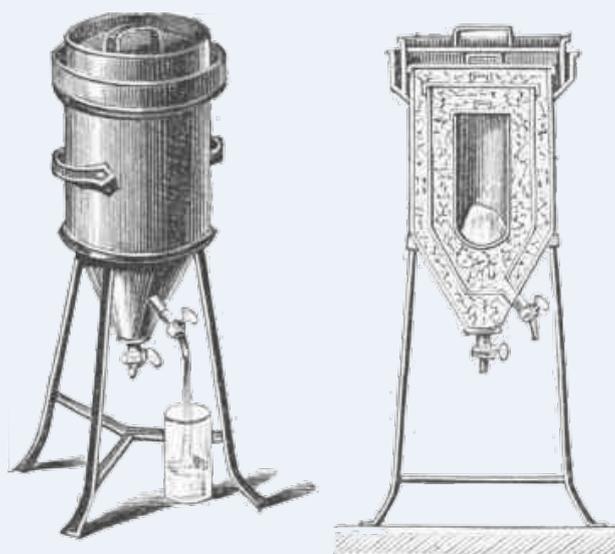


図 8.1 氷熱量計

8.2 ラプラスの自然像

不可秤量物質

- * 18世紀，熱・光・電気・磁気はいずれも粒子だと考えられていた。
→熱・光・電気・磁気を担う物質は不可秤量物質（imponderable matter）と総称。
→自然界は不可秤量物質と通常物質から構成されていると考えられた。

不可秤量物質がもつとされた性質

1. 質量を持たない（万有引力が働かない）。
2. 壊されることも，新たに作られることもない。
3. 同種の不可秤量物質間には，非常に短い距離でのみ働く力が作用する。

- * シャルル・オーギュスタン・クーロン… フランスの技術者，物理学者。
電気および磁気が距離の2乗に反比例する力をおよぼすこと（クーロンの法則）を見出す。

表 8.2 不可秤量物質

観測	物質名	説明
光	光粒子（フォトン）	物質粒子との間に近距離でのみ作用する力が存在するとニュートンが提唱。
熱	熱粒子（カロリック）	熱粒子間に斥力が働くため，熱を帯びると物質は膨張するとされた。
電気	電気流体	イギリスの 그레이が電気伝導を発見した際に存在を示唆。
磁気	磁気流体	クーロンの法則の説明に利用された。

Profile 038 クーロン (Charles-Augustin de Coulomb, 1736 ~ 1806)

フランスの物理学者。母親には医者になることを望まれていたが、ロイヤル・ド・フランス大学で数学の講義を受けてからは数学者を目指すようになった。その後、メジエールの工兵学校に学び、1716年に工兵科を副首席で卒業した。1764年から陸軍の技師として西インド諸島マルティニーク島で要塞を建設する任務についていたが、病気のためにパリに帰り、勤務のかたわら応用力学の研究を行った。やがてフランス革命が起こると、クーロンは混乱を避けてブルアに移り科学研究を続けた。1877年に磁気コンパスに関する論文でパリ・アカデミー賞を受けた。1802年以降は、公教育監督官も務めている。



1776年から度量衡制定の仕事に関与していたため、パリ大学にてねじり秤による帯電体間および磁極間の引力や斥力を測定し、クーロンの法則を発見し、静電気学と電磁気学の基礎を築いた。また、摩擦の法則を確立した功績ももつ。

■ ラプラスの魔

- * ピエール・シモン・ド・ラプラス … フランスの数学者，物理学者，天文学者。
天文力学の専門家であったが，熱や光の研究にも関心を示し，新しい物理学の流れを作った。
- * ラプラスは不可秤量物質と通常物質による自然界の構成論を支持した。
→さまざまな粒子間力を「感知できない距離でのみ感知できる力が働き，感知できる距離では感知できる力が働かない」と表現。
→その力を積分して計算する際に，余分な項を省略することが可能とされた。
- * 著書『確率の哲学的試論』の中で自然界のあらゆる可秤量・不可秤量の双方の物質粒子の位置と運動量を把握し，過去と未来のすべての事象を予測することのできる英知の存在を想像。
→この英知はラプラスの魔¹⁾と呼ばれ，この存在が可能な決定論的宇宙観を提示。



図 8.2 星雲説のイメージ図

Profile 039 ラプラス (Pierre-Simon Laplace, 1749 ~ 1827)

フランスの数学者，物理学者，天文学者。16歳でカーン大学に入学し，数学的才能を發揮。28歳でパリの士官学校の教授に任命された。

1799年から1825年にかけて刊行された『天体力学』でラプラスは，ニュートンの重力理論を太陽系に適用して観測値と理論値の食い違いを取り除いて太陽系の安定性を証明した。この功績のためラプラスは「フランスのニュートン」と呼ばれることもある。

また，確率論についても業績があり，科学データを確率論的に解釈することの有効性を示した。彼の著書『確率の解析論的理論』は100年以上にわたって確率論の標準的なテキストであった。さらに，熱・電気・磁気などについて数学的研究を行ない，さらに太陽系の誕生に関しては星雲説を唱えている。

一方，ラプラスは政治にも関与しており，ナポレオン1世の下で内相を務めたこともある。政治的には変わり身が速かったため，フランス革命の際も無事であったと言われる。



¹⁾ ラプラスの悪魔^{デーモン}と呼ばれることもある。現代では，量子力学の不確定性原理によってラプラスの魔が存在し得ないことが示されている。

8.3 偏光現象の発見

アルクユ会における物理学研究

- * アルクユ会 … ラプラスが友人クロード・ルイ・ベルトレと協力して創設した研究会。エコール・ポリテクニク卒業の若手研究者を誘い、開催。一時期『アルクユ広報』を出版。→ラプラスの自然観を軸に様々な研究活動を実施。やがてはナポレオンの保護を受ける。
- * ラプラス自身は毛細管現象や大気の屈折現象に関する研究を行った。
- * ジョゼフ・ルイ・ゲーリュサック … フランスの物理学者・化学者。当時発明されたばかりの気球に乗り、上空の気圧を測定。→仮定された光粒子と空気粒子の引力や、毛細管中の液体粒子と管壁のガラス粒子との引力を足し合わせ積分計算（ラプラス独自の理論）。

表 8.3 アルクユ会の主要メンバー

名前	主な業績
ラプラス	決定論的宇宙像を完成させる。
ベルトレ	アンモニアの組成や塩素の漂白作用を発見。
ゲーリュサック	カリウム・ホウ素の単離やヨウ素の発見。
テナール	ゲーリュサックと共にホウ素を単離。コバルトブルーを発明。
マリユス	偏光現象を発見。
ビオ	ビオ・サバルの法則を導出。

Profile 040 ゲーリュサック (Joseph Louis Gay-Lussac, 1778 ~ 1850)

フランスの化学者、物理学者。パリのエコール・ポリテクニク、土木学校を卒業。エコール・ポリテクニクでフルクロアの実験助手を務めていた頃、熱による気体の膨張法則を発見した。フルクロアの後継者として化学教授に就任。その他にパリ大学の物理学教授やパリの国立自然史博物館化学教授、上院議員などを歴任した。

フランス学士院の高層大気観測計画で中心的な役割を担い、地磁気や気象学の重要な研究を行った。さらに 1809 年に気体反応の法則を発見し、アヴォガドロがアヴォガドロの法則を形成するための重要な布石を配した。

化学研究ではカリウム・ホウ素の単離やヨウ素の発見、有機分析法の改良および多数の有機化合物の組成決定などで知られている。特に、青酸の組成に関する研究は当時有力と考えられていたラヴォアジエの酸酸素説を覆した。また、シアン単離はその後の有機化学発展に大きく寄与した。応用化学の分野でも硫酸製造法の改良（ゲーリュサック塔の発明）など多くの業績を残した。



コラム エコール・ポリテクニーク

フランスにはグランゼコールという、実務的な特定の職業人を養成することを目的とする特殊な国立教育機関がある。エコール・ポリテクニーク（高等理科専門学校）はこのグランゼコールのうちの最古のものである。現在もフランス国防省の所轄下に存在している。かつては卒業生の大半が軍の将校となったが、現在では多くの卒業生が政財界に進んでいる。

エコール・ポリテクニークは1794年の12月に、国民議会におけるラザール・カルノーとガスパール・モンジュの提唱のもと、若者の科学知識の向上と軍隊内の技術者養成を目指す国立中央中央職業学校として創設された。当時のフランスの高等教育に共通する弊害と考えられていた極度に観念的かつ抽象的な議論を行う傾向に対抗する意図でポリテクニーク（諸学芸）の学校という呼称が用いられたが、翌1795年にこれが正式な名称として採用された。

エコール・ポリテクニークは多くの有能な科学者を育成し、19世紀はじめにフランスが科学の面で指導的な国家としての立場を確立する上で大きな役割を演じた。ここで行われた教育は非常に高度であり例えばコーシーの『エコール・ポリテクニークにおける解析学教程』は初等解析学を今日でも教えられているような体系的な解析学へと整えた最初の教科書である。これらの優れた実績のために、エコール・ポリテクニークをモデルとする学校や大学は世界中に数多く存在する。

表 8.4 エコール・ポリテクニークの著名な出身者

卒業年	氏名	職業
1800年	シメオン・ドニ・ポアソン	数学者
1800年	ジョセフ・ルイ・ゲーリュサック	化学者, 物理学者
1806年	オーギュスタン・ジャン・フレネル	物理学者
1810年	ガスパール・ギュスターヴ・コリオリ	数学者, 物理学者
1874年	アンリ・ベクレル	物理学者
1875年	アンリ・ポアンカレ	数学者, 哲学者

偏光現象の発見

- * エティエンヌ・ルイ・マリユス…フランスの物理学者・化学者。アルクユ会のメンバー。複屈折性の結晶¹⁾に反射した太陽光が入射すると、常光か異常光のどちらか一方だけが明るくなることに気づき、偏光現象を発見。
- * 結晶内で分光する光の性質をマリユスは粒子の極性（polarisation）と呼んだ。
 - ◇ 光粒子は、放射される進行方向に垂直な軸の周りで自転している。
 - 通常光は軸がバラバラの方向を向いているが、ガラスに反射されると方向が揃う（＝偏光）。
 - ◇ 物質粒子と引力を及ぼす極と、斥力をもたらす極が存在。
 - 光粒子がガラス表面に当たった時、前者が接触すれば透入、後者が接触すれば反射する。
 - ◇ 自転の速度は色によって異なる。

¹⁾ 方解石など、光が入射すると2つの屈折光線に分かれるような結晶。これらを印字された文字の上に置くと、文字が二重に見える。分離した光線のうち、通常の屈折の法則（スネルの法則）にしたがうものを常光、そうでないものを異常光と呼ぶ。

8.4 フレネルの光波動論

光粒子論

- * ラプラスの自然観にも見られるように、当時、光は粒子（不可秤量物質）だと考えられていた。
- * 現代人からすると偏光現象は光を波と考える方が説明しやすそうだが、当時の科学者らは光を波とみなしては説明がつかないと考えていた。

光波動論が成立しないとされた理由

波には横波と縦波がある。

横波：進行方向と垂直に振動（固体中のみを伝わる）

縦波：進行方向と平行に振動（液体中でも伝わる）

→光を波として伝える媒体は、液体 or 気体であるはず。

→光は音と同じ縦波（∵横波なら液体中を伝わらない）。

→しかし、音には「偏音現象」のようなものは存在しない。

（縦波は進行方向だけの一元的振動であり、偏りなど生じるはずがない）

→偏光現象を説明できない。



図 8.3 横波と縦波

光波動論

- * オーギュスタン・ジャン・フレネル… フランスの物理学者。 p.67 Profile 025 ホイヘンスアルクユ会の研究者から離れ、ラプラスの自然像とは一線を画し、独自に研究を進める。
→アルクユ会を支援していたナポレオンが失脚するのと同時に、自分の研究成果を出し始める。
- * フレネルは光の回折現象を波の干渉現象を用いて数値的に正確に説明。
→パリの科学者から高評価を受けるが、光波動説はニュートンやラプラスの論を覆すものであったため、容易に受け入れられず。
- * フランスの科学者たちは光粒子論派（ラプラス派）と光波動論派（フレネル派）に分かれる。
- * トーマス・ヤング… イギリスの物理学者。ヤング率やロゼッタストーンの研究でも知られる。
干渉縞から光の波長を計算し、波長が1マイクロメートル以下であることを解明。
→さらに、光は横波であるとの手がかりも得る。
→次第に波動説が有利になっていった。

Profile 041 フレネル (Augustin Jean Fresnel, 1788 ~ 1872)

フランスの物理学者、土木技師。技術者になることを目指して1804年にエコール・ポリテクニークに入り、土木工学を学んだ。さらにエコール・デ・ポンセシヨゼに入学し、卒業後は政府の土木技師となった。1814年から光学の研究を始め、1818年にはアラゴの助力でパリ勤務となり、その後6年間で多くの科学的成果を生み出した。灯台監督官に任命されたほか、1823年にはフランス科学アカデミーの会員となり、さらに1827年にはイギリスの王立協会からランフォード・メダルを授与された。



1815年にヤングとは独立に光の波動論を唱え、光の回折や干渉の現象を論じた。フレネルはこの時点では光を縦波と考えていたが、のちに偏光現象を説明するために横波説の立場から数学的な工学理論を展開した。また、光行差の問題などから光学現象への地球の運動の影響を研究し、不動エーテル仮説と随伴係数を導入した。

これらの理論的研究に加えて灯台の反射鏡の代わりにフレネルレンズと呼ばれる複合レンズを開発するなど、実験的研究にも卓越した業績を残した。

コラム 光の速度

昔の人々は光の速度は無限だと信じていた。これはケプラーやデカルトのような科学者でさえそうであった。一方、ガリレオはそうは考えず、メルセンヌが音速を測定することに成功した方法を用いて光速の測定を試みた。すなわちガリレオとその助手はそれぞれ異なる丘の頂上に立ち、ガリレオが一方の頂上から光の信号を送り、もう片方の頂上の助手がそれをみて直ちに光の信号をガリレオに送り返すという実験を実施した。しかし、助手との距離を色々変えても一連の信号のやり取りにかかる時間は一定であった。無論この時間は助手が「信号を見てから信号を送り返す」のにかかる時間に他ならず、光速度の測定には失敗した。

デンマークの天文学者レーマーはガリレオよりも長い距離で光速を測る実験を行った。彼は木星本体にガリレオ惑星が隠される食について調査しているとき、地球と木星が太陽に対して同じ側にあるときに起こる食は、太陽が地球と木星の間にあるときに起こる食よりも数分早く観測できることに気付いた。そして、地球と木星が最も離れたときには、最も近いときと比べて16分遅れて光が届くことを求めた。レーマーはこの16分という時間が木星からの光が地球の軌道の直径を横切るのに必要な時間であると正しく推論し、最終的に光速度を秒速240,000kmと計算した。

より正確な光速の測定は19世紀中頃にフィゾーによって達成された。彼は回転する歯車を使った実験から光速度を算出し、毎秒約313,000kmという値を得た。その後、マイクロ波やレーザーなどを利用した測定法が考案されると、光速度は真空中で正確に秒速299,792.458kmと求められ、逆にこの速度が1mの定義に利用されるようになった。

8.5 電流の磁気作用

電流の磁気作用の発見と研究

* ハンス・クリスティアン・エルステッド … デンマークの科学者。

電池の両極板をつなげて電流を流し、電線の下に磁針を置くとその針が振れ、電流を止めると磁針は元のように南北方向を示すことから、電流の磁気作用を発見。

→ラプラスの自然像からはまったく説明不可能な現象。

ラプラスの自然像に合わない現象

1. 電気と磁気という、相互作用しないはずの2種類の不可秤量物質の間に力が働いた。
2. 電気流体が静止している間には作用せず、動くときにのみ作用した。
3. 電線のまわりを周回するように作用し、流体粒子の中心間での引力や斥力とは性質が異なっていた。

* ジャン・バティスト・ビオ … ラプラスの弟子。

電気の運動により導線の表面に磁気が発生し、その磁気が磁針に作用を及ぼすと考え、作用力と距離との関係（ビオ・サバールの法則）を導出。

→電流と磁石が直接作用するのではないと説くことで、ラプラスの自然像を擁護。

→しかし、どのようにして導線の表面に磁気が発生するかは説明できず。

* アンドレ・マリー・アンペール … フレネルの友人。

光と同様に、未知の媒体の振動によって電流と電流の相互作用が引き起こされると想像。その後、電流同士の相互作用に電流の磁気作用を還元させ、微小電子同士に働く引力と斥力の数学定式を行うことに成功（距離の二乗に反比例する力）。

→ビオ・サバールの法則を組み込んだ上で、電磁気理論の数学的体系を構築。

Profile 042 エルステッド (Hans Christian Ørsted, 1777 ~ 1851)

デンマークの物理学者、化学者。若いころは父の薬局を手伝っていたが、のちにコペンハーゲン大学で薬学と自然哲学を取め、同大学の教授となる。1824年には科学知識普及協会を創設し、科学の教育や普及にも尽力した。

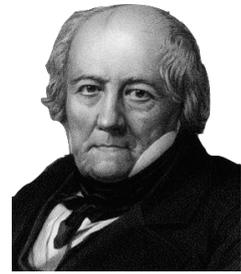
1820年、電流を流した針金の近くで磁針が針金と直角になることを発見した。この発見に刺激されてアラゴからファラデーまでの一連の電気と電磁気の関係追究研究が行われ、電磁気学発展のきっかけを与えることになった。この功績から磁場の強さのCGS電磁単位に「エルステッド」の名が使用されている。また、ドクニンジンからのピペリジン抽出や金属アルミニウムの精製などの化学的業績ももつ。



Profile 043 **ビオ** (Jean-Baptiste Biot, 1774 ~ 1862)

フランスの物理学者。エコール・ポリテクニークに学び、ボービエ大学数学教授となる。さらに、コレージュ・ド・フランスの数理物理学教授も務める。フランス科学アカデミー会員。

1820年にサバールと共同で発見したビオ・サバールの法則は電磁気学の基礎をなす法則として広く知られている。またゲーリュサックとともに気球を用いて初めて上層大気および地磁気を観測した。偏光の研究でも数々の成果を上げたが、特に糖溶液を通過する偏光の偏光面が濃度に応じて回転することを発見した業績は大きく、1840年にロンドンの王立協会からランフォード・メダルを受けた。彼の旋光研究はパスツールによって受け継がれ、その後の彼の発酵に関する研究の糸口となった。



コラム **電気と磁気**

古代ギリシャ人やさらにその昔の人々も、磁石や静電気の存在は認識していた。しかし、1000年頃に中国人が航海用に磁石を使い始めるまでは、この現象についての考察はさしたる進展も見せなかった。磁石についての基本的な法則のいくつかは1269年には記録されており、その後16世紀末にギルバードが静電気と磁気についての研究を行っている。しかし、それ以降は長い期間この問題についてはほとんどの科学者の研究対象から外されていた。

18世紀初頭、グレーとデュ・フェが静電気の研究を再開した。しかし、このテーマが人々の関心を集めるようになったのは1745年にライデン瓶の発明者の1人ミュッセンブルークが最初の電気ショックを受けてからのことである。このぞっとする体験について彼はのちに「一言で言えば、わたしはもうだめだと思った」と報告している。電気が衝撃を与えることを知ったフランクリンは有名な凧の実験を思いつき、その実験から雷の正体が電気であることを明らかにした。

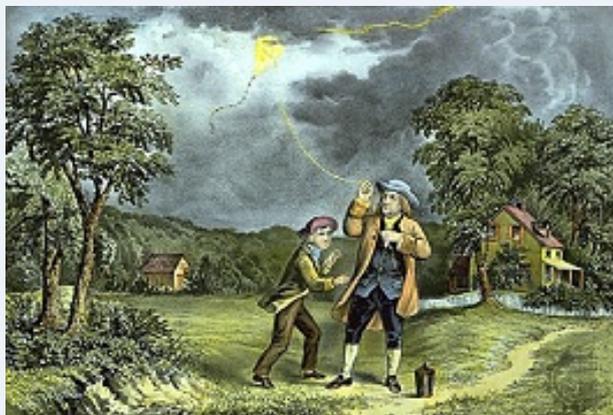


図 8.4 雷の日に凧を上げるフランクリン

1733年、フランスの物理学者デュ・フェは電荷には2種類あり、同種の電荷は反発し異種の電荷は引き合うことを発見した。1780年代にはクーロンが静電気と磁気が生み出すそれぞれの力について念入りに研究を行ってクーロンの法則を発見し、エルステッドも電気と磁気の間を追求した。1820年にはエルステッドの研究が広く知れ渡るようになり、これが多くの科学者を刺激し、新たな発見が相次いだ。例えば、ゼーベックは1821年に熱電効果を発見したし、ステュルジャンは最初の電磁石を作り上げた。

その後も電気と磁気との関連にかかわる注目すべき研究が相次いだ。その中でも特に重要なのは1830年から1831年にかけてファラデーとヘンリが独立に発電機の原理を発見したことである。彼らはこの例のように、しばしば独立に同一の物理的関係の解明や装置の開発を発表したが、ファラデーの業績は理論的影響強くもったのに対し、ヘンリの仕事は常に直接的に実際の応用に結びつくものが多かった。

1831年、ヘンリはアメリカで最初の実用的なモーターを開発した。さらに、1830年代中にはモールスと協力して電信という画期的な装置の製作も始めた。1879年にはエジソンとスワンが独立に実用的な照明を考案し、この発明により電気が一般家庭にまで送られるようになった。

Profile 044 アンペール (André-Marie Ampère, 1775 ~ 1836)

フランスの数学者、物理学者。18歳で当時の数学研究の成果を学び終え、詩作や歴史、哲学にも関心を寄せる。ブール大学の物理学および化学教授を経て、エコール・ポリテクニクの数学教授に就任した。のちにコレージュ・ド・フランスの一般物理学教授。系統的な実験よりも天才的なひらめきによる理論構築を得意とし、その後の電気力学の発展の基礎を築いた。特にアンペールの法則を見出したことは有名。電流の国際単位アンペアは彼の名にちなむ。



また、電流測定技術の開発にも貢献し、電流の磁気作用を利用した検流計を考案した。彼の科学に対する哲学的考察も知られており、アンペールの晩年の著作『科学哲学試論』はデカルト的二元論による学問分類を論じる内容である。

フレネルによる数学理論の完成

- * アンペールが電磁気理論の数学的体系を構築した頃、フレネルは光波動論から偏光現象の説明を試み、数学的理論を完成。
→光は横波で、横波を生み出す弾性固体を光の媒体と仮定した。
- * この時代、光波動論が有力になりつつあったが、そもそも波動論が否定される根拠となった光の媒体に関する問題は未解決のままであった。
→後に「エーテル」と呼ばれるこの媒体の実体研究は19世紀の物理学者の課題として残った。

8.6 熱運動説とエネルギー保存則

熱運動説の復活とエネルギー保存則の発見

- * 光波動論が確立されたことによって、熱の本性に関しても再考が求められた。
- * 1800年、イギリスのウィリアム・ハーシェルによって赤外線が発見される¹⁾。
→1830年頃までに、赤外線と熱放射は同一のものであるとされるようになった。
→以降、徐々に熱運動説が定着していった。
- * カロリック説の代わりに熱運動説が定着した後、1840年代にエネルギー保存則が提唱される²⁾。
→ベランジュが力積、マッハがポテンシャルの概念を定義し、エネルギー説が発展。

コラム エネルギー説

エネルギーという語は1807年にヤングが著書『自然科学研究』の中で「仕事をする能力」の意味で用いたのが最初とされている。これはギリシャ語で「力」を意味する *ergon* という単語に前置詞 *en* (英語の *at* にあたる) がついてできた「はたらいっている状態」を意味する *energeia* というラテン語の単語が変化して生じたものである。

力の概念はニュートン以前には曖昧なものであったが、エネルギーの概念もまた19世紀になるまでは漠然としたものであった。今日では小学生でさえも「電池とは化学エネルギーを電気エネルギーに変換するものである」とか「摩擦によって運動エネルギーは熱エネルギーに変換される」などと教わるが、こうした理解が得られたのは科学史的には1842年から1847年にかけてのことであり、それまでは「力」とほぼ同じ意味で用いられることさえあった。

この時期ドイツ人科学者マイヤーは、熱帯地方の住民たちの血が鮮やかな赤色をしていることから「熱帯の人が体温を保つには少量の酸素で済む」と考え、そこからエネルギーの量は一定で、ただ形を変えるにすぎないと結論づけた。彼の説は熱エネルギーと力学的エネルギーが同一のものであるという意味を内包している。一方、イギリスのジュールは羽根車で水槽をかき混ぜる実験などを行い、実験的に熱の仕事当量を求めて、熱エネルギー・電気エネルギー・力学的エネルギーのすべてが同一のものであり、これらは一定の比率で相互に変換できることを明らかにした。さらにヘルムホルツも先の2人とは独立にエネルギーの変換について研究を行った。かくして、エネルギー保存則は発見された。

前述のヘルムホルツは重力による位置エネルギーを「自然力」などと呼んだが、1853年までには位置エネルギーをはじめとするポテンシャルエネルギーもエネルギーの概念に包含されることになった。やがて1905年にはアインシュタインがエネルギーと質量さえもが同一のもの異なった形態にすぎないことを証明するが、このときにもエネルギー概念は重要な前提として機能していたのである。

¹⁾ ハーシェルは、太陽光をプリズムに通していたときに、7色に分光された可視光の赤色より外側の位置に置いた温度計の値が上昇することに気づき、目には見えない赤外線を発見した。

²⁾ 逆に、このエネルギー保存則の提唱がカロリック説に決定的な打撃を加え、これを終焉に導いたとする見方もあるようである。

第 8 章のまとめ

- (1) 17 世紀までは熱運動説が主流であったが、18 世紀に科学者たちはこれを疑い始める。
- (2) ブラッグは潜熱概念とともに熱物質説を提唱、多くの科学者がこれを支持。
→ラヴォアジエが熱物質をカロリックと命名。
- (3) ラプラスは熱・光・電気・磁力を担うのはすべて粒子（不可秤量物質）だと考えた。
→「ラプラスの魔」と呼ばれる英知の存在を想定。
- (4) マリユスは偏光現象を発見、光の粒子論によってこれを説明。
- (5) フレネルは光の波動論を提唱し、電流の磁気作用を説明。
- (6) エルステッドが電流の磁気作用を発見。
→粒子論的自然像では異なる不可秤量物質間に働く力を説明できない。
→磁石内部にも電流が流れている仮定し、アンペールが解決。
- (7) 赤外線の見を発見を経て熱運動説が復活し、エネルギー保存則の提唱につながる。

第9章

古典物理学の誕生

みずから光輝くロウソクは、どんな宝石よりも美しい。
— マイケル・ファラデー

9.1 電磁気の研究

ファラデーの実験研究

- * マイケル・ファラデー … イギリスの物理学者。
王立研究所のハンフリー・デイヴィーの実験助手として働く。
- * 1820年、エルステッドが電流の磁気作用（電池）の発見し、その実験研究に携わる。
生命の働きに電気的作用があることを解明（カエルの実験）。
- * 1831年に電磁誘導の現象を発見し、力線概念を導入。
「磁石のN・S極から発せられる力線が電線の輪を横切ると電線に電流が起電される」とする。
→いわゆる磁力線のこと。ファラデーは実験講演を披露し、これを視覚化。
- * アレッサンドロ・ボルタ … イタリアの物理学者。
電気盆や検電器を発明し、電気化学研究の先駆者となる。メタンガスの発見でも知られる。
- * ボルタが電池を発明して以来、溶液に電気を通して化学反応を起こし（電気分解）、現象を観察する研究が盛んに行われる。
→力線概念の検討にこうした電気化学研究が役立った。
- * ファラデーは電気分解の現象から逆に、静電気や電流の現象の理解の再解釈を志向。放電現象は「空気中の+と-の電荷間に分極する分子による緊張が高まったときに発生する」とした。

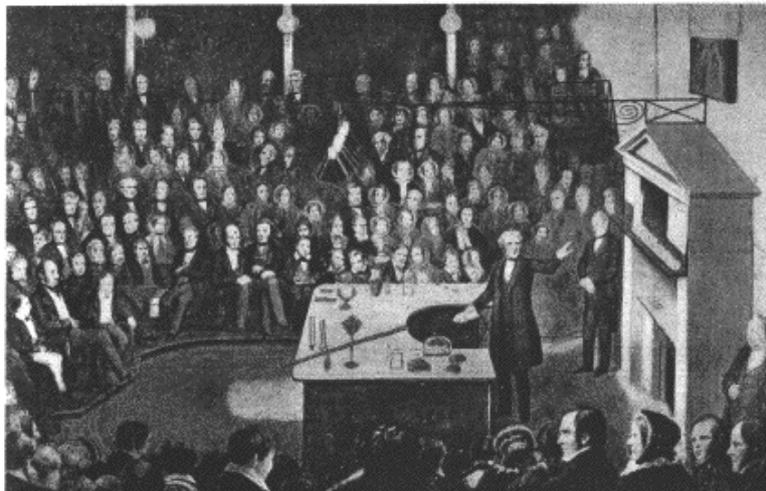


図 9.1 公開講義で実験を披露するファラデー

Profile 045 ファラデー (Michael Faraday, 1791 ~ 1867)

イギリスの化学者、物理学者。鍛冶職人の息子として生まれ、学業は読み書きと算術を習ったのみで、15歳のときから書店兼製本業の店に奉公するようになる。このとき、製本作業を行っていた科学の本に興味を持つようになり、本に書かれている実験を再現してみたりなど科学を独学するようになった。

1812年に、奉公先の店の客であった王立研究所所員の計らいでデイヴィーの講演を聞いたことをきっかけとして自然科学の仕事に就きたいと強く願うようになり、翌年デイヴィーの助手となった。エルステッドの電流の磁気作用の発見を伝え聞くと、これが電流の周りの円周にそって生じる力のためであることに気づき、それに基づいて電動機の原理を明らかにした。財政難の王立研究所を救うために1825年からはじめた毎週金曜の講演やクリスマス講演は大いに好評を博した。

二酸化炭素、硫化水素、塩素などの液化やベンゼンの発見、鉛ガラスの研究など化学上の業績を上げたのち、電磁気学の研究に没頭し、1831年に電磁誘導現象を発見、その2年後にファラデーの電気分解の法則を導いた。その後も静電誘導、グロー放電のファラデー暗部、ファラデー効果、反磁性物質などを次々と発見した。理論面では電磁気作用が媒質空間を通して伝達されるとして「力線」の概念を提唱し、マクスウェルの電磁気理論の基礎を築いた。

晩年はヴィクトリア女王の好意で建てられたハンプトン・コート邸で過ごし、76歳のときにその書斎で静かに生きを引取った。



Profile 046 ボルタ

(Conte Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, 1745 ~ 1827)

イタリアの物理学者。コモ高等学校教授、パヴィア大学で物理実験学の教授を務めたほか、パドバ大学では哲学部長を務めた。

1775年に電気盆（静電気をためる装置）、1781年に検電器を発明。1797年にガルバーニ電気が生物体に関係なく金属だけで電流が得られることを示した。これをきっかけとして、電気は筋肉から生じるとする動物電気説を唱える者と論争が起きたが、1800年にボルタ電堆として知られる電池（亜鉛と銀の円盤を食塩水で濡らしたフェルトで挟んで交互に積み重ねたもの）を発明したことによって、不動の勝利を得た。

ほかにも沼に発生する可燃性のガス中からメタンガスを発見し、密閉容器にメタンを入れ電気火花で燃焼させる実験を行うなど化学上の業績もある。また、静電容量を研究して電位と電荷が比例関係にあることを発見した。電位差の単位ボルトは彼の名にちなむ。



コラム 電池の発明

世界最古の電池は、前2世紀頃（ペルシャ時代）に使われたバグダッド電池だと考えられている。バグダッド郊外のホイヤットラブヤ遺跡で見つかったこのつぼ型電池は、正極活物質に銅、負極活物質に鉄が使用され、電解質にはワインビネガーやブドウ酒などが用いられていたと考えられている。電圧は0.4～0.8V程度と推定される。ただし、バグダッド電池は2,000年以上前のものであり、電気を起こすためというよりは装飾具のメッキを行うために利用されていたものと考えられているため、これを「電池」と呼ぶかどうかには議論がある。

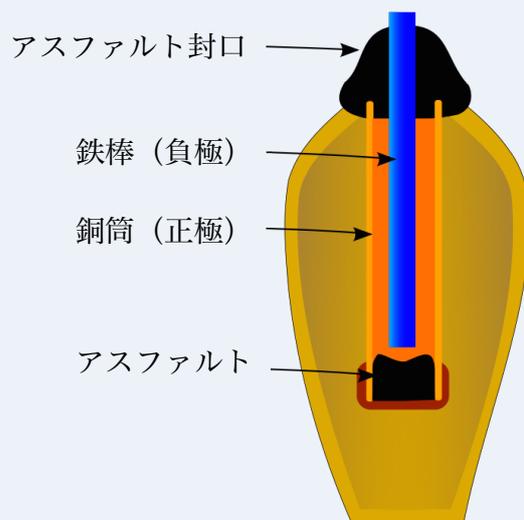


図9.2 バグダッド電池

一方、近代的な電池の原理は1780年にイタリアの生物学者ガルバーニが発表したものがその最初とされている。彼はカエルの足の神経に2種類の金属をふれさせると電流が流れ、足の筋肉がわずかに動くことに気づき、その原理を発見した。この原理をもとに、最初の化学電池を発明したのがボルタで、彼の発明したボルタ電池が、人類の手にした最初の定常電流電源とされている。すなわち人類はライデン瓶から急激に放出されるのとは異なり、導体内を定常的に流れる電気を得ることができるようになった。

表9.1 さまざまな電池

発明年	名称	正極	負極	特徴
1836年	ダニエル電池	Cu	Zn	ボルタ電池が水素を発生する問題を解決。
1844年	グローブ電池	Zn	Pt	ダニエル電池よりも強力だが、高価。
1859年	鉛蓄電池	Pb	PbO ₂	最初の二次電池（充電可能な電池）。
1866年	ルクランシェ電池	Zn	MnO ₂	安価で長持ち。電話用として急速に普及。
1886年	マンガン乾電池	Zn	MnO ₂	ルクランシェ電池を改良。取り扱いが容易。
1955年	アルカリマンガン乾電池	Zn	MnO ₂	アルカリ性の電解質を利用。高価だが長寿命。
1899年	ニッケルカドミウム電池	NiO(OH)	Cd	鉛蓄電池よりも耐久性の高い二次電池。
1979年	リチウムイオン電池	LiCoO ₂	C	軽量で高電圧な二次電池。

磁気による旋光現象の発見

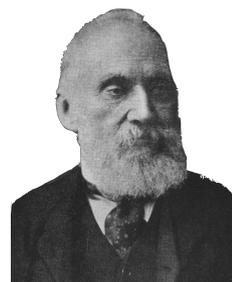
- * ファラデーは、電気や磁気の媒体が緊張状態にあることを直接的に証明するため、電氣的緊張状態にあると考えられる空間に光線をくぐらせる実験を行った。
- * ウィリアム・トムソン… イギリスの物理学者。初代ケルビン男爵。
「電氣的緊張状態中を光線が通過すると、光線の偏光面が何らかの影響を受けるかもしれない」とファラデーに示唆。
→電圧を高くしても期待した効果は生まれなかったため、磁気に目を転じる。
→磁気が光の偏光面を回転させる（旋光）ことを発見。のちにファラデー効果と名付けられる。
- * フランスの物理学者は結晶内を偏光が通過すると偏光面が回転することを発見し、これを研究。
→反射により結晶中を二度通ると、回転がなくなり、元の光の偏光面に戻る。
→しかし、磁気ではこの現象が見られない。
- * トムソンは、「磁気の場合磁力線に沿って微小な渦が並んでおり、それらにより旋光が起こる」と想像（「N から S へと向かう磁気力線上には無数のマイクロの渦が並んでいる」という考え）。

Profile 047 ケルビン卿 (William Thomson, 1st Baron Kelvin, 1824 ~ 1907)

イギリスの物理学者。グラスゴー大学、ケンブリッジ大学に学び、22歳でグラスゴー大学の教授となる。本名はウィリアム・トムソン。ケルビンの名はグラスゴー大学近くを流れる川の名前からとられた。

若いうちは熱伝導と電気伝導の関連を論じ、電磁力線の概念を示し、誘電体のヒステリシス現象を発見した。のちに熱力学研究に転じ、ジュールとカルノーの所説を正當に評価して1848年に絶対温度目盛りを導入、その単位は彼にちなみケルビンと名付けられた。1851年に、クラウジウスとは独立に熱力学第二法則を導いた。また、同年にトムソン効果、翌年にジュール・トムソン効果を発見した。さらに、エネルギー散逸の問題を重点的に論じ、地球の熱的な死を予言して注目を集めた。1853年以降は電磁気現象の研究に復帰し、高周波電流や海底電信の電線容量の研究に取り組んだ。象限電気系、検流計、測深計など発明品も多い。

力学的自然観を信奉し、電磁波の媒体であるエーテルをはじめ、すべての物理現象に力学モデルを作るべきだと主張して当時の科学思想に多大なる影響を与えた。



コラム 研究方法の国による差異

19世紀になると、研究スタイルの国による違いはそれまでよりもいっそう明確になった。例えばドイツでは科学は大学を中心として強固に組織化されて純粋科学を指向したのに対し、イギリスでは伝統的に実際的な問題を扱うことが多かった。このコラムでは、こうしたそれぞれの国における研究の特色について簡単にみていくことにしよう。

■**イングランド** 伝統的な研究スタイルからなかなか抜け出せなかった上、科学者の総数も比較的少なかった。科学はほんの一握りの才能ある人間の扱う領域と考えられ、ほとんどの科学者はアカデミック・ポストに就いてはいなかった。アマチュアの科学会は無数に存在したものの、一般にイングランドの科学教育は充実しているとは言い難いものであったとされる。19世紀の中頃にいくつかの技術学校が創設され、その一部ではオックスフォード大学やケンブリッジ大学よりも進んだ科学教育を行うところもあった。これはそれらの大学がイギリス国教会との関係から解剖の禁止などの制約を受けていたことによる。

イングランドではケンブリッジの学部学生が組織した解析学協会が数学復活へのきっかけを作り、19世紀の終わりまでには抽象代数学が発展するまでに至っていた。しかし、イングランドでは数学で用いる記号が大陸と異なっていたなどの理由から、大陸の数学書を読める者がほとんどいなかったなどの問題を抱えていた。

■**スコットランド** イングランドとは異なり、エディンバラ大学などは教会との関係を持っていなかったため、比較的早い時期に医学校を創設することができた。そのため、こちらがイギリス全体の科学事業の中心的役割を果たした。スコットランドの大学はスコットランドの独自性を追求しつつ急速な発展を遂げ、今日まで続く伝統的教育体制を確立した。ここでは化学を学ぶ学生を非常に多く受け入れたが、コースを取る学生の数によって教授の収入が決定される制度のために実践的授業・研究への移行はままならなかった。

■**フランス** 18世紀後半からはナポレオンが政治的に非常に大きな影響力を持ったが、このことはフランスの科学発展に重要な影響を与えた。すなわち、ナポレオンはエジプトへの遠征時に約170名の科学者や建築技術者からなる学術調査団を同行させるなど科学に大いに関心を示すとともにこれを支援した。また、1794年に設立されたエコール・ポリテクニークの科学教育の成果もあり、19世紀のはじめにはフランスはヨーロッパ各国の中で科学的には指導的な地位を築くことができた。

■**ドイツ** 19世紀初頭の大学改革以来、科学研究機関は大学を中心として高度に組織化された。こうして理論化学の先進国となったドイツでは化学工業が大いに発展し、産業界全体に大きなインパクトを与えるまでに至った。やがて、科学教育と技術的進歩の密接な関係が広く認識されるようになると、フランスのエコール・ポリテクニークを模して工業大学が設立された。19世紀末には、この工業大学がドイツ産業の急速な発展の中心的な役割を演じた。そこでは、最先端の知識よりも技術的諸問題の解決のために科学を用いる姿勢が重視された。

■**アメリカ** 19世紀にはあまり科学は注目されていなかった。移住者のためにその人口は着々と増加していったが、居住者たちの関心は理論的知識の追究よりは主に実践的冒険の方に向いていたといえる。しかし、アメリカは技術の面で世界を大きくリードしていた。比較的人口密度が低く、肉体労働にも高額報酬を支払う必要があったため、特に労働力を節約する装置は重宝された。こうした中で技術発明家や起業家の産業発達における役割は非常に大きかった。ベル、エジソンをはじめとする発明家が多くの大企業を設立した。1848年にはアメリカ科学振興協会が設立されて、アメリカ科学発展において中心的な役割を果たした。それでも、理論化学は20世紀の中頃まで教育において副次的な役割を担うに過ぎなかった。

9.2 電磁気学理論の成立

■ マクスウェルの電磁気学理論

- * ジェームス・クラーク・マクスウェル… イギリスの物理学者。
ケルビン卿の磁力線渦モデルを継承し、発展させる。
 - ◇ 磁力線には縮もうとする性質がある（磁力が働くということ）。
 - ◇ 渦の回転力がもつ回転モーメントが、磁気インダクタンスという電氣的性質に対応する¹⁾。
- * また、マクスウェルは静電気の研究も行い、変位電流の概念を導入。
- * マクスウェルはこうした力学的モデルからさらに一歩進み、興味深い議論を行う。
 - ◇ 振動がセルからセルへと伝わっていく速度が光速度とほぼ一致。
→ 「電磁波と光は同一のもの」ではないかと考え始める。
 - ◇ 1864年、『電磁場の動学的理論』で電磁気現象を表す数学的理論を展開²⁾。
 - ◇ 1873年、『電気と磁気に関する論考』でマクスウェル方程式の原型を記載する。
→ のちにイギリスのヘヴィサイドが現在のような4つの方程式に整理する。
- * 電磁波理論を整理し、電磁波の存在を実験的に確認することが、マクスウェル死後の科学者の課題となる。

Profile 048 マクスウェル (James Clerk Maxwell, 1831 ~ 1897)

イギリスの物理学者。エディンバラ大学およびケンブリッジ大学に学び、アバディーンのマーシャル・カレッジとロンドンのキングズ・カレッジの教授を経て1871年にケンブリッジ大学教授に就任した。ここでキャベンディッシュ研究所の創設に尽力し、設立後は初代所長となった。

幼い頃から数学に秀で、14歳のときに卵形曲線に関する論文を執筆した。光の色に関する研究や土星の環の研究を行った後、気体分子運動論に転じ、熱と運動の関係や分子の速度分布則（マクスウェル・ボルツマン分布）を導いた。さらに、ファラデーが展開していた電磁気現象に興味を抱き、力線に数学的基礎づけを与え、場の考えを支持して有名なマクスウェル方程式を導いた。また、これに基づいて電気振動による電磁波が発生すること、そしてその伝播速度が光速度に等しく横波であることを予言し、光の電磁波説の基礎を築くこととなった。

気体の分子運動論・熱力学・統計力学など多くの分野の基礎を築いたという理論上の功績だけでなく、史上初のカラー写真撮影など工学的な実績ももつ。「マクスウェルの悪魔」と呼ばれる思考実験は、情報とエネルギーに関する今日の研究へとつながっている。



¹⁾ したがって、電磁石のスイッチを切っても、すぐには渦の回転は止まらない。

²⁾ それまでの力学は、自然にはたらく力を物体間を結ぶ直線的な作用として記述していたため、直線方向と回転方向の要素が組み合わさる電流と磁気関係を表現できなかった。そこで、マクスウェルは微分方程式を用いて回転を表現し、最終的に8つの方程式で電磁気現象を一般的に記述することに成功した。

ヘルツによる電磁波の発見

- * ハイน์リッヒ・ルドルフ・ヘルツ … ドイツの物理学者。
ライデン瓶¹⁾を使用して放電によるスパークを作り出し、これを発生源として電磁波を測定。
- * 金属の反射板を用いて、空間中に電磁気の波が生じていることを確認。
→1888年、論文『空気中の電磁波とその反射に関して』の中で電磁波の存在を論証。
- * ヘルツの研究は、イタリアのマルコーニによる無線電信の発明²⁾につながる。
→20世紀の通信技術への扉を開く。

Profile 049 ヘルツ (Heinrich Rudolf Hertz, 1857 ~ 1894)

ドイツの物理学者。ハンブルク大学で科学と工学、語学（アラビア語とサンスクリット語）を学び、キルヒホッフとヘルムホルツに師事して1880年にベルリン大学で学位を取得した。キール大学講師やカルルスルーエ工科大学教授を経て、ボン大学教授となる。

彼は1883年にマクスウェルの電磁気理論の研究を開始し、1888年に実験室で電磁波を発生させ、これが反射・屈折などの点で光波とまったく同一の挙動を示すことを示した（ヘルツの実験）。この結果、マクスウェルの光の電磁論に実験的根拠が与えられることになり、さらにはのちの無線通信時代への道を切り拓くことにもなった。振動数の単位として使用されるヘルツ（Hz）は彼の名にちなむ。



コラム 19世紀の技術革新

電磁気学が、通信技術や日常生活におよぼした影響は特に大きいものであった。19世紀のはじめには、大陸間や海を越えての通信は受け手のもとに届くまでに何週間もの期間を必要とされたが、19世紀の終わりまでにこの状況は一変し、このようなやりとりは電信で瞬時に実現できるものとなった。さらに革命的なこととしては、電話というまったく新しい手段で人々が結ばれたことが挙げられる。また、1879年以降は電灯が夜を明るく照らすようになり様々なモーターやヒーターが家庭のあらゆる場面で活躍するようになった。

さらに、19世紀の初頭は依然として貨物の輸送には運河が最も活躍していたが、この輸送手段にもまた大改革が起き、機関車が北米大陸とヨーロッパ中に広がったほか、1885年にはベンツが20世紀の主要な移動手段となる自動車を発明した。都市でも建築技術の向上を受けてビルの高層化が起き、都市間には吊橋やトンネルといった大規模な構造物が建設された。

1) ガラス瓶の内側・外側に金属箔を貼ったコンデンサー（蓄電装置）。18世紀には大型の起電機として用いられたが、19世紀にはコイルを用いた変圧器と組み合わせて蓄電器にも利用された。

2) マルコーニは1895年に初めて無線通信に成功。さらに、その後も無線機器の改良を続け、1901年には大西洋を隔てた通信にも成功した。

第3の変化は、ベッセマー法による安価な鋼鉄の出現によって起こった。新しいエンジンや機械の発明が市民生活に大きな影響を与えたのはもちろんのこと、新しい建築技術に鋼鉄が多く使用されたこともこのことと密接に関わっている。また、比較的少数の農民にとっては新しい農業機械の発明も役に立ち、急激に増加する人工に対して食物や衣料を提供した。

ある種の技術の向上は、他の諸科学に直接影響を及ぼしたという例もある。例えば1822年以降に登場したさまざまな写真技術は天文学にとって特に重要な意味をもっていた。19世紀の終わりには計算機も実用的なものとなり、科学研究に大いに貢献した。

9.3 相対性理論の誕生と古典物理学の完成

- * マクスウェルの電磁気学には次のような課題が残っていた。
 - ◇ 電磁波の担い手であるエーテルは弾性固体なのか。
 - ◇ マイケルソンとモーレーは次のような指摘をした。

「宇宙空間に静止したエーテルの中を地球が動くのであれば、光の速度は方角によって異なるはずだが、実際には一定であるのは矛盾ではないか」

→オランダのローレンツは、地球が進行方向に若干短縮しているとする仮説を立てた。

→実験結果を説明するための恣意的な仮説に過ぎないとして反論が相次ぐ。
 - ◇ 電流に沿って荷電粒子が動くときに力が働くのであれば、荷電粒子とともに動く人物にとって、荷電粒子は静止しているはずなのに力が働いているのは奇妙ではないか。
- * 上記の課題に答えを与えたのがアインシュタインの相対性理論だった（☞11.1節）。
 - ◇ 時間と空間という物理学の基本概念を改訂。
 - ◇ 相対性と光速の普遍性を根本原理とすることで、上記の矛盾を解消。

→エーテルは無用の存在となる。

Profile 050 マイケルソン (Albert Abraham Michelson, 1852 ~ 1931)

ポーランド生まれのアメリカの物理学者。2歳のときに家族でアメリカに渡った。アナポリス海軍兵学校を卒業後、そこで物理と化学を教えた。その後ドイツとフランスへ留学し、さらに帰国後はクリーブランドの応用科学ケース・スクール教授となる。クラーク大学教授を経てシカゴ大学教授に就任した。1907年には、その光学に関する業績が認められて、ノーベル物理学賞を受賞。



1881年にマイケルソン干渉計を発明し、これを用いて光速度の厳密な決定を行ったほか、モーレーと共同で地球とエーテルの相対速度の変化を検出する実験を行った。この実験の結果はアインシュタインが光速不変の原理を確立する有力な動機となった。また、光の波長を長さの基準として用いる提案や天体の直径の測定なども行った。

コラム 元素の整理

第8章および第9章では主として物理学の進歩について見てきたが、ここでこの期間における化学の進歩についても軽くまとめておきたい。すなわちここでは、ラヴォアジエ以降次々と発見された元素が、ドルトンやアヴォガドロの仮説と関わりながらどのような過程をたどって整理されていったかを見ていくことにする。

■**プラウトの仮説** イギリスの化学者プラウトは1815年、多くの元素の原子量が整数または整数に非常に近い値をとるように見えることから、原子は水素の原子量に相当する単位から形成されているのかもしれないとする仮説を提唱した。実際、これほど多くの原子量が整数に近いということはただの偶然とは考えられなかったが、原子量が厳密に整数にならないものが多かったためプラウトの仮説をそのまま受け入れる化学者は少なかった。それでも、この仮説は原子量の精密測定を刺激し、原子構造への興味を喚起したという意味でその功績は無視できないものとなっていった。

■**三つ組元素** 1817年から1819年にかけて、ドイツの化学者デベライナーは3元素のグループ（三つ組元素）がいくつかあって、そのうちの1つの元素の原子量が他の2つの元素の原子量のほぼ中間値をとることを見出した。彼の主張する三つ組はハロゲン（塩素・臭素・ヨウ素）やアルカリ土類金属（カルシウム・ストロンチウム・バリウム）のような、明らかに類似した性質をもつ元素からなっていた。デベライナーは、さらにアルカリ金属（リチウム・ナトリウム・カルシウム）やカルコゲン（硫黄・セレン・テルル）などの三つ組も発見した。

この規則性は、原子がある構成単位からできていて、三つ組の中の1つの元素と次のものとの間では一定数の構成単位の過不足があるのだろうという仮説を支持しているように見え、実際そう考えた化学者も少なくなかった。このことはプラウトの仮説の復活に寄与したが、スウェーデンのベルセリウスは1845年に「プラウトの仮説が正しいならば元素変換が少なくとも理論上は可能であるはずだが、そのような現象は実験室で一度も観察されていない」としてこれを痛烈に批判した。

■**オクターブ則** 1860年代までに化学者たちは、首尾一貫して、正確な分析に基づき、かつ一般に受け入れられた一式の原子量を手にしていった。そのため、19世紀初頭にデベライナーの注意を惹きつけたような規則性が、再び化学者たちを突き動かす土台が整った。

そうした中、イギリスのニューランズはこの原子量を用いて元素を並べ、水素から順に番号をつけていった。そして彼は、ある元素の8個あとにくる元素は必ずその性質が「音楽のオクターブの8番目の音符のように、最初のもの繰り返し」になっていることを発見した。ニューランズが音楽に例えたため、この数値的な規則性はオクターブ則と呼ばれるようになった。

■**メンデレーエフの周期表** 1860年代、ヨーロッパ中の化学者たちは元素に番号をつけて表に配列したり、円筒の周りに巻きつけた戦場に書き込んでみたり、グラフ上にプロットしてみたりして、原子量や性質に関する規則性をうまい具合に表現する方法を検討した。そのような試みのうちで最も影響力をもつことになったのは、ロシア人化学者のメンデレーエフが作成した周期表であった。

メンデレーエフは、各元素を1枚ずつのカードに、その原子量と性質および類似する元素とともに書き込み、それらのカードの最も良い配列の仕方を探した。そして彼は、元素の性質はその原子量と周期的な関連性をもつと結論づけ、周期表の原型を完成させた。この周期表は、メンデレーエフの時代以降も改良を重ねられ、現在でも化学教育の最も基本的な道具となっている。

Reihen	Gruppe I. — R ⁰	Gruppe II. — R ⁰	Gruppe III. — R ⁰	Gruppe IV. RH ⁴ R ⁰	Gruppe V. RH ⁵ R ⁰	Gruppe VI. RH ⁶ R ⁰	Gruppe VII. RH ⁷ R ⁰	Gruppe VIII. — R ⁰
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Su=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

図 9.3 メンデレーエフの第二周期表

Profile 051 メンデレーエフ (Dmitrii Ivanovich Mendeleev, 1834 ~ 1907)

ロシアの化学者。ギムナジウムの教師であった父の死後、1855年にサンクトペテルブルグの師範学校で教師の資格を得たのち、一旦クリミアに赴任した。1856年にサンクトペテルブルグ大学に復学し、1859年にはドイツのハイデルベルク大学に留学した。帰国後サンクトペテルブルグ大学工業研究所教授を経て、1867年に同大化学技術教授に就任した。



化学の教科書を執筆する過程で元素の体系的分類を検討中、1869年に原子量順に配列した諸元素の性質の間に周期性が見られることを発見、周期律を発表した。メンデレーエフのこの考えは当初受け入れられなかったが、やがて表の空白部に入るべき未知の3元素（ガリウム・スカンジウム・ゲルマニウム）の存在とそれらの性質についての予測が正しいことが証明され、化学に新しい時代を画するものとして広く認められるようになった。

メンデレーエフは応用化学の分野でも活躍し、ロシアのソーダ工業や石油工業の発展にも貢献した。しかし、その進歩的思想によって当局と衝突することとなり、1890年に大学を去って晩年は度量衡局長の職にあった。

第9章のまとめ

- (1) ファラデーは電磁誘導現象を発見。また、力線（磁力線）の概念を導入。
さらに、「磁気に光を通すと光の偏光面が回転する」こと（ファラデー効果）を発見。
- (2) トムソンは「磁力線に沿って微小渦が並んでおり、それが旋光を引き起こす」と説いた。
- (3) マクスウェルは電磁波の存在を提唱。静電気の研究も行い、変位電流の概念を導入。
また、伝達速度の一致から電磁波と光は同一のものと考え、
→電磁気学理論を大成し、マクスウェル方程式を導出。
→マルコーニの無線機発明につながる。

第10章 有機化学の誕生

科学と平和が無知と戦争に勝利することをわたしは確信している。

— ルイ・パスツール

10.1 化学の教育と研究

リービッヒの実験教育

- * ユストゥス・フォン・リービッヒ … ドイツの化学者。父親は薬剤師。有機化学の確立に大きく貢献したほか、大学の化学に実験教育を導入した。
- * 1831年、物質の質量（含有量）を測定する実験装置を開発。
→学生でも正確な測定が可能になる。
→リービッヒ自身も、この装置で有機物質の組成を分析。
- * リービッヒの学生主体の実験研究・教育は、世界中の注目の的となった。

表 10.1 リービッヒの開発した主な元素分析法

手法・装置	概要
カリ球	試料の燃焼で発生した二酸化炭素を水酸化カリウムで吸収して炭素含有量を測定。
炭水素定量法	燃焼で生成する水と二酸化炭素を過塩素酸マグネシウムと水酸化ナトリウムで吸収して定量。
リービッヒ法	水酸化カリウムと硝酸カリウムを用いて試料中の硫黄を硫酸イオンにし、硫黄含有量を測定。
リービッヒ滴定	シアン化物イオンが銀イオンと安定な錯体を作ることを利用してシアン化物イオンを定量。

Profile 052 リービッヒ (Justus Freiherr von Liebig, 1803 ~ 1873)

ドイツの化学者。薬剤師の子として幼い頃から化学に興味をもつ。ボン大学、エランゲン大学で化学を学ぶが、両大学の化学教育に満足できず中退した。その後、ゲーリュサックに認められて指導を受けた。やがてギーセン大学助教授となり近代的な化学実験室を構成し、学生自身による実験研究を中心とした化学教育を推進し、大学の化学教育に重大な影響を与えた。また、彼自身の化学理論研究も成果をあげ、1845年に男爵に叙せられた。晩年はミュンヘン大学教授、バイエルン・アカデミー会長、内閣顧問などを歴任した。



有機化合物の元素分析法の改良、安息香酸の研究と根理論、酸水素説の確立、発酵の研究などの有機化学分野の功績の他に、農芸化学や生理学など応用化学分野でも優れた業績を残している。化学雑誌『化学年鑑』の編集や化学啓蒙書『化学通信』の執筆が有名。

コラム リービッヒの実験室

リービッヒの化学実験室設立は、19世紀最初の10年間におけるプロイセンの大学改革によって近代化された大学制度のおかげで達成された。これは、ナポレオン戦争の頃の哲学者ヨハン・ゴットリーブ・フィヒテやプロイセンの文部大臣カール・ヴィルヘルム・フォン・フンボルトの尽力でなされた改革で、大学における教育と研究を融合し、あらゆる分野の学問について統制のとれた学習を保証する内容のものであった。学問の自由や Ph.D. という近代的な学位の概念が生じたのもこの改革にともなって生じた。こうしたドイツの大学モデルはやがてアメリカを始めとする世界各国に輸出されることになる。

このような状況下でリービッヒはパリへの留学からドイツへと帰国した。彼は有力な大学にポストを得ようとしたが、実際にはギーセン大学という弱小大学の員外教授（准教授相当）という地位しか得られなかった。それでもリービッヒは何人かの協力的な同僚に恵まれて、彼らと共に薬学者や化学者を要請する教室を開設することができた。

しかし、リービッヒがパリで学んできた化学の水準には、そんな教室で提供できる限界を超えたレベルの化学分析が必要であった。そこで彼は、高い力量をもつ有機分析家を養成できるように有機分析をテーマとして教室を作り直すことにした。そして、リービッヒはカリ球に代表されるようないくつかの有機分析法を開発し、この目的を遂げるとともに化学の新しい分野を切り拓いていった。

1830年代の半ばからリービッヒは国際的に多くの優秀な学生を集めるようになり、実際的な訓練と研究活動を織り交ぜて体系立った実験室教育コースを作り上げた。その学費の安さと徹底的な指導ぶり、リービッヒ自身のカリスマ性が、国際的に高水準な学生を集める要因となった。リービッヒがギーセンに所属していた約30年の間に、彼は700人以上の学生を指導し、化学界を牽引する優秀な研究者や技術者を数多く輩出した。



図 10.1 リービッヒの学生実験室

合成染料の発明

- * アウグスト・ホフマン … リービッヒの弟子。コールタール¹⁾の成分を分析。
→蒸留によって、コールタールの純粋成分を抽出することに成功。
- * ホフマンは 1845 年にロンドンの王立化学学校に招聘され、パーキンらを指導した。
- * ウィリアム・パーキン … イギリスの化学者。
アニリンからキニーネ（マラリアの特効薬）を取り出そうとして失敗。
→一方、反応に際して生じる紫色の沈殿物が紫色染料として利用可能であることに気づく。
→合成染料製造の企業化を図り、「モーヴ」²⁾として合成染料化。
→父親の支援も受けながら、パーキン社を設立。
- * ルナール兄弟 … フランスの化学者。赤色染料「フクシン」³⁾を合成・商品化。
→ルナール社を設立し、特許も獲得。のちにフクシン社となる。
- * 当時のフランス特許法では、特許対象はあくまで商品そのものであり、製造過程ではかった。
→新たな製造法を発明しても、特許侵害になってしまった。
→フランスの染料産業全体の没落につながっていく。

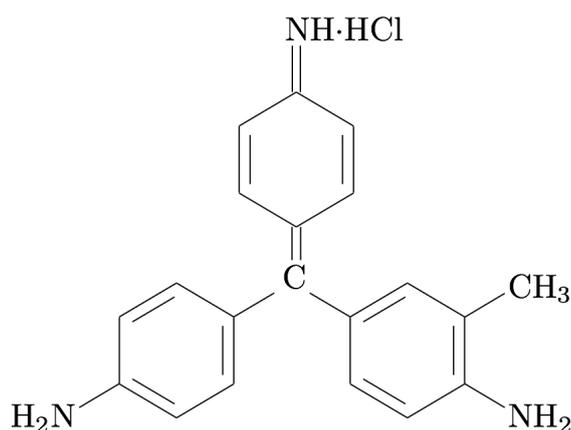


図 10.2 フクシン

表 10.2 染料開発競争

開発年	染料名 (商品名)	色	開発者	説明
1856 年	モーヴ	紫	ウィリアム・パーキン (英)	最初の合成染料。
1858 年	ヒドロキシアゾベンゼン	橙	ペーター・グリース (英)	初のアゾ系染料。
1868 年	アリザリン	茜	アドルフ・バイヤー (独)	のちにパーキン社が特許取得。
1878 年	フクシン	赤	ルナール兄弟 (仏)	細菌の染色や消毒にも用いられる。
1880 年	インジゴ	藍	アドルフ・バイヤー (独)	工業的合成法は BASF 社が開発。
1901 年	インダンスレン	青	レネ・ボーン (独)	黄～黒の広い色調をもつ高級染料。

¹⁾ 石炭を乾留したとき生成する茶褐色または黒色の粘 稠な液状物質。その悪臭と用途のなさから、当時は厄介な産業廃棄物として扱われていた。

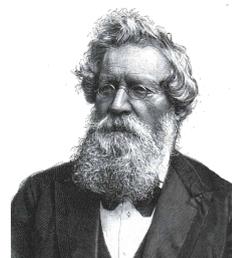
²⁾ フランス語でアオイを意味する語 *Malvaceae* に由来する。アニリンパープルと呼ばれることもある。

³⁾ 花の色が似る *Fuchsia* という植物が由来とする説とルナール (キツネの意) をドイツ語にした *Fuchs* が由来とする説がある。また、マゼンダやロザニリンとも呼ばれる。

Profile 053 ホフマン (August Wilhelm von Hofmann, 1818 ~ 1892)

ドイツの有機化学者。ギーセン大学にてリービッヒの化学実験室で学んだ後、1845年ロンドンに新設されたばかりだった王立化学学校の初代教授に招かれ、以降約20年間有機化学の研究・教育の両面でイギリス化学界に貢献した。1865年、ベルリン大学教授に就任してドイツに帰国し、ドイツ化学会の設立に協力した。

ギーセン大学在学中、彼はリービッヒの最も有力な弟子の一人として研究者養成実験室のモデルを確立と拡張に尽力した。ホフマン自身はコールタールとその誘導体を研究対象に選び、ドイツのアラニン染料工業の建設に重要な役割を果たした。また、ホルムアルデヒドや不飽和アルコールの発見、ホフマン反応の発見などが知られている。



Profile 054 パーキン (Sir William Henry Perkin, 1838 ~ 1907)

イギリスの有機化学者。1853年王立化学学校に入学してホフマンに師事、その助手としてキニーネ合成の研究を行った。そして、その研究中にアニリンパープルとチリアンパープル（モーベイン）を発見した。品質の高い染料が合成できることに気付いたパーキンは師ホフマンの反対を押し切って王立化学学校を中退し、父親からの支援を受けながら1856年に特許を取得して最初の合成染料工業を起こした。

また、1858年にはアミノ酸グリシンの合成に初めて成功したほか、酒石酸や最初の人工香料クマリン、アリザリンの合成なども成し遂げた。パーキン反応の発見や旋光の研究などの基礎研究も知られている。1906年、モーベイン発見の50周年にあたってナイトの称号を授かった。1883年からロンドン化学学会会長。

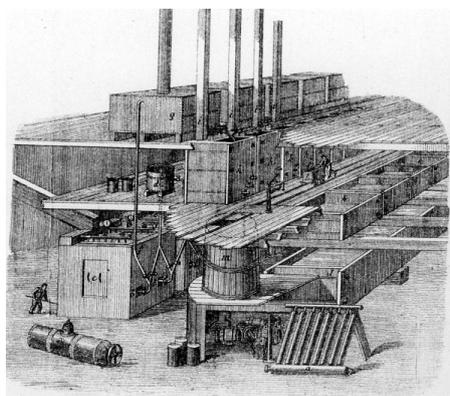
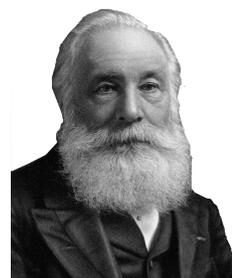


図 10.3 パーキンのアリザリン工場

10.2 科学と技術の相互交流

ドイツの研究者たち

- * アウグスト・ケクレ … ドイツの有機化学者。リービッヒの弟子。
ベンゼン環 C_6H_6 の構造 (図 10.4) を発見した¹⁾。
- * アドルフ・バイヤー … ドイツの有機化学者。ケクレの弟子。
ベルリンの職業専門学校で天然染料の成分に関する研究を行った。
→若い実験助手カール・グレーベとカール・リーベルマンが協力する。
- * バイヤーは 1868 年、アリザリン (茜の成分) の構造式を決定。
→翌 1869 年にはその合成法も発明。
→ハインリッヒ・カロの仲介で、BASF 社と提携し、製造・販売。
- * 同時期にウィリアム・パーキンもアリザリンの合成法を開発し、特許をめぐって競合する。
→当時は合成方法の差が重視されていなかったため、1869 年にパーキン社が勝訴。
- * バイヤーはさらにシュトラスブルク大学でインジゴ (藍の成分) の合成に取り組む。
→1880 年にインジゴの合成法開発。3 年後の 1883 年にインジゴの構造式を決定。
→1890 年代、BASF 社とヘキスト社が開発競争にしのぎを削る²⁾。
- * アリザリンやインジゴの合成法開発には、有機合成の理論的知識や実験的技術とともに、産業技術のノウハウの密接な協力が必要不可欠であった。

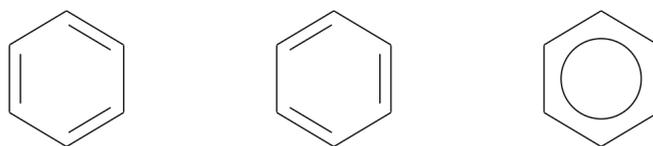


図 10.4 ベンゼン

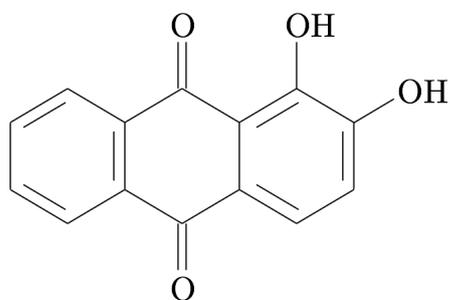


図 10.5 アリザリン

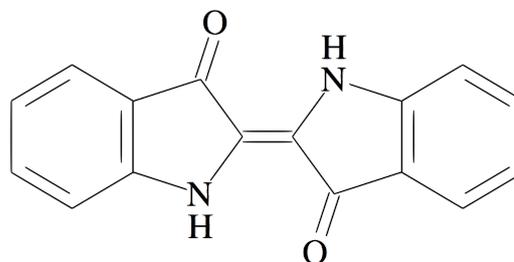


図 10.6 インジゴ

¹⁾ 当時ベンゼンが C_6H_6 の分子式をもつことは既に知られていたが、その構造については謎に包まれたままであった。

²⁾ こうした激しい開発競争の結果、1900年にはドイツで良質のインジゴ藍を量産することが可能となった。このことによって、イギリスは植民地インドで生産していた藍が売れなくなり、染色業界のみならず大英帝国の政治経済体制まで脅かされることになった。

Profile 055 ケクレ (Friedrich August Kekulé von Stradonitz, 1829 ~ 1896)

ドイツの化学者。1847年、建築家志望でギーゼン大学に入学したが、リービッヒの講義を聞いて化学に転向し、リービッヒに師事するようになる。ハイデルベルク大学講師、ヘント大学教授を経て1865年にボン大学教授となった。

実験的基礎に基づいて有機化学の理論を展開し、炭素が4価であり、炭素同士が連鎖状に結合するとして古典有機化合物論の基礎を築いた。ベンゼン環のケクレ構造式を提出したことはあまりにも有名だが、これにより芳香族化合物の化学の基礎も築いたとされる。また、雷酸水銀や不飽和酸、チオ酸についての重要な研究成果もあげている。主著の『有機化学教科書』は、第4巻第1部まで刊行された時点で未完のままに終わってしまった。



コラム ケクレの夢

1890年、ケクレはベンゼンの環状構造に関する最初の論文を発表してから25周年を記念する式典で即興の講演を行った。その中で彼は、教科書を開いているときに暖炉の前でうたた寝をしていて、あのケクレ構造式に辿り着いたのだという逸話を述べた。それによれば、ケクレの夢の中では炭素の鎖がねじれたり回ったりしてまるで蛇のような動きをしていた。そして突然、一匹の蛇の頭が自分の尻尾を捕まえて回転する環になったという。

もっとも、これは作り話であるとする説もある。なぜなら、1861年に見たはずのケクレのこの夢について1890年に彼がこれを語るまで一度も文章によって記録されていないからである。一方、このことについて「夢は科学論文に発表しても根拠にならないからだ」と反論する者もあり、真相は定かでない。いずれにせよ、科学者が科学以外のことを考えているときに潜在意識を通して創造的なアイデアをひらめかせることはそう珍しいことではないらしい。

ケクレ自身は「夢に学ぼう。そうすれば我々は真実を学ぶこともあるかもしれない。しかし、夢は目が覚めているときにそれを検証するまでは公表しないようにしよう」と述べて、夢を安易に公表することに対して警告をしている。

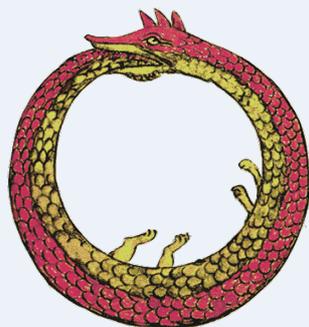


図 10.7 ウロボロス

Profile 056 バイヤー (Johann Friedrich Wilhelm Adolf von Baeyer, 1835 ~ 1917)

ドイツの有機化学者。1858年にベルリン大学で学位を取得した。さらに、ハイデルベルク大学でブンゼンやケクレに師事して大きな影響を受けた。ヘント大学、ゲベルベ研究所を経てシュトラスブルク大学教授、ミュンヘン大学教授となる。有機染料とヒドロ芳香族化合物の研究による有機化学や化学工業への貢献によって1905年にノーベル化学賞を受賞した。

インジゴの合成と構造決定、フタレイン系染料の発見、尿酸誘導体、ポリアセチレン、オキソニウム塩の研究、炭酸同化作用の研究、環状有機化合物についての張力説、ベンゼン構造の集中式の提案など多彩な研究を行ない、門下にはフィッシャーやウィルシュテッターなど有名な有機化学者を輩出した。



ドイツにおける特許制度の改定

- * 普仏戦争に勝利し、ドイツ帝国として統一されたドイツは1877年に帝国特許法を制定¹⁾。
→「製品」ではなく「製造法」に重点が置かれるようになった。
- * 特許制度が改定され、染料企業は競って化学者を雇い、研究開発に力を入れるようになった²⁾。
→化学者の実験室は拡張整備され、企業内研究所として組織されるようになる。
→さまざまな物質について、新製法の開発が加速した。

コラム ドイツの化学企業

ドイツでは、合成染料が開発・合成されるようになって以降、数多くの化学企業が登場するようになった。これらの企業は化学工業の発展にともなって大きな利益を上げ、その存在感と影響力を高めていった。

■BASF社 BASFはBadische Anilin und Soda Fabrik（バーデン・アニリン・ソーダー製造会社）の略で、金銀細工加工業者だったフリードリヒ・エンゲル・ホルンによって1865年に設立された。設立当初は染料フクシンとその合成に必要な各種薬品を製造する会社であったが、1868年にカール・グラubeとカール・リーバーマンがアントラセンからアリザリンを合成する方法を開発して以降、様々な薬品の製造を行うようになり、やがては総合化学会社に成長した（ハーバー・ボッシュ法によるアンモニア製造や電力発電まで行った）。後にイーゲー・ファルベンを主導することになる。なお、BASF社は現在でも世界最大の化学企業として健在である。

¹⁾ 1842年に制定された「発明特許および特権の付与に関する関税同盟にとって拘束的な立法の協定」がその前身となった。

²⁾ 製法開発のための研究者だけでなく、特許対策のための専門家も多数必要とされた。

■**バイエル社** フリードリヒ・バイエルとヨハン・フリードリヒ・ヴェスコットによって、ドイツ西部に設立された。バイエル社も元々は染料工場であったが、1899年にアセチルサリチル酸をアスピリンの商標名で商品化したことで広く知られている。医薬品製造が有名だが、印画紙の製造なども行う。現在でも製薬会社として存続している。

■**ヘキスト社** カルル・マイスター、オイゲン・ルシアスとルートヴィヒ・ミュラーの3人が1863年に建設したタール系染料（最初の製品はフクシン）の製造工場が成長して、1880年にフランクフルト郊外のヘキストで設立された。1883年には解熱鎮痛剤であるアンティピリンの製造を開始し、染料メーカーから総合化学薬品メーカーへと成長した。1890年にコッホが開発した結核ワクチンツベルクリンを結核診断薬として製造したほか、サルバルサンの製造販売も行った。また、インスリンの抽出に成功し、ドイツ内で独占的に販売したことで知られる。

■**イーゲー・ファルベン** 正式名称を利益共同体染料株式会社という化学企業トラスト。上述の3社を含む当時のドイツの化学関連企業最大手6社が統合され、1916年に設立された。第1次世界大戦中は爆薬や医薬品などの大量生産で巨利を博したが、ドイツの敗戦により多くの特権と市場を失った。その結果、アメリカやイギリスの化学工業が大いに発展した。一方、イーゲー・ファルベン社も第2次世界大戦までにはその勢いを取り戻し、ナチス政権の台頭とともにこれと共同して第2次世界大戦では特に合成ゴム・人造石油・火薬類などの生産で巨利を得て1943年にはドイツ国内外の800社を支配する一大トラストとなったが、敗戦後は戦争犯罪に問われるとともに解体が命じられた。

10.3 世界を席巻するドイツの化学工業

合成染料の医薬品への応用

- * 1870年代以降、タール成分からサリチル酸・アセトアリニド・スルフォナールなどが合成され、医薬品として利用されるようになった。cf. ロバート・コッホによる細菌学の確立。
- * パウル・エールリヒ…ドイツの細菌学者、生化学者。
特定の細菌だけに作用する「魔法の弾丸」の開発を試みた。
→彼のもとに留学していた秦佐八郎が梅毒の治療薬サルバルサンを発明。

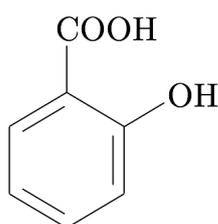


図 10.8 サリチル酸

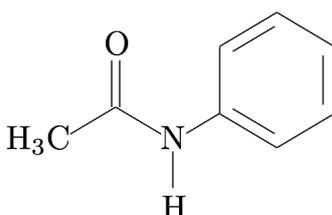


図 10.9 アセトアリニド

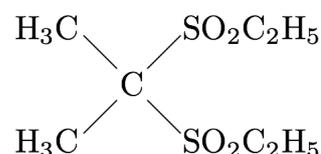


図 10.10 スルフォナール

Profile 057 エールリヒ (Paul Ehrlich, 1854 ~ 1915)

ドイツの細菌学者。血液学・免疫学・化学療法の先駆者と言われる。駆梅薬サルバルサンの発見者。ブレスラウ大学やライプチヒ大学で医学教育を受けたのち、ベルリン大学で助手となった。

その後、コッホの伝染病研究所に入り、ベーリングが発見したジフテリア血清の抗体価の決定方法などを開発した。1896年に免疫研究所所長となり、免疫機構を説明するために側鎖説を提唱。1899年からフランクフルトに移って実験治療研究所を新設、ヘキスト社の支援を受けながら色素の組織への親和性や側鎖説から導き出された色素による化学療法の研究を始めた。1909年、免疫に関する研究の功績により、フランスのメチニコフとともにノーベル医学生理学賞を受賞した。



コラム 薬学の歴史

古代中国では生薬を用いた医療が紀元前後に体系化されて以来、ヨーロッパでは古代ギリシャのディオスコリデスが『薬物誌』を発刊して以来、人々は病気の治療のためさまざまな草木や鉱物などを薬として用いるようになった。こうした医療には長いこと科学的裏付けがなされなかったが、17世紀から18世紀にかけて近代医学が確立されるようになると人々は病気の原因を科学的に明らかにし、合わせてその予防法も検討するようになり、薬学が近代科学として確立されていくことになる。

薬学がまず最初にあげた大きな功績の1つとして、イギリスの医師ジェンナーによる種痘（天然痘の予防接種）の成功がある。さらに19世紀後半にコッホによって結核菌やコレラ菌が発見され、それまで不治の病とされていた病気のメカニズムが解明されるようになると、その治療薬もあとを追うように次々と開発されていった。予防法についても同様で、1880年にはフランスのパスツールによってワクチン接種による伝染病予防が一般化された。また、同じく19世紀には伝承薬であった生薬の有効成分が次々と単離されるようにもなった。中でも長井長義によるエフェドリンの単離やゼルチュルナーによるモルヒネの単離、ベレチェとベントゥによるキニーネの単離は特によく知られている。

20世紀に入ると、化学や生物学の進歩も相まって、次々と新しい発見や発明がもたらされるようになる。特に、1901年の高峰譲吉による最初のホルモン（アドレナリン）の発見や1928年にイギリスのフレミングによってなされた抗生物質ペニシリンの発見は、現代医療に飛躍的な進歩をもたらした業績の代表例と言える。以来、化学療法の時代が幕明けることとなり、今日に至るまで化学療法剤はさまざまな感染症の治療や予防に役立ち、人類に貢献してきた。また、その効用は感染症の治療にとどまらず、例えば抗癌剤なども発明されて不治の病とされてきた多くの病気から人々の命を救うこととなった。

Profile 058 秦佐八郎 (Sahachiro Hata, 1873 ~ 1938)

日本の細菌学者。山根家に生まれたが、15歳で秦家の養子となった。第三高等学校第三部（岡山大学医学部の前身）で医学を学び1898年に上京、伝染病研究所所長の北里柴三郎の門に入ってペストの研究を行った。1907年から梅毒スピロヘータの治療薬開発を志してドイツに留学し、免疫学などを修めた。留学中の1909年、エールリヒを助けて606製剤（サルバルサン）を開発した。のちに日本では、サルバルサンを製造するために第一製薬が創業されることになる。秦はこの翌年に帰国し、北里研究所部長や慶應大学教授などを歴任した。

晩年は深達性消毒薬を研究し、アクリジンやキノリン剤を開発したほか、熱帯病研究上の功績もある。現在、島根県益田市美都町には、秦の業績を顕彰する秦記念館がある。



第1次世界大戦までの有機化学工業

- * 第1次世界大戦までにドイツの有機化学工業は世界の中で断然優位を占めるようになった¹⁾。
∴ 研究開発環境がいち早く誕生し、整備された。
ex. 企業間の熾烈な競争、企業内の研究所の設立、企業と大学の密接な協力関係
- * 1911年、カイザー・ヴィルヘルム協会²⁾のもとに化学研究所が設立される。
→ 大学・企業・国家の三者が一体となって、有機化学研究を進めるようになる。

コラム 戦争に利用された化学

水源を汚染する作戦をはじめとして、化学・生物兵器の使用には長い歴史があるが、第1次世界大戦は化学戦の歴史における1つの分岐点であった。それは、この戦争においてはじめて化学兵器がある程度大規模に用いられ、科学の専門知識や研究成果が継続的に適用されたからである。当時、すべての戦争を終わらせる戦争と言われたこの総力戦は、最初の「国家間の産業戦」と呼ばれており、国の全経済と国民の力がこの戦争に投入された。使用された兵器全体からみれば化学兵器はほんの一部であり、具体的には高性能爆薬200万トン、縦断500億発が消費されたのに対して、毒ガス（主に塩素ガス）の使用量は12.5万トンにすぎなかった。それでも、この革新的な戦闘形態は、科学と産業資源の大規模な投入の成果だった。化学戦は3年半のあいだに著しい進化と適応を遂げ、戦中から戦後にかけて人々の感情をかきたて、またその有効性と潜在力について果てしない議論を巻き起こした。

¹⁾ 日本では、第1次世界大戦でのドイツ敗戦後ドイツからの化学薬品の輸入が途絶えて以降、国内の化学工業が発達していくこととなるが、その経緯はここにあった。

²⁾ ドイツの科学振興のため1911年にヴィルヘルム2世の勅許を得て設立された機関。優れた学者たちに講義や教育の義務なしに研究に打ち込める機会を提供することを目的としてベルリンその他に多くの研究所を設置・管理した。

第 10 章のまとめ

- (1) リービッヒは物質の含有量を測定する実験装置を開発し、有機物の組成分析を行った。
また、大学の化学に実験教育を導入した。
- (2) ヨーロッパで染料開発競争が行われる。
- (3) フランスの特許法は製品本位であったが、ドイツの帝国特許法は製法本位であった。
→熾烈な開発競争で化学者の雇用進展。ドイツの有機化学工業が世界をリード。

第11章

現代物理学の誕生

天から与えられている何ものかに、ぜひとも到達しなければならない。

— マリー・キュリー

11.1 アインシュタインの相対性理論

特殊相対性理論と一般相対性理論

- * アルベルト・アインシュタイン… ドイツ生まれのユダヤ人理論物理学者。
1905年に特殊相対性理論を提唱。「絶対時間」の概念を捨て去った。
→エーテルの存在を仮定せずに、光速が一定であることの説明に成功する。
- * 特殊相対性理論の中でアインシュタインは、運動していない物体でも質量を持てばエネルギーを保持していると主張した。

$$E = mc^2$$

- * 1916年には一般相対性理論を提唱。重力を時空の歪みとして説明した。
→ニュートン力学は、重力がそれほど大きくない場合の近似的な理論とされる。

Profile 059 アインシュタイン (Albert Einstein, 1879 ~ 1955)

理論物理学者。スイス連邦工科大学チューリッヒ校に学び、ベルンの特許局技師を経てプラハ大学、スイス連邦工科大学、ベルリン大学各教授を歴任したが、1933年にナチスから逃れてアメリカに渡り、プリンストン高級研究所で研究生活をおくった。1921年、光電効果の法則発見の業績でノーベル物理学賞を受賞した。

1905年にチューリッヒ大学に学位論文を提出したが、その直後からブラウン運動の理論的解明、光量子仮説、特殊相対性理論、質量とエネルギーの等価性に関する4論文を相次いで発表した。これらはいずれも物理学史上画期的なものであった。また、1916年には一般相対性理論を発表した。

さらに、万有引力と電磁気力を包括する統一場理論の構築に努めた。量子統計力学でも多くの業績を上げたが、量子力学を牽引していたボーアらのコペンハーゲン解釈には最後まで反対の立場をとり続けた。

また、アインシュタインは熱烈な平和主義者で、ユダヤ人同胞のためにも献身的な努力を惜しまなかった。第2次世界大戦の際はナチスの脅威に対抗するためにルーズベルト大統領に原子爆弾開発を勧告した。一方、戦後は核戦争の危険を除去するように熱心に活動した。



コラム ノーベル賞

ノーベル賞はアルフレッド・ノーベルの遺言によって設立され、1901年に最初の授与が行われた。ノーベル賞は、現在では多くの科学者が最も熱望している賞となっている。

ノーベルはスウェーデンのストックホルムで生まれ、9歳のときに両親とともにサンクトペテルブルグに移った。そこで彼の父はロシア政府のために創案した魚雷や敷設水雷の製造を開始した。青年時代、ノーベルは父の所有するストックホルムの工場で爆薬の研究を行った。1864年、そのストックホルムの工場で爆発事故が起こり、ノーベルは弟を失ってしまう。それ以来、ノーベルは爆薬をより簡単に扱い、運搬できる方法を研究するようになった。

しかし当時のスウェーデン政府は何度も問題を起こした爆薬工場の再建を認めなかった。そこで、ノーベルはスウェーデンではなくドイツに工場を設立し、1867年ニトログリセリンをケイソウ土に混ぜ、爆発信管なしでは起爆しない棒状の鋳型に入れて形どればよいことを見出した。ノーベルはこのアイデアをもとにダイナマイトを発明し、さらに爆発性ゼラチンや無煙火薬の開発にも成功した。こうして彼は後に軍事目的で利用されることになる爆薬を発明したが、実際のところ本人は熱心な平和運動家であった。

355にも及ぶ特許のおかげで、ノーベルは非常に裕福な暮らしを送ることができた。また生涯にわたって一度の結婚もしなかったため、彼の死後には9,200,000ドルもの遺産が残ることになった。ノーベルは同時に、この莫大な遺産を利用して人類に対して最も恩恵をもたらした人に与えるための賞を設立するようにとの遺言も残していた。

ノーベル賞の授与や選考のしくみは些か複雑である。ノーベル賞の基金は、彼の遺言に基づいて設立されたノーベル財団が法的な所有者であり、また賞の運営管理者でもあるが、4つのノーベル賞授与機関（表 11.1）を結びつける管理体としての役割を果たすに留まり、賞の審査やその決定には一切関与しない。受賞者には金メダル、賞状および賞金が与えられるが、この賞金の額は基金の収益に左右される。すなわち、基金の前年度の利息の67.5%が5つの賞の賞金に割り当てられる。それ以外は選考にかかる費用や繰り越し金となる。

ノーベル賞は、その受賞者の決定にあたっては少々複雑なルールが定められている。基本的には、各分野ごとに5人のノーベル委員会が設けられ、この委員会が世界各国から寄せられた推薦状を参考に選考を行う。この選考審議は非公開で進められ、結果にはクレームをつけられない。また、受賞者を決定するにあたっては、国籍や人種・宗教・イデオロギーなどにより差別を行うことは禁止されており、さらに各賞の受賞者は3人までで死後の受賞はできない。こうした規則はすべてノーベルの遺言にしたがって決められたものである。

毎年ノーベルの命日（12月10日）にノーベル平和賞はノルウェーのオスロで、それ以外はストックホルムでその授与が行われている。

表 11.1 ノーベル賞の授与機関

賞名	授与機関
化学賞 & 物理学賞	スウェーデン王立科学アカデミー
医学生理学賞	カロリンスカ研究所
文学賞	スウェーデンアカデミー
平和賞	ノルウェー議会

11.2 エネルギーの量子仮説

■ ヴィーンの放射公式

- * 金属などを熱すると、色が赤→橙→黄→白と変化していく。つまり、物体は温度が上昇するにつれて高い振動数（短い波長）の光を多く放出する¹⁾。
- * グスタフ・キルヒホッフ … ドイツの物理学者。
物体から放射される光や放射熱のスペクトル分布は、一定の温度の壁に囲まれた時には、物体や壁の材質によらず、その温度だけに依存することを示した²⁾。
→物理学における黒体放射のスペクトル分布決定の重要性を指摘。
- * ルートヴィヒ・ボルツマン … オーストラリアの物理学者。
黒体放射自体も温度・エネルギー・圧力（放射圧と呼ぶ）をもつと主張。
→黒体放射の全エネルギー密度が絶対温度の4乗に比例すること³⁾を証明する。
- * ウィルヘルム・ヴィーン … ドイツの物理学者。
物体の単位体積あたりのエネルギー u を温度 T とその時の振動数 ν の関数で表す。

$$u(\nu, T) = \nu^3 e^{-\frac{h\nu}{T}}$$

→しかし、低い振動数（長い波長）においては実測値とずれてしまう。

- * 高温におけるスペクトル分布式の決定は、逆にスペクトルを測定することにより温度の高さを決定できることを意味していたため、鉄鋼の技術が進歩した19世紀末において、溶鉱炉の温度測定にスペクトル分布が用いられることが期待されていた⁴⁾。

Profile 060 キルヒホッフ (Gustav Robert Kirchhoff, 1824 ~ 1887)

ドイツの物理学者。ケーニヒスベルク大学に学び、ブレスラウ大学員外教授、ハイデルベルク大学教授、ベルリン大学数理物理学教授を歴任した。その主著『力学講義』は古典物理学の標準的教科書として広く使用された。

1849年キルヒホッフの電気回路の法則を、1859年キルヒホッフの放射法則を発見した。その後ブンゼンとともにスペクトル分光の研究に従事し、セシウムとルビシウムを発見。また、フラウンホーファーが太陽スペクトル中にD線と名づけた黒線は、ナトリウムの輝線と同じ位置にあることを見出し、太陽に存在する元素を推定した。彼の分光學上および黒体放射の業績が、のちの原子の構造および量子論の研究への道を開いたといえる。1882年には波動方程式を解いてホイヘンスの原理に理論的根拠を与えたほか、音響学・弾性論の業績もある。



1) この現象を熱放射という。ここで、放射とは可視光や不可視光線を含む電磁波一般のことをいう。

2) この主張には、どの波長の放射もすべて吸収する物体（黒体という）の存在が仮定されているため、「黒体放射」と呼ばれている。

3) この法則はボルツマンの師シュテファンが実験的に見出していたため、今日では「シュテファン・ボルツマンの法則」と呼ばれている。

4) そのため、各種標準の制定と精密測定を目的に設立されたドイツの物理工学研究所では高温でのスペクトル分析が進められた。

Profile 061 ヴィーン (Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien, 1864 ~ 1928)

ドイツの物理学者。ゲッティンゲン大学、ハイデルベルク大学に学び、ベルリン大学でヘルムホルツに師事した。1886年、光の回折現象に関する研究で学位を取得。その後、アーヘン工科大学教授、ギーゼン大学教授、ヴュルツブルク大学教授、ミュンヘン大学教授を歴任する。1911年にノーベル物理学賞受賞。

1893年に黒体放射について波長と温度の関係を発見。また、波長分布の式も導いたが、短波長にしかあてはまらなかった。レイリーの導いた長波長側にしかあてはまらなかった式とともに、のちのプランクの公式を導くきっかけを作った。この他にX線や陰極線、カナル線の研究にも貢献した。



コラム 原子と電子

物質が原子で組み立てられているらしいという考えは古代ギリシャの哲学者レウキッポスにまでさかのぼるが、原子が実際に存在することを示す事例が報告され始めたのは17世紀になってからのことである。たとえば、ボイルは気体が圧縮されてもなおそれが気体のように振舞い続けるためには、小さな粒子から構成されている必要があると信じていた。

しかし19世紀になっても、原子論はほとんど進歩していなかった。ドルトンが原子論を唱えはしたが、原子の存在を直接的に証明することはできていなかったのである。この状況が変化し始めたのは19世紀後半にガイスラーが陰極線を発見した頃からであった。この陰極線の正体をめぐっては、物理学者の意見は2つに分かれた。ドイツでは多くの物理学者はこれを電磁波に似た波であると考えたが、伝統的に粒子論が支配的であったイギリスでは陰極線は何らかの粒子であると考える者が多かった。1881年、イギリスの物理学者ストーニはこの仮想的な粒子に「電子」という名前を与えた。そして、1897年から数年をかけて、トムソンがついにこの粒子・波動論争を終結させた。すなわち彼は、電界をかけると陰極線の方向がふれることを見出し、陰極線の正体が粒子（電子）であることを証明した。また、このとき同時に電子の質量が水素原子1個の質量の約 $1/2000$ であることも判明した。

電子が物質から出てくる以上、これは原子の構成要素に違いないと直ちに仮定されることとなった。1898年、トムソンは原子の模型として正電荷の球体の中に電子が埋め込まれているプラムプディングモデルを提案した。これ以外の原子モデルも多数提出され、例えばレーナルトは原子の大部分が何もない空間であるという実験結果を得て、1903年に正電荷と電子が組になったほとんど空っぽの原子モデルを提唱した。またその翌年、日本の物理学者長岡半太郎は電子が正電荷の周りを惑星のようにまわる長岡モデルを提出した。1911年までに、ラザフォードとその共同研究者によって原子が実際に長岡モデルに近いものであることが示された。なお、現在では原子の構造はこれよりは幾分複雑なことがわかっており、中心の陽子の周りに電子が雲のように存在するモデルが広く知られている。

プランクの放射公式

* マックス・プランク … ドイツの物理学者。

空洞の壁が内部の光や放射熱に呼応して振動する振動体（調和振動体）からできていると想定して、熱力学を適用しエントロピーを計算した¹⁾。

→ヴィーンの公式を修正した、実測値と完全に一致する新しい公式を提出。

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \cdot \frac{h\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

* 上記の公式を導くために、プランクは量子仮説を利用した。cf. ボルツマンの原理

全体のエネルギー E を細かく分割し、物体内部の光や放射熱に呼応して振動する振動体に割り振っていくと、 $h\nu$ が最小となる²⁾。つまり、エネルギーの最小単位は $h\nu$ (エネルギー要素)。

∴ 光は粒子 (量子) である。

👉 p.131 Profile 059 アインシュタイン

Profile 062 プランク (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858 ~ 1947)

ドイツの理論物理学者。市民法を専門とする大学教授の息子としてキールに生まれる。ミュンヘン大学とベルリン大学に学び、ヘルムホルツやキルヒホッフの指導を受ける。ミュンヘン大学講師、キール大学教授を務めた後、ベルリン大学に移り1913年に同大学の総長となった。1930年からはカイザー・ヴィルヘルム研究所（第2次世界大戦以降は彼の名を記念してマックス・プランク研究所となる）所長。1918年にノーベル物理学賞を受賞している。



熱力学、特に黒体の熱放射・吸収の問題を研究し、1900年に放射線のエネルギー分布を説明するためエネルギー量子仮説を提唱した。この考えは、その後の量子力学発展に直接影響を与えた。また、マッハラによる実証主義に対して、實在論的立場から激しい論争を展開したことでも知られる。主著は『新しい物理の世界像』と『物理学的認識への道』。

プランクの業績は輝かしいが、彼とその周囲の人物はかなり悲惨な目に遭っている。彼の2人の娘は出生直後に亡くなり、息子のうちの1人は第1次世界大戦で戦死した。プランク自身は決してナチス政権を支持していなかったが、彼はナチスの時代にドイツに残る義務があると感じていた。また、これはナチスの暴走はすぐに止まるだろうという彼自身の希望的観測による判断でもあった。しかし現実には彼にとって非常に厳しいものとなる。彼はユダヤ人同僚の助命をヒトラーに嘆願したが失敗し、1937年にカイザー・ヴィルヘルム財団の会長を辞任せざるを得なくなった。また、彼の次男はヒトラー暗殺計画に関わったとして告発され処刑されてしまった。さらにプランクは連合軍の爆撃により家を失った。最終的にプランクは大戦の最後の数日間に連合軍によって救出された。

¹⁾ 黒体放射スペクトルよりは電磁的振動子のエネルギー分布の方が容易に求められた。

²⁾ ここで登場する h はプランク定数と呼ばれる。その値は測定値との比較で求められる。 $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 。

11.3 量子力学の誕生と発展

放射線の発見

- * ヴィルヘルム・レントゲン … ドイツの物理学者。
1895 年，陰極線の研究中に偶然 X 線を発見。
- * アントワーヌ・アンリ・ベクレル … フランスの物理学者。
1896 年，ケイ光と X 線の間係を追究中にウラン鉱から放射線を検出し，放射性物質を発見。
- * キュリー夫妻 … とともにフランスの物理学者，化学者。
1898 年に放射性物質のラジウムを発見。さらに，妻のマリーは金属ラジウムの分離にも成功。
- * 以後，放射線を用いた原子モデルの実験・研究が盛んになる。



図 11.1 レントゲンが撮影した手の透過画像

Profile 063 レントゲン (Wilhelm Conrad Röntgen, 1845 ~ 1923)

ドイツの物理学者。オランダで初等教育を受けた後，チューリッヒ工科大学で機械工学を学んだが，クントの助手になって物理学の研究を始めた。1900 年にミュンヘン大学教授に就任。

1895 年，陰極線の研究を行っている際，陰極線を発生させている真空放電管を紙で包んだにも関わらず，管から離れたところにたまたま置いてあった白金シアン化バリウム（ケイ光物質）を塗布した紙が光ることに気付いた。実験を重ねてその強い透過性や写真感光性を調べ，未知の放射線という意味で X 線と名付けた。近代の物理学を巻く開き，医療分野に大きく貢献したこの発見に対して，1901 年第 1 回ノーベル物理学賞が与えられた。

レントゲンには，このほかにも弾性・毛管現象・熱伝導・電磁現象に関する研究がある。



Profile 064 ベクレル (Antoine Henri Becquerel, 1852 ~ 1908)

フランスの物理学者。祖父も父も物理学者という物理学者家系に生まれる。パリのエコール・ポリテクニクを卒業後、土木学校で学び、土木技師となった。1892年、祖父および父の後を継いで国立自然史博物館教授となった。3年後、エコール・ポリテクニク物理学教授となる。

1895年、レントゲンによるX線の発見に衝撃を受け、翌年ケイ光とX線の関係を追究中にウラン鉱からの放射線を検出、はじめて原子核の崩壊現象を観測した。1900年、この放射線が電界および磁界で曲がること、しかもその一部が陰電子であることを確認した。1903年、キュリー夫妻とともにノーベル物理学賞を受賞した。



Profile 065 キュリー夫妻

(Pierre Curie, 1859 ~ 1906 & Maria Skłodowska Curie, 1867 ~ 1934)

フランスの物理学者夫妻。夫ピエールはパリ大学を卒業し、同校助手を経て1904年に同校教授となった。兄のジャックとともに結晶の研究から圧電気現象を発見、結晶の対称性を理論的に説明し、種々の物理学現象の対称性を電場と電流の関係として説明した。特に、熱が磁性に及ぼす影響を研究し、キュリーの法則とキュリー温度を発見して学位を得た。妻のマリーはロシア占領下のポーランドで住み込みの家庭教師をしながら数学と物理学を独学し、24歳でフランスに移ってパリ大学で物理学と数学を修めた。

このときにピエールと知り合い、1895年に結婚。1903年には夫妻で揃ってノーベル物理学賞を受賞した。

マリーは結婚と同じ時期、ベクレルが発見したばかりのウランの放射能を追ううちにトリウムにも同様の放射能があることを発見した。以降、夫妻は共同でピッチブレンド中の放射性物質を追跡し、1898年に新しい放射性元素（ポロニウムとラジウム）を発見した。このとき、ピエールは放射線を測定するために電離箱と圧電気系を考案した。また、電場におけるラジウムの放射能の研究から α 線、 β 線、 γ 線を発見した。これにより原子の崩壊が実験的に証明され、世界を驚かせた。

1906年、ピエールは荷馬車に轢かれて急死してしまった。その後、マリーはパリ大学教授となり、金属状態の純粋なラジウムの単離に成功し、1911年に2つの新元素の発見と純粋ラジウムの単離に対してノーベル化学賞が授与された。晩年はラジウム研究所所長を務めた。



コラム ブルバキの数学

1939年にニコラ・ブルバキの『数学原論』の第1巻が出版されたが、以降20巻(7,000ページ)以上にもなったこの重要な著作は、数学全体を同一の記号法によって首尾一貫した体系として再編成しようとしたものである。著者の自伝によると、ブルバキは1949年から王立ポルダヴィアン・アカデミーに所属し、その後ナンカゴ大学の数学研究所に移った。

これらの機関が聞きなれないとしても、驚くには当たらない。この数学者ブルバキとその関係機関はすべて現実には存在しない架空のものである。つまりブルバキとは、デュドンネ、カルタン、アイレンベルクらを中心として構成されたフランスの数学者集団のペンネームである。また、ヴェイユのような数学者やフランス人以外の若干名の数学者もこれに協力していたことがわかっている。先述の『数学原論』の各巻はこれらの数学者が委員会を編成して執筆にあたり、それらをブルバキの原稿料で振る舞われた上等のワインと料理を囲みながら論評し合ったのである。

原子構造論

* ヨハン・バルマー… スイスの数学者、物理学者。

水素原子の輝線¹⁾の波長 λ が簡潔な式で表現できることを発見。のちに水素原子以外にも拡張され、次のように一般化される ($R = 1.10 \times 10^7 \text{m}^{-1}$, n_1, n_2 は $n_1 > n_2$ を満たす自然数)。

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

→このように一定の固有波長が生じる理由を説明できる原子モデルの提出が求められる。

* ジョゼフ・ジョン・トムソン… イギリスの物理学者。

「空気中の負の電荷をもつ電子が霧散しており、正の電荷がそれを包む」とする説を提唱。

* 一方、「原子には正の電荷を持つ核が中央に存在し、その周りを電子が飛び回っている」とする有核モデルも考えられていた。

* アーネスト・ラザフォード… イギリスの物理学者。トムソンの弟子。ニュージーランド出身。

α 線を金箔にあてて散乱の様子を調べる実験を行い、大きく反跳される粒子の存在を発見。

→密度の高い核が原子内に存在することがわかり、有核モデルが実証された。

* 電子が原子のまわりを高速回転しているのなら、マクスウェルの電磁気学にしたがうと電磁波が発生し、電子はエネルギーを徐々に失っていき、いずれ原子核に落ちると考えられた。

→しかし、実際にはそうはならないことが疑問とされた。

* ニールス・ボーア… デンマークの物理学者。ラザフォードの弟子。

電子の周回軌道²⁾が核に近づく(電子が落下する)につれ、エネルギーが発生し、原子に安定をもたらしていると考えた。

¹⁾ 原子が放射する光のスペクトル。元素ごとに固有の波長をもつ。逆に、波長から元素の種類がわかるので分光分析などに利用されている。

²⁾ 彼は原子核の周りに複数の電子軌道があると想定すれば元素の周期律を説明できることに気付いたが、そのような系が(ニュートン)力学的に不安定であることもわかっていた。しかしボーアは分子の内部でニュートン力学が成り立つと不都合な事態が生じることを学位論文執筆の際に経験していたため、既存の力学と電磁気学に反して、電子が原子核の周りを回転運動するにも関わらず、電子軌道が一定の大きさを保つとする仮定(定常条件)を許した。

Profile 066 ラザフォード (Ernest Rutherford, 1871 ~ 1937)

イギリスの物理学者。ネルソン・カレッジを卒業後、カンタベリー大学とケンブリッジ大学に学び、キャベンディッシュ研究所で研究を行った。カナダのマギル大学教授、マンチェスター大学教授、キャベンディッシュ研究所所長、王立研究所教授を歴任。さらにイギリス科学振興協会会長や王立協会会長も務めた。1908年にノーベル化学を受賞。また、1914年にはナイトの称号を贈られ、1931年にはネルソン男爵に叙せられた。



電波検知器の考案、気体中のイオンによる電気伝導などの仕事をした後、1898年に放射能研究に転じて α 線、 β 線、 γ 線の違いを明らかにし、1902年にソディとともに原子崩壊説を立てた。このとき、ラザフォードははじめて「半減期」の概念を提唱した。また、 α 線がヘリウムの原子核であることを実証したり、 α 線を金属箔に衝突させる研究から有核原子模型を確立したりもした。

第1次世界大戦中は潜水艦探知装置の開発に従事していたが、戦後になって再び数々の業績を生み出す。例えば、1919年には α 線を窒素原子にあてて水素原子をたたき出し、初めての原子核人工変換に成功した。陽子（プロトン）の命名、中性子や重水素の存在予言、放射能による年代測定法の提唱なども彼によるものである。

物質構造の根本を明らかにしたこと以外にも、生涯を通じて有能な弟子の育成に励んだことなど、その科学界に対する功績は極めて大きい。「原子物理学の父」とも称される。また、ナチスに迫害されていたユダヤ人学者の救済にも尽力した。

Profile 067 ボーア (Niels Henrik David Bohr, 1885 ~ 1962)

デンマークの理論物理学者。父はコペンハーゲン大学教授。1911年、コペンハーゲン大学から学位を取得後イギリスへ留学。トムソンやラザフォードの下で研究を行う。1916年にコペンハーゲン大学教授となるまでデンマークとイギリスの間を行ったり来たりした。1921年にコペンハーゲン理論物理学研究所を創設し、自ら所長となって世界でも有数の研究所に育て上げた。1922年にノーベル物理学賞を受賞。晩年は東洋哲学を研究し、量子力学との類似性を見出した。



1913年にラザフォードの原子模型とプランクの量子仮説を組み合わせて、水素原子のスペクトルの説明に成功した。これ以降、量子論の発展に中心的な役割を果たした。1930年代、原子核が研究対象となると核の液滴模型を提出し、原子核理論に大きな影響を与えた。1940年に母国がドイツに占領され、3年後に見の危険を感じて一家でスウェーデンに逃れた。その後、息子とともにイギリスとアメリカの原子爆弾開発に協力したが、第2次世界大戦以降は原子力の平和利用運動に尽力した。

量子力学の誕生

- * ヴェルナー・ハイゼンベルク … ドイツの理論物理学者。
1925 年末に遷移確率¹⁾を行列の計算で求める行列力学を発表。
- * ド・ブロイ … フランスの物理学者。
静止エネルギー ($E = mc^2$) と量子論の公式 ($E = h\nu$) を結びつける
→ 「物体は $E = mc^2/h$ という振動数をもつ波である」とする物質波動論を提唱。
- * エルヴィン・シュレディンガー … オーストリアの理論物理学者。
ド・ブロイの物質波のアイデアを発展させ、量子力学の礎を築く。
- * シュレディンガーは 1926 年、物質波の波動方程式 (シュレディンガー方程式) を導出²⁾。

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

→ ボルンは、この波動関数の絶対値は物質粒子がある空間地点に存在する確率を表すと主張。

→ シュレディンガーはさらに 1927 年、波動力学と行列力学の等価性を証明した。

- * 1927 年、ハイゼンベルクが「物質粒子の位置と運動量は、同時に決定することができない」とする不確定性原理を提唱。
→ 物質粒子は、その存在が確率として空間内に広がりをもっているような存在とされる。

Profile 068 シュレディンガー

(Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, 1887 ~ 1961)

オーストリアの理論物理学者。ウィーン大学に学び、第 1 次世界大戦中は軍務に服したが、シュツットガルト大学教授、ブレスラウ大学教授、チューリッヒ大学教授を経たのち、プランクの跡を継いでベルリン大学教授となった。1933 年にナチスに追われてオーストリアに戻ったのち、1938 年イギリスに渡り、ダブリン高等研究所教授に就任した。さらに 1956 年には再びオーストリアに帰国し、ウィーン大学教授を務めた。1933 年にディラックとともにノーベル物理学賞を受賞している。



1926 年にド・ブロイらの考えを拡張して波動方程式を導き出したハイゼンベルクに対して、物質の波動性に基づいた波動力学を打ち立てた。さらに行列力学と波動力学の数学的等価性を証明し、波動方程式の解である波動関数の物理的解釈の問題や観測問題の哲学的研究など、量子力学の発展に対して最大級の貢献をなした。

他にも生命現象が統計的因果律に支配されているという独自の考えを展開し、のちの分子生物学の発展に大きな刺激を与えたことでも知られる。量子力学の理論的著書のほかに『私の世界観』や『生命とは何か』などがある。

¹⁾ あるエネルギーの定常状態からあるエネルギーの定常状態へと電子が移る確率。アインシュタインが 1916 年に導入した概念。

²⁾ これにより、ボーアの原子構造論から導かれる結果を見事に再現することができた。

コラム シュレディンガーの猫

量子力学では物理量の状態を表す波動関数の運動はシュレディンガー方程式によって記述される。しかし、その物理量を観測する際の運動はその方程式では記述できない。ノイマンは量子力学の数学的体系を完成させるため、観測過程における波動関数の運動に対する1つの理論的体系を与え、波の収縮は装置で得られたデータを人間が最終的に認識する際に起こると考えざるを得ないと結論づけた。これに対し、シュレディンガーは原子の崩壊（ミクロな現象）と猫の生死（マクロな現象）を結びつけた1つの思考実験を提示し、ノイマンの体系にしたがうと奇妙なことが起こることを示した。

この思考実験では、原子核とその原子核の崩壊により放出された α 線を感知して毒ガスを出す装置と共にネコを箱に入れる場合を想定する。原子核がいつ崩壊して α 線を出すかは、量子力学では崩壊している状態と崩壊していない状態の重ね合わせと表現され、いずれに変化するか（状態が確定するか）は確率的にしか計算できないとされている。そのため箱を開けていない（観測していない）状態のとき、量子力学的には原子核が崩壊して α 線が発生して毒ガスが放出されて猫が死んでいる状態と、原子核が崩壊しておらず α 線が発生していないため毒ガスが放出されずにネコが生きている状態が重ね合わさっているということになる。しかし、このときの猫が現実には半死半生状態にあるとは考えにくい。そこで、どこの段階で猫の生死というマクロ世界での状態が決定されたのかということが問題になったのである。

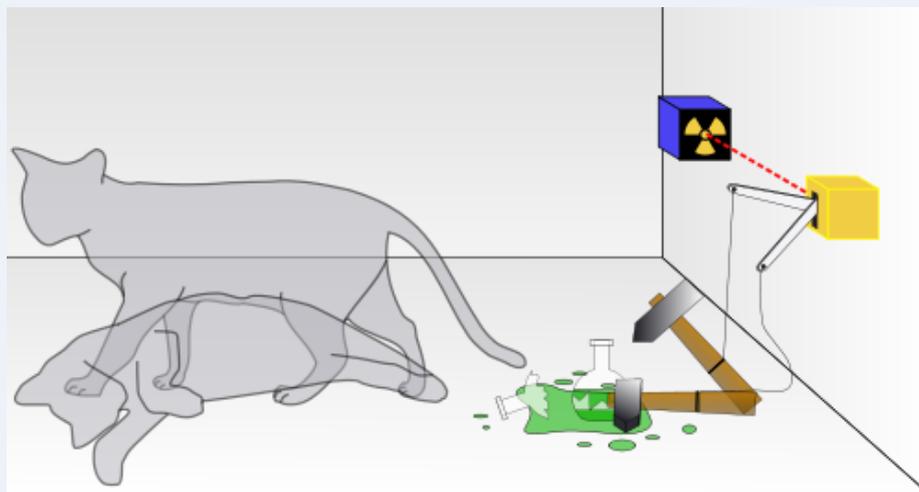


図 11.2 「シュレディンガーの猫」のイメージ図

このパラドクスに対してはいくつかの解釈が提示されている。1つ目の解釈はコペンハーゲン解釈と呼ばれるもので、箱を開けて人間が猫の状態を観測した段階で重ね合わせの状態の波動関数が収縮し、猫の生死が確定するとしている。このほかにもエベレット解釈や多世界解釈と呼ばれる解釈も存在し、こちらは箱を開けて人間が観測した段階で重ね合わせの状態が分岐を起こし、猫が生きている世界と猫が死んでいる世界に分かれると主張されている。1980年代のホーキングらの活躍による影響もあり、現在は多世界解釈が優勢とされているが、未だにこの量子論の解釈問題に関して結論が出たといえる状況にはない。

第 11 章のまとめ

- (1) スペクトル分布の研究が進み、ヴィーンの放射公式が導かれる。
→しかし、低振動数で実測値とずれる→プランクが修正。
- (2) レントゲンが X 線、ベクレルが放射性物質を発見。
→放射線を用いた原子モデルの研究が盛んになる。
- (3) ラザフォードは実験により、原子の有核モデルが正しいことを立証。
→ボーアモデル提唱につながる。
- (4) シュレディンガーはシュレディンガー方程式を導出し、量子力学の礎を築く。
- (5) ハイゼンベルクは不確定性原理を提唱。

第12章 原子物理学と原爆開発

希望ある未来は、人の良心の中だけにある。
— アルベルト・シュバイツァー

12.1 原子物理学の発展

中間子・中性子の発見

- * 湯川秀樹 … 日本の物理学者。日本人初のノーベル賞受賞者。
1932年、陽子や中性子を原子核としてまとめる中間子の存在を理論的に予言。
→1937年に宇宙線の中でその存在が確認された。
- * 中性子は1932年に発見され、原子核の基本構成が明らかとなっていた。
→ α 線を中性子にぶつけることで、より容易に原子核を調べることが可能となった。

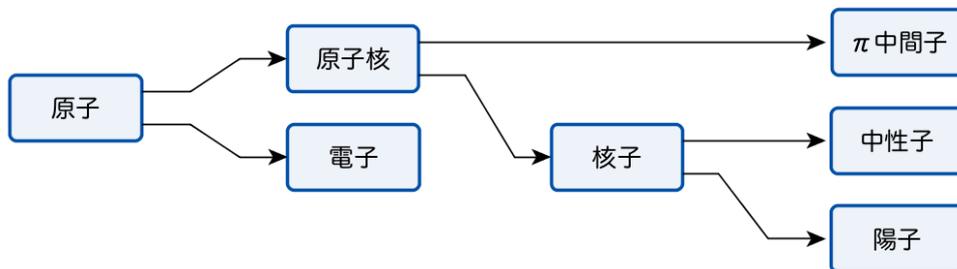


図 12.1 原子を構成する粒子の階層

Profile 069 湯川秀樹 (Hideki Yukawa, 1907 ~ 1981)

日本の理論物理学者。京都帝国大学理学部物理学科を卒業後、大阪帝国大学講師と京都帝国大学教授を経て1942年に東京帝国大学教授に就任。さらに、プリンストン高等研究所客員教授やコロンビア大学教授も務めた。1953年、京都大学基礎物理学研究所の創設に伴い初代所長となる。1943年に文化勲章を受賞し、1949年には日本人として初めてノーベル物理学賞を受賞した。

1934年、核子間の力および β 崩壊を媒介する場の粒子として、電子と陽子の中間の質量をもつ粒子の存在を予言し、さらに1936年にはK電子捕獲の理論を提唱した。湯川の予言は μ 粒子発見をはじめ多くの素粒子の発見を刺激した。また、ノーベル賞受賞後は非局所場の理論展開に務めた。



■ ウラン核分裂の発見

- * エンリコ・フェルミ … イタリアの物理学者。
当時、自然界における最大の原子であったウランに中性子を放射し、原子核が分裂して新たな原子となる核分裂の過程を観測。
- * オットー・ハーンとリーゼ・マイトナーは、中性子を放出したウラン試料からバリウムを検出。
- * 核分裂の際、強力な静電気的作用により2つの塊が反跳し合い、大きな運動エネルギーを生じることが示される→原爆に応用される可能性が浮かび上がる。

Profile 070 フェルミ (Enrico Fermi, 1901 ~ 1954)

イタリアの物理学者。ピサ大学で学位を取得。その後、ドイツのゲッティンゲン大学でボルンに支持し、1924年に帰国した。

1926年に発表した新しい統計手法（フェルミ統計）に関する論文が認められてローマ大学教授となり、1934年 β 崩壊の理論を立てた。同年、減速中性子によって多くの放射性同位元素を作り出した。その際、ウランの核分裂には気付かなかったというエピソードは広く知られている。1938年にノーベル物理学賞を受賞し、受賞に際してファ

シズム全盛期のイタリアからアメリカに亡命した。アメリカではコロンビア大学教授として原子力の研究に専念し、マンハッタン計画のリーダーの1人として1942年12月2日にウラン核分裂の連鎖反応を人工的に制御することに成功した。1944年にアメリカの市民権を得て、1945年からはシカゴ大学教授となった。

「理論物理学者にして実験物理学者でもあった最後の人」であったフェルミの功をたたえて第100番元素はフェルミウムと名付けられた。



コラム コンピュータの誕生と発達

技術史においてコンピュータの発達は独特である。発明後すぐにこれほどの発達を遂げたものは他に類を見ない。こうした急速な成長の背景には、その圧倒的な利便性の高さとともに軍事的な側面があることは否定できない。

中世以来、科学者は長い間計算できる機械に魅せられてきた。17世紀にパスカルは足し算と引き算のできる歯車を用いた機械（パスカリーヌ）を発明した。さらにその数年後、ライプニッツは四則演算を行うことができる機械を発明した。ただし、これらの機械はすべての操作過程を人間が直接操作する必要があった。

19世紀にはイギリスのパベジが完成には至らなかったものの、それまでとは異なった種類の計算機械を設計した。それは解析機関と呼ばれる装置で、現代のコンピュータにもつながる重要な特徴を有していた。すなわち、一連の指示（つまり“プログラム”）を機械に与える

とそれに基づいて計算が遂行される設計がなされていた。解析機関はバベジが「ミル」と呼んだ中央処理装置のほかに、「ストア」と呼ばれた記憶装置と穴あきのカードから命令を読み取る入力装置を備えていた。この装置にひとたびプログラムを書いたパンチカードを挿入すれば、あとは人手をわずらわすことなくさまざまな演算をこなすことができた。

この機械が完成を見なかった理由の一端は、これが純機械的に作動する機構をもち、当時の技術ではこの機械的作動に適するほど精密な部品を製造できなかったことにある。しかし、1920年代に真空管が発明されると技術的な革命が開始された。そして1930年代、パスカルやライプニッツの機械を引き継いでいた当時の計算機に対し、機械的な歯車やレバーの代わりに真空管を用いる方法が科学者たちによって探求されたのであった。

実際に誰が現代のコンピュータを発明したのかということにははっきりしないが、1942年に理論物理学者のアタナソフとその助手のベリーが数学的演算を行うために約300本の真空管を用いた装置を開発したのが最初のコンピュータであると現在一般に認められている。このコンピュータはアタナソフ・ベリー・コンピュータ（ABC）と呼ばれ、2進数で16桁までの演算を行うことができた。

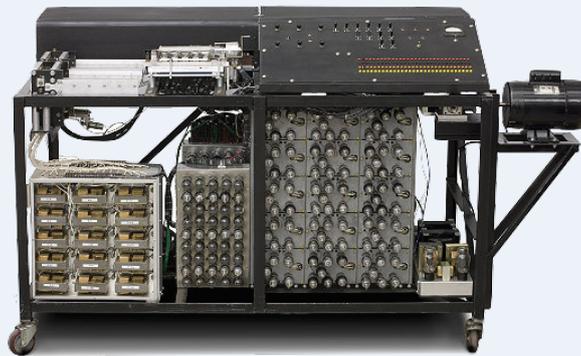


図 12.2 最初のコンピュータ ABC（復元機）

同じ頃、何人かの科学者と技術者は電子計算機の開発にとりかかった。多くの発明がそうであったようにコンピュータも国防上の必要からその研究が急速に進んだ。第2次世界大戦中、アメリカのメリーランド州アバディーンにある弾道研究所は弾道計算のためにより高速で機械的でない計算機を必要とした。そのため ENIAC (Electron Numerical Integrator And Computer) というコンピュータの開発が1943年に開始され、早くも1946年に完成した。このコンピュータは約18,800本もの真空管を使い、その加熱フィラメントは真空管の故障を防ぐため常にスイッチが入った状態となっていた。ENIACはABCとは異なり10進法の機械であり、この点に大きな進歩があった。ENIACはプログラムを作ることができ、汎用機としての機能を果たすことができた（チューリング完全）からである。しかし、プログラムを組むためには、配線板にケーブルを差し込んだり何千ものスイッチを入れたりして機械の配線を変える作業をいちいち行う必要があった。また、150kWという膨大な電力を消費するため ENIAC の電源を入れると街中の明かりが一瞬暗くなったと噂されるほどであった。

ENIACに続くコンピュータとして開発された EDVAC (Electronic Discrete Variable Computer) は特許に関わる法的な争いがあったため、完成したのは1952年のことであった。EDVACには数学者ノイマンのアイデアが多く盛り込まれているが、中でも画期的であった

のはプログラムがメモリに内蔵されていたということである。ENIAC もいくつかの限定された演算処理装置をもっていたが EDVAC ではそれが中央演算装置（CPU）にまとめられ、メモリの書き込みと読み出しの等速化（ランダムアクセス）を可能にした。これは2進数を連続的に処理し、ブール論理に基づいて演算を行った。

一方、イギリスでも電子計算機の開発は戦争のための努力がきっかけとなっている。第2次世界大戦中、ドイツではエニグマと呼ばれる電動式の符号化機械やそれよりもさらに強力なローレンツ暗号機が用いられていたが、これらの暗号の解読は当時不可能とされていた。これに対し、イギリスは秘密施設ブレッチェリー・パークでコロッサスと名付けられた一連の電子計算機の開発を行い、ドイツ軍の秘密通信解読を目指した。最終的に、2,500本の真空管を用いたこの暗号解読専用機は見事にその目的を遂げ、戦争の早期終結に貢献した。

このコロッサス制作の経験を活かし、イギリスの技術者たちは1950年にACE（Automatic Computing Engine）を完成させた。これには数学者チューリングが指導的役割を果たしたが、彼はこの機械用に現代的な意味でのプログラムを初めて書いたのであった。また、もっと大型の計算機MADMも1948年にマンチェスターで完成された。これは、メモリ内にすべて内蔵されたプログラムによって作動する最初の計算機であった。

表 12.1 初期コンピュータの性能比較

名称	完成年	演算方式	記憶容量	消費電力
ABC	1942年	2進法	3,200 bit	-
Colossus	1943年	2進法	25 bit	4.5kW
ENIAC	1946年	10進法	2,000 bit	150 kW
MADM	1948年	2進法	2,560 bit	25 kW
ACE	1950年	2進法	4,096 bit	-
EDVAC	1952年	2進法	44,000 bit	56 kW

第2次世界大戦後、1950年代から1960年代にかけてはUNIVAC IやIBM701, 650, System/360などに代表される商用コンピュータが登場し、コンピュータの開発がさらに急速に進展することとなった。まず、ハードウェアに関して真空管がトランジスタに代わり、さらにトランジスタや抵抗、コンデンサとして別々に扱われていた部品が集積回路にまとめられるようになった。メモリ装置もかさばる真空管や遅延記憶装置から磁心記憶装置（コアメモリ）となり、さらに半導体メモリへと置き換わっていった。バベジの解析機関ではパンチカードやパンチテープが入出力と記録の手段として用いられていたが、これも磁気テープや磁気ディスクとなっていった。ハードウェアの発達はその後も続き、特に1970年代にパーソナルコンピュータが登場してからは小型化が加速的に進められた。その結果、現代の小型コンピュータの能力は1960年代までの大型コンピュータを遥かに凌ぐ性能をもつ。また、ソフトウェアも単純な機械言語から現代の高級言語への進歩を経験している。

こうしたコンピュータの発達は、軍事技術や宇宙開発（☞ 13.3 節）に応用されたのみならず、1980年代以降に進んだインターネットの普及やWindowsをはじめとするOSのGUI化も相まって一般市民にも浸透し、社会全体に極めて大きな影響を与えた。今日では、小学生から高齢者まで多くの人がある恩恵にあずかるようになっている。

12.2 原爆開発と科学者の苦悩

■ アインシュタインの書簡

- * エンリコ・フェルミが、分裂した核から複数の中性子が生まれ出され、それが他の原子核を分裂させて反応がネズミ算式に進行する「核分裂の連鎖反応」の可能性を示唆
→実現すると膨大なエネルギーになるため、爆弾への応用が懸念されるようになる。
- * ハンガリーからアメリカへの亡命科学者ら（レオ・シラード、エドワード・テラー、ユージン・ウイグナー）は、原子爆弾がナチスにより他国に先んじて開発されることを危惧。
→ウラン資源はベルギー領コンゴに存在したためベルギー政府に接触すべく、ベルギー女王と親交のあるアインシュタインに書簡執筆を依頼。アインシュタインはこれに同意。
→ただし、ベルギー女王に書簡を送ることは気が引けたため米大統領に宛てて書簡を出す。

アインシュタイン書簡

1. ウランの核分裂の発見とその兵器への応用の説明。
2. コンゴのウラン鉱山の確保と国内の原子物理学研究の交流・援助の必要性を提唱。

→爆弾そのものは重くかさばる物であるとのイメージを報告。

- * アインシュタイン書簡を受け、米政府はウラン諮問委員会を設立。
→しかし、爆弾を船で運び爆発させるとの戦術は現実離れであるとし、一旦解散。
→国防研究委員会が下部組織として吸収。
- * 国防研究委員会…ヴァネヴァー・ブッシュを中心に組織し、科学技術を軍事動員、
ex. 兵器（焼夷弾など）、探査機、*etc.*
→のちに科学研究開発局（OSRD）に再編され、科学技術動員の組織、実用可能性の判断を行う。



図 12.3 アメリカ合衆国

マンハッタン計画

- * 核分裂には臨界量が必要であったが、これが膨大な量であることが課題であった。
 - ◇モード委員会報告で、ウラン濃縮の可能性が指摘される。
 - ◇カリフォルニア大学バークレー校でプルトニウムが発見される。
 - 少量の燃料で核分裂を起こすことが可能になる。
- * 米政府は原爆開発の管轄を科学研究開発局から陸軍に移し、マンハッタン計画を始動。初期の原爆開発の要^{かなめ}は次の2点であった。
 - ◇ウラン濃縮：フッ化ウランをから²³⁵Uを抽出（気体拡散法）。
 - ◇プルトニウム抽出：シカゴ大学に研究施設（冶金研究所）を設置し、研究に取り組む。
 - 溶解と沈殿を繰り返す沈殿法が開発される
- * 濃縮ウランやプルトニウムは、ニューメキシコ州のロスアラモス研究所へ送られる。
 - ロバート・オッペンハイマーらによって原爆開発が実施される。
- * プルトニウム原爆では、ウラン原爆とは異なる方法で起爆する必要があった。
 - ◇砲撃法：濃縮された核燃料を二つに分け、火薬により両者を結合して臨界量を超えさせる。
 - 二分した核燃料それぞれで核分裂が進んでしまい、十分な火力が得られず。
 - ◇爆縮法：球の中心にプルトニウム核を設置し、それを取り囲むように火薬を置く。球の外側を同時に爆発させることで火薬が中心に向かって爆発、その圧力で臨界量に達する。

コラム マンハッタン計画の徹底した秘密保持

マンハッタン計画は科学史上最大規模の計画であり、19の州とカナダにわたる37の施設で4万3,000人もの雇用者を動員し、22億ドルの予算で運営された。さらにナチスから逃れ来た最高の科学者を含む多数の物理学者がこのプロジェクトに参加した。マンハッタン計画の直接の結果としてテネシー州オークリッジやワシントン州ハンフォード、ニューメキシコ州ロスアラモスなどの都市が発生するほどであった。

これほど巨大なプロジェクトであったにも関わらず、アメリカ政府はすべての作業の秘密を保持することに成功した。計画を主導したごく少数の人々を除く大部分の作業員や科学者は、組織の本当の目的が何であるかを知らなかった。この秘密保持は当然厳重に施行された。主要な科学者たちは、エンリコ・フェルミはヘンリー・ファーマー、ユージン・ウィグナーはユージン・ワグナーと称し、変名で旅行をした。ロスアラモスではすべての電話が監視され、もし秘密が脅かされると軍当局が判断すれば、会話は中断させられた。さらに、取り扱いに注意の必要な物質には暗号名が与えられ、例えばプルトニウムは49（原子番号が94であるため）、ウランは管合金などと呼ばれた。

このような大規模で徹底した秘密保持の努力の結果、1945年7月に最初の核実験が行われるまで、この計画を一切露見することなく進行させることに成功した。そして、その直後の8月6日と9日にその成果物は日本の広島と長崎に投下され、数十万人の命を奪う結果となった。

フランク報告と原子科学者の運動

- * 冶金研究所のメンバーは、原爆開発を超えて戦後の原子力利用（原子力の社会利用）を展望し、会議を重ねる者たちがいた。
→マンハッタン計画の監督者グローブス将軍の命令で解散。
- * ジェームズ・フランク … シカゴ大学の化学者。ドイツから亡命。
原子力の利用、政治的・社会的意義をアメリカ政府に報告。

フランク報告

- 第1節：科学の中立性¹⁾
- 第2節：国際協定の必要性
- 第3節：日本への原爆投下の是非²⁾

→フランク報告は受け入れられず、トルーマン大統領は原爆投下を命令。

- * 1945年7月にアラモゴルド砂漠で実験を行い、同年8月に広島・長崎に原子爆弾投下。

表 12.2 日本に投下された2つの原子爆弾

特徴	広島型	長崎型
通称	リトルボーイ	ファットマン
燃料	ウラン 235	プルトニウム 239
燃料量	60kg	8kg
総重量	4t	4.5t
起爆方式	砲撃法	爆縮法
燃料効率	1.3 %	13 %
爆発力	TNT 火薬換算 15kt	TNT 火薬換算 21kt

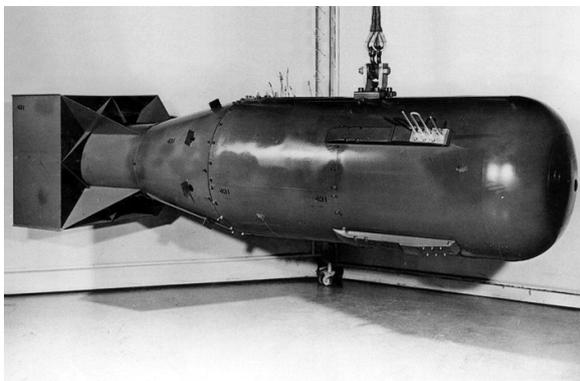


図 12.4 広島に投下されたリトルボーイ

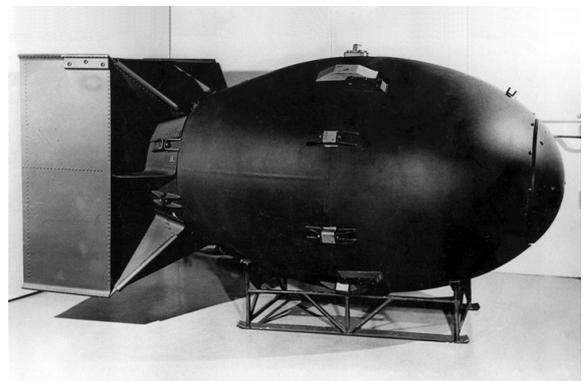


図 12.5 長崎に投下されたファットマン

¹⁾ フランクは、戦後に原爆の製造競争が勃発することを予測していた。

²⁾ 日本に無警告のまま原爆を投下すればアメリカの信頼は失われ、来たる戦後国際協定制定の場でイニシアティブをとれなくなる恐れがあると考えたフランクは、「無人島で示威実験を行い、中立国の代表に目撃させて日本に降服を訴えさせるべき」と主張。

Profile 071 フランク (James Franck, 1882 ~ 1964)

アメリカの物理学者。ドイツに生まれ、ハイデルベルク大学で化学を、ベルリン大学で物理学を学び、1906年に学位を取得した。1920年からゲッティンゲン大学教授となる。

1912年よりヘルツと共同で電子衝突による原子の実験的研究に取り組みフランク・ヘルツの実験に成功、原子構造が量子的なものであることを実験的に確証した。この業績によって1925年にヘルツと共にノーベル物理学賞を受賞した。

1933年、ナチス・ドイツを逃れ、デンマークを経てアメリカに渡った。はじめはジョンズ・ホプキンス大学教授となったが、1938年からはシカゴ大学教授となる。第2次世界大戦中はマンハッタン計画に参加したが、日本への原爆投下には反対した。

晩年は光合成にともなう諸反応に関心を向け、その化学的メカニズムの解明を目指した。



コラム 原爆と日本

マンハッタン計画を始動させ、成功させた力は、多くの優秀なユダヤ系科学者を含む科学者たちにあった。彼らが極度に恐れたのは「間の時間帯」と呼ばれる、ナチスドイツが原爆を保有し、連合国側が原爆をもたない時間帯が生じることであった。したがって、科学者らの目的は開発した原爆を使用することではなく、ナチスドイツに原爆を使用させないことにあったという。

しかし、実際に原爆が完成した頃には、その支配権はすでに科学者らの手にはなかった。むしろ、マンハッタン計画の始動段階から原爆の支配権は政府と軍首脳部が握っていたといえる。そして彼らは、第2次世界大戦後にソ連がアメリカと並んで国際的優位に立つことを恐れた。それを防ぐためには、原爆開発を成功させた科学技術力・経済力と前代未聞の非人道的な兵器を、情勢によっては直ちに使用できる状況にあることをソ連に見せつけばよいと考えた。しかし、原爆の完成当時ドイツは既に降伏しており、原爆を投下することができなかった。かくして、日本がその不幸な投下地に選ばれた、と今日では考えられている。

原爆の投下目標についてはアメリカの目標委員会で慎重に議論された。同委員会は当初、東京湾・川崎・横浜・名古屋・大阪・神戸・京都・広島・呉・八幡・小倉・下関・山口・熊本・福岡・長崎・佐世保の17箇所を候補として選んだが、のちに京都と広島が最も望ましいAA標的、次点で横浜と小倉がA標的、そして新潟がB標的と5つまで絞られた。これらの標的都市は原爆の威力検証と衝撃戦略のために通常の爆撃目標から外された。このリストには長崎が含まれていないが、トルーマン大統領らが道義的な制約から京都を目標から外すよう指示したため、その代替都市として長崎が追加されたようである。最終的に、原子爆弾は8月6日に広島、8月9日に長崎へそれぞれ投下され、甚大な被害を出すこととなった。

12.3 戦後の原爆

- * 原爆開発に携わった科学者も、原爆投下の知らせを受け憤る。
→戦後は原子力の社会的利用を主張。
- * 原子力科学者連盟は機関紙『原子科学者会報』を発刊。
- * フランクの予測通り、原爆製造競争が激化。東西対立（冷戦）がこれに拍車をかける。
- * テラーの指導のもと、水素爆弾が開発される。
→1954年、ビキニ環礁で水爆実験が行われ、第五福竜丸事件が発生。
→広島で第1回原水爆禁止世界大会が開催される。
- * 1957年、ラッセル・アインシュタイン宣言を受け、パグウォッシュ会議が開催される。
→現在まで続く、科学者による科学の平和利用提唱の場となる。ノーベル賞平和賞受賞。



図 12.6 第1回パグウォッシュ会議記念写真

Profile 072 ラッセル (Bertrand Arthur William Russell, 1872 ~ 1970)

イギリスの哲学者、数学者、評論家。ケンブリッジ大学で哲学と数学を専攻、1916年に反戦運動によって罷免されるまで同大学で講師を務めた。1950年にノーベル文学賞受賞。

数学者として出発したが、数学は論理学的概念に還元できるとして『数学の諸原理』や『プリンキピア・マテマティカ』を著し、のちの論理学に多大なる影響を与えた。以来哲学の研究を始め、イギリス経験論に立った認識論（マッハ主義）を展開するが、ここにも数学の研究を通して得られた論理学的成果を取り入れている。

社会評論家、社会運動家としても1950年代の反スターリン運動、パグウォッシュ会議の開催、ベトナム戦争反対の「ラッセル法廷」などを通し、個人の尊厳と世界平和のために貢献した。主著は『西洋哲学史』。



コラム 数学の限界

19世紀、数学者らは微積分の基本概念にある曖昧さを一掃すると同時に、非ユークリッド幾何学の発見を契機として伝統的な既成の枠から開放された。19世紀末までに、数学は体系内無矛盾であらゆる証明問題が証明できるという意味で完全なものであることさえ示せば、数学の発展は完成の域に達すると思われていた。

1900年ヒルベルトはパリで開催されていた第2回国際数学者会議において20世紀の数学への課題として23の問題を提示している。その2番目は「算術の公理が矛盾を導かないことを証明せよ」というものであり、整数の算術の無矛盾性の証明を求めるものとなっている。彼は、数学全体の完全性と無矛盾性を示すことを計画した。数学の完成を目指すこの壮大な計画は、一般にヒルベルトの計画（ヒルベルト・プログラム）と呼ばれている。

集合論の創始者カントルはその17年前に、ヒルベルトの計画にとって妨げとなるような決着のつかない問題の存在に気付いていた。しかし、ヒルベルトはそれらの問題を克服できないものとは考えていなかった。その理由の1つは、カントルが発したのは彼自身の集合論における矛盾（逆理）に関連するものであったことである。その矛盾とは「いかなる集合にもそれ以上の要素をもつ集合がある」というカントルの証明から生じたものであった。逆理が生じるのは、すべての集合の集合を考えるとときである。すべての集合の集合よりもさらに多い要素を持つ集合は一体存在するのだろうか。

ヒルベルトの講演の1年後、ラッセルがさらに深刻な逆理を発見した。それは「自らを要素として含まない集合のすべての集合にその要素は含まれるか」という命題である。

$$\text{Let } R = \{x \mid x \notin x\}, \text{ then } R \in R \iff R \notin R$$

ラッセルの逆理は集合論の核心にあまりにも迫るものであったため、彼や他の数学者はその逆理を避けるべく集合の理論の大幅な改訂や制限を余儀なくされた。

1920年代に、ヒルベルトは数学は無矛盾であることを証明するために他の数学者たちとの大々的な共同作業に入った。ヒルベルトの属する形式主義者のグループは目的の大半を達成したように見えたが、その代償は非常に大きなものとなった。すなわち彼らは証明しようと試みていた概念よりもはるかに複雑な概念を仮定しなければならなかったのである。

1931年、ゲーデルはそれまでのさまざまな議論に終止符を打つような解答を示し、形式主義者らの努力に報いた。この年、彼はいわゆるゲーデルの不完全定理を証明したのである。これにより、自然数の体系を作り出すことができるほど十分に強力ないかなる無矛盾な公理系においてもその真偽が証明できない命題が存在することが示された。すなわち、数学は無矛盾でないか不完全であるかのいずれであることが判明し、ヒルベルトの計画は深刻な影響を受けることとなった。

ゲーデルの不完全性定理の証明以来、数学者たちは数学のすべての分野の基礎となっている広く認められた公理系からは証明できない特別な命題（決定不能命題）の例をゲーデルを模した方法で示している。しかし、その不完全さにもかかわらず数学は発展を続けている。数学が無限の可能性をもたないことがわかって、なおさらに興味を感じるようになったと明言する数学者までいるほどである。

第 12 章のまとめ

- (1) フェルミがウランの核分裂を観察し、連鎖反応の可能性を示唆。
→核兵器への応用が危惧されるようになる。
- (2) シラード・テラー・ウィグナーの 3 人はナチスが先行して核開発を行うことを危惧。
→アインシュタインも同意し、米大統領宛にアインシュタイン書簡を出す。
- (3) アインシュタイン書簡を受け、米政府はウラン諮問委員会を設置。
→一旦解散し、国防委員会が吸収→科学研究開発局 (OSRD) に再編される。
→マンハッタン計画が始動する。
- (4) 気体拡散法でウランを濃縮し、沈殿法でプルトニウムを抽出 (冶金研究所)。
→核燃料はロスアラモス研究所へ送られ、オッペンハイマーらが原爆開発。
→起爆方法としては縮爆法が採用される。
- (5) フランク報告：① 科学の中立性、② 国際協定の必要性、③ 日本への原爆投下の是非。
- (6) 戦後は原爆と原子力の開発における軍の独走を抑制。核開発は国際管理される。
ex. 原子科学者連盟, 原水爆禁止世界大会, ラッセル・アインシュタイン宣言

第13章 宇宙と自然と科学

原因を探求し続ける力が、人を発見者にする。
— チャールズ・ダーウィン

13.1 宇宙の構造

望遠鏡で観測される世界

- * コペルニクスは“天球”の存在を前提とした。
→彼の理論はケプラーやニュートンによって完成されたが、もはや“天球”の出番はなかった。
→望遠鏡の発達により、「遙か彼方に恒星がある」という考え方が定着¹⁾。
- * 望遠鏡による観測によって、星だと思われていたものが星雲だったとわかった事例もある。
- * 星の光を、プリズムを通すことによってスペクトル分析することもあった。
- * 19世紀初めには地動説を裏付ける年周視差²⁾が観測できるようになった。

宇宙膨張論

- * ハーバード大学のヘンリエッタ・リーヴィットがマゼラン星雲内の変光星を多数発見。
→さらに、ケフェウス型変光星の変光周期と光度との間に相関があることを発見。
→地球から天体までの距離測定に利用される。
- * 一般相対性理論によって、遠方の星で赤方偏移が見られることが示される³⁾。
→ルメートルやガモフによって宇宙膨張論（ビッグバン理論）が提唱される。

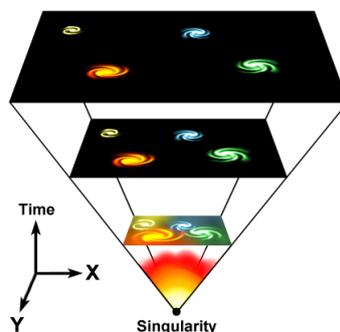


図 13.1 ビッグバン理論

1) 「銀河や星雲が円盤のように集まっている」という理論も登場した。
2) 天体の天球上の位置が公転周期と同じ周期で変化して見える現象のこと。
3) 一般相対性理論によると、重力によって空間が歪み距離が伸びるため、光の波長が理論値よりも長くなる。

13.2 自然の歴史

自然史

- * 英語の“natural history”という言葉は「博物学」と訳されたり、自然法に合わせて「自然史」と訳されたりする。
→「自然はいつできたのか」を探求するため、自然の過去を研究、地質学と共に発達した。
- * ヨーロッパでは古来、キリスト教的な考え方に支配されてきた。
→英仏で、温度差はあったが、いずれもキリスト教から独立した考え方をもつようになる。
- * 近代になって鉱山が発達し、より深いところで採掘を行うようになったので地質の同定を行う必要が生じた。
→地球の歴史を解き明かす鍵となる地質学が発達する。
→さらに、化石の発見が相次いだことによって古生物学という研究分野も誕生。

コラム 化石の成因

化石とは、簡単にいうと過去の生物の死骸が何らかの仕方で形を残しているものである。それらは、大昔から人の目に触れていたに違いないが、そのことを記録に残したのはギリシャ人が最初であった。クセノファネスやヘロドトスは高い山の上に貝など海の生物の化石があることを認め、それは山がかつて海底にあったからだとして正しく推論している。しかし、大きい骨の化石は神話に出てくる動物や巨人の痕跡だと解釈された。いずれにせよ、ギリシャ人たちは化石が生物の痕跡だということまでは正しく認識していた。

アラビアの学者イブン・シーナー（アヴィセンナ）はある金属が他の金属に変わることはないとして錬金術に反対したが、化石についても生物の骨が石に変わることはあり得ないと主張した。彼の主張は結果的に正しかったが、数世紀にわたって論争を引き起こした。

その後もさまざまな科学者が化石の成因について意見を述べたり分類したりした。その中には、化石がノアの箱舟に乗り遅れた哀れな生物の痕跡だとするような間違っただ説も含まれていたが、全体としては化石に対する正しい理解は少しずつ深まっていった。ただし、化石の中には既に絶滅した生物種のものも含まれているということが気づかれるには19世紀まで待たねばならなかった。そこには、「創造主が生物種の滅亡を許すはずがない」というキリスト教的な考え方が影響していたのかもしれない。

19世紀になると地質学者たちは地球の歴史が極めて長いものであり、その間には多くの生物が発生したり消滅したりしたと考えるようになった。そして、一部の化石は絶滅したか、まだ人間が発見できていない生物のものであることがわかってきた。また、中にはシーラカンスのように「生きた化石」として化石の発見よりもあとに現生していることが判明するという例も現れるようになった。1842年にはオーエンによって太古の大型爬虫類を指す「恐竜」という言葉も作られ、1854年に開かれた初の恐竜展は一般の人々を大いに興奮させた。

1) 自然の歴史は天地創造によって始まり、いずれ最後の審判が行われるというもの。

ダーウィンの進化論

- * チャールズ・ダーウィン … イギリスの地質学者、博物学者。
地質調査のため、ビーグル号に乗ってガラパゴス諸島などへ赴く。
→島ごとに、ゾウガメの甲羅の模様やフィンチの嘴の形が異なること¹⁾に気づいた。
→「この細かい変化は何なのだろう？」と考えるうちに、“神の創造”に疑問を抱くようになる。
- * ダーウィンは『種の起源』²⁾を著し、進化論を提唱する。
→「ヒトはサルから進化した」という考えは当時の人々から非常に反感を買い、さらに聖書の記述と矛盾するためキリスト教とも対立した。
→20世紀に入って、ダーウィンの自然淘汰説とメンデルの遺伝学などが組み合わされて、現在の進化機構論が形成された。

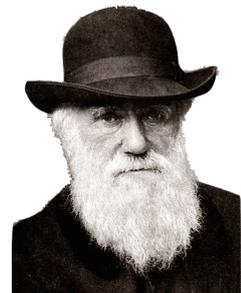
Profile 073 ダーウィン (Charles Robert Darwin, 1809 ~ 1882)

イギリスの博物学者。エラズマス・ダーウィンの孫。エディンバラ大学に入学するが2年で退学、ケンブリッジ大学に入り直す。ここで植物学者のヘンズローらに博物学を学ぶ。

1831年から英海軍のビーグル号に博物学者として乗船し、5年間にわたって太平洋や大西洋の島々、南アフリカ沿岸、ガラパゴス諸島などを訪れ、動植物相の観察や化石の採集、地質の研究などを行った。彼はこの航海中に行った諸観察から生物の種が変化する可能性を考えるようになり、1837年よりそのことに関するノートをまとめ始めた。

進化論の執筆をはじめてまもなく、ウォレスから彼の理論と同一の内容の論文を受け取り、ライエルらの計らいで業績の要約をリンネ学会で発表し、1859年に『種の起源』を出版した。ダーウィンの進化論は、旧来の進化思想と異なり、内容が科学的かつ豊富な実例によって裏付けられている点に特徴があり、強い説得力をもったため大きな反響を呼んだ。また『種の起源』は環境への生物の適応もテーマとして扱っており、生態学の出発点ともなった。

進化の研究以外にもフジツボやラン、ミミズの研究にも没頭した。特に晩年は植物の運動に関する実験的研究を行ない、その結果を『植物の運動力』などにまとめた。



コラム 進化論の誕生

チャールズ・ダーウィンは19世紀の最も偉大な生物学者と呼ばれて当然の存在であるが、進化に関する彼の見解はまったく新しいというわけでも完全であったというわけでもない。実際、ダーウィンは20年間もあたためていた進化論を世に発表したのは、アルフレッド・

1) ダーウィンはイギリスに帰国後、種も異なっていたということを知る。

2) 原書名は *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* と非常に長い。

ウォレスが彼と同じ結論に達し、その小論をダーウィンに郵送してきたからである。ダーウィンは常に度量の大きい人で、自分の研究成果とウォレスのそれを同じ会合で発表するように手配した。こうして、ダーウィンは進化論の基本的な考えを何年も前にまとめたにも関わらず、どちらも先取権をもらわないように配慮したのである。しかし、もし進化論をウォレスだけが主張していたら、世に直ちに大きなインパクトを与えることはなかっただろう。というのも、ダーウィンは既にビーグル号の航海記や航海に関する科学的業績で既に著名人となっていたからにはほかならない。さらにダーウィンは、進化論発表の翌年 11 月 24 日に『種の起源』を出版して多くの証拠と説得力のある豊富な議論で多くの生物学者を納得させた。

しかし、この進化論の提唱はダーウィンやウォレスが突如として思いついたものというよりは、それ以前から着々とその土台が出来上がりつつあったという背景がある。まず、近代的な種概念が 1686 年にジョン・レーによって定義されている。1749 年にはビュフォンがこれを今日でも使用されている「繁殖可能な個体集団で、その他の集団との繁殖は成功しない」という形で発表した。それまでの人々はあまり明瞭な種概念をもっていなかったため、小麦の種からはときとしてキビが生えるなどと信じていたが、そのようなことが起こりえないことはこのときにはっきりした。また、18 世紀までのほとんどの科学者は卵もしくは精子の中にすでに成熟した個体の縮小体が形成されているとする前成説を信じていた。このことは進化の概念が生じることを強く妨げていたが、18 世紀以降は発生に関する研究が進んで、後成説が優位に立つようになっていた。

進化論に都合のよい雰囲気を作った他の要因として、化石が生物の痕跡物であることが理解され、多くの化石はすでに絶滅した種のものであるという認識が育ってきたことが挙げられる。さらに、地球の歴史が進化が起こるのに十分なほど長いものであるということが明らかになったことも進化論出現の必要条件であったといえる。

このような背景の中で 19 世紀前半の多くの科学者やアマチュア科学者はある種の進化を信じるようになった。こうした初期の進化論者の 1 人であるラマルクは環境が種を進化させるという正しい理論を考えた。またチャールズ・ダーウィンの祖父エラズマス・ダーウィンも発生による進化という理論を提唱している。しかし、これらの“進化論もどき”はそれぞれ親の後天的な特性が子孫に伝わるとの主張や地球自体も進化の対象に含まれるという誤った部分を含んでいたために世間に受け入れられることはなかった。

チャールズ・ダーウィン以前のイギリスの進化論者でもっとも影響力があったのはチェンバースであった。彼が 1844 年に出版した『創造の痕跡』はダーウィンとウォレスの双方に影響を与えた。ただし、チェンバースは慎重性に欠く科学者であったため進化の事実を手にしてはいたものの論拠に乏しく、また多くの誤りを含んでいた。

『種の起源』出版後の科学者たちは進化の事実とダーウィンおよびウォレスの自然淘汰説をいずれも認めるようになった。ただし、一般の人々は当初それほど簡単にこの事実を受け入れたわけではなかった。とりわけダーウィンの理論を無神論的とみなした人々はそうであった（ダーウィンは進化論や自分自身が無神論的であるとは考えていなかった）。また、人間と類人猿が祖先を共通にするという考えを否定する人も多かった。自然淘汰説に反対した人の中で特に有名なのは S. バトラーと G.B. ショーで彼らはエラズマス・ダーウィンの説や神秘的な生命力を信じていた。しかし、最終的には進化論と自然淘汰説は、聖書の創造の記述と矛盾すると頑なに考え続ける人を除いてはほとんどの人々の賛同を得ることとなった。

地球の年齢

- * 古代ギリシャの人々は、地球は無限の過去から存在し続けてきたと考えた。
- * 17世紀、キリスト教やユダヤ教の影響により、天地創造は紀元前4004年とされていた
→19世紀初頭には、地質学的な証拠に基づいて1万年程度とされるようになった。
- * 19世紀末、“地球の冷却”という側面から物理学者らが地球の年齢を計算。
→地質学者や進化論者もそれぞれの手法を用いて計算し、1億年程度との認識で一致。
- * 1896年、キュリー夫妻によって放射能が発見されると議論は急展開し、ウランを含む岩石の放射性崩壊量から逆算して地球の誕生は16億年前とされるようになる。
- * 1955年、キャニオン・ディアブロ隕石の年齢測定結果から、地球の年齢は間接的に45.5億年と推定され、現在でも地球の年齢は46億年程度と考えられている。

大陸移動説の提唱

- * アルフレート・ヴェーゲナー…ドイツの地質学者、気象学者。
古生代末期には地球上には巨大な大陸（パンゲア）があり、これが分裂・移動して現在のよう
な大陸の配置になったと主張する大陸移動説を提唱した。
→大陸が移動するという確固たる証拠がなかったため、戦前の段階では認められなかった。
- * 冷戦時に海底研究が進んだことによって、海底のプレート調査が行われる。
→プレートテクトニクス論が登場し、大陸移動説が受け入れられるようになる。
- * 海底掘削やその分析により、地磁気反転などの現象が理解されるようになる。
- * トーマス・クーンはこれをパラダイムシフト（科学革命）の好例と位置づける。

Profile 074 ウェーゲナー (Alfred Lothar Wegener, 1880 ~ 1930)

ドイツの地質学者、気象学者。父は神学者だった。ベルリン大学とハイデルベルク大学で天文学と気象学を学び、ドイツ海洋気象台理論気象部長兼ハンブルク大学やグラーツ大学教授を歴任した。その主著は『大陸と海洋の起源』。

4回にわたってグリーンランド探検に加わり、極地の気団を研究。1911年には大気構造論や大気熱力学理論を発表した。ほかに熱力学・光学・音響学的研究が知られている。ウェーゲナーの業績として特に有名なのは、1912年の大陸移動説提唱である。彼は大西洋両岸の海岸線の相補性や海を隔てた大陸間での古生物の共通性、赤道近くに存在する氷河遺跡などから古生代末の原始大陸が、分裂・移動して今日の大陸の分布となったと考えた。しかし、この説は大陸を移動させる原動力としてどんな力が考えられるかなど多くの不明確な点を残していたために発表当時は学会で認められず、不遇のうちにグリーンランド探検中に遭難死した。ドイツ政府は遺体を軍艦で運んで国葬にしようと提案したが、家族がこれに反対したためウェーゲナーの遺体は彼の愛したグリーンランドに留まり続けている。





図 13.2 大陸移動説

コラム プレートテクトニクス

ウェーゲナーの大陸移動説は発表当初、地殻の中で大陸を移動させる機構が不明であったために否定されはしたが、この仮説は無視するにはあまりにも魅力的なものであった。そのため、第2次世界大戦の後にも地質学の多くの教科書には彼の大陸移動説が紹介され、同時にまたその妥当性については常に疑いが抱かれた。

1950年代初頭から、岩石の残留磁気の測定機器や年代測定法の改良、大洋での大規模な海底調査などによって新しい地球科学研究の流れが起り始め、徐々に大陸移動の証拠が提出されるようになった。また松山基範による発見以来、地球の磁場の来たと南が数十万年ごとに反転を繰り返してきたということも知られるようになった。さらに1960年代のはじめに、ヴァインとマッシューズが大洋底ではこの反転現象が水平に並んだ岩石の縞模様として観察されることを明らかにし、このことから地溝から新たな大洋地殻が次々に形成されるとする海洋底拡大説が支持されるようになった。

やがて、地質学者は大陸移動説と海洋底拡大説とを融合してプレートテクトニクス論という1つの学説をまとめていった。それによると、地殻は10から20枚程度の大きなプレート(厚さ約100kmの板状の岩体)に分割されており、これらのプレートは地殻のすぐ下の半液体状の部分に浮かんだような状態にある。そして、隣り合うプレートが互いに衝突するところでは山脈が形成されたり、地震の震源になったりする。この理論により、海陸の移動・地震・火山・山脈の形成など地球上のさまざまな変動現象を説明することができる。

プレートが移動する原動力については、現在に至ってもまだ完全には解明されていない。海洋底拡大説の時代には、マンツルの対流がその原動力とされることが多かったが、実際のプレートの動きを説明しようとするとは極めて不自然な対流が起こっていると仮定しなければならないという欠点があった。近年では、アセノスフェアと呼ばれるプレートの下にある柔らかい層が、プレートよりわずかに大きな密度をもつことによる重力的な不均衡がプレート移動の原動力として有力視されている。

この学説は地殻のさまざまな性質や現象を説明したり予測したりするのに大変素晴らしい成果をおさめた。しかし、一部の地質学者はプレートがゆっくりと移動していることが実際に測定されるまではなかなかこの説を受け入れなかった。1990年代、ついに人工衛星やレーザー光による測距調査、極めて遠い銀河の位置を基準にした電波干渉法などにより、これらのプレートが約2cm/年の速度で移動していることが立証された。

13.3 戦後の科学

特徴

- * 20 世紀（戦後）の科学の特徴はビッグサイエンス（巨大科学）であるとされる。
→様々な科学が指数関数的に成長。ex. ヒトゲノム計画，巨大加速器，スペースステーション
- * 1970 年代頃に飽和（成長が漸近）。
→さらなる科学活動の大規模化。cf. 政府の支援，企業研究所
- * 先端技術を用いて，真空管内部の現象を分析。cf. 顕微鏡，望遠鏡，加速器
- * 有機化学の発達は染料技術の発展と強く結びついている。
→化学は技術との結びつきが非常に強い。

分子生物学の誕生

- * 1665 年に，イギリスのロバート・フックがコルク片を顕微鏡で観察し，細胞を発見。
cf. 『ミクログラフィア（微小世界図説）』 👉 p.72 Profile 027 フック
- * 19 世紀後半，ロバート・コッホやルイ・パスツールらが顕微鏡を用いて細菌を発見。
→“病気の原因”と考えられるようになる。
- * 電子顕微鏡が発明された後は，病原菌やウイルスを観察・判別可能になる。
- * 顕微鏡に加え X 線回折¹⁾も生物学の進歩に大きく貢献した。
- * 1953 年にジェームズ・ワトソンとフランシス・クリックが DNA の二重らせん構造を発見。
→分子生物学という言葉が登場する。



図 13.3 『ミクログラフィア』に掲載されたノミの拡大図

¹⁾ 20 世紀の始めに開発された結晶構造・原子配列を決定するための手法。

コラム 細胞説

19世紀以前に生体の構造を考えた人々は組織や器官の存在を認めはしたが、組織は非生物物質と同様な単純物質からできていると考えた。1665年にフックが自作の顕微鏡でコルク片を観察して細胞を発見して“cell”（小部屋の意）と名付けたときでさえ、彼は生物に関する最も基本的な発見をしたということには気付かなかった。

植物細胞は細胞壁をもつが動物細胞はこれをもたないため、植物細胞のほうが観察しやすい。そのため顕微鏡が改良される度に科学者たちは種々の植物組織の細胞を観察した。こうしてブラウンが植物細胞中に核があることを発見した。しかし、それでもなお細胞の重要性は認識されていなかった。こうした状況が一変したのは、1838年に植物学者シュライデンが「すべての植物組織は細胞からなる」と唱えたときである。翌年には動物学者シュワンが、卵も細胞であることを主張して動物についても同様のことが成り立つことを示唆した。このときやっと、生物全般についての細胞説が提唱されることとなった。シュライデンとシュワンは細胞説の基本概念について正しい主張をしたが、彼らの主張がすべて正しかったわけではない。例えば、シュライデンは新しい細胞はある細胞の表面に芽として生じると考えたが、のちにネーグリがこれを否定した。もっとも、細胞分裂がきちんと理解されるようになるまでにはまだ多くの年数を要した。

細胞説はその後も拡張が続き、1845年に単細胞生物にまで拡張したほか、ケリカーは1840年代に精子や神経線維も細胞であることを示した。また、1850年代にフィルヒョーが「すべての細胞は細胞より生じる」と唱えたことも重要である。

Profile 075 ワトソン (James Dewey Watson, 1928 ~)

アメリカの遺伝学者、生物物理学者。シカゴ大学を卒業後、1950年インディアナ大学で学位取得。コペンハーゲン大学に留学し、生化学研究に従事した。1951年エイブリーの報告にヒントを得て、DNA分子の構造を研究するためケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所に移る。彼はX線回析の技術をDNAに対して適用し、1953年に共同研究者のクリックとともにDNA分子の二重らせんモデルを完成。その家庭で二重らせん説の正しさが証明され、1962年にクリック、ウィルキンズとともにノーベル医学生理学賞を受賞した。



カリフォルニア工科大学教授を経て1955年よりハーバード大学教授となる。その間にもDNA分子の遺伝子暗号の解読に貢献し、mRNAを発見した。1965年に初版を刊行した『遺伝子の分子生物学』は分子遺伝学の優れた教科書として広く用いられて版を重ねた。著書『二重らせん』は二重らせんモデルを考案した頃の研究生生活を回顧して書かれたもの。1968年、分子生物学研究の世界的中心地コールド・スプリング・ハーバーの計量生物学研究所所長となり、がん研究の指揮をとった。

宇宙開発

- * 第2次世界大戦前から、アメリカやソ連などでロケット研究が行われるようになる。
→1957年10月4日、ソ連が最初の人工衛星「スプートニク」を地球周回軌道に打ち上げる。
→その後も次々と人工衛星が打ち上げられ、バン・アレン帯や太陽風を発見。
→通信衛星や気象衛星が人々に恩恵を与えた一方で、人工衛星やロケットの軍事利用は問題化。
- * 1961年4月12日、ソ連の「ボストーク1号」が初の有人飛行（地球1周）に成功。
→同年5月5日にはアメリカの「フリーダム7号」も有人飛行に成功。
→1969年7月20日には「アポロ11号」が月面に着陸し、人類が初めて月面に立つ。
→やがてアメリカのスペースシャトルとソ連のソユーズが有人飛行を繰り返すようになる。
- * アメリカのスペースステーション計画は1990年代最大の“巨大科学”プロジェクトとなった。
→近年では民間企業による宇宙産業参入も相次ぎ、宇宙開発はますます活況を呈している。

原子物理学の発達

- * 1930年代に様々な粒子が発見される。ex. 陽電子、中性子、ミューオン
- * 素粒子論の発達に伴い、素粒子を発生させるための巨大な加速器やその検出装置である霧箱や泡箱¹⁾が発明される。また、その解析のためコンピュータのパターン認識技術も進歩した。
→加速器は年々大型化し、物質の究極的構造や宇宙の生成過程が急ピッチで解明されている。
cf. ヨーロッパ連合原子核研究機関（CERN）、フェルミ国立加速器研究所
- * 2012年、CERNは大型ハドロン衝突型加速器（LHC）での研究でヒッグス粒子を発見。



図 13.4 アメリカのフェルミ国立加速器研究所

¹⁾ 霧箱は1911年にチャールズ・ウィルソンが発見した原理をもとに開発された荷電粒子検出装置。泡箱はその後継装置で霧箱より高速に観測作業が行えるが、さまざまな補助装置を必要とするため全体としては非常に大掛かりな装置となる。

第 13 章のまとめ

- (1) 望遠鏡をはじめとする諸装置の発達によって、宇宙構造の理解が進んだ。
- (2) 自然の歴史に対する理解は、地質学の発展とともに深まってきた。
→古生物学の誕生、進化論の提唱、大陸移動説の提唱などにつながる。
- (3) 戦後の科学は大規模な研究活動を特徴とし、ビッグサイエンス（巨大科学）と呼ばれる。
→多くの科学分野が指数関数的に成長し、やがては飽和状態に陥った。
- (4) 現代では DNA の二重らせん構造発見に端を発する分子生物学の流行も顕著である。

付録 A

2014 年度期末試験問題

試験時間：80 分，持ち込み：不可

以下の I から V までの問題に答えなさい。

リストされている語句を使って答えを記述するときは，特に語句を使用する数について指示がある場合を除いて，すべての語句を使用して答えを書くこと，語句を使う順番は自由にしてよい。

- I. 次の命題から誤っている命題を選び出し，その番号を記した上で，誤っている箇所を訂正して正しい命題にしなさい（誤っている箇所が一部に限られる時，その部分を指摘し，その部分が正しくなるように書き換えるだけでよい）。
- (1) 自然科学が西洋で誕生し発達した理由の一つとして，古代ギリシャにおいて論理的推論によって仮説や意見を論証するという哲学的態度が生まれたことをあげることができる。
 - (2) 中世ヨーロッパで設立された大学では，アリストテレスの著作が哲学の授業において利用されたが，それらはキリスト教の神学的教義と対立することのないよう教えられた。
 - (3) アリストテレスの哲学では最外天球の外側にも別の天体が存在するかもしれないと想像されたが，キリスト教の教義ではそのような考え方は否定された。
 - (4) 中国では古代から天体の運行に基づいて国家の運勢を占う占星術が重視され，そのために天文観測や天体運行の計算理論の検討が継続的に進められた。
 - (5) コペルニクスの著作『天球回転論』では，著者による序文において地動説はあくまで仮説的なモデルであり実際の天体のあり方を必ずしも表したものではないと述べられている。
 - (6) ケプラーは，ティコ・ブラーエの精密な天文観測データを用いて，火星が楕円運動をしていることをつきとめた。また火星を含む各惑星は，面積速度一定の法則に従い，速度を変化させながら楕円軌道上を運行するとされた。
 - (7) ニュートンは，ガリレオの提唱した円慣性の概念とケプラーの提唱した楕円運動の法則とを統一的に説明するために，万有引力に基づくニュートン力学を作り上げた。
 - (8) 18 世紀の化学者はフロギストンという燃焼の素となる物質の存在を仮定し，物質が燃焼するときに，空気中に存在するフロギストンが物質と反応して燃焼が起こると説明した。
 - (9) 電気と磁気との相互作用を示す電流の磁気作用は，19 世紀初頭に発見された当初，不可秤量物質の粒子間に働く引力や斥力の作用によって説明できると考えられた。
 - (10) アメリカの物理学者マイケルソンとモーレーは，光の速度が地球の運動によらないことを立証する実験をした。光速度の不変性は，19 世紀末に物理学者に不思議に思われた現象の一つだった。

II. 次の3問のうち2問を選び、答えなさい。

- (1) アリストテレスの自然学の説明体系について、以下の言葉を使って説明しなさい。
地球, 天球, 四元素, 自然運動, 可動態
- (2) プトレマイオスの天動説に基づく惑星理論では、離心円・周転円・エカントといった幾何学的概念が利用された。これらの概念について図を用いて説明しなさい。またこれらの概念についてコペルニクスがどのように考えたか、説明しなさい。その上で、コペルニクスの地動説とプトレマイオスの天動説との幾何学的関係について、図を用いて説明しなさい。
- (3) ガリレオは主著である『天文対話』の中で、地動説をどのように擁護したのだろうか。またその擁護の議論の中で、どのように実験を扱ったのだろうか。物を落とす実験、斜面で球をころがす実験を引用しながら、そのことについて説明しなさい。

III. 次の4問のうち2問を選び、答えなさい。

- (1) 18世紀から19世紀前半にかけて熱については熱の物質説から熱の運動説へ、光については光の粒子説から光の波動説へ、物理現象の捉え方の大きな転換があった。その歴史過程について説明しなさい。
- (2) ファラデーやマクスウェルによって生み出された電磁気学の発展について、以下の言葉を使って説明しなさい。
電流の磁気作用, 電磁波, ファラデー効果, 力線, 機械モデル
- (3) 量子論と量子力学の成立過程について、以下の言葉を使って説明しなさい。
黒体放射, 原子核, シュレディンガー, 物質波動論, ボーア
- (4) 地球や生命を含む自然界の時間的発展について、近代以降の科学者はどのように考えてきたか、以下の6つの言葉のうち4つ以上を使って説明しなさい。
地層, 化石, ガラパゴス諸島, 放射能, ウェーゲナー地磁気の反転

IV. 原爆開発に関して、次の問いに答えなさい。

- (1) 核分裂が発見された後、その現象を利用する原子爆弾は、どのように構想され、実際に開発されていったか。その歴史的過程の概略を説明しなさい。
- (2) 冶金研究所の科学者たちが執筆した「フランク報告」においてその著者たちは、原爆の投下について、どのような論拠をもとに、どのような勧告をしたか述べなさい。またそれに対する自分の意見を述べなさい。

V. 今学期の授業で最も興味をもった科学史上のトピックを一つ選び、自分の感想も込めながら、その科学史的内容と科学史上の意義について簡単に述べなさい。

付録B

科学史に登場する研究機関

本書に登場する数多くの科学者は、それぞれ異なる環境で学問を修め、また研究を行った。ここでは、数々の輝かしい業績が生み出された幾多の研究機関の中から、著者が独断と偏見により選出した10の機関について簡単な紹介を記しておこうと思う。

I パリ大学

基本情報

設立	1170年
所在地	212, rue Saint-Jacques 75005, Paris (フランス)
ウェブサイト	http://www.univ-paris1.fr
在籍数	学生：約350,000人(13大学合計)
著名な卒業生	M. & P. キュリー, A. ラヴォアジエ, L. ド・ブロイ

略史と現況

もとはノートルダム大聖堂附属学校だったものが発展し、学生・教員それぞれの自治団体ユニベルシタス(ギルド)を形成するようになり、13世紀にローマ教皇と国王の双方から自治権を獲得した。中世には神学部・教会法学・医学の3上級学部と教養を学ぶ下級学部による構成が確立した。この制度は評判を呼び、ヨーロッパ全域から優秀な学生が集まるようになった。

16～17世紀には各学寮(コレージュ)の独立性が強まり、パリ大学は事実上「学寮の連合体」ともいえるような形態に変化した。中でも1257年頃に神学者ソルボンによって設立されたソルボンヌは有名で、パリ大学神学部やひいてはパリ大学全体の代名詞とまでなった。

18世紀後半から19世紀にかけて、パリ大学はフランス大革命とナポレオンによる学制改革の結果、新設されたフランス大学の大学区(アカデミー)の1つとして再編成され、自然科学部などが創設される一方、神学部は廃止され、教会との結び付きも消滅した。さらに第三共和制期に文部大臣ジュール・フェリーによって改革が行われ、法人格と財政上の自治権を有する近代型の大学となった。

その後、パリ大学では所属学生が年々増加していき、20世紀なかばには単一の大学で学生数20万人を擁するまでにマンモス化していた。1968年にはパリ大学の寮自治紛争を火種とする学生の反乱(五月革命)が勃発し、伝統的な大学の管理・運営のあり方が根本から問い直されるようになり、1969年に高等教育基本法が制定されてフォール改革が実行された。その結果、パリ大学はI～XIIIまでの13大学に分割され、現在に至っている。

II パドバ大学

基本情報

設立	1222 年
所在地	Via 8 Febbraio 1848, 2, 35122 Padova PD (イタリア)
ウェブサイト	http://www.unipd.it
在籍数	教員：約 1,400 人，学生：約 65,600 人
著名な卒業生	N. コペルニクス，J. グレゴリー

略史と現況

イタリアのパドバには 12 世紀以前にも法学や教養諸学を教授する教育機関が存在していたが、パドバ大学はそれらの機関が発展して成立したのではなく、1222 年にパドバに集団移住してきたボローニャ大学の学生や教師によって成立したと考えられている。そのため、中世のパドバ大学はボローニャ大学とほぼ同様の組織機能を有していたとされる。

歴代の教授の中にはガリレオをはじめとする著名な科学者や哲学者などが大勢含まれ、大学と密接な関係にある美術館には彼らの肖像が保存されている。また、15 世紀以降はベネチアの影響もあって医学研究が発達し、近代医学の発展の中心地となった。このほか、1545 年に設立された大学附属植物園はヨーロッパ最古の植物園として知られている。

III ハイデルベルク大学

基本情報

設立	1386 年
所在地	Grabengasse 1, 69117 Heidelberg (ドイツ)
ウェブサイト	http://www.uni-heidelberg.de
在籍数	教員：約 1,300 人，学生：約 29,000 人
著名な卒業生	W. ヴィーン，H. ヘルムホルツ，D. メンデレーエフ

略史と現況

1386 年神聖ローマ帝国のルプレヒト 1 世によりパリ大学をモデルにして、ドイツで最初の大学として設立された。ドイツのルネサンスや宗教改革の中心地となったが、三十年戦争で荒廃し、18 世紀には一時カトリック教会の管轄下に入ったこともある。

1803 年に選帝侯カルル・フリードリヒの尽力によって自治権をもつ近代的な大学となり、再びその威信を回復した。現在は自治権をもつドイツの代表的な国立総合大学の 1 つとなっている。なお、正式名称はルプレヒト・カルル大学ハイデルベルクという。

IV コペンハーゲン大学

基本情報

設立	1479 年
所在地	Nørregade 10, 1165 København (デンマーク)
ウェブサイト	http://www.ku.dk
在籍数	教員：約 2,200 人，学生：約 34,000 人
著名な卒業生	H. エルステッド，T. ブラーエ，N. ボーア

略史と現況

1479 年にデンマーク国王クリスティアン 1 世が北欧最古の 1 つとして創設した。その後 1530 年代の宗教改革期に一時途絶えたが、クリスティアン 3 世によって再興された。1728 年の大火事によって大被害を受けたものの 19 世紀に入ると自然科学系を中心に一大発展を遂げ、20 世紀初頭までデンマーク唯一の総合大学として、学術研究および教育の中心的機関としての地位を誇った。

1970 年に制定された大学法によって国立の機関となり、文部省の管轄下に入った。現在、大学の運営は教授・職員・学生の 3 者の合議によりなされている。

V エディンバラ大学

基本情報

設立	1583 年
所在地	Old College, South Bridge, Edinburgh EH8 9YL (イギリス)
ウェブサイト	http://www.ed.ac.uk
在籍数	教員：約 2,500 人，学生：約 20,000 人
著名な卒業生	C. ダーウィン，J. ブラック，J. マクスウェル，D. ラザフォード

略史と現況

スコットランド王ジェームズ 6 世が宗教改革後の 1582 年に下した勅許状により、エディンバラ市会が翌 1583 年に創立したタウンズ・カレッジを起源とする。スコットランドでは 4 番目に設立された大学である。18 世紀にはヨーロッパ大陸の各国と盛んに知的交流をはかり「スコットランド啓蒙学派」の拠点ともなった。イングランドの大学と異なり学部制を採用したほか、学費を低く抑えて幅広い社会階層にその門戸を開放するなどし、独自の「民主的伝統」を築いた。世界で最初に女子学生の入学を認めたことでも知られている。

エディンバラ大学は総長の選び方が独特で、3 年ごとに教師と学生による選挙によって大学外の人から選ばれる。選出された総長は大学の財政や人事などに責任を負う理事会の議長を務める。

VI ゲッティンゲン大学

基本情報

設立	1737 年
所在地	Wilhelmsplatz 1, 37073 Göttingen (ドイツ)
ウェブサイト	http://www.uni-goettingen.de
在籍数	教員：約 700 人，学生：約 31,000 人
著名な卒業生	W. ヴィーン，C. ガウス，R. コッホ，E. フェルミ，G. リーマン

略史と現況

ハノーバー選帝侯でもあったイギリス国王ジョージ2世によって1737年に設立された。その名を記念して正式名称はゲオルク・アウグスト大学ゲッティンゲンと称される。ハレ大学をモデルと、中世以来の神学部優先を排して科学の自由研究を重んじ、大学確信運動の先駆的な役割を果たした。

1837年には有名なグリム兄弟を含む七教授が憲法上の問題でハノーバー王と対立して大学を去ったゲッティンゲン七教授事件が発生し、ドイツの世論を沸騰させた。一方、ゲッティンゲン大学はこの大学は新人文主義発祥の地としても知られている。

大学図書館の蔵書数は優に200万冊を超え、貴重な写本や古版本も多く、ドイツで最も豊富な蒐集の1つとなっている。

VII コロンビア大学

基本情報

設立	1754 年
所在地	116th St & Broadway, New York, NY 10027 (アメリカ)
ウェブサイト	http://www.columbia.edu
在籍数	教員：約 6,400 人，学生：約 19,900 人
著名な卒業生	B. オバマ，利根川進，F. ルーズベルト

略史と現況

1754年にイギリス国王ジョージ2世の勅許状によりキングズ・カレッジとして創立された。アメリカ独立後の1784年にコロンビア・カレッジと改められ、以降徐々に専門学部や大学院が増設されて1896年に現在のコロンビア大学となった。

ニューヨークに所在し、アメリカ合衆国では5番目に古く著名な大学の1つ。非宗派の私立大学で、アイビーリーグの1つでもある。

VIII フンボルト大学

基本情報

設立	1810 年
所在地	Unter den Linden 6, 10099 Berlin (ドイツ)
ウェブサイト	https://www.hu-berlin.de/de
在籍数	教員：約 1,600 人，学生：約 22,800 人
著名な卒業生	W. ヴィーン，A. ウェーゲナー，M. プランク，H. ヘルツ，A. マイケルソン

略史と現況

旧ベルリン大学。第 2 次世界大戦後に東ドイツの管轄下に置かれた際に、フンボルト大学に改称された。なお、西ベルリンでは旧ベルリン大学の学生と教授を中心としてベルリン自由大学が設立されたが、ドイツ統一後も両大学が併立したままとなっている。

母体となるベルリン大学は国王フリードリヒ・ウィルヘルム 3 世によって 1809 年に出された勅令によって設立された。設立にあたっては、当時公教育長官であった W. フンボルトが「教授の自由」と「学習の自由」を理念として制度設計し、さらに初代学長のフィヒテをはじめ、シュライエルマッハーやヘーゲルなどのすぐれた学者たちによって著しい発展を遂げたため、一躍ドイツを代表する大学となると同時に、近代大学のモデルとして全世界に大きな影響を与えた。

IX チューリッヒ大学

基本情報

設立	1833 年
所在地	Rämistrasse 71, 8006 Zürich (スイス)
ウェブサイト	http://www.uzh.ch
在籍数	教員：約 2,000 人，学生：約 17,600 人
著名な卒業生	A. アインシュタイン，W. レントゲン

略史と現況

前身校は 1523 年に創設されたが、近代的な意味で大学となったのは、スイスが永世中立国となったウィーン会議以降の自由主義改革運動中 1833 年のことであった。そのため、15～16 世紀に創設された同国のバーゼル大学やジュネーブ大学と比べると歴史が浅い。

現在はスイス最大規模の大学であり、神学部・法学部・経済学部・医学部・獣医学部・芸術学部・理学部の 7 学部から構成されている。

X キャベンディッシュ研究所

基本情報

設立	1874 年
所在地	19 J.J.Thomson Avenue, Cambridge (イギリス)
ウェブサイト	http://www.phy.cam.ac.uk
著名な関係者	F. クリック, J. トムソン, A. ラザフォード, J. ワトソン

略史と現況

19 世紀のケンブリッジ大学は、科学的知識を拡大するために物理学の高い知識と技能をもつ研究者や技術者の育成する実践的な実験教育を行う研究機関を設置する必要があることを認識していたが、資金不足のために棚上げにされていた。そのような状況下、1861 年に名門貴族キャベンディッシュ家出身の第 7 代デボンシャー公爵がケンブリッジ大学の総長に就任して個人で多額の寄付を行い、1874 年にキャベンディッシュ研究所を設立した。

初代所長は電磁気学理論で知られるマクスウェルが務め、その後はレイリーやトムソンを所長に迎えた。1895 年ケンブリッジ大学が学制改革を実施し、他大学の卒業生にも学位の取得の道を開いたため、世界各地から若い研究者がやってきて研究所は活気に満ちた。トムソン自ら電子の発見を達成するなど、自由な学風の下に新しい原子物理学の分野を開拓した。

第 1 次世界大戦中は研究所のスタッフも国防研究に動員され、一時その勢いが衰えたが、1919 年に原子核を発見したことで知られるラザフォードが所長に就任し、再び活気を取り戻した。その後、アストンによる質量分析器の開発やコッククロフトとウォルトンによる高電圧加速装置で陽子を加速した原子核の破壊実験、チャドウィックの中性子の発見、さらにはディラックやファウラーによる量子力学に関する理論的考察など、次々と優れた研究業績を発表し、世界の物理学界における地位を固めて隆盛期を迎え、キャベンディッシュ研究所は「核物理学研究のメッカ」と呼ばれるに至った。

第 2 次世界大戦中、研究所のスタッフは再び国防研究に動員され、レーダーの研究や重水を利用した核連鎖反応の研究、原爆製造計画の一端を担う研究など、軍事研究に関与することになった。

戦後、キャベンディッシュ研究所はさらに多彩な研究業績を残してきた。ライルの電波望遠鏡を使った宇宙の電波源の調査研究、ワトソンとクリックによる DNA の二重らせん構造の発見、モットの非金属の金属へのモット転移の発見的研究、ジョセフソンの超伝導体の研究、ケンドルーらの X 線解析によるタンパク質の構造研究など数々の優れた研究を生み出した。最終的に、キャベンディッシュ研究所は今日までに 31 人ものノーベル賞受賞者を輩出し、世界で最も多くのノーベル賞受賞者を出した研究所としてこれ以上ない輝かしい名声を誇っている。同研究所がこれまでに多くの極めてすぐれた研究者を育成できたのは、気鋭の優れた研究者に恵まれたこともあるが、時宜になかった研究組織の編成や研究資金の確保ができたからにはほかならないと言われている。

現在、キャベンディッシュ研究所は西ケンブリッジへ移転し、天体物理学・高エネルギー物理学・低温物理学・固体物理化学・半導体物理学・光エレクトロニクス・物性理論・生物物理学・超伝導研究など現代を代表する諸分野の研究を展開している。

付録C 科学史年表

本書に登場した科学史的事実を時系列に並べてみた。古代より脈々と続く人類の歩みを、少しでも感じ取ってもらえればと思う。なお、国の略号は以下を用いた。

米：アメリカ，英：イギリス，伊：イタリア，豪：オーストラリア，
 欧：オーストリア，蘭：オランダ，瑞：スイス，典：スウェーデン，
 西：スペイン，丁：デンマーク，独：ドイツ，仏：フランス，
 白：ベルギー，波：ポーランド，露：ロシア

年号	科学史上の出来事	世界の動き
前 585	タレスが5月28日に起こった日蝕を正確に記録。	
前 530	ピタゴラスがクロトンでピタゴラス教団を設立。	ペルシャ帝国が繁栄。
前 387	プラトンがアテネ郊外にアカデメイアを創設。	
前 352	中国の観測者が初めて超新星を観測。	
前 335	アリストテレスがアテネにリュケイオンを創設。	アレクサンドリア建設。
前 240	中国でハレー彗星が観測される。	
前 220	アルキメデスがアルキメデスの原理を発見。	始皇帝が中国を統一。
前 129	ヒッパルコスが史上初の天文表を作成。	
前 104	武帝が太初暦を制定。	
77	ディオスコリデスが『薬物誌』を発刊。	
105	蔡倫が紙の製法を改良。	
125	張衡が渾天儀を発明。	
132	張衡が候風地動儀を発明。	
150	プトレマイオスが『アルmageスト』を著す。	
271	中国で羅針盤の原型が発明される。	
529	アカデメイアとリュケイオンが閉鎖される。	西欧初の修道院設立。
704	中国で最初の印刷物が制作される。	
820	フワーリズミーが代数学の書を著す。	
832	バグダードに知恵の館が設立される。	
972	アズハル大学（最古の大学）が完成	
1020	イブン・シーナーが『医学典範』を著す。	紫式部『源氏物語』成立。
1074	オマル・ハイヤームらがジャラーリー暦を作成。	
1076	サレルノ大学が設立される。	カノッサの屈辱。
1119	ボローニャ大学が設立される。	
1126	アデラード（英）が『天文表』をラテン語に翻訳。	北宋が滅び、南宋が成立。

年号	科学史上の出来事	世界の動き
1142	アデラードが『原論』をラテン語に翻訳。	
1145	ロバート（英）が『代数学』を翻訳。	
1170	パリ大学が設立される。 ヘラルド（伊）が『アルマゲスト』を翻訳。	
1222	パドバ大学が設立される。	
1224	フリードリヒ 2 世がナポリ大学を設立。	
1229	トゥルーズ大学が設立される。	
1272	トレド表を改良したアルフォンソ表が作成される。	マルコ・ポーロが航海。
1277	タンピエの譴責が実施される。	
1280	授時暦が完成する。	元が南宋を滅ぼす。
1328	ブラッドワーディン（英）が速度や抵抗を考察。	
1340	ビュリダン（仏）がパリ大学の総長となる。	百年戦争はじまる。
1355	イブン・バットゥータが『三大陸周遊記』を著す。	黄巾の乱。
1386	ハイデルベルク大学が設立される。	
1405	鄭和が大船団を率いて最初の大航海。	
1479	コペンハーゲン大学が設立される。	
1500	ダ・ヴィンチ（伊）がヘリコプターを設計。	
1510	コペルニクス（波）の『コメンタリオルス』回覧。	ポルトガル人がゴア占領。
1527	パラケルスス（瑞）がバーゼル大学で講義を行う。	
1531	ハレー（英）がハレー彗星の観測を予言。	
1543	『天球回転論』と『人体の構造』が刊行。	日本に鉄砲が伝来。
1551	ラインホルト（独）がプロシア表を作成	
1560	ポルタ（伊）が初の学会「秘密の学会」を開催。	
1572	ブラーエ（丁）がカシオペア座の超新星を発見。	
1576	ヴェン島にウラニボルグ天文台が建設される。	
1581	ガリレオ（伊）が振り子の等時性を発見。	オランダが独立。
1583	エディンバラ大学が設立される。	
1592	ガリレオがサーモスコープを発明。	朱印船貿易が本格化。
1597	リバヴィウス（独）が『アルケミア』を著す。	
1600	ギルバート（英）の『磁気論』が刊行される。	関が原の戦い。
1603	ローマでアカデミア・デイ・リンチェイが設立。	江戸幕府成立。
1609	ケプラー（独）が『新天文学』を著す。	
1610	ガリレオが『星界の報告』を著す。	
1620	ヘルモンテ（白）が「気体」という語を作る。	清教徒がアメリカに上陸。
1623	ガリレオの『贗金鑑識官』が出版される。	
1627	ケプラーがルドルフ表を作成。	
1632	ガリレオが『天文対話』を発表。	
1633	デカルト（仏）が『宇宙論』を完成させる。	
1643	トリチェリ（伊）がトリチェリの真空を作り出す。	ルイ 14 世が即位。
1655	ホイヘンス（蘭）が土星の衛星タイタンを発見。	

年号	科学史上の出来事	世界の動き
1660	イギリスで王立協会が設立される。	チャールズ 2 世が即位。
1661	ボイル (英) が『懐疑的な化学者』を出版。	康熙帝が即位。
1662	グラント (英) が統計学を創始。	
1664	『王立協会会報』が発刊される。	
1665	フック (英) が細胞を発見。 ニュートン (英) が二項定理と微分法を発明。	
1666	フランス科学アカデミーが設立される。	ロンドンの大火。
1669	ベッヒャー (独) が「土」の元素を 2 種類に区別。	
1675	ライプニッツが独自に微積分法を確立。	
1678	ホイヘンスが光の波動説を展開。	
1679	フックがニュートンに協会機関誌への寄稿を依頼。	イギリスで人身保護法発布。
1686	ジョン・レー (英) が種概念を提唱。	
1687	ニュートンが『プリンキピア』を出版。 シュタール (独) がフロギストン説を唱える。	
1704	ニュートンが『光学』を著す。	
1708	リップルスハイ (蘭) が望遠鏡を発明。	
1727	ヘールズ (英) が「固定空気」を発見。	キャフタ条約締結。
1733	デュ・フェ (仏) が電荷は 2 種類あることを発見。	ロシアが大北方探検開始。
1735	フランス学士院が地球の形状を調査。	乾隆帝が即位。
1737	ゲッティンゲン大学が設立される。	
1746	フランクリン (米) が雷が電気であることを証明。	
1754	コロンビア大学が設立される。	
1761	ブラック (英) が潜熱の理論を確立。	
1766	キャベンディッシュ (英) が水素を発見。	
1769	ワット (英) が蒸気機関を発明。	
1772	プリーストリー (英) が塩化水素などを発見。 ラヴォアジエ (仏) が燃焼に関する研究を開始。	第 1 回ポーランド分割。
1774	シューレ (典) が塩素を発見。	
1775	ブラックが「固定空気」の諸性質を研究。 プリーストリーが酸素を発見。	アメリカ独立戦争。
1778	ボルタ (伊) がメタンガスを発見。	ハワイ諸島が発見される。
1780	ガルバーニ (伊) が電池の原理を発表。	
1783	ラヴォアジエとラプラス (仏) が熱量保存則発見。	パリ条約締結。
1785	クーロン (仏) がクーロンの法則を発見。	
1787	フランスで『化学命名法』がまとめられる。	アメリカ合衆国憲法制定。
1794	エコール・ポリテクニークが創設される。	テルミドールのクーデター。
1796	ジェンナー (英) が初の種痘に成功。	『ハルマ和解』完成。
1800	ハーシェル (英) が赤外線を発見。 ボルタがボルタ電錐を発明。	
1805	ゼルチュルナー (独) がモルヒネを単離。	トラファルガーの海戦。

年号	科学史上の出来事	世界の動き
1806	アルクユ会が創設される。	大陸封鎖令が発令。
1807	ヤング（英）がエネルギーの概念を提唱。	ティルジット条約締結。
1808	ドルトン（英）が原子論を提唱。	
1809	ゲーリュサック（仏）が気体反応の法則を発見。	
1810	マリユス（仏）が偏光現象を報告。 フンボルト大学が設立される。	
1811	アヴォガドロ（伊）が分子説を提唱。	
1814	ラプラスが『確率の哲学的試論』を著す。	ウィーン会議。
1815	フレネル（仏）が光の波動論を唱える。 プラウト（英）がプラウトの仮説を提唱。	ワータルローの戦い。
1817	デベライナー（独）が三つ組元素説を提唱。	
1820	エルステッド（丁）が電流の磁気作用。 ドイツでモルヒネが単離される。	南極大陸が発見される。
1821	ゼーベック（独）が熱電効果を発見。	ギリシャ独立戦争はじまる。
1822	アンペール（仏）がアンペールの法則を発見。	
1825	ラプラスが『天体力学』を完成。	デカブリストの乱。
1826	リービッヒ（独）が化学実験教室を開設。	
1831	ヘンリ（米）が最初の実用的なモーターを開発。 ファラデー（英）が電磁誘導を発見。	
1833	チューリッヒ大学が設立される。	
1838	シュライデン（独）が植物の細胞説を唱える。	
1839	シュワン（独）が動物の細胞説を唱える。	蛮社の獄。
1840	ケルビン卿（英）が絶対温度を導入。	アヘン戦争。
1842	オーエン（英）が「恐竜」を定義。	
1848	アメリカ科学振興協会が設立される。	フランスで2月革命。
1849	フィゾー（仏）が歯車を利用して光速度を測定。 キルヒホッフ（独）が電気回路の法則を発見。	ローマ共和国建設。
1856	パーキン（英）がモーヴを発見。	アロー戦争はじまる。
1858	パーキンがグリシンの合成に初めて成功。 ダーウィンとウォレス（英）が進化論を提唱。	日米修好通商条約調印。
1859	キルヒホッフが放射法則を発見。 ダーウィンが『種の起源』を出版。	イタリア統一戦争。
1864	マクスウェル（英）が電磁気現象の研究を開始。 ニューランズ（英）がオクターブ則を発表。	国際労働協会結成。
1865	ケクレ（独）がベンゼンの構造式を提出。 BASF社が設立される。	
1867	ノーベル（典）がダイナマイトを発明。	マルクス『資本論』発刊。
1868	バイヤー（独）がアリザリンの構造式を決定。	明治元年。
1869	メンデレーエフ（露）が周期律を発表。	スエズ運河が開通。
1872	ボルツマン（奥）がシュテファン分布を証明。	日本で学制が公布。

年号	科学史上の出来事	世界の動き
1874	キャベンディッシュ研究所が設立される。	
1877	ドイツで帝国特許法が制定される。	東京大学創立。
1878	ルナール兄弟（仏）がフクシンを合成。	ベルリン会議。
1879	エジソン（米）が白熱電球を発明。	
1880	バイヤーがインジゴの合成に成功。 パスツール（仏）がコレラ菌のワクチンを開発。	
1881	マイケルソン（米）がマイケルソン干渉計を発明。 ストーニ（英）が「電子」を命名。	アラビー・パシャの反乱。
1884	バルマー（瑞）がバルマー系列を発見。	清仏戦争はじまる。
1885	長井長義がエフェドリンを単離。	インド国民会議が成立。
1888	ヘルツ（独）が電磁波の存在を理論的に証明。	パスツール研究所開設。
1893	ヴィーン（独）が放射式を発表。	
1895	マルコーニ（伊）が無線電信を発明。 レントゲン（独）がX線を発見。	
1896	ベクレル（仏）が放射性物質を発見。	
1897	トムソン（英）が電子の質量を解明。	
1898	トムソンが原子のプラムプディングモデルを提唱。 キュリー夫妻（仏）ラジウムを発見。	米西戦争。
1899	バイエル社がアスピリンを発売。	南ア戦争はじまる。
1900	プランク（独）がエネルギー量子仮説を提唱。 ヒルベルトが23の問題を提示。	義和団事件が発生。
1901	高峰譲吉がアドレナリンを発見。 最初のノーベル賞授与が行われている。	
1902	ラザフォード（英）らが原子崩壊説を提唱。	日英同盟が成立。
1903	レーナルト（独）が原子モデルを提唱。 長岡半太郎が原子の太陽系モデルを提唱。	
1905	アインシュタイン（独）が特殊相対性理論を発表。	日露戦争が終結。
1908	リーヴィット（米）が2,400以上の変光星を発見。	青年トルコ革命。
1909	エールリヒ（独）がサルバルサンを開発。	人類が初の北極点到達。
1911	ドイツで化学研究所が設立される。 ラザフォードが原子の有核モデルを実証。	人類が初の南極点到達。
1912	ウェーゲナー（独）が大陸移動説を提唱。	タイタニック号が沈没。
1913	ボーア（丁）が原子理論を発表。	
1916	イーゲー・ファルベンが設立される。 アインシュタインが一般相対性理論を提唱。	
1919	ラザフォードが人類初の元素変換に成功	ヴェルサイユ条約締結。
1923	ド・ブロイ（仏）が物質波動論を提唱。	トルコ共和国成立。
1925	ハイゼンベルク（独）が行列力学を発表。	ロカルノ条約締結。
1927	ハイゼンベルクが不確定性原理を提唱。 ルメートル（白）がビッグバン理論を提唱。	

年号	科学史上の出来事	世界の動き
1928	フレミング（英）がペニシリンを発見。	不戦条約締結。
1929	ハッブル（米）がハッブルの法則を発見。	世界恐慌。
1931	ゲーデル（米）が不完全性定理を証明。	満州事変。
1932	湯川秀樹が中間子の存在を予言。 チャドウィック（英）が中性子を発見。	オタワ連邦会議。
1934	フェルミ（伊）が多くの放射性同位元素をつくる。	中国共産党の大西遷。
1936	湯川秀樹が K 電子捕獲の理論を提唱。	スペイン内乱はじまる。
1939	ブルバキの『数学原論』が出版される。 米大統領にアインシュタイン書簡が渡される。	第 2 次世界大戦はじまる。
1942	最初のコンピュータ（ABC）が開発される。	
1945	広島と長崎に原子爆弾が投下される。	第 2 次世界大戦が終結。
1946	アメリカで ENIAC が開発される。	日本国憲法公布。
1953	ワトソンとクリックが DNA の構造を解明。	朝鮮戦争の休戦協定。
1955	ラッセル・アインシュタイン宣言が発表される。 地球の年齢が 45.5 億年と推定される。	ワルシャワ条約機構成立。
1957	第 1 回パグウォッシュ会議が開催される。 ソ連が最初の人工衛星を打ち上げる。	
1961	ソ連がはじめて宇宙の有人飛行を成功させる。	
1962	シュレディンガー（奥）が波動方程式を導出。	キューバ危機。
1968	フェルミ国立加速器研究所が設立される。	プラハの春。
1969	アポロ 11 号が月面に着陸。	
2012	ヒッグス粒子が発見される。	

あとがき

手帳の記録によれば、本書の執筆が開始されたのは 2014 年 4 月 21 日のことであった。当初、私はごくごく一般的な科学史のシケプリを期末試験に間に合うように完成させるつもりでいた。しかし、科学史の授業が終わりに近づくにつれ、あることに気がつかずにはいられなかった。この科学史のカリキュラムは、物理学について詳しい一方で、化学や数学についての扱いは軽く、生物学をはじめとする他の諸分野については、ほとんど言及さえされていなかったのである。私は、こうした抜け落ちを補うようなプリントを作成するように方針を転換した。結果、完成したのが本書である。

いま思えば、あの決定は迂闊であったと言わざるを得ない。1 学期の期末試験前（2014 年 7 月）に完成させるつもりだった執筆計画は大幅に後ろへとずれ込み、途中は作業を行っていない期間も長い。最終的な完成はちょうど 1 年も遅れることになってしまった。もし、昨年度の科学史受講者の中でこのシケプリを心待ちにしてくれていた人がいるのであれば — そんな人がいればの話だが — 私はこのことを深くお詫びせねばなるまい。

完成が 1 年も遅れてしまった分、本書の完成度はそこそこ高いものとなったと自負している。しかし、これもあくまで「そこそこ」に留まることは私の不覚である。本書のデザインを決定する段階では、現状よりもずっと洗練されたものに仕上げる予定であった。ところが実際には、種々の箱物や図表を並べるうちに全体の見栄えが雑然とした印象を与えるものになってしまった。実は今回がフルカラー文書への初挑戦であったのだが、その難しさを痛感させられたと言える。また、内容についても紙面の都合上省かねばならない事柄も多く、書きたかったことの半分も盛り込めなかった。とはいえ、こうした反省点は今後の文書作成に活かしていければと思う。気が向けば、本書の版を重ねることもあるかもしれない。

最後になってしまったが、本書の執筆にあたっては数多くの方にご支援を頂いた。1 学期に指導してくださった橋本先生はもちろんのこと、高速筆記で一言も聞き逃さずに完璧な授業ノートを作成したばんだ氏、内容や見栄えについていくつかの助言を提供したクラスの同級生や SCIFUNS の同期諸氏にまずお礼申し上げたい。また、本書の組版には Lua \LaTeX を用いたが、 \TeX 開発者の Knuth 大先生、 \LaTeX 開発者の L a mpo r t 氏、北川弘典氏をはじめとする Lua \TeX -ja の開発者諸氏、第 10 章に登場するすべての構造式描画に利用させていただいた $\text{X}\mathcal{M}\mathcal{T}\mathcal{E}\mathcal{X}$ の開発者・藤田眞作氏など使用した \TeX 関連システムの開発に携わったすべての方、さらに私が \TeX や \LaTeX に興味を抱ききっかけをくださった出身高校の T 先生、組版に関してさまざまな助言をくださった東大 \TeX 愛好会関係者の皆様には一層の謝意を示したいと思う。

2015 年 7 月
ワトソン

参考文献

全体

- [1] 植村美佐子. MARUZEN 科学年表 - 知の 5000 年史. 丸善, 7 2008.
- [2] 木村陽二郎 (編). 科学史 (ニューカレッジブックス). 有信堂高文社, 11 1995.
- [3] 橋本毅彦. 〈科学の発想〉をたずねて 自然哲学から現代科学まで (放送大学叢書 12). 左右社, 10 2010.
- [4] ブリタニカ・ジャパン (編). ブリタニカ国際大百科事典. 第 3 版, 1 2004.
- [5] 朝日新聞社. コトバンク. <https://kotobank.jp> (accessed 2015-07-08).
- [6] 池田長生. 新化学小事典. 三省堂, 12 2008.
- [7] 巖佐庸, 倉谷滋, 斎藤成也, 塚谷裕一 (編). 岩波 生物学辞典. 岩波書店, 第 5 版, 2 2013.
- [8] T.H. ルヴィア. 入門化学史 (科学史ライブラリー). 朝倉書店, 9 2007.
- [9] 藤嶋昭. 時代を変えた科学者の名言. 東京書籍, 4 2011.
- [10] 安孫子誠也, 岡本拓司, 小林昭三, 田中一郎, 夏目賢一, 和田純夫. はじめて読む物理学の歴史 (読んで楽しむ教科書). ベレ出版, 3 2007.
- [11] I. ジェイムズ. 50 人の物理学者. シュプリンガー・ジャパン株式会社, 2 2010.

第 1 章 ギリシャの自然学

- [12] 高野義郎. 古代ギリシア科学史の旅 (丸善ブックス). 丸善, 12 1996.
- [13] アリストテレス. 世界の名著 (9) ギリシアの科学 (中公バックス). 中央公論新社, 3 1980.
- [14] James J. Tattersall. 初等整数論 9 章. 森北出版, 第 2 版, 9 2008.
- [15] 岡部洋一. 音階, 7 2015. <http://www.moge.org/okabe/temp/scale.pdf> (accessed 2015-07-08).
- [16] 馬場良始. ピタゴラス音律 - 小学校専門科目「数学」での実践, 3 2012. <http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~ybaba/onritsu1.pdf> (accessed 2015-07-08).
- [17] 古代ギリシャ (アテナイ) の教育, 1 2009. <http://historyrakusei.bake-neko.net/education/educ3.html> (accessed 2015-07-08).

第 2 章 中世の科学

- [18] 日本貿易振興機構 (ジェトロ) リヤド事務所. アラブ人名の由来と正しい呼び方, 1 2012. https://www.jetro.go.jp/world/middle_east/sa/others/pdf/name.pdf (accessed 2015-07-08).
- [19] ハンス=ヴェルナープラール. 大学制度の社会史 〈新装版〉 (叢書・ユニベルシタス). 法政大学出版社, 新装, 2 2015.
- [20] 横尾壮英. 中世大学都市への旅 (朝日選書). 朝日新聞, 6 1992.
- [21] 横尾壮英. 大学の誕生と変貌 - ヨーロッパ大学史断章 (大学史叢書). 東信堂, 7 1999.
- [22] 樺山紘一. 都市と大学の世界史 (NHK 人間大学). NHK 出版, 4 1998.

第3章 中国の科学

- [23] 国立国会図書館. 暦の歴史, 5 2007. http://www.ndl.go.jp/koyomi/rekishi/03_index_01.html (accessed 2015-07-08).
- [24] 鳥山喜一. 黄河の水 - 中国小史 (角川文庫ソフィア). 角川書店, 改, 10 1972.
- [25] 株式会社紙藤原. 紙の歴史. <http://www.kamifujiwara.co.jp/kami/history.html> (accessed 2015-07-08).
- [26] Nicky. 中国・古代の4大発明, 2 2012. <http://www.k5.dion.ne.jp/~a-web/Eng/Gv-sChnInvntn.htm> (accessed 2015-07-08).
- [27] 杜石然, 陳美東, 周世徳, 范楚玉, 金秋鵬, 曹婉如. 中国科学技術史〈上〉. 東京大学出版会, 2 1997.
- [28] 杜石然, 陳美東, 金秋鵬, 曹婉如, 周世徳, 范楚玉. 中国科学技術史〈下〉. 東京大学出版会, 3 1997.

第4章 コペルニクス革命

- [29] 古典天文学 (プトレマイオス, コペルニクス, ケプラー), 2 2003. http://fnorio.com/0015Classical_Astronomy1/Classical_Astronomy.htm (accessed 2015-07-08).
- [30] ティコ・ブラーエの観測装置, 7 2013. http://mail2.nara-edu.ac.jp/~asait/kuiper_belt/eclipse2/tycho_instrument.htm (accessed 2015-07-08).
- [31] コペルニクス. コペルニクス・天球回転論. みすず書房, 12 1993.
- [32] A.G. ディーバス, 伊東俊太郎. ルネサンスの自然観 - 理性主義と神秘主義の相克 (ライブラリ科学史 (7)). サイエンス社, 2 1986.
- [33] E.J. ホームヤード. 錬金術の歴史 - 近代化学の起源 (科学史ライブラリー). 朝倉書店, 6 1996.

第5章 機械論的自然観

- [34] ガリレオ. 偽金鑑識官 (中公クラシックス). 中央公論新社, 5 2009.
- [35] 世界天文年 2009 日本委員会. ガリレオの生涯, 4 2010. <http://www.astronomy2009.jp/ja/webproject/life-g/index.html> (accessed 2015-07-08).
- [36] 大塚善樹. ガリレオとデカルトの機械論哲学/ボイルの実証主義/ニュートンの自然哲学, 9 2014. <http://www.yc.tcu.ac.jp/~otsuka/ts/ts4.html> (accessed 2015-07-08).
- [37] 永井俊哉. ガリレオはなぜ異端審問で有罪となったのか, 6 2013. http://www.systemicsblog.com/ja/2013/galileo_affair/ (accessed 2015-07-08).
- [38] 株式会社共同通信社. 太陽と見間違えることも? 見つけるとテンションが上がる「幻日」, 3 2015. http://www.kyodo.co.jp/release-news/2015-03-25_1484786/ (accessed 2015-07-08).
- [39] 総務省統計局. ジョン・グラント, 2 2015. http://www.stat.go.jp/koukou/trivia/h_1600.htm (accessed 2015-07-08).

第6章 ニュートンの総合

- [40] アイザック・ニュートン. 光学 (岩波文庫 青 904-1). 岩波書店, 11 1983.
- [41] 児島 昌雄森 一夫. スペクトルの謎. <https://www.shinko-keirin.co.jp/keirinkan/kori/science/ayumi/ayumi19.html> (accessed 2015-07-08).
- [42] The Royal Society. History. <https://royalsociety.org/about-us/history/> (accessed 2015-07-08).

第 7 章 化学革命

- [43] 青木国夫. 思い違いの科学史 (朝日選書). 朝日新聞出版, 6 1981.
- [44] 卜部吉庸. 化学 I・II の新研究 - 理系大学受験. 三省堂, 12 2004.
- [45] 啓林館. 歴史に見る化学の探究, 6 2012. http://www.keirinkan.com/kori/kori_chemistry/kori_chemistry_2_kaitei/contents/ch-2/6-bu/6-1-2.htm (accessed 2015-07-08).

第 8 章 数学的実験物理学の誕生

- [46] Glauben leben. 物理の歴史 (熱), 10 2010. http://www15.wind.ne.jp/~Glauben_leben/Buturi/History2.htm (accessed 2015-07-08).
- [47] エネルギーおよびエルグの語源, 8 2013. <http://www.nararika.com/butsuri/kagakushi/energy/energy-gogen.htm> (accessed 2015-07-08).
- [48] 遠赤外線協会. 遠赤外線初めの一步. <http://www.enseki.or.jp/ippo.php> (accessed 2015-07-08).
- [49] 株式会社キャノン. キャノンサイエンスラボ 光って何? http://web.canon.jp/technology/s_lab/light/001/11.html (accessed 2015-07-08).
- [50] 足利裕人. 歴史で学ぶ物理学入門. ふくろう出版, 12 2012.

第 9 章 古典物理学の誕生

- [51] 株式会社パナソニック. やさしい電池の歴史, 3 2014. <http://panasonic.co.jp/ec/academy/rekisi/rekisi.html> (accessed 2015-07-08).
- [52] 電池の歴史概要. <http://www.geocities.jp/hirokyuki0620785/battery/batteryhistry.htm> (accessed 2015-07-08).
- [53] マイケルファラデー. ろうそく物語. 法政大学出版局, 新装, 7 2005.

第 10 章 有機化学の誕生

- [54] Paula Y. Bruice. ブルース有機化学〈上〉. 化学同人, 第 5 版, 2 2009.
- [55] John McMurry and Eric Simanek. マクマリー有機化学概説. 東京化学同人, 第 6 版, 9 2007.
- [56] 麓泉. 合成染料物語, 1 2007. <http://www005.upp.so-net.ne.jp/fumoto/linkp14.htm> (accessed 2015-07-08).
- [57] 麓泉. イーゲー・ファルベンの誕生, 5 2010. <http://www004.upp.so-net.ne.jp/x2f/IGFarben.html> (accessed 2015-07-08).
- [58] 日本薬学会. 薬学の歴史, 7 2015. <http://www.pharm.or.jp/shosasshi/pdf/koukou56rekishi.pdf> (accessed 2015-07-08).
- [59] 山川浩司. 国際薬学史 - 東と西の医薬文明史. 南江堂, 4 2000.
- [60] エドワード・M. スピアーズ. 化学・生物兵器の歴史. 東洋書林, 7 2012.

第 11 章 現代物理学の誕生

- [61] 大系編集委員会 (編). 現代物理学の歴史〈1〉素粒子・原子核・宇宙 (朝倉物理学大系). 朝倉書店, 6 2004.
- [62] 藤井保憲. 相対論 (放送大学教材). 放送大学教育振興会, 改訂, 3 1999.
- [63] P.Y. ブルース. ブルース有機化学〈下〉. 化学同人, 第 5 版, 3 2009.
- [64] A.D. バイエルヘン. ヒトラー政権と科学者たち (1980 年) (岩波現代選書). 岩波書店, 1 1980.
- [65] 嶺重慎, 田中耕一郎, 高橋義朗 (編). 光と物理学. 京都大学学術出版会, 10 2007.
- [66] 小山慶太. ノーベル賞でたどる物理の歴史. 丸善出版, 10 2013.

第 12 章 原子物理学と原子爆弾

- [67] 齊藤三夫. 物理学史と原子爆弾 - 核廃絶への基礎知識. 新風舎, 9 2004.
- [68] ロナルドタカキ. アメリカはなぜ日本に原爆を投下したのか. 草思社, 6 1995.
- [69] マイケル・ゴードン. 原爆投下とアメリカ人の核認識: 通常兵器から「核」兵器へ. 彩流社, 8 2013.
- [70] 広島市. 原爆・平和. <http://www.city.hiroshima.lg.jp/www/genre/1001000002088/index.html> (accessed 2015-07-08).
- [71] 上山清二. Web で学ぶ 情報処理概論, 11 2012. <http://www.infonet.co.jp/ueyama/ip/index.html> (accessed 2015-07-08).

第 13 章 宇宙と自然と科学

- [72] 金子務. さらばアリストテレス - エピソード科学史異聞 (平凡社 自然叢書). 平凡社, 4 1993.
- [73] ロバート・ミュアウッド. 地球の科学史 - 地質学と地球科学の戦い (科学史ライブラリー). 朝倉書店, 9 2001.
- [74] チャールズ・ダーウィン. 種の起原 (原書第 6 版). 朝倉書店, 5 2009.
- [75] JAXA. 宇宙開発の歴史. http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/cosmic_history.html (accessed 2015-07-08).

図の出典

- 表紙絵 GATAG (著作者: vectorarts)
<http://free-illustrations.gatag.net/2014/01/12/160000.html>
- プロフィールの肖像 *Wikimedia Commons*
https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page
- ビュリダンの肖像 *Jean Buridan, 1300 - 1358 France, a pioneer of faith and science*
<https://maxdoubt.wordpress.com/2014/01/14/jean-buridan>
- 図 1.1, 2.1, 6.3, 12.3 国土地理院 地理院地図
<http://maps.gsi.go.jp/>
- 図 1.6 松岡正剛の千夜千冊
<http://1000ya.isis.ne.jp/1254.html>
- 図 3.3 *History of the most spectacular palindromic poetry map*
http://blog.sina.com.cn/s/blog_78942cee01011agr.html
- 図 3.4, 3.5 中国の宇宙論
http://arai2.web.fc2.com/c_uchuron.htm
- 図 5.1 *Galileo Galilei: chi era costui?*
<http://www.osservatoriofeynman.eu/kalos/?p=475>
- 図 5.2 *El registro fósil en la heráldica municipal europea*
http://glossopetrae.blogspot.jp/2010_11_01_archive.html
- 図 6.2 *Principia Mathematica*
http://www.icollector.com/Books-Newton-Principia-Mathematica-1742_i10569321
- 図 6.4 *The Basics*
http://www.cis.rit.edu/people/faculty/montag/vandplite/pages/chap_15/ch15p1.html
- 図 6.5 *Isaac Newton: el costo de ser un genio*
<http://curiosidades.batanga.com/4323/isaac-newton-el-costo-de-ser-un-genio>
- 図 7.1 *Phlogiston Theory*
<https://jahschem.wikispaces.com/phlogiston+theory>
- 図 7.2 *Science & Society Picture Library Prints*
<http://www.ssplprints.com/image/94292/>
- 図 7.3 *Gases, God and the balance of nature: a commentary on Priestley*
<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/373/2039/20140229>
- 図 7.4 *Elements of Chemistry*
https://ebooks.adelaide.edu.au/l/lavoisier/antoine_laurent/elements/chapter19.html

- ☒ 8.1 *Diseases Of The Heart*
<http://chestofbooks.com/reference/American-Cyclopaedia-4>
- ☒ 8.3 2013 年ノーベル物理学賞, 発表! - 新しい物理学の幕開けだ! -
<http://blog.miraikan.jst.go.jp/topics/201310082013-9.html>
- ☒ 8.4 見えない雷を追い - 驚異の自然現象 -
<http://poyoland.jugem.jp/?cid=15>
- ☒ 9.1 ファラデーの伝
http://www.aozora.gr.jp/cards/001234/files/46340_24939.html
- ☒ 10.1 *Justus von Liebig in His Laboratory*
http://germanhistorydocs.ghi-dc.org/sub_image.cfm?image_id=2278
- ☒ 10.3 *A History of the International Dyestuff Industry*
<http://colorantshistory.org/HistoryInternationalDyeIndustry.html>
- ☒ 12.2 参画 eye パソコン講座
<http://jerira.blog.fc2.com/blog-entry-92.html>
- ☒ 12.6 パグウォッシュ会議の歩み
<http://www.pugwashjapan.jp/about.html>
- ☒ 13.3 *Aristotle to the end of the 17th century*
<http://bugs.adrianthysse.com/2011/01/ento-101>
- ☒ 2.2, 3.2, 4.5, 5.3, 7.5, 8.2, 9.2, 9.3, 10.7, 11.2, 11.1, 12.2, 13.2
Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page
- 上記以外 すべて自作

索引

あ

アーネスト・ラザフォード	138
アーヘン工科大学	134
アイザック・ニュートン	69
アイザック・バロウ	70
アイレンベルク	138
アインシュタイン	104, 114, 131, 147, 173
アインシュタイン書簡	147
アヴィセンナ	28, 156
アヴォガドロ	90, 91, 97, 115
アウグスティヌス	17, 33
アウグスト・ケクレ	123
アウグスト・ホフマン	121
アカデミア・セクレトルム・ナチュラエ	64
アカデメイア	19, 22
アカデミア・デイ・リチェンリ	64
アカデメイア・デル・チメント	64
マクスウェル・ボルツマン分布	112
アストン	174
アズハル大学	31
アスピリン	126
アセチルサリチル酸	126
アセトアリニド	126
アタナソフ	145
アタナソフ・ベリー・コンピュータ	145
新しい物理の世界像	135
アテネ	19, 22
アテネ人の国制	22
アデラード	29
アトモン	18
アドルフ・バイヤー	123
アドレナリン	127
アナクシマンドロス	13
アナクシメネス	13, 15
アニマ	55, 82
アニユトス	19
アニリン	121
アヘン	77
アヴォガドロの法則	97
アポロ	163
アメデオ・アヴォガドロ	91
アメリカ科学振興協会	111
アラゴ	100, 101
アリー・イブン・ユヌス	51
アリザリン	121-123, 125
アリストアルコス	25
アリストテレス	14, 19, 21-23, 33-35, 47, 54, 59, 64, 66, 81
アリストテレス哲学	32-35
アルキメデス	25, 26, 59
アルキメデスの原理	25, 26
アルクユ広報	97
アルクユ会	97
アルケー	13-15
アルケミア	77
アルケミー	28
アルトドルフ大学	78
α線	137, 139
アルフォンソ表	49, 51
アルフレート・ヴェーゲナー	159
アルフレッド・ノーベル	132
アル・フワーリズミー	27
アルベルト	34
アルベルト・アインシュタイン	131

アル・マアムーン	27
アルマゲスト	25, 29, 47, 48
アレクサンドリア	25, 26, 33, 48, 77
アレクサンドロス大王	21
アレクサンドロ・ボルタ	107
泡箱	163
アントラセン	125
アンドレアス・ヴェサリウス	51
アンドレアス・オシアンダー	50, 55
アンドレ・マリー・アンペール	101
アントワーヌ・アンリ・ベクレル	136
アントワーヌ・ラヴォアジエ	87
アンペール	101, 103
アンペールの法則	103
イーゲー・ファルベン	126
イエナ大学	82
イオニア学派	20
医化学	62, 63
イタリア学派	20
一行	39
一般相対性理論	131, 155
イデア	19
イデア論	19
遺伝学	157
遺伝子の分子生物学	162
イブン・アッ・シャーティル	49
イブン・シーナー	28, 156
イブン・バットウータ	28
イブン・ルシュド	28
陰極線	134
インジゴ	121, 123, 125
インスリン	126
インターネット	146
インダンスレン	121
インディアナ大学	162
インペトウス	34
陰陽五行説	37, 39, 43
陰陽説	37, 38
ヴァネヴァー・ブッシュ	147
ヴァイン	160
ヴィーン	133, 170, 172, 173
ウィーン会議	173
ウィーン大学	140
ヴィーンの放射公式	133
ウィグナー	148
ヴィッテンベルク大学	50
ウィリアム・ギルバード	55
ウィリアム・トムソン	110
ウィリアム・パーキン	121, 123
ウィリアム・ハーシェル	104
ウィルキンズ	72, 162
ウィルシュテッター	125
ウィルス	161
ウィルヘルム・ヴィーン	133
ヴィルヘルム・レントゲン	136
ヴェイユ	138
ウェーゲナー	159, 160, 173
ヴェサリウス	51
ウエッジウッド	86
ヴェルチェッリ王立大学	91
ヴェルナー・ハイゼンベルク	140
ヴェン島	52, 53
ウォルトン	174

ウォルフ	78	懐疑的な化学者	54
ウォレス	157, 158	カイザー・ヴィルヘルム協会	128
宇宙の神秘	55	カイザー・ヴィルヘルム研究所	135
宇宙膨張論	155	ガイスラー	134
宇宙論	66	解析学協会	111
ユニベルシタス	169	解析機関	144, 146
ウブサラ・ノート	49	解析力学	78
ヴェルツブルク大学	134	蓋天説	42
ウラニボルグ天文台	52, 53	海洋底拡大説	160
ウラン	144	ガウス	172
ウラン諮問委員会	147	科学アカデミー	64, 94, 100, 102
ウラン濃縮	148	科学革命	69
運動力学	74	科学研究開発局	147
エイブリー	162	化学元素要論	87
エウクレイデス	25	科学知識普及協会	101
エーテル	23, 76, 103, 110, 114, 131	化学通信	119
エールリヒ	128	科学哲学試論	103
エカント	47, 55	化学哲学の新体系	89
易経	40	化学年鑑	119
エコール・デ・ボンセショゼ	100	化学の新体系	90
エコール・ポリテクニク	97, 98, 100, 103, 111, 137	化学命名法	87
エジソン	103, 111	学芸学部	30, 34
エチエンヌ・タンピエ	32, 33	郭守敬	39, 44
X線	136, 137	核分裂	144
X線回折	161	確率の哲学的試論	96
エティエンヌ・ルイ・マリユス	98	カステリ	60
エディンバラ大学	85, 111, 112, 157	ガスメーター	88
ENIAC	145	加速器	163
エニグマ	146	カッシーニ	64
エネルギー説	104	活字印刷	56
エネルギー保存則	104	渦動宇宙論	66, 75
エネルギー要素	135	仮名暦	40
エネルギー量子仮説	135	カニツァーロ	91
エネルギーゲイア	21	可能態	21
エフェドリン	127	ガモフ	155
エベレット解釈	141	火薬	45
エラズマス・ダーウィン	157	カリフォルニア工科大学	162
エラスムス・ラインホルト	51	ガリレオ	33, 59, 60, 64-66, 69, 70, 74, 93, 100, 170
エラステネス	25	ガリレオ・ガリレイ	59
エランゲン大学	119	カルタン	138
エリキサ	53, 77	カルノー	98, 110
エルヴィン・シュレーディンガー	140	ガルバーニ	109
エルステッド	101, 103, 107, 108, 171	カルルスルーエ工科大学	113
エルモンド・ハレー	70	カルル・フリードリヒ	170
エレア学派	18, 21	ガレノス	30, 51
演繹法	64	カロリック	90, 93-95
円慣性	69	カロリンスカ研究所	132
遠心力	69	漢	41
延長	66	監候	41
エンベドクレス	18	慣性原理	69
エンリコ・フェルミ	144, 147	慣性の原理	66
王恂	39, 44	カンタベリー大学	139
王立化学学校	121, 122	カント	50
王立協会	54, 64, 67, 70-72, 84, 100, 102, 139	カントル	152
オーエン	156	γ線	137, 139
オーギュスタン・ジャン・フレネル	99	気	37, 38, 43
大阪大学	143	ギーセン大学	119, 120, 122, 124, 134
岡山大学	128	キール大学	113, 135
オクタブ則	115	機械論的自然観	65
オックスフォード学派	35	幾何学集	60
オックスフォード大学	31, 72, 73, 111	気象学	66
オットー・ハーン	144	気体拡散法	148
オッペンハイマー	148	気体反応の法則	97
オバマ	172	北里柴三郎	128
オマル・ハイヤーム	28	キニーネ	121, 122, 127
オルガノン	64	帰納法	62, 64
か		吉備真備	39
カール・ヴィルヘルム・シェーレ	84	キャベンディッシュ	84
カール・グラーベ	123	キャベンディッシュ研究所	112, 139, 162, 174
カール・リーバルマン	123	キュリー	137, 169
カーン大学	96	キュリー夫妻	136
懐疑的化学者	83	キュリロス	33
		共感	62, 65

強制運動	21, 34
京都大学	143
行列力学	140
極性	98
距離の法則	55
霧箱	163
ギルバード	102
キルヒホッフ	113, 133, 135
キロム	15
キングズ・カレッジ	112, 172
クーロン	95, 103
クーロンの法則	95
クーーン	159
グスタフ・キルヒホッフ	133
クセノファネス	156
具注暦	40
クラーク大学	114
グラーツ大学	159
グラーベ	125
クラウジウス	110
クラクフ大学	50
グラスゴー大学	85, 110
グランゼコール	98
グラント	67
グリーン	121
クリスティアン 1 世	171
クリスティアン 3 世	171
クリスティアン・ホイヘンス	66
クリック	161, 162, 174
グリニッジ天文台	73
グレイ	95
グレー	102
クレオプロス	15
グレゴリー	170
グレシャム・カレッジ	72
クロード・ルイ・ベルトレ	97
クロトン	16
クント	136
慶應大学	128
形而上学	22
ゲーデル	152
ケーニヒスベルク大学	133
ゲーバル	77
ゲーリュサック	91, 93, 97, 102, 119
ゲオルグ・シュタール	81
ゲオルク・レティクス	50
ケクレ	123-125
ゲタール	88
掣壺正	41
ゲッティンゲン大学	134, 144, 150, 172
ケフェウス型変光星	155
ケプラー	51, 52, 55, 56, 69, 100, 155
ケプラーの法則	55, 56
ゲバルベ研究所	125
ケリカー	162
ケルスス	62
ケルビン	72, 110, 112
ケロタキス	54
元	44
原子科学者会報	151
現実態	21
原子爆弾	131, 139
賢者の石	53, 77
原子力科学者連盟	151
原子論	18, 22, 89, 91
原水爆禁止世界大会	151
ケンドルー	174
顕微鏡	72
ケンブリッジ大学	64, 70, 110-112, 139, 151, 157, 162, 174
原論	16, 25, 26, 29
光学	70, 76
後成説	158
候風地動儀	42, 43

コーシー	98
コルタール	121, 122
コールド・スプリング・ハーバー	162
五月革命	169
後漢	42
五行説	37, 38
黒体輻射	133
国防研究委員会	147
五元素	37
ゴシック様式	29
コジモ 2 世	59
古生物学	156
コッククロフト	174
コッホ	126, 127, 161, 172
固定空気	83
コペルニクス	49-52, 69, 155, 170
コペンハーゲン解釈	131, 141
コペンハーゲン大学	53, 101, 139, 162
コペンハーゲン理論物理学研究所	139
コメンタリオルス	49
暦	39
コリオリ	98
コルベール	64
コレージュ	169
コレージュ・ド・フランス	102, 103
コレギウム	31
コロッサス	146
コロビア大学	143, 144, 172
渾天儀	42
渾天説	42
コンピュータ	163

さ

細菌	161
細菌学	126
細胞	72, 161
蔡倫	45
サグレド	61
サクロポスコ	47
サジアドーレ	65
サバル	102
サリチル酸	126
サルヴィアチ	61
ザルカーリー	51
サルバルサン	126-128
サレルノ	33
サレルノ大学	31
サンクトペテルブルグ大学	116
三原質説	63
酸酸素説	97
三十年戦争	170
三大発明	45
三大陸周遊記	28
三段論法	22
三平方の定理	16, 17
ジェームズ・クラーク・マクスウェル	112
ジェームズ・フランク	149
ジェームズ 6 世	171
ジェームズ・ワット	85
ジェームズ・ワトソン	161
ジェンナー	127
シカゴ大学	114, 144, 150, 162
磁気論	55
思考の規則	66
紫色染料	121
自然運動	21, 34
自然科学研究	104
自然学	32
自然学問題集	34
自然哲学	20
自然淘汰説	157
自然魔術	62, 63
七賢人	14, 15

実験教育	119
実験治療研究所	127
実践的知識	21
ジャコモ	29
ジャラーリ歴史	28
シャルル・オーギュスタン・クーロン	95
ジャンバティスタ・デラ・ポルタ	62
ジャン・バティスト・ビオ	101
ジャン・ビュリダン	34
周	41
自由学芸	30
周期表	115
宗教裁判	61
周期律	116
周転円	47
ジュール	104, 110
ジュール・トムソン効果	110
ジュール・フェリー	169
朱熹	43
儒教	40
授時曆	44
シュタール	81, 82
シュツットガルト大学	140
種痘	127
シュトラスブルク大学	123, 125
ジュネーブ大学	173
種の起源	157, 158
シュライエルマッハー	173
シュライデン	162
シュレディンガー	140
シュレディンガー方程式	140
シュワン	162
松果体	66
硝石空気	83
章法	39
逍遥学派	22
ジョージ・スターキー	84
ジョージ2世	172
植物の運動力	157
ジョゼフ・ジョン・トムソン	138
ジョセフソン	174
ジョセフ・ブラック	83, 84, 93
ジョセフ・プリーストリー	83, 84
ジョゼフ・ルイ・ゲーリュサック	97
初等化学講義	85
ジョン・グラント	67
ジョンズ・ホプキンス大学	150
ジョン・ドルトン	89
ジョン・レー	158
シラクーザ	26
磁力線	107
司曆	41
進化論	33, 157
新機関	64
人体の構造	51
新天文学	55, 56
新プラトン主義	50
シンプリチオ	61
スイス連邦工科大学	131
彗星天文学概要	73
水素爆弾	151
数学原論	138
数学の諸原理	151
数理哲学	20
スコットランド啓蒙学派	171
スティープン・ヘールズ	83
ステュルジャン	103
ステラボルグ天文台	53
ストーニ	134
スパルタ	22
スプートニク	163
スペースシャトル	163
スペースステーション	163

スペクトル分析	155
スルフォナル	126
スワン	103
星雲説	96
西洋哲学史	151
星界の報告	59
生氣論	82
星座	41
製紙法	45
精神指導の規則	66
生成消滅論	32
生態学	157
生命とは何か	140
ゼーベック	103
世界の調和	56
赤外線	104
積分法	69
ゼルチュルナー	127
遷移確率	140
前漢	40, 41
旋光	110
占星術	39, 40, 62
前成説	158
セントヘレナ島	73
潜熱	93
専門学部	30
宣夜説	42
創造の痕跡	158
相対性理論	114
ソクラテス	19
ゾシモス	77
ソディ	139
ソフィスト	19, 21
ソユーズ	163
ソルボンヌ	169
ソロン	15

た

ダーウィン	157, 158, 171
第一解説	50
第一性質	65
太陰太陽曆	39
大学	29, 30, 47
大外科学	62
第五福竜丸事件	151
太史局	41
太初曆	41
太史令	41
代数学	27, 29
タイタン	67
ダイナマイト	132
第二性質	65
大翻訳時代	29
太陽中心説	25
太陽風	163
太陽礼賛思想	50
大陸移動説	159, 160
大陸と海洋の起源	159
タウンズ・カレッジ	171
楕円軌道の法則	55, 74
多角数	17
高峰譲吉	127
多世界解釈	141
脱フロギストン空気	83, 87
ダニエル・ラザフォード	84
ダブリン高等研究所	140
タレス	13-15, 17
タンピエの譴責	32-35
知恵の館	27
チェンバース	158
地磁気図	73
地磁気反転	159
地質学	156

置閘法	39
地中の自然学	82
地動説	25, 49, 50, 52, 55, 56, 61, 69, 155
チャールズ・ウィルソン	163
チャールズ・ダーウィン	157
チャールズ 2 世	67, 72
チャドウィック	174
中間子	143
中性子	143
チューリッヒ工科大学	136
チューリッヒ大学	131, 140
チューリング	146
張衡	42, 43
調和振動体	135
調和の法則	55
地理学便覧	48
沈殿法	148
珍品陳列室	62
ツベルクリン	126
デイヴィー	107, 108
ディオスコリデス	127
ディオドロス	15
帝国特許法	125
ティコ・ブラーエ	52, 55
デイビット・ヒルベルト	26
ディラック	140, 174
鄭和	45
ティンクトゥラ	53
デーヴィ	91
テオフィロス	33
テオフラストゥス・ホーエンハイム	62
デカルト	66, 69, 70, 75, 76, 78, 81, 100
てこの原理	25, 26
哲学原理	70
哲学の原理	66
テナール	97
デバライナー	115
デモクリトス	18, 22
チュービンゲン大学	56
デュドンネ	138
デュナミス	21
デュ・フェ	102
テラー	151
伝記図表	85
電気分解	107
天球	23
天球回転論	50, 51
電子	134
電磁気力	131
電磁波	113, 114
天人感応論	40
天人合一説	40
天人相関説	40
伝染病研究所	127
天体・地体論問題集	35
天体力学	94
天体論	32
電池	107
天動説	25, 61
天文志	41
天文対話	59, 61, 70
天文表	29
ドイツ化学会	122
統一場理論	131
導円	47
東京大学	143
同心天球説	47
董仲舒	40
動物電気説	108
トゥルーズ大学	31
トーマス・クーン	159
トーマス・ヤング	99
特殊相対性理論	131

特許状	30
利根川進	172
ド・プロイ	140, 169
トマス・ブラッドワーディン	35
トムソン	72, 134, 138, 139, 174
トムソン効果	110
トリチェリ	60
取り尽くし法	26
トリノ大学	91
ドルトン	89-91, 93, 115, 134
トレド	29
トレド表	51
トレミー	48

な

長井長義	127
長岡半太郎	134
ナポリ大学	31
ナポレオン	96, 97, 99, 111, 169
鉛蓄電池	109
南宋	43, 44
ニールス・ボーア	138
二原質説	63
ニコラウス・コペルニクス	49
ニコル・オレーム	34
二重らせん	162
二重らせん構造	161
贋金鑑識官	65, 93
二命名法	87
ニュー・アトランティス	64
ニュートン	53, 56, 66, 69-73, 75-77, 81, 93, 95, 99, 155
ニュートン力学	74
ニュートンリング	70
ニューランズ	115
人間論	66
ネーグリ	162
熱運動説	93, 104
熱素	93
熱物質説	93
熱量保存則	93
ネルソン・カレッジ	139
年周視差	155
燃素	81
ノイマン	141, 145
ノーベル	132

は

ハーキム表	51
パーキン	122
パーキン社	121
ハーシェル	104
パーゼル大学	62, 173
ボアティエ大学	66
ハーバード大学	162
バイエル社	125
バイエルン・アカデミー	119
ハイゼンベルク	140
ハイデルベルク大学	116, 124, 125, 133, 134, 150, 159
バイヤー	121, 123, 125
ハインリッヒ・カロ	123
ハインリッヒ・ルドルフ・ヘルツ	113
パウサニアス	15
パウル・エールリヒ	126
パグウォッシュ会議	151
爆縮法	148
バグダッド電池	109
破章法	39
パスカリーヌ	144
パスカル	144, 145
パスツール	102, 127, 161
BASF 社	121, 123, 125
秦佐八郎	126
バチエラー	32

八卦説	39	物質波動論	140
パドバ大学	50, 59, 108, 170	物心二元論	66
パピア大学	108	物理学的認識への道	135
パベジ	144, 146	武帝	41
パラケルスス	62, 63, 77	ブトレマイオス	25, 47
パラダイムシフト	159	ブトレマイオス天文学	47
パリ学派	34	ブラーエ	52, 53, 56, 171
パリ大学	31, 34, 95, 97, 137, 169, 170	ブラウト	115
バルメニデス	18, 19	ブラウン	162
ハレー	70, 71	ブラウン運動	131
ハレ大学	82, 172	フラウンホーファー	133
パレルモ	29	ブラック	83-85, 93, 171
バン・アレン帯	163	ブラッドワーディン	35
反感	62, 65	プラトン	14, 19, 21, 22
パンゲア	159	ブラハ大学	131
ハンス・クリスティアン・エルステッド	101	ブラムプディングモデル	134
ハンフリー・デイヴィー	107	ブランカー	72
ハンブルク大学	113, 159	フランク	149
万有引力	56, 70, 71, 75, 76, 131	ブランク	134, 135, 139, 140, 173
ピアス	15	ブランクの放射公式	135
ビーグル号	157	フランク報告	149
ピエール・キュリー	137	フランクリン	102
ピエール・シモン・ド・ラプラス	96	フランシス・クリック	161
ヒエロン2世	26	フランシス・ベーコン	62
ビオ	97, 101	フランス学士院	97
ビオ・サバルの法則	101, 102	ブリストリー	83-87
光波動説	99	フリードリヒ1世	31
光量子仮説	131	フリードリヒ・ウィルヘルム	82
ピサ大学	59, 144	フリードリヒ・ウィルヘルム3世	173
ヒステリシス現象	110	フリードリヒ2世	31
微積分学	67	プリンキピア	70-74
ピタゴラス	15-17	プリンキピア・マテマティカ	151
ピタゴラス音律	16, 17	プリンストン高級研究所	131
ピタゴラス学派	77	プリンストン高等研究所	143
ピタゴラス教団	16, 17, 19, 20	ブルースト	90
ピタゴラスの定理	16	ブルトニウム	148
ビッグサイエンス	53, 161	ブルバキ	138
ヒッグス粒子	163	プレートテクトニクス論	159, 160
ピッタコス	15	プレスラウ大学	127, 133, 140
ヒッパルコス	25, 48	ブレダ大学	67
ヒドロキシアゾベンゼン	121	フレネル	98-101, 103
微分法	69	フレミング	127
ヒポクラテス	30	フロギストン	81-83, 86, 94
秘密の学会	63	プロクロス	13
ピュシオロゴイ	14	プロシア表	51
ヒュパティア	33	プロタゴラス	15
ビュリダン	34	分圧の法則	89
氷熱量計	93, 94	分子生物学	140, 161
ヒルベルト	152	分子説	91
ファーレンハイト	60	分析論	29, 32
ファウラー	174	ブンゼン	125
ファラデー	101, 103, 107, 108, 110, 112	フンボルト	120
ファラデー効果	110	フンボルト大学	173
フィゾー	100	ハヴィサイド	112
フィッシャー	125	ハーゲル	173
フィヒテ	120, 173	ベーコン	53, 62, 64
フィルヒョー	162	β 線	137, 139
フルクローア	97	ベーリング	127
ブル大学	103	ハールズ	83, 84
フェリー	169	ヘキスト社	123, 126, 127
フェルミ	144, 148, 172	バクレル	98, 136, 137
フェルミ国立加速器研究所	163	バッセマー法	114
フォスター	72	バッヒャー	81, 82
フォトン	95	パニシリン	127
不可共役的な比例関係	16	ハラクレイデス	25
不確定性原理	140	ハラクレイトス	15
不可秤量物質	76, 95, 99, 101	ハラルド	29
武器軟膏	62	ベランジュ	104
フクシン	121, 125, 126	ペリアンドロス	15
フクシン社	121	ベリー	145
プシュケー	14, 23	ペリカン	54
フック	70-72, 84, 161, 162	ペリパトス学派	22
物質波	140	ベル	111

ベルセリウス	115
ヘルツ	113, 150, 173
ベルトレ	97
ヘルマン	29
ヘルムホルツ	104, 113, 134, 135, 170
ヘルメス主義思想	50
ベルリン自由大学	173
ベルリン大学	113, 122, 125, 127, 131, 133-135, 140, 150, 159, 173
ベレチェ	127
ヘロドトス	156
変位電流	112
偏光現象	98
変光星	155
ヘンズロー	157
ベンゼン	124
ベンツ	113
ベントウ	127
ヘント大学	124, 125
ヘンリ	103
ヘンリー・キャベンディッシュ	84
ヘンリー・モア	76
ヘンリエッタ・リーヴィット	155
ポアソン	98
ポアンカレ	98
ホイヘンス	64, 66
ホイヘンスの原理	67
ボイル	54, 72, 83, 84, 93, 134
望遠鏡	59, 155
砲撃法	148
放射性物質	136
放射線	136
放電現象	107
ボエニ戦争	26
ボーア	131, 138, 171
ボーキング	141
ボービエ大学	102
ボーン	121
補間法	44
保障正	41
ポテンシャル	104
ホフマン	122
ホメロス	13
ボルタ	107-109
ボルタ	63, 64
ボルタ電池	91
ボルツマンの原理	135
ホルモン	127
ボルン	140, 144
ボローニャ大学	31, 50, 170
本性	21
ボン大学	113, 119, 124

ま

マーシャル・カレッジ	112
マイケルソン	114
マイケル・ファラデー	107
マイヤー	104
マインツ大学	82
マクスウェル	108, 112, 113, 171, 174
マクスウェルの悪魔	112
マクスウェル方程式	112
摩擦の法則	95
マシューズ	160
魔術	62
魔術的自然観	65, 75
マゼラン星雲	155
マッギル大学	139
マックス・プランク	135
マックス・プランク研究所	135
マッハ	104, 135
松山基範	160
魔法の弾丸	126
マリー・キュリー	137

マリユス	97, 98
マルコーニ	113
マンチェスター大学	139
マンハッタン計画	144, 148, 150
ミクログラフィア	161
三つ組元素	115
ミヒャエル・メストリン	56
ミュッセンブルーク	102
ミュンヘン大学	119, 125, 134-136
ミレトス	13
ミレトス学派	13, 20
明	45
ムセイオン	25
無線電信	113
無理数	16
メストリン	56
メタン	108
メチニコフ	127
メディチ家	59
メルセンヌ	100
免疫研究所	127
面積一定の法則	55
面積速度一定の法則	55, 74
メンデル	157
メンデレーエフ	115, 116, 170
モア	76
モーヴ	121
モーベイン	122
モールス	103
モーレー	114
モット	174
モルヒネ	127
モンジュ	98

や

冶金研究所	148, 149
薬物誌	127
ヤング	99, 100, 104
有核モデル	138
有機化学教科書	124
ユークリッド	13, 16, 25, 26, 59
ユークリッド幾何学	26
ユージオメーター	83, 86
湯川秀樹	143
ユスチニアヌス	22
ユストゥス・フォン・リービッヒ	119
陽電子	163
ヨーロッパ連合原子核研究機関	163
ヨハネス・ケプラー	55
ヨハネ 21 世	33
ヨハン・バルマー	138
ヨハン・ベッヒャー	81
四元素	18, 21, 23, 38, 54, 65, 81
四体液説	48

ら

ライデン大学	67
ライデン瓶	102, 109, 113
ライプチヒ大学	53, 78, 127
ライプニッツ	78, 144, 145
ライル	174
ラインホルト	51
ラヴォアジエ	77, 85, 88-90, 93, 94, 97, 115, 169
ラグランジュ	78, 88
ラザフォード	72, 84, 134, 138, 139, 171, 174
羅針盤	45
落下運動の法則	69
ラッセル	152
ラッセル・アインシュタイン宣言	151
ラプラス	93, 94, 96, 97, 99, 101
ラプラスの魔	96
ラマルク	158
リーゼ・マイトナー	144

リーパーマン	125
リービッヒ	119, 120, 122-124
リーマン	172
力学講義	133
力積	104
力線	107
離心円	47
リゾーマタ	18
リバヴィウス	77
粒子論的自然観	65
流体力学	75
流率法	69, 76
リュケイオン	22
梁	42
量子	135
量子仮説	135
量子統計力学	131
量子力学	131, 140
理論的知識	21
リンネ	56, 87
ルイ・パスツール	161
ルーズベルト	172
ルートヴィッヒ・ボルツマン	133
ルック	72
ルドルフ 2 世	52, 53, 62
ルドルフ表	51
ルナール兄弟	121
ルナール社	121
ルネサンス	56
ルネ・デカルト	66
ルブレヒト 1 世	170
ルメートル	155
靈憲	42
靈魂	14, 23
靈台郎	41
レイリー	134, 174
レウキッポス	18, 134
レーナルト	134
レーマー	100
レーメル	64
レオナルド・ダ・ビンチ	56
レトルト	54
レン	72
錬金術	28, 62, 63, 70, 76, 77, 156
レントゲン	136, 137, 173
ロイヤル・ソサイエティ	72
ロイヤル・ド・フランス大学	95
ローマ大学	144
ローマ帝国	25
ローレンツ	114
ロスアラモス研究所	148
ロゼッタストーン	99
ロバート	29
ロバート・オッペンハイマー	148
ロバート・コッホ	126, 161
ロバート・フック	70, 161
ロバート・ボイル	83
ロンドン化学学会	122

わ

惑星運動論	69
私の世界観	140
ワット	85
ワトソン	161, 174

ワトソン^{かがくし}科学史

発 行 2015年7月14日初版

著 者 ワトソン

配布元 ワトソン研究室

<http://watson-lab.com>

本書の一部または全部を著作権法の定める範囲を
超え、無断で複写、複製、転載することは法律で
固く禁じられています。

©2015 ワトソン