

常識と近代科学*

Common Sense and Modern Science

都 築 正 信**

TSUZUKI, Masanobu

目次

序文

プロローグ

第一章 古代ギリシア科学

第一節 古代ギリシア初期自然学

第二節 アリストテレス自然学

第三節 ヘレニズム期科学

第二章 アリストテレスの栄光

第一節 古代ギリシア科学の伝搬

第二節 アリストテレスの栄光

第三章 近代への序曲

第一節 イタリアルネサンスの勃興

第二節 動的对象の把握

第四章 近代科学の成立

第一節 物体運動の解明

第二節 近代科学の成立

第三節 実験と観測

第四節 ニュートン力学の言語

エピローグ

序文

ニュートン力学に代表される近代科学は、今日、世界的に普及している。

この近代科学は十六世紀から十七世紀後半にかけて西欧において成立した。それは古代ギリシアでも、アラビアでも、インドでも、中国、

日本でも生まれなかった学問である。他の地域ではなく、なぜ西欧に生まれたのか。

この問いは、かねてから人々に興味を引き起こしてきた。実際、この問題に関しては、すでに多数の考察がなされていて、もはや議論の余地がないかのような印象を受けるほどである。

本稿は、このような状況において、恐れも省みずあえてこの問題に取り組んでみたものである。西欧とはかなり異なる環境と歴史のうちにいる日本の一学徒が、遅ればせながら、西欧における近代科学の興起をどのようにとらえたかを提示することも一興ではあるまいか¹⁾。

さて、近代科学が西欧に生まれたとはいえ、西欧が単独で無から生み出したわけではない。西欧の学問の歴史をふり返ると、中世から近代の十七世紀に至るまで、いや、近代科学の成立の直前においてさえ、西欧にあっては古代ギリシアの学術が支配的であった。中でもアリストテレスの影響が強大であった。とくに、宇宙を含む自然に対しては、アリストテレスの自然観が強固に人々をとらえていた。それにもかかわらず、西欧においてアリストテレスの学問が乗りこえられ、近代科学が誕生した。このことは、アリストテレスを含め、古代ギリシアの学問を十分吸収しながら、ついに近代科学ないしそれに相当するものを創出しえなかったアラビアとは対照的である。

一方、西欧は、古代ギリシアの学問を導入し

* 故広瀬秀雄教授に捧げる。

** つづき・まさのぶ
埼玉大学名誉教授

て以降、近代科学の成立に至る間に、芸術におけるルネサンス運動と南北アメリカ大陸の発見、マゼランらによる世界周航というたいへん大きな出来事にそうぐうしている。

ルネサンス運動の基調には、自然や人間を正確に把握し描写するという「写実」の精神があった。この精神は人間の文化に深く浸透して、その後も絶えることなく、現代文化にまで及んでいるであろう。他方、新大陸については、古代ギリシアの学問はほとんど言及していなかった。西欧はあらたに自らこの新世界に対処しなければならなかった。

こうした歴史を念頭におきながら、西欧はどのようにしてアリストテレスの自然観を克服し、新しい自然観に到達したのか、という問題を論じてみよう。と云うのは、上の冒頭の問題も、この問題とほとんど同値だからである。

ところで、アリストテレスの自然観を克服することは、かれの、「大地は静止し、太陽が天空を回転する」という観念をくつがえすことを意味していた。一方、この観念は、人類が誕生して以来、日夜経験する常識であり、それは、この常識を逆転することでもあった。西欧近代がはじめて、このことを成し遂げたのである。

ただし、西欧がアリストテレスの天文観を克服したとはいえ、彼のすべてを否定したわけではない。アリストテレスは古代ギリシアの学問を代表する一人であり、西欧は一方で、かれや著名なユークリッドを通して学問的方法を学び、それを継承した。西欧近代は学問的探究において古代ギリシアから何を学び、独自に何を加えたか。この点についての考察が本稿の目的でもある。以上のことから、本稿の章立ては次のようになる。

第一章は古代ギリシアの哲学を扱う。その中心はアリストテレスである。しかし、彼に先行する哲学者がすでに自然に対して哲学的考察を

行っており、アリストテレスもその伝統の下に思索を深めた。したがってここでは、最初に初期ギリシア哲学者の自然探究の特質を取り上げることにする。次いで、アリストテレスの自然考察をやや詳しく論じる。ともあれ、西欧は近代科学以前、かれの自然観に支配されていたのであるから、その根幹を押さえておく必要がある。

西欧が古代ギリシアから受容した重要な学問の一つは、演繹法に基づいて構成された数学(幾何学)である。その根本はユークリッドによって完成され、その後アポロニウスやアルキメデスらが発展させた。これを第一章の最後に置こう。

周知のように、西欧は古代ギリシアの学問を最初、アラビア語に翻訳されたものを通して受け入れた。したがって、第二章は、はじめに古代ギリシアの文献のアラビア語への移転と、さらにそこから西欧への移入の経緯を述べておこう。その移入の後には、とくにアリストテレスの学問がキリスト教神学と融合され、スコラ哲学の形成に大きな役割をはたし、また、西欧各地の大学においては必修科目とされ、西欧キリスト教世界の知識人の間では、もはや、常識と目されるまでになった。このあたりのことにも言及しておきたい。

アリストテレスの権威が支配的になる頃に、ルネサンス運動が興隆し、続いて大航海時代における西欧の新世界への進出が始まる。第三章第一節が担当する時代である。

イタリア・ルネサンスの末期、十六世紀の中頃に、コペルニクスの地動説が現れ、十七世紀に入ってケプラーの三法則が発見される。この二つを第三章第二節にすえよう。コペルニクスはアリストテレス・プトレマイオスの天動説をくつがえしたとはいえ、いまだ天体運動のいわゆる「円の呪縛」の下にあった。一方、ケプラーの三法則による惑星運行の正確な描写は、そ

の呪縛から脱し、ルネサンスの写実主義を天体運動という動的現象に反映させたものとも考えられる。しかし、ケプラーにしても、一方では、まだアリストテレスの古い運動原理にとらわれていた。

第四章で最初に論じるのはガリレオである。彼は地上における物体の落下運動を解明し、さらに新規の道具である望遠鏡を天に向けることによって、アリストテレスの天地二元論を打破した。ケプラーとガリレオの仕事はニュートンに伝わり、彼において近代科学は最初の頂点に達する。第四章第二節では、ニュートンの名著『プリンキピア』をとりあげよう。

第二節の目的は、『プリンキピア』を通して、少数の原理の下で演繹的に導かれた理論が、惑星の運動と地球上の物体の運動をいかに統一的に説明するかを具体的な実験と観測によって確認することである。したがって、ここでは実験と観測による詳細なデータを必要とする。

第四章の最終節では最初に、『プリンキピア』の中の枢要な言葉、物体の「質量」の、ある意味で特異な性格を分析する。それは数量であるにもかかわらず人間には直接的に経験できない量なのである。さらにニュートンが設定した「慣性の法則」や運動方程式がもつ非経験性ないし仮構性を指摘し、『プリンキピア』の全体を通して流れる説明の論理（仮説演繹法）を明らかにしよう。

『プリンキピア』では、不変的でしかも普遍性をもつ言語によって現象を説明するという古代ギリシアに発する伝統を背景にして、そこに現象を正確に把握するというルネサンス由来の「写実」の精神が加えられ、さらに、天才にのみ許される独自の言語が用いられて、天地の現象が理論的に統一的に説明されている。その結果、古代ギリシア以来二千年を経て、人類の大いなる謎であった太陽と月と惑星の諸運動が解

明された。天体運動を正確に把握するという人類の一つの「夢」が実現したのである。

ともあれ、本稿は、近代科学がなぜ西欧において成立したか、という問いに対する一つの歴史物語であり、同時に、それを通して近代科学がもつ自然認識の特異な形式を明らかにするものである。議論は歴史上のデータを基盤として展開されているが、近代科学の歴史的解釈に関しては、これまでの通説、たとえば機械論などの枠を越えて、斬新な見解を提言しよう。

科学もまた人間の精神の働きの結果であり、一つの文化である。本稿は、その文化に従事する科学者を含め、人間の長い間の常識であった天動説を完全に覆し、現代に続く科学の根幹を創造した近代科学という文化について何らかの興味をもつ諸賢に一読を乞うものである。そして、読了された時、近代科学成立の過程が「常識との闘い」であったこと、および、近代科学のもつ創造性と非常識性と普遍性によって、人間の自然認識は拡大し、深化したことを了解されんことを願うものである。

プロローグ

ギリシア神話は天地の成り立ちについておおむね同じような話をもっているが、そのうちの一つは次のような話を伝えている¹⁻²⁾：

万物をつかさどる神が・・・にわかには混沌（カオス）の中からあらわれて、天から地を、地から水を、下空から上空をひきさいた。天地水空をさらにこまかくわけたあとで、神はそれらにこんにちみられるような正しい秩序をあたえた。ついでかれは大地には平原や山岳をつくり、草花や木々をもってその上をおおった。地上たかく、神は回転する天空をおいてかずかずの星をちりばめ、東西南北を吹く風にそれぞれ宿るべきところを定めた。彼はまた、水には魚を、地には獣を、空には太陽と月と五つの遊星を配し

た。そして、神は最後に人間—あらゆる生きもののなかでもかれだけが天空を仰いで日月星辰を眺めることのできる人間を作り出した。もっともこれは、イーアベストの息子プロメーテウスが水と粘土で人間をつくり、その魂には創世のはじめから生き残っていたあるさまよえる聖霊をみたしたという説を信じがたいとしてのことであるが。

第一章 古代ギリシア科学

第一節 古代ギリシア初期自然学

古代ギリシア自然学を代表するのはアリストテレスの自然学である。しかし、かれの自然学が成立する二百年ほど前から、古代ギリシアの人々によって自然に対する考察がなされ、幾何学の初歩的知識も得られていた。人々の中ではタレス、アナクシマン드로ス、ピタゴラス、ヘラクレイトスなどの名があげられよう。しかし、かれらを含め、「初期ギリシア哲学者（ソクラテス以前の哲学者）たちの手になる原著はもはや完全に失われ、ただ後代の思想家・作家による間接的な情報と文字通りの断片的な引用を通じて、わずかな断章ないし語句が伝えられているにすぎない¹⁻³⁾」、のが現状である。

ここでは、このようなわずかな資料のうちから最初にタレス（624~546b.c.頃）のものを取りあげよう。その理由は、かれの自然にたいする考察の断片からも、すでに、古代ギリシア自然学的重要な特徴をかなりの程度、読み取ることができるからである。

ディオゲネス・ラエルティオスはタレスについて次のような断片を残している：

「ある人たちによれば、自然について論じたのも、かれが最初であった¹⁻⁴⁾。

万物の元のもの（始原）は水であるというのが、かれの根本的立場であり、また宇宙世

界（コスモス）は生命をもったもので、神々（ダイモーン）に満ちている¹⁻⁵⁾、とした。」

「ある人たち」という言葉から、タレスが自然を考察した最初の人であるという世評があったことがわかる。

シンプリキオスはタレスについて次のように伝えている：

「元のもの（始原）が単一で運動変化すると語っている人たちを、[アリストテレス]は本来の意味での自然学者と呼んでいるが、かれらのうちの一部、・・・たとえばミレトスの人タレスや・・・ヒッポンは、感覚的な諸事象から導いた結論として、水が元のものであると語った。熱いものも湿ったものによって生き、死体となったものは乾き干からび、またあらゆる種子は湿っており、すべての栄養物は水気を含んでいる、といった事態があるからである。・・・水は湿りという本性の元のものであり、すべてのものにとって必須のものであるからである。したがって、かれらは、水が万物の元のものであると考え、そこから、大地が水の上に浮かんでいるとも主張したのである¹⁻⁶⁾。

ここに言う水は、具体的な水ではなく、ふつうの水や海水、さらに湿り気などから抽象されたもので、抽象的かつ普遍的な表象であると考えられる。それが感覚的な現象から、種子や生体にとって不可欠なものであり、万物の根源は水であると推定したのである。ミレトスの人タレスが、大地は水の上に浮かんでいるとしたのは、当時、ミレトスが東地中海の海上交易の中心であったためかもしれない。

また、アリストテレスは、「哲学の創始者たるタレス」は水が元のものであると言っているが、その「見解をとったのは、おそらく、あらゆるものの栄養となるものが湿り気をもっているこ

と、熱そのものさえ湿り気をもったものから生じ、それによって生きことを観察した結果であろう¹⁷⁾、と推定している。

アリストテレスも、ものの元が水であるというタレスの主張が観察に基づく結果であると考えていることがわかる。

タレスはまた、二等辺三角形の底角が等しいことの証明¹⁸⁾や、不等辺三角形の外接円を作出したことが伝えられている¹⁹⁾。ユークリッド幾何学の萌芽的知識をすでに得ていたのであろう。

世界の成り立ちについては、神話における物語ほどしか知らない人々にとって、自然にたいするタレスのような見方は極めて新鮮に映ったに違いない。自分たちが、その中に生きる自然について初めて神話的説明から脱却したのである。人々は大きな刺激を受けたことと思われる。実際、この後、タレスに続き自然について独自の見解を表明する人たちが現れる。ここでは、そのうちの四人について簡単に触れておこう。

万物の元のもの（始原・アルケー）として、「無限なるもの（ト・アペイロン）」を考えたのはアナクシマンドロス（610～546b.c.）である¹¹⁰⁾。かれは、しかし、これから万物が生じ、また、すべてがこれへと消滅してゆくというだけで、この「無限なるもの」が何であるかについては何も語っていない。あるいは語り得なかったのかもしれない。

アナクシマンドロスの一門には、万物の根源は空気であるとしたアナクシメネス（546b.c.頃）がいる。かれは空気以外の物質は、空気の濃縮化と希薄化によって生じるとした。すなわち、空気が薄くなると火になり、濃くなると雲になり、さらに濃くなると水になり、さらに濃縮されると石になると考えた¹¹¹⁾。

一方、ヘラクレイトス（544～484b.c.頃）は、火があらゆるものの始原であると説いた¹¹²⁾。かれによれば、火からすべての物が生成し、そして

また、火へとすべてのものが終息するのである。

ヘラクレイトスにおいて他に注目すべきことは、あらゆるものは流転し、何ひとつとどまるものはない、と主張したことである。そして、「人は同じ川に二度と入ることはない¹¹³⁾」、と指摘した。ここでは、「同じ」ものとか「同一性」という概念をめぐる哲学的問題が提起されていることになる。

以上は、万物の始原ないし原理として、ある一つの元を想定した立場である。前五世紀には四つの元を万物の原理とみなす人が現れた。それがエンペドクレス（495～435b.c.）である。

アリストテレスによれば、エンペドクレスは自然の「素材の意味で語られる基本要素が四つであると初めて標ぼうした人物である¹¹⁴⁾。」四つとは、火、空気、水、土であり、かれは、これら四つの要素が「愛」によって結合し、「争い」によって分離し、結合と分離を経て、生命を含め、すべてが生まれると考えた。かれはまた、「太陽は火の巨大な集合体であり、月より大きい。月は円盤状、天空は結晶体である」とした¹¹⁵⁾。アエティオスによれば、エンペドクレスは、(雷電について)、「(太陽の)光が雲にぶつかって入り込み、抵抗する空気をそこから追い出すのだが、その光の消失と破裂が轟音を生み出し、その輝きが雷電を、また、その雷電の緊張が稲妻を生み出すとした」という¹¹⁶⁾。雷電を自然的原因の中で説明しているのである。

エンペドクレスの四元素説はアリストテレスを含め、古代ギリシアにおいて広く受け入れられることになる。先の一元素説は、人間の経験上、容易には受け入れにくい面があり、一方、四元素はすべて人間が生きる上で不可欠なものばかりであり、この考えが一般に広がったものと考えられる。

ここでは、アリストテレス以前、タレスを始祖とするいく人かの自然研究を取り上げてみた。

残された資料は少ないが、それでも、以上から、かれらの思考の特徴をいくつか指摘できであろう。

一つは、「わたしはこう考える」という自己の思惟の表明である。かれらは自分の思考のみに依拠して、神とか神話や超自然的なものなど、かれらの外部にある権威に頼ることはしていないのである。自ら思考し、その結果を自らの責任において表明するという態度を堅持していた。

これは知の歴史においてまったく新しい出来事であった。「知の独立」というべきことが、すでに古代ギリシアの初期に行われていたのである。これを思惟の自立性と呼ぼう。

かれらは自然を変化するものにとらえ、変化を一つないし四つの要素によって説明しようとした。特徴の第二は、これらの元や要素が、人間の日常の現象から抽象されたことば（表象）であり、普遍性をもち、しかも平易であることである。すなわち、説明の根拠を、人間の日常の感覚経験に置いていることである。これを、思惟の普遍性と日常性と呼ぼう。

第三に、考察の対象が万物、すなわち自然全体であることである。限定された現象の理解ではなく、全体的理解ということが志向されていたのである。これは、一つに、神話が世界全体を対象としていた影響であろうか。いや、世界の全体像と其中的人間の意味を求めるのは、むしろ人間の本性であって、その要求に応えたものと考えべきだろう。自然世界の全体的理解を目指す傾向を思惟の全体性と呼ぼう。

これらは、いわば、アリストテレス自然学のさきがけである。その特徴を以上によって簡約して述べれば、思惟の自立性、思惟の普遍性と日常性および思惟の全体性ととらえられよう。重要な点は、アリストテレス自然学がこれらの特徴をすべて継承しているということである。

一方、アリストテレスの自然に対する思索は、

タレスなど上記の人々とは比較にならないほど包括的であり、その特徴も上の四つに尽きるわけではない。かれの自然学はさらに、思索の広範性と体系性、論理の厳格性が加わり、強力な説得力を備えていた。それだけに近代科学の成立以前、人はこぞってかれの自然学を受け入れたのである。

ところで、実際のところ、人々が受容したのはかれの自然学だけではない。周知のように、かれは万学の祖と言われるほどに広範な分野にわたって著作を残し、その多くが時間と空間を越えて人間を魅了した。だが、ここは近代科学を問題とする場である。このため、次節ではかれの『自然学』を中心として話を進めよう。それは、近代科学の特徴を明らかにするのに十分有効であろうからである。

第二節 アリストテレス自然学

(一) 哲学の方法

アリストテレス (384~322b.c.) は、よい文体は、「明瞭さにある」とし、さらに、「普通に使われていることばは文章を明瞭にする」という¹⁻¹⁷⁾。また、書きことばについて、「書かれた文章は正確さの点で、(弁論より)すぐれて」いる、と述べている¹⁻¹⁸⁾。これらから、かれが書きことばについては、明瞭さと正確さをよしとし、そのために、普通に使用されていることばを重んじたと考えられる。実際、アリストテレス研究者であるアクリルは、「かれの哲学の鍵となる用語は、高度に専門的なものではなく、単純で日常的な語句である¹⁻¹⁹⁾」、と指摘し、次のように述べている：

「アリストテレスが日常言語に細心の注意をはらったことは、かれの哲学を近づきやすいものにすることに役立っている—かれは、説明をつけずに専門用語を用いたり抽象概念に頼ったりすることによって現実離れし

た空論に赴くことはしない¹⁻²⁰⁾。」

アリストテレスの膨大な著作において、このような態度がどこまで貫かれているか筆者には分からない。中には、専門の学者でも読解が難しい箇所もあるようだ¹⁻²¹⁾。

一方、アリストテレスは先人の自然研究に広く目を通していった。かれは、「どんな重要な問題を探究する場合でも、まず、先人たちの見解を一通り見ることから始める¹⁻²²⁾」のである。これは現在の学問研究においても模範とするべき態度であろう。これを欠いてはおおよそ学問の発展ということはありませんからである。

アリストテレスの先人たちは、おおむね日常の言葉で見解を語っていて、これが、アリストテレスの著述において普通の言葉がよく用いられる一因かもしれない¹⁻²³⁾。

(二) 四元素とアイテール

アリストテレスは、エンペドクレスが唱え、当時「医師や自然学者たちの間に流布していた¹⁻²⁴⁾」四元素説と四性質を承認していた。四元素は、火、空気、水、土であり、四性質は熱性、冷性、乾性、湿性である。

ところで元素としての火は、通常のいろいろな火から抽象されたもので、実際の火そのものではない。それは「現実的には感覚されないが、しかし、可能的には感覚されうる¹⁻²⁵⁾」実体である。土の元素は、普通の土や岩石、あるいは植物や動物が死んだあとに水分をまったく失ったものでも土の元素を適用するように、極めて広い概念であり、あいまいである。空気、水も同様で、実際の空気や水そのものではなく、上に述べた「火」と同様な実体であるが、現実には感覚されない。

アリストテレスは、月より下の自然はこれら四元素の離合集散ないし、その変化から成ると

考えた。したがってかれにとって、自然学とは自然に存在するものの転化（運動や変化）の様相を明らかにすることであった。かれは自然について、こう述べる：

「われわれ（自然研究者）としては、自然によって存在するものども[自然的諸存在・自然物]のすべてを、あるいは少なくとも、そのあるものどもを、動くものであると前提しておきたい。そして、このことは、事実からの帰納によって明らかである¹⁻²⁶⁾。」

ここで「動く」とは、ものの変化や運動すべてを指す言葉である。かれにおいては、自然は変化し動くのである。これは、人間の経験から容易に理解されることであるとしている。

アリストテレスは、変化する自然について二つの原理を置いた。一つは、『自然学』第七巻第一章にある次のものである：

「動く（変化する）ものはすべて何ものかによって動かされるのでなければならない¹⁻²⁷⁾。」

これをアリストテレスの「運動の原理1」と呼ぼう。ここに動くものとは、変化するもの全般を指す。結局、変化するものには、かならず変化をもたらす何ものかが存在するのである。

もう一つの原理は、同七巻第二章にある。「(運動において) 動かすものは、それによって動かされるものと一緒にある¹⁻²⁸⁾。」

一緒にということは、接触しているということである。これをアリストテレスの「運動の原理2」と呼ぼう。これは、ものが離れているときには、互いに力をおよぼすことはない、という性向を言明したものであり、かれにあっても人々にあっても経験から自明なことであった。

アリストテレスの「運動の原理1,2」については、問題が一つあった。

それは、石を投げたり、矢を飛ばしたとき、何が石や矢を動かしているかという問である。

かれは、石や矢を飛ばしたときには、同時に、

空気を押し続けているわけであるから、空気が、それらを押し続けていると説明している¹⁻²⁹。かなり苦しい弁明ではある。あの軽い空気が重い石を動かしたり、矢を勢よく押し続けられるものだろうか。

これについて明確な異論が現れるのは、西欧十四世紀であり、最終的な解決は、ガリレオ、ニュートンにまで至らなければならないのである。問題は実は手ごわいのである。ここでは、問題の提示だけにとどめて話を先に進めよう。

(三) 物体の自然運動

地上の物体、すなわち、月より下の物体はすべて、これら四元素の混合、合成によってできていて生成消滅、変化しつづける存在である。しかもその運動は常にいずれは静止してしまい、永続的な運動をするものはない。

一方、アリストテレスは月や月より上にある天体、太陽や惑星、恒星などはすべて円運動をするとみなした。実際、恒星は夜、北極星付近を中心として完全な円運動が観測される。しかも円運動は「単純かつ完全であり永続的である¹⁻³⁰」から、不変、不生不滅の天体にふさわしい運動である。したがって、天体は地上の物体とは異なるものからできているはずだと考え、かれはこれをアイテールと呼んだ。天体の物質アイテールにとって自然な運動は、途切れることのない永遠的な円運動である。こうして、天体と地上の物体は完全に異質なものからできていると考えられる。

アイテールは永遠的な円運動をする。これも運動の一つであり、「運動の原理 1」に従えば、天体も他のなにものかによって動かされるのである。しかし、天体について人間が感覚できることはまことに少ない。アリストテレスはこう述懐する：

「この貴くて神的な実体（天体）については

人が考察することの手がかりも、またわれわれがそれらについて知りたいと憧れるものでも、明らかなものどもは全くすくない¹⁻³¹。」

だが、アリストテレスは極めて少ない観察データから、天体を動かすものが恒星天の外側にあるはずだと想定し、これを「不動の動者（動かずして動かすもの）¹⁻³²」と呼んだ。かれとしては、自らの「運動の原理 1」に従うかぎり、このような神的な実体を設定しなければならなかったであろう。この実体は、かれがアイオン（始終、常住、永劫）と呼ぶものである¹⁻³³。

後に、カトリック神学は、この「不動の動者」を神と同一視した¹⁻³⁴。

天体（詳しくは天球）は一日に一回転するから、重さがほとんどない物体である。つまり、天体をつくるアイテールはほとんど重さをもたないはずである。こうして天は軽い物体の本来の場所であるとみなされた。このため、四元素の一つの火は軽い物質の本来の場所に向うことが自然的（本来的）運動であるとされ、常に天に向うのである。

一方、軽いものの反対である重いものは、天とは正反対の場所である宇宙の中心、すなわち、地球の中心が本来の場所でなければならず、重いものは、したがって常に地球の中心に向うとされた。つまり、土や水のような重いものは常に地球の中心に向うのが自然的（本来的）運動なのである。

以上をまとめると、物質と運動について次のような対応が存在していることになる：

<u>自然的な物質</u>	<u>自然的運動</u>
アイテール	—— 円運動
火の元素	—— 天（上）への運動
土の元素	—— 地の中心（下）への運動
地上の物体	—— 上下の運動と強制運動の合成
動物	—— 自身の運動

アリストテレスは地球が球形であると理解していた。北にゆくにつれて新しい星が見えることや月食の際に見られる月の欠け方などから推定したのである¹⁻³⁵。

以上が、静止する球形の地球とその上で変化し、二種類の固有の運動をする月下の物体と、不変不生不滅で、円運動を永続的に行う月より上の物体という峻別をとるのがアリストテレスの天地二元論である。

かれのこの所説はほぼ二千年にわたって広範な人びとの心をとらえてきた。近代科学を修めた者には笑うべき説かもしれない、しかし、肉眼でのみ天を眺め、日常的な観察に根を置くこの考えに異を唱えることは極めて困難であった。諸賢が仮に当時に在ったとして、この説明に確乎とした反論を提示できるであろうか。一考するのも無駄ではあるまい。

(三) 四原因説

自然を転化するものと捉えたアリストテレスは転化には四つの種類があるとみなした。

一つは、ものの生成消滅である実体の転化、二つは、ものの移動である場所の転化、三つは生命などの特徴である成長増大の転化、四つは葉の色が変わる、鉄がさびるなど、ものの性質の転化である。

しかし、最初の実体の生成と消滅は、存在から非存在へ、非存在から存在への移行であるから後に、これは転化と呼ばれるべきでないとした¹⁻³⁶。

アリストテレスは、上の四つのうち移動については詳細に論じているが、残りの転化についてはあまり触れていない。ものの移動に関する基本的な様相は上の(二)で述べた通りである。

生成消滅としての実体の変化では、生成するものについて、その原因を知らねばならない。原因としてアリストテレスは四つをあげる。形

相因、質料因、起動因、目的因の四つである。

この四つについては、山本が簡潔にまとめているので、それに従うことにしよう。それによれば、次のようになる¹⁻³⁷：

質料因 事物がそれから生成し、その生成した事物に内在するところのもの。たとえば、銅像であれば、その材料である青銅か、その類である金属。

形相因 事物の「そもそも何であるか」(本質)を言い表す定義である。例えば、家の場合、「人の住むために建てられたもの」である。「人間は理性的動物である」における理性的。

起動因 ものごとの転化または静止の第一の始まりがそれからであるところのそれ。父は子作りの起動因。酒杯ができるためには細工師が必要で、それが起動因。

目的因 物事の終り、すなわち物事がそのためにであるそれ[目的]。たとえば、散歩は健康のためと云うときの、健康。

なお、アリストテレスは、「自然は二義、すなわち質料としての自然と、型式[形相]としての自然があり、形相の方は終り[目的]であって、・・・形相そのものは、それとしての原因[目的因]である¹⁻³⁸」と考え形相因と目的因を同一のものとみなしている。

また、起動因は、ある目的のための原因であって、目的因がなければ起こらない。したがって、形相因、目的因、起動因の三つはしばしば一致する。このため、アリストテレス自然学は主として形相因と質料因の二つを中心として展開する¹⁻³⁹。

一方、アリストテレスは、『形而上学』において、自然について次のように述べている：

「すべてのものは、およぐ魚でも飛ぶ鳥でも植物でも、同様な仕方ではないにせよ、とにかく何らかの仕方でも共同的に秩序づけられている。これらすべては、それぞれ他とは無関係に

存在するようなものではなくて、互いになんらかの関連をもっている。それは或る一定の目的にむけてすべてが共同的に秩序づけられているからである¹⁻⁴⁰⁾。」

さらに、かれは「神と自然は何ものもむだにはつukらない¹⁻⁴¹⁾」と考え、これを自然の原理とした。こうして自然のすべて秩序の下にあり、それぞれが何らかの目的に沿って存在することになる。このため、アリストテレスにおいては、形相因（目的因）と質料因のうち、前者が後者より優先することになる。この結果、かれの自然に対する説明として、目的論的説明が大きく浮かび上がるのである。この特徴は、ことにかれの生物学的著作において顕著である。

「最も明白に、自然の目的性の認められるのは、他の[人間以外の]動物においてである¹⁻⁴²⁾」、とはアリストテレスの言であり、目的性は植物のうちにもあり、「木の葉が果実をおおい守るために生えるなどは、それである。さらに、燕が巣を作り、蜘蛛が網をはり、植物が栄養をとるために根を下におろすなどするのは、なにかのためにでもある¹⁻⁴³⁾」、とも言う。

さらに、例をあげれば、象の鼻の長いわけは、「象は沼地に住んでいるので、息をしたり、ものを食べたりできるためには、このような鼻をもっていなければならない¹⁻⁴⁴⁾」と指摘する。人間の「眉毛とまつ毛とは、どちらも眼の防護のためにある¹⁻⁴⁵⁾」、などとも言う。その他、『動物部分論』では多数の事例があげられている。

しかし、例外もある。たとえば、肝臓のまわりの胆汁は、・・・たんなる余剰物ないし老廃物であって、何かのためにあるものではない¹⁻⁴⁶⁾。また、目は何かのためにあるが、(人間の)目が青いということは、何かのためにあるわけではない。だから、「すべてのものについて目的を探究するにはおよばない」とも言っている¹⁻⁴⁷⁾。

人間のすべての部位に何かの目的を持たせることはむずかしいし、まして、自然の生物のすべてについて目的を見出すことは、当時であっても今日でも容易なことではないと思われる。

一般に、目的論的説明は、自然の現象を、あるがままに見て、見られるままに説明するものである。現実の現象を観察し、簡単な推理を加えるだけで可能である。説明として容易で、たいてい論理的な矛盾は生じない。目的論的説明は、最も人に受け入れやすいものである。

さらに、それはひとたび信じられると、もはや疑うことはむずかしく、反論は容易ではない。現在でも、多くのことで、人々はこの種の説明で満足して終ることも確かである。

(五) 場所（空間）と時間

上に述べたように、アリストテレスにおいては、ものの移動とは、ものの本来の場所と深く結びついていた。軽いものの本来の場所は天であり、重いものの本来の場所は、その反対の地球の中心である。ところが、このように場所と移動（運動）を一体化させると、「空虚」ということが起こりえないことになるのである。

たとえば、「空虚」を「物体が奪い去られた一種の場所¹⁻⁴⁸⁾」のようなものと考えたときには、その「空虚」においては、上も下も方向も存在しない結果、その中のものは自然にしたがった運動をもたないことになり、およそ運動ということが不可能となってしまう¹⁻⁴⁹⁾。このようなことはあり得ない。

また、媒質中を物体が落下するとき、媒質の抵抗のために軽いものほどゆっくり落ちる。ところが物体の何も無い「空虚」では、「抵抗がまったくなくなるから、何もかも同じ速度をもつことになる。しかし、これは不合理なことである。¹⁻⁵⁰⁾」

アリストテレスは「空虚」が存在しないこと

を固く信じていた。かれは『自然学』第四巻において「空虚」の否定のために半分以上の頁を費やしている¹⁻⁵¹⁾。上に述べた理由は、その一部にすぎない。おそらくアリストテレスの「空虚」否定の論議に、ただ言論のみによって反証することは不可能であったろう。かれの所説以降「空虚」の存在は長年にわたって否定され続けられるのである。当時もそれ以後も長く、「空虚」すなわち「真空」を人々は経験の上に乗せることができなかつたのである。

さて、場所移動の一つとして天の円環運動がある。アリストテレスは、この円環運動を時間の尺度とみなしていた。

かれは、「前と後を知覚するとき、われわれは時間があるという」ように、「時間とは、前と後についての運動の数である¹⁻⁵²⁾」と考えた。

ところが、「運動は時間によって測られる。」そこで測る尺度を考えるなら、「あの均等的な円環運動が最もすぐれた尺度である。というのは、この円環的運行の数は最も可知的なものだから¹⁻⁵³⁾。」

可知的とは、わかりやすいということである。この尺度は、実際には、太陽の(前の)南中から次の(後の)南中までの時間(間)である。この尺度が規則的で厳格に一定であることは、古代エジプト以来熟知されていたことであり、アリストテレスはこれを理解していた。時間を思弁の上ではなく、実際的な経験によってとらえていたことがわかる。

アリストテレスの「気象論」には、興味深い議論が展開されているが、紙幅の関係上省略しよう。

以上、アリストテレスの自然学をごく短く概括した。本節の最後にこの概括からアリストテレス自然学の特徴をまとめてみよう。

(六) アリストテレス自然学の要諦

かれの自然学においては、かれに先立つ古代

ギリシアの人々の自然研究の特徴を継承していると言ふことができる。自ら考え、その考えを自分のことばで表明するという思惟の自立性は、かれの哲学の根幹となっているし、その内容はおおむね日常のことばで語られていて、表現の平易性も守られている。

さらに考察の対象を全体に広げようとする思考の全体性。これに関しては、アリストテレスにいたって、初めて十分な形で実現したとみなすことができる。

かれの運動論では、「運動の原理1」(「動くものは何ものかによって動かされる」)が重要な役割をはたしている。この原理は、人間の日常の経験、たとえば、馬車を動かすのは馬の力が必要だ、ものを引き上げるには人の力がある、などから当然のこととみなされた。元来、生命ではない物体の場合、それが何ものにもよらずにひとりで動き続けるなどということはあり得ないのである。この原理は、人間の日常の経験から抽象され、帰納されたものと考えられる。

日ごろの常識に基づく説明であり、常識論的説明と呼んでもよいであろう。かれはこの原理を基礎にして、恒星天球や太陽や惑星天球の運動から地上の物体の運動まで本性的固有の場所との関連において体系的に説明した。

一方、天体は不生不滅であり、しかも不変の円環運動を永続的に続ける。地上の物体は変化し、いずれは消滅する。したがって、天と地はまったく異なる物質からできている。アリストテレスは、天について人間に許されたわずかな観測からそう判断した。これは、一応、経験に従っており、論理の上では、反論がきわめて困難であった。かれの天地二元論は、日常の観測に少しの推理を加えて創作されたものである。常識の範囲を大きく逸脱しているわけではない。かくして彼の理論は、ほとんどの人々に受容されたのである。

また、地上の自然現象の原因として、形相因と一体である目的因が大きく取り上げられている。「自然は何ものもむだには作らない」という原理で自然を説明することが優先されている。生物の働きや部分を全体の中に位置づけることが目指されている。これは、とくに動物の場合に顕著である。これを目的論的説明と呼ぼう。

こうして、かれの自然にたいする説明、すなわち、自然学の特徴として、第一に帰納的であり、さらに全体論的、目的論的、かつ常識論的であるということが出来る。それは、人間の「生の経験」を土台として、自然を包括的に、矛盾なく説明している。人間性が、世界の成り立ちと構造、さらに、その中の人間の位置を求めるものとすれば、かれは、その欲求に応じることに於いて、人間の心を驚づかみにしたのである。これをアリストテレスの「驚づかみ」と呼んでもよいであろう。

ひとたび、この包括的説明に囚われたら、その「驚づかみ」から逃れることは容易ではなかった。このためであろう。かれの自然哲学は、ギリシアを越えてアラビヤの地に広がり、やがて西欧にも伝えられ、西欧学問界を支配するに至るのである。

一方、かれの学問が全体性と包括性を重視しているため、説明においておおまかであり、あいまいさをもっていたことも認めざるをえないだろう。これを正すためには、例えば、ユークリッドの厳格な論理やアルキメデスの厳密な思考を必要とした。科学が発展するためには、アリストテレスに欠けていた数理科学が伴わなければならない。このため次節では、ヘレニズム期の数理科学をとりあげる。

近代科学は人間の長い知的な努力の末に成立した。これを示すのが本稿の目的であり、そのためには避けて通れない道程である。

第三節 ヘレニズム期科学

紀元前323年アレクサンドロス大王が死去した後、帝国は三つに分けられ、そのうちの一つがエジプトのアレクサンドリアに首都を定めたプトレマイオス王朝であった。この王朝は、女王クレオパトラのとき、紀元前30年ローマ軍に滅ぼされるまで約300年続いた。この期間をヘレニズム期と呼ぶ。

ヘレニズム期の初期、学芸を深く愛好したプトレマイオスⅠ～Ⅲ世は、アレクサンドリアに図書館を建設し、多くの学者を集め、かれらの研究を支えた¹⁻⁵⁴⁾。プラトンやアリストテレスの学統を継ぐ人も集まったが、後世に残る学術は主として数学や物理学の分野の人々によってはたされた。実際、その学術はアラビヤを経て西欧中世に伝えられ、やがて西欧近代科学の成立に重要な貢献をすることになる。この節では、西欧近代に大きな影響をおよぼした学問分野を取り上げておこう。

(一) 数学・物理学

本稿で近代科学という場合、十七世紀後半に成立したニュートンの近代力学を中心とした自然科学を指している。ところが、数学は自然を対象とした科学ではない。第二節で検討したアリストテレス自然学でも数学と云える部分はごくわずかしかない。しかし、近代科学における自然研究では、数学が不可欠な役割を果たすのである。その数学は、ヘレニズム期において発展した。

いや、発展したというより、数学はこの時期、革命を経験したというべきであろう。革命とは、この場合、実用的ないし直観的数学から、「証明」を必須とする純粋数学への転換を意味する。この転換は、ヘレニズム期の紀元前三世紀後半ごろに成立したユークリッド(330-275b. c. 頃)の『原論』において実現したと言えるだろう。

『原論』¹⁻⁵⁶⁾は、本稿の第四章に深くかかわるだけでなく、数学という学問の特質を十分に表出しているものであるから、その要点をここで述べておこう。

有名なピタゴラスの定理は古代ギリシア以前、エジプトやメソポタミアでも知られていた。その一例を示せば、次の通りである[図1]¹⁻⁵⁶⁾：

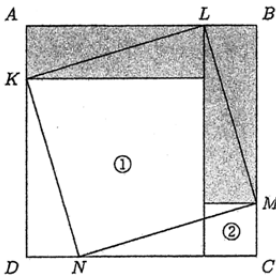


図1 “中国の証明”とされる。

[図1]において、 $\triangle KDN$ は任意の直角三角形で、四辺形 $ADCB$ は辺 AD を一辺とする正方形。このとき、 $\triangle KDN$ において次が成り立つことがわかる。

$$\begin{aligned} & \text{斜辺}KN\text{を一辺とする正方形の面積} \\ & = \text{辺}KD\text{を一辺とする正方形の面積①} \\ & + \text{辺}DN\text{を一辺とする正方形の面積②} \end{aligned}$$

このように、三角形に適当な線を加えて、図から直接的に定理を読み取ることを直観的証明と呼ぼう。

ユークリッドの『原論』では、ピタゴラスの定理はまったく異なる方法で証明される。

『原論』は全十三巻から成るが、最も重要なのは第一巻である。そこでは、最初にことばの定義が与えられ、次いで五つの公準(要請)と九つの公理(共通概念)が置かれる。

定義では、最初に、

「点とは部分をもたないものである。」

「線とは、幅のない長さである。」

「線の端は点である。」

「直線とは、その上にある点について一様に横たわる線である。」

などのように、幾何学の基本的要素である点、直線の定義がなされ、続いて、円、三角形、二等辺三角形、平行線などが定義される。

公準、公理は議論の前提として認められるもので、すべて疑われることのないものとして設定される。そのうち二つが重要である。一つは第五公準で、これは、後の十九世紀において非ユークリッド幾何学誕生のきっかけを与えた公準であるが、その問題は、本稿の趣旨から離れるので、ここでは省略する。

他に重要なのは、第九の公理で、「二点を通る直線はただ一つしかない」ことを言明する。

こうした準備の下で、種々の命題(定理)が述べられ、証明される。はじめに、三角形の合同定理が証明され、五番目の定理では、タレスの発見にかかるとされる「二等辺三角形の両底角は等しい」が証明され、三十二番では、三角形の内角の和は二直角であることが証明される。第一巻はピタゴラスの定理とその逆の定理の証明で終る。

証明は合理的な論理に従ってなされ、その厳密な推論の過程を演繹的推理と呼ぶ。結局、証明とは、命題(定理)の成立することが、定義されたことばとあらかじめ設定された少数の公理・公準から演繹的推理によって厳密に示されることであり、結果として得られる定理は疑いようがなくなるのである。

かくして、疑われることのない前提から演繹的推理を通して疑うようなない確実な結論が得られる。証明によって、人間の経験に根拠を求めることなく、確実な命題を導くことができる。このことを古代ギリシア人は初めて発見したのである。これを「証明の発見」と呼ぼう。

『原論』は、簡明な公理から証明によって、いかに複雑な命題である定理が得られるかを組織的に叙述したものであり、演繹的推理の聖典である。全世界で聖書について広く読まれた本

とまで言われている。証明を本質とする純学数学が学問として独自の道を歩み始めるのはこの『原論』以後のことである。『原論』において数学の革命が成就したのである。

『原論』は歴史上突然現れたわけではない。紀元前6世紀前半のタレスの、上に述べた伝説的発見から前3世紀のユークリッドまで約三百年は経過している。ここは、しかし、その歴史的経緯を語る場ではないので、話を先に進めよう¹⁻⁵⁷⁾。

ヘレニズム期では、ユークリッドにやや遅れてアルキメデス(287-212b. c.)とアポロニウス(262-200b. c. 頃)がすぐれた業績を残した。そのうち近代西欧に深く接続するものを取り上げよう。

アルキメデスは、数学ではユークリッドの成果を踏まえて、放物線と直線で囲まれた図形の面積を決定する方法を編み出した。その図形を多数の三角形によって近似させて面積を定めるものである。いわゆる「取り尽くし法」である¹⁻⁵⁸⁾。ただし、かれの場合、面積の数値を求めるわけではなく、特定の三角形の面積との比を求めるものである。「取り尽くし法」は、後にケプラーが採用することになる。

アルキメデスは、物理の分野では、てこの原理と浮力の原理を発見した¹⁻⁵⁹⁾。浮力の原理は、周知のように、物体を液体に沈めたとき、物体はそれと同じ体積の液体に等しい重量を浮力として得るというもので、若きガリレオはこの原理とてこの原理を組み合わせることで物体の比重を正確に決定する方法を工夫した。

一方、アポロニウスは円錐曲線ですぐれた仕事をなした。

任意の斜面錐を平面で切断したとき、切断の仕方によって、その切り口が三つに分かれる。すなわち、放物線、双曲線そして楕円である¹⁻⁶⁰⁾。かれは、これを元にして、これらの曲線の種々

の性質を見出した。とくに楕円の性質は、後にケプラーの知るところとなり、かれの火星楕円軌道の発見につながるのである。

(二) 天文学

恒星は季節によって見え方が異なる。細かい観測によれば、太陽は恒星天球の中を東に移動しつづけ、一年でもとに戻る。月は満ち欠けを伴いつつ、約29.5日の周期で地球を一周する。他方、水星、金星、火星、木星、土星の五つの惑星は、恒星天球の中で複雑な動きをする。たいていは、太陽と同じように、東へ向う(順行)が、ときには、しばらく同じ所に留まり(留)、次いで西へ動き(逆行)、反転して再び東へ向う。天のこうした現象に古くから人々の興味を引き付けてきた。

第一節で述べたように、自然現象を神や超絶的存在に頼らずに、自らの思考によって自然界の中で説明するのが古代ギリシアのタレス以来の伝統である。錯綜した天体運動に対して、天体構造をあてはめることによって理解し、把握しようとする人が現れた。その始祖はエウドクソス(407-355b. c.)であろう。かれは、各天体に地球を中心にもつ複数の同心球を配置し、同心球の異なる回転運動によって天体の動きを把握しようとした¹⁻⁶¹⁾。ただし、恒星天球の場合は、東から西へ回転する天球が一つである。

天球の同心球モデルは後にカルポス(370b. c.)やアリストテレスによって改良が試みられた¹⁻⁶²⁾。しかし、それらのモデルは、天体運動を正確にとらえることができなかった。当時は惑星の観測方法も未熟であったし、モデルと観測を正確に一致させるというような考えには、それほど関心がなかったのであろう。アリストテレスらは、天球の回転運動という自然学に即した原理的モデルを探究していたと考えられる。

ヘレニズム期を代表する天文家は、ヒッパル

コス(190-120b. c. 頃)である。かれの生涯も事績もよくわかっていないが、残されている史料¹⁻⁶³⁾から、かれが当時第一級の天文観測家であり、後世に残る大きな仕事を行ったと考えられている。

ヒッパルコス恒星に関して一等星から六等星まで六段階に分け、同時に、数多くの星座を正確に決定したと考えられる¹⁻⁶⁴⁾。正確な星座の表は、いわば天界の地図に相当し、太陽や月や惑星、その他の天体の位置を示すのに天文観測上不可欠の手段である。さらに春分点が黄道に沿って、百五十年間に約2度の割合で西へ移動することを発見した。これは今日、日本では歳差と呼ばれている現象である。これらのことはヒッパルコスが天文観測において非凡な能力をもっていたことを示している。

他方、かれは天体の運行を説明するために斬新なモデルを考案した。

古代天文学とアリストテレスによれば、天体は地球を中心とした円運動をする。ところが、太陽の運動の長年にわたる観測の結果、地球は太陽の円運動の中心からややずれていることが判明した。このずれを調整するために考え出されたのが、導円と周転円である[図2]。これはヒッパルコスの原案とみなされている。[図2]において、導円の中心はC、周転円の中心は常に導円上にあり、それは導円上を動く。太陽は周転円上にあつて、周転円の移動に伴って同時に周転円上を動くのである。この結果、図2に見られるように太陽は導円からややずれた円上を動くことになる。この軌道円が離心円である。このモデルは、天体は円運動するという原則と太陽の観測データとを適合させるために作られたものである。

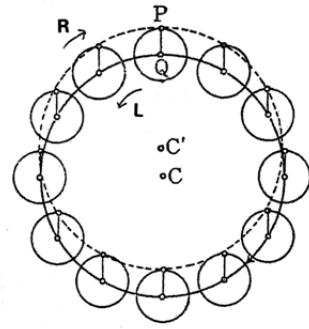


図2 大きい実線の円は導円。その上を周転円の中心QがLの方向に動く。太陽Pは周転円上をRの方向に動く。

ヒッパルコスの天体観測の成果と天体運行の理論モデルは約二百年後にプトレマイオスに引き継がれる。かれはヒッパルコスの業績を基礎に古代の天文学を集大成する。その結果が主著『アルマゲスト』である¹⁻⁶⁵⁾。

プトレマイオスはヘレニズム期を過ぎた紀元二世紀にアレクサンドリアで活動していることがわかっているが、正確な生年も没年も不明である。『アルマゲスト』は全十三巻から成り、アリストテレスの『自然学』と異なり、専門用語と高度の数学(幾何学)の知識を必要とする天文学の専門書である。西欧の天文学は近代の直前まで、アリストテレスの天体観と『アルマゲスト』の惑星運動理論に支配されていたのである。科学史家バタースフィールドは、その状況を次のように表現している¹⁻⁶⁶⁾。

「近代科学が評価する点—具体的に確立されていて、現象にあてはめてみても細かいところまで事実と全体的に符号するという強み—をもっていたのは、プトレマイオスの理論だけであった。」

これによれば、『アルマゲスト』の天体理論は、近代科学に匹敵する学術性を備えていたと思われる。ここでは、その理論の概要を広瀬にしたがって述べておこう¹⁻⁶⁷⁾。

第一、二巻は序論で、基礎仮定・球面天文学・球面三角法（弦の表による方法）などの説明にあてている。ここで基礎仮定というのは、地球は球形で、天球の中心にあって静止しており、天球は回転していること、また、地球は恒星天球に対しては、一点とみなすことができるほど小さいということである。これらの妥当性については、その理由・根拠をあげている。

中でも、天体が円運動するという古代天文学の最大の理念を擁護した。これについては、プトレマイオスの考えを『アルmagest』から直接引用しよう¹⁻⁶⁸⁾：

「主として常に目に見える星の回転によって天球の観念が生まれた。ことにこの回転がすべてに対し唯一にして同一の中心のまわりに行われることを見て、この観念は確実さを得た。」

[図3]は天体望遠鏡による星々の動きを写す天体写真である¹⁻⁶⁹⁾。天の北極付近を中心にした完全な円運動を見ることができる。古代メソポニアや古代エジプトの神官らもこうした円運動を観測したに違いない。天体の円運動の最有力の根拠となった。アリストテレスはこれに理論的説明を加えた。



図3 北の空の星の動き。星は天の北極を中心の時計の針と反対方向に一日に一回転する。

第三巻は、太陽の運動を取り扱う。太陽は地球の周りをまわり、導円と周転円との組み合わせの上を動くのである。第四巻は月の運動である。月は太陽に比べると一層複雑な運動をする。それは次の第五巻で、やはり導円と周転円の組み合わせによって説明される。第六巻は、主としてヒッパルコスに基ずく日・月食論である。そこに引用されている古代の観測記録は、近代の天文学者が、月や太陽の運動、地球の自転速度の長期的変動などの研究のために非常に重要な資料となっている。第七、八巻は、1028個の恒星表で、その位置と、一等から六等に分けた等級示されている。西欧では、長い間、これが恒星位置の唯一のよりどころであった。第九、十三巻は、惑星運動論で、地球を中心とした惑星の運動を導円と周転円の組み合わせによって表そうとしたものである。この運動論がいわゆる天動説を大成しているもので、十七世紀ごろまでヨーロッパを支配した天文学的宇宙論である。古くから天文学における最大の課題は、水星、金星、火星、木星、土星の五惑星の運動を正確に把握することであった。プトレマイオスもこの問題を追及した。しかし、五惑星は他の天体に比べ一段と複雑な動きをする。このため、かれは導円の中にもう一つの中心を設けた。エカントと呼ばれる点である¹⁻⁷⁰⁾。

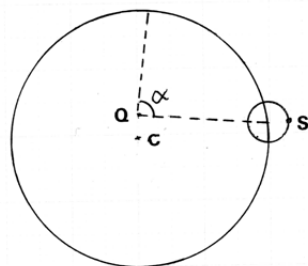


図4 Cは導円の中心。Qがエカント。角 α は速度一定である。Sは太陽。実際の構造はもっと複雑である。

興味深いことには、古代ギリシアにおいてす

でに地動説を唱える者も現れた。これはコペルニクスが指摘することで、フィロラオス(450b. c. 年頃)や同時代のヒケタスである¹⁻⁷¹⁾。また、アリストアルコス(310-230b. c. 頃)も太陽や恒星が静止し、地球が自転していると考えていた¹⁻⁷²⁾。

それに対してプトレマイオスは、次の批判を提示し、それらの地動説を明確に否定した。

「理論的にみて次のことを仮定してもさしつかえないと主張する人々がある。例えば天空が静止し、地球がほぼ一日で西から東にその軸のまわりに回転する、と¹⁻⁷³⁾。

(このとき、地球は)極めて少ない時間に非常に大きな回転をするから、回転によって地球はその周囲にあるいかなる物体より一層速い運動することを認めねばならない。かくて地球上に支えられない物体は常に地球と反対の運動をするように見えるであろう。そして、雲、投げられた物体、飛ぶ動物は東へ行くことはないだろう。何となれば、地球はこの方向では常に他を追い越すから、地球だけを除いて他はすべて西に後退するように見えるだろう¹⁻⁷⁴⁾。」

地球が一日に一回自転するとなれば、地球は巨大な球形をしているから、その表面の速度は極めて大きくなる。このため一度大地から離れた物体や動物は地球に追いつくことができないから西へ追いやられてしまう。プトレマイオスはそう主張する。

プトレマイオスのこうした主張に対し、地動説は的確な答えを用意できなかったであろう。『アルマグスト』は、バターフィールドが指摘するように、科学としても十分な説得力をもっていたのである。

一方、プトレマイオスの理論モデルは、エウドクソス・アリストテレスの自然学的かつ実在論的な同心球説とはことなり、導円、周転円、さらにエカントなどの人為的な工夫をこらして、観測との数量的一致を目指したものであり、「現

象を救う」仮構とみなされがちであった。ここで、前者を実在論的理論、後者を現象論的理論とよべば、二つの理論の性格の相違は、一般に、現在の科学理論に対しても議論される点であり、今でも、科学哲学の中心問題の一つである。

第二章 アリストテレスの栄光

古代ギリシアの学問は、ヘレニズム期以後、ローマ帝国支配下のエジプト・アレクサンドリアにおいて継承された。この時期には、数学者・哲学者であり、『原論』の編纂にも貢献したテオン(四世紀)がいる。その娘ヒュパティア(370?—415)は学塾の学頭として多くの弟子を集めた²⁻¹⁾。かのじよはプトレマイオスの天文学アポロニウスの円錐曲線に関する注釈書を著したといわれる。しかし、415年異教徒としてキリスト教徒との争いに巻き込まれ、白昼暴徒によって虐殺された²⁻²⁾。彼女の死後、古代ギリシアの学問は、アレクサンドリアにおいては消滅したとみなされている。紀元五世紀初頭には古代ギリシアの学灯は、歴史の表舞台から姿を消すのである。

しかし、古代ギリシアの学問は消滅しなかった。5世紀から8世紀にかけて、「ギリシアの学問体系は、シリア語、ヘブライ語への翻訳を通して、東の方には広く伝えられ²⁻³⁾」、時を経て、アラビア語圏で再生し、やがて西欧中世のキリスト教世界で復興し、栄光のときさえ迎えるのである。

第一節 古代ギリシア科学の伝搬

(一) アラビアへの伝搬

予言者マホメットがある天啓を得てアラビアの社会改革に乗り出し、幾多の困難の後に、かれはアラビア半島のアラブ族を糾合し、統一国家を作ることに成功する。

マホメットの死後、かれの教友アブー・バクルの指導の下で、アラブの大征服が開始される。その後、歴代のカリフも引き続いて外征を行い、版図を広げた。第四代カリフの時代に、シリア総督であったムアーウィヤは、ウマイヤ朝(661-750)を開き、首都をシリア・ダマスカスに置いた。その版図は、東はイラン、アフガニスタンを含み、中東のシリアからエジプトを治め、さらに地中海南岸に沿う地域から北アフリカを経て、スペイン南部にまで及んだ²⁻⁴⁾。

ウマイヤ朝は750年アッバース家によって打倒され、ここに約五百年続くアッバース朝(750-1250年)が開始される²⁻⁵⁾。アッバース朝の第二代の王アリー・マンスールは新たに都をバクダードの築き(762年)、外部から学者らを招いた。なかでもシリア語に通じ、古代ギリシアの学問を修めた人たちが多くいた²⁻⁶⁾。以後バクダードは行政の中心としてのほか、古代ギリシアの学問再興の地として、アラビア学術研究の中心ともなる。

とくに、第五代カリフ、ハールーン・アッラシード(763-806)は、「科学と文芸のアラビア史上最大の保護者の一人²⁻⁷⁾」であり、学者らに古代ギリシアの科学書をアラビア語に翻訳させた。その学者の一人に、先駆的翻訳者であるアブ・ヤフヤ・イブン・アル・パトリーク(796-806の間に没)がいる。かれはヒポクラテスやガレノスの医学書、ユークリッドの著作、プトレマイオスの『アルマゲスト』などを翻訳した²⁻⁸⁾。

さらにラシードの子で第七代カリフとなったアル・マムーン(在位813-833年)は、アッバース朝きっての開明君主とうたわれ、830年の頃バクダードに「知恵の家」と呼ばれる館を立ててギリシア学問の大規模な翻訳事業を行った。かれはシリア語やギリシア語など各国の国語に通じた学者を集め、また、シリア、アルメリアやエジプトの地へ使者を派遣し、書籍を買い求め

させた²⁻⁹⁾。

科学の歴史において、アル・マムーン在位中に忘れてならないのは、アル・クワリズミ(九世紀生存)である。かれは、「知恵の家」の館員であり、バクダードの天文台でも働いた。かれの特筆すべき功績は、インドから伝えられた記数法をアラビア語の書物の中で初めて述べたこととみなされている²⁻¹⁰⁾。

現在に続く、この記数法は、いうまでもなく、1から9までの数字にゼロ0を加えて、数字の置かれる位によって、数の単位が十倍されるといいう位取りの原理による数の表記である。この方法は、ローマ数字による記数法に比べ、数の表示と計算をはるかに簡明なものにした。

かれはまた、ラテン語にも翻訳された『アルゲブラ(代数学)』を著した。これは二次方程式などの解法を述べたもので、代数学という学科が「アル・クワリズミとともに誕生したこと教える²⁻¹¹⁾」書物として、数学の歴史において重要な貢献をした。

その頃の最大の翻訳者は、フナイン・イブン・イシャーク(810-977)であろう。かれは翻訳の指導者でもあり、息子と甥を含む多くの協力者を得て、ヒポクラテス、アリストテレス、ユークリッド、アルキメデス、プトレマイオス、ガレノスなどの著作を翻訳した。とくに古代ギリシアの科学関係の文献はほとんどすべて翻訳された²⁻¹²⁾。

フナインにやや遅れて翻訳事業に大きく貢献したのはサービット・イブン・クッラ(826-901)である。かれはバクダードに翻訳学校を建てて多くの弟子とともにギリシア数学と科学の翻訳にあたった。かれらによる翻訳は、ユークリッド、アルキメデス、アポロニウス、テオドシウス、プトレマイオス、ガレノスなどの、ギリシア科学の重要な著作を含んでいる²⁻¹³⁾。

750年のアッバース革命のとき、難を逃れたウ

マイア家のアブド・アッラフマーンは北アフリカを経て、スペイン南部でアッバース家のスペイン総督軍を破り、コルドバに都を定め、後期ウマイヤ朝を建てた²⁻¹⁴。

その後、アブド・アッラフマーン三世（在位912-961年）は版図を広げ、カスティーリャ、トレド、サラゴサの諸都市を支配した。三世の時代は後ウマイヤ朝の黄金時代であった。農業、産業、商業、芸術、学問が栄え、国内の安全と秩序が保たれた。バクダードとは政治的に断絶していたが、文化交流は活発に行われた²⁻¹⁵。

三世の子ハカム二世（在位961-976）は好学の君主で、たえず学者の研究に興味を示し、書記官をカイロ、シリア、バクダードに派遣し、古代ギリシアの学問のアラビア語に翻訳された書籍を大量に集めさせた。トレドを含むスペイン・アンダルシア地方には、これらの写本が広がった²⁻¹⁶。

スペインのウマイヤ朝は十一世紀に入ると徐々に衰え、国家は小王国に分裂してしまう。さらに十一世紀の後半にはレコンキスタが本格的に始まり、1085年にはトレドがイスラム教徒から奪回された。トレドが落ちたことは、西欧の学徒に古代ギリシアの学問のアラビア語訳と広く接し得る場を提供することになった。アッバース朝バクダードにおいて翻訳された古代ギリシアの学問の本流がラテン語に翻訳される場が確保されたのである。しかし、ラテン語への訳業については次の第二節で扱うことにして、ここではアラビアの学問の発展について一言述べておきたい。

本稿はニュートンを頂点とする西欧近代科学の成立という出来事に焦点を置いた論稿である。その趣旨から、アラビアの学問についても、とくに近代科学との関連が深い天文学におけるアラビア科学の特徴に触れておこう。

第一章の終尾で指摘したが、古代ギリシアか

らヘレニズム期にかけて、天体理論として、自然学的（実在論的）と現象論的の二つが生まれていた。伊東によれば、アラビアの研究者の間では、自然学的宇宙理論が好まれたという²⁻¹⁷。

その代表的な学者はアヴェロエス（アラブ名イブン・ルシュド、1126-98）であろう。かれは、スペインはコルドバの人で医学書も残したが、イスラムおよび西欧中世の社会では、アリストテレスの著述を独自の注釈とともに訳出したことで著名である。アリストテレスに対する崇敬の念が強かったことは、「アリストテレスの誕生によって世界ははじめて完全になった」と言うかれのことばにあらわれている²⁻¹⁸。

アヴェロエスは天文学について、プトレマイオスより、アリストテレスに戻るべきであると主張する²⁻¹⁹：

「それゆえ天文学者は、それによって与えられ、自然学の見地から不可能なものは何も含まれていないような、そうゆう天文体系をつくらねばならない。・・・プトレマイオスは（その意味で）天文学を正しい基礎の上に置くことはできなかつた。・・・周転円や導円というのは自然学的には不可能である。われわれはそれゆえ、自然学の原理を基礎とする真の天文学の新しい探究に従事しなければならぬ。」

自然学の見地による天文学とは、もちろんアリストテレスの自然学による天文体系である。アヴェロエスについては、本章の第二節で再び言及するであろう。

（二）西欧ラテン世界への伝搬

古代ギリシアの学問で残されていたものの大部分は十世紀の終る頃にはアラビア語で読めるまでになっていた。これらアラビア語の文献はやがてラテン語に重訳されて西欧に伝搬する。

その主要なルートは二つあった。一つはシチリアを含む南イタリアであり、他はスペインであった。いずれのアラビア世界と強力に結びついていた地域である。

ラテン語への翻訳が本格的かつ大規模に行われたのは十二世紀である。このとき、西欧に大きな影響を与えたのは、アル・クワリズムの数学を含め、古代ギリシアのアリストテレスの学問体系、プトレマイオスの天文学およびガレノスの医学などであり、さらに、これらに対するアラビアの学者による注釈や総合であった。

アラビアを通して早くに古代ギリシアの学術を吸収した人は十世紀のゲルベルトゥス（940頃—1003）である。かれはのちにシルヴェステル二世としてローマ法王になる。卓越した学者でもあり、若い頃スペインのカタルーニャに赴き、アラビアの学術を学んだ。また多くの弟子も育てた²⁻²⁰。その一人はフランスのシャルトルの司教になり、そこの司教座聖堂付属学校で教えをとった。その後、シャルトルにはベルナル（1126年没）が現れ、古代ギリシア・アラビアの学術を豊富に取り入れ自然研究を重視し、独自の教育を行った²⁻²¹。

このベルナルの弟に、『六日間の業』を著したティエリ（1150年頃活動）がいる。この書は、神の天地創造をプラトンの『ティマイオス』を基礎として説明しようとしたものである²⁻²²。

ティエリの著作が現れた十二世紀はアラビア語によるギリシャ古典がラテン語に翻訳される大翻訳時代である。

この時代を代表する一人は、クレモナのゲラルド（1114頃—1187）である。かれはプトレマイオスの『アルマゲスト』を求めトレドに至り²⁻²³、そこでアラビア語に訳された大量の古代ギリシアの書物を見出し、それらをラテン語に翻訳することに生涯を捧げた。

ゲラルドによる『アルマゲスト』の翻訳は1175

年に行われた。かれは1187年に没するまでに87点におよぶアラビア語の文献をラテン語に翻訳した²⁻²⁴。それには、アリストテレスの諸著作、ユークリッドの『原論』、アルキメデスの著作やアポロニウスの『円錐曲線論』、アル・フワーリズミーの『代数学』などが含まれる。さらに、ガレノス、アヴィケンナの医学書もある²⁻²⁵。なかでも後者の大著『カノン（医学典範）』のラテン語訳は西欧医学界に著しい影響を与えた²⁻²⁶。

ゲラルドよりやや遅れて、マイケル・スコット（1235年頃没）は、アリストテレスの『動物誌』を翻訳した。かれはアヴェロエスのアリストテレス注解書の翻訳でも知られ、また、『占星術入門』を著した。シチリアの神聖ローマ帝国皇帝フリードリヒ二世（1194-1250）に招かれ宮廷に入った²⁻²⁷。占星術師として仕えたのであろう。

フリードリヒ二世は、神聖ローマの皇帝として十字軍を指揮したこともある。王はアラビアの習俗に理解を示す一方、アラビア語文献のラテン語への翻訳を奨励した。最大の貢献は、1224年におけるナポリ大学の創設であろう。かれは大学にアラビア語の写本のコレクションを寄付し、アリストテレスやアヴェロエスを翻訳させ、大学の教材として採用させた²⁻²⁸。ナポリ大学にはトマス・アクイナス（1225—75）の若き姿があった²⁻²⁹。

シチリアでは、ややさかのぼるがパレルモの王朝の高官であったエウゲニオスがプトレマイオスの『光学』をアラビア語からラテン語に翻訳した。またサレルノの一学究は『アルマゲスト』の翻訳をエウゲニオスの助力を得て、1160年頃完成させた。この人物は、さらにユークリッドの『与件』、『光学』、『反射光学』およびプロクロスの『自然学原論』をギリシア語からラテン語に翻訳したと考えられている²⁻³⁰。

かくして十二世紀には、古代ギリシアの学問

や占星術さらに錬金術までの文献が多数の人々によってアラビア語からラテン語に翻訳された。ここでは、その主要なものを述べたにすぎない。いずれにしても、十三世紀の中頃には、西欧は古代ギリシアの大部分の学術文献とアラビア人による注釈などをラテン語で読めるまでになっていた²⁻³¹⁾。

十三世紀における翻訳ではムールベークのギョーム(1215-86以前)によるアルキメデス全集と、アリストテレス全集のギリシア語からのラテン語への完訳がなされ²⁻³²⁾、のちのちの学者の研究に活用された。もちろんこれらすべては筆記による写本であり、部数としては圧倒的に少量であった。しかし、ともあれ、これらラテン語訳されたギリシア・アラビアの学術を題材として西欧中世の人々の思索は鍛えられてゆくことになる。西欧中世は、古代ギリシア学術の吸収と、それによって思考を鍛錬し深めてゆく場であり、時でもあった。

第二節 アリストテレスの栄光

伊東は、「十二世紀以前における西欧は、世界文明の辺境にあった²⁻³³⁾」、という。そこへ、体系性、普遍性、論理性、平明性を備えた古代ギリシアの学問が一举に大量に流入したのである。これを受容した人々は、その内容に圧倒され、魅了された。科学では、中でも、アリストテレスの広大な自然学、ユークリッドの幾何学、プトレマイオスの天文学、ガレノス・アヴィケンナの医学の影響は絶大であった。

ユークリッド幾何学の典籍『原論』は、普遍的抽象的言葉を用いて、少数の明白な前提(公理)から論理を重ねて複雑な命題に至る演繹的推理の方法の教典であり、この方法は、この書によって初めて西欧にもたらされたものであり、以後、西欧の科学は、この推理法を規範として成立してゆく。しかし、『原論』における数学と

しての内容は、幾何学的図形の性質を明らかにすることや、線分の長さを量として、数の理論を究明するという限定的なものであった。

プトレマイオスの『アルmagest』は天体現象を数値的に把握することを目的とした高度の専門書であった。アヴィセンナの『カノン』は人体の生理などを広く述べてはいるが、医学と医療を主要な目標としていた。

これらに反し、アリストテレスの学問は、自然世界から人間およびその社会に至るまで百科全書ともみまごうほど広範な分野の考察を行っており、西欧学問界に与えた影響は計り知れないものであった。本節では、十二世紀以降の西欧哲学世界の論議を、アリストテレスの科学を中心にして概観しておこう。当時は、哲学と科学は渾然融合していた²⁻³⁴⁾し、さらに神学とも密接な関係にあった。

古代ギリシアを代表する哲学者にはアリストテレスとともにプラトンがいる。しかし、「中世はプラトンの名前よりもアリストテレスに共感を持っていた」とハスキングズは指摘する²⁻³⁵⁾。続けてかれは、こう明言する：

「プラトンのとりとめもない語り口、対話の形で一つの主題をめぐる自由に精神を遊ばせるやり方は、中世にはついになじむことがなかった。(中略)反面、アリストテレスは、その完結、明晰、系統的な表現が、手引書・教科書好きの時代に気に入られ、哲学・科学のほとんどすべての分野に、アリストテレスの名前を冠した教科書が見られるようになった。(中略)権威者の数の少ない時代に、彼は学問の大部分、高度な部分を代表する者として、たちまち衆にぬきん出てしまった。早々のうちに「哲学者の王」、「知ある者の主」になったのも驚くにあたらない²⁻³⁶⁾。

第一節に述べたティエリによるプラトン『テ

『イマイオス』にもとづく天地創造の話も「アリストテレス自然学の勝利をまのあたりにして時とともに姿をけす²⁻³⁷⁾」のである。

それでも、プラトニズムがまったく消えたわけではないが、中世西欧の哲学・科学の世界ではアリストテレスが他を圧倒していたであろう。

西欧において、ラテン語に翻訳された古代ギリシアの学問を最初に受容した人々は、修道院や司教座聖堂付属学校の聖職者たちであった。

ハスキンズに従えば、西欧中世の学問の初期を代表する聖職者はアベラルドゥス (P. アベラルド; 1079-1142) である。かれは、著書『然りと否』でスコラ哲学に特徴的な問答形式を確立した²⁻³⁸⁾。

これは、たとえば、次のような命題を設定する。

1 信仰は理性によって裏付けられるべきである—あるいは否。

106 水の洗礼を受けなければ誰も救われない—あるいは否。

154 うそは許される—あるいは否。

157 人を殺すことは合法である—あるいは否。これらの問題について、その肯定と否定の議論を例示するのである。これらは普遍性と抽象性の高い言語によって論議されるのであり、思索を鍛える訓練の役割をはたしたであろう。

アベラルドゥスはまた、同書の中で、いわゆる普遍論争を提起した。これは、「人間とか、家とか、馬とか、一般名辞あるいは一般概念の本質に関わる問題である。唯名論が主張するように、これらは単なる名前をいわず、せいぜい便利なこしらえものにすぎないか、それとも実念論者が断言するように、個々の物とは別のまったく独立した存在で、個々の物はその中に一時的に客観化されているのだろうか²⁻³⁹⁾。」

ハスキンズが指摘するように、この問題は今日でもわれわれのものである。言語というも

のが背負う宿命的な問題の故である。

本稿は、この種の問題を論ずる場ではないが、一言触れておけば、一般概念（筆者はこれを表象と呼ぶ）は思惟の中のみ存在し、実体ではないが、しかし、人間にあつては、表象という普遍を通してのみ具象としての現実が把握される。したがって表象は、たとえ人為的なものであっても、人間の現実認識にとって不可欠である、というものである。これは筆者の根底の立場でもあるので、本稿にもそれが多少は反映しているかもしれない。

さて、十三世紀には西欧各地に大学が設立されると、学問の主要な担い手は大学に移ることになる。大学が高等教育と研究機関として登場するのである。

当時の大学の教育組織について、次のようであった²⁻⁴⁰⁾。

原則として、神学、法学、医学、人文（学芸）の四学部からなる。神学、医学、法学に進むためには、まず人文学部で自由七科を中心とする基礎教育を修了しなければならなかった。人文学部ではその主要教材としてアリストテレスの著作を使用するようになってから「哲学部」として他の三学部と並ぶ独自の性格を主張しはじめた。

大学の中でも、神学と哲学においては、パリ大学の権威が圧倒的であった。パリ大学は西欧全体で最も優れた大学で、絶大な影響力をもっていた。オックスフォード大学はパリ大学を模範として設立されたが、やはり神学と哲学において有力であった²⁻⁴¹⁾。

パリ大学では、早くも「1210年頃にアリストテレスの自然哲学や形而上学の講義が行われた²⁻⁴²⁾。その後、一時はアリストテレス哲学の講義の禁止命令が出されたが、「1255年には人文学部でアリストテレスの自然学的・形而上学的・倫理的著作の教授を義務付けることがパリ大学

の規約に定められるにいたる²⁻⁴³⁾。

神学と哲学におけるアリストテレスの普及に際してアルベルトゥス・マグヌス(1193頃-1280)の逸することはできない。リーゼンフーバーによれば、「かれはギリシア人、アラブ人、ユダヤ人の哲学的・自然科学的知見のすべてを導入しようという意図に従って、1250年代の後半からアリストテレスの全著作への膨大な注解書を著した。この注解書はアリストテレスのテキストの内容を敷衍(ふえん)し、解説するという形式のものであり、(中略) そのつどのテキストや題材に密着した解釈を行うことを通じて、知の全体を折衷的に集積した²⁻⁴⁴⁾。」

かれはまた、「信仰のことがらでは、アウグスティヌス、医学ではガレノス、自然哲学では、アリストテレス」に学ぶ、と語っている²⁻⁴⁵⁾。かれにとって信仰と自然学は別種の認識であったのだ。

アルベルトゥスはまた、自然観察に特別な関心を持ち、とくに植物学と動物学の分野においては自分で観察(たとえば、ハチの解剖)を行って、その結果を報告している²⁻⁴⁶⁾。自然はかれにとってもはや象徴的、道徳的な瞑想のための素材ではなく、それ自体として知るに値し、その細部に至るまで魅力的な経験的研究の対象なのである²⁻⁴⁷⁾。

かれの自然研究において注目すべき態度は、自然現象の原因を自然の中に求むべきことを主張している点である。かれの次の言葉はそれを示している²⁻⁴⁸⁾。

「科学において我々は、創造者たる神がその自由意志によって、奇跡のために作り出したものをいかに用いるであろうかを研究すべきではなく、自然に内在する原因を根拠として自然の中に起こり得ることを研究すべきである。」

これは自然現象の原因を自然の中に求めよう

とした古代ギリシアのタレスらの哲学者に通じる思想である。

リーゼンフーバーによれば、十三世紀の西欧はアリストテレスを主として三つの方向において受容したという。かれの言うことを縮約するところなる²⁻⁴⁹⁾。

一つは、伝統的な神学的世界像を固持しようとし、アリストテレスからは、この枠組みと衝突しない、論理学、自然哲学と形而上学の基本概念を受容する。

二つは、ラテン・アヴェロエス主義で、かれらは、アリストテレスをアヴェロエスの解釈にしたがってキリスト教の教義を配慮することなく教授し、哲学が信仰といかなる関係もなく遂行される完全に自立したものであると主張した。

三つは、進歩的かつキリスト教的な中道のアリストテレス主義で、この流れを押し進めたのは、アルベルトゥスらであり、その代表的な存在はトマス・アキナスである。かれらはプラトンの、アウグスティヌス的な思想を排除することなく、キリスト教神学の中に靈魂論、認識論、形而上学をも含むアリストテレス哲学の哲学を最大限に統合しようとする。

このうちアキナスらがとる最後の方向がキリスト教神学の主流となる。

トマス・アキナス(1224-74)は修道院で基礎教育を受けたのち、ナポリ大学に入り、そこでペトルス(十三世紀)の下でアリストテレスの著作を学んだともと思われる²⁻⁵⁰⁾。その後パリに出てアルベルトゥス・マグヌスに出会い、その薫陶を受けた。さらに生地イタリアに戻り、著名な翻訳家グレイルムス(前節のギョーム)から、アリストテレスの著作やその注解書、プロクロス『神学綱要』、ギリシア教父など、多くのギリシア語原典の正確な翻訳の提供を受け、その注解に取り組んだ²⁻⁵¹⁾。

かれは多くの著作を残したが、その思想と立

場は生涯の大作『神学大全』にくり広げられている。幸いにも、日本語に全訳されている²⁻⁵²⁾。それをひも解くと、アウグスティヌスをはじめキリスト教関連の書物からの引用はおびただしいが、それらと並んでアリストテレスの著作『形而上学』、『自然学』、『動物論』、『分析論後篇』などからの引用もいたる所に見られアキナスがいかにかアリストテレスの哲学に精通していたかわかる。ここにその一例をあげよう²⁻⁵³⁾。

『神学大全』 第二問題 第三項

神について一神は存在するか。

神は存在しない、とも考えられる。けだし、「神」という名称のもとにおいては、ある無限な善が理解される。だから、神が存在しているものとすればいかなる悪も見出されないはずであろう。だが、われわれの世界には悪が見出される。それゆえ、神は存在しない。

他面、その反対の論にいう。

『出エジプト記』第三章（第十四節）には、「われは或るところのものである」という、神自らの言葉が語られている。（すなわち、神は存在する。）

以上に答えて、私はこういうべきである。

神が存在するという事は、五つの道によって証明されることができる。

第一の、そして最も判りやすい途は、運動変化ということよりするものである。けだし、この世界においてもものが動いている、すなわち運動変化しているということは確実であり、感覚によって確認される場所である。動くものは、然るに、すべて他者によって動かされる。さらにこの動かすものもまた同様である。だが、こうして無限に遡行してゆくわけにはゆかない。・・・かくして、われわれは必然的にいかなるものによっても動かされていないある「第一動者 (primum motus) にまで到達せざるをえな

い。そして万人が神としてなしているところのものはまさしくこうしたものである。

ここでは最初に、神は存在するかという問いが出され、それに対して、否定と肯定の議論が行われ、最後にアキナスの判断が示される。アベラールに始まるスコラ学独特の問答形式が採られている。

注目すべきことは、ここに「動くものには動かすものがある」というアリストテレスの「運動原理1」が採られていることである。第一章で述べたようにアリストテレスはこの原理を天球全体に適用し、永遠に動き続ける天球全体を動かすものとして、「不動の動者」が存在すると考えた。これは動くもの（変化するもの）のすべての根源であるから、アキナスにおいては神となった。ここにアリストテレスの「不動の動者」としての神とキリスト教の神とが同一視されて、アリストテレス哲学とキリスト教神学が融合する一つの契機が作られたのである。

アキナスの『神学大全』は、アリストテレスの哲学をキリスト教神学に融合させる壮大な実践であった。これは成功したと思われる。実際、『神学大全』は、十五世紀の終りに、それまでのペトロス・ロンバルトゥスの『命題集』に代わって神学の教科書として採用されるに至るのである²⁻⁵⁴⁾。さらに、1545年のトリエント公会議では、議場に設けられた祭壇のうえには「聖書および教皇たちの教令集とならんで、トマスの『神学大全』がいつでも参照できるように、ひたかたのままおかれていたという²⁻⁵⁵⁾。」このとき、アリストテレス哲学はヨーロッパキリスト教世界において栄光の座に就いたといえよう。

振り返れば、西欧においてアリストテレスは、はじめキリスト教の聖職者に学ばれ、次いで十三世紀以来創設された西欧各地の大学では、最初から基礎科目として教授され、やがて神学と

学問の世界では、常識的で不可欠の知識とみなされるようになり、西欧知性を代表する賢人たちの思考の支柱をなし、ついにアキナスにおいて、「哲学と神学、信仰と理性の調和」がはたされ²⁻⁵⁶⁾、「キリスト教の教義同様に、西欧思想の根底をつくることになって²⁻⁵⁶⁾」、現在に及んでいる²⁻⁵⁷⁾。

アリストテレス哲学は、第一章で示したように、普遍的言語によって人間の生の経験を包括的に矛盾なく説明する。目的論的であり、常識的で、わかりやすい。人間が常に世界の全体的理解と、その中の自己の意味を知ろうとする欲求をもつものとすれば、かれの哲学は、その欲求を満たすものだった。しかも、ハスキンズが言うように、その表現は「簡潔、明晰、系統的」である。その哲学が古代ギリシアだけでなく、アラビアにも西欧にも広く受け入れられたのは、こうした理由によるところが大きいと考えられる。さらに、かれの哲学はわかりやすい反面、「あいまい」²⁻⁵⁸⁾さを合わせもち、反論しにくい点も有利であったろう。あいまいさは反論ないし批判には強いのである。

しかし、歴史は学問の世界でも、時に皮肉である。トリエント公会議でアリストテレス哲学が絶頂にあるときの二年前、コペルニクスが『回転について』が出版され、アリストテレス自然学への重大な批判が断行されていた。科学の世界は急旋回を開始していたのである。だが、ただちにそこへ行く前にイタリアルネサンスの時代を訪ねなければならない。それは近代を語る上で不可欠の時代だからである。

第三章 近代への序曲

第一節 写実主義の台頭

ヨーロッパ十三、十四世紀の世界、カトリック教会が強大な社会的権勢をふるい、ゴシック

およびビザンティウム芸術が最盛を誇り、古代ギリシアの学問が絶対的権威をもっていた。人々は天動説の下で生活を送り、自然や社会に対してもギリシア・ローマ時代のものの見方や考え方が支配的であった。

しかし、そうした社会にも変化が訪れる。実際、十四世紀には、一部ではあるが、自分の眼でものを見て、自分の頭で考え、自分の感動を大事にする人々が現れた。彼らは前代の教えを継承しつつも、それに全面的に従わないで人間と世界を自分自身の眼で見つめ、自分の感覚経験や感情を率直に表現する道を選びだしたのである。中世とルネサンスを区別するのは、「人間と世界の発見」であるというブルックハルトの言葉³⁻¹⁾は世界が中世から新しい時代へと変転することを意味するであろう。

こうした変化の先頭に立った分野が絵画や彫刻などの芸術であった³⁻²⁾。このことは、西洋美術史をひもとくとき、諸家が一樣に指摘するところである。ここでは、本稿と関連すると考えられる絵画の分野からいくつかの作品を取り上げてその斬新な面に注目してみよう。ただし、ここは美術史を論じる場ではない。以下は本稿の趣旨に沿うかぎりにおいて選択したものである。

イタリア絵画の「新時代の幕開けを告げる³⁻³⁾」役割をはたしたのはジョット(1267?~1337)である。かれの作品「マギの礼拝」(1304~1306)を取り上げてみる[図5]。

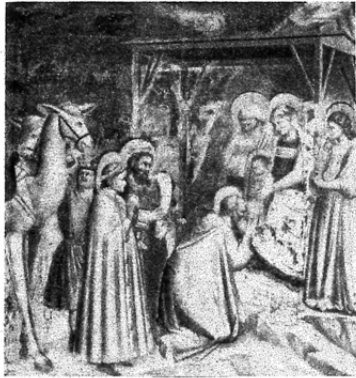


図5 “東方三博士の礼拝” 建物の屋根の上に長い尾をもつハレー彗星が見える。

これは、キリスト生誕の際に、ベツレヘムの星に導かれて東方の三人のマギが礼拝に訪れるという聖書の物語を描いたものである。

美術史家マックス・ドヴォルシャクは、ジョットの絵画について、一般的には、「中世美術の観点からみて最大の革新は構図上の原理である³⁻⁴⁾」とし、具体的には³⁻⁵⁾、

「絵の対象が単一の観察点から描かれ、事件をあたかも眼前に、舞台の上で演ぜられるように表した。(それは、また)、中心の人物がその中にある空間の一角が視覚的統一体として描かれていることでもある。」

ドヴォルシャクは、この絵について、次のような評価を与えている。

「人物たちはわれわれの概念からいえば、稚拙であるが、生命のない塊量ではなく、生きた有機体である身体として現れている³⁻⁶⁾。

(中世と異なり)、今や感覚的直観とその効能が主眼となった。(中略)そして浮彫のごとき効果をあらわすべきであるという原理が選ばれた。この浮彫の効果ということは、それより以後、レオナルドやミケランジェロに至るまで絵画のあらゆる発展の核心となったものである³⁻⁷⁾。」

ジョットは生ある人間を、ボリュームをもつ三次元的形象として描くことができたということであろう。この絵の上方には、1301年に突然

出現した大彗星を描いている。天は不変であるとするアリストテレスの見解に反して自己の経験を重視する姿勢を示したものであろうか³⁻⁸⁾。

ジョットの直接の継承者ではないが、かれの新鮮さを保持しながら、写実性を一層高めたのが十五世紀初頭のマザッショ(1401~1429)である。かれはフィレンツェのサンタ・マリア・デル・カルミネ大聖堂内にあるブランカッチ礼拝堂に一連のフレスコ画を製作した。美術史家ヴァザーリは、それについてこう伝えている³⁻⁹⁾。

「ブランカッチ礼拝堂は、その時代の、あるいは後世の美術家たちが踵(きびす)を接してマザッショの芸術を習得しようと学びにくる場となった。その美術家のリストには、フラ・アンジェリコ、アンドレア・デル・カスターニョ、ボッティチェリ、レオナルド・ダ・ヴィンチ、ミケランジェロ、ラファエロなどの巨匠たちが目白押しに並んでいる。」

連作のうちには、有名な「楽園追放」(1424~27年)[図6]がある。神の命に逆らい、禁断の木の実を食べたアダムとイヴが楽園を追われるというよく知られたテーマを描いたものである。ドボルシャクは、ジョットにあつては、「個人を描こうとする場合でもある一般的な類型が支配している」が、マザッショになると「説得力

のある写実効果が強められ、そのためわれわれの眼には死んだ図式ではなく生きた人間のように見える³⁻¹⁰⁾」、と評している。

アダムの体全体で表現された深いなげきと、イヴの表情に描か



図6 “楽園追放” 208 88cm

れた強いかなしみが見る者に生々しく伝わってくるのである。

「ヴァザーリは、ルネサンス美術を推進した原動力を古代の再生とは別のところ、すなわち、造形諸芸術の分野における現世的な実在感の出現の中にみた」とは、M. ヴェトラムの言葉である³⁻¹¹⁾。

マザッショが他の聖堂に描いた作品「三位一体」(1427～28年)[図7]は、「十五世紀の遠近法の展開の一つの頂点である³⁻¹²⁾。」

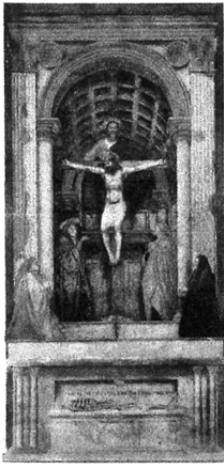


図7 “三位一体” 667、317cm
この絵を初めて見た人は、その空間の迫真性に驚嘆したことであろう。

十四世紀に芽生えた写実主義は十五、十六世紀を通して、ルネサンス芸術の基調をなした。「ヴィーナスの誕生」などの大作を残し、幻想的な画風で知られるボッティチェリにおいても、名高い作品「春」(1478年)には三十種ほどの花が明確に描かれ、そのうち少なくとも十二種は同定できるという³⁻¹³⁾。

ダ・ヴィンチの「最後の晩餐」(1495年)はリアリズムと遠近法に基づいて制作された最高の作品の一つであろう。ラファエロの「アテネの学堂」(1510年)も忘れ難い。中央にはプラトンが天を指さし、アリストテレスの手が大地をかざしている姿が描かれていて、両者の哲学の特

質を象徴しているかのようだ。

十六世紀に入ると、自然世界を自らの眼を通して把握しようとする態度はイタリア以北にも広くみられるようになった。ここからしばらくイタリアの地から離れることになる。

最初に、西欧において初めて植物の精確な図譜を出版した二人の植物学者に注目しよう。両者は、「薬剤という実用的な必要性から」著書を刊行した³⁻¹⁴⁾。

一人はオットー・ブルンフェルス(1488～1543)である。かれはドイツ・マインツの出で、修道院で神学を学ぶかわら植物の研究に励んだ。1530年に『本草写生図譜』を出版した。図版は画家の技量をもつ人が描いたもので、ブルンフェルスは第一巻の冒頭で、画家に次の賛辞を載せている。

本画家は、「天賦の才をもって、多くの薬草のあるがままの姿と寸分たがわず、描きだし、また出版させたのである³⁻¹⁵⁾。」



図8 左図はフックス『植物誌』(1542年)収載
右図はブルンフェルス『本草写生図譜』(1531年)

ブルンフェルスの方は、葉がやや萎れている。図版の一つが[図8]の右側のものである³⁻¹⁶⁾。この画家は従来の型通りに絵を模写することにあきたらず、自分の眼で見て、自然をありのままに描いたのである。

ブルンフェルスにやや後に現れたのがレオンハルト・フックス(1501～1566)である。かれもドイツの人で、バヴァリアで生まれた。医師に

して、植物学者であり、二つの大学で医業に従事した³⁻¹⁷⁾。

かれは1542年に『植物誌』を出版した。植物の図版はフックスの指示の下で、画家と彫刻師によって作られた。かれは、その序文で、こう述べている³⁻¹⁸⁾。

「図版に関しては、それぞれ生きている植物に基づいて、ありのままに描いているのだが、それらの図がほとんど完璧であるようにとりわけ注意を払ってきた。」

[図8]の左側はそのうちの一枚である。[図8]のような緻密で精確な植物図譜は、この時代以前には決して見られなかったものである。

フックスの『植物誌』が出版された翌1543年には、時代を画する書物がドイツ・ニュルンベルクで出版された。いうまでもなく、コペルニクスの著書である。これは、しかし、本稿の構成上次の第二節で取り上げよう。ここで述べるべきものは、ヴェザリウスの解剖学である。

ヴェザリウス(1514~1564)はブリュッセルに生まれ、少年時代にはさまざまな小動物を解剖した。パリで医学を学んだ後、パドヴァ大学で学位をとったが、すぐに教授になった。大学では解剖学の講義をした。当時の講義では、解剖は助手が行うという伝統であったが、かれはそれに従わず、すべての解剖を自ら行って講じたという³⁻¹⁹⁾。解剖で得た知識は、ルネサンスの写実の技量を修得した画家カルカーの手で銅版画として描かれ、1543年、スイス・バーゼルで『人体の構造について』の書名で出版された。

図版は三百枚達し、制作には五年の歳月を要した。人体の、筋肉、骨格、内部器官、静脈系、神経系、脳などが「比類のないほど美しく正確で明確な図版で示されていた。」[図9]はその一枚である³⁻²⁰⁾



図9 大腿骨はガレノスの教えと違い真つぐであった。また、肋骨の数は男女とも同じだった。

しかし、人体解剖では、当時西欧で絶対的な権威をもっていたガレノスの考えと異なるためは、激しい批判を浴びた。一例は、心臓の右心と左心を隔てる壁に中孔があるとするガレノスの所見に対して、隔壁は緻密でそのような隙間は見つからないと主張したことである³⁻²¹⁾。これは後に、人体の血液循環に関わる大きな論点となった。

この時期、西欧は歴史上かつてない大きな出来事にも遭遇した。ブルックハルトの「人間と世界の発見」のうち「世界」の方である。

イタリア・ルネサンスがたけなわの十五世紀の末、西欧イベリア半島では、新しい天地を求めて未知の世界に乗り出す人々がいた。一人はスペイン国王の支援を受けたコロンブスであり、大西洋を越えてインド到達を目指した。もう一人はバスコ・ダ・ガマであり、ポルトガル王の命によりインド航路の開拓を目的としていた。

二人がいずれもアジアのインドないし香料諸島に目標を置いたのは、当時香料貿易を独占していたアラビア人に対抗するためであった。もちろん新天地でのキリスト教の布教という目的も兼ねていた。コロンブスは1492年に西インド諸島に到達し、アメリカ大陸発見のきっかけを生み、ダ・ガマは1497年にはアフリカ喜望峰を回るインド航路開拓に成功した。

この結果、西欧の人々は南北アメリカ大陸とアフリカ大陸という新しい広大な大地の存在を知ることになった。この後、二十数年にしてマゼラン隊が世界周航をはたすことになる。第一章で述べたように、アリストテレスはすでに地球が球形であることを根拠とともに指摘していたが、これら両大陸については、かれはまったく教えるところがなかった。聖書も同である。

新世界の発見は西欧にとって未曾有のできごとであった。人々は、あらためて世界と地球を自分の眼でみなければならぬことを痛感した。

しかし、世界が広がり、地球の球形が実証されたとしても、時代はなお天動説に支配されていた。万能の天才と称されるダ・ヴィンチにしても、大航海に乗り出した人々にしても大地は静止し、天が動くという経験則は揺るがなかった。

(二) 目標の転換（静から動へ）

ルネッサンスにおいて人間は対象を精確に描くことに成功したといっても、対象は静態的であった。あるいは、出来事の変化の一瞬を静止させて描いたものであった。ヴェザリウスは心臓の構造を正確に描いたが、その機能までを発見したわけではない。血液循環の話はまだ先にあった。フックスが植物の葉を精密に描いたとしても、葉の働きまで理解したわけでもない。循環といい、働きといい、いずれも運動であり、変化である。

アリストテレスは自然を変化するものと正しく洞察し、変化を目的論の下で理解しようとしたが、変化の過程や仕組みについては、見ようとしなかった。運動についても同様である。たとえば、天体の運動にしても、その原理を与えるのみで、運動の過程を述べるには至っていない。

画家ジョットが生きた14世紀には、投げた石や射た矢を動かす続けるものについて、アリストテレスとは、異なる見解を示す人々が現れた。

その代表はパリ大学のJ. ビュリダンであろう³⁻²²⁾。かれは、物体を動かすものは、物体を動かすとき、ある種の「インペトゥス（運動力）」を物体におし込め、その力が動かし続けると考えたのである³⁻²³⁾。すなわち、石は投げられたとき、投げた人によって、「インペトゥス」が石に込められ、それが引き続いて石を動かすのである。その力は、空気などの抵抗がないかぎり、永久には働き続ける。

しかし、この考えも、石を動かし続ける「力」が存在するというを意味しており、アリストテレスの「運動の原理1」から脱しているわけではない。

運動・変化は、静止したのと同じように対象を見るだけで理解することは不可能である。運動・変化はかならず過程と前後の関係をもつから、そこでは、対象を見ると同時に、その過程において、あと・さきの順序を示す何らかのマークを必要とする。順序を無視して運動・変化を理解することは不可能なのである。

ところで、アリストテレスをもち出すまでもなく、変化があれば、そこに時間が生まれ、時間があれば、そこに変化が伴っている。そこで順序を示す印としては、時間を表すものが最も適切であろう。運動がものの移動であれば、その位置と時間を示すことができればよい。

運動・変化を把握する上で、さらに重要なことは、運動に関しては、それが安定していることである。複雑な運動や偶然によって左右されやすい運動を正確に把握することは、極めて困難である。

自然世界において、古来から人間が安定した運動として注目したものに二つあった。一つは天体の運動であり、他は物体の自然落下運動である。

天体の運動の中でも太陽の日周運動が極めて安定していたことは、古代メソポタミアや古代

エジプト文明以来人間が気づいてきたことであり、時間の尺度として用いられた。太陽の南中から次の南中までの時間である。西欧の時計はこの時間を二十四等分して時刻を設定するために作られた。とくに宗教においては戒律を守り、日課を定刻通りに行うことが義務であるから、時刻を正確に刻む時計を必要とした。西欧では十五世紀頃に、精度は粗いが一応実用に耐える機械式時計が製作されていた³⁻²⁴⁾。後のブラーエやケプラーらが使用したのは、こうした機械式時計であったと考えられる。自然のリズムによるものではなく、人為的に設定された時間である。

筆者は、先の論文で時間を実用時間と理論時間に分けて考えるべきことを提議したが、ここでの時間は実用時間である³⁻²⁵⁾。

そして、時計の導入によって、物体の運動を時間とともに、初めて正確に把握することに成功したのは、上の二つの安定した運動であった。後に見るように近代科学は、その成功の上に成立したのである。

その意味では、近代科学とそれ以前の科学を分けるのは、前者が自然を、動くもの、変化するものとして動きと変化を時間とともに理解することを目標としたのに対し、後者は自然を静態的に把握することを目指していたといえるのである。アリストテレスの自然学は、その典型であろう。すなわち、近代科学は動的対象を時間に沿って連続的に把握することに成功したのである。しかし、このことは人間にまったく新しい言語の創出を要求した。

ところで、プトレマイオスもまた天体の動きを時間とともに把握しようとした。しかし、その理論には大きな問題があった。

第一章で指摘したように、かれの理論は天体の実際の動きを表わしたのではなく、「現象を救う」ための仮構であった。事実を述べたもの

ではない。このため、天体の位置と時間は連続したものとしてではなく、離散的に孤立して捉えられていた。しかも、後に述べるように観測精度も劣っていた。

近代科学としての天文学は、これらの問題を解決しつつ成立した。次節に移ろう。

第二節 動的対象への把握

天体運動を時間とともに初めて正確に把握することに成功したのはケプラーであろう。しかし、かれの成功のためには、その前に二つのステップを経ることが必要であった。一つはコペルニクスの地動説であり、もう一つはティコ・ブラーエによる精密な天体観測である。

(一) コペルニクス

1. 地動説

コペルニクス(1473~1543)は著書『回転について』(1543年)において、まったく新しい天文観を提示し、アリストテレス-プトレマイオスの天文学を完全に覆したのであった。

アリストテレスにあっては、地球は宇宙の中心にあって静止し、太陽と恒星天球は一日に地球を一回転するのであった。ところがコペルニクスでは、宇宙の中心は太陽の近くにあり、太陽は静止し、地球は太陽の周りをまわり、かつ、一日に一回自転するのである。恒星の一日の回転は地球の自転によもので、恒星は元来静止している。月だけは地球を回るが、すべての惑星は地球ではなく、太陽の周りをまわる。惑星の順行と逆行も、地球から見る惑星の位置の移動によって説明できる。プトレマイオスが設けたエカントは必要がない。以上がコペルニクス地動説の骨子である。

かれは、この骨子を早くも1510年代に『コメンタリオルス』という表題で書き記し、友人たちに回覧していた³⁻²⁶⁾。それ以来三十数年を経る

間に、その骨子に血と肉を加え地動説を完成させた。それが『回転について』³⁻²⁷⁾ (以下では、略して『回転』と呼ぶ) である。

『回転』は六巻からなる本格的な学術書である。序文では地動説を信じるに至った経緯が述べられ、続く第一巻では理論の概要が略述されていて研究の基本的構想を知ることができる。第二巻以降は天体個々の運動の詳細な考察であり、高度に専門的である。ここでは、序文と第一巻から科学史上重要であると考えられる論点を取り上げておこう。

さて、大地は静止し、太陽が日々、東から出て西に沈むというのが、万古不易の人間の経験的事実である。コペルニクスは、なぜ敢えてこの事実を無視し、実際には、太陽が静止し、大地が回転するという常識に反する途方もない考えをもつにいたったか。時の法王パウルス三世に献じた『回転』の序文に聞こう³⁻²⁸⁾。

「私が数学者から承認されている意見に反対であり、おそらく良識に反するところの地球の運動ということをどうして敢えて考えるに至ったかをお聞きになりたいと思います。そこで私は宇宙の諸球の運動を導き出す方法を研究するのに、数学者たちはかれらの研究において一致していないことを理解した事実以外に私を推進した理由がないことを法王さまに隠しますまい。何となれば、第一に数学者たちは太陽と月の運動について全く確かでないので、かれらは一年の長さを導き出すことも観測することもできないからです。

次に、これらの天体ならびにその他の五つの惑星の運動を定める点において、かれらは見かけの回転と運動について同一の原理と同一の仮定と同一の証明を使っておりません。」

コペルニクスは、アリストテレス—プトレマイオスの天体理論では、一年の長ささえ正確に算出されないことをあげ、数学者すなわち天文学者に混乱があることを指摘する。このため層の上では、難しい問題が生じていた³⁻²⁹⁾。また、惑星の運動に関しては、各惑星ごとに理論が建てられ、惑星の運動全体を統一的に説明する原理が欠如していることにも批判の矢を向ける。そしてかれは、数学者、哲学者が「最も完全な芸術家によってわれわれのために作られた宇宙の機構の運動の正確な説明を一つも持っていないことに倦怠を感じ始めました³⁻³⁰⁾」、と嘆くのである。

最も完全な芸術家、すなわち神が創造された宇宙についてまだ誰も正確な説明を与えていない。こうして、かれはこれまでの教えとはまったく別の考えを取るべきではないか、と思うようになる。

一方、歴史を振り返れば古代ギリシアにはすでに地動説を唱えた哲学者がいたことがわかる³⁻³¹⁾。コペルニクスはかれらに勇気づけられたのかもしれない。いずれにせよ、当時の天文学の混乱を前にして、かれは地動説に踏み切るのである。

『回転』の第一巻では、最初に宇宙が球形であることと、地球もまた球形であることが述べられる。地球球形説は、すでにアリストテレスも指摘するところであり、コペルニクスはかれとほぼ同じ根拠、例えば北方へゆくほど新しい星がみえることなどをあげて球形説を支持する。

続いて、かれの天体運動理論の一つの根幹である公理、すなわち、天体はすべて円運動ないし円運動の組合せで行われる、という命題が強調される。これは古代ギリシア以来すべての天文学者が固持したコンセプトである。天体の運動は一般に、第一章の[図3]で示したように、日々天の北極付近を中心として円運動をする。

これは、「周期的に行われるものであり、それは等速円運動でなければ不可能だからである。ただ円運動だけが物体をもとあった場所に帰らせることができる³⁻³²⁾」という考えに基づくものである。楕円運動が知られていない時代、この考えに反論することは誰でもさうとう困難であつたらう。これこそ天体が円運動であるとする呪縛の根源の一つである。諸賢は有効な反論を提示できるだろうか。

他方、なぜ地球が自転しているといえるのか。宇宙を包む恒星天球は見かけの上では、一日に一回転する。だが、コペルニクスは、恒星天球は、地球と太陽との距離が問題にならないほど無限とも考えられるくらい遠方にあることを論じたのち、そのような巨大な恒星天球を一日一回転させるより、小さな地球が一日一回転すると考える方が自然であると主張する³⁻³³⁾。そして、これが地球自転説の有力な根拠となる。

では、地球の公転についてはどうか。

コペルニクスは「不動（静止）という状態は変化という状態より一層高貴で神聖と考え³⁻³⁴⁾」る。すると恒星天球という不変な存在こそ高貴・神聖であるから、静止の状態にふさわしい。変化の絶えない地球こそ動きの状態にあると考えるべきである。さらに、日々世界を照らす太陽についても高貴で神聖な存在であると考えられ、静止の状態が似つかわしい。かくして恒星天球と太陽は静止し、地球が太陽の周りを巡るのである。他の五惑星についても地球と同様に扱われる。

天体のこうした関係を原則とみなし、古くからの観測データに基づき六惑星、すなわち、水星・金星・地球・火星・木星・土星の配列とその軌道の大きさが決定される。そして、地球から見た他の惑星の見かけの運行、すなわち、西から東への順行、留、逆行も説明される。

惑星の運動は、静止する太陽を中心とする導

円と導円上の点を中心とする周転円の複雑な組合せによって説明される。地球は太陽の第三惑星の位置にあるが、惑星運行の説明の原理はプトレマイオスのものと変わらない。これが『回転』の第五、六巻の内容であり、コペルニクスが最も力を入れた部分である。複雑にして難解である。

しかし、これによって、天動説による天体構造は刷新され、「はじめて太陽中心の惑星系の配置と軌道の大きさが与えられ、現在、太陽系と呼ばれているものが認識され³⁻³⁵⁾」たのである。[表]はコペルニクスが算出した太陽と、地球を含む惑星との平均距離を示すものである³⁻³⁶⁾。ただし、太陽—地球間の距離を1天文単位とする。

太陽からの平均距離

	<u>コペルニクスの値</u>	<u>現在の値</u>
水星	0.36	0.391
金星	0.72	0.721
地球	1.0	1.000
火星	1.5	1.52
木星	5	5.2
土星	9	9.5

単位は1天文単位である。

2. 批判と考察

このコペルニクスの地動説は、しかし、当初から強い批判にさらされていた。

批判の第一は、何より、大地が動き、天が静止しているという考えは、われわれの経験に根本的に反することであった。人間は経験によって、太陽を含めすべての天体が頭上を動き、大地が静止していることを知っている。これを疑うなどありえないことだ。もしも大地が回転していれば、地上で真上に投げた物体は、落ちてきたとき、投げた地点から遠く離れているはずだ。しかし、もとの場所に戻るではないか。これに対して、コペルニクスは満足な答えをもつ

ていなかった。

地動説では月だけが地球をまわるという特別な地位が与えられている。なぜか。

また、金星が太陽を回り、地球が金星の外側をまわるのであれば、金星の満ち欠けが見えるはずだ。しかし、それは観測されない。

さらに、重要な批判は、恒星に対する視差がまったく認めることができなかったことである。恒星が静止し、地球が太陽を回るのであれば、[図10]の示すように地球から恒星に対する視差が観測されねばならない。しかし、それは当時誰にも観測できなかった。

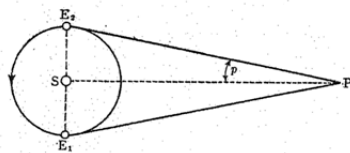


図10 Pは恒星、Sは太陽、E₁、E₂は六か月をおいた地球の位置。角pはおそらく小さい。

最後に、コペルニクスの地動説によって、太陽系の構造が示され、惑星運動が統一的に把握されたとはいえ、惑星運行では円に円を重ねるプトレマイオスのものと変わらない手法が用いられ、しかも惑星運行の予測も大いに改善されたわけではなかった。これは科学史家の多くが指摘することである³⁻³⁷⁾。

以上のように多くの重大な欠陥をかかえたままのコペルニクス説を、はじめはほとんどの人が受け入れなかったのは当然であろう。まして、アリストテレス自然学に捉われていたカトリック教会がこれを拒否したのは当然である。この問題では聖書の教示もさることながら、教会はまだ世間の常識の立場と同じだったのである。

コペルニクスの地動説に最初に賛同した人は、ごく少数であった。かれらは、おそらく、太陽を中心とした六惑星の運行に対する幾何学的統一的説明に強い魅力を感じたのではなかろうか。後に述べるが、ケプラーの最初の論文は、この

統一的説明なくしてはありえなかったからである。

ともあれ、コペルニクス地動説を歓迎した人のなかにケプラーとガリレオがいたのである。そして周知のように、ケプラーにおいてはじめて惑星運動の正確な運行経路と時間が把握された。

この意味で、コペルニクスの革命的なアイデアは、惑星運動という動的現象を人間が史上はじめて正確に獲得するための不可欠な足場を提供したのである。

コペルニクス説について、最後に強調したい点を述べておこう。

思えば、コペルニクスが地動説を唱えた際に、古代ギリシアの先人に先例を見出したのは賢明であった。第一章第一節で指摘したように、古代ギリシアの自然学者（哲学者）は、自己の見解を自己の責任において提示するという「思惟の独立性」を具有していたからである。コペルニクスもかれらにならい、自己の地動説を何ものにも依存せず自らの責任において発表した。しかし、再三にわたって述べてきたことだが、人間の経験は、大地が静止し、天が動くことである。それに反し、大地が回転し、太陽と恒星天球が静止しているという主張は、人間の経験に背く非常識な命題である。コペルニクスはこれを十分自覚していた。かれは自分の考えが異端であり、不合理であり、このため、人々に軽蔑されることを恐れてもいた。もしかれがこの考えを単に声高く唱えるだけであつたら、周囲から狂人扱いされてもやむをえなかったであろう。かれが偉大であつたのは、この非経験的かつ非常識的で奇抜な考えが真実であることを、当時としては第一級の数学理論と古代からの観測データを融合させて実証すべく大著として発表したことである。かれはそこで、大地が回転し、太陽が静止しているという人間の経験でき

ない事実を、観測データという人間の経験の次元に下して示した、あるいは示そうとした。このことがやがて宇宙に関する人類の認識をくつがえすという深遠な結果につながったのである。

認識の逆転とは、約言すれば、経験の外にある隠れた事実を、経験の内に取り込もうとしたことである。これはアリストテレスには思いも及ばなかったことであろう。かれの思考は常に、人間の経験の大地に根差していた。

アリストテレスは第一章で述べたように、「見えるがままが真実の姿である³⁻³⁸⁾」とする自然観から脱却できなかつたのである。いや、このことは、かれに限らないであろう。むしろそれが人間の本性とも考えられるからである。しかし、近代科学は経験できない、言い換えると、見えない事実を明るみに出すことにこそ、その本質があるのである。以下のすべては、そのことを実証する目的をもって記述されよう。

(二) ブラーエ (観測精度の刷新)

十五、十六世紀における西欧天文学の混乱の前にして、コペルニクスは天体運動の理論の刷新を図った。しかし、天文学は理論だけでは成立しない。観測データを不可欠とする。しかもそのデータは精度が低ければあまり役に立たない。天文学における混迷を知って、理論よりもデータの徹底した改善を図ったのがデンマークの大貴族の一人チホ・ブラーエ(1546-1601)である。

かれは若いころから天文現象に強い興味をもち、十代にしてすでにアルフォンス表とプロイセン表を手にしていた³⁻³⁹⁾。1563年8月13日に土星と木星の合が起きた。かれは、アルフォンス表では、一か月、プロイセン表では日時が正しく定められていなかったことを見出した³⁻⁴⁰⁾。

その後、1572年にはカシオペア座に新星が出現した。これは超新星の爆発で、十数か月にわ

たって昼間でも見られたという。その時のかれの記録が残されている³⁻⁴¹⁾。

昨1572年十一月十一日の日没の夕暮れのことである。・・・明るさで群星を威圧して私の頭上で輝いている、いままでに見たことのない異常な星がみえていることに気づいた。・・・私はこの星をみたたん、恥ずかしくも私は一瞬私の視覚を疑った。しかし、他人もそこに星があるのが見えることによって、それ以上私は視覚を疑うことをやめにした。この星の出現ということは、世界創成以来出現した自然の脅威であるばかりではなく、ヨシュアの祈りに応え太陽がその運行を留め、キリストが十字架にかけられたとき太陽が暗黒になったという神聖な語り伝えと同レベルの、驚天動地の自然の驚異である。

この観察は、古代ギリシア以来、堅く信じられてきた、天は不生不滅で、一切変化しないという宇宙観が破られる出来事であった。ブラーエは長年学んできた手法を活かし、この新星が恒星と同じほど遠方にあることを証明した³⁻⁴²⁾。

当時は広く占星術が信じられていた。ブラーエはこの新星の出現に際し、時の国王にある進言をしたところ、それが王の注意をひき、一つの島の領有と、そこに天体の観測所を建設することが許可された。1576年のことである。

そののち、多数の観測用具を作成し、多くの助手を雇い、二十年にわたって天体観測を続け膨大な観測データを集積した。かれの観測データは、肉眼による観測では最も精密なものとなされている。誤差は普通四分以内、最良なものでは一分であったとう³⁻⁴³⁾。望遠鏡のもたない時代では、これが観測の精度の限界であったろう³⁻⁴⁴⁾。

なお、従来の観測精度について、山本によれば次のようである³⁻⁴⁵⁾。

「R. ホールによれば、(プトレマイオスが用い

た) ヒッパルコスのもので20分、それ以後最も精度がよいものでも10分、天体観測の誤差は、古代からコペルニクスに至るまではほとんど10分以上の誤差がみこまれていた。したがって、ホールは、「ティコ・ブラーエ以前、理論はその結果が観測と弧の10分以内で一致すれば適切であると考えられていた」、という。

しかし、ティコの登場で観測精度は一挙に一桁向上した。

プトレマイオス説にせよ、コペルニクス説にせよ、観測データに不備であれば、理論の正当性を保証することはできない。天体運動という動的現象を正確に把握するためには、何にもまして観測の正確さが要求される。ブラーエはそれを十分自覚していたのであろう。

当時としては最良のデータを収集しながら、しかし、ブラーエ自身はプトレマイオスとコペルニクスの二つの説のいずれにも同意しなかった。かれは代わりに折衷説というべきものを提示した。宇宙の中心は静止する地球である。水星と金星は太陽のまわりを周り、太陽とともに地球を周る。月と他の惑星も地球を周る。むろん、恒星も地球も周るのである。

これは、プトレマイオス説とコペルニクス説との「妥協の」³⁻⁴⁶⁾の産物ではあるが、ブラーエはまだアリストテレスの天体観から脱却できなかったことを示している。かれがそう考えた根拠は、自身の観測技術をもってしても視差を観測できなかったこともあるが、かれには地球が動いているとは到底信じられなかったのである³⁻⁴⁷⁾。

その後、フレデリック二世の死去に伴い、ブラーエはヴィーン島を離れ、1599年大量のデータを携えてルドルフ二世治下のプラハに居を定めることになる。そこでケプラーと運命的な邂逅をはたす。集積された観測データはすべて最終的にケプラーの手に渡ったのであった。1601年のことである。

(三) ケプラー

① 円から楕円へ

ヨハネス・ケプラー(1571~1630)は南ドイツのルター派の両親の下に生まれた。生家は貧しかったが、教育を受ける機会にめぐまれ、神学校に学び、その後、給費生としてチュービンゲン大学に進学した。

大学では神学を志したが、数学(天文学)と語学に秀でていて、師ミハイル・メストリンに大きな影響を受けた。メストリンはドイツにおいて数少ないコペルニクス主義者であった³⁻⁴⁸⁾。

ケプラーは最初の著書『宇宙の神秘』(1596年)でこう述べている³⁻⁴⁹⁾。

「私がこの[コペルニクス]説に与したのは、軽率な心からではなく、なによりも、わが恩師にして著名な数学者メストリンの力強い後押しによってである。」

「後押し」というからには、かれ自身進んでコペルニクス地動説に賛同するところがあったのであろう。上の書を出版したのはかれが二十五才のときであった。内容は、太陽を中心に置き、地球を含めた六惑星と五つの正多面体を関係づけて太陽系の構造を提示したものである。その要旨は、地球を含む六惑星と五つの正多角

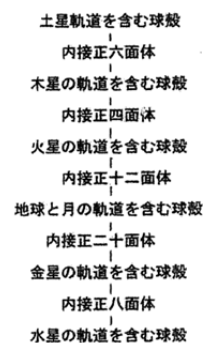


図 11 五つの正多面体と六つの惑星がこの関係を生んだ。ケプラーによれば、正六面体(サイコロ)が完全なもので、他は、それを削り取ったものである。

形が次の順序で交互に互いに接していることを主張するものである³⁻⁵⁰⁾。

[図12]はその構造を示す。

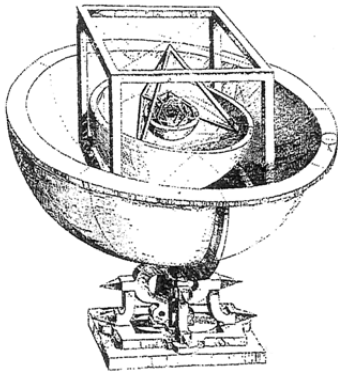


図 12 最も外側の半球は土星の球殻である。

この構造モデルは夢想と変わらないように見えるが、かれ自身は、コペルニクスの『回転』にある観測数値(球殻の外表面と内面、すなわち、太陽からの最大値と最小値)と、この理論から得られる数値とを比べて、実際にこの構造が存在することを実証しようとした。いくつかの数値ではかなり近い場合もあったが、ずれの大きい場合も出た。しかし、もしブラーエの正確な観測データが入手できれば、必ず良い結果が得られると期待した。後にデータを得たが、結局、期待通りにはゆかなかつた。が、かれは宇宙にはこの構造の秩序が実在することを生涯疑わなかった³⁻⁵¹⁾。

ブラーエの助手として働き始めて最初に与えられた課題は、火星の軌道決定の問題である。

ケプラーには、「動くものには動かすものがある」とするアリストテレスの[運動の原理1]が働いていたのであろう、静止する太陽に対して、惑星を動かすものがなければならぬと考え、それを太陽とみなした。このため、惑星は太陽に近づけば早く動き、遠くなれば遅くなる。かれはこれを土台として火星軌道の研究を遂行した。

その成果は『新天文学』(1609年)として結実した。ラテン語で書かれ、本文だけで450ページにおよぶ大作である。

著書の目的は火星軌道の確定であるが、地球の軌道も求められている。本の価値を高めたのは、第一法則「火星は楕円を描いて太陽を周る」と、第二法則「太陽と火星を結ぶ直線が描く面積は速度が一定である」が述べられ、それらがブラーエのデータによって実証されていたからである。著書の多くを占めるのは、研究の試行錯誤の記録であり、また太陽が火星に及ぼす力の考察である。二つの法則のうち、第一法則が何より重要である。この法則の発見を契機として「天体は円運動する」という古代ギリシア以来、人々を捉えていた「円の呪縛」が解かれることになったからである。ケプラーはブラーエの観測データに全幅の信頼を置き、理論を鍛えていった。

とはいえ、火星の正確なデータが収集されても、火星の軌道が自ずから浮かび上がるわけではない。データ自体は軌道の形を何も伝えないのである。

ケプラーの『新天文学』は、幸い、2013年にラテン語から日本語に完訳された³⁻⁵²⁾。筆者は、先年、それを不明な箇所をのこしながらも読解して、ケプラーの火星楕円軌道発見の経緯と軌道の本紀要の中に論文としては発表した³⁻⁵³⁾。

ここでは、それを要約する形で、『新天文学』におけるケプラーの考究の要点を述べておこう。

かれもまた、最初、円軌道に執着していた。その際、太陽の位置は円の中心ではなく、中心から少し離れたところに置いた。古代ギリシア以来の、いわゆる離心円である。ただし、天動説では、太陽の位置に静止した地球が置かれている。多くの離心円の試行の最後に、軌道円とブラーエのデータとの誤差が最大で8分以内にまで小さくなるものが見出された。従来の誤差

の基準であれば、この程度は容認されたであろうが、ブラーエのデータを信頼していたケプラーはこの円軌道をあきらめる。のちにかれは、こう述懐する³⁻⁵⁴⁾。

「私の第一の誤りは、惑星の行路を完全な円としたことだった。これは時間を奪った盗人で、あらゆる哲学者たちの権威で武装している上に特に形而上学にも相応しいので、とりわけ有害であった。」

「時間を奪った盗人」の言葉には、円運動に固執し、あまたの時間を無駄にしたという悔恨の思いがにじみ出ている。以後、ケプラーは円軌道に戻ることはなかった。結局、古代ギリシア以来の「円の呪縛」を断ち切るのは人間が取得する事実でしかなかったことがわかる。

次いでケプラーが考えたのは、卵形の軌道である。この形は遠日点と近日点では円に近く、中ほどで内側に入り込む軌道である。多くの試行の末に、観測データとのずれが主要な三地点で5分以下になったケースがあった。かれは、一時この結果に満足し、大いに喜んだ。

しかし、その形を導くのに大変苦労しなければならず、かれはこれもまた捨てることになる。

『新天文学』には離心円と火星軌道を同時に含む多数の図が出ている。そのうち同じ図形が五度も載っている場合がある。ケプラーが格別重視したものと思われる。それが[図13]³⁻⁵⁵⁾である。

かれはこの図から火星軌道を楕円とする考えに至るきっかけをつかむのである。図を説明しよう。

図の丸い実線は円で、その中心はHである。

A, E, C, Dは円上の点であり、Nは太陽を表す。太陽は円の中心Hから少し離れたところに位置する。したがって円は、いわゆる離心円である。(天動説ではNの位置に地球がある。)Aは太陽か

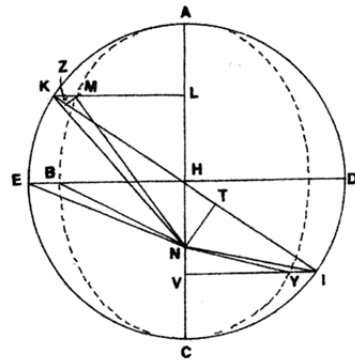


図13 実際は、この図の大きさであれば、楕円と円は完全に円と一致してしまう。

ら最も離れた遠日点、Cは太陽に最も近づいた近日点であり、したがって直線ACは火星軌道の長径である(しかし、まだ楕円と決まっているわけではない)。直線EDは中心Hにおいて長径と垂直に交わる。最後に、点線は火星軌道とみなされるもの。これが楕円であるとわかればよいわけである。

この図に関してケプラーは次の文を書き添えている³⁻⁵⁶⁾。

「火星に対する勝利はまったくむなしいものであったと思ううちに、まったく偶然に最大の視覚的均差を図り取った $5^{\circ} 18'$ という角度の正割に思い至った。この値が100429であることを見たとき、まるで新しい光のもと、眠りから目覚めたかのように、以下の推論を始めた。」

ここで「以下の推論」を要約してみよう。

『新天文学』では、離心円の半径を100000とし、 $5^{\circ} 18'$ の正割(セカント)を100429としているが、現代の数値表示には対応しないので、ここでは、半径を1、上の正割を1.00429としてゆく。また、以下では、二点A, Bを結ぶ線分の長さを[AB]で表す。

まず、上記の文の意味を言い換えると、次のことである。

△NEHにおいて、 $\angle NEH = 5^\circ 18'$ 。この角の余弦（コサイン）が1になる。ところが、この長さは太陽Nと火星Bを結ぶ線分の長さに等しい。このことは、観測データによって、 $[HN] = 0.009265$ 、 $[BH] = 1 - 0.00429$ のゆえ、 $[BN] = 1$ が算出されるからである。

これらから次式が成り立つことがわかる。

$$\begin{aligned} \angle ENH \text{の余弦} &= [EH] \text{ (半径)} = 1 \\ &= [BN] \text{ (太陽と火星の距離)} \end{aligned}$$

議論のスタートは、離心円上の点Eにおける直角三角形ENHであった。これを点Eより上の離心円上の任意の点Kに一般化するのである。

このときの直角三角形は、△KNTとなる。この場合は、 $\angle NKT$ の余弦 $[KT]$ が太陽Nからの火星の距離となる。すなわち、

$$\begin{aligned} \angle NKT \text{の余弦} &= [KT] = \text{太陽と火星の距離} \\ \text{このとき、} [NH] &= e \text{ とし、} \angle KHA = \beta \text{ とすれば、} \\ [KT] \text{の長さ} &= \text{次式で与えられる。} \end{aligned}$$

$$[KT] = 1 + e \cos \beta$$

いま、任意の点Kから長軸CA上に垂線を下し、その足をLとする。

ここで、直線KL上に、点Mをとり、 $[MN] = [KT] = 1 + e \cos \beta$ となるようにする。

次いで、中心Hに関して点Kと点対称となる点Iを考え、Iにおいても同様なことを考える。この場合、上の点Mに対応する点は図のYであり、 $[IT] = [NY]$ を満たす。

こうして得られる点MやYの全体が楕円をつくるのである。

なぜなら次式が成立するからである

$$\begin{aligned} [EH] : [BH] &= 1 : \sqrt{1 - e^2} \\ [KL] : [ML] &= 1 : \sqrt{1 - e^2} = [IV] : [VY] \end{aligned}$$

ここで、 $[EB]$ の幅について一言注意すると、離心円の半径1対し、0.00429であるから、半径を25cmとしたとき、ようやく1mmになるほどで、軌道が楕円といっても、普通の本にこれを描けば円とほとんど変わらないのである。

ケプラーは、楕円となるMやYを採る直前に、[図13]の中の点Zを採った。この場合、Zは直線KT上の点で、 $[NZ] = [KT]$ を満たす点である。

このような点Zの全体を火星の軌道とした場合、かれはこれを豊頬形とよんだのであるが、ブラーエのデータと比較したとき、ずれが5分程度で治まる。その意味では火星の軌道としての資格があるが、最終的に、かれはこれも捨てる。あまりに複雑だからであったためである。

こうして経過の下で得られた楕円軌道でも、ブラーエの観測データとの間にいくつかの箇所5分ほどのずれが生じた。

豊頬形では、5分のずれがあったとき、それを捨てているにもかかわらず、楕円形の場合では、同じ程度のずれがあっても採用している。

この大きな理由は、面積速度一定の第二法則と合わせると、火星の位置と時間が従来より、はるかに簡単にしかも一層正確に算出されたからであろう。楕円は長軸の方向と長さ、太陽の位置と離心率が決まれば、すべての位置が決まるからである。

火星の楕円軌道発見の成果は1627年のルドルフ表となって現れた³⁻⁵⁷⁾。このとき、他の惑星の軌道も決定され、表にはその結果が盛り込まれていた。ヴォーケルによれば、ケプラーは1629年に小冊子を出版し、その中で自らの理論に基づいて1631年11月7日に水星が太陽面を通過することを予言した。ケプラー自身は1630年に死去したので、それを実見できなかったが、当日ほぼ予言通りに太陽の手前を水星が通過するのが観測された³⁻⁵⁸⁾。ここに人々はあらためてケプラーの惑星理論の正確さを認めざるを得なくなった。

こうして、人間はケプラーの楕円理論において、初めて物体の動態的対象について、その運動変化を時間とともに正確に把握することに成功した。この成功は人々に刺激を与えずにはお

かないであろう。広く西欧に伝わるのである。

ところで、第二法則は面積速度が一定であるというものである。ケプラーの場合、速度は近代科学における「瞬間における速度」とは異なることに注意しよう。かれにおいては、時刻は別にして時間とは常に幅をもつものであった。一定の間をもつ時間において、太陽と火星を結ぶ直線が一定の面積を通過するというのが第二法則だからである。この場合面積はつねに近似値で与えられる。ケプラーの頭の中にはまだ、瞬間における速度という理論的概念はない。この理論的時間と速度は次のガリレオにおいて実際化される。

② 非日常語の出現（見えないものを見る）

ケプラーは大量の観測データの下で天体運動の秩序としての法則を発見した。言い換えると、すでに得られている多くの事実から法則を導いた。これも帰納法の一つとみなすことができる。複数の既知の事実から一般法則を導くのが帰納の原理だからである。アリストテレスは見えるがままの事実を見えるがままに秩序づけて体系化したわけで、これも帰納の原理にしたがっているとみなすことができる。

ケプラーの場合は、しかし、法則の中に、楕円とか面積速度という非日常的表象（アイデア）が含まれていることが重要である。

楕円は自然界や日常の世界にはほとんど見かけない表象である。それは歴史的には第二章第一節で述べたようにヘレニズム期においてアポロニウスの円錐の学術的研究の中に現れたものであり、ケプラーの当時としては最先端の数学的知識であった。かれは楕円の理論に通じていた。これが幸いであった。もしこれを知らなかったら火星軌道は卵円形で終わっていたであろう。そのとき、科学の歴史は大きく変わっていたはずである。

楕円や面積速度一定という表象は学術的専門用語と呼ばれるものである。自然現象を説明するのに、こうした非日常的言語を用いるという、近代科学では当然のことになっている事態はケプラーにおいてはじめて有効性が認められたわけである。このためには、それらの言語が具体的な事実の場に降りてこなければならぬ。それが実証とか検証と呼ばれる過程である。ケプラーが自身の楕円理論をブラーエのデータで裏付けたのが、その過程である。

このことは、言い換えると、日常的には見えない表象を、見える事実によって根拠が与えられたことを意味する。これは従来のアリストテレス自然学と決定的に異なる特徴である。肝要な点は、既知の事実をいくら集めたところで「目に見えない」事実は生まれないということであり、「見えない」事実を見るためには、従来にない新しい内容(表象)をもつ言語を見つけるか、あるいは自ら創らねばならないことである。

見えない事実を見抜くためには、夢であれ、理想であれ、直観であれ、真実を担うと信じる言葉であればどのようなことでもよい。だが大事な点は、その言葉が真実を担っていることを、誰でもが共有する普遍的事実によって明らかにしなければならないことである。この手続きを欠けば、単なる夢想にしかすぎないであろう。最も強力な普遍的事実は経験上の数値であろう。したがって経験上の数値で表わされる言葉を見出すことが肝要となる。

ケプラーの著書『宇宙の調和』³⁻⁵⁹⁾(1618年)は、ほとんどが夢ないし無理な理屈づけの物語である。しかし、その中に、いわゆるケプラーの第三法則：

「各惑星の太陽を周る周期Uの平方と、太陽からの平均距離rの立方の比、 r^3/U^2 は一定である³⁻⁶⁰⁾」

が含まれていた。これだけはブラーエのデー

タによって確実であることが立証されていた。これは夢想には終わらなかったのである。

ケプラーの非凡な研究結果にもかかわらず、天動説をくつがえすことはなかった。ほとんどの人は楕円軌道論を、惑星位置の予測に有効な数理上の手段とみなしていた。

ケプラーの三法則は、やがてニュートンの知るところとなり、かれの天体理論誕生の素地を提供することになる。地動説が確固とした地位に達するのはかれまでまたねばならない。

最終章に移ろう。

第四章 近代科学の成立

第一節 落下運動の解明

ケプラーは惑星の運動を位置と時刻とともに正確に把握することに成功した。これは惑星の運動が極めて安定していたことが大きな要因である。

一方、地上にあっては、自然界に安定した安定した運動はまれである。物体の落下運動は、普通、まっすぐに落ちるとはいえ、鳥の羽のような物はゆっくりと落ち、鉄のような金属はす早く落下する。投げられた物体はある種のカーブを描くが、その形は決して安定していない。地上において物体運動を正確に把握することは異常な困難に出会うのである。

さらに近代科学の誕生の前は、天の物体は不変、不生不滅であり、生成消滅をくりかえす地上の物体とはまったく異質であり、したがってその運動も地上と異なるとする天地二元論が根強く生きていた。こうした時代状況のうちにガリレオ・ガリレイ(1564—1642)が登場する。

ガリレオは地動説をめぐるカトリック教会と争ったことで有名であるが、チコ・ブラーエやケプラーが終生、天文現象の研究に従事していたのに対し、ガリレオは四十代の中頃まで地

上の物体運動の解明に力を入れていた。解明の手段として用いられたのが幾何学として数学であった。

元来、ガリレオは医師になる目的でピサ大学に入学したが、やがてこれを断念し、数学の勉強に専念するようになった。これには、当時のトスカナ大公の宮廷付き数学者であったオステイリオ・リッチの影響が大きかった⁴⁻¹⁾。リッチは、三次方程式の解法で有名な時代を代表する数学者タルタリアの弟子であり、大公の宮廷で若者に数学を教えていた。

ガリレオはリッチから、『原論』の公理に基づく演繹法の論理を吸収したり、また、アルキメデスの厳密な論理と手法を習得したことであろう。アルキメデスのこの原理や重心の求め方、浮力の原理、さらに円や二次曲線の面積の求め方などを学んだと思われる。

勉学の成果は早くもガリレオ二十二才のときに発表した論文「小天秤」に見られる⁴⁻²⁾。

これは今日の言葉で言えば、アルキメデスの浮力の原理を利用して、天秤によって物質の比重を精密に測定する方法を述べたものである。

天秤は、いうまでもなく支点をもち、支点の左右のモーメントのつり合いによって物体の重さを測るものである。この場合、モーメントは物体の重さと支点からの距離によって与えられるが、ガリレオの言葉によれば、重さとは、「下の方向に向かって自然な運動を起こす傾向を示すところの性質である⁴⁻³⁾。」

注目すべきは、物体の重さが、下に向う「自然な運動を起こす傾向」と捉えられているわけで、力の概念は使われていないのである。また、アルキメデスの浮力の原理も、媒質中を落下する物体の抵抗を示すものであって、ここにも力の概念はない。

いずれにしても、『小天秤』で重要な役割をはたすのは、モーメントにしても浮力の原理にし

ても、物体の鉛直下方に落下する運動である。

① 真空中等速落下の法則

一方、ガリレオも学んだアリストテレスの自然研究では、第一章で述べたように、真空を否定する強力な論が展開されていて、古来から、自然には真空という状態はありえないとみなされていた。その根拠の一つは、第一章で述べたように、真空では物体の落下速度が無限大になるからというものであった。

ガリレオは、しかし、天秤や、水のような媒質中の落下運動の実際の経験から、そのようなことは起こりえないと確信し、さらにいくつかの思考実験を重ねて、最終的に、次の法則に思い至る⁴⁴⁾。

等速落下の法則：真空中では、すべての物体が同じ速さで落下する。

だが、この法則は一見したところ、人間の常識に反するものである。実際、ガリレオに批判的立場にある人物は、「一房の羊毛と一片の鉛が同じ速度で落下するなんて、とても信じられそうもありませんね⁴⁵⁾」と強く疑う。

こうした批判の中にあって、ガリレオは法則の根拠として次のような実験を提示する。

当時、真空の状態を確保する技術はまだなかったもので、真空に極めて近い状態として、媒体として空気を採ることにする。その理由は、

「たとえ完全な真空でなくとも、(媒体の)希薄さが極限になり、重さの違いが大きいにもかかわらず速度の違いが極めて小さくなり、ほとんど見定めがつかなくなる、ということがわかれば私たちは、真空中ではすべての物体が同じ速さで落下すると確信してもよい⁴⁶⁾」、

と考えられるからである。

それでも、落下距離が長い場合は、空気の抵抗が影響して、軽いものは遅く落ちるだろうし、

距離が短い場合は、落下があまりにも早く終わってしまい、法則の検証ができないであろう。

実験で検証するといっても困難が伴うのである。

そこでガリレオは振子を使うことを思いつく。

一つは鉛、他の一つはキルクの、二つの球—鉛の重さはキルクの100倍以上—を用意し、それぞれ200cmほどの同じ長さの糸でつるす。両者を鉛直の状態から引き離し、同時に手放す。このときそれぞれの球は糸の長さを半径とする円周に沿って落下し、振動をくり返す。この振動が100回もくり返されたが、鉛もキルクもほとんど同じ周期をもっていた。したがって、たとえ1000回振動しても、二つは完全に同じ歩調を保つことになるであろう。ただし、媒体(空気)が与える影響のために、キルクの振幅は鉛より小さくなることが見られる⁴⁷⁾。

実験の結果から、実験がもし真空中で行われたとしても、鉛もキルクもまったく同じ振幅をもって振動することになる、と結論できると考えられる。このことは、鉛もキルクも真空中では全く同じ速度で落下することを意味する。

ガリレオはしかし、実験から、なぜ最後の結論が得られるのか。その理由は一切述べていない。結論は、はたして妥当であったか、この実験のみでは不明であろう。実際に、実験の意味はニュートンに至って明らかにされる。

以上がガリレオ自らの手で書き残した**真空中等速落下法則**の実験である。科学史関係の本ではときに、ガリレオが大小二つの鉄の球をピサの斜塔の上から落下させたという逸話が出ているが、ガリレオ自身の記録には、そのような話は確認されていない⁴⁸⁾。

ともあれ、振子の実験は、ガリレオが検証の困難な実験に対しても、実験を工夫し、法則を実際に確かめようとする実証の精神を強く持っていたことを示すものである。

一言付け加えると、この振子の実験は後にニュートン自らによって行われ、かれの理論形成に重要な役割をはたすことになる。したがって科学史の上ではまことに有意義な実験であった。さらに後に、振子は正確に時を刻むものとして時計製作にも応用され、時計の精度は大幅に改善されたことは、第三章で触れた通りである。

② 落体の法則

自然落下運動の重要な特性は速さが時間とともに増加することである。始めは静止していたものが落下するにつれて速さが早くなる。アリストテレスもこの現象に気づいていた。かれは速さが増す原因は、重いものがその本来の場所、すなわち、地球の中心に近づくからだと説明した。ところが、ガリレオの場合、速さの増大の原因についてはまったく問題にしないで、速さがどのような程度で増加するかを問題とした。要するに、落下現象を数値上で正確に把握することを目指した。

物体の落下運動に関して、ガリレオの「落体の法則」として知られているのは次である：

落体の法則 自然落下する物体の落下距離は落下時間の平方に比例する。

物体運動に関する法則や定理における時間はすべて理論時間である。数学や物理の理論で使われる時間はすべて時間軸上のものである。

ガリレオは理論時間を伴うこの法則の存在を、1604年には認めていた。知人のパオロ・サルピ宛の書簡で、法則に言及しているからである⁴⁾⁹⁾。しかし、その時点では、落下運動というものがどのような条件の下で起きるのか、そして、はたして落下法則は実際に本当なのか、という二つの問題があると考えていたと思われる。

ガリレオは、それから約三十年後に『新科学対話』（以下『対話1』とする）を出版した。ここでは、この二つの問題をかれなりに解決して

いる。それは、科学史上重要な意味をもつとみなされるので、ここではやや詳しく検討しておく。

ガリレオは最初、落下速度は落下距離に比例すると考えて法則を理論的に導こうとした。しかし、まもなく、それが間違いであることに気づく⁴⁾¹⁰⁾。

試行錯誤の末に、ようやく、落下速度は落下時間に比例するという条件の下で、法則が成立することに思い至る。それは『対話1』において定理の形で次のように述べられる：

定理 静止から等加速で落下する物体の落下距離は、その距離を通過する時間の平方に比例する⁴⁾¹¹⁾。

この定理において、自然落下運動は等加速で落下するという前提が立てられていることがわかる。

ここで、等加速とは、同一の時間には同一の程度で速度が増大すること、時間が二倍になれば、速度も二倍になり、三倍になれば、速度も三倍になる、すなわち、速度が時間に比例して増加することを意味する。したがって、この定理において

「自然落下にあつては、落下速度は落下時間に比例する」

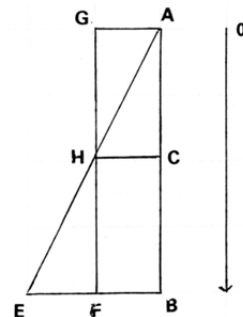


図14 $\triangle ABE$ の面積がB時点における落下距離に等しい。

ということが条件ないし前提として設定されているのである。これを図示すれば、[図14]のようになる。

図において縦軸ABは時間軸であり、横軸は速度軸である。始点Aにおいては速度ゼロであり、時点Bにおける速度の大きさはBEの長さである。直線AEは落下速度が落下時間に比例していることを示す。このとき、 α を定数として、 $BE = \alpha AB, HC = \alpha AC$ である。 α は加速度である。

ところが、『対話1』においては、落下速度が落下時間に比例するというを正当化する根拠を何一つ与えていない。その意味では、この命題は仮説とみなさざるを得ないであろう。

かれはこの仮説（条件）の下で、落体の法則を次のようにして論理的に導く。

[図14]において、Cは時間ABの中点で、Hは線分AEの中点である。したがって長さCHは、時点Cにおける落下物体の速度を表す。

ガリレオの論理は、「時点Bにおける落下距離は、ABの中点Cにおける速度CHをもって時間間隔ABだけ落下した距離に等しい」、というものである。すなわち、

B時点における落下距離をL(B) とすれば、

$$L(B) = (1/2)EB \cdot AB$$

ところが、仮説により、 $BE = \alpha AB$ であるから

$$L(B) = (1/2) \alpha AB^2$$

という結果を得る。すなわち、落下距離L(B)は落下時間ABの平方に比例する、ということなのである。AB=tおけば、次式が成立する。

$$L(B) = (1/2) \alpha t^2$$

しかし、このような論理の上のみで得られた落下法則は、実際の落下運動において真に成立するのだろうか。

一方、この法則に限れば、すでに中世において哲学者によって取り上げられ、成立することが思惟の上では認められていた⁴⁻¹²⁾

ガリレオがこの法則に新生面を開いたのは、

この法則の内容を独自の実験で確かめたことである。かれは『新科学対話』でこう明言する⁴⁻¹³⁾

「実験こそ著者の無視しなかったものです。私は著者といっしょに次のようにして落体によって実際に行われる加速運動が上述の通りになることを実証したのです。」

この著者とはガリレオ自身と考えてよい。「私」とは、ガリレオの立場に立ってかれの所説をわかりやすく説明する人物である。

実験は斜面の上に沿って鉄の球を転がすものであり、これこそ近代科学の本質である検証実験の幕開けを告げるものである。やや詳しく述べておこう⁴⁻¹⁴⁾。

斜面を作る角材として、長さ6~7m、幅25~30cm、厚さ4cmのものを用意する。厚みの中央に幅1cmの溝を作り、その内側に極めてなめらかな羊皮紙を張っておく。角材の一端を他の端より1mほど引き上げて傾斜させ、溝の上を、硬くなめらかな完全に丸い鉄球をころがす[図15]。

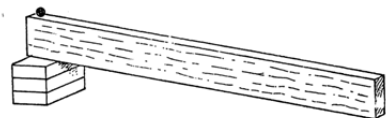


図15 これは実験の概略の図である。

その際、落下に要する時間を次のようにして測る。大きな器に水を入れ、高いところに置き、器の底に小さな管を差して、水が管を通して下に流れ落ちるようにしておく。

鉄球を転がすと同時に水を流し、球が斜面上を適当な長さまで落下したとき水流を止め、流れ落ちた水の量を集める。こうして鉄球の落下した距離と、それに対応する落ちた水の量を天秤で正確に測定する。ガリレオは斜面の傾斜の角度を変えてくり返しこの実験を試行したという。

この実験の結果、鉄球の落下距離は、常にほぼ、集積された水量の平方に比例することが確かめられた。これは落下距離が落下時間の平方に比例す

ることを示すものである。

ガリレオのこの実験によって、人間は初めて、地上の物体運動の一つを正確に解明することに成功した。解明とは、この場合、運動物体の位置と時間を連続的に正確に把握することである。

①における真空中等速落下に関する振子の実験にせよ、この斜面の実験にせよ、いずれも自然に存在する現象そのものではなく、ガリレオが、すなわち、人間が工夫し作った人工的現象である。ガリレオ以降、実験と言えほとんどすべてが、こうした人間の手で作られた人為的現象となる。

しかし、たとえつくられたにせよ、それは自然現象の一部とみなすことができる。ただし、その際、データを読み取るというやっかいな作業が必要である。

ガリレオは、また、なめらかで抵抗のまったくない平面上では、物体は静止しているか、等速直線運動を続けるということを、簡明な思考実験で示した⁴⁻¹⁵後に、その運動と自然落下運動を合成したときには、物体は放物線の軌道を描いて落下することを明らかにした⁴⁻¹⁶。

一方、第三章で述べたように、ケプラーは楕円軌道を含む三つの法則によって惑星運動の時間と位置を連続的に正確に把握することに成功した。

かくして人間は十七世紀前半に天と地の代表的な物体運動を時間とともに連続的に正確に描き出すことができるようになった。これらすべては、ニュートンに伝わり、かれの力学理論構築の重要な資材となるのである。

第二節 天地二元論の克服

すでに述べてきたように古代ギリシアから中世を経て近代科学誕生の前夜まで、人々をとらえてきた世界観は、天と地を作る物質は異なる

ものからなり、しかも、両者は本質的に違う運動をするというものであった。こうした天地二元論に根本的な疑念を投げ、天地一体論とも言うべき主張を強力に行ったのがガリレオである。

十七世紀の初頭、ガリレオはまったく新しい器具、筒眼鏡（つつめがね）を入手した。現在の望遠鏡で、いうまでもなく、これは人間の視覚機能を著しく広げるものであった。アリストテレスの天体観に不信をいだいていたガリレオが、これを天に向けたのは当然であった。かれが地動説の闘士に変貌するのは、望遠鏡による天体観測以後のことである。

観測の結果は最初に1610年の『星界の報告』⁴⁻¹⁷（以下『報告』とする）として、次いで1613年の『太陽黒点とその諸現象の沿革および証明』⁴⁻¹⁸（以下では『黒点の証明』とする）として出版された。しかし、かれが見た天体については広く知られていることであり、ここでは上の両書の要点のみを述べよう。

望遠鏡はまず月面に向けられ、非常に注意深い観測の結果、こう結論するのである。

「月の表面は、多くの哲学者が月や他の天体について主張しているような、滑らかで様な球体ではない。逆に起伏に富んでいて粗く、いたるところに窪みや隆起がある。山脈や深い谷によって刻まれた地球の大地とかわらない⁴⁻¹⁹。」ガリレオが見た月面は起伏に富む地球表面と変わりはないのであった。月は地球と変わらない同格ともいえるべき存在なのである。

ガリレオが月面の観測以上に重視したのは、木星における四つの衛星の発見とその観測である。かれは『報告』の中で、「この著作において最も重要なことが残されている」と注意し、それは、

「世界の初めから今日まで、かつて誰の眼にもふれなかった四つの惑星（衛星のこと）を発見し、さらにこれら惑星の配置、および、

その運行と変異とについて二か月間に行った観測を公表することである⁴⁻²⁰⁾。」

この文言に続いて、1610年1月7日から3月2日にかけて行った観測を克明に記録する。それは、木星および木星を中心とした四つの衛星（現在の、カリスト、ガニメデ、エウロパ、イオ）の配置とその時刻を図とともに記載したものである⁴⁻²¹⁾。

衛星はすべてつねに木星に随伴し、木星の逆行のときにも順行のときと同じように従っている。当然、それらは木星と同じ周期、十二年で世界の中心の周りを回転することは疑いない。

コペルニクス体系では、五惑星とともに地球と月は太陽の周りをまわる。しかし、月だけは例外的に地球の周りを回転する。月のこの動きはコペルニクス説の弱点であった。しかし、今や、地球と月の関係とまったく同じ関係が木星とその衛星において見出されたことになる。もはや、月は天体として例外的存在ではないことになった。ガリレオは地動説にますます自信を深めるに至る。

『報告』では、この他、恒星についての観測結果を記録している。

注目される一つの事実として、月や惑星の観測では対象が拡大され、「惑星は丸い円の輪郭をもつ球体にみえるが、恒星は決して丸い周縁を描いてはいない。たえずまたたく光彩のような外観を呈する」のみであるとしている⁴⁻²²⁾。

オリオン座の観測では、帯の三ツ星や剣の六つの星の近くには80の星が見つげられる。また、ミルク色をして、雲のように流れる銀河は、「実際は重なりあって分布した無数の星の集合にはほかならない」⁴⁻²³⁾ことがわかる。

以上の多くの観測記録が世間に提示されても、地動説は広がることはなく、社会はなお、天動説に支配されていた。

実際、ガリレオが『黒点の証明』において、太陽の表面には生成消滅し、移動さえする黒い斑点がある、という観測を示した後は、イエズス会の一人が、すぐにも反論を行う。それは、「太陽の黒点は、太陽からほど遠くないところにあつて、水星や金星と同じく太陽の周りを回転している星」という主張である⁴⁻²⁴⁾。かれは、太陽は永遠に不変で完全であるとするアリストテレス的世界像を頑固に守り通すのである。

第三節 ガリレオの論理

① 地動説（主著『天文対話』をめぐる）

ガリレオはアリストテレスの天体観を否定し、強固に地動説を唱えた。それを象徴するのが有名な宗教裁判であろう。裁判において問題となったのは、1632年に出版された『天文対話』である。その正しい書名を『プトレマイオスとコペルニクスとの二大世界体系についての対話』という⁴⁻²⁵⁾。これは文字通り、アリストテレス—プトレマイオスの天動説とコペルニクスの地動説の双方について対話形式で詳細に検討したものであり、しかし、最終的には地動説が真実であることの実証を企図していた。

そこでは、天動説と地動説のそれぞれの根拠がさまざまな角度から詳細に検討される。アリストテレスの天地二元論と、天も地も変わらないとするガリレオの考えが議論される。

しかし、両者の主張だけでは、天動説、地動説どちらも決定的な根拠を示すことができない。結局、最終的に、ガリレオの立場にある人物が、地球表面に毎日生じる海水の干満が、地球の一日の自転と一年をかけて恒星天球を一周する地球の公転の二つの運動の合成によって起きる現象であるという考えを示し、それをもって地動説の確定的な根拠であると主張する。

しかし、当時、すでに多くの人々が海水の干満は月の引力によると考えていた⁴⁻²⁶⁾。これは時

の教皇バルベリーニさえも同様であった⁴⁻²⁷⁾。ガリレオの決定的な誤りは、地中海では、満潮と干潮が一日にそれぞれ一回しか起こらないと考え、海水の干満は地球の反対側でも起きることを否定したことであろう⁴⁻²⁸⁾。

以上を考慮すれば、ガリレオが『天文対話』によって地動説を正当化できると考えたのは大きな失敗であった。ガリレオは、月の表面が地球と変わらないことや、木星に月と同じような四つの衛星があることを発見し、地動説を強力に主張したにもかかわらず、結局、地動説の決定的証拠を提出することはできず⁴⁻²⁹⁾、かれは当時の常識としての天動説をくつがえすことはできなかったのである。天（太陽）が動き大地が静止しているという人間の本性的認識を崩すことはできなかった。

すでに前章で述べたが、当時、ガリレオと並んで地動説を強調したのはケプラーである。ケプラーの、惑星の楕円軌道発見や惑星運動に関するルドルフ表の作成などは地動説の有力な援軍になるはずであったが、ガリレオはこれらをまったく無視した。本来天文学者ではなかったかれは地上の物体運動の一端を明らかにしたが、惑星の天体運動の軌道には目を向けなかったのである。

なお、ガリレオの地動説をめぐる裁判では、当時に限れば必ずしもガリレオが正しくローマ教皇庁が間違っていたとは言えないことが了解されよう。裁判には複雑な政治的要因もからんでいたのである。しかし、1992年教皇庁は天動説を放棄、地動説を承認し、併せてガリレオ裁判が誤りであったことを認めている。

② 仮説演繹法

ガリレオの業績を科学史の上で考えるとき、天文観測に優るとも劣らぬものは、上記で述べた物体の「落体の法則」の実証実験であろう。この実験を通して、かれは近代科学の認識形式

である仮説演繹法の原型を提示した。これは科学の歴史においてガリレオが初めて明確な形で提示したわけであるから、ここに、その骨子を述べておこう。

物体の落下運動においては、まず次の仮説が提示される

仮説：落下運動では速度は落下時間に比例して増加する。

この仮説を直接実証することはできないので、これから演繹的推理によって次の結果を導く。

検証命題：落下距離は落下時間の平方に比例する。

最後に、斜面を利用した多数の実験によって検証命題が検証される。この結果、最初の仮説は妥当な命題として受け入れられる。これがガリレオにおいて遂行された仮説演繹法である。

この場合、たとえ検証命題が多数の実験によって検証されたとしても、仮説は仮説である地位にとどまらざるを得ないであろう。仮説を直接的に正当化したわけではないからである。仮説の信頼性は増したであろうが、しかし、絶対的な確実性は得られない。ニュートンの名著『プリンキピア』は、この仮説演繹法を駆使して成功を収めたものである。ニュートンに移ろう。

第二節 近代科学の成立

十七世紀にはイングランドのロンドンに大陸諸国で起こった学術や思想のほとんどが流入していた。占星術や錬金術も行われていた。天文学では、コペルニクスの地動説はもちろんケプラーの楕円軌道論も知られていた。ガリレオの『天文対話』はトーマス・ソスベリーによって英訳され、本節の主役であるニュートンは、これを1664年に熟読したと「日記帳」に書き残している⁴⁻³⁰⁾。さらにソスベリーはガリレオの『レ・メカニケ』と「小天秤」を1662年に、『新科学対話』を1665年に英訳し、いずれもロンド

ンで出版した⁴⁻³¹⁾。当然ニュートンもそれらを読んでいたのである。

十七世紀の末には、このロンドンに時代の混迷を突き破る新しい風が起こり、その風はやがて大陸諸国に吹きわたり、ついには全世界に広がるのである。これによって地動説は不動の地位を得る一方、近代力学の基礎が築かれるのである。

新風の源は、言うまでもなく、ニュートン(1642~1727)の『プリンキピア』⁴⁻³²⁾である。本節では、『プリンキピア』のみを取り上げる。この書は、天と地の物体運動を同一の理論によって統一的に説明しただけでなく、二千年に渡って固守されてきたアリストテレス『自然学』の思想を完全に断ち切り、自然研究にまったく斬新な方法を導入したとも考えられるからである。

一般に、言語は記号表現とその内容からなる。内容は概念ないし観念(本稿では、表象と呼ぶ)であり、それは外に取り出すことができない。アリストテレス自然学は普遍的表象をもつ言語によって、変化する自然世界を整序し、体系化ないし組織化するものであった。このアリストテレスの学問を有力な範例として、普遍的言語を用いて世界を分析し、解明することが、古代ギリシア以来の西欧認識論の伝統である。ニュートンもまたこの伝統を背負っており、『プリンキピア』は、普遍的表象をもつ言語によって、物体運動一般を解明することを目指していた。

しかし、もちろん『プリンキピア』はその伝統を背負っていただけではなかった。その考究において、従来にはない新しい特質をもつ言語が枢要な役割を果たしていた。

新しい言語の特質とは何か。

第一に、その言語の表象(内容)は人間の日常の経験では容易に把握できないという特質もっている。この特質を非経験的特性と呼び、

そのような表象を非経験的表象、その記号表現を非経験的言語と呼ぼう。ここで一つだけ例をあげれば、物体のもつ「質量」である。

第二に、その表象は数量的に表示できるものであった。これによってその表象は、他の数量をもつ表象との間に関数関係を立てることが可能になる。関数関係は、すなわち、数式の上に乗せられるということである。このような表象を関数的表象と呼ぼう。

表象の非経験性と関数性という二つの特性はアリストテレスの言語には持ちえないものであった。かれの言語の特性は、第一章で述べたように人間の経験に深く根ざしており、常識と結合していたが、数式とは無関係であった。

一方、関数的表象としては、たとえば落下速度などは時間を伴って、ガリレオの落体の法則においてすでに使用されていた。だがガリレオの場合、その表象は落体と放物体という極めて限定的な現象においてのみ用いられていた。

ところが、『プリンキピア』における中枢の言語は、非経験性と関数性の特性をもつだけではなく、驚嘆すべき普遍性を備えていた。同一の言語によって、天体の運動も地上における物体の運動も等しく正確に説明することに成功した。天地の運動は同じ言語によって詳細に描かれたのである。

以上を念頭に置いて、『プリンキピア』の言語と論理を検討してみよう。この検討を通して、近代科学における自然認識の特性を明らかにすることができよう。

(一) 運動の三法則

『プリンキピア』は三編から成る。第一、二編は理論編で、第一編は通常の物体の運動、第二編で抵抗のある媒質中の物体の運動を扱う。第三編は理論を実際の現象に適用する応用編である。科学史の上から重要なのは、第一と第三編であり、

以下では、そこを元に『プリンキピア』における議論の特質を論じてみよう。

『プリンキピア』の正式には『自然哲学の数学的原理』と訳され、物体の運動を数学によって説明しようとしたものである。そして数学とは、ユークリッド幾何学を指し、第一編の論述の形式自体ユークリッドの『原論』に従っている。すなわち、第一編では、初めに言葉の定義が与えられ、次いで、自明とみなされる命題が公理として設定され、これら定義と公理から演繹的推理によって諸定理が証明され導き出される。

『プリンキピア』第一編で定義されている言葉のうち、現在に連続し、かつ重要であるものをとりあげることから始めよう。

定義 I 物質とは物質の密度と大きさ（体積）とをかけて得られる物質の測度である⁴³³。

物質とは、普通、物体の質量と呼ばれているものである。質量は『プリンキピア』において中枢の言葉の一つであるにもかかわらず、明確な定義が与えられていない。定義 I にある密度の定義がどこにも書かれていないからである。それでもニュートンは、『プリンキピア』において質量は物体のすべてに備わる固有の量であり、地上のどこにおいても、宇宙のどこにあっても不変であると考えている。それは、人々が通常経験する物体の重さ（重量）とは異なるものであり、その意味で、これは非経験的表象（概念）である。では物体の質量と重量はどのような関係にあるのか。

ニュートンは『プリンキピア』第三編で、ガリレオの振子の実験とほとんど同じ実験を通して、質量と重量が比例することを示している。これによって、人間は物体の質量自体を直接測ることができなくとも、重量の数値をもって質量を数量として把握できたのである。

定義 II 運動量とは、速度と物質質量とをかけて得られる運動の測度である⁴³⁴。

運動量は速度と質量の積として定義されるが、この速度とは、瞬間における速度であり、人間の感覚では直接把握できない、ある意味では一種の観念的表象であることに注意しよう。

定義 III 物質の固有力とは、各物体が、現にその状態にあるかぎり、静止していようと、直線上を一様に動いていようと、その状態を続けようとする内発的能力である⁴³⁴。

ニュートンは、この定義に続いて次の説明を加えている。

これは物質の慣性と呼ばれる性質で、物体が静止しているか、等速直線運動しているとき、他の力が、その状態を変えようとする場合にだけ働くにすぎないものである。

定義 IV 外力とは、物体の状態を静止していようと直線上を一様に動いていようと、変えるために、物体におよぼされる作用である⁴³⁵。

この外力は作用するときだけあって、作用が終われば物体には残っていないことに注意する。

定義 V 向心力とは、中心とするある一点に向ってあらゆる方向から、物体が引き寄せられたり、押しやられたり、また何らかの形でそのほうに向わされるところのものである⁴³⁶。

この種の力は、諸物体を地球の中心に向わせる力とか、諸惑星を直線運動からたえず引き戻し、曲線上を回転させる力などであり、第一編で扱われる主要な力である。

言葉の定義に続いて、ニュートンの時間と空間が述べられる。

「絶対的な真の数学的時間は、それ自身で、そのものの本姓から、外界のなにものとも関係なく、均一に流れ、別名を持続ともいいます⁴³⁷。」

時間は、もともと、事物の変化を通して得られるものであるにもかかわらず、ここでは外界とは一切関係なく、ただ何かが均一に流れてい

るものとして考えられている。あまりにも漠然としていてとりかかりようがない。しかし、実際のところ、『プリンキピア』の議論における時間は、現代の物理学で使われている理論的時間と変わらない。

空間においても同様である。『プリンキピア』における絶対空間という絶対的に静止した空間というものは、実際は、抽象的なユークリッド三次元空間と変わらないと考えられる。

定義に次いで、証明の必要のないとみなされる公理として、運動の法則が与えられる。

法則 I すべての物体は、その静止の状態を、あるいは直線上の様な運動の状態を外力によってその状態を変えられないかぎり、そのまま続ける⁴⁻³⁹⁾。

この法則は、物体に何ら外力が作用しないとき、静止しているか、等速直線運動を続けていることを言明しているもので、一般には、慣性の法則と呼ばれる。この法則によれば、物体が静止していないで、外力が働いていない場合でも、直線運動をし続けることがあり得るわけである。

これは、アリストテレスが約二千年前に設定した「運動の原理 1」一動くものには動かすものがある一を否定し去る新たな原理である。近代力学はこれを第一の法則に置くことから出発している。

法則 I について注意しなければならないことは、この法則を単独では証明することはできない、ということである。物体は静止してるか、「永久に直線上を動き続ける、ということに対しては、明らかに何の証拠もない⁴⁻⁴⁰⁾」のである。

法則 II 運動の変化は及ぼされる起動力に比例しその力が及ぼされる直線の方向に行われる⁴⁻⁴¹⁾。

ここで運動とは運動量のことであり、この法則の示すものは、力を f 、質量を m 、速度を v とすれば、 $f = \Delta(mv)$ である。 Δ は変化を表す。質量は変化しないから、 $f = m\Delta(v)$ 。 $\Delta(v)$ は速度の変化、すなわち加速度であるから、これを a で表せば、法則は次式となる。

$$f = a m \quad (I)$$

これは、一般に運動方程式と呼ばれる式で、近代力学理論の根幹をなすものである。ここでも一言注意しておけば、物体の速度も加速度も瞬間における数量であり、人間の感覚では直接には把握できない量であるということである。

さらに、力を質量と加速度という二つの量の積として表すことができるということについては、これを直接的に正当化できる根拠を人間はもっていないことに注意しよう。

法則 I と II において、時間の表象が持ち込まれている。これによって、物体の運動を時間とともに把握できるようになった。

法則 III 力の作用に対し反作用は常に逆向きで相等しく働く⁴⁻⁴²⁾。

これについては、作用を及ぼす物体が離れている場合でも法則は成り立つことに注意しよう。次に、系 I、II において、いわゆる力の平行四辺形の法則が述べられる。二つの力の一つの力への合成方法と、その逆、一つの力の二つの力への分解の方法である。

この後、注解においてガリレオの自然落下運動が取り上げられる。

「最初の二つの法則と系の初めの二つによって、ガリレオは重量をもつ物体の落下が時間の二乗に比例することを、また、投射体の運動は放物線に行なわれることを見出しました。それらの両運動とも空気の抵抗によってわずかに遅らされることを除けば経験と一致します⁴⁻⁴³⁾。」

実際、本章第一節で述べたが、ガリレオは、自然落下においては、加速度 α が一定であることを実験で示した後、落下速度は落下時間に比例するという仮説の下で、落下距離は落下時間の平方に比例することを導き、それを実験によって確かめている。また、放物体は、水平方向の等速直線運動と鉛直上方（下方）への運動の合成であることから、その運動の軌跡が放物線を描くことを論じている。

以上の結果から、ニュートンは、上記の法則と系の二つは、実験によって確かめられたとし、疑いえないものとして扱ってゆくことになる。これらの法則は単独では証明できないとしても、それらを組み合わせることにおいて、有効であることが確認され、法則として認められるのである。

『プリンキピア』では、これらの言葉と法則の上に数多くの定理が演繹的に証明され導かれる。その推論においては全面的にユークリッド幾何学が用いられる。このため現在では、『プリンキピア』の推論過程を理解することはかなりむずかしい。ここでは、それら諸定理のうちで最も枢要と考えられる万有引力定理に話を進めてみよう。

(二) 向心力と万有引力

第一編の最初にある定理は、惑星運動におけるケプラーの定理に相当するものである。

定理 1 回転する諸物体が、不動の力の中心にひかれた動径によって描くそれぞれの面積は、不動の一平面上にあり、かつ時間に比例する⁴⁻⁴³⁾。

次いで、この定理の逆も証明される。

定理 2 一平面内に描かれた任意の曲線上を運動し、かつ不動の、あるいは一様な直線運動をもって進む一点にひかれた動径によって、その点のまわりに時間に比例する面積を描く物

体はすべて、同じその点に向う向心力によって動かされている⁴⁻⁴⁵⁾。

では、この向心力の大きさはどのくらいか。

定理 4 の系 1 一様な円運動する物体の向心力は、円の中心に向い、その大きさは物体の速度の二乗を半径でわったものに比例する⁴⁻⁴⁶⁾。

すなわち、半径 r の円上を速度 v で動いている物体は大きさ v^2/r に比例する加速度をもっているということである。

かくして、半径 r の円軌道に沿って運動する質量 m の惑星にあつては、向心力

$$f = m \frac{v^2}{r}$$

が働いていることになる。

この系 1 によれば、物体が円運動しているとき、それは、円の接線方向への慣性（等速直線運動）と中心に向かう向心力との合成によって説明できる。同様に惑星が太陽を焦点とする楕円運動をしているときでも、惑星は太陽の引力の下で何ものにも動かされることなく運動し続ける。もはや、アリストテレスの「不動の動者」（アイオーン）は必要がないのである。

さらに、この結果とケプラーの第三法則を組み合わせれば、次が得られる：

定理 4 の系 6 回転物体の周期が半径の $3/2$ 乗に比例するとき（ケプラーの第三法則が成立しているとき）、向心力は半径の二乗に逆比例する⁴⁻⁴⁷⁾。

系 8 では、同じことが、円ではなく面積速度が一定な軌道において、半径の代わりに物体の中心からの距離を使う場合でも成立する⁴⁻⁴⁸⁾。

太陽と諸惑星の間には、ケプラーの第三法則が成立することは、当時すでに知られていたことであり、太陽系の惑星運動においては、ニュートンの他、レン、フック、ハリーもまた、系

6 が成立することに気づいていたという⁴⁻⁴⁹⁾。

系 6 と作用反作用の法則を結びつけると、諸惑星と太陽との間に、次式で表される力 f が存在することになる。ただし、 M は太陽の質量、 n は惑星の質量、 D は太陽と惑星の距離である。

$$f = G \frac{Mn}{D^2} \quad (\text{II})$$

ただし、 G は太陽系における普遍定数である。かくして、ここに太陽系における重力 f の存在と、その大きさが示されたことになった。

ところが、話はここでは終わらないのである。

ニュートンの偉大であり、かつ西光学問界に物議を起すもとになったのは、(II) の関係を一挙に宇宙に存在する物体すべてに押し広げたことである⁴⁻⁵⁰⁾。

かれは次の命題を定理として設定した。

定理 m と n を宇宙空間の任意の二つの物体の質量、両者物体間の距離を D とすれば、二物体間には次の力が存在する。

$$f = G \frac{mn}{D^2} \quad (\text{III})$$

ここに G は宇宙における普遍定数である。

この定理を万有引力定理と呼ぼう。『プリンキピア』では、第三編で、二つの定理、命題 7・定理 7 と命題 8・定理 8 に分けて述べられている⁴⁻⁵¹⁾。これは宇宙の物体の間には普遍的に重力が存在する、すなわち遠隔作用力が存在することを主張しているわけで、人びとの間に重大な疑念と論議を呼び起こすことになった。とくに、デカルトやライプニッツは科学に「オカルト」(隠れた力)を持ち込んだとして強く反対した。

ニュートンは太陽系において太陽と諸惑星の間に (II) の関係が成立する以上、宇宙全体においても同様な関係 (III) が成立してもよいと判断したのである。その根拠を挙げれば、『プリ

ンキピア』第三編にある規則 III である⁴⁻⁵²⁾。

規則 III 物体の性質で、増強されることも軽減されることもできない、実験によって見出されるかぎりのあらゆる物体について符号するところのものは、ありとあらゆる物体について普遍的な性質とみなされるべきであろう。

ここで言う実験とは、天文観測も含めて考えるべきであろう。要は、太陽系において出現している関係は、宇宙全体においても普遍的に出現していると認めようということである。

本節の (一)、(二) は『プリンキピア』の理論部分から鍵となるいくつかの定理を選択抜粋したものである。最後に、逆二乗則に従う中心力の下で運動する物体が楕円軌道をとるとする命題を述べておこう。これは『プリンキピア』の出版する以前の 1680 年頃、ハリーとニュートンの間で問題となっていたものである⁴⁻⁵³⁾。

命題 13 の系 1 物体が P から任意の速度で任意の直線 PR の方向に進み、同時にその場所の中心からの距離の二乗に逆比例する向心力によって作用されるとすると、その物体は焦点を力の中心にもつある円錐曲線上を動くであろう⁴⁻⁵⁴⁾。

このとき、ケプラーの第三法則も成り立つ。

命題 前の命題と同じ前提において、円錐曲線が楕円であれば、各楕円上の周期はその長軸^(マ)の $3/2$ 乗に比例する⁴⁻⁵⁵⁾。

さて、ここまでは理論の段階である。もし、『プリンキピア』がここで終わっていたら科学として成立しなかったであろう。実際のところ、万有引力定理は、かならずしも人々に容易には受け入れられなかったのである。人々を説得したのは、『プリンキピア』の第三編「世界体系」である。この編こそ『プリンキピア』を近代科学にまで押し上げた根幹の部分であり、これによってニュートンの近代科学も経験科学である

ことを示されたのである。

第三節 実験と観測

近代科学において観察と測定は不可欠である。ことに物理学は測定を本質とする科学である⁴⁻⁵⁶⁾。このことは近代科学を代表するニュートンの力学においても変わらない。実際、『プリンキピア』の第三編「世界体系」では、数多くの実験と観測の記録があり、おびただしい観測値と測定値が記載されている。これは、ニュートンの力学が第一、第二編の理論部門だけでは学問として成立しないことを、かれ自身十分自覚していたからであろう。

『プリンキピア』の理論には上に述べたように不確かな仮説が複数設定されている。そうした理論を正当化するのに、言葉をいくら加えても効果はないであろう。なぜなら理論は外界である自然を説明するために設けられたのだから、それが正当であるか否かは、自然に聞いてみなければならないからである。このためニュートンが自然界に実験と観測を求めたのは当然であった。ここではとくに重要と思われる実験と観測をいくつか取り上げよう。

① 質量は重量に比例すること。

ニュートンは『プリンキピア』の命題24・定理19において、「同じ長さのひもでつり下げられた諸物体の物質量の比は、それぞれの重量の比と真空中における振動の時間の二乗の比との積にある」を導いた⁴⁻⁵⁷⁾。これによれば、長さ l の一定した単振子に対して、いくつもの物体において周期 T が同じであれば、この命題から、物体の質量 m と重量 w が比例することがわかる。すなわち比 w/m が物質によらないのである。この比を g と置き、重力の加速度と呼ぶ⁴⁻⁵⁸⁾。この結果、物質の質量の数値として、物体の重量、すなわち重さを用いることが許される。質量は名目的な量ではなく、現実的変量として用いることが

できるようになった。

ニュートンは多数の物体について周期が同じとなることを自らの実験で確かめている。少し長いが引用しておこう⁴⁻⁵⁹⁾。これは第一節で述べたガリレオの真空中等速落下の法則の実証実験とほぼ同じである。

「重量をもつものはすべて地球に（少なくとも空気のごくわずかな抵抗から生じられる、さまざまに異なった遅れを除けば）相等しい時間内に落下することは、遠い以前から多くの人たちによって観測されてきたところであり、事実その時間が相等しいことは振子できわめて正確に知ることができる。そのことをわたくしは、金、銀、鉛、ガラス、砂、通常の塩、木材、水、小麦を使って調べてみた。二つの、まるい、相等しい、木の小箱を準備し、一方には木材を満たし、相等しい重量の金を（できるかぎり正確に）いま一方の振動の中心にとどめた。箱は11フィートの相等しい糸でつるされ、重量も、形も、空気抵抗も、すべて相等しいふたつの振子を作った。するとそれらは同一の振動でもって、置かれた場所の近くで、きわめて長い間いつたりきたりし続けた。」

このことから、また、すべての物体について重力の加速度が一定であること、したがって、ガリレオが述べた物体の「等速落下の法則」が成立することがわかる⁴⁻⁶⁰⁾。

② g の測定

運動方程式と力の平行四辺形の法則を用いると、長さ l をもつ単振子については振幅が小さい（あるいは振れ角が小さい）場合、その周期は

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1)$$

と表せる。ただし、 g は重力の加速度。

ニュートンは、この式（1）を使い、パリに

おける重力の加速度 g を測定した。

すなわち、パリにおいて2秒で振動する振子の長さは、ホイヘンスによって3パリフィート $8\frac{1}{2}$ ライン (99.42cm) が求められ、パリにおいては、自然落下のとき一秒に15パリフィート1インチ $1\frac{7}{9}$ ライン (490.6cm) 落ちると結論される⁴⁻⁶¹⁾。この距離は落体の法則から $(\frac{1}{2})g$ であるから、 g の値はメートルで表せば、981.2cm である⁴⁻⁶²⁾。現在の数とほぼ一致する。

③ 月の運動⁴⁻⁶³⁾

月は地球を中心として公転する。その公転周期はニュートンの得た数値は27日7時間43分であった。また、地球の周はフランス人の測量隊によって、123249600パリ・フィートの数値が得られていた。これによって地球の半径も得られる。

一方、地球の中心から月までの距離は平均で地球半径の60倍である。

これらの数値から命題4の系1によって、月がその軌道上において地球の中心に向う向心力 g_M (すなわち加速度) を求めると、

$$g_M = 15\frac{1}{12} \text{パリ・フィート}$$

が得られる。これは、月が軌道上において一分間に落下する距離である⁴⁻⁶⁴⁾。

一方、地球表面において物体が地球の中心に向う向心力 (加速度) を g_E とおけば、上の系6により、

$$g_E = 60^2 g_M = 3600 g_M / \text{分}^2$$

となる。

これより、

$$g_E = g_M / \text{秒}^2$$

したがって、月が地球表面まで落ちてきたとき、月は地球表面において一秒間に $(\frac{1}{2})g_E = (\frac{1}{2})g_M = 15\frac{1}{12}$ パリ・フィート落下するのであろう。なお精確には、15パリ・フィート1インチ $1\frac{4}{9}$ ラインである⁴⁻⁶⁵⁾。

ところが、この数値は②で得た地球表面における物体の一秒間における落下距離とほぼ一致するのである。

この結果、ニュートンは、月を軌道上に保つ力は地球が月をその中心に引き付ける力にほかならないと確信したのであろう。

かくして、ニュートンの運動法則と万有引力定理は、天の運動と地における運動を結合させたのである。

月は自転運動と地球をまわる公転運動の他、太陽の引力を受けて複雑な運動をする。ニュートンは、月の複雑な運動を具体的に詳細に論じている。

④ 地球の形状

重力の加速度 g は地球上の場所によって異なることは当時すでにわかっていた。最も顕著な相違は赤道方面に行くに従い、その数値が小さくなることであつた。

例えば、ニュートンの友人ハレー博士は、1677年ごろセントヘレナ島にいたとき、彼の振子時計がロンドンにおけるより進みが遅いことを見出した⁴⁻⁶⁶⁾。②の単振子の周期を与える式において g の値が小さくなるためである。1682年、ヴァランとデ・アイの両氏は、ゴレー島での単振子の周期をパリ王立天文台における単振子の周期と同じにするためには2ラインほど短くする必要のあることを見出した⁴⁻⁶⁷⁾。

これらの現象は、もし地球が赤道付近ではふくらみ、極付近では平たくなる回転楕円体であるとすれば説明がつく。

というのは、地球の質量を M とするとき、地球表面の a 地点における質量 m の物体に対して、万有引力の定理の式 (II) を適用すると、その物体の地球の中心からの距離を Da とすれば、 $f = mg_a$ であるから、物体の地球中心に向う加速度が g_a は次式で与えられる。その際、ニュートンは地球の全質量を地球の中心に集中させてもよ

いことを理論的に証明している。

$$g_a = G \frac{M}{D_a^2}$$

これによって D_a が大きくなればなるほど g_a が小さくなることがわかる。 g_a の値は、周期を同じ1秒とする単振子の長さによって求められる。そして、赤道に近づくにつれて、 g_a の値が小さくなることが確かめられ、この結果、ニュートンは地球が扁平な回転楕円体であることを示したのであった⁴⁻⁶⁸⁾。当時、フランスでは地球が極の方向に伸び、赤道付近では平らな回転楕円体であるとする考えが支配的であったが、結局、これは否定されたのである。

⑤ 潮汐現象⁴⁻⁶⁹⁾

月と地球の間には重力が働く。月もまた地球を引いているのである。そのことを示す典型的な現象は地球上の潮汐の運動であろう。

海の干潮と満潮は月と太陽が海水を引く力の合力として起こる全地球的規模の現象である。海水を引く力を起潮力と呼ぼう。ニュートンは月の起潮力と太陽のそれとを比較すると、4.4815対1であると算定した⁴⁻⁷⁰⁾。かれは、これをブリistolから3マイルの下流、エイヴオン河の河口やプリマスにおける潮汐の現象、その他のデータから推定している。結局、海の干満は主として月の起潮力によって起こることになる。

満潮と干潮は交互に一日に二回起こる。これは、ある地点で満潮（干潮）が起こるとき、地球上のその地点と反対側で、満潮（干潮）が起こるからである。

また、満潮は月がその場所の子午線上にあるときではなく、子午線を通過してから6時間内に起こる。実際には、子午線通過から2ないし4時間後に起きる。このことは、フランスと喜望峰との間の大西洋や、南太平洋のチリーや

ペルーの海岸で見られる通りである。

新月と満月の時は、月の引力に太陽の引力も加わり、干満の差が最も大きくなる。このときを大潮と呼ぶ。また、月が上下弦（半月）のときは、太陽が月の起潮力を引き下げるので、干満の差が最小となる。このときを小潮と呼ぶ。

ニュートンは、このような古くから知られているさまざまな潮汐現象が主として月の引力によって、ときには太陽の引力を重ねて整合的に説明できることを示したのである。

⑤ 彗星の運動

『プリンキピア』で論じられた他の重要な問題は彗星の軌道である。

彗星は古代ギリシャ以来特異な天体现象として広く知られていた。彗星は、惑星や恒星と異なり、天界に突然現れ、しばらく天界にとどまり、やがては消失してしまうことが常であり、はたしてこれは月より上の不変世界にある現象か、それとも月より下の気象現象の一種であるかが長年にわたって議論されてきた。アリストテレスにあっては、月より上の世界は不変であるから彗星は当然月下界の出来事であった。

しかし、天は不変であるとするアリストテレスの自然観をくずす一つのきっかけは、彗星の運動であった。彗星が月より上の世界における出来事であることを強力に主張した一人は、ケプラーの大学時代の師メストリンである⁴⁻⁷¹⁾。他には、ケプラーに最高の天文データを提供したチコ・ブラーエである⁴⁻⁷²⁾。両者は、1577年の彗星に関して詳細な観測を行い、月より上の惑星の領域に属するものと確信したのである。これら二人から天文の知識を吸収したケプラーは、当然彗星は月上界に存在する天体であった。ケプラーの天文学を受け継いだニュートンにおいても、まったく同じであった。

かれは彗星にかかわると理論と個々の彗星の軌道と観測記録をかなりの紙幅を費やして記述

している。ここでは、そのうちの二つの彗星を述べておこう。以下の定理と命題および実例はすべて『プリンキピア』第三編のものである。

彗星を月より上の太陽系の一員であると考えるとき、万有引力定理と上の命題13の系1を結合するとまず、彗星は太陽を焦点とする円錐曲線を描くことが結論され、続いて次の命題が得られる。

命題40の系1 彗星が、軌道上をめぐってくるとすれば、焦点を太陽の中心にもつ楕円上を運動する⁴⁻⁷³⁾。

次にこれらの理論に整合する彗星の観測記録を二つだけ述べておこう。いずれもハリーが注目したものである。

一つは、575年周期で地球に接近する彗星である⁴⁻⁷⁴⁾。これが観測されたのは、ユリウス・カエサルが暗殺された後の紀元44年の九月、次いで紀元531年、さらに紀元1106年、そして1680年の終りから次の年の初めにかけてである。著しく長い尾をもっていた彗星であった。彗星の近日点は、いて座22度44分25秒、その時刻は1680年12月7日23時9分であった。その他、当時得られたいくつかのデータに基づき、彗星の軌道を導きだした。

その楕円の長軸は、地球太陽間の距離を10000とすると、138297の長さを持ち、その共役軸は18481.2の長さである。おそらく扁平な楕円である。ニュートンは、この楕円軌道上の彗星の位置を算定し、その位置と観測から出された位置を表にした(ここでは表は省略する)。

ニュートンは、「この彗星の運動は、(中略)理論とよく一致し、この一致によって彗星が同一のものであることがわかり、さらに軌道が正しく決定されたこと」が示されたと判断した⁴⁻⁷⁵⁾。それでも、観測値と理論値にはほとんど1分ほどのずれが伴い最大では3分ほどのずれがある。ニュートンの推理が正しければ、次に接近するのは2255年。この長い尾をもつ彗星を地球上で見られるのは、

残念ながらまだまだ先の話だ。

ここで取り上げたいもう一つは、1682年に現れた逆行する彗星である。軌道の黄道面に対する傾きは17度56分00秒。近日点はみずがめ座2度52分50秒にあった。近日点の太陽からの距離は、大軌道半径を100000として58328。また近日点(通過)の平均時は9月4日7時39分。フラムスティードの観測から計算された(彗星の)場所は、理論によって計算された(彗星の)場所と対照して、表としてまとめてある。(この表はここでは省く。)これがハレーの名を冠して呼ばれている彗星である⁴⁻⁷⁶⁾。

かれは、1531年、1607年、1682の彗星の軌道の類似から、極めて扁平な楕円軌道を描く同一の彗星であろうと推測し、わずかな差異は木星の影響によるとし、1758年にふたたび地球に回帰するであろうと予測した。これらのことをまとめて1705年Phil. Trans. に発表した。その後、彗星は予測通りに現れた。ニュートン理論の信頼性をあらためて人々に示すこととなった出来事である。

彗星は、突然現れ、しばらく天に輝き続け、やがて消え去る星である。その軌道の存在すらはっきりせず、まして軌道の形についてはほとんど何もわからなかった。しかし、ニュートンの理論は少数のデータから、彗星の軌道を見事に導きだし、さらに未来の予測さえ正確に遂行したのである。ここにニュートンの理論は確固とした評価を得ることとなった。

第四節 『プリンキピア』の言語

ニュートンの『プリンキピア』を頂点とする西欧近代科学は、物体運動に新たな原理を導入し、全世界的な一般的常識である天動説を根底からくつがえし、地動説を確立した。これはやはり人間がなしとげた最大級の偉業というべきであろう。

『プリンキピア』はニュートンの思索とかれが見聞した実験と観測の記録である。思索はそこで使用されている言葉に込められているはずである。この第四節においては、『プリンキピア』の言葉をあらためて取り上げ、その言葉の特異な面を検討してみよう。

① 質量と慣性法則

ニュートンの近代力学が質量という言葉なくしては成立しないということは誰もが容易に理解されよう。

質量は、しかし、前節で述べたように『プリンキピア』では明確な定義が与えられていない。ただ物体はすべて質量をもつと考えられているだけである。むしろ、すべての物体が質量という観点からとらえられているだけで、それ以上のものでもそれ以下のものでもない。物体の形状も色も硬さも、そのほか一切の質はすべて捨像されている。

しかも、質量は量である。それは物体の置かれている場所とは無関係にいつでもどこでも常に同じ量である。地上にあっても宇宙に投げ出されても不変な量である。このような量を人間は直接把握することはできないであろう。それは日常の経験からかけ離れているので、日常の経験から帰納された言葉ではない。その意味では、質量は非経験的言語であり、その内容を本稿では表象と呼ぶが、非経験的表象であり、非常識的表象と呼ぶことができる。

ところが、本章第三節で示したところにより、質量は物体の重さ、すなわち重量と比例することが判明する。これによって、質量は重量という経験的用語で置換できるのである。ニュートンの非凡の才が洞察した結果である。

ニュートンの運動の第一法則（慣性の法則）によれば、物体は力を加えられないかぎり、静止しているか、等速直線運動の状態にある。等速直線運動をしているとき、物体には何ら力が

働いていないにもかかわらず動きつづけている。これは、もちろん、アリストテレスの運動の原理を完全に否定するものである。かれの原理では、動いているものには、すべて動かすものが必要にならないからである。

さてどちらが妥当であろう。人間の通常の経験からすれば、生き物でもないかぎり、物体に何ら力が作用していないにもかかわらずひとりでに動き続けることなどありえないと判断するのである。この判断は、S. ピンカーによれば、むしろ人間の生得的判断である⁴⁷⁷。そうであればアリストテレスの運動の原理の方が人間の普通の経験に根差しているのである。

ボールを真上に投げる。ボールは上昇し、最上点に達し、下降する。この間、ボールにどのような力が働いているか、現在でも正しく答えられる人はどのくらいいるだろうか。

ひるがえって、ニュートンの慣性の原理を地上にあって直接経験できるような出来事はほとんど不可能であろう。B. ブルースが指摘するように、

「運動の第一法則は、巧妙に述べられていて他のいかなる（ニュートンの）法則とも同じくそれを直接証明することはできない。私どもは第一法則の言明を正当化するのに十分な長時間の観察を行ったこともなければ、物理学者たちがそれを実証し得るような実験装置を発明したこともない。ニュートンの主張は、あることの結論ではなく、一つの仮定である⁴⁷⁸。」

それ自体を立証することのできない命題は、一つの仮説であるといっても過言ではあるまい。その意味では、慣性の法則自体も経験から抽象されたものではなく非経験的言語であり、非経験的表象をもつというべきであろう。

しかし、それはニュートンの力学理論の第一位におかれている法則である。それに相当する

何らかの正当化ないし有効性が必要である。

そのためにはどうすればよいか。

再び、ブルースの言を借りれば、「第一法則の有用さは、かれの他の法則と組み合わせるとき初めて現れる⁴⁻⁷⁹⁾」のである。他の法則とは、第一法則に続くすべての法則を指すであろう。それは単独では価値がわからないのだ。

② 力と運動方程式

『プリンキピア』では、第二法則において力の実体が明らかにされる。それは力の運動方程式：

$$f = \alpha m \quad (1)$$

である。ここに α は加速度、 m は質量、 f は力を表す。

このとき、力 f は加速度 α と質量 m の積であり、ともに数値として表せるから、力も数値として表現される。ここで、もし加速度が時間の関数として表現されるならば、力もまた時間の関数として表されることになる。

ここで問題としたいのは、時間の関数としての速度および加速度である。

ニュートン力学においては、時間はガリレオにならぬ時間軸として数値化されている。数値化されていることは、実数の各数値に対し瞬間としての時間に対応していることを意味する。時間は実数区間として幅を有するとともに、大きさも幅ももたない瞬間から成るとされる。

ところで、瞬間が大きさをもたないとき、「瞬間における速度」とはどんな意味をもつのだろうか。

物体がある大きさの時間に、ある長さの距離を進んだとき、距離を時間で除して得られるのが平均速度である。これが普通、人間が理解しえる速度であろう。しかし、「瞬間における速度」というとき、瞬間は大きさをもたないので、人

間は瞬間を感覚することはできない。人間の感覚機能は、かならず大きさや幅をもつものに対してのみ反応するものであるからである。したがって、「瞬間における速度」も人間は感覚できないであろう。

したがってニュートン力学においては、「瞬間の速度」というものがあると仮定されているもの、あると期待されているものと考えべきであろう。「瞬間における加速度」についても同様である。これは感覚上「瞬間の速度」よりさらにいっそうつかみにくい概念である。それはあると仮定されている量と考えるべきであろう。

以上の論議は、運動方程式の力についても同様である。方程式(1)において、力は、瞬間における加速度という仮説的性格をもつ表象と、質量という非経験的表象によって作られているものであり、力それ自体が仮説的性格をもっている。人間が普通に経験する力は、かならず時間的幅の上で働くのであって、瞬間という幅のない時間の上では何も作用するはずがないのである。

したがって運動方程式は、力は他に対し、瞬間ごとに作用して物体に瞬間における加速度を起こさせるものとして考えていこう、という一種の取り決め、一つの約定ということができる。いわば理論の前提である。理由はとにかくとして、この方程式を理論の前提、公理として設定していこうというものである。

③ 万有引力定理

ニュートン力学において最も重要な力、万有引力については、上の第二節で示したように、太陽を焦点とする惑星系の運動から帰納的に導かれたとはいえ、引力を宇宙空間の物質全体にまで適用できるとする言明は仮説であることをまぬがれないであろう。

ここでも、ブルースの言葉を採れば、「私どもは重力(万有引力)そのものを直接体験したこ

ともなければ、立ったり歩いたりするときに、地球に向って引っ張られていると案じたこともない。力が、中間に何の仕掛けもないのに、ある距離を隔てて作用するとの考え方も経験に根差したものではない⁴⁻⁸⁰⁾」のである。重力の存在については、人間の直接的経験は何らの正当化を与えないのし、離れた物体の間に引力が存在するという考えは、何よりも人間の経験に反しているのである。

したがって、この力については『プリンキピア』発表の当時から、とくに大陸において、ニュートンは物体に科学では認められない神秘的な「オカルト（隠れた力）」を与えているという強い批判があった。十七世紀の高名な哲学者ライプニッツはその代表である。また、疑うことのできない明らかな命題から思索を展開することを眼目にしていたデカルトにとっても、決して容認できない力の表象であった。

以上①、②、③の論議からすると、『プリンキピア』の基盤を構成する力学の基本法則が、すべて非経験的言語ないし非経験的命題（定理）から成ることがわかる。これらは、多数の人間の日常の経験から抽出されたものではなく、むしろ一人かあるいは少数の人間の非凡な洞察から生まれたとみなされるであろう。とくに万有引力の定理は、その感を深くする。

これらの言語は、経験をいかに多く積み重ねても、自然をいかに深く観察してもけっして得られないものであろう。

しかし、ニュートン自身はこれらを仮説とは考えていなかったと思われる。『プリンキピア』第二版の最後に「一般注」がある。ニュートンはそこで、デカルトの宇宙渦動説を批判する一方、自分の重力説の弁明を試みている。そこに有名な「私は仮説をつくらない⁴⁻⁸¹⁾」という言葉のこしている。この文言の意味は前後の文脈から、重力の原因については、自分は仮説をつ

くらない、と主張しているものと考えられる。実際、かれは『プリンキピア』で重力の存在を主唱しても、その原因についてはほとんど言及していないのである。

また、「仮説をつくらない」の文に続いて次の文面がある。

「実際の現象から導き出されないものはすべて仮説と呼ばれるべきものだからである。そして仮説はそれが、形而上的なものであれ、形而下的なものであれ、・・・実験哲学においては何らの位置を占めるものではないからである。この哲学では特殊な命題がじっさいの現象から推論され、のちに帰納によって一般化されるのである。このようにして物体の不可入性、・・・また、運動の法則や重力の法則が発見されたのである⁴⁻⁸²⁾。」

これによれば運動の法則や重力の定理は実際の諸現象から推論され帰納されたものである。筆者の思うに、慣性の法則は、落体の法則と組み合わされて放物体の運動から、運動方程式は、落下運動や振子の実験から、万有引力の法則は、太陽を巡る惑星系の運動からそれぞれ帰納され一般化されたものと考えられる。それが法則ないし定理として設定されたものである。

しかし、結局のところ、少数の事例から帰納された法則は、確立され立証されたものではない。仮説の地位に止まらざるをえないであろう。

『プリンキピア』の力学は、これら仮説を土台として形成されたにもかかわらず、批判に耐え、やがて近代科学の盤石の基盤となった。なぜだろうか。

その理由は、なにより、『プリンキピア』の理論が天と地の物体の運動を同一の原理によって正確に描くことに成功したからである。それが『プリンキピア』第三編である。ニュートンは理論の正当化のために、神のような超越的表象をもち出すことはしなかった。その代わり、人

間が行う実験と観察に根拠を求めたのである。第三編におけるおびただしいデータの収集は、かれが自説を実験と観察の上に置こうとした強い意志の表現であろう。

『プリンキピア』は、一言でいえば、少数の非経験的言語と命題を用いて天地にまたがる多数の事実を説明することに成功したのである。天が動き地が静止するという常識を非常識的言語によってくつがえしたのである。常識をくつがえすには非常識の言語をもってあたらねばならないということであろう。それによってこそ人間は認識を拡大することができるのである。

なぜなら、常識をくつがえすことは、他方、新しい「真実」を手に入れることでもあるからである。これまで気づくことのなかった「真実」に気づかされることである。コペルニクス、ブラーエ、ケプラー、ガリレオ、ニュートンらの発見も日常の経験や常識を越えたところに「真実」を求める強固な意志の上にはたされたのである。実用ないし効用を重視する心性からは生まれなかったであろう。

ルネサンスの画家たちが、三次元のものを二次元のカンバスに正確に描写する技法を編み出し、自然や人間を詳細に描くことに成功したように、かれら科学者たちは自然の運動を、経験を越えた非常識的言語を作り出すことによって、書冊の上に正確に記述することに成功した。

その際に、とくにガリレオとニュートンによって用いられたのが**仮説演繹法**と呼ばれる方法である。ニュートン自身はこの方法を自覚していなかったであろう。かれは上に述べたように、自分は仮説を作らなかつたと信じていたからである。

再び強調するが、非常識的言語が有用であることを立証するためには、それを裏付けるものがなければならない。それが実験や観測が要求される理由である。近代科学が実験と観測を不

可欠とするのも、その理論において常識を超える言語や命題を含んでいるからである。

一般に、多くの経験を基に人間の抽象の能力によって一般的命題を得る方法を**本来的帰納法**と呼べば、仮説演繹法は、逆に一般的命題を基に、それに整合する事実を観測や実験を通して集める。

両者の論理構造を図式化すると次のようになる。

I 本来的帰納法の構造



II 仮説演繹法の構造

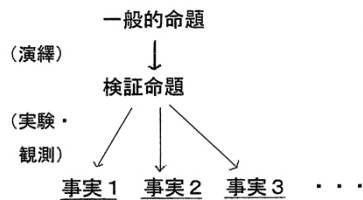


図16 本来的帰納法では事実の集積があつて一般的命題が得られる。仮説演繹法では検証命題の下で事実が観測や実験を通して集められる。

本来的帰納法は、F. ベーコン (1561-1626) が主導した知識獲得の方法である。しかし、かれはコペルニクス地動説にまったく関心を示さず、ガリレオの落体の法則に関する仮説も拒否し、終生、近代科学とは無縁であつた⁴⁻⁸³⁾。

仮説演繹法もまた、一般的命題の信頼性を高めるためには、検証命題に適合する事実を集めなければならない。そこでは、一般的命題を決めたのちに、事実を収集する。本来的帰納法とは事実に対する姿勢が逆である。その意味では、仮説演繹法は**転倒した帰納法**といふことができよう。しかし、経験できない「隠れた真実」あるいは「常識を超えた真実」を得るためには、現在までに仮説演繹法が最も有効である。これは、近代科学の成立以後の科学の歴史が示すこ

とでもある。物理学を離れて重要な事例を一件あげれば、十八世紀末にフランスのラヴォアジエが酸素元素の仮定の下で燃焼に関する近代化学理論を作り上げたこと、さらにそれを継承して、十九世紀に入って、イギリスのドルトンが原子仮説を土台として物質反応の理論を提唱し近代化学を発展させたことで十分であろう。ここはこれ以上を語れる場所ではない。

最後に一つ問いを提示させていただきたい。

人間は、自然や人間に関する「真実」としての一般的命題を、事実や経験を経ることなく獲得できるだろうか。

要するに、人間は、自然や人間に対する「正しい」認識を、上記Ⅰの**本来的帰納法**、ないし、Ⅱの**転倒した帰納法**に依らないでも獲得できるだろうか、という問いである。

カントはどう答えるだろう。ラッセルやウィットゲンシュタインは、アメリカを代表する哲学者W.V.O.クワインやH.パトナムは。そして皆さんは。

エピローグ

十七世紀近代科学の成立の結果、不生不滅かつ不変で永遠に円運動を続ける「貴くて神的な」月上界と、生成消滅と変化をくりかえし、上下の直線運動をする「卑しく低俗な」四元素から成る月下界というアリストテレスの二元的宇宙観は瓦解した。同時に、かれが設定した二つの運動原理-「動くものには動かすものがある」と「動くものと動かすものはいっしょにある」-は、運動物体に関しては完全に否定された。前者は「慣性原理」によって、後者は「万有引力定理」によって。かくしてアリストテレス「自然学」は崩壊したのである。

これは、イタリアルネサンス以来人間が追及してきた正確な自然描写と、運動物体の正確な把握という目標の達成の代償としてみなされよ

う。しかし、廃れたものは、それだけではないであろう。すでに60年前、A. コイレは、近代科学の成立に伴って起きた事態を次のように述べている。

「科学的・哲学的な革命というプロセスは、一言でいえばコスモスの破壊を結果したものでいえるのである。一つの限りある、閉ざされた、階層的に秩序づけられた全体としての世界観、価値の位階が存在の位階と構造を決定し、暗くて重い、不完全な地球から上に上るにしたがって、ますます完全になり、聖なるものになってゆく星と天球との全体—こうした世界観は哲学的にも科学的にも全く堅固なものであったが、この科学革命の結果、崩壊してゆき、それに代わって不明確で限りのない宇宙(universe)現れてきたのである。・・・こうしたコスモスの破壊が意味するのは、即ち、価値概念に基づく一切の考慮、それは例えば、調和、完成、意味、目的といったものであるが、それら一切のものが、科学思想によって排除されたということ、つまり存在から価値が剥奪され、価値の世界と事実の世界が分離されたことを意味するのである⁴⁻⁸⁴⁾。」

コイレの言がどこまで核心を得ているか定められないが、科学革命が目的論に彩られた統一的世界観を滅ぼし、人間は世界の限定された部分、ばらばらにされた局所的場面の探究に向うようになったことは否定できないであろう。実際、ニュートン力学は、すべての存在を、質量をもつ物体と限定した上で、物体の運動を正確に描くことに成功したのである。そこでは、人間も海水も鉄塊も月も惑星もすべてを、同質同等なもの規格化し、主として重力のもとでそれら物体がとる運動が詳細に記述される。

しかし、アリストテレスであれば、それが人間にとってどんな意味があるのだと問うであろう。天地の物体運動の正確な把握が行われたと

しても、宇宙と自然が人間に対してもつ意味がわかるわけではないし、人間がいささかも解明されたわけではない。いや一片の葉さえ理解されたわけでもない。わかったのは物体運動という限局された一面だけではないか。

筆者はここで、近代科学を批判するものではない。すでに述べたが、西欧近代科学は人類が成し遂げた偉大な仕事であることに変わりはない。また、それに代わって、人間は世界の統一の有機的全体像を探究すべきだと主張しているわけでもない。そのようなことは、すでにカントやマルクスの哲学が試みているとも考えられし、同様な試みは今後も行われるであろう。人間はつねに全体像を求める本性をもっているからである。近代科学は世界の画定された一部面を明らかにしたが、同時に、人間はひたすら自然の限定された部分を精細かつ正確に把握する方向に突き進むようになったということである。正確さは‘真理’を表し、‘真理’、すなわち、「知識は力なり」(E.ベーコン)の信条のゆえであろうか。その結果、人類は月面に降り立ったが、反面、核爆弾を手にし、いつでも人間を大量に虐殺し、大地を人間の存在を許さぬ土地に変える力を持つに至っている。原発もときに同様な力を振うであろう。人類は自らを高度の文明と極度の危機と不安に満ちた空間に閉じ込めてしまった。

脱出せねば!?

だが、時は人間にどんな楽観も許さぬかのようだ。

最後に一言。

本稿は西欧近代科学がどのような経過を経て西欧で興起したかを描くことを目的としてきた。この科学は古代ギリシアに源流をもち、中世西欧へ流入しキリスト教神学との融合した後、ルネサンス運動を経て、最終的にはニュートンの

『プリンキピア』において成立した。現代科学は、その成果の上に立って、あるいはそれに刺激されて、広大な分野で驚嘆すべき発展を遂げている。物理学に限っても相対性理論や量子力学はニュートン力学では扱われなかった分野にも光を投じている。

ここで今、もしソクラテスが再生し、上は宇宙の歴史から下は遺伝子や原子の構造まで現代科学のすべてを理解したとしたら、かれは何と言うであろう。

かれの答えを一言でいうには、大きな危険を伴わずにはいられないが、それでも、かれは「私は何も知らない」と答えると筆者には思われる。その意味することは、人間は、変転やむことなき世界の、人間とは関係のない、人間から独立した不変の「真実」を、ついに知ることにはできない宿命の下にあるのだということではなからうか。人間の言語による認識には確たる限界があるのである。これは、しかし、別の論考で語られるべきであろう。それは本来、哲学が担う仕事である。

注]

序文

1-1) 近代科学誕生に関する文献は、これまでに日本においても多数出版されている。ここでそれらを列記するのは控えよう。あまりに多いからである。筆者自身はそのほとんどに目を通したと思っているので、研究論文としては、それら文献の見解と筆者のものとの相違にも触れるのが理想であるが、そのようなことはあえてしなかった。その理由は、それを行うと紙幅が大幅に増える怖れがあることと、筆者自身の見解をできるかぎり、ストレートに、かつ、わかりやすく、伝えたかったからである。ただ、次の二つの著書からは、重要な示唆を受けたことは記しておきたい。

I.B.コーエン『近代物理学の誕生』吉本市訳、河出書房(株)、1967年

- H.バッターフィールド『近代科学の誕生』(上)(下)
渡辺正雄訳、講談社学術文庫、1978年
- また、伊東俊太郎『近代科学の源流』、『十二世紀ルネッサンス』からは、古代ギリシア科学の西欧への移転および、アリストテレスの中世カトリック神学への大きな影響について教えられることが多くあったことも記しておく。
- プロローグ**
- 1-2) R.グレーヴス『ギリシア神話』上、高杉一郎訳、紀伊国屋書店、1980年、p. 23
- 第一章**
- 1-3) 『ソクラテス以前哲学者断片集』第Ⅱ分冊、岩波書店、1997年、[付言]。以下では『断片集』と略記
- 1-4) 『断片集』第Ⅰ分冊、1996年、p. 134
- 1-5) 同上、p. 135
- 1-6) 同上、p. 151
- 1-7) 同上、p. 150
- 1-8) 同上、p. 156。カントもこのことに言及している。カント『純粹理性批判』(上)、篠田英雄訳、岩波文庫、p. 28
- 1-9) 『断片集』第Ⅰ分冊、p. 143
- 1-10) 同上、p. 165
- 1-11) 同上、P. 184
- 1-12) 同上、P. 295
- 1-13) 同上、P. 296
- 1-14) 同上、第Ⅱ分冊、P. 185
- 1-15) 同上、第Ⅱ分冊、p. 163
- 1-16) 同上、第Ⅱ分冊、p. 198
- 1-17) 『アリストテレス』世界古典文学全集16、筑摩書房、1966年、p. 139
- 1-18) 同上、p. 154
- 1-19) J. アクリル『哲学者アリストテレス』、藤沢令夫、山口義久訳、紀伊国屋書店、1985年、p. 30
- 1-20) 同上、p. 31
- 1-21) 「古来アリストテレス研究者たちによって問題にされ、最も多く議論され、今もなお一致した解決をみない箇所」もある。山本光雄『アリストテレス』岩波新書、1977年、p. 104
- 1-22) J. アクリル、既出、p. 29
- 1-23) 東洋の一学徒にすぎない筆者が翻訳や研究書に依りながらも、アリストテレスの所説をそうおうに理解できるのは、翻訳者の学殖と労苦のおかげであるが、アリストテレスのことばの平易さと明瞭性にも負うであろう。
- 1-24) E. ブレイエ『ギリシアの哲学』渡辺義雄訳、筑摩書房、1985年、p. 269
- 1-25) 山本光雄、既出、p. 70
- 1-26) 『アリストテレス全集』3「自然学」、岩波書店、1993年、p. 6
- 1-27) 同上、p. 267
- 1-28) 同上、p. 272
- 1-29) 『アリストテレス』世界古典文学全集、既出、p. 392
- 1-30) 山本光雄、既出、p. 57
- 1-31) 山本光雄、既出、p. 32
- 1-32) 『アリストテレス全集』3、既出、p. 329
- 1-33) 同上4、pp. 39-40
- 1-34) 「三つの学問分野があることになる。その一つ(神学あるいは第一哲学)は、不動のものを扱い、他の一つ(天文学)は、動かされるものであるが、不滅のものを扱い、もう一つ(狭義の自然学)は、[動かされるとともに]滅びるものを扱うのである。『アリストテレス』世界古典文学全集、既出、p. 338。W. F. バイナム『歴史でわかる科学入門』藤井美佐子訳、太田出版、2013年、p. 47
- 1-35) 『アリストテレス全集』4[天体論]、既出、p. 101
- 1-36) 山本光雄、既出、p. 55
- 1-37) 同上、pp. 40-1
- 1-38) 『アリストテレス全集』3、既出、p. 76
- 1-39) 山本光雄、既出、p. 46
- 1-40) 『アリストテレス全集』12[形而上学]、岩波書店、1994年、p. 431
- 1-41) 『アリストテレス全集』4[天体論]、既出、p. 14
- 1-42) 『アリストテレス全集』3、既出、p. 75
- 1-43) 同上、p. 76

- 1-44) J. アクリル、既出、p. 112
 1-45) 同上、p. 111
 1-46) 同上、p. 115
 1-47) 山本光雄、既出、p. 50
 1-48) 『アリストテレス』世界古典文学全集、既出、p. 392
 1-49) 同上、p. 392
 1-50) 同上、pp. 394-5
 1-51) 同上、pp. 384-400
 1-52) 『アリストテレス全集』3、既出、p. 170
 1-53) 同上、p. 188
 1-54) 佐々木力『数学史』、岩波書店、2010年、pp. 184-186。
 ダンネマン『大自然科学史』第二巻、安田徳太郎編・
 著、三省堂、1972年、pp. 14-5
 1-55) ユークリッド『原論』、中村幸四郎、共立出版、1971
 年。世界の名著第九巻『ギリシアの科学』、池田美
 恵訳、中央公論社、1972年、pp. 251-381
 1-56) E. オマール『ピタゴラスの定理』伊里由美訳、
 岩波書店、2008年、p. 37。
 1-57) 『原論』の成立過程については、上の佐々木力、
 第二章が詳しい。
 1-58) 佐々木力、既出、pp. 198-207
 1-59) 世界の名著『ギリシア科学』、既出、p. 480
 1-60) 佐々木力、既出、p. 186
 1-61) たとえば、D.C. リンドバーク『近代科学の源をた
 どる』高橋憲一訳、朝倉書店、2011年、pp. 96-9
 1-62) D.C. リンドバーク、既出、pp. 99-102
 1-63) 主に、後掲の『アルマゲスト』である。
 1-64) 広瀬秀雄『天文学史の試み』、誠文堂新光社、1981
 年、pp. 73-80
 1-65) プトレマイオス『アルマゲスト』藪内清訳、恒星
 社厚生閣、1982年
 1-66) H. バターフィールド『近代科学の誕生』(上) 渡
 辺正雄訳、講談社学術文庫、1978年、p. 57
 1-67) 広瀬秀雄、既出、pp. 85-7
 1-68) 『アルマゲスト』、既出、p. 6
 1-69) 藤井旭『星空の四季』誠文堂新光社、1987年、p. 79
 1-70) T. クーン『コペルニクス革命』常石敬一訳、講談
 社学術文庫、2000年、pp. 107-8
 1-71) コペルニクス『天体の回転について』矢島祐利訳、
 岩波文庫、p. 30. p. 108
 1-72) 同上、p. 117
 1-73) 『アルマゲスト』、既出、p. 13
 1-74) 同上、p. 14
- ## 第二章
- 2-1) 佐々木力、既出、p. 220
 2-2) 同上、p. 221。E. ギボン『ローマ帝国衰亡史』7、
 ちくま学芸文庫、1996年、筑摩書房、p. 149
 2-3) C.H. ハスキンス『十二世紀ルネサンス』別宮貞徳・
 朝倉文市訳、みすず書房、1997年、pp. 234-5
 2-4) 岩波講座『世界歴史』8、1969年、岩波書店、pp. 5-7
 2-5) 同上、p. 7
 2-6) 伊東俊太郎『近代科学の源流』中公文庫、2007年、
 中央公論社、p. 78
 2-7) 同上、p. 174
 2-8) ダンネマン『大自然科学史』3、安田徳太郎訳編、
 1981年、三省堂、pp. 17-8
 2-9) 同上、p. 16
 2-10) 佐々木力、既出、p. 262
 2-11) 同上、p. 271
 2-12) 伊東俊太郎、既出、p. 178
 2-13) 同上、p. 180
 2-14) ダンネマン、既出、pp. 51-2
 2-15) ダンネマン、既出、pp. 53-4
 2-16) 同上、p. 55
 2-17) 伊東俊太郎、既出、p. 204
 2-18) ダンネマン、既出、p. 43
 2-19) 伊東俊太郎、既出、p. 204
 2-20) 同上、既出、p. 252。
 2-21) 伊東俊太郎『十二世紀ルネサンス』、2006年、講
 談社学術文庫、p. 98
 2-22) C.H. ハスキンス『十二世紀ルネサンス』別宮貞徳、
 朝倉文市訳、1997年、みすず書房、P. 286
 2-23) 同上、p. 180
 2-24) 同上、p. 181

- 2-25) 同上、pp. 200-3
- 2-26) 本稿が一般の科学史であれば、ガレノスとアヴィケンナについては、多くを述べなければならない。しかし、ここでは簡単な紹介のみにとどめる。ガレノスは紀元二世紀の人で、小アジアのベルガモンで生まれ、各地で医学、外科学、薬物学を学んだ後、ローマで開業した。医者として働いたわら数百編に上る著述を行い、ヒポクラテス以来のギリシア医学を集大成した。その学説は千数百年にわたってアラビアおよび西欧の医学界を支配した。
- 以上、川喜多愛郎『近代医学の史的基盤』(上) 岩波書店、1999年、第四章
- アヴィケンナは哲学者、医学者、科学者、また、詩人としてイスラム学芸の絶頂にたつ偉大な学者であった。政治家として医師として活躍する一方、アリストテレス主義者であり、著作は百五編に上り、哲学者、神学者、医学者としてかれの影響は大きかった。大著『カノン (医学典範)』はガレノス流の解剖学、生理学をはじめ、病理学、養生法、病気治療法を詳しく論じていて、西欧近代に至っても大きな影響を持っていた。川喜多愛郎、同上、第六章。
- 2-27) 伊東俊太郎『十二世紀ルネサンス』、既出、p. 188
- 2-28) ダンネマン、既出、p. 83
- 2-29) K. リーゼンフーバー『西洋古代・中世哲学史』、2000年、平凡社、p. 289
- 2-30) 伊東俊太郎『近代科学の源流』、既出、p. 266
- 2-31) 同上、『十二世紀ルネサンス』、既出、pp. 200-203
- 2-32) 伊東俊太郎『近代科学の源流』、既出、p. 267
- 2-33) 同上、『十二世紀ルネサンス』、既出、p. 286
- 2-34) C. H. ハスキンス、既出、p. 283
- 2-35) 同上、p. 284
- 2-36) 同上、pp. 284-5
- 2-37) 同上、p. 286
- 2-38) 同上、p. 294
- 2-39) 同上、p. 291
- 2-40) K. リーゼンフーバー、既出、p. 260
- 2-41) 同上、p. 261
- 2-42) 同上、p. 265
- 2-43) 同上、p. 266
- 2-44) 同上、pp. 275-6
- 2-45) 同上、p. 276
- 2-46) 同上、p. 276
- 2-47) 同上、p. 276
- 2-48) 伊東俊太郎『近代科学の源流』、既出、p. 295
- 2-49) K. リーゼンフーバー、既出、p. 267
- 2-50) 同上、p. 289
- 2-51) 同上、p. 309
- 2-52) T. アクイナス『神学大全』高田三郎訳、創文社、1974年
- 2-53) C. H. ハスキンス、既出、p. 294
- 2-54) K. リーゼンフーバー、既出、p. 309
- 2-55) 稲垣良典『トマス・アクイナス』講談社学術文庫、1999年、p. 482
- 2-56) 伊東俊太郎『近代科学の源流』、既出、p. 299
- 2-57) B. ラッセルによれば、「カトリックの聖職者たちは、哲学に関するかぎり、聖トマスを受け入れなければならない。」また、「カトリック教徒の間では、純粋に哲学的な事柄についてアリストテレスを批判することが、ほとんど不信仰であるかのように考えられている。』『西洋哲学史』2、市井三郎訳、みすず書房、1995年、p. 446-7。なお、原典『History of Western Philosophy』は1946年出版。
- 2-58) ハスキンスはギボンならそう言うであろうとしている。C. H. ハスキンス、既出、p. 284

第三章

- 3-1) J. C. ブルックハルト『イタリア・ルネサンスの文化』柴田治三郎訳、中央公論社、1966年、第IV章
- 3-2) H. バターフィールド『近代科学の誕生』(上) 渡辺正雄訳、講談社、1978年、p. 74
- 3-3) 佐々木英也、富永良子責任編集『ゴシック』2、世界美術大全集西洋編10、小学館、1992年p. 87
- 3-4) M. ドヴォルジャック『イタリア・ルネサンス美術史』(上巻) 中村茂夫訳、岩崎美術社、1990年、p. 21
- 3-5) 同上、p. 22-3

- 3-6) 同上、p. 30
- 3-7) 同上、p. 31
- 3-8) この彗星はハレー彗星とみなされている。欧州宇宙機関(ESA)は1985年ハレー彗星の大接近に伴い観測のために探査機を打ち上げた。探査機は、画家ジョットに敬意を表し「ジョット」と命名された。
- 3-9) 佐々木英也、森田義之編著、同上、pp. 143-44
- 3-10) ドヴォルシャック、既出、p. 39
- 3-11) M. ヴェトラム『ルネサンス美術』西洋美術史8勝邦興訳、1998年、グラフィック社、p. 11
- 3-12) 佐々木英也、森田義之責任編集『イタリアルネサンス』1、世界美術大全集11、小学館、1992年、p. 357
- 3-13) G. R. テイラー『生物学の歴史』1、矢部一郎、江上生子、大和靖子共訳、みすず書房、1976年、p. 13
- 3-14) R. ハクスリー『西洋博物学者列伝』植松靖男訳、悠書館、2009年、p. 46
- 3-15) W. ブラント『植物図譜の歴史』森村謙一訳、八坂書房、1986年、p. 57
- 3-16) 同上、p. 62
- 3-17) 同上、p. 60
- 3-18) 同上、p. 62
- 3-19) G. R. テイラー、既出、p. 18
- 3-20) 同上、p. 19
- 3-21) 同上、p. 20
- 3-22) A. C. クロムビー『中世から近代への科学史』(下) 渡辺正雄、青木靖三共訳、コロナ社、1968年、pp. 67-8
- 3-23) 伊東俊太郎『近代科学の源流』、既出、p. 320
- 3-24) 有澤 隆『図説時計の歴史』河出書房新社、2006年、p. 17。ちなみに、ホイヘンスが正確な振り子時計の制作に成功したのは、1656年のことである。それでも一日に10分程度の誤差が出たという。
- 3-25) 都築正信「パタンと表象」Ⅲ(空間と時間)、埼玉大学紀要 教養学部 第51巻(第2号)、2016年、pp. 192-200
- 3-26) O.ギンガリッチ編集代表『コペルニクス』林大訳、大月書店、2008年、p. 88
- 3-27) 『回転について』は、上の矢島訳と高橋憲一訳『コペルニクス・天球回転論』みすず書房、1993年がある。ただし、いずれも翻訳は第一巻のみである。高橋の訳書には非常に詳しい訳注が付けられている。引用については、筆者自身が古くから親しんでいた矢島訳を採用した。
- 3-28) 矢島訳『回転について』、既出、pp. 15-16
- 3-29) ローマの独裁官G. J. カエサルはb. c. 47年、一年を365. 25日とする暦を制定した。この暦の一年は真の一年に比べほんの少し長かった。このずれのため、カエサルの時分には、春分の日が3月23日頃であったが、1500年も経過すると、それが3月11日頃になってしまった。カトリック教会は宗教上の動機から暦の改革を行う必要があったのである。実際の改暦は1582年に実行されたが、当時、まだカトリック教会も世間も大勢として天動説の下であった。現在、広く使用されているのはこの暦である。
- 3-30) 矢島訳『回転について』、既出、p. 16
- 3-31) 同上、p. 17
- 3-32) 同上、p. 28
- 3-33) 同上、p. 27
- 3-34) 同上、p. 40
- 3-35) 同上、第十章、pp. 42-7. 広瀬秀雄『天動説から地動説へ』国土社、1979年、p. 173-4
- 3-36) I. B. コーエン『近代物理学の誕生』、既出、pp. 65-6. なお、高橋憲一訳の同上書(p. 64)には、やや詳しいデータが算出してある。
- 3-37) T. クーン『コペルニクス革命』常石敬一訳、講談社学術文庫、1989年、p. 219, p. 281。山本義隆『世界の見方の転換』2、みすず書房、2014年、pp. 420-3
- 3-38) 広瀬秀雄『天文学史の試み』誠文堂新光社、1981年、p. 119
- 3-39) アルフォンス表：カスティリア(スペイン)の国王アルフォンス十世(152-84在位)の奨励の下で作成された惑星の表。プトレマイオスのものの改良版として使われた。I. アシモフ『科学と発見の表』小山慶太、輪湖博訳、丸善(株)、1996年、pp. 64-5. プロイセン表：ドイツの数学者E. ラインホルト

- (1511-53)はコペルニクスの計算法を取り入れ、精度を高めた惑星表を完成した(1551年)。スポンサーであったプロイセン公爵にちなんでプロイセン表と呼ばれた。I. アシモフ、同上、p. 84
- 3-40) 山本義隆『世界の見方の転換』3、みすず書房、2014年、p. 792
- 3-41) 広瀬秀雄、既出、p. 124
- 3-42) 同上、pp. 126-8
- 3-43) 山本義隆、既出、pp. 884-5
- 3-44) 同上、p. 885
- 3-45) 同上、p. 886
- 3-46) T. クーン『コペルニクス革命』、既出、p. 320
- 3-47) 広瀬秀雄、既出、p. 134
- 3-48) 山本義隆、既出、p. 960
- 3-49) 同上、p. 964
- 3-50) J. ケプラー『宇宙の神秘』大槻真一郎・岸本良彦訳、工作社、2009年
- 3-51) A. ケストラー『ヨハネス・ケプラー』小尾信弥・木村博訳、河出書房新社、1971年、p. 53
- 3-52) J. ケプラー『新天文学』岸本良彦訳、工作社、2013年
- 3-53) 都築正信「ケプラーの火星楕円軌道について」埼玉大学紀要 教養学部 第32巻(第2号)2017年、pp. 263-278
- 3-54) 『新天文学』、第40章、p. 388
- 3-55) 同上、第59章、p. 542
- 3-56) 同上、第56章、p. 510
- 3-57) ケプラーは晩年天文表の作成に専念した。
- 3-58) J. R. ヴォーケル『ヨハネス・ケプラー』林大訳、大月書店、2010年、pp. 183-4
- 3-59) ヨハネス・ケプラー『宇宙の調和』岸本良彦訳、工作社、2009年
- 3-60) 同上、p. 507
- 第四章**
- 4-1) 豊田利幸責任編集『ガリレオ』世界の名著21、中央公論社、1977年、p. 34
- 4-2) 同上、p. 36
- 4-3) 同上、p. 219
- 4-4) ガリレオ『新科学対話』上、岩波文庫、1975年、p. 109
- 4-5) 同上、p. 110
- 4-6) 同上、pp. 110-1
- 4-7) 同上、p. 126
- 4-8) 青木靖三『ガリレオ・ガリレイ』岩波新書、1969年、p. 21
- 4-9) 青木靖三『ガリレイへの道』、平凡社、1980年、p. 22
- 4-10) ガリレオ『新科学対話』下、岩波文庫、1972年、p. 25
- 4-11) 同上、pp. 35-7
- 4-12) 十四世紀の中頃、オックスフォードのマートン・カレッジには、運動体について数学的に厳密な形で理解しようとする人たちが現れた。かれらは図14を横にしたものを使い、初速度がゼロで、速度が時間に比例して変わる運動体については、スタートからの到達距離が時間の平方に比例するという法則が成り立つことを主張した。これからガリレオの「落体の法則」までは容易である。しかし、かれらは、これらの法則について、実際の場に適用するという考えは、いっさいなかった。理論の世界にとどまっていたのである。A. J. クロンビー、既出、pp. 90-96。伊東俊太郎『近代科学の源流』、既出、pp. 310-1
- 4-13) ガリレオ『新科学対話』下、既出、p. 42
- 4-14) 同上、pp. 42-3。ガリレオのこの実験は、かつて板倉聖宣によって再現された。その記録は次にある。板倉聖宣『ぼくらはガリレオ』岩波書店、1972年、本稿本文の単位はそれに従う。再現実験では、ガリレオの記述とほとんど同じ結果が得られている。科学史家のA. コイレは、ガリレオの実験を「なかったし、無価値である」と断じている(佐々木力『科学革命の歴史構造』上、岩波書店、1990年、p. 177)。しかし、実験の詳細な記述と、再現実験の結果から、ガリレオは実際に実験を行い、所期の目的を達成したものと考えられる。

- 4-15) ガリレオ『天文対話』(下) 青木靖三訳、岩波文庫、1977年、p. 222-6
- 4-16) ガリレオ『新科学対話』(下) 今野武雄・日田節次訳、岩波文庫、1972年、pp. 152-3
- 4-17) ガリレオ『星界の報告』山田慶児、谷泰訳、岩波文庫、1976年
- 4-18) この書の中の最も重要な「第二書簡」が『星界の報告』に収録されている。
- 4-19) ガリレオ『星界の報告』、既出、pp. 18-9
- 4-20) 同上、pp. 34-5
- 4-21) 同上、p. 42
- 4-22) 同上、p. 37
- 4-23) 同上、p. 40
- 4-24) 同上、p. 167
- 4-25) ガリレオ『天文対話』上、下、青木靖三訳、岩波文庫、1977年
- 4-26) 豊田利幸責任編集『ガリレオ』、既出、p. 119.
- 4-27) 同上、p. 120
- 4-28) ガリレオは月の海水に対する作用は副次的なものと考えた。決定的な誤りは、干満が地球の反対側でも同時に起こることを否定したことであろう。このため地中海の干満は一日に一度しか起きないとしたのである。ガリレオ『天文対話』下、既出、p. 196
- 4-29) 広瀬秀雄、既出、p. 174
- 4-30) 豊田利幸責任編集、既出、p. 172
- 4-31) 同上、p. 173
- 4-32) 幸いなことに、『プリンキピア』の邦訳が二通りある。一つは、中野猿人訳注、講談社、1977年。他は、河辺六男責任編集『ニュートン』、世界の名著31、中央公論社、1997年である。本稿での引用文は河辺六男による。なお、河辺の本には、ニュートンは、ガリレオの著作を勉強していた時期の前後に、デカルトの『哲学原理』を読み、また、当時の水準的な数学書を熟読し、さらにバロウによる『エウクリデス幾何学原論』を学び、伝統的な演繹的証明形式をくりかえし読んだ、ことが書かれている。
- 4-33) 河辺六男編『ニュートン』、既出、p. 60
- 4-34) 同上、p. 60
- 4-35) 同上、p. 60
- 4-36) 同上、p. 61
- 4-37) 同上、p. 61
- 4-38) 同上、p. 63
- 4-39) 同上、p. 72
- 4-40) B. グレゴリ『物理と実在』亀淵迪訳、丸善、1993年、p. 42
- 4-41) 河辺六男編『ニュートン』既出、p. 72
- 4-42) 同上、p. 73
- 4-43) 同上、p. 79
- 4-44) 同上、p. 97
- 4-45) 同上、p. 99
- 4-46) 同上、p. 102
- 4-47) 同上、p. 102
- 4-48) 同上、p. 102
- 4-49) 同上、p. 103
- 4-50) I. H. コーエン『近代物理学の誕生』吉本 市訳、河出書房、1967年、p. 217
- 4-51) 河辺六男編『ニュートン』、既出、pp. 402-3
- 4-52) 同上、p. 415
- 4-53) 同上、p. 30
- 4-54) 同上、p. 116
- 4-55) 同上、p. 117
- 4-56) 「物理学とは根本的に実験科学であり、すべての実験、すべての発見の中心には、測定と、その不確かさがある。」W.ルーウィン『これが物理学だ!』東江一紀訳、文芸春秋(株)、2014年、p. 50
- 4-57) 河辺六男編訳『ニュートン』、既出、p. 325
- 4-58) 江沢 洋『物理学は自由だ』[1]力学、日本評論社、2004年、p. 72
- 4-59) 河辺六男編訳『ニュートン』、既出、p. 428
- 4-60) 本章第一節にあるガリレオの「等速落下の法則」の実験のためには、この理論的裏付けが必要である。
- 4-61) 河辺六男編訳、同上、p. 426
- 4-62) 1パリ・フートは約32.5cm(中野猿人訳『プリンシピア』、既出、p. 801)。1ラインは訳2.26mm(河辺

六男編訳、既出、p. 325)

- 4-63) 河辺六男編訳、既出、pp. 425-6, pp. 452-500
- 4-64) 同上、pp. 426
- 4-65) 同上、p. 426
- 4-66) 同上、p. 448
- 4-67) 同上、pp. 448-9
- 4-68) 同上、p. 452
- 4-69) 同上、pp. 495-500
- 4-70) 同上、p. 498
- 4-71) 山本義隆『世界の見方の転換』3, みすず書房、2014年、p. 830
- 4-72) 同上、p. 824
- 4-73) 河辺六男編、既出、p. 512
- 4-74) 同上、p. 529
- 4-75) 同上、p. 531
- 4-76) 同上、p. 555
- 4-77) S. ピンカー『心の仕組み』(中) 椋田直子・山下篤子訳、日本放送出版協会、2003年、p. 162
- 4-78) B. グレゴリー、既出、p. 42
- 4-79) 同上、p. 42
- 4-89) 同上、p. 41
- 4-81) 河辺六男編、既出、p. 584
- 4-82) 同上、pp. 584-5
- 4-83) P. ロッシ『魔術から科学へ』前田達郎訳、みすず書房、1999年、p. 264-5

エピソード

- 4-84) 末吉孝州「マキアベリと近代世界」史観、早稲田大学史学会、第73冊、1966年、p. 54. 出典は、Alexandre Koyré『From the Closed World to the infinite universe』(Haper Torchbook, New York, 1957), Introduction, pp. 3-4,