

# 振子の実験におけるガリレオとニュートン

## —近代力学理論の基盤形成について—

### Galileo and Newton on the Swing of the Pendulum: On the Formation of the Foundation of Modern Dynamics Theory

都 築 正 信\*

TSUZUKI Masanobu

ガリレオの発見にかかる、真空ではすべての物体が等しい速さで落下するという等速落下の法則は、かれのピサの斜塔の逸話とともによく知られている。しかし、その法則が近代科学の成立に際して果たした役割については、その逸話ほどには広く知られていない。本稿では、最初に、この法則を実証するためにガリレオとニュートンが行ったほぼ同様な振子の実験を検討する。次いでその検討を踏まえ、近代科学の頂点の一つであるニュートンの『プリンキピア』の理論の根幹をなす質量の概念と物体の運動方程式の両者が、地球表面におけるこの等速落下の法則を契機として生成されたと考えられることを指摘する。これによって等速落下の法則が近代科学の形成において偉大な役割をはたしことが了解されよう。

キーワード：等速落下の法則、振子の実験、質量と運動方程式

#### 序文

中心をもって回転する天体が、その中心に引かれた動径によって描く面積は時間に比例するという法則（ケプラーの第二法則）や、そのような回転する天体の周期が、半径の3/2乗に比例するときは、中心に向かう加速力（加速度）は半径の二乗に逆比例する、という有名な法則は、ニュートンが早くに理論的証明を与え、かれの主著『プリンキピア』の理論形成の上で太い支柱となったことはよく知られている。一方、『プリンキピア』は、このような天体運動から得られた理論だけで形成されたわけではないことに目を向けなければならない。

『プリンキピア』の理論編ともいべき第一編には、質量の概念や、三つの運動法則<sup>1</sup>が置かれている。とくに質量を含むいわゆる運動方程式（法則Ⅱ）は、力の近代的定義として、近代力学理論において中枢の位置を占めるものである。しかし、これらの質量概念や運動方程式は、天体運動の分析からだけでは導出されないことに留意する必要がある。

実際のところ、質量の概念は地上における物体の重量（重さ）の概念を介在して初めて明確

\* つづき・まさのぶ、埼玉大学名誉教授、西洋科学史・言語認識論

<sup>1</sup> 念のため、『プリンキピア』第一章にある三法則を述べておこう。法則Ⅰは、いわゆる慣性の法則で、すべての物体は外力を加えられない限り、静止の状態かあるいは等速直線運動を、そのまま続ける、というものである。法則Ⅱは、今日、運動方程式と呼ばれているもので、運動（運動量＝物体の速度と質量の積）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。これは、現在、力＝加速度と質量の積として理解されている。法則Ⅲは、作用反作用の法則で、力の作用に対し、反作用は常に相等しい、あるいは、二物体の相互の作用はつねに相等しく逆向きであるとするものである。これらは、いずれも自明である公理として理論の初めに置かれている。

にされ、把握できるものである。したがって、質量概念を含む運動方程式にしても、人間の経験できる重量を含む現象から獲得されなければならない。しかし、物体の重量は人間が地上においてのみ直接経験できる量である。このため、質量も運動方程式も地上の現象を通してこそ知られるものである。

では、ニュートンは、質量や運動方程式を地上のどのような現象から獲得したのだろうか。

それを解くカギは、ガリレオによって見出され、最終的にニュートンによって実証された等速落下の法則にあるというのが、本稿の趣旨である。これは、やや唐突で奇妙な見解に見えるが、以下の論述を一読されれば、それほど驚くべきものではないことが理解されるであろう。

## 1. 物体の落下運動

西欧は地上における物体の運動について、かつて、長い間アリストテレスの考え方に支配されていた。それは、重いものは地球の中心に向う下への直線運動を、軽いものは天に向う上への直線運動をするとし、なお、重いものほど早く下への運動をする（落下する）というものであった。かれは、これを自然の本質的運動とみなした。この堅固な論理に疑問を抱き、物体は重さに関係なく、重いものも軽いものも、真空中では同じ速さで落下するという事に気づき、それを真空に近い大気の中で実証しようとした一人がガリレオであった。

一般に、物体の自然落下運動に関して、ガリレオの発見にかかる法則として広く知られている二つの法則がある。一つは、いま述べた真空中では物体の重さに関係なく同じ速度で落下するというものであり、他は、落下における落下距離は落下時間の平方に比例するという法則である。前者は一般に、**真空中における等速落下の法則**（以下では、単に**等速落下の法則**）と呼ばれ、ピサの斜塔から大小二つの鉄球を落下させたというガリレオの逸話を伴って語られることが多い。しかしその逸話が広がっているわりには、その法則が科学史上ではたした役割についてはほとんど知られていない。

ところで、これら二つの法則は、とりあえず、別物である。前者はすべての物体について、落下速度は同じである、したがって、加速度も同じであるとし、その加速の程度はまったく問題にしていないのに対し、後者はその加速の程度を問題として、加速は時間に対して一定であること、したがって速度が時間に比例することを述べているからである。ガリレオもニュートンもこれら二つの法則を明確に区別して扱っているが、二人は、前者の**等速落下の法則**に対しては、ほぼ同じような振子の実験を行っている。

本稿は以下で、二人が行った振子の実験をてがかりとして、**等速落下の法則**が近代科学誕生に寄与した要点を論じてみよう。議論は、おのずから、序文で示した問題の解明につながるであろう。

さて、ピサの斜塔の話を書ける裏付けの確実な記録は存在していない。これについて、少し古いが、A. C. クロンビー（1968:151）は、実験は実際には行われずに、それはガリレオの「思考実験」であったと推定している。最近では、J. T. デヴレーゼと G. v. ベルへの両者（2009:200）は、オランダの S. ステヴィンが、アリストテレスの考え—落下においては重いものほど早く落ちる—を

反駁するために、1586年までに、二つの大小二つの鉛球を30尺の高所から落下させたという話を紹介し、同時にガリレオにおいてはピサにおける実験ないしそれに類する記録はないと論じている。

ガリレオはピサの実験はともかく、少なくとも「思考実験」は誰かに語っていたかもしれない。ところが、ガリレオは**等速落下の法則**を証明するために、そうした「思考実験」だけではなく、実際にも実験を行っていたのである。それはかれの著作『新科学対話』に収録されているもので、振子を使う実験である。不思議なことであるが、等速落下の法則に関連して、ニュートン以外に、ガリレオのこの実験に言及している人を筆者は知らない。

ガリレオの実験の後、およそ半世紀を経て、ニュートンがほぼ同様な振子の実験を行った。かれは、重さの異なる多くの物体の振子について実験を試みた。重要な点は、ガリレオと異なり、その実験結果が等速落下法則の成立を示すことになる理論を伴っていたことである。理論とは、いうまでもなく、『プリンキピア』の理論であるが、直接には、その第二編の「命題24・定理19」を指す。本稿では、第一に、ガリレオとニュートンの実験を紹介し、さらに命題24を述べ、それら実験と命題24の関係を明確にする。それによって振子の実験の意味が明らかにされよう。『プリンキピア』は三編から成るが、ニュートンは自身の振子の実験を三編のいずれにおいても言及しており、かれが『プリンキピア』を論述する上において、その実験をいかに重視していたかがわかるのである。

さて、まず、ガリレオの実験を振り返ってみよう。

## 2. ガリレオ(1638:126)の振子の実験

実験の詳細は次である。

一つは鉛、一つはキルクの、二つの球—鉛の重さはキルクの100倍以上—を取り、それぞれ4ないし5キュービット（1キュービットは20インチ前後）の同じ長さの糸で吊るした。それぞれの球を、鉛直の状態から引き離して、同時に手離すと、球は同じ長さの糸を半径とした円周に沿って落下し、鉛直線を通り越して行つては、また同じ路を戻つて来ました。この自由運動が100回もくり返され、重い物体は軽い物体とほとんど同じ周期をもっており、したがってたとえ100振動、あるいは、1000振動しても、重い方はちつとも軽い方よりさきんじえない、それほど完全に二つの球は同じ歩調を保っている、ということが明らかになりました。

ガリレオが1000回も振動させたというのは疑問であるが、かれは、振子を多数回振動させても、振子の長さが同じであれば、二つの振子の周期と振幅が同じであることを認めている。

ガリレオがこの実験を行ったのは、真空中では、

**物体の重さに関係なく等しい速さで落下する**

という命題を実証することにあつた（ガリレオ：1638:125-128）。この命題はもちろん、**等速落下の法則**である。

ガリレオにおいては、まだ真空の空間を作り出すことはできなかったので、真空に近い空間として、大気の空間をそのまま選択した。これは後に見るように、ニュートンにおいても同様である。ただ、ニュートンの場合は振子の先端につるす小箱を丸くするなど空気の抵抗を少なくする工夫を凝らしている。

問題は、ガリレオの場合、かれの実験のみで、**等速落下の法則**が実証されたとするのは早計であろうと考えられることである。

なぜなら、ガリレオによる振子の実験では、物体が落下するにしても、その落下距離は、実験者が振子を引き上げ静止させた地点から振子が振られ、最下点に達するまでの距離である。

[図1]で言えば、A点（振子の静止点）からB点（振子の最下点）までの垂直距離  $h$  にすぎないのである。ガリレオの実験では、その距離はただか数10cmであろう。物体の落下運動でははじめは、それほど早くないから、この程度の高さでは同じ時間に到達しても不思議はないのである。

実際のところ、ガリレオはこの実験で、なぜ**等速落下の法則**が実証されたと言えるのか、その理由についてはほとんど何も述べていないに等しい。かれが結論として述べているのは、次の文だけである（ガリレオ：1638, 128）。

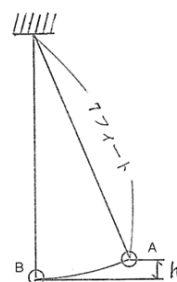


図 1

「これらの物体が同じ時間で同じ長さの弧を描くならば、私たちはその速さも同じだと断言してもかまわないでしょう。」

しかし、振子の実験においては、落下距離は圧倒的に短いのである。それにもかかわらず、なぜそうした断言が可能なのか、理由は語られていない。かれの実験において**等速落下の法則**が実証されたとするには何か他に明確な根拠を必要とする。

おそらくニュートンはガリレオの実験における論理の欠陥を見抜いたものと考えられる。ほぼ半世紀を経て、ニュートンは同様な実験を行うとともに、その実験結果が**等速落下の法則**を実証するものである旨の理論的根拠も示したのである。

次いでニュートンの実験に移るが、その前に注意しなければならないことがある。

ガリレオの場合、実験の目的は、**等速落下の法則**を実証することにあつた。一方、ニュートンにおいては、同様な実験を行いながら、その法則と同時に、物体の質量と重量を明白に区別し、なお、それらの関係を明確にすることにあつた。そこで本稿を完全にするために次に質量と重量について述べておこう。

### 3. 質量と重量

物体には軽いものと重いものがある。ゴルフ球とピンポン球では重さがまるで違う。軽いにせよ、重いにせよ、物体は重さをもっている。これは大昔から人々が日常経験してきたことである。しかし、かつて、アリストテレスは火のように上に昇るものは重さをもたないとみなしていた、西欧近世まで支配的であったが、現今その考えに同意する人はいないであろう。

一方、物体は重さとは別に質量という量をもっている。質量は重さ（重量）ではない。質量は宇宙のどこにあっても一定不変の量であるが、重量（重さ）は宇宙の場所によって異なる。月面での重量は地球表面のもの1/6になる。地球でも、重量は高い山の頂上と平地ではわずかに異なる。特殊な場所として、宇宙船内では、人間も物体も宇宙船にしっかりと固定されないかぎり、船内の空間にただよう状態にある。このとき、物体の重量は人間に感覚されない。ゼロとしか感じられない。しかし、物体はすべて重量をもっていて、すべては地球の重力によって地球に引かれている（落下しつつある）。人々が日常的に経験するのは、物体の重さ（重量）であって、質量は日常的に直接経験できる量ではない。

念のため、ニュートン（1687：河辺訳，第一編，60）の質量の定義を述べておこう。

**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。

ここに物質とは質量のことである。それは物体の密度と体積の積として与えられる。だが、『プリンキピア』には密度の定義はどこにもないのである。だからこれだけでは、質量が何であるかわからないであろう。

一方、『プリンキピア』の第三篇の冒頭部分には、ニュートン(1687:河辺訳, 415)の文言として、「物体の性質については実験による以外われわれに知られない」という極めて重要な言明がある<sup>2</sup>。これに従えば、重量も質量も物体にかかわる性質であるから、当然これらの性質に関する実験を行わなければならないであろう。それはどんな実験であったか。ニュートンはこの定義の後に次のように述べて、その種の実験に言及し、合わせて、質量と重量との関係を明確にしている（ニュートン：1687，河辺訳，第一編，60）。

「この量（質量）は個々の物体の重量として知られている。というのは、後で述べるように、私はきわめて精密にしつらえた振子の実験によって（物質量が）重量に比例することを見いだしたからである。」

ニュートンはこれによって、初めて明確に次を主張した。

（地上においては）、質量は重量に比例する。

この命題を、**質量・重量の基本関係**と呼ぼう。かれはこの関係を主著『プリンキピア』（ニュ

<sup>2</sup> これはニュートンの自然研究に対する態度の表明として注目に値するが、これについてはまた別の機会に論じたい。

ートン：1687)において、理論と実験の双方を用いて実証した。この場合、どちらか一方を欠けば実証されたことにはならない。

質量・重量の基本関係は、『プリンキピア』では次の命題・定理の形として述べられる。

**命題 6・定理 6** 物体はすべて各惑星に重力で引かれること。また、諸物体の任意の一惑星に対する重量は、その惑星の中心からの等しい距離にあっては、各物体における物質量に比例する（ニュートン：1687，河辺訳，第三編，428）。

ここで重量とは、物体が惑星に重力で引かれるときに生じる重さのことであり、物質量とは質量のことである<sup>3</sup>。この命題は、地球上の同一地点においては、質量は重量に比例することを主張する<sup>4</sup>。この定理により、地上において測定可能な重量（重さ）によって質量が測定値として具体的に算出されることになる。これは、質量という物体の（重量とは異なる）固有の量が人間の経験値として把握されることを意味する。人間が直接には経験できない理論値としてしか与えられない質量が経験値に変わるのである。この点が肝要である。

では一体、この定理はどのような根拠に基づいて主張されているのだろうか。

かれはこの命題 6 の直後に次の文を置いている（ニュートン：1687，河辺訳，第三編，428）。

「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精確に知ることができる。

この立言の意味することは何であろうか。

いま、『プリンキピア』第一編の方法則Ⅱ：力＝加速度×質量 を地上の物体に適用したとき、物体の重量（重さ）を物体に働く地球の重力とみなせば、次式が得られる。

$$\text{重量} = \text{加速度} \times \text{質量}$$

ここでもし地上において諸物体の落下速度が同じ、すなわち加速度が同じであれば、質量は重量に比例することがわかる。したがって定理 6 が成立すること、いいかえると、質量が重量に比例することは地上において等速落下の法則が成立するか否かにかかっていることになる。

そして実際に、等速落下の法則は成立する。これをニュートンは自らの振子の実験と『プリンキピア』第二編の命題 24 の両者によって実証するのである。それが次の 4. 項である。

ところで上に言う「多くの人」の一人はガリレオであろう。豊田利幸(1977:173)によれば、ニュートンがガリレオの『新科学対話』(1638 年)の英訳版を読んでいたことは確実である。当然ガリレオの振子の実験にも目を通していただであろう。ニュートンが振子の実験をガリレオの

<sup>3</sup> 現在の用語でいえば、ここでの質量は慣性質量に、重量は重力質量に相当する。

<sup>4</sup> リンゴ 0.5kg、人間の体重 70kg などというのは、質量のことで便宜的に重量として使っている。この場合、重量/質量の比は 1。本来の重量の単位はニュートン (N) であり、上のリンゴの重量は 4.9、人間の重量は 686 ニュートン。

実験から示唆を受けたことは十分考えられるのである。ガリレオの他には、1673年に『振子時計』を出版した Ch. ホイヘンスがあげられるだろう(豊田利幸(1977:151-2))。

次にニュートンが行った振子の実験と『プリンキピア』第二編命題 24 の説明に移ろう。

#### 4. ニュートンの振子の実験と命題 24

ニュートン (1687:河辺訳, 第三篇, 428) の振子の実験とは次のものである。

私は、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。二つの丸い、相等しい木の木箱を準備し、一方には木材を満たし、相等しい重量の金を[できるかぎり精確に]いま一方の振動の中心にとどめた。小箱は 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(二つの) 振子を作った。するとそれらは相等しい振動をもって、置かれた場所の近くで、きわめて長い間いったりきたりし続けた。

実験の様子は、江沢洋(2004:72)に的確に描かれているので、それを使わせていただく。それが[図 2]である。

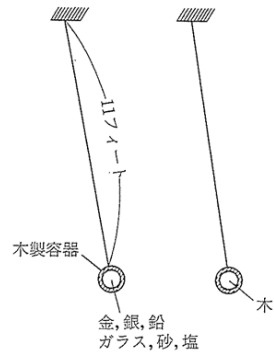


図 2

実験は、重量の異なる二つの振子が、長い間、相等しい振動で、相等しい周期と相等しい振幅をもって往復したことを示している。

以上の二人の振子の実験を振り返ると、ニュートンは実験によって、第一義的には、**質量・重量の基本命題**を、ガリレオの場合は、**等速落下の法則**を実証する目的であり、同じような実験を行いながら、その目的にはややずれがあることがわかる。だが、実際は、次のニュートン (1687:河辺訳, 第二編, 325) による命題が証明されれば、二つの目的は同時に達成されるのである。

**命題 24・定理 19** 振動中心が支持中心から相等しい距離にある、ひもでつり下げられた諸物体における物質質量は、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の比にある。

この命題の内容はこうである。二つの振子の物体の質量を、 $m_1, m_2$ 、重量を、 $W_1, W_2$  とし、それぞれの周期を、 $T_1, T_2$  とすれば、次式が成立する。

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{W_2 T_2^2}{W_1 T_1^2} \quad (1)$$

ここで、 $T_1 = T_2$  であれば、 $g$  を定数として、(1)から次式を得る。

$$W_1 = gm_1, \quad W_2 = gm_2 \quad (2)$$

すなわち、物体の質量は重量に比例する。

以上のことは、二つの振子の周期が同じでことから、**質量・重量の基本関係**が結論されることを示しているのである。

同時に、物体の重量とは重力でもあるから、上式(2)における  $g$  は、『プリンキピア』の法則Ⅱ（力＝加速度×質量）によって、落下運動における加速度を意味し、それが諸物体において一定であることになり、落下速度は諸物体において同じであることになる。ここにガリレオの発見にかかる**等速落下の法則**が実証されたわけである。

落体の**等速落下の法則**はこうして、ニュートンの理論を基盤とした振子の実験によって初めて成立することがわかる。ニュートンはガリレオの実験から得た結論に理論的根拠を与えたことになる。

ところで、命題 24 のニュートンによる証明はかならずしもやさしくはない。それは数学上の専門的な要素を含んでいるので、ここでは省くことにする。そうすることで、本稿の主張を弱めることにはならないであろう。一つ重要なことは、証明においては運動方程式が決定的な役割をはたしていることである。チャンドラセカール (1998:35-6) と和田純夫 (2009:254-5) は共にその証明の要約を述べている。両者はいずれも、命題 24 の重要性を認識しているが、ことにチャンドラセカールは、その命題を著書の本論において最初の章に置き、『プリンキピア』の理論全体の基礎をなす定理の一つであることを強調している。卓見であろう。

また、M. ヤンマー (1977:72) は、ニュートンの証明の代わりに、長さ  $l$  の振子の周期  $T$  は、 $T = 2\pi (l/g)^{1/2}$  で与えられるという広く知られているホイヘンスの公式を採用している。これは間違いではないが、ニュートンの命題 24 の証明とはまったく異なるものである。中野猿人 (1977:740) は『プリンキピア』を完訳し、詳しい訳注をほどこして貴重である。しかし、命題 24 の注には、ヤンマーと同じ振子の公式を置いている。ニュートンの証明との相違は明らかである。

終りに、ニュートンの振子の実験と命題 24 に関して科学史上の意義を述べておこう。

## 5. 振子の実験の科学史上の意義

質量の概念と運動方程式（法則Ⅱ）なくして『プリンキピア』は成立しない。これらは『プリンキピア』全編を支える土台である。万有引力の法則も、引力（重力）は物体間の距離の二乗に逆比例し、物体の質量に比例することを述べており、重さに比例するものではない。

一方、自然落下においては、すべての物体について重量にかかわらず加速度は同じである。

ここで、この加速度について具体的な事象に即して検討してみよう。

地球表面において、物体の加速度は上の 4. で述べた振子の公式： $T = 2\pi (l/g)^{1/2}$  から算出



される。それによれば、 $g = 9.8 \text{ m/秒}^2$ である。したがって、リンゴも鉛もキルクの薄片もすべては、(真空中ないしそれに近い状態では) この加速度で落下する。

一方、月は地球を中心としてほぼ円に近い周回運動をしている。いま、突然、月の軌道上で月の慣性が停止し月が地球に向かって落ちてきたとすると、地球表面における月の落下の加速度を、月の軌道半径や周期などのデータからニュートンの逆二乗則の式を用いて求められる。その値は、上の  $g$  のものとはほぼ一致する(ニュートン(1687):河辺訳, 第三編, 426)。したがって、地球の表面においては、リンゴも月も地球の重力(引力)を受けて同じ加速度をもっているのである。すなわちガリレオの等速落下の法則が成立している。

リンゴは木から落ちるだけでなく、落下においては、リンゴもキルクもあの巨大な月もすべてが地球表面においては、同じ加速度に従って落下する。この事実が枢要である。この結果、月という天体の運動が地上の物体の落下現象としっかりと結合したのである。かくしてガリレオの**等速落下の法則**は天体運動と地上の物体の運動を結ぶ要衝の役割を果たしたことになる。

また、上記 3. で指摘したように、等速落下の法則が成立すれば、物体の固有の量である質量は経験値である物体の重量と同様に数量として扱うことが可能になる。

したがって、ニュートンにとって、ガリレオの等速落下の法則は何としても成立しなければならなかったのである。ニュートンが『プリンキピア』の三編すべてにおいて、等速落下の法則を確認する振子の実験に言及していることは、いかにその実験が重要であったかを示すものである。それは質量が重量に比例することと同時に、落下における加速度が重量にかかわらず一定であることを確認する実験でもあった。ニュートンにおいては、**等速落下の法則**が成立しなければ、『プリンキピア』の理論は重大な危機に直面する危険をはらんでいた。運動方程式が疑問視されるからである。しかし、その法則の成立することが確認されたことによって、物体の質量と重量が比例すること、さらに法則Ⅱ(運動方程式: 力=加速度と質量の積)の有効性を確認することにもなり、理論の基礎は盤石となった。

かくして、ガリレオの**等速落下の法則**は、ニュートンに『プリンキピア』理論の土台を形成する端緒を提供したと言えよう。その意味でガリレオもまた近代科学の理論形成に真に偉大な貢献をしたと結論できよう。振り返れば、ニュートンの時代、質量の概念と運動方程式の存在を示唆し、擁護する地上の現象としては、物体の等速落下の現象しかなかった。二人の巨人はこれを突破口として近代科学の基盤を創出したのである。しかし、ガリレオが等速落下の法則を見出したとき、彼自身はまだその深い意味を見通していなかったであろう<sup>5</sup>。

以上で本論を終える。

さて本稿を書き終えてみて、歴史の一つの切り口として次の文を加えておきたくなった。諸賢が一読されても時間の無駄にはならないであろう。

---

<sup>5</sup> A.C.クロンビー(1967:155) は、ガリレオにおいてはまだ、重量(重さ)と質量を明確に区別することは不可能であったが、天秤の平衡の考察を通して、物体にはその重さあるいは物質の量に等しい運動に対する内在的抵抗があるという考えもっていた、としている。

## 6. 余滴—大胆な歴史回顧

アリストテレスの自然学以来、西欧は物体運動の解明を一つの目標としてきた。その際に、対象となる運動は、何よりも安定していなければならなかった。複雑で偶然に左右されやすい運動は解明の対象として困難であったからである。

安定な物体運動は地上において自然を観察するかぎり、何より天体の運動であった。太陽の大地を一周するように見える見かけの運動（日周運動）、一年をかけて天空の星々の間を通る年周運動、地球を巡る月の運動と満ち欠けの変化、さらには、水星、金星、火星、木星、土星の地球をめぐる運動、これらは長い間にわたって極めて安定しており、その運動を正確に把握することは、種々の理由の下で人間の永年の目標であった。恒星の運動はこれらの天体に比べ単純であった。それは北極星の付近を中心とした夜間の円運動と四季の変化に伴った年間の運動および歳差の運動であり、恒星は全体として上記の天体の運動の位置を示す地図の役割をはたしていた。

一方、地上では、安定した運動は、むしろ、稀であったというべきであろう。地上の物体の運動はさまざまな状況の変化を受けやすく、天体のような安定した運動はほとんどないに等しい。だが、ようやく一つ、物体の落下運動だけは単純であり、変わらぬものであった。すべての重い物体は支えがないかぎり、急速に速さを増して大地の表面に対して垂直に落下する。この不変にして普遍的な落下運動に、後に、落下に似た安定な運動として、振子の運動が加えられた。こうして地上では落下運動と振子の運動が最初の究明の対象になったのである。

以上から人間が物体運動を解明するにあたって、太陽系の物体運動と地上の物体の安定した落下運動から入っていったのは自然であった。

ところで、運動変化を把握するには運動の軌跡をデータとして把握する必要がある。運動変化はかならず前後の関係をもっている。したがって運動を正確に把握するためには、物体の位置および前後関係を表すマーク（印）、具体的には時間の表示が不可欠である。そして時間の表示には、基準となる時間を必要とする。太陽の年周運動は一年の長さとして、また、その日周運動は極めて安定した一日の時間として、一般の時間の長さを測る二つの基準を提供した。人間はその二つの調整には苦勞をしてきたが、ともかく世界的に現在のグレゴリオ暦と一日を24分割する時間と、さらにそれを細かく分割した一分、一秒の単位をもつに至っている。

以上を踏まえて、きわめて大雑把に言えば、ケプラーの惑星運動における三法則、ガリレオの地上の物体運動の等速落下の法則、さらにそれにニュートンの運動方程式と天体運動の逆二乗則、速度と加速度という時間を変数とする概念を含むこれらすべてがニュートンによって総合されて、近代力学と近代天文学が形成されたといえる。しかし、その草創には、コペルニクスの太陽系の理論とチコ・ブラーエの正確な天文観測があったことを記憶にとどめねばなるまい。

天と地の物体運動という動的対象を統一的にしかも、時間に従って連続的に正確に把握し、同時に、人間の日常経験に基盤を置く天動説をくつがえし、日常経験と相矛盾する地動説を確立するためには、人間の知性を総結集する必要があった。近代西欧のみがそれを成し遂げたのだ。

## 参考文献

江沢 洋(2004)『物理は自由だ[1]力学』日本評論社

S. チャンドラセカール(2002)・中村誠太郎監訳『 Chandrasekharの「プリンキピア」を読む』講談社

A. C. クロンビー(1968)・渡辺正雄・青木刺靖三訳『中世から近世への科学史』(下巻)コロナ社

J. T. デヴレーゼ&G. v. ベルヘ(2009)・中沢聡訳『科学革命の先駆者シモン・ステヴィン』朝倉書店

ガリレオ(1638)・今野武雄・日田節夫訳『新科学対話』(上)岩波文庫

ニュートン(1687)・中野猿人訳(1977)『プリンシピア自然哲学の数学的原理』講談社

同上・河辺六男訳『ニュートン』(世界の名著)中央公論社

豊田利幸(1977)『ガリレオ』(世界の名著)中央公論社

M. ヤンマー(1977)・大槻義彦・葉田野義和・斎藤威訳『質量の概念』講談社

和田純夫(2009)ブルーバックス『プリンキピアを読む』講談社