

ガリレオ事件

モーリス・フィノッキアロ

ガリレオのコペルニクス革命に対する主要な貢献は、十分な吟味と、開かれた態度と、公正さという理想に導かれながら、コペルニクス説の擁護に成功したことであった。ガリレオの望遠鏡による発見の教訓と文化面での反響について考えてみよう。

1609年6月、ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei) は、像を3倍から4倍に拡大する、レンズの組み合わせからなる光学機器が、前年にオランダで発明されたことを耳にした。参考になる機器をもっていなかったにもかかわらず、ほとんど試行錯誤によって、ガリレオはすぐにこの機器をまねてつくることに成功した。また、その倍率を、最初は9倍に、次いで20倍に、そしてこの年の終わりには30倍に上げることもできた。さらに、この機器を地上での実用のみ供するのではなく、天空の体系だった観察に用いて、宇宙についての新たな真実を学ぼうとした。

3年のうちに、ガリレオは一連の発見のうちのいくつかを成しとげていた。彼は、月が山と谷で覆われた粗い表面をもつことを見つけ、肉眼で見えるもの以外に教え切れないほどの星があることも知った。銀河や星雲は、多くの独立した星が密度濃く集中している姿であることも発見した。木星には4つの月があり、それぞれの距離と周期を保って木星のまわりを回っていた。金星の見かけの姿は、その公転につれて、月の満ち欠けのように、完全な円盤から半月に、次いで三日月状になり、また半月から円盤に戻っていくのであった。そして、太陽の表面には、地球を覆う雲のように、きわめて不規則に生まれては散らばる、大きさも形もさまざまな黒い点が存在していた。これらの点が見えている間の動きからすると、太陽は自身の軸を中心に、1か月ほどの周期で自転しているようであった。

こうした発見の多くは、ほかの人々によっても独立になされていた。月の

山脈はイングランドのハリオット (Thomas Harriot) が、黒点はドイツのシャイナー (Christoph Scheiner) が見つけていた。しかし、これらの意味をガリレオのように深く理解した者はいなかった。方法論からいえば、望遠鏡は、それ以前の肉眼による観察で得られたものをはるかに超える新種の情報を集めることを可能にしており、天文学上の革命を意味する機器であった。実質的な問題としては、これらの発見は、コペルニクスの地動説に対する、最終的とはいえないまでも決定的な証拠となった。後者について理解するためには、背景を知る必要がある。

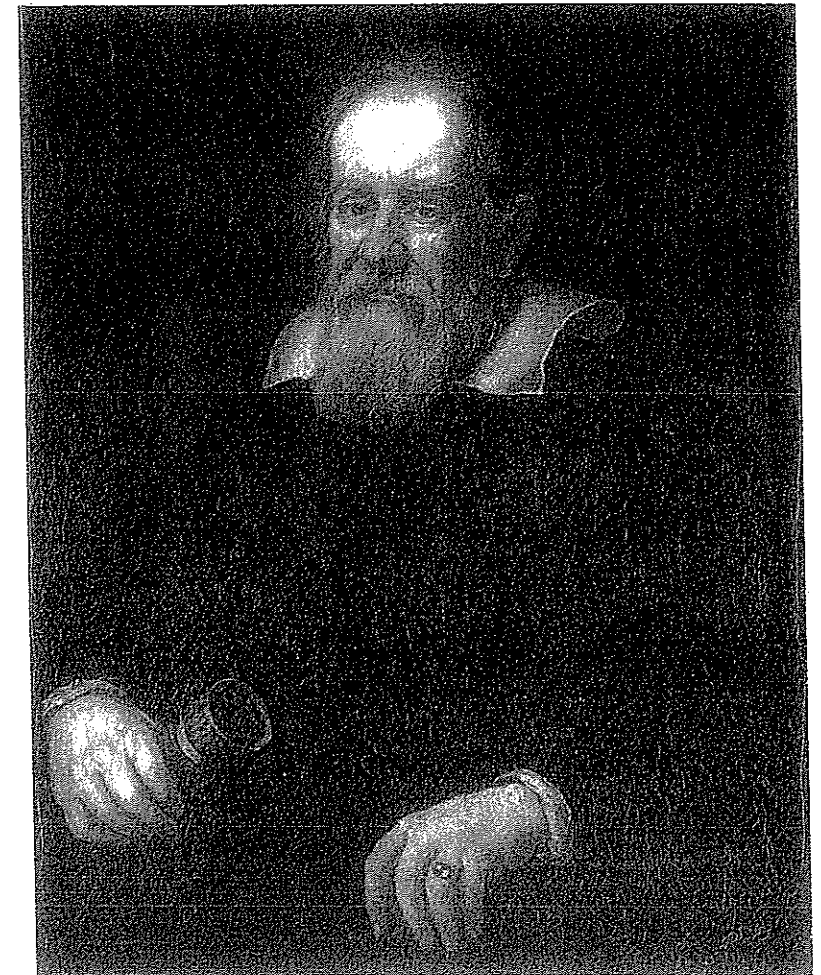
コペルニクス革命

1543年、コペルニクス (Nicolaus Copernicus) は書物を刊行し、地球が、1日周期の自転と、太陽を中心とする1年周期の公転をしていることを要点とする世界の体系について詳述した。コペルニクスは、古代ギリシア以来ほとんど全世界で否定されてきた古い発想を支持する、新しい議論を提示することに成功した。彼は、宇宙が太陽を中心とする体系であり、地球が太陽のまわりを回転していること (地動説) を認めれば、天体の運動について知られている事実を定量的な細部にわたって説明できることを示した。さらに、この説明のほうが、地球が静止しているとする説よりも首尾一貫している (かつ単純で美しい) ことも指摘した。

コペルニクス革命により、しかし、上で述べたことに留まらないさらに多くの議論が必要になった。地動説が新しい理論的考察によって支持されるのみでは不十分であり、新たな観察に基づく証拠が必要であった。望遠鏡がそ

うした新奇な証拠をもたらした。たとえば、月の山脈や太陽の黒点の存在は、地球と天体の間に見逃せない類似性があることを示していた。この事実は、地上と天界を分けて考える伝統的な説を否定するものであり、したがって、地球が惑星であること、つまり“天界”におかれることも可能になった。木星の衛星の存在は、ある物体のまわりを回転する物体のまわりを、さらにほかの物体が回転するという現象が物理的に起こりうることを示していた。それならば、太陽のまわりを地球が回転し、その地球のまわりを月が回転するということも可能になるわけである。金星の満ち欠けは、その軌道が太陽を中心とするものであることを表しており、この部分に関するコペルニクスの体系の正しさを確証していた。

さらには、地球の運動は、新しい議論と証拠によって建設的に支持されるのみでは不十分であって、新旧とり混ぜた多くの有力な反論による吟味にも耐えなければならなかった。これらの反論は、天文学的な観測やアリストテレスの自然学、聖書の記述や伝統的な認識論に基づいていた。たとえば、アリストテレスの自然学によれば、物体の自然な状態は静止であり、物体を運動状態におくためにはつねに力が働いている必要があった。そうすると、地球が回転していればその上の物体は鉛直方向には落下できないことになるが、実際には鉛直方向の落下が観測されている。また、ヨシユア記の10章12~13節によれば、神が奇跡によって太陽の日周運動を止めて、日の出ている時間を長くしたので、ヨシユアは日没前にイスラエル人たちに勝利に導くことができたという。天文学的な反



〈図1〉望遠鏡による観測
ガリレオは望遠鏡を発明したわけではなかったが、天文学における望遠鏡の利用の道を切り開いた。

論に対するガリレオの回答は、コペルニクス説が示唆する観測結果は、肉眼では得られないが望遠鏡では実際に見えることを示すことであった。自然学的な反論には、運動の保存と合成という原理を中心とする、新しい自然学を明示することで対応した。そして、聖書に基づく反論に対しては、聖書は科学的な権威はもたないので、聖書の記述は、証明済みあるいは証明可能な天文学上の主張を無効にするために使われるべきではないと主張した。

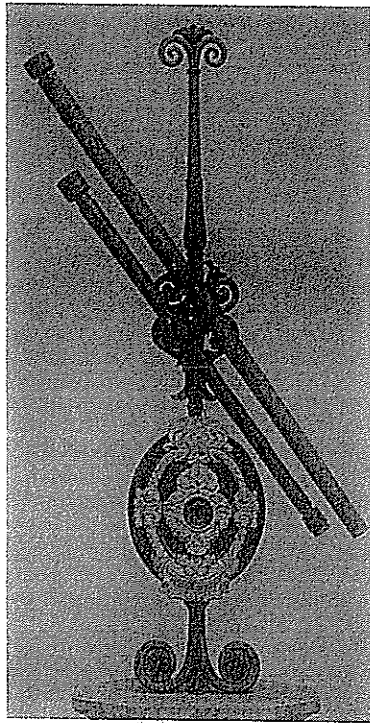
岡本拓司 訳

The Galileo affair

Maurice A Finocchiaro

Maurice A Finocchiaro is Distinguished Professor of Philosophy, Emeritus, at the University of Nevada, Las Vegas, US. He is the editor of *The Essential Galileo* (Hackett) and the author of *Defending Copernicus and Galileo: Critical Reasoning in the Two Affairs* (Springer), of which this article is a summary. e-mail maurice.finocchiaro@unlv.edu

Physics World Vol. 22 No. 3
© 2009 Institute of Physics



〈図2〉天体の観測

1609年以降、ガリレオが用いた望遠鏡。これにより天の体系的な観測が行われた。

最終的には、太陽中心説の擁護のためには、これらの反論を突き崩す否定的な議論だけではなく、それらの強みを好意的に理解することも必要であった。ガリレオはこのことに敏感だったので、彼の書物のなかには、地球中心説の擁護者たちの著作よりも明確かつ痛烈に述べられた反コペルニクス論を見いだすことができる。

ただし、ガリレオにはまた、彼のコペルニクス擁護論が、完全に最終的あるいは決定的なものではないこともわかっていた。たとえば、彼の望遠鏡では恒星の年周視差を見いだすことができないなど、いくつかの反証も残っていた。

ガリレオのコペルニクス革命に対する主要な貢献は、ようするに、決定的というわけではないにせよコペルニクス説を擁護するのに成功し、またその議論においては、十分な吟味と、開かれた態度と、公正さという理想に思慮深く導かれた論証と観察が強調されていたという点にあった。

ガリレオ裁判

しかしよく知られているように、ガリレオの努力はカトリック教会による妨害を受けた。実際、ガリレオ裁判は、コペルニクス擁護をやめさせようとする、教会による一連の試みであったと解釈できる。1616年に図書検閲聖省は、地動説は聖書に反すると定め、これにより聖書に基づく反論に抗してコペルニクスを擁護すること全般が禁じられた。さらに、ベラルミーノ枢機卿 (Cardinal Robert Bellarmine) はガリレオに、地球の運動を擁護するのをやめるよう警告した。これは、ガリレオ個人に対して、天文学的・科学的・

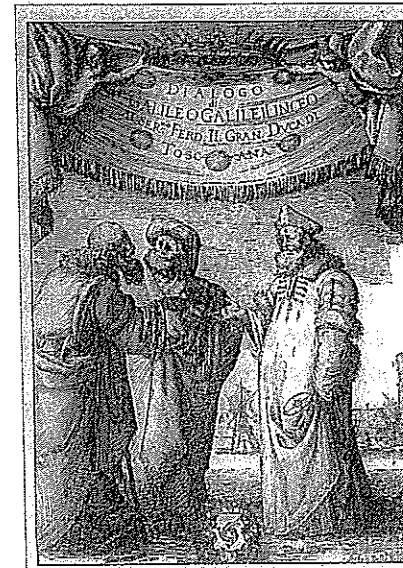
哲学的視点に基づくコペルニクス擁護の禁止が命ぜられたことを意味していた。1633年には、形式的な審問の後、検邪聖省はガリレオを、地動説の擁護と聖書の天文学的な権威の否定という異端を犯していると判断し、有罪とした。ガリレオは『ブトレマイオスとコペルニクスの2つの主要な世界体系の対話』(通称『天文対話』、1632年)において、地動説と天動説の両方を吟味し、地動説のほうが地球静止の説よりも強力であることを示し、コペルニクス説がおそらく真実であるとほめかしていた。こうして地動説を擁護していたガリレオは、暗黙のうちに、間接的に、そして蓋然的には異端を犯していたことになる。

ガリレオへの判決はまた、さらに長引き、複雑で、対立の激しい論争を生んだ。論争は今日も引き継がれている。しかし筆者は、この問題の複雑さは、要点をそこなわずに単純化できると考えている。

最初は、地球の運動の物理的な現実性について、さまざまな問が提示された。しかし次第に、科学史家たちは、この点についてガリレオが正しかったことを、異論の余地なく確認するようになった。この点が理解されるようになると、今度は、ガリレオが提示した理由や議論、証拠が正確であったかどうかが問題となった。つまり、結果は正しかったが理由は誤っていたのではないかと問われるようになった。教訓に富む問題ではあるが、この種の批判からもガリレオの推論は擁護できる。しばらくの間、彼はまた、聖書は科学上の権威ではないとする、彼の文献解釈上の原則に関しても非難を受けた。しかしこの点についても、歴史はガリ

レオが正しいとした。少なくとも、1893年、教皇レオ13世が回勅『プロヴィデントィッシムス・デウス』(「もっとも深い摂理の神」、冒頭の言葉からこの回勅はこうよばれる)において公表した、近代カトリック教会の公式的見解に基づけばそうである。しかし、この神学的な名誉挽回が果たされる以前は、ガリレオは無能な神学者として有罪判決を受けたという伝説が広まっていた。つまり、聖書に基づく説教やふるまいによって、天文学的な主張を裏づけようとしたというのである(実際に彼が行ったのは逆である)。この伝説が追い払われるのには19世紀いっぱいかなかった。いずれにせよ、解釈上の問題についても、聖書は科学上の権威ではないとする彼の議論の正しさを確かめるのが重要である。ガリレオ式のこの判断には多くの反論が突きつけられたが、筆者はこれを反論から擁護できると考えている。

次第に明らかになっていったように、ガリレオを、無能な科学者、無能な神学者、無能な論理学者としてとがめようとする試みは無効になっていった。すると今度は、彼はほかの理由で非難されるようになった。ある者たちは、法的な状況に着目し、教会が1616年に出したコペルニクス説に関する警告に従わなかったことに罪を認めると述べた。しかし、この警告がたんに議論することすら禁止するものであったと解釈されるのであれば、このような特殊な禁止命令の存在は、1867年から1878年にかけて初めて公開された裁判の記録に基づくと、疑わしいものになる。これらの記録には、ガリレオはこの話題を議論することさえ禁じられたとする書類は1つが含ま

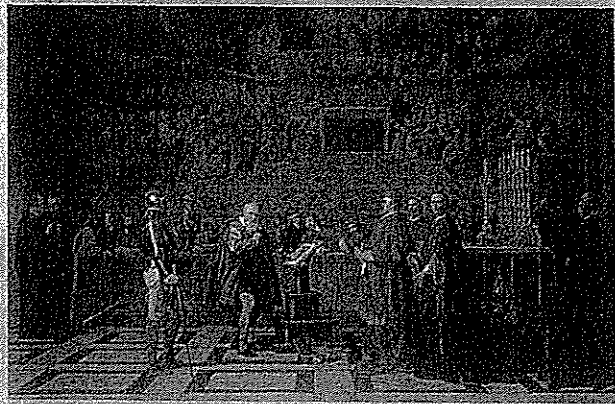


DIALOGO
DI
GALILEO GALILEI LINGEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STUDIO DI PISA.
E Filosofo, e Matematico primario di
SERENISSIMO
GR.DVCA DI TOSCANA.
Doue nei congressi di quattro giornate si discorre
I sopra i due
MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, e COPERNICANO;
Propugnando indistintamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.
CON PRI VILEGI.
IN FIRENZA, Per Gio: Batista Landini MDCXXXII.
CON LICENZA DE' SUPERIORI.

れるのみであるが、当該の書類はいくつかの点できわめて異例である。もしこうした厳しい禁止がなされたのであれば、ほかに存在する、より信頼性の高い適切な書類がそれについてふれているはずであるが、そうした形跡はいっさいない。反面、もし警告がコペルニクス説擁護の禁止であったと理解されるのであれば、その存在を疑うものはないが、すると問題は、こうした禁止が正当なものであったかどうか、またもし正当なものであったとすれば、ガリレオの擁護は、科学的また論理的に、公正で有効なものであったかというものに戻ることになる。

最後に、ガリレオ裁判全体は、科学と宗教の対立や調和について示唆するところがあるように思われるが、私たちがこの問題を理解するにあたって、ガリレオは賞賛されるべきか非難されるべきかという問題がある。これを解決するにあたっては、3つのことがらを認めなければならない。第1に、も

〈図3〉論争を巻き起こした書物
ガリレオが1632年に発表した『2つの主要な世界体系の対話』により、彼は教会から異端の判決を下されることとなった。



〈図4〉裁かれる科学

ガリレオはコペルニクスの天文学を支持したかどにより、カトリック教会による裁判にかけられた。

ともとの事件で中心にあったのは、コペルニクス説が聖書の記述に矛盾することを認める者と、否定する者との間の対立であった。皮肉なことに、ガリレオは対立を否定し、教会は対立を認めていた。第2に、事件そのものは、科学と宗教の間の対立というよりも、文化の保持と発展の間の対立の縮図として理解するのが適切である。実態としては、聖職者にもガリレオを支持する者が多くおり、科学者にも教会を支持する者が多くいた。教会にも科学にも内部分裂があった。第3に、その後の4世紀の間、通常、この事件は、それが正当な場合も誤っている場合もあったが、科学と宗教の対立の縮図として意識されてきた。このために、後の議論で最重要視された話題が、まさに科学と宗教の間の対立であるということになったのである。

2つの文化

今日に至るまで、論争の勢いが衰える兆しはない。近年のカトリック教会によるガリレオの名誉の回復のみならず、左翼寄りの社会批評家による反ガリレオの議論をみても、これは明らかである。

たとえば1942年、ガリレオの没後300周年には、部分的かつ非公式に、ガリレオの名誉回復が初めて行われた。その後、教皇庁立科学アカデミー、ミラノカトリック大学、教皇庁立ラテ

ラノ大学(ローマ)、バチカン放送局などで最高位にある何人かの聖職者が、この事業を引き継いだ。彼らはガリレオをカトリックの英雄とする記述を発表し、そこではガリレオは、科学と宗教の間の調和を支え、同時代のカトリックの権威に反してまでも天文学上の真理を弁護する勇気を持ち、1633年の裁判が服従を要求すると外見上は彼の見解を撤回する宗教的な敬虔さを持ち合わせた人物として描かれた。

1979年には、教皇ヨハネ・パウロ2世が非公式にガリレオの名誉回復を再び始め、1992年まで継続された。教皇庁立科学アカデミーで行われた2つの講演と、その他の声明や行動において、教皇は、ガリレオ裁判は誤りであったのみならず不正義であったと認めた。教皇はさらに、ガリレオに敵対した聖職者たちに反して、ガリレオは聖書の解釈において神学的に正当であったと宣言した。信仰を指導する立場からいっても、新しい発見を広めようとする彼の欲求は、これに抵抗しようとする敵対者たちの意向と同様、道理にかなったものであり、またガリレオは、科学と宗教の調和の教訓に富む実例であるとも述べた。

カトリックのさまざまな公的人物や組織によって名誉回復がなされていたのとはほぼ同時に、ガリレオは、世俗文化の多様な代表者たちによって、かつてなかった批判にさらされることとなった。これは予期せぬ役割の入れ替わりであり、かつての仇敵は友となり、昨日の友は敵となった。これらの批判者たちは、ガリレオへの社会的・文化的批判とでもよびうるものを展開した。つまり、彼らはガリレオを、産業

革命の濫用や、科学者の社会的責任感の欠如、原子爆弾、2つの文化の間の分裂といったことがらについて、個人的あるいは象徴的に、責任を負うべき人物として非難したのである。彼らの多くは左翼の著述家であった。主要な人物には、たとえばドイツの劇作家ブレヒト(Bertolt Brecht)がおり、1938年に書かれた彼の戯曲『ガリレオ』(『ガリレオの生涯』)は、20世紀演劇の古典となった。また、1958年にベストセラーとなった『夢遊病者たち: 人類の宇宙観の変化の歴史』を著したケストラー(Arthur Koestler)も、ガリレオ批判者の1人である。さらに、オーストリア生まれの哲学者ファイヤーアーベント(Paul Feyerabend)は、1975年に初版が出された『方法への挑戦』のなかで、彼独自の社会的批判を推し進めた。

これらの展開は、いまだに適切な収まりどころを得てはいない。たとえば、カトリックによる“名誉回復”は、不公平な非難を(カトリックによってさえ)受けることがあり、また逆に無批判に(カトリックでない人々によってさえ)受容されることもある。左翼寄りの社会批評は、現場の科学者たちには一顧だにされないが、科学者たちの存在意義はこの種の批判によって脅かされるか、あるいは進歩派を自称する人々によって独断的に擁護されるかしている。進歩派はまた、ガリレオからは多くを学んでいるようにはみえず、時計の針をガリレオ以前の時代に戻そうと望んでいるかのように思われる。この論争は当面は続くように思われる。

しかし私は、論争と折り合いをつけ、ついにはこれを解決する道を開く枠組

みをつくり出すことができたと考えている。私の考えでは、論争は、ガリレオへの有罪判決を正しいと認めるかそうでないかの議論に即して解釈される。これらの議論に対し、私たちは、ガリレオが地球の運動を認める議論と認めない議論に対してとったのと同じ態度をとるのである。ガリレオの態度のうち重要であった点は(それらは、十分な吟味、開かれた態度、公正さといういい方で標識された)、自身の見解に反する諸議論を知って理解し、否定する以前にそれらの強みを評価するということであった。ようするに、私の包括的な結論とは、今日ガリレオ事件に関して、また科学と宗教の対立や制度上の権威と個人の自由の対立といった論争に関して、ガリレオが適切に擁護されるためには、ガリレオ自身がコペルニクスの擁護のさいにそうしたように、理性に基づく十分な吟味が、開かれた態度で公正に行われなければならないというものである。

これらは、1609年にガリレオが望遠鏡で行い始めた発見の、文化面での反響と教訓の一部である。そしてまたこれらは、望遠鏡による発見が始まってから400年の記念にふさわしい、新しい試みや機会の一側面でもある。

本記事は、『Physics World』(<http://physicsweb.org/toc/world/>)からの翻訳です。『Physics World』は、Institute of Physics (IOP, 英国物理学会)発行の月刊会誌です。世界の最新の物理学ニュースや、多彩なレビュー記事を提供します。購読についての詳細は、www.physicsweb.org/subscribe をご覧ください。

具体的にわかりやすく
天文学の深い理解へ

天文学 入門

星とは何か

中嶋浩一 著

A5判 196頁

定価2,625円(税別)

ISBN978-4-621-08116-7



目次

現代天文学と星座／恒星の世界／恒星界の多様性／恒星界の規則性／非恒星天体のリスト、メシエカタログ／星とは何か——恒星の内部構造理論／星の一生(I)星の誕生と成長の理論／星の一生(II)星の最期

星の観察や星の一生を中心に、天文学の標準的内容を初學者向けにわかりやすく解説。たとえば、理科年表の数値を用いた具体的な解説など、理解を深める工夫がなされている。

MARUZEN

丸善(出版事業部) 営業部 TEL(03)6367-6038
<http://pub.maruzen.co.jp/>

動力学の黎明期にあった“活力”論争

ジョージ・スミス

ニュートン力学を、質点の集まりよりも複雑な系を扱えるように拡張しようとする試みが、保存則をめぐる1世紀にわたる論争を生んだ。

てこや滑車の学である機械学 (mechanics) とは区別される、運動の学としての力学 (mechanics) は、17世紀初めには登場していた。次の世紀の半ばまでには、質点の運動を扱うにはニュートン (Isaac Newton) の運動の3法則で十分であることが明らかになっていったが、どうすればこれらの法則を流体や剛体を扱えるように拡張できるのか、あるいはそもそも拡張できるか否かは、まだ明らかではなかった。このため18世紀には、最小作用の原理のような新しい法則が提案され、議論されることとなった。こうした議論のなかでもっともよく知られているのが、“活力” (*vis viva*, ラテン語で“生きている力”を意味し、現在運動エネルギーとよばれるものに近い^{*1}) をめぐる論争であるが、これはすでに1686年、つまりニュートンが『プリンキピア』¹⁾ で運動の法則を発表する1年前には始まっていた。

活力論争は、ライプニッツ (Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646-1716) とデカルト (René Descartes, 1596 - 1650) の継承者たちとの論争として始まった。それは18世紀いっぱいわたって続き、いくつかの懸賞の課題にもなった²⁾。1788年、初期の参戦者たちが舞台から去ってだいぶたった後、ラグランジュ (Joseph Louis Lagrange, 1736 - 1813) が、彼の『解析力学』 (*Mécanique analytique*) の第2部の冒頭で活力の問題を再び取り上げた³⁾。

活力論争は、現在では通常、 mv (運動量) と mv^2 (運動エネルギー) のいずれが保存するのかという問題をめぐるものであったと理解されている。実際にはそれほど単純ではなく、だからこそこの論争は上述の通り長期にわたっ

て続いたのである。論争が多様な課題をめぐるものであったことを理解するためには、これがどのようにして始められたかを見るのがよい。しかしまず、初めに、活力論争を mv と mv^2 の間のものととらえることで、暗黙のうちに犯しているいくつかの時代錯誤を取り除かなければならない。

ニュートン力学でいう質量は、18世紀に入ってかなりたつまでは論争に関わることはなかった。このことを無視すると、ニュートンの概念の新しさを見失うことになる。ニュートンは、『プリンキピア』において初めて、質量 (mass, ラテン語では *massa*) を“物質の量”の短縮語として導入した。それ以前に彼は、重さ (heaviness, ラテン語では *pondus*) について考察している。質量を導入するにあたって、彼は「振り子によって行われたきわめて正確な実験」により質量が重さに比例することが示された事実を強調している。

ニュートン以前の標準的な用語は“かさ” (*bulk*, ラテン語では *moles*) であった。ニュートン自身、衝突する球の運動の解を示した彼の唯一の出版物、『普通算術』 (*Arithmetica universalis*)⁴⁾ のなかでは、この語を引き継いでいる。『普通算術』は1707年にラテン語で発表された。“かさ”という語は、ライプニッツとデカルト主義者の両方に支持されていた、重力と重さに関する広くいきわたった見方を反映している。これは、重力や重さは固体を押し下げる作用をもつエーテル物質によって生じ、その作用は重さが固体の量に比例するような具合にはたらくという考え方であった。

mv と mv^2 にまつわるもう1つの時代錯誤は、記号の使用それ自体に関する

*2 [訳注]現代の用語でいえば運動量に近い。ただし、後述するように、デカルトの場合には運動の方向の違いが無視された。

ものである。18世紀のあいだに微積分がとって代わるまでは、量は代数的な記号ではなく幾何学上の図形の線や面積によって表現されており、複数の量の間の関係は、方程式ではなく比例関係によって表されていた。活力論争に当初から関わっていた2つの量は、かさと速度あるいは速さの積として表される“運動”^{*2}と、ライブニッツ流にいうところの活力で、こちらはかさと速さの2乗の積であった。

ガリレオの『新科学論議』

速さの2乗が重要であるという考えは、ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei, 1564-1642) が主張した、“位置運動”の説明に関する3つの主要な発見から導かれている。3つの発見は1638年に発表された『2つの新しい科学をめぐる論議』 (*Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove Scienze*, 以下『新科学論議』)⁵⁾ のなかで説明されている。

1. 抵抗する媒質がなければ、鉛直方向の落下は一律に加速する運動であり、したがって落下中に獲得される速さの2乗は落下した距離に比例する。
2. 抵抗する媒質がなければ、静止状態からの落下で獲得される速さは、物体をもとの場所に戻すのに十分なものに正確に一致し、それ以上ではない。
3. ある与えられた高さから斜面に沿って落下する場合、獲得される速さは面の傾きによらず同じである。

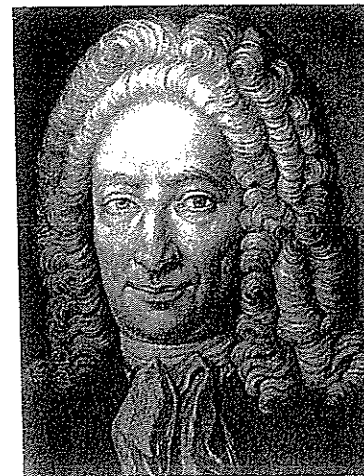
3つのうち最後のものを、時代錯誤的ではあるが、ガリレオの経路独立性

の原理とよぼうと思うが、これは速さの2乗という量に、ほかの指摘では与えられなかったであろう一般性を与え、それによって活力の概念の確立に決定的な役割を果たした。ガリレオは、はじめこの原理を仮定として導入した。ガリレオの死後の『新科学論議』の版では、斜面の上に置かれたおもりとつり合わせるためには、どのような大きさのおもりを鉛直につり下げることが必要かという議論に基づく論証がなされている。

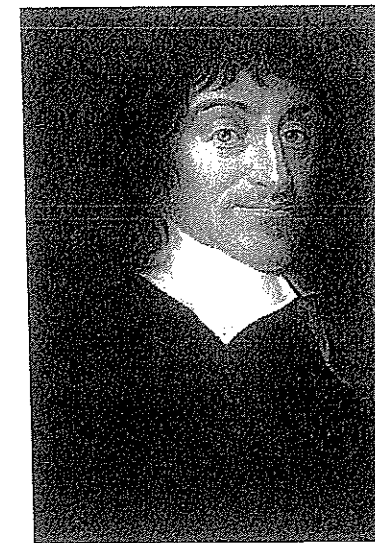
この論証に満足できなかったガリレオの高弟、トリチェリ (Evangelista Torricelli, 1608 - 1648) は、1644年、彼の名をもってよばれることになる原理に基づき、背理法による論証を行った。この原理とは、つながれた2つのおもりは、それらが共有する重力の中心 (重心) が降下することがなければ、自然に動き出すことはない、というものである⁶⁾。30年後、ホイヘンス (Christiaan Huygens, 1629 - 95) は、彼の『振り子時計』 (*Horologium oscillatorium*)⁷⁾ のなかで、経路独立性が重要であることを強調し、曲線に沿っての落下というより一般的な場合について同種の証明を与えた。

デカルト：運動の保存

ライプニッツは活力の保存によってデカルト派の原理に対抗したが、後者はわれわれの眼には一見支離滅裂に映る。この原理は、運動の総量——つまり、かさと速さの積の総量——は、常に同じであるというものである。ここでは、速さは方向を無視して考えられており、ベクトル量ではない。したがって、デカルトの原理は、現代の運動量保存則の先駆けではけっしてない。



〈図1〉ライプニッツ
(Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646 - 1716)



〈図2〉デカルト
(René Descartes, 1596 - 1650)

*1 [訳注]現代の用語で表せば質量と速さの2乗の積 (mv^2)。

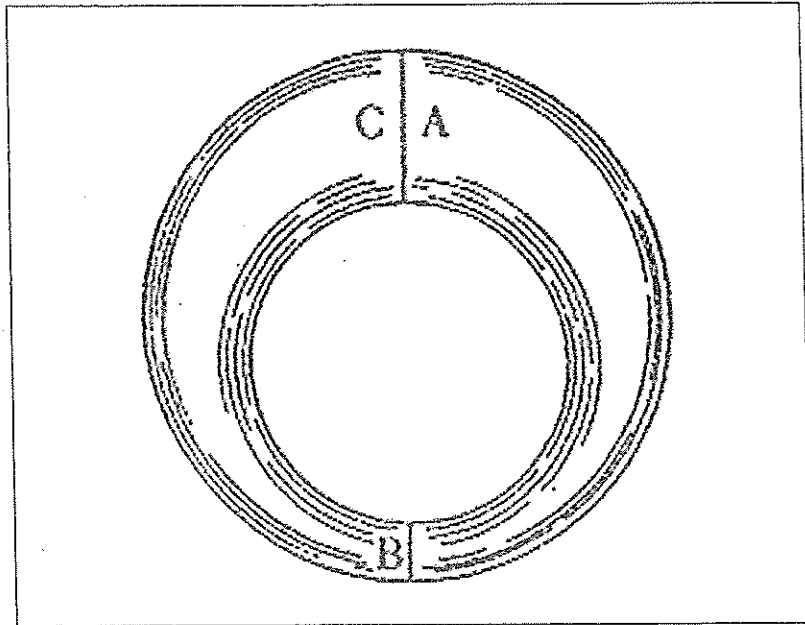
岡本拓司 訳

The *vis viva* dispute: A controversy at the dawn of dynamics

George E. Smith

George E. Smith is a professor of philosophy at Tufts University in Medford, Massachusetts, and acting director of the Dibner Institute for the History of Science and Technology at the Massachusetts Institute of Technology in Cambridge.

Physics Today Vol. 59 No. 10
© 2006 American Institute of Physics



〈図3〉デカルトの運動の保存の着想をスピノザが図にしたもの
この円形の境界をもつ環状の流れにおいては、もしACでBよりも流れが4倍広げれば、Bにおける流れの速さはACの4倍になる。

そこでわれわれは、彼が何を考えていたかを理解する必要がある。答はデカルトの、真空は不可能であるというア priori な主張のなかにある。すべての空間は物質によって満たされており、物質のいかなる部分の運動も、その前にある物質を押しよけることになる、というわけである。

デカルトの結論は、「あらゆる運動において、物質の完全な輪が自発的に動く」⁸⁾というものである。スピノザ (Benedict (Baruch) de Spinoza, 1632 - 77) は『デカルト哲学の原理』(Renati Des Cartes principiorum philosophiae)⁹⁾のなかで、〈図3〉の絵によって、この結論とデカルトの運動の保存則を説明した。この原理は、速さと断面積の積が図中の輪の中のどこでも一定に保存されているという点で、非圧縮流体の連続性という現代的な概念に似た点をもつ。デカルトはもちろん誤っていた。しかし、彼が自分の「自然の法則」

と比べてさえより基本的なものであると考えたこの原理は、支離滅裂なものではなかった。

デカルトが、局所的な変化のさいに運動が保存される仕組みについてどう理解していたかを検討すると、何が問題であったかが明らかになる。彼の自然の法則の最初の2つは、運動は、妨げられるものがなければ、直線に沿って一様に続くという内容であった。実際彼は、惑星の曲線に沿った運動が起こるためには、直線から離れさせる何かが必要であると主張した最初の人物であった。またこの点では、彼は、慣性の法則として知られるものについて、誰よりも強い先取権を主張できる。

デカルトの自然の法則の第3番目は、運動の局所的な変化に関するものである。

物体がほかの物体に出会うとき、もしそれを直線に沿って動き続けさせる力が、ほかの物体のこれに抵抗する力よりも小さければ、物体はほかの方向に逸らされることになり、そのさい、運動の量は保たれて方向のみが変化する。しかし、もし物体の力のほうが大きければ、物体はほかの物体とともに動き、ほかの物体に与えた分だけその運動を失う。

こうして、力という概念が、力の競争によって運動のやりとりが決定されるという考えとともに導入された。力には、運動の変化に抵抗するものと、運動の変化を生み出すものがあると考えられたのである。デカルトの主張によれば、後者は、物体の大きさと速さによって決まっていた。

デカルトの『哲学原理』の1644年の

ラテン語版では、運動の交換に関する彼の議論は、個々の場合に何が起こるか、「各物体に、運動を起こすあるいは運動に抵抗する力がどれほどあるか」を計算し、「強いものが常にその効果を発揮することを確実なものとして受け入れれば」決定できるという注意によって締めくくられている。しかし、3年後のフランス語版では、彼は7つの補足的な規則を付け加え、2つの「完全に固い」、完全にほかから切り離されている物体が接触する場合の結果を明確に予言している。たとえば3つ目の補足的な規則は、もし2つの物体が同じ大きさであり、一方がわずかに速ければ、速いほうが力の競争に勝ち、最小限の量の速さを他方に移して競争が終わるというものである。

歴史的に見ると、これらの補足的な規則に関して重要な点は、それらが日常の経験に反するという事実である。デカルトもこの点に気づき、以下のような弁護を行った。

たしかに、経験はしばしば私がいま説明したばかりの規則に反するようにみえる。しかし、世界にはほかのものから完全に切り離された物体はなく、またわれわれは完全に固い物体に出会うこともほとんどないのであるから、個々の物体の運動が互いの衝突でどの程度変化させられるかを定める計算を行うのは、きわめて難しい。

この弁護は、デカルトの支持者にとっては十分に思われたかもしれない。しかし、ほかの者は、経験に反しない衝突の規則を探る意欲をかきたてられることとなった。

ホイヘンスは正解に達した

ホイヘンスも衝突の問題への挑戦者の1人であった。彼はオランダ政界の著名人の息子で、デカルトもホイヘンス家をよく訪れていた。1650年代、まだ20代であったころ、ホイヘンスは固い球が直接衝突する場合の正確な規則を導き出した。その時点では発表しないことにしたが、1661年にロンドンを訪問したさい、彼は、当時王立協会 (Royal Society) の結成に向けて準備中であつたさまざまな人々にこの結果を説明した。

1668年の終わりごろ、自然哲学と数学において秀でていた2人のイギリス人、ウォリス (John Wallis, 1616-1703) とレン (Christopher Wren, 1632-1723) が、王立協会に衝突の規則を明らかにする論文を提出した¹⁰⁾。ウォリスは非弾性衝突について述べ、レンは完全弾性衝突を考察した。このころ、王立協会の書記オルデンバーグ (Henry Oldenburg) は、この話題についての論文を提出するようホイヘンスに依頼しており、論文は1669年初めに届いた。論文の結論は、レンのものと同じであった。ウォリスとレンの論文は1669年1月11日の『フィロソフィカル・トランザクション』(Philosophical Transaction of the Royal Society) に掲載されたが、ホイヘンスについての言及はなかった。

オルデンバーグがホイヘンスに論文を依頼したのは、ホイヘンスが1661年のロンドン訪問のさいに述べたことばかりが理由ではなかった。1660年代末、ホイヘンスは自然学において世界の最先端をいく人物であった。1650年代には、彼は群を抜いて優れた望遠鏡



〈図4〉ホイヘンス (Christiaan Huygens, 1629 - 95)

を製作し、これにより土星のもっとも大きな衛星タイタンを発見した。この発見は1659年の『土星の体系』(Systema Saturnium)で発表され、同時に、これより以前の望遠鏡によって数十年にわたって観測されていた土星の奇妙な突起が、実は輪であると理解できることも明らかになった。1650年代の末までには、彼はサイクロイド振り子*3の等時性を発見しており、サイクロイド振り子の時計を設計して天文台に大きな便益をもたらし、また振り子を用いて4つの重要な図形に対する地表面の重力の大きさを測定した。

ホイヘンスは王立協会の会員(fellow)に選ばれた最初の外国人であり、またオランダ人のプロテスタントであったが、フランスの王立科学アカデミーの発足時(1666年)からの会員(academician)であった。オランダは、ホイヘンスとローレンツ(Hendrik Antoon Lorentz)という、物理学史における2つの巨星を生み出しておきながら、どちらも同時代の超新星、つまりニュートンとアインシュタインに覆い隠されるという不運をかこてきた。

論文が『フィロソフィカル・トランザクション』に掲載されなかったため、ホイヘンスは縮約版を『ジュルナル・デ・サヴァン』(Journal des Sçavans)の1669年3月8日号に発表した。軽視されたと感じたオルデンバークは、すぐにラテン語訳を、明らかにされたことの説明とともに『フィロソフィカル・トランザクション』に掲載した¹¹⁾。この1ページ半の論文が、固い球の正面衝突の問題を解決した。論文は、この解決の4つの帰結で締めくくられている。

1. 2つの固い物体がもつ運動の量は、

衝突によって増えるかもしれないが、反対の方向にある運動の量が差し引かれれば、同じ方向では常に同じ運動の量が残る。

2. 固い物体おのおのの大きさと速度の2乗の積を足し合わせたものは、衝突前後で常に同じである。

3. 静止している固い物体は、ほかのそれより大きい小さい物体と衝突する場合、その中間の大きさをもつ第3の物体が間に入ると、衝突が直接起こるときよりも多くの運動を受け取る。とくに第3の物体が幾何学平均である場合には最大となる。

4. 自然のすばらしい法則(球状の物体については私は証明でき、また衝突が真向かいに起ころうが斜め向かいに起ころうが、物体が固かろうがやわらかかろうが、この結果はすべての場合に当てはまるように思われる)によれば、2つ、3つ、あるいはそれ以上の物体の重力の共通の中心は、それらの衝突の前も後も、常に一様に同じ方向に同じ直線の上を動いている。

これらの主張を逆の順番で考察しよう。第4の主張は、ニュートンが『プリンキピア』で大いに活用した原理を述べるものである。第3の主張によれば、ホイヘンスの理論については強力な定性的検証が可能である。第2の主張は活力の保存として知られることになる内容である。そして第1の主張は、デカルトの運動の保存則を否定し、ベクトル的な運動の保存則、つまり現在われわれが運動量の保存と称するものをもってこれに代えようとするものであ

る。しかし、デカルトの原理と対比するために、これを「方向性運動の保存」とよぶことにしよう。

ホイヘンスがこれらの結果を基本原理から導いた論文の全体は、彼の死後、1703年ようやく出版された。これは大作である¹²⁾。論文は、同じかさをもつ物体どうしの場合を論ずる部分と、異なるかさをもつ物体の場合を論ずる部分の2つに分かれている。結果を導出するための仮説は、デカルト主義者たちも支持することをホイヘンスが確信しているものばかりであった。最初の部分で鍵となる仮説は、相対性の原理である。

物体の運動と、それらの等しいあるいは等しくない速さは、それぞれ静止しているとみなされるほかの物体との関係において理解されねばならない。たとえ前者と後者がともに、あるほかの運動を共有しているとしてもである。したがって、2つの物体が互いに衝突する場合、お互いを動かす様子は、もし両者がともにさらにほかの一樣運動のもとにあるほかの物体からみれば、すべての物体にとって外的なこの一樣運動がなかったとした場合と、まったく異なることがないであろう。

ホイヘンスは、この相対性原理を、答がすぐ得られる参照系に問題を移し変えるために用いた。

第2の部分の鍵となる仮説は、「2つの固い物体が衝突する場合、もし衝撃のあとで一方が以前もっていたすべての運動を保つことがあれば、他方からは何も奪われずまた与えられることは

ない」というものである。この仮説から、ホイヘンスは以下の重要な命題を導いた。「2つの物体が衝突する場合には常に、お互いからみれば、離れるさいの速さと近づきさいの速さは同じである」。この議論はトリチェリの原理に基づいている。ホイヘンスの論文の言辞の巧みさは、その結論に反対するデカルト主義者たちを瀕死の状態に置き去りにすることとなった。

よく知られた問題

ホイヘンスの、後にライブニッツが活力力とよんだものの保存則に対する貢献は、衝突の研究のみにとどまっていた。1673年、彼は『振り子時計』を出版した⁷⁾。ニュートンの『プリンキピア』を別にすれば、『振り子時計』は17世紀の力学においてもっとも重要な著作である。ニュートンの『プリンキピア』も、実はホイヘンスの著作に範をとっている。『振り子時計』の第4部では、数十年前にフランスのメルセンヌ神父(Marin Mersenne, 1588 - 1648)によって出された「振動の中心」という有名な問題が解かれている。この問題とは次のようなものである。「2つかそれ以上のおもりを(曲がらない)ひもでつないだ振り子と同じ周期で振れる、おもりを1つだけもつ単振り子の長さはどれだけか。」

2つのおもりのついた振り子を考えてみよう。下のおもりがあることによって、上のおもりの運動は、それがないうちに比べてどれだけ遅くなるだろうか。ホイヘンスの解答は2つの仮説から出発する。1つはトリチェリの原理で、もう1つは、抵抗がない場合には、「動いている振り子の重心は、上昇と下降で同じ長さの弧を描く」とい

う主張である。これらの仮説から、彼は解答の基礎となる2つの命題を導いた。

1. いくつかの物体が、異なった高さを落下あるいは上昇する場合、それぞれの上昇あるいは落下の高さと物体の大きさの積の和は、すべての物体の重心の上昇あるいは下降の高さに、それらの物体の大きさの和をかけた積に等しい。
2. 振り子が多くのおもりからなり、静止状態から始まって、ひと続きの振動のどの部分であれ終えたとしても、おもりの間をつなぐひもが切れ、それぞれのおもりがそれまでに得た速度を上向きに変え、頂点に達したと想像しよう。これらすべてを認めれば、すべての物体の重心は、振動が始まる前にあった高さに戻るであろう。

命題1の高さは、得られた速度の2乗の代役を果たす。2つの命題により、それぞれの高さから落ちる個々のおもりの速度の2乗と、落下により重心が得る速度の2乗が関係づけられる。これで複数の点状のおもりの振動の中心を求めるのに十分な準備ができたが、ホイヘンスは次いでこれをさまざまな形をした振り子に拡張している。

ラグランジュは、より早くになされた衝突の問題の解決ではなく、ホイヘンスの振動の中心の問題の解決をひきあいに出して、活力の保存の原理の発見をホイヘンス1人の成果であるとし、ライブニッツにはふれなかった²⁾。ここで重要なのは、当初は固い球に限定された衝突の問題を解くなかで現れた原理が、ガリレオの経路独立性の原理をより一般化した形となって、まった

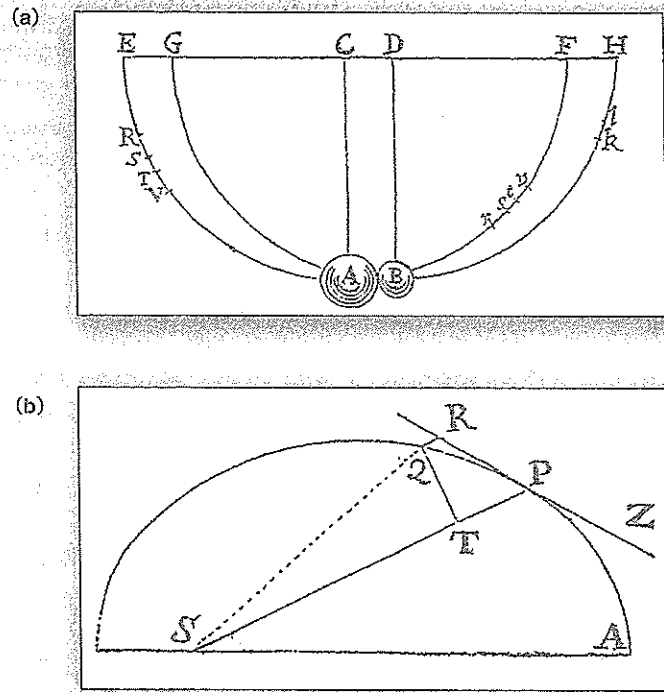
く異なった背景から現れた難問の解決を可能にしたという点である。

ライブニッツとニュートン

ライブニッツはいくつかの段階で活力論争をおり立てたが、それは1686年から始まり1695年に頂点を迎えた。1686年3月、新しい雑誌『学術紀要』(Acta Eruditorum)に微分法に関する画期的な論文を発表した2年後、ライブニッツは同じ雑誌に「デカルトその他による自然法則に関する注目すべき誤りの短い証明」¹³⁾と題する論文を発表した。この小論が書かれた意図は、ライブニッツが自然において保存すると認める起動力と、保存するとは認めない運動の量を、デカルト主義者が同一視しているのに反論することであった。彼の議論は以下の2つの仮定から始まる。(1)ある高さから落下する物体は、もとの高さにもち上げるのに必要な力*4を得る。(2)たとえば、1ポンドの物体を4フィートもち上げると、4ポンドの物体を1フィートもち上げるのには同じ力が必要である。

力を、物体の大きさと、物体に速度を与える高さの積であるとする、その値は(2)でとりあげた2つの物体について同じになる。しかし、最初の物体が得る速度は、ガリレオによれば、2番目の物体が得る速度の2倍であり、したがってこれらの物体の運動の量は異なる。この観察から、ライブニッツは「力はそれがもたらすことのできる結果によってこそ見積もられるべきである」と結論した。

ライブニッツの1686年の小論は、活力についてはふれておらず、またホイヘンスの衝突の問題の解決にも頼ってはいない。しかし結論では、彼が注意



〈図5〉ニュートンの『プリンキピア』の図¹⁾
 (a) 弾道振り子で圓い球の衝突の試験を行う場合に、空気抵抗に関する補正を行う方法を示す。
 (b) 曲線運動の向心力を決定する。

を喚起した誤りが、「多くの学者たちが、実際にはまったく正しいホイヘンスの振り子の振動の中心についての法則を、最近になって疑問視している理由」であると述べていた。

ニュートンの『プリンキピア』の第1巻は、活力論争との関わりをもつ部分であるが、1686年1月に印刷所に送られており、このときニュートンはまだ『學術紀要』に載ったライプニッツの小論を見ることはできなかった。ニュートンは、『プリンキピア』の第2版(1713年)と第3版(1726年)が出るまでには、たしかにこの論争に気づいていた。た

だし、どちらにも論争への言及はない。それでも、あらゆる版で同じままであった第1巻のいくつかの部分で、論争をあおったことはたしかである。たとえば運動量保存の法則は、ニュートンの運動の法則の系として提示されており、その次の系としては、注意深く論証されたホイヘンスの重心の原理が続いている。

運動の法則の経験的な論証においては、ニュートンは、衝突の理論についてのより厳しい検証を行うために弾道振り子(図5a)の測定を行うさい、空気抵抗に関する補正を行う方法を示し、衝突物体が完全な弾性体ではないことに由来する補正も同様にやると付け加えている。こうしてニュートンは、物体が完全に固くはない場合に、質量と速度の2乗の積が保存しないことを強調したのである。

ニュートンの『プリンキピア』の命題40は、問題をさらに複雑にした。この命題は、ガリレオの経路独立性の原理は、一様な重力のもとでのみ成り立つわけではなく、どのような中心力のもとでも成り立つことを示した。この結果、速度の2乗はもはや単純に落下した高さ按比例するわけではなく、中心力のこの高さに沿った積分に比例することになる。こうして知らず知らずのうちに、命題40は、速度の2乗の重要性は支持しながら、これを落下の高さと交換可能なものではなくしてしまったわけである。

重要なさらに面倒な複雑さが、ニュートンの起動力の概念によりもたらされた。彼は、彼の求心力を、『振り子時計』のホイヘンスの遠心力と結びつけたことを明らかにしている。ホイヘンスは、物体を円運動に結びつけてお

く糸の張力を示すために、この力を思いついたのであった。これは、糸と円運動する物体を平衡状態に保つ静的な力で、つり下げたおもりを支える糸に働く張力にきわめてよく似ている。ホイヘンスは、一様な円運動では、張力は物体の重さに比例し、また無限小の極限では、円がその接線から離れた距離を、それだけ離れるのに要した時間の2乗で除したものに比例すると結論した。

これはまさにニュートンが、〈図5b〉で示される一般的な曲線運動の場合の向心力について行ったことであって、彼は、無限小の極限では、力は、図のQRを、 $SP \times QT$ で表される時間の2乗で除したものに比例すると結論している。ホイヘンスとの違いは、ニュートンが、物体に働く向心力を、それを生み出す仕組みに働く同じ大きさで逆向きの力とは独立のものであると考えた点である¹⁴⁾。ニュートンの質量をホイヘンスの重さと入れ替えれば、両者とも、一様な円運動では力は mv^2 を半径で除したものに比例すると結論していることがわかる。両者ともに、長く採用されてきた慣用にならって、力の概念を平衡状態の静的な力と結びつけた。

ベルヌーイの不满

しかしさらに厄介な事情が、ベルヌーイ(Jacob Bernoulli, 1654 - 1705)の、複合振り子の振動の中心に関する1691年の『學術紀要』の論文によって生じた¹⁵⁾。ホイヘンスが解答をそこから導いた「あいまいな仮説」についての不满を明らかにしたベルヌーイは、この仮説を否定はしなかったが、ホイヘンスの仮説をこの原理にとり替え

て、ホイヘンスと同じ結果を違うやり方で導いた¹⁶⁾。この原理は、ホイヘンスのそれとは異なり、静的な平衡の原理であり、静的な力と、今日われわれが仮想変位とよぶもののみを用いる。ベルヌーイはこれを使って、振り子の曲がらない糸に沿った平衡の条件を求めた。この糸が、おもりの間で運動の量に移していくのである。

振動の中心の問題は、18世紀に入っても引き続き注目を集めた。ラグランジュが彼の『動力学』の最初の章で指摘したように、ニュートンの3つの法則は、質点の運動については十分であるが、それらだけでは振動の中心の問題の解答を得ることはできなかった。すると問題は、これはベルヌーイが問い始めたのであるが、複合振り子やこれに似た多くの問題を解くためには、さらにどのような原理が選ばれるべきか、というものとなった。ホイヘンスの活力の原理以外の候補としては、ダランベール(Jean d'Alembert)によってベルヌーイの原理が一般化されたもの、オイラー(Leonhard Euler)の運動量のモーメントの原理、そしてモーペルテュイ(Pierre de Maupertuis)の最小作用の原理などがあつた。

生ける力と死せる力

ライプニッツが1686年の小論を発表すると、デカルト主義者たちとのやりとりが始まった。デカルトの運動の保存(図3)は、全空間が物質で満たされていると考えれば、捨てがたい。デカルト主義者たちとやりとりをするうち、ライプニッツは「動力学」(dynamics, この語は彼のものである)についての著作のなかで、自分の立場を鍛え上げていくこととなった。ただしこれ

らは、19世紀まで公刊されることはなかった¹⁷⁾。こうした著作のなかでは、ライプニッツは、方向性のある運動の保存を認めているが、運動は mv^2 とは違って方向性があるため、ほかの物体との関連で考える必要があり、したがって個々の物体がそれ自体としても性質ではないと述べている。彼は、やわらかい物体の衝突の場合には mv^2 が一見保存しないことも認めている。しかし、検出されることのない物体の微小な構成要素の運動により、この場合も実際には保存されていると主張した。

ライプニッツは、彼の「動力学という新しい学」についての論文を発表している¹⁸⁾。『力学提要』(Specimen dynamicum)と名づけられたこの論文は、1695年に刊行された。ここで彼は、活力(vis viva)を、生ける力(living force, つまり活力)と死せる力(dead force)を区別する議論のなかで導入した。死せる力の例として彼が指摘するのは、「遠心力と、重力あるいは求心力」であり、また、静的な平衡を保つのに関わる力で、それらのつり合いが壊れると運動が起るといふものであつた。

「古代人たちは、知られている限り、死せる力の科学のみを考察し、それを一般に機械学とよんだ」と彼はいう。「これは、てこや、滑車や、斜面を扱う学問であつた」。こうした力は、まさにかさと速度の質量に比例する。なぜならば「運動がまさに始まる時」には、動いた距離は速度に比例するためである。生ける力は衝突のさいに現れるが、これは「死せる力の常に続く影響が無限に集まって生ずるのである」。

結果は原因に等しくなければならぬという形而上学的な原則をもちだし、ライプニッツは1686年の議論の変

●反射と屈折の法則が破れるとき
●マイクログレージングに対して透明な
物体ができた!

●銀河団衝突が早く
タークマターの存在

反射と屈折の法則が破れるとき

バーバラ・ゴス・レヴィ

久我隆弘 訳

New angles to refraction and reflection in chiral liquids

Barbara Goss Levi

Physics Today Vol. 59 No. 12 © 2006 American Institute of Physics

よく知られた「反射角と入射角は等しい」という反射の法則が成り立たない場合があることが、最近の実験で確かめられた。

フレネル(Augustin-Jean Fresnel)は旋光性のある液体^{*1}、すなわち鏡面対称性のない分子からなる液体に入射した光は2つに分かれるだろうと1822年に予言した。旋光性液体中で光が2つに分離するのは、右回り円偏光と左回り円偏光の液体中での伝播速度、つまり屈折率が異なるからである。フレネルはこの分離角を測定する実験を提案したが、この分離角はマイクロラジアン程度と非常に小さいため、フレネルの時代には測定不可能だった。しかしフレネルは、直線複屈折性^{*2}のある結晶石英(水晶)が像を2重にすることは測定していたので、その効果を使って円偏光状態という光の状態があるということは証明した。

ハーバード大学ローランド研究所のゴーシュ(Ambarish Ghosh)とフィッシャー(Peer Fischer)は最近、フレネルが提案したのと同様な手法で、旋光性液体中を伝わる2つの円偏光状態の

間の小さな分離角を測定した。フィッシャーは、「いままで誰もこの分離角測定をしたことがなかったのは驚きだ」と語っている。「たぶんこれまでの研究は、円偏光間の位相差にはばかり注目しており、伝播する光の位置(分離角)については見過ごしていたのだろう」と続けている。

2つの円偏光の間の位相差は、溶液中を伝播する長さとともに増大するので、直線偏光方向の回転角として割合と簡単に測定できる。直線偏光は右回り円偏光と左回り円偏光とを同じ割合でコヒーレントに重ね合わせたものであり、旋光性媒質中では一方の円偏光はもう一方の円偏光よりも伝播速度が遅い。したがって、媒質中を伝播すると2つの円偏光の間に位相差が生じ、再び重ね合わせたときには直線偏光の偏光方向が回転しているのである。

現在、溶液中の旋光性分子の濃度やその旋光度の測定には、偏光回転法がもっぱら用いられている。有機立体化学のほとんどの研究は、旋光性分子に関するものである。また、ほとんどの医薬品は旋光性物質であり、単一の光学異性体(同じ旋光性をもつ分

子)が市場に出回っている。なぜなら、鏡面対称な異性体は人体に異なる影響を及ぼすからである。

ゴーシュとフィッシャーは分離角を測定するために、左旋光性、および右旋光性の光学異性体をプリズム型の容器(キュベット)に入れて交互に並べ、そこに直線偏光の光を通した(図1a)。キュベット内の光学異性体のタイプに応じて光の出入射面での屈折角が異なるので、境界面を通るたびに2つの円偏光成分はお互いに離れていくことになる。(図1b)は、CCDカメラ上で測定した一連のキュベットを透過してきた光線の位置画像であり、それぞれ境界面は8, 12, 16, 20となっている。

ゴーシュとフィッシャーは、屈折してきた2つの光線をCCDカメラでも分離して測定できるように、図にあるようなたくさんのキュベットを使った。さらに彼らは、位置敏感検出器を用いて単一の境界面でもこの分離を測定できることを確認した。1つの境界面を通ってきたレーザー光の、ほんのわずかな変位を測定できたのである。レーザー光の偏光を右回り円偏光と左回り円偏光の間で変調し、その変調に同期した測定を行うことで、わずか10ナノラジアンの変位も測定可能となった。

ゴーシュらはこの検出器を使って、

*1 [訳注]「光学活性がある」という場合もある。

*2 [訳注]1軸性結晶では、結晶軸方向に電場が振動している直線偏光と、結晶軸に垂直に振動している直線偏光の屈折率は異なる。この性質のことをたんに複屈折性とよぶ場合が多いが、本稿では円偏光に対する複屈折性、つまり円複屈折性を議論するので、両者をきちんと区別できるように、直線複屈折性と正確に記述することにしている。

種を提示した。彼は、「力を、上昇に用いることで生み出される結果」によって計算し、ある物体からほかへ移される力は、速度の2乗に比例すると結論した。ライプニッツは、運動の変化にさいして保存するのは生ける力のほうであると決めるのは、形而上学的な原則であることを明言した。

17世紀から18世紀に受け継がれた活力論争は、正味のところ、どの量が普遍的に保存されるのかという問題に関するものであった。保存するのは、デカルトの運動か、ライプニッツの活力か、あるいはわれわれが今日運動量とよぶものなのか。論争がこれほど長く続いたのは、いくつかのさらに込み入った問題が関わっていたためであった。1つは、「力」という語が何を指すべきかという、語義に関わる問題である。これより扱いやすかったわけではなく、またこれより混乱を招きにくかったわけでもなかったのが、ライプニッツがとり上げた形而上学的な問題であった。そしてまた面倒であったのが、やわらかい物体の衝突にさいしては、活力は保存しないという経験的な事実であった。

18世紀の運動に関する研究の多くは、特定の問題と、それらに数学的な解答をもたらすことのできる原理的を絞っていた。活力がやわらかい物体の場合に保存しないことにより、活力の保存という原理が問題なく使えるのはどのような場合か、という疑問が生じた。そしてついには、ベルヌーイによって問題が提起された。「活力の原理は、それが正しい解答を与える場合であっても、公理のようにみなののは適切であったのだろうか。これを力学全体にとって基本的なものであるとす

るライプニッツの主張は、さらに疑わしい」。論争がこれほど長引いたのも無理はなかった。

参考文献

(以下、日本語訳が複数ある場合は、新しさを、普及の程度などを考慮して1種類のみ掲げる。)

- 1) I. Newton: *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, London (1687); 第3版の新しい英訳は、*The Principia, Mathematical Principles of Natural Philosophy: A New Translation*, I. B. Cohen, A. Whitman, trans., U. California Press, Berkeley (1999). [河辺六男責任編集「ニュートン」(中央公論社, 1971年)に河辺六男訳所収。]
- 2) T. L. Hankins: *Isis* 56, 281 (1965); L. L. Laudan: *Isis* 59, 130 (1968); C. Ilits: *Isis* 62, 21 (1971) and 64, 356 (1973).
- 3) J. L. Lagrange: *Mécanique analytique*, Paris (1788), 2nd ed. (1811). 英訳は、*Analytical Mechanics*, A. Boissonnade, V. N. Vagliente, trans., Kluwer, Dordrecht, the Netherlands (1977). [ラグランジュ原著・森本或雄訳「解析力学抄」(丸善, 1916年), 抄訳]
- 4) I. Newton: *Arithmetica universalis*, Cambridge (1707). 1728年の英語版, *Universal Arithmetica*, The Mathematical Works of Isaac Newton, vol. 2, D. T. Whiteside, ed., Johnson Reprint Corp., New York (1967), p. 46所収。
- 5) G. Galilei: *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove Scienze*, Leiden (1638). 英訳は、*Dialogues Concerning Two New Sciences*, H. Crew, A. de Salvio, trans., Dover, New York (1954). [伊東俊太郎「ガリレオ」(講談社, 1985年)に齋藤忠訳所収。]
- 6) E. Torricelli: *De motu gravium naturaliter descenduntium, et projectorum*, Florence (1644).
- 7) C. Huygens: *Horologium oscillatorium, sive de motu pendulorum ad horologia apatato demonstrations geometricæ*, Paris (1673). 英訳は、*The Pendulum Clock or Geometrical Demonstrations Concerning the Motion of Pendula as Applied to Clocks*, R. J. Blackwell, trans., Iowa State U. Press, Ames (1986). [原亨吉編「ホイヘンス」(朝日出版社, 1989年)に原亨吉訳所収。]
- 8) R. Descartes: *Principia philosophiæ*, Paris (1644). 英訳は、*Principles of Philosophy*, V. R. Miller, R. P. Miller, trans., Reidel, Dordrecht, the Netherlands (1983). [井上庄七・小林道夫共編「デカルト: 哲学の原理」(朝日出版社, 1988年)。]

- 9) B. de Spinoza: *Renati Des Cartes principiorum philosophiæ*, Amsterdam (1663). 英訳は、*Earlier Philosophical Writings: The Cartesian Principles and Thoughts on Metaphysics*, F. A. Hayes, trans., Bobbs-Merrill, Indianapolis, IN (1963). [スピノザ著・島中尚志訳「デカルトの哲学原理: 形而上学的思想」(岩波書店, 1959年)。]
- 10) A. R. Hall: *Brit. J. Hist. Sci.* 3, 24 (1966).
- 11) C. Huygens: *Philos. Trans. R. Soc.* 4, 925 (1669).
- 12) C. Huygens: in *Opuscula postuma*, B. de Volder, B. Fullenius, eds., Leiden (1703). 未公開の M. S. Mahoney (Princeton University) による英訳がある。[原亨吉編「ホイヘンス」に西敬尚訳所収。]
- 13) G. W. Leibniz: *Acta Eruditorum* (1686), p. 161. 英訳は、*Philosophical Papers and Letters*, L. E. Loemker, trans., and ed. Reidel, Dordrecht, the Netherlands (1969), p. 296. [下村寅太郎・山本信・中村幸四郎・原亨吉監修「ライプニッツ著作集」3 数学・自然科学(工作舎, 1999年)に横山雅彦訳所収。]
- 14) B. Pourciau: *Arch. Hist. Exact Sci.* 60, 157 (2006).
- 15) J. Bernoulli: *Acta Eruditorum* (1691), p. 317.
- 16) E. Mariotte: *Traité de la percussion ou choc des corps*, Paris (1673).
- 17) D. Garber: in *The Cambridge Companion to Leibniz*, N. Jolley, ed., Cambridge U. Press, Cambridge, UK (1995), p. 272.
- 18) G. W. Leibniz: *Acta Eruditorum* (1695), p. 145. 英訳は、*Philosophical Papers and Letters*, L. E. Loemker, trans. And ed., Reidel, Dordrecht, the Netherlands (1969), p. 435. [下村寅太郎・山本信・中村幸四郎・原亨吉監修「ライプニッツ著作集」3 数学・自然科学に横山雅彦・長島秀男訳所収。ライプニッツの生前未公開であった第2部を含む。]