

XVII

ガリレオ

Galileo

1564-1642

伊藤和行

Kazuyuki Ito

1 新しい自然観の誕生

近代科学における自然研究のモデル

ガリレオ・ガリレイ（一五六四—一六四二）は、ニュートンとともに、近代科学の創始者として知られる。彼は最初の「科学者」として、ピサの斜塔での落体実験や振子の等時性の発見、また『二大世界体系対話（天文対話）』の出版によって惹き起こされた宗教裁判といった事件によって歴史に名を残している。彼の科学上の功績としては、望遠鏡による天文観測と地動説の擁護、落下法則と投射体の軌道の発見がまず挙げられるが、劣らず重要なことは、それらの科学的活動において彼が展開した方法が近代科学における自然研究のモデルとなった点である。彼が展開した自然現象の数量的把握と、特別な装置を用いた数学的法則の実験的検証という方法は、それまで自然研究に携わっていた哲学者たちのものとはまったく異なる新しいものであり、それは「科学革命」と呼ばれるに値するような自然研究の革新を招くものだった。「科学者」であるガリレオと「哲学の歴史」で扱う理由を挙げるとすれば、現代科学の方法論的出発点が彼にあること、そして彼が従来の自然哲学とはまったく異なる新しい自然現象の研究方法を提示し、同時に新しい自然観の誕生を導いたことにある。

❖生涯と背景

対抗宗教改革の
真つただ中

ガリレオは一五六四年二月一日に斜塔で有名なピサで生まれた。この年には、ルネサンス芸術の巨匠ミケランジェロが亡くなっており、レオナルドやラファエッロで知られるルネサンスはすでに終焉を迎え、時代は対抗宗教改革の真つただ中だった。ガリレオの人生には、地動説をめぐる宗教裁判に象徴されるように、対抗宗教改革による文化的引き締め政策とイタリアの不安定な政治的状况が色濃く影を落としている。

数学者兼哲学者

先にガリレオを「科学者」と呼んだが、実はこの時代には現代的な意味での「科学」も「科学者」も存在せず、彼はピサ大学（一五八九―九二年）およびパドヴァ大学（一五九二―一六二〇年）の数学教授、そしてイタリア中部のフィレンツェを支配していた「トスカーナ大公付主席数学者兼哲学者」（一六一〇―四二年）として活動したのだった。彼は人生の後半を、かつてレオナルドらの芸術家がそうであったように、宮廷で活動する知識人として過ごした。また彼がピサ大学とパドヴァ大学に就職したさいにも、その後ろ盾となったのは、トスカーナ大公国築城監督官グイドバルド・デル・モンテ侯であり、

◆1…わが国では、この著作は邦訳の表題である『天文対話』として知られているが、本稿では、本来の表題に倣って『二大世界体系対話』と表記する。原題は『プトレマイオスとコペル

ニクスの二大世界体系に関する対話』(*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo ptolemaico e copernicano*) 1632。

望遠鏡による天文観測

彼は貴族や君主の庇護を背景にして活動したのである。

ガリレオの人生は、一六〇九年に始まる望遠鏡による天文観測を契機として一転した。それまでは、一介の数学教師にすぎず、彼の主なる活動も、機械学（静力学）、築城術、計算尺の製作といった応用数学者のものであった。パドヴァ時代に落下運動や投射体の運動に関する理論的研究を進め、さまざまな実験を行ったことも知られているが、その成果が公表されるのは晩年の一六三〇年代に入ってからだった。ガリレオは望遠鏡の発明者ではなかったが、それを天空に向け、月の凹凸や木星の衛星などを発見することによって宇宙像の変革を導き、さらに望遠鏡をトスカナ大公からの庇護を獲得するため有力な道具に変えた。彼は発見した木星の衛星を、トスカナ大公の家系名を取って「メディチ星」と名づけ、天文観測の結果を発表した『星界の報告』を大公に献呈することによって、一六一〇年に「トスカナ大公付主席数学者兼哲学者」として同大公の宮廷に迎え入れられたのである。

地動説への確信

フィレンツェでの彼の科学的活動は、もっぱらトスカナ大公宮廷における彼の地位と結び付いて行われている。彼は望遠鏡による観測結果から地動説への確信を深め、一六一一年と一六一五年にローマに赴いて、教皇庁の有力者らに望遠鏡を披露するとともに地動説を熱心に説いた。これはアリストテレス哲学を信奉する哲学者らの反発を受け、一六一六年には枢機卿ベラルミーノから地動説に関して訓告を受けている。それ以後、

宗教裁判

近代力学の基礎
を築く

ガリレオは地動説について論じることはなかったが、フィレンツェ出身の教皇ウルバヌス八世が選出されたことから、ガリレオは地動説を論じた『二大世界体系対話』を一六三二年に刊行した。この出版に端を発する宗教裁判において、彼は有罪を認めざるをえず、終生フィレンツェ郊外の住居に幽閉の身となった。この裁判には、ガリレオがトスカーナ宮廷の高い地位にいたこともあって、教皇庁とりわけ教皇とトスカーナ宮廷との政治的関係が大きな影を落としていた。当時のイタリアでは、思想的問題は宗教的問題そして政治的問題に連関していたのである。しかし、この不遇の晩年にガリレオは『新科学論議』を執筆し、落下法則や投射体の軌道の理論を発表し、近代力学の基礎を築いたのだった。

2 数学的自然

◆望遠鏡による天文観測と地動説

ガリレオが地動説を信奉するようになったのはパドヴァ時代だったが、本格的に地動説を主張するのは、望遠鏡による天文観測を始めてから、すなわち一六一〇年代になってからだ。彼の観測は当時の天文学さらには宇宙論にも大きな衝撃を与えたが、その歴史的意味を理解するためには、同時代の一般的な宇宙像と新しい動きについて触れ

地球中心説すな
わち天動説

ておかねばならない。

古代以来、伝統的な宇宙像の核となっていたのは地球中心説すなわち天動説であり、ガリレオの時代においても、宇宙は、地球を中心とした階層的構造をもち、月下界と月上界すなわち地上界と天上界に大きく区分され、前者が不完全で可変なのに対して、後者は完全で不変なものと考えられていた。天文学においても地球中心系が伝統的であり、ルネサンスに復活したプトレマイオスの天文理論もそうである。それに対して、一五四三年にコペルニクスは太陽中心の惑星理論体系を提出するが、実在世界の記述では、地球の運動を含むことから自然学的に大きな問題に直面せざるをえなかったのである。

天文観測の精度
の向上

ティコ・ブラー
エ

伝統的な宇宙像への挑戦は、天文観測の精度の向上という予想しない方面からもたらされた。それまで彗星は月よりも下で起る気象現象と考えられ、地表から蒸発して上昇したものが燃えて光っているとみなされていた。それに対して、ティコ・ブラーエ（一五四六—一六〇二）は異なる地点から観測したときの視差がないことから、それが月よりも遠くにあると主張したのである。このことは、月上界は完全で不変であるというアリストテレス的な世界像に大きな疑問を投げかけた。ガリレオがアリストテレス的宇宙像に対する挑戦を開始したのも新星の視差の観測からだった。一六〇四年の秋に出現した新星を観測し、ガリレオは、新星は月よりも上の世界に存在すると主張した。月上界における変化を認めたことによってアリストテレス主義者たちとの戦いに参入するこ

眼鏡用のレンズ
を用いて望遠鏡
を製作

『星界の報告』

となったのである。

ガリレオをして地動説の熱狂的な伝道者へと変えたのは望遠鏡だった。彼は一六〇九年に、オランダで望遠鏡が発明されたことを伝え聞き、さっそく既成の眼鏡用のレンズを用いて倍率数倍のものを製作した。さらにその年の終わりには、望遠鏡用にガラスを研磨して、倍率二〇倍の望遠鏡を完成させ、それを夜空に向けたのだった。ガリレオは望遠鏡の発明者ではなかったし、その理論に関しても同時代のケプラーのほうがはるかに優れていた。しかし実際に性能の良い望遠鏡を製作し、それをたんなる玩具から科学研究のための観測器具に変えたのは、間違いなくガリレオの功績だった。

ガリレオは、一六〇九年の末から、天候と健康が許すかぎり、ほぼ毎日観測を続けている。その成果は、一六一〇年三月に出版された『星界の報告』に記されている。そこでは、まず第一に、月の表面には凹凸があり、地表と同様に山や谷があることが指摘され、その高さも推測されていた。これは、月より上の世界は完全であって、地球とはまったく異なるという伝統的な宇宙像を転覆させるものだった。第二に、木星の周りを巡る四つの衛星が描かれていた。これは、太陽の周りを惑星が回転する可能性を示唆するものとガリレオには思われた。第三に、肉眼では見えない非常に多くの恒星が認められ、天の川が無数の恒星からなると記されている。このような望遠鏡による知見は、天上来界は地上界とはまったく異なるものであるという伝統的な見方の基盤を揺るがすものとガ

リレオは考えたが、それゆえに伝統的な理論を信奉する哲学者たちからは大きな批判が巻き起こったのである。

太陽黒点の観測

『星界の報告』の出版以後も、ガリレオは天文観測を続け、地動説への確信を堅固にするような情報を天上界から得ていた。その一つは太陽黒点の観測である。太陽に「黒いしみ」が存在することは、天上界の完全性に対して大きな疑問を投げかけた。その報告は、一六一三年に刊行された『太陽黒点とその属性に関する記述と証明』まで待たねばならないが、ここでは、黒点が太陽表面上にあり、二七日の周期で一回転することが示されていた。さらにガリレオにとって地動説の決定的な証拠と思われたのは、一六一〇年の末に観測した金星の満ち欠けだった。地動説によれば、金星が太陽の反対側にあるときには小さく円形であるが、地球に近づくにつれて大きく欠けていくのである。これはちょうど地球の周りを巡る月が満ち欠けを示すのと同じ理由による。したがって、金星が月と同じように満ち欠けを示すならば、月が地球の周りを巡るように金星も太陽の周りを巡っているはずである。ガリレオは、金星の満ち欠けの発見の後、望遠鏡を携えてローマに向かい、教皇庁の有力者に対して、望遠鏡の威力を示すとともに、地動説を説いたのだった。このガリレオの地動説キャンペーンは、アリストテレス主義者らの反発を惹き起こし、対抗宗教改革の流れのなか、教皇庁による思想的引き締め政策的的になってしまいが、この問題については後で論じることしよう。

金星の満ち欠け

アリストテレス主義者らの反発

海の干満を地動
説によって説明

日常的経験とは
異なるレベルの
経験の導入

望遠鏡による天文観測の成果は、天上界と地上界との二分にもとづくアリストテレス的宇宙像に転覆を迫るものと言えようが、しかし地動説が正しいことを確認する決定的証拠を提供するものでもなかった。ガリレオは、そのような地動説と天動説の正否を決定する自然哲学的な根拠として海の干満の説明を考えていた。それが提示されたのは、一六三二年に出版された『二大世界体系対話』においてだった。この著作では、地動説を真理として説いてはならないという教皇庁の命令に従い、天動説と地動説のどちらにも荷担せず、仮説として論じる姿勢をとったと序文では述べられている。しかしガリレオは天動説の難点を指摘し、さらに海の干満を地動説によって説明しているので、後者を真理とみなしていることは読者には明瞭だった。地動説によれば、地球は自転と公転という二重の運動をしていることから、二つの運動の方向が一致しているところでは早く運動し、反対のところでは遅く運動することになる。この速さの違いから海水の振動が生じ、その結果海の干満が惹き起こされるというのである。この説明は誤っているが、これこそガリレオにとっては地動説に関する最強の理論的根拠だった。

ガリレオによる宇宙像の変革は、望遠鏡という新しい装置によって導出された非日常的経験にもとづいたものであって、当時の哲学者たちが根拠とした日常的経験とはまったく異なるレベルの経験の導入によるものだった。ガリレオの望遠鏡の登場は、現代の巨大な天体観測用望遠鏡への道程が始まったことを意味している。ガリレオは、もう一

つの重要な業績である運動論においても、特別な装置を製作し、日常的な観察とは異なる非日常的な経験を得るような「実験」を行っていた。

❖落下法則と数学的自然学の誕生

『新科学論議』

数学的著作をモデルとした運動論

落下法則の発見はガリレオの名を科学史において不朽のものにするとともに、近代力学、さらには近代物理学の誕生を告げたと言われる。『新科学論議』では、落下法則すなわち落下距離は落下時間の二乗に比例すること、投射体の軌道がパラボラ曲線であることが数学的に導出されている。その考察を通じて、自然現象における数学的法則の探究とその実験的確認という数理科学のモデルが提示された。同書で彼は数学的著作をモデルとして運動論を展開している。すなわちそこで目標とされたのは、エウクレイデス（ユークリッド）やアルキメデスの数学的著作であって、定義、公準から出発し、命題として定理や問題を導出するという演繹的体系の構築だった。

『新科学論議』は四日にわたる対話から構成され、前半では、外力に対する物質の抵抗という工学的（当時の言葉では「機械学的」）問題が扱われ、後半で運動の問題が論じられているが、それは『位置運動論』というラテン語で著された数学的形式の著作について、三人の登場人物がイタリア語で対話するという特殊な形式をとっていた。『位置運動論』は三巻、すなわち「均等運動論」、「自然加速運動論」、「強制運動すなわち投射

「均等運動論」

比例関係

「体」から構成されている。各巻の構成はまったく数学書のものだった。第一巻「均等運動論」は、均等運動の定義、四つの公理、六つの定理（命題）から構成されている。まず「均等運動すなわち一樣運動とは、任意の等しい時間のうちに可動体が通過する部分が互いに等しいものである」と定義されている。次いで四つの公理があり、最初の二つでは同一の均等運動における距離と時間の関係、後半の二つでは、同一の時間における速さと距離の関係が述べられている。しかし速さと時間、距離のあいだの数量的関係が具体的に述べられているのはそれに続く六つの定理においてであり、ここでは比例関係という、ガリレオが運動の問題を論じるさいの数学的道具立てが示されていた。

定理 1 速さが等しいとき、時間の比は距離の比に等しい。

定理 2 時間が等しいとき、距離の比は速さの比に等しい。

定理 3 距離が等しいとき、時間は速さに逆対応する（時間の比は速さの逆比である）。

定理 4 距離の比は、速さの比と時間の比から合成される。

定理 5 時間の比は、距離の比と速さの逆比とから合成される。

定理 6 速さの比は、距離の比と時間の逆比とから合成される。

これらの六つの定理は、速さ、距離、時間の関係を比例によって述べたものだが、その内容は、関数として速さを定義すれば一つの命題ですむようにわれわれには思われる。しかしガリレオが数学を運動という現象に適用しようとしたときに、彼が用いることのできた数学的道具立てはわれわれのものはまったく異なっていた。彼が使用できたのは比例関係だけであって、通過距離の運動時間による商である平均速度や、その極限として瞬間速度というような概念も、それを表現する数学的技法もなかったのである。ニュートン以降の近代力学の発展が微積分の発展と重なっていたことからうかがわれるように、ガリレオは、運動現象を適切に扱うのに不可欠とわれわれには思われるような数学的道具立てをもたずに、数学的運動論を築こうとしていたのだった。

加速運動を十分に
明瞭には定義
できなかった

近代的な速度概念とその数学的表現をもたないガリレオは、加速運動を扱うさいに大きな問題を抱えざるをえなかった。そもそも加速運動を十分に明瞭には定義できなかったのである。彼は一樣加速運動とは、各時間に等しい「速さの度合」が加わるものと定義している。この「速さの度合」という概念は中世後期の運動論において、「非一樣な運動」すなわち加速運動を論じるさいに、任意の瞬間における速さを表すために導入され、それは、その「速さの度合」である時間だけ「一樣な運動」をしたときの通過距離によって測られるものとされていた。とくに「一樣に非一樣な運動」すなわち一樣加速

「マートン規則」

運動においては、「マートン規則」が導かれている。それによれば、「一様に非一様な運動」における通過距離は、同じ時間において、その最終の「速さの度合」の半分の「速さの度合」でもって「一様な運動」をしたときの通過距離に等しいのである。

定理1「中間速度定理」

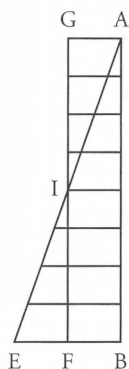
ガリレオも、「自然加速運動論」では、まずその定義から、「マートン規則」と同じ結論を導く定理1「中間速度定理」によって一様加速運動を均等運動に還元し、定理2によって通過距離は通過時間の二乗に比例することを証明している。落下法則の導出において核心となる定理1とは次のとおりである。

定理1 可動体がある距離を静止からの一様加速運動によって通過する時間は、同じ可動体が同一の距離を、その速さの度合が先の一様加速運動の最大かつ最終の速さの度合の半分であるような均等運動で通過する時間に等しい。

◆3…中世の運動論に関しては、E・グラント『中世の自然学』横山雅彦訳、みすず書房、一九八二年を参照。

◆4…『新科学論議』二四七—二四八頁。ガリレオの「中間速度定理」の発見に対する「マートン規則」の影響がこれまで主張されてきたが、彼がこの定理に言及するのは『新科学論議』が初めてであって、それまでは「二倍距離定理」を用いていた

ことから考えても直接的な影響は認めがたいように思われる。「二倍距離定理」とは、一様加速運動の最終の「速さの度合」でもって一様運動を行うときには、一様加速運動のさいの二倍の距離を通過するというもので、バドヴァ時代の草稿や『二大世界体系対話』で見られる『天文対話』上、青木靖三訳、岩波文庫、一九五九年、三四一—三四三頁参照。

C
D

ガリレオはこの定理を次のようにして証明している（図版参照）。可動体が一樣加速運動によって時間 AB において通過する距離を CD とし、その最終の「速さの度合」を EB とする。三角形 AEB において、

AB の各点から BE に平行に引かれた全線分は、瞬間 A 以降の各瞬間における「速さの度合」を表す。さらに BE を F で二等分し、 BA 、 BF に平行に FG 、 AG を引くと、平行四辺形 $AGFB$ が作られ、これは三角形 AEB に面積が等しい。平行四辺形内にある BE に平行な線分は、均等運動における各瞬間の「速さの度合」を表している。このとき、三角形 AEB に含まれる全平行線の集まりは平行四辺形 $AGFB$ に含まれる全平行線の集まりに等しい、すなわち一樣加速運動と均等運動では同数の「速さの度合」が費やされる。よって両者が同じ時間で通過する距離は同じである。

この証明は一般に、一樣加速運動と均等運動による通過距離を表す三角形と長方形の面積が等しいことから、両者による通過距離が等しいことを導くものと理解されている。しかしこの証明をよく見ると、実は「速さの度合」の集まりが距離に等しいとも、図形の面積が距離を表すとも述べられておらず、距離 CD と三角形 AEB や平行四辺形 AG

F Bとの関係についても何も触れられていないのである。ガリレオは「速さの度合」を距離に直接的に関係づける方法をもっていなかったと考えられる。

「不可分者」

ガリレオが、二つの図形の面積を比較するときに用いているのはわれわれの積分法ではなく、「不可分者」(indivisibles)による方法だった。この方法によれば、二つの図形の面積を比較するためには、対応する「不可分者」すなわち平面図形の場合には線分の長さを比較すればよいのである。たとえば、高さ h と底辺が等しい長方形と平行四辺形の面積が等しいことは、底辺に平行な直線によって両方の図形から切り取られる線分すなわち「不可分者」がつねに等しいことから導かれる。もしその線分の長さがつねに一方が他方の二倍であれば、面積も二倍になる。この「不可分者」の概念は基準線に平行な切断線を用いるという分析的なものであって、「不可分者」の集まりがもとの図形を表すといった構成的なものではなかった。というのは、区分求積法における長方形は非常に小さくとも幅をもつものであるのに対して、「不可分者」は幅のない線分であるから、それをいくら集めても幅は生じないのである。ガリレオにおいては、瞬間はちょうど大

◆5…立体図形の場合には「不可分者」は平面図形になる。「不可分者」の理論は、カヴァリエーリの『不可分者による連続体の幾何学』(一六三五年)において体系的に論じられている。

V・J・カッツ『数学の歴史』上野健爾・三浦伸夫監訳、共立出版、二〇〇五年、五三七―五四一頁参照。

「速さの度合」
は線分に対応

斜面上の下降運
動

きさのない点に対応しており、「速さの度合」は線分に対応していたのである。「速さの度合」が「不可分者」である線分によって表されるとすれば、「速さの度合」すなわち「不可分者」を集めても、それは距離すなわちものと図形の面積を表すことはできなかった。このため定理1の証明では、通過距離が等しいことは、同じ時間で同数の「速さの度合」が費やされるという曖昧な表現によって示唆されているだけだった。もちろんガリレオは直観的には面積が距離を表していると考えていたと思われるが、それを論証する数学的な手段をもたなかったのである。

「自然加速運動論」においてガリレオは定理1と定理2によって落下法則を導出した後、残りの三六の命題では斜面上の下降運動を論じている。実はガリレオの落下現象の考察の中心は鉛直落下運動ではなく、斜面上の運動だった。斜面運動の議論の出発点となっているのは、斜面運動の「原理」と呼ばれるものである。すなわち「同一の可動体が傾きの異なる斜面上で獲得する速さの度合は、それらの斜面の高さが等しいときには互いに等しいことを認める」。ガリレオはこの「原理」を証明せずに仮定し、その正しさはそれから導出された結果が確認されることから証明されるとした。この「原理」は、現代的に見れば、物体の重さの斜面方向の分力に加速が比例することを意味しており、したがって物体に働く外力と加速との関係を示すものだった。しかしガリレオは、それを仮定してしまうことによって、この動力学的問題を回避し、まったく天下一の議論を

振子の等時性と
最速降下線

進めてしまったのだった。これは、ガリレオが外力と加速との十分な関係を見出していなかったことを示していると言えよう。この結果、ガリレオの落下運動の議論はまったく力が関与しない運動論的なものとなってしまったのである。

以上のような問題を抱えていたにもかかわらず、ガリレオが斜面運動に関する三六〇の命題を入れた目的は何だったのだろうか。一つは振子の等時性を証明することであり、もう一つは垂直に立てられた円弧が最速降下線（高さの異なる二点間を最短時間で落下する軌道）であることの証明だったと考えられる。残念ながらガリレオの目論見は両方とも失敗に終わった。というのは、完全に等時的なのはホイヘンスが示すようにサイクロイド振子であり、また最速降下線は円ではなく、カタナリー（懸垂線）だったのである。しかしガリレオの落下運動の研究がたんに鉛直落下運動を論じるだけではなく、斜面運動に関して明瞭な目標をもっていたことは忘れてはならない。

ガリレオの落下運動の理論は、一樣加速運動の定義から出発していることからうかがわれるように、そこで展開された定理が現実世界において成立することを保証するもの

◆6…ホイヘンスは、『振子時計』（一六七三年）において「中間速度定理」を背理法を用いて厳密な仕方で証明しているが、そこでは図形の面積を表すものとされている。cf. M.

Blay, *Les raisons de l'infini*, Paris, 1993, pp. 52-55.
◆7…『新科学論議』二四四頁。

巧みな斜面の実験

は理論内にはなかった。一樣加速運動が落下運動であることを確認し、数学的理論を現実世界に結び付けるのは斜面の実験である。それは、空気などの抵抗をできるだけ避け、斜面によって加速度を小さくして、できるだけ精度を高くするという巧みなものだった。この実験は思考実験ではないかと、その現実性が疑問視されたこともあった。たしかにその実験に関する記述を彼の残した手稿の中に見出すことはできないが、一方でそれよりも複雑な実験をガリレオが行っていたことが手稿から知られている。

3 新しい科学

❖ 数学的世界と物理的世界

ガリレオが提示した新しい「科学」とは、数量的規則性を、自然現象の本質的性質とみなして、精密な測定を含む実験によって確認するといふものだった。その試みのマニフェストは、『偽金鑑識官』（一六二二年）の中の有名な一節で示されていた。

哲学は、いつもわれわれの眼前に開かれているこの壮大な書物（宇宙のことを言うのですが）の中に記されているのです。しかし、最初にそこに書いてある言葉を理解し、文字を識別することを学ばなければ、理解することはできません。この書物

「数学の言葉」

は、数学の言葉で書かれており、その文字は三角形や円、そして他の幾何学的図形なのです。それらによらなければ、人間の力でこの書物の言葉を理解することはできませんし、またそれらなしでは、空しく暗い迷宮の中をさまようばかりです。¹⁰

日常的世界の背後に隠されている数学的世界

しかしこの「数学の言葉」は日々の経験において得られるものではなく、日常的世界から抽出せねばならないものだった。天文学においては、恒星や惑星の位置を正確に測定する観測装置や望遠鏡を用いることが不可欠だったし、また落下運動についても、斜面の実験では、斜面上を下降させることによって落下の加速度を小さくし測定を容易にするとともに、鉛球を用いて空気抵抗の影響を極力減らすという工夫がなされていた。ガリレオは、日常的世界の背後に隠されている数学的世界こそ現象の本質であり、それを捉えるためには、特別な道具を用いた実験が必要と考えていたのである。しかしこの主張に対して、哲学者たちはその根拠を問うだろう。数学的世界と物理的世界は別のも

◆8: 『新科学論議』二五三—二五四頁。

しい。

◆9: 『ガリレオの運動論関係の手稿』に関しては、S・ドレイク『ガリレオの生涯』田中一郎訳、共立出版、一九八四—八五年および高橋憲一『ガリレオの迷宮』共立出版、二〇〇六年が詳

◆10: 『偽金鑑識官』『ガリレオ』(『世界の名著』21、山田慶児、谷泰訳、中央公論社、一九七三年、三〇八頁参照(訳文は筆者によるものである))。

のであって、数学的論理を物理現象に適用することは不当なのではないか、と。そもそも幾何学的な命題は現実世界では成り立たないのである。

このことは、ガリレオ自身が『二大世界体系対話』の中で「球が平面と一点で接する」という命題を取り上げて論じていた。そこで、アリストテレス主義者の登場人物シンプリーチョは、この命題は幾何学的に証明されても、それが適用できるのは抽象的な球に関してであって、物質的な球に関してではないと主張する。それに対して、ガリレオの代弁者サルヴィアティは、物質的な球が平面と一点で接しないとすれば、それは不完全な球と平面だからであって、両者が完全であれば、一点で接するはずであると反論する。しかしシンプリーチョは納得せず、物質的な形状にはかならず不規則性がともない、完全な図形は物質界では得られないと再反論していた。この数学的証明の自然現象への適用に対する反論に対して、ガリレオは直接的には答えることができなかったと言えよう。

十分に堅固な理論的基盤をもたず

ガリレオの数学的運動論は、十分に堅固な理論的基盤をもってはいなかった。落下運動に関しても、それが一樣加速運動であることの理論的根拠を提示することはできず、一樣加速運動の定義から出発し、その正しさはそれから数学的に導出された落下法則の実験的確認によっていた。また斜面運動においても、斜面の傾きによる加速の大きさの変化を理論的に説明することはできなかった。真空中の落下においてすべての物体が等

特異な原子論

しい速度で運動するという法則に関しても、速度が重さに比例するとすれば、矛盾が導かれることを指摘しているが、速度が等しいことは証明していないのである。以上のようなことを説明するためには、力と加速のあいだの関係、また質量の概念が必要であり、ガリレオに望むことは歴史的に無理だろう。しかしガリレオ自身は、数学的世界と物理的世界とをどのようにして結ぼうとしていたのだろうか。

その架け橋と考えられるのは、ガリレオの特異な原子論である。彼は、物質が無限小の原子から構成され、全自然現象はその運動に還元されるという機械論的な自然観を抱いていた。『偽金鑑識官』では、物体の性質は、長さや重さ、運動のような一次性質と、味や匂い、色のようなわれわれの感覚に依存する二次性質に区分され、前者が物体の真の属性であるのに対して、後者は物体を構成する微小粒子すなわち「原子」の運動と接触からわれわれの感覚に惹き起こされたものにすぎないと述べられていた。^{◆12}

また『新科学論議』第一日では、物体の凝集力が原子論によって説明されていた。物体が引っ張られることに対して示す抵抗力は、物体を構成する原子が固く結合したことから生じうる凝集力なのである。ここでは、物体は無数の大きさのない原子から構成されていると考えられ、これは幾何学において線分が無数の大きさのない点から構成され

◆11：前掲訳書『天文対話』上、三〇五—三一五頁。

◆12：『偽金鑑識官』五〇—二一五〇七頁。

数学的世界と物理的世界とに同一的な構造を規定

ているのと同じであるとされている。そしてガリレオは数学の求積において用いられた「不可分者」の概念を、自然界における原子の概念に対応させ、数学的世界と物理的世界とに同一的な構造を指定した。すなわち、「不可分者」の方法では、平面図形に対しては線分が「不可分者」であるが、線分は太さをもたないゆえに平面図形の中には無限個の線分が含まれているのである。

同様に物体も大きな無数の原子から構成されていると考えられる。ガリレオが、物体を構成する原子に関して論ずるさいに、数学的な「不可分者」に関する議論を援用したことはこれまでも批判されてきた。しかしこの数学的原子論は、数学的世界と物理的世界が同一構造をもち、それゆえに数学的論理の物理現象への適用が可能であることを彼に保証するものだったのである。

❖「新科学」へ向けて

『二大世界体系対話』と並ぶガリレオの主著であり、近代数理科学のマニフェストとも言うべき『新科学論議』の正式の表題は、『機械学と位置運動という二つの新しい科学に関する論議と数学的証明』だった。ここで「位置運動」と並んで「機械学」が「新科学」として挙げられていることに違和感を抱くかもしれない。実際、この著作の前半で論じられているのは、外力に対する物質の抵抗力に関する考察であり、それは近代材料

「メッカニカ」

「新しい科学」
の出発点は技術
的関心

工学の起源と評価されている。しかしこの「機械学」は、原語の「メッカニカ」(mechanica)から推測できるように、現代の「力学」という言葉の源泉となったものであって、当時は、機械に関わる技術的な知識のほか、槓子や滑車の働きを説明する静力学的な考察も意味していた。そしてガリレオにとっては、位置運動も技術的な関心の対象だったのである。投射体の運動の考察の目的は、大砲の弾丸の最大射程が四五度であることの証明と、発射角度による到達距離の変化を一覧にした射程表の作成だったが、これは弾道学という技術的学問の研究そのものだったのである。ガリレオはみずからの「新しい科学」の出発点が技術的関心にあったことを自覚しており、『新科学論議』の冒頭で、登場人物の一人であるサルヴィアティーは次のように述べていた。

サルヴィアティー あなたがた、ヴェネツィア市民の、あの有名な造船所をしばしば訪れることから、思索的な精神をもつ人たちに大きな哲学的考察の場が与えられるように、私は思います。とくに機械学と呼ばれる分野においてはそうです。というのは、そこでは、あらゆる種類の道具や機械が多くの職人たちによってたえず働かされており、彼らのなかには、先輩たちの行った観察や、彼ら自身がいつも優れた注意を払って行った観察を通じて、大いに熟練し、非常に鋭い意見をもつ人がぎっしりいるからです。

サグレード まったくあなたのおっしゃるとおりです。また私は生まれつき好奇心が強いので、気晴らしにあの場所をしばしば訪れ、ほかの職人よりも優れた点をもつことから、親方と私たちが呼んでいる人たちの仕事に加わったのです。私は驚かされるだけでなく、いまだに隠されていたほとんど想像もできないような結果の原因についての考察にあたっては、彼らの議論から何度も助けられました。

数理工学者としてのアルキメデス

実際にガリレオの「新しい科学」のモデルとなったのはアルキメデスの静力学研究であり、彼が研究者の理想とみなしていたのがアルキメデス、それも数理工学者としてのアルキメデスだった。実際アルキメデスの著作『浮体について』と『平面板の平衡について』は、ルネサンスにおいて、静力学のように数学を自然現象に適用する試みの見本となっていた。そしてこれらの著作を積極的に紹介し発展させていたのは、宮廷や市政府に雇われていた数学的能力をもった技術者（あるいは技術的問題への関心が強い数学者、現代的に言えば数理工学者）たちだった。彼らは、アルキメデスの静力学的平衡の考察を艇子や滑車などの単純機械の機能の理論的考察に適用していた。ガリレオがピサ大学やパドヴァ大学に就職したさいに後援をしたガイドバルド・デル・モンテ侯も、そのような技術者のグループに属していた。ガリレオも若い時代には機械学の論考を著しており、晩年まで一貫して技術的問題への関心を抱いていた。

数学者や機械学者は具体的な問題の探究にこそしむ

数量的把握と実験的検証

◆13: 「哲学者は、主として普遍的な事柄に専念します。彼らは定義と最も一般的な性質とを見出します。そしてむしろ好奇心の対象であるような、ある種の微妙なことや些細なことは数学者に委ねます。そしてアリストテレスは運動一般がどのようなものであるかについて優れた定義を与え、位置運動について

このようにガリレオの「新しい科学」とは技術的な関心を出発点としており、運動を論じるさいの彼の視点も哲学者のものとはまったく異なっていた。ガリレオ自身が『新科学論議』の中で、なぜ落下において加速が起こるのかといった問題は哲学者に任せて、自分は加速がどのような数学的規則に従うのかを考察すると述べていた。また『二大世界系対話』でも、哲学者は普遍的な事柄に専念するのに対して、数学者や機械学者は、具体的な問題、たとえば加速運動が生じるさいの比の探究にこそしむと述べている。

ガリレオの研究は当時の哲学者から見れば、けっして哲学に属するものではなかった。当時の学問分類に従えば、数学を用いた天文学や静力学は、自然学と数学のあいだの中間的な学問に区分され、自然学とは異なるものとみなされていた。そしてガリレオの落下法則の理論が、基本原理からではなく同様加速運動の定義を出発点としていることは、哲学者によって彼の研究が確固としたものと認められないことを意味していた。このように彼の「新科学」は新しい「自然哲学」とはなりえないのであるが、その数量的把握

はその主要な属性（略）を示すだけで満足したのです。そして加速運動については、加速を根拠づけることで満足し、そのような加速の比や他のより特殊な出来事についての探究は、機械学者やほかの身分の低い職人に委ねたのです」（前掲訳書『天文対話』上、二四九頁参照。訳文は筆者によるものである。）

と実験的確認という方法は自然理解において大きな有効性を提供し、新しい自然研究のモデルを提供したのである。

図版出典——Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze: attinenti alla meccanica & i movimenti locali*, 1638, reprint ed., Bruxelles, 1966.