

ガリレオ『世界系対話』における運動論

伊藤 和行

1：序

ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei, 1564-1642) はニュートンと並び、近代科学の創始者として知られている。彼の業績は、コペルニクスの惑星理論すなわち太陽中心説の擁護を核とする宇宙論の変革と、落下法則で知られる数学的運動論の構築に大きく分けられる。前者は、『世界系対話』の刊行 (1632年)¹を契機とする宗教裁判によって知られている。一方後者は、近代力学の第一歩であるとともに、自然現象における数学的法則の探究と実験による経験的確認という近代数理科学の方法を提示したものとして評価されてきた。

『世界系対話』は宇宙論に関する主著であるが、また運動についても多くのページが割かれていた。もちろん運動論に関しては『新科学論議』(1638年刊行)²が主著であり、その後半部分において、落下法則の導出と実験による検証、そして投射体の軌道がパラボラ曲線 (放物線) となることの証明が行われている。しかし『世界系対話』においても、よく知られている運動の相対性の議論のほか、落下法則や投射体の運動に関する議論もなされていた³。そもそも太陽中心説に基づく宇宙論では、地球の運動がもたらす自然学的な問題の解決が最も重要な課題だったのである。そのためには、アリストテレス自然学に基づいた伝統的な運動論とは異なる新しい運動論を、新しい宇宙

¹ 『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 tolemaico e copernicano*)。邦訳 (岩波文庫版) では『天文対話』と表記されているが、本研究では、原題にしたがって『世界系対話』と表記する。ガリレオの人生と業績については、ドレイク (1984-5); ファントリ (2010); Camerota (2004); Heilbron (2010); Machamer (1998) を参照。

² 『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』 (*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica & i movimenti locali*)。ガリレオの運動論の発展に関しては、高橋 (2006) を参照。

³ 『世界系対話』の内容に関しては、Finocchiaro (1997); (2014) で詳細に述べられている。ガリレオの宇宙論に関しては、コイレ (1988); Clavelin (1968); Shea (1972) などを参照。

論の基盤として構築することが必要だったのである。

地球が自転しているとするならば、なぜ我々はそれを感じないのだろうか、なぜ強い東風が吹かないのだろうか、なぜ我々は、円運動によって飛ばされてしまわないだろうか。これらの疑問に答える必要があったのである。それらに対して、ガリレオは、新しい運動論を展開することによって返答していく。その中には、慣性運動や運動の相対性、運動の合成、落下運動、投射運動といった、ガリレオの運動論の主要な問題がほぼ含まれていた。『新科学論議』におけるように体系的な記述はなされていなかったが、以降で検討するように、地上の物体だけでなく、天上の物体すなわち惑星へも議論は展開されている。

『世界系対話』では、プトレマイオスの地球中心的体系とコペルニクスの太陽中心的体系が4日間にわたる対話の中で論じられている。どちらの体系も仮説として考察するという体裁を採りつつも、ガリレオの意図は、コペルニクスの体系が現実世界を記述する真の理論であることを論証することにあつた。それを目指し、ガリレオは4日間の対話編を構成していった。すなわち第一日では、『星界の報告』および『太陽黒点論』といった過去の著作で示されていた、望遠鏡による天体観測から得られた成果を再録し、新しい知見は伝統的な宇宙像を否定するものであると主張する。伝統的な宇宙論では、世界は天上界と地上界に二分され、天上界が不生不滅で完全であるのに対して、地上界は生成消滅する不完全なものとされていた。それに対して、ガリレオは、天上界でも、地上界におけるように生成消滅し、変化もすると主張する。第二日では、地球の自転運動を取り上げ、それに対する批判に対して反論していく。運動の相対性の考えが述べられ、我々には地球の運動については判断できないと主張される。第三日では、地球の公転運動が扱われ、惑星の逆行運動の合理的な説明といった天文学的な問題が扱われていた。これら三日間の議論を踏まえ、太陽中心説の決定的な根拠として提示されたのが、地球の二つの運動（自転運動と公転運動すなわち日周運動と年周運動）の合成運動による汐潮の説明だった。

本論考は、以上のような『世界系対話』における運動に関わる議論を、宇宙論との関わりに焦点を当てて検討するものである。具体的には、慣性運動、落下運動、運動

の合成と相対性というガリレオ運動論の主要なトピックを取り上げて考察していく⁴。

2. 慣性運動

慣性運動は近代力学における基本法則の一つである。ニュートンは、『プリンキピア』(1687年刊行)⁵において三つの運動法則を措定して力学の理論体系を構築しようとしたが、その第一法則は慣性運動に関するものであり、力と運動の変化の関係を述べた第二法則の前提となるものでもあった。第一法則によれば、物体は、外部から力が働かない限り、その静止あるいは等速直線運動の状態を継続するのである。そして外力が働いた場合にどのように運動が変化するのか、すなわち作用力と加速の関係を与えるのが第二法則だった⁶。

慣性運動という考えは、アリストテレス自然学に基づいた伝統的な運動論の枠組を大きく超えるものである⁷。というのも、伝統的な運動論では、物体は、外的な力によって動かされた場合には、その力が働かなくなれば静止するとされていたからである。その主張は、日常的な世界においては、何かによって動かれている物体は、その力が及ばなくなると自然に止まってしまうという経験を反映している。それに対して、ガリレオは、非常に巧みな議論によって、力が働かなくなっても、水平面上では、物体は運動を継続するという主張を導出していた。水平面は巨視的には、地球の中心をその中心とする球面となるので、このガリレオの慣性運動は現在のような直線運動ではなく円運動となる。

この「円慣性」の考えが『世界系対話』第一日と第二日において論じられていた。どちらにおいても、球の斜面上での運動を用いて、水平面上では運動が加速も減速もせず、等速で継続することが導かれている、以下では、より詳しい説明がされている

⁴ 宇宙論との関係における運動の問題に関する研究としては、コイレ(1988)およびClavelin(1968)が先駆的であるとともに、いまだに重要である。また高橋(2006)第7章を参照。

⁵ 『自然哲学の数学的諸原理』(*Principia mathematica philosophiae naturalis*)

⁶ なお第三法則は作用と反作用について述べたものである。ニュートンの力学については、Newton(2016)の序論およびBlay(1995)を参照。

⁷ 伝統的な運動論と宇宙論に関しては、グラント(1982)第5章、第11章、第12章、リンドバーク(2011)第4章、第5章を参照。

第二日の議論を検討する⁸。

完全に丸い球をきわめて滑らかな斜面の上に置くと下降を始め、その運動はたえず加速していく。その加速は斜面の傾きが大きいほど大きくなる。一方、斜面上を上昇するときには、速度は減少するが、その減速は斜面の傾きが大きいほど大きい。斜面の傾きが小さくなると、下降運動の加速も上昇運動の減速も小さくなる。それでは斜面の傾きがなくなったときには、どうなるだろうか。下方にも上方にも傾いていない平面上では、下方に傾いていないので加速する原因はなく、また上方に傾いていないので減速する原因もない。したがって加速も減速もせず、同じ速さで運動を続けるはずである。そのような平面とは、地球の中心から等距離にあるもの、すなわち地球の表面、水平面である。よって水平面上では、物体は一度衝撃を与えられると、加速も減速もせず、その速さで運動を続けることになる。

これより、円運動は一様（等速）であり、永遠に継続すると主張される。ガリレオにおける慣性運動とはたしかに等速運動であるが、本来の直線運動ではなく水平面上での直線運動、すなわち円運動であった。これは、ガリレオにとって重さが物体に本性的な性質であって、物体の運動を考える際にも重さを抽象することは不可能だったからである。重さを二次的な性質としたのはデカルトであり、彼は、物体の第一性質を延長とすることによって、慣性運動を等速直線運動としたのだった。さらにニュートンは、質量と重量を区別し、重量を万有引力によって生じるものとして捉えたのである⁹。

『世界系対話』第一日では、円慣性の考えを導いた後、それを根拠として、地上の物体と天上の物体の区別の否定へと進んでいる。アリストテレス自然学では、宇宙は、地上界と天上界という二つの世界に分けられ、両者はまったく異なるものとされていた。地上界が不完全で可變的であるのに対して、天上界は完全に普遍的であり、そして両世界では物体の自然な運動も異なっている。すなわち地上の物体の自然運動は落

⁸ *Dialogo*, OGG, VII, pp.172-174; 『天文対話』(上)、222-226頁。第一日における議論は、*Dialogo*, OGG, VII, pp.52-53, 56; 『天文対話』(上)、49、54頁。

⁹ ガリレオの慣性の概念については、とくにコイレ(1988)、第3部「ガリレオと慣性の法則」を参照。Cf. Hooper (1998)。また17世紀の力学の発展に関しては、Blay (1999); Meli (2006); Westfall (1971)を参照。

下運動と上昇運動という直線運動であるのに対して、天体の自然運動は円運動なのである。

これに対して、ガリレオは、円慣性の考えを用いて、円運動は地上の物体においても自然なものであると主張する。まず彼は、円慣性のために円運動が一様であって永遠に継続するのに対して、直線運動は加速あるいは減速するものであるから永続的なものではないと主張する。よって「円運動のみが、宇宙を統合し、最良の配置に置かれている自然の物体に自然本性的に適しうる」のに対して、「直線運動は、自然の物体が完全な秩序から除かれたときに、そこへ戻るためにあてがわれる」¹⁰のである。

ガリレオは、静止と円運動のみが宇宙の秩序の維持に適していることを示したあとで、円慣性の考えを用いて、円運動が地上の物体においても自然運動であるならば、地上の物体と天上の物体を区別する根拠はなくなると主張する。

アリストテレスが天体を諸元素から異なるものとする条件は、彼が両者の自然運動の相違から導いたもの以外にはまったく実体を持たないと答えましょう。したがって、円運動が天体のみのものであることを否定し、すべての自然の可動体にふさわしいと主張するならば、必然的な結果として、生成可能性と生成不可能性、変化可能性と変化不可能性、分割可能性と分割不可能性などといった属性は、世界の全物体に、すなわち諸元素と同様に天体にも等しく共通に適していると言わねばなりません。またアリストテレスは、円運動から、天体に割り当てた属性を拙く誤って推論したと言わねばなりません¹¹。

ガリレオは、円慣性に基づいて、地上世界と天上世界というアリストテレス宇宙論の核心ともいえるべき考えを否定するのである。この主張は、『世界系対話』における主要な論点であった太陽中心説と密接な関係を持っていた。というのは、太陽中心説によれば、地球は惑星の一つ、すなわち天体の一つとなり、地上世界と天上世界を異な

¹⁰ *Dialogo*, OGG, VII, p.56; 『天文対話』(上)、54-55頁。

¹¹ *Dialogo*, OGG, VII, pp.61-62; 『天文対話』(上)、62-63頁。同様の主張は、『天文対話』(上)、77頁でもなされている。

る世界として分ける根拠がなくなるからである。アリストテレスが地上と天上の物体の区別を自然運動の相違から導出しているというガリレオの主張には無理があるが、自然運動が両世界の物体の区別において重要な点であったことは間違いないだろう。

ここまで見てきたように、『世界系対話』第一日では、円慣性によって地上の物体にとっても円運動が自然的であると主張されていた。円慣性の考えが著作において最初に述べられたのは『太陽黒点論』（1613年刊行）¹²だったが、そこでは天上の物体に適用されている。太陽黒点の運動を説明する際に、円慣性が用いられているのである。

ガリレオは、太陽黒点が、当時一般に考えられていた太陽と地球の間にある天体の影ではなく、太陽表面上か、すぐ近くにある物体の影であると考えていた。そして、黒点の共通の規則的運動から、太陽が自転しており、一緒に黒点も回転運動を行っているとは主張している。黒点は、何も外的な力が働かなくとも自ら円運動を行うことが円慣性の考えによって説明されるのである。

ここでは、太陽表面上にあるはずの黒点の運動が、地上の物体の運動と同様にして考察されており、太陽表面上での運動が地球表面上での運動と同じ法則に従うことが前提とされている。しかしながら、太陽黒点の実体がいかなるものであるかは論じられておらず、もちろん太陽中心へ向かう「重さ」を持っているか否かも触れられていなかった。

『太陽黒点論』での円慣性の説明は以下のようなものである。

というのも、自然的物体は、重い物体が低い方へ向かおうとするように、ある種の運動に対する自然的傾向を持つのが観察されるように思われるからです。このような運動は、何らかの障害によって妨害されないときにはいつも、それら重い物体から、特別の外的な運動因を必要とせず、内在的原理でもってなされるのです。自然的物体はまた、重い物体が上方への運動に対して示すように、ある種の他の運動に対しては嫌悪を持ちます。したがって、物体は外的な運動因によって強制的に追い立てられなければ、このようには決して動きません。最後に、自

¹² 『太陽黒点に関する論考と証明』 (*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari*)。高橋(2006)によれば、それ以前に書簡の中で円慣性に言及していた(70頁)。

然的物体は、重い物体が水平運動に対してそうであるように、ある運動に対しては無関心です。地球の中心に向かうのではないので、物体はこの運動への傾向を持ちませんし、中心から離れるわけでもないので嫌悪も持ちません。ですから、あらゆる外的な障害が取り除かれるならば、地球に対して同心的な球の表面にある重い物体は、静止に対しても、水平面のどの部分に向かう運動に対しても無関心でしょう。そして一度おかれた状態を保つでしょう。すなわち、静止状態におかれたならば、この状態を保持するでしょうし、運動の状態、たとえば、西向きの運動の状態におかれれば、これを持続するでしょう。こうして、たとえば、何らかのインペトを一度だけでも受け取った船は、静かな海に沿って、決して止まることなく我々の球のまわりを動き続けるでしょうし、そこに静かにおかれた場合には、船は永久に静止しているでしょう。これは、前者の場合なら、あらゆる外的な障害が取り除かれたときに、後者の場合では、船に外的な動因が何も加えられなかったときに生じるでしょう¹³。

ここでの慣性運動の議論は、『世界系対話』で述べられているものとほぼ同じものであり、『世界系対話』の刊行よりも20年ほど前にガリレオが円慣性の考えに至っていたことがわかる。『太陽黒点論』では、さらに円慣性が太陽黒点という天上世界に属するものに適用される。ガリレオは、何も触れずに、地球上と太陽上の物体を、運動に関しては同じ世界に属するものとして議論を進めたが、これは伝統的な宇宙論を逸脱していた。アリストテレス自然学に寄れば、地上界と天上界はまったく異なる世界であり、地上の物体の自然運動が直線運動であるのに対し、天上の物体のそれは円運動とされていた。その点からは、黒点にとっては円運動が自然なものと考えられるかもしれない。しかしその議論の対象は惑星などの天体であり、黒点といったものではなかった。そもそも黒点のようなものは、伝統的な宇宙論では想定されていないのである。天上界は完全な世界とされており、黒点のようなものが存在するとは考えられていなかった。それは『星界の報告』（1610年刊行）が当時の人々にもたらした大きな衝撃

¹³ *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari*, OGG, V, p.134; 「太陽黒点にかんする第二書簡」、118-119頁。

から理解されよう。そこでガリレオは、望遠鏡による観察に基づいて、月の表面が滑らかな球面ではなく、地上のように凹凸が存在していることを明らかにし、天上界の完全性という考えを否定していた¹⁴。

伝統的な宇宙論においては存在が想定されていなかったものを、自然学においてどのように扱えばよいのだろうか。この問題こそガリレオが望遠鏡による天体観測を開始して以来取り組んできたものだった。望遠鏡によって得られた新しい知見に対しては二つの対応が考えられる。一つは、伝統的な宇宙論の枠組の中で新しい知見を解釈し、枠組を保持することである。ガリレオに本格的な黒点観測を行う契機を提供したシャイナーが取ったのがこの立場である。彼は、黒点が太陽の周りを回転する一群の小天体の影と考え、太陽には属さないとして、太陽の完全性を擁護しようとしている。もう一つの立場はガリレオの取ったものである。新しい知見に対応する形で、宇宙論に変更を加えるという試みである。ガリレオは、黒点が太陽表面の近くにあるとし、その運動を地上の物体の運動と同様に扱おうとした。すなわち黒点が円運動をすることを、地上の物体に関して導かれた円慣性によって説明した。伝統的な宇宙論に従えば、黒点は天上世界に属するがゆえに自然本性によって円運動をすると説明することもできたのではないだろうか。

先にも触れたように、ガリレオは、地上の物体においても円運動が自然な運動であることを主張することにおいて伝統的な運動論を逸脱していたが、また地上の物体に関する法則を天上世界に属する黒点に適用することによって、地上世界における法則を天上世界にまで拡張して適用していた。地上と天上の両世界に対して同一の法則を適用しようとしたのである。ガリレオは伝統的な宇宙論を大きく逸脱していたが、『太陽黒点論』では、自分の議論の革新性については何も触れず、あたかもそれが当然であるかのように論じている。現代の読者が彼の議論の革新性に気づかないとすれば、それは、現代の宇宙論が彼の敷いた路線の上に築かれているからに他ならないだろう。

さらに『世界系対話』では、惑星の円運動が永遠に継続する根拠として円慣性の考えが用いられていたと考えられる。伝統的な宇宙論においては、恒星や惑星の運動を支持するものとして天球の存在が考えられていた。ガリレオも『世界系対話』の中で

¹⁴ *Sidereus nuncius*, OGG, III, pp.62-75; 『星界の報告』(2017)、22-41頁。

は幾度となく、天球に言及している。しかし、その実在性に関しては、ティコ・ブラーエが、彗星および新星が天上界に存在することを視差の測定によって推論してからは大きな問題になっており、ガリレオもその存在を否定したと考えられる。『世界系対話』第四日では次のように述べていた。

第一に、火の元素があるかどうか疑わしいと述べましょう。しかし、火の元素があるとしても、月の天球、またほかのすべての天球についても非常に疑わしいのです。すなわち、そのような堅固で広大な物体があるのでしょうか、あるいは、空気の先に、われわれの空気よりもはるかに希薄で純粋な物質の連続的な膨張が広がっており、その中を諸惑星がさ迷っているのでしょうか¹⁵。

天球の存在を否定することによって、なぜ惑星は円運動を行うのか、なぜ円運動は永遠に継続するのかという問題が生じていた。それに対して、ガリレオは、円慣性の考えによって、惑星にとっても円運動こそ自然な運動であり、それが減速する理由は存在しないと考えていた。また円運動が惑星を初めとする天体にふさわしい運動であり、それが永遠に不変な運動であるならば、宇宙の初めに惑星らはどのようにしてその運動を獲得したのかという問題が生じる。それに対して、ガリレオは、『世界系対話』第一日でプラトンに帰されている宇宙創造についての話を取り上げている¹⁶。創造者は、惑星を最初、宇宙の中心へ向けて直線運動、すなわち落下運動をさせ、ある定められた所に到達すると運動の向きを変えさせたので、以後惑星は円運動しているというのである。

この逸話では、もはや天球の存在は前提とされておらず、地上の物体における円運動の議論がそのまま惑星という天体に適用されていた。そこでは、地上の物体と天上の物体が同一の運動法則に従うことが暗黙の内に認められているのである。さらに惑星に円慣性の法則を適用することは、惑星の軌道が円運動でしかないこと、すなわちケプラーが主張するような楕円軌道ではあり得ないことを意味していた。ガリレオが

¹⁵ *Dialogo*, OGG, VII, pp.468-469; 『天文対話』(下)、227-228頁。

¹⁶ *Dialogo*, OGG, VII, p.44; 『天文対話』(上)、36頁。Cf. Carugo (2017).

ケプラーの楕円軌道という考えについて、『世界系対話』において言及することがなかった背景にはこのことがあったのではないだろうか¹⁷。

3. 落下法則

落下法則は、アリストテレスの運動論においても中心的役割を担っていた。それによれば、落下運動は、重い物体の自然本性的な運動であり、その速さは重さに比例するとされていた。ガリレオは、若い時代に、これに疑問を抱き、アルキメデスの浮力の法則に基づき、落下の速さは物体の比重に依存すると考えていた。落下においては加速が本質的であって、落下速度が時間に比例すること、落下距離が時間の二乗に比例することに気付いていたのはパドヴァ時代以降のことである。落下運動における加速が数学的法則に従うことの発見こそ近代数理科学の出発点だったのである。

ガリレオが落下運動を体系的に論じたのは『新科学論議』第三日においてであるが、それに先立ち『世界系対話』第二日において落下法則について述べていた。落下運動が一樣加速運動（等加速度運動）であること、そして落下距離は落下時間の平方に比例することなどが説明されている。さらに斜面上の下降運動や振子の運動も扱われており、水平面上での慣性運動の考えもこの議論の中で展開されていた¹⁸。そして、興味深いことに、落下運動の法則が地上の物体だけでなく、惑星という天体にも適用されていた。もちろん落下法則は地上の物体に関するものであり、落下運動は物体の重さによって引き起こされる以上、その惑星への適用は本来考えられていなかったはずである。

惑星の落下運動が論じられているのは、『世界系対話』第一日の、直線運動と円運動について論じた箇所においてである。円運動こそ一様な運動なのであり、それゆえ天体にふさわしい運動とは円運動であるとガリレオは主張し、前章でも触れたプラトン

¹⁷ フェデリーコ・チェージがガリレオ宛の書簡（1612年）において、ケプラーの楕円軌道論について言及していた。またガリレオの蔵書には、ケプラーが惑星の楕円軌道を主張した『新天文学』が含まれていた。（ファントリ（2010）、149頁、注2）

¹⁸ そのほか運動エネルギー保存則の先駆といわれる考えが述べられていた。1：物体が下降する際に獲得するインペトは、これを再び同じ高さまで運ぶことができる。2：傾きが異なるが、高さの異なる斜面を降下したときに得られるインペトは等しい。（*Dialogo*, OGG, VII, pp.46-47; 『世界系対話』(上)、40-42頁）

によるとされた、宇宙創造についての話が取り上げられている、惑星は、創造者によって最初に直線運動をさせられ、それから円運動に移り、以後はその運動を継続しているというのである。

世界の物体も、創造されて完全に確定されたあとは、いくらかの時間、その創造者によって直線運動で動かされ、ある定められた場所に到達したあとで、一つずつ回転するように向きを変えられて、直線運動から円運動へ移り、それからは、そこで維持されていて、いつも保持されています¹⁹。

ここで、直線運動は、運動する物体にある速さの度合を与えるためのものである。前節で検討したように、地上の物体は、水平面上では運動への傾向も抵抗も持たなかった。それゆえ水平面上では、いかなる速さも自然に得ることはできなく、よって水平面上の運動である円運動を行うには、まず直線運動すなわち落下運動によって速さを得る必要があった。「円運動は、先行する直線運動なしでは、自然的には決して獲得され得ない」²⁰のである。ガリレオによれば、この議論は、地上の物体のみならず、木星を初めとする惑星にも適用される。そして、この直線加速運動とは落下運動なのである。神は、惑星を同じ場所で創造し、そこから宇宙の中心へ向かって落下していくような傾向を与える。その落下によって、惑星に現在も持っている速度を獲得させ、それから円運動に軌道に変えたのだった。そして惑星は、その速度を維持しながら円運動を続けるのである²¹。

したがって各惑星の速度は、どれほどの距離を落下したのかによって決まる。たとえば木星と土星を比べると、次のようになる。

…木星と土星の二つの速さが持つ比から、また両者の軌道の間にある距離および自然運動の加速の比から、それらが出発した場所は、それらの回転の中心から、

¹⁹ *Dialogo*, OGG, VII, p.44; 『天文対話』(上)、36頁。このプラトンに帰されている惑星運動の話については Barcaro (1983) を参照。

²⁰ *Dialogo*, OGG, VII, p.53; 『天文対話』(上)、49頁。

²¹ *Dialogo*, OGG, VII, p.53; 『天文対話』(上)、50頁。

どれだけの高さや隔たりにあるかが見いだされえます。このことが見いだされて確定されたとき、火星がそこからその軌道まで下降するかどうか探求されますが、その軌道の大きさと運動の速さは、計算から与えられるものと一致することがわかります。そして同様のことが、地球や金星、水星についてもなされます。それらの円の大きさや運動の速さは、計算が与えるものにきわめて近いのですが、これは驚くべきことです²²。

実際の計算は示されておらず、ガリレオがどのような計算を行ったかはわからない。ここで重要な点は、惑星の運動が加速運動とされ、地上の物体の落下運動と同じ法則に従うとされていたことである。地上の物体が地球の中心へ向かって落下するように、惑星も宇宙の中心へ向かって落下していく。惑星という天体に対して、地上の物体に対するのと同様の議論ができる根拠にも触れられておらず、あたかも当然のこのように議論は進められていた。

ここでは、惑星の落下運動がどのような加速運動であるかについても論じられていなかった。落下運動が一様加速運動であることが述べられ、落下法則が具体的に示されたのは第二日においてである。そこではさらに落下運動がわれわれの地上世界から、月の天球の凹みという天上界に間近な領域にまで拡張されている。大砲の弾丸が月の天球の凹みから地球の中心まで落下するのにかかる時間に関する、ある作者の主張が批判されていた。その作者は弾丸が等速運動を行うことを前提として、落下には六日以上を費やすと主張している²³。それに対して、ガリレオは、落下運動は等速運動ではなく加速運動であり、その加速は単位より始まる奇数にしたがうことを指摘する。等しい時間間隔を取るとき、第一の時間に一だけ通過するとすれば、第二の時間には三、第三の時間には五、第四の時間には七というように、通過距離は奇数の列となるのである。つまり

可動体によって通過される距離が相互に持つ比は、静止から出発するときには、

²² *Dialogo*, OGG, VII, pp.53-54; 『天文対話』(上)、50-51頁。

²³ *Dialogo*, OGG, VII, p.245; 『天文対話』(上)、327頁。

その距離の測られる時間が持つ比の二重比である、すなわち通過距離相互の比は時間の平方相互の比に等しい²⁴。

ガリレオはまず、落下運動が加速運動であること、そして落下法則、すなわち落下距離は落下時間の平方に比例することを提示する。そして弾丸であれば、重さにかかわらず同じ時間には同じ距離を通過するとして、速さが重さに比例するというアリストテレスの主張を否定したのである²⁵。

第二日において落下運動に関する議論の発端となったのは、月の天球の最下部から地球の中心までの落下時間の問題だった。月の天球の最下部から始まる落下運動なので、地上界に属する運動であるが、しかし落下運動の議論は通常は地上付近の運動を対象としていることを考えると、ガリレオの議論はかなり適用領域が拡大されているとも言える。扱われている運動は、我々の日常世界の運動から地球規模での領域における運動に及び、また運動物体の対象も弾丸のような物体から地球、そして惑星までが含まれることになる。しかし地上の物体は、重さという地球の中心へ向かおうとする傾向を持っているがゆえに落下運動をするのである。惑星が宇宙の中心へ向けて落下すると言うとき、惑星の重さに当たるものは何なのだろう。惑星が持っている、宇宙の中心へ向かって運動しようとする傾向とは何かという問題が生じるのである。落下運動を地上の物体から惑星という天体へ拡張することによって、重さの概念を惑星にも適用できるようなものに拡張せねばならなくなるはずである。

地上の物体の場合は、重さは、地球を構成する部分が自ら集まり球状になろうとする性質として考えられていた。「大地の諸部分が動くのは、世界の中心へ向かって進もうとするのではなく、その全体と一つに集まるために進もうとしてであり、これによって地球の中心へ向かう自然な傾向を持つのであって、その傾向によって地球を形成し、維持しようと協力する」²⁶。このことは、月や太陽、その他の天体にも適用され、それらを構成する部分も同じ自然的傾向によって球形となるのである。すなわち月や太陽、

²⁴ *Dialogo*, OGG, VII, p.248; 『天文対話』(上)、332頁。

²⁵ *Dialogo*, OGG, VII, pp.249-250; 『天文対話』(上)、334頁。

²⁶ *Dialogo*, OGG, VII, pp.57-58; 『天文対話』(上)、56頁。

そしてほかの天体も、それぞれの中心に向かう自然的傾向をもっている²⁷。おのおのの天体を構成する部分が向かうのは宇宙の中心ではなく、それらの中心なのである。しかし、天体の一部分ではなく、惑星という天体全体が宇宙の中心へ落下することについては説明はなされていなかった。地球が含む惑星全体がもつ重さとは何を意味するのか、という問題は残されたままだった。

ガリレオは一個の物体としての地球の運動を扱うことに苦慮していたと考えられる。そのことは、コペルニクスによって地球に与えられたという三つの運動を論じた箇所から覗かれる。第一の運動は日周運動すなわち自転運動、第二の運動は年周運動すなわち太陽の周りの円運動である。第三の運動は、地球の自転軸がつねに一定方向を向いていることを説明するためのものだった。この第三の運動を説明するために、ガリレオは、地球は磁石であるというウィリアム・ギルバートの考えに訴えていた²⁸。

しかし地球が巨大な磁石であるならば、磁石が他の磁石を引きつけるように、地球も磁石である他の惑星を引きつけられるのではないだろうか。太陽が巨大な磁石であるならば、地球を初めとする惑星は、磁力によって太陽へ引きつけられると考えられないだろうか。そうすれば、惑星の、太陽の周りの円運動は、地上の物体の慣性運動と同様のものとして説明できよう。しかしガリレオはこのようには考えなかった。ケプラーの、月の力の作用による潮汐の説明を否定し、地球の二つの運動の合成による運動論の説明を主張したのである。

4. 運動の合成と運動の相対性

4.1 運動の合成

運動の合成は、『新科学論議』第四日において、投射体の軌道がパラボラ曲線（放物線）であることを導いた際に中心的な役割を果たしていた。水平方向の投射は、水平方向の等速運動（慣性運動）と鉛直方向の等加速運動（自然落下運動）の合成運動と

²⁷ *Dialogo*, OGG, VII, p.58; 『天文対話』(上)、57頁。

²⁸ *Dialogo*, OGG, VII, pp.424-426, 436-437; 『天文対話』(下)、166-168、284-285頁。ウィリアム・ギルバート(William Gilbert, 1544-1603)は、『磁石論』(*De magnetibus*, 1600年刊行)において、地球を巨大な磁石であると考えていた。

して考えられ、それよりその軌道がパラボラ曲線であることが証明されていた²⁹。この運動の合成の考えは伝統的な運動論を否定するものである。というのも、伝統的な運動論によれば、水平方向の運動は強制運動であるのに対して、鉛直方向の落下運動は重さによる自然運動であった。これら二つの運動は範疇の異なるものであって、両者が同時に同一の物体において存在することは認められ得なかった。したがって、水平方向の等速運動と鉛直方向の等加速運動の合成が考えられるためには、自然運動と強制運動という伝統的な運動概念が否定されることが不可欠だった。

『世界系対話』では、投射体の放物線軌道についてはほとんど論じられておらず、水平方向の投射についても軌道は問題とされていない。『世界系対話』における運動の合成に関する議論でよく知られているのは、第四日における潮汐の説明にかかわるものである。そこでは、地球の二つの運動の合成運動によって潮汐が説明され、そのことから、潮汐こそ地球の年周運動と日周運動の存在を証明するものとみなされていた。しかし、地球の運動が二つの運動、すなわち日周期の自転運動と年周期の円運動から合成されることは問題となっていない。一方第三日において、年周運動について論じた際に、年周運動と日周運動が地球において両立することが述べられていた。

次に年周運動と日周運動に関しては、これらは同一の方向へなされるので、まったくよく共存しうるので。それは、われわれが一つの球を斜面にそって下降させる際に、その球が、斜面上を自発的に降りるときにそれ自身で回転するような仕方でなされます³⁰。

この一節からは、ガリレオが自転運動と円運動を同類の運動とみなしていたことがわかる。空気等の抵抗がなければ、物体は自転し続けることは経験的に知られていたはずであり、円運動と同様、物体にとって自然なものとされていたと考えられる。自転運動と円運動が同類の自然運動であるとするれば、それらの合成運動を認めることも問題なかったのだろう。

²⁹ *Discorsi*, OGG, VIII, pp.267-273; 『新科学論議』、264-271 頁。

³⁰ *Dialogo*, OGG, VII, p.424; 『天文対話』(下)、166 頁。

むしろ『世界系対話』において運動の合成に関して問題となっていたのは、第二日における地球の自転運動が引き起こす自然学的な問題にかかわってであった。物体の自然落下運動を考えよう。もし地球が自転しているとするならば、落下運動を行う物体は同時に地球とともに円運動を行うことになる。したがって、落下物体の運動は、地球の自転運動による水平方向の一様運動と、落下運動すなわち鉛直方向の落下運動から合成されねばならない。しかし、これは伝統的な運動論に反していた。伝統的な運動論では、物体の運動は自然運動と強制運動に分類され、前者が内在的原理によって生じるのに対し、後者は外在的原理によって生じるのである。したがって両者は相反するものであるから、一つの物体が同時に両方の運動を行うことはできなかった。自然運動と強制運動という、相反する二つの運動からなる合成運動をすることは不可能だったのである。

この批判に対して、ガリレオは、水平面上での運動、すなわち地球の中心のまわりをめぐる円運動は、落下運動を妨げるものではなく、両者が干渉することはないと主張する。

もう一つの、それに加わる下方への運動に関して第一に明らかなことは、これら二つの運動は、中心の周りの円運動と中心へ向かう直線運動のことですが、それらは互いに反対することも破壊することもなく、両立しないこともありません。というのは、可動体に関しては、このような運動に対しては何らの嫌悪も持たないからです。また、あなた方自身が認めていることですが、嫌悪は、中心から遠ざかる運動に反対するもので、傾向とは、中心へ近づく運動へ向かうものなのです。よって、必然的に、中心へ近づくことも遠ざかることもない運動に対しては、可動体は嫌悪も傾向も持たなく、結果として、それに込められた能力が減少する原因も持たないこととなります。そして、運動因は、新たな作用によって弱められねばならないような唯一のものではなく、互いに異なる二つのものなのです。両者のうち重さは可動体を中心へ引きつけることだけに専念し、また込められた力は可動体を中心の周りに導くことに専念するので、何ら障害となる原因はないのです³¹。

³¹ *Dialogo*, OGG, VII, p.175; 『天文対話』(上)、228頁。

このように、ガリレオは、鉛直方向の運動と水平方向の運動は互いに妨げることがないので、干渉し合うことがなく、物体は同時に二つの運動を行うことができる、すなわち両者の合成運動が可能であると考えていた。

さらに、ガリレオは、「重さ」による運動と、「込められた性能」による運動を同類のものとして扱っている。伝統的な運動論では、前者は自然運動、後者は強制運動であるから。両者が一つの物体において同時に存在することは認められ得なかった。それに対し、ガリレオは自然運動と強制運動の区分を否定する。伝統的な運動論によれば、地上の物体の自然運動は直線運動であり、重い物体の場合は重さによる落下運動、軽い物体の場合は軽さによる上昇運動であった。しかしガリレオは、「重い投射体を上方へ運ぶ能力は、それを下方へ動かす重さに劣らず自然なものである」³²と主張し、その根拠として自然運動が強制運動になってしまう例をいくつか提示している³³。

第一の例は、地球の中心を通る穴を開け、そのなかへ大砲の弾丸を落下させる場合である。弾丸は、重さという内在的原理によって落下し、中心に達すると、そこをさらに通り過ぎて上昇する。この上方への運動は内在的原理に反する反自然的な運動すなわち強制運動である。しかしその運動を引き起こしたのは最初の自然運動であり、したがってそれは内在的原理による運動なのではないだろうか。

第二に、斜面に沿って下降する重い物体は、その下降の際に獲得した「インペト」によって、斜面に沿って上昇することが挙げられる。斜面に沿って上昇する運動は、重さに逆らうものである以上強制運動であるが、それを可能にしているのは、自然運動によって獲得した「インペト」であって、外在的原理から得られたものではない。

第三の例は、振子の運動である。天上から吊り下げられた鉛の球は、鉛直線から離されてから下降すると、最下点を通過したのち上方へ動いていく。この場合も、振子の錘を上昇させるのは外的な力の作用ではなく、その重さによる下降運動すなわち自然運動によって得られた「インペト」だった。

最後に、木の球が非常に高い所から落下し、水面に達すると、水中に沈んでいく例が挙げられていた。木の球にとっては、水中を下降することは反自然的であり、内的

³² *Dialogo*, OGG, VII, p.261; 『天文対話』(上)、351頁。

³³ *Dialogo*, OGG, VII, p.261; 『天文対話』(上)、352-353頁。

原理に反しているのである。

以上の例から、重さという同一の内在的原理によって、下降運動のみならず、上昇運動という反対の運動も引き起こされるのであるから、自然運動と強制運動という区分は十分な説明能力を持たないとガリレオは主張する。さらに円運動は、上方と下方、どちらへの運動にも反対するものではないので、重い物体にとっても、軽い物体にとってもその本性に反するものではないはずである。したがって、円運動が落下運動と混合しうると考えてもよいはずである³⁴。自転している地球上で落下する物体は、直線運動のほかに、地球の自転による円運動も行っている、すなわち直線運動と円運動からなる合成運動を行っていると考えられよう。ガリレオは、自然運動と強制運動という伝統的な運動の区分、すなわち内的原理による運動と外的原理による運動という区分を否定した。そして等速円運動と落下運動（鉛直方向の等加速度運動）をどちらも自然な運動として認めることによって、両者の合成運動から、地球が運動しているときの物体の落下運動を説明するのである。

4.2 運動の相対性

このように地球が自転運動をしているとしても、物体の落下運動は可能であり、物体は鉛直方向の落下運動と、地球の自転による水平方向の運動とからなる合成運動を行うことになる。しかし、水平方向の運動を行っていると我々は気づかない。物体が鉛直方向の直線運動しか行っていないように見えるのは、我々も地球の自転による円運動を共有しているために、物体の円運動が観察されないからである。我々に観察されるのは、我々に相対的な運動のみである。

運動の相対性をめぐっては、海面上を走っている船上のマストの上から物体を落下させる実験がよく知られている。この実験は、第二日において、地球の自転運動に対する一連の批判に対する返答の中で論じられていた。地球の自転運動への疑問として、もし地球が西から東へ自転しているならば、なぜ高い塔から落下する物体は、塔よりも西に落下しないのか、なぜ西に向かって発射された砲丸は東に向かって発射された砲丸よりも遠くへ飛ばないのか、なぜ南北に向かって発射された弾丸は西の方へずれ

³⁴ *Dialogo*, OGG, VII, pp.264-265; 『天文対話』(上)、356頁。

て落下しないのか、といった疑問が挙げられていた³⁵。

それらの疑問に対して、ガリレオは、地球上の物体はすべて、地球の自転運動を共有しており、それゆえに我々は地球の自転運動に気づかないと主張する。我々が、物体の運動として気づくのは、我々が持っていない運動、すなわち我々にとって相対的な運動だけなのである。このことを説明するためにガリレオが提示するのが、海面上を走っている船上での実験である。船上のマストから物体を落下させるとすれば、その物体は、鉛直方向の直線運動、すなわち落下運動を行うが、船は水平方向に進んでいるので、その水平方向の運動も共有している。よって物体は、落下による直線運動と水平方向の運動からなる斜め方向の運動を行うことになる³⁶。たしかに船の外にいる人からはそのように見えるだろう。しかし船上の人には、物体はマストの真下に落ち、鉛直方向の直線運動をするように見えるのではないだろうか。

またガリレオは、走っている馬上から球を落下させた場合も同様であると主張する。球は、馬の運動も所有しているので、その運動は、先の場合と同様に斜め方向の運動を行うことになる³⁷。さらに高い塔の上から物体を落下させる場合も同様なのである。地球が回転しているとしても、落下物体は地球の運動を塔と共有しているので、塔の真下に落下することになる。大砲を発射させる場合も同様である。したがって、地球が運動していても、塔から落とされた物体や大砲から発射された砲丸の運動からは、我々がそのことについて気づくことはないはずである³⁸。よって、それらの運動からは、地球の運動については何も述べることができない。

運動の相対性に関するガリレオの議論はまったく説得力のあるように思われる。しかしその議論では、一つの物体が同時に二つの運動を行うこと、そしてそれらの運動は互いに妨げることがないことが前提とされている。水平方向の慣性運動と垂直方向の落下運動とは互いに影響することがなく共存し、両者から合成される運動を物体は行っている。この運動の合成という考えは伝統的な運動論においては認められておらず、運動の相対性を考えるには、運動の合成という考えが不可欠だったのである。

³⁵ *Dialogo*, OGG, VII, pp.151-153; 『天文対話』(上)、193-195頁。

³⁶ *Dialogo*, OGG, VII, p.170; 『天文対話』(上)、221頁。

³⁷ *Dialogo*, OGG, VII, pp.182-183; 『天文対話』(上)、238-239頁。

³⁸ *Dialogo*, OGG, VII, pp.196-199; 『天文対話』(上)、259-262頁。

地球の自転運動の問題では、地上の全物体が地球の運動を共有しているはずなのである。船上の実験でいえば、船上の物体はすべて船の運動を共有しているのである。マストから落下している物体のように、船と接触していないときでも船の物体の運動を共有していなければならない。地上の物体の場合には、物体が地面に接していようとまいと地球の自転運動を共有していなければならない。それゆえ、地球が自転していたとしても、強い東風が吹くことはなく、塔から落下する物体はその真下に落下するのであり、西向きに射程が東向きに射程よりも長いということもないのである。

運動の相対性という考えは様々な運動が合成可能であることを前提としていた。運動が合成されるためには、アリストテレスが考えていたような自然運動と強制運動という運動概念を否定することが不可欠だった。あらゆる運動が、内的であれ外的であれ、どのような原理から生じるとしても、それから生じた運動は同類のものであり、それゆえに合成も可能なのである。

5. 結論 地上の運動論から、天上の力学へ

ガリレオは、『世界系対話』を通じて、地球の運動に伴う自然学的な問題を解決するために新しい運動論を構築していった。慣性運動の考えはアリストテレス運動論の根幹ともいべきものを否定する試みであったし、自然運動と強制運動という運動概念の否定は、あらゆる運動を統一的に扱う運動論への第一歩であった。ガリレオの運動論は、本来地上の物体すなわち重さをもつ物体に関するものである。しかし彼は、その議論を、太陽の黒点といった天上界の物体にも適用し、地上界と天上界を同一の論理で捉えようとする。それは、運動論の側面から太陽中心説を支持し、伝統的な宇宙論の転覆を導く試みだった。

太陽中心説が宇宙論にもたらした最も大きな問題は、太陽が宇宙の中心に置かれたということよりもむしろ地球が宇宙の中心を離れ、惑星の一つとなったことにある。地球が宇宙の中心という特権的な地位を失うことによって、伝統的な宇宙論の核心といべき世界の階層性、とりわけ地上界と天上界という二つの世界の存在根拠が失われてしまったのである。ガリレオは、望遠鏡を用いた天体観測によって得られた知見を根拠として、この二つの世界という考えを否定し、新しい宇宙像の構築へ向かった

のだった。

ガリレオが描いた天上界とは、月や太陽に見られるように、地上界と同様の可変的なものである。さらには、天上界にも地上界と同様の運動法則が適用される。円慣性の考えからは、天体のみならず地上の物体にとっても円運動が自然な運動であることが導かれている。そして惑星が円運動を継続することも円慣性の考えで説明されうるのである。さらにガリレオは、惑星すなわち天上界の物体と地上界の物体が円運動という共通の自然運動をもつことを根拠として、天上の物体と地上の物体の区別が意味を持たないと主張していた。この二つの世界の統一は、ガリレオにおいては、地上界の天上界への拡張、いわば天上界の地上界化によって進められていた。というのも、彼がもっていたのは、地上界の物体に関する理論や法則だったからであり、地上界の現象からの類推によって天上界の事象も解釈されるのである。

しかし、このガリレオのアプローチは、惑星を初めとする天体の運動の説明において大きな問題に直面することになる。地上の物体にとって、重さは自然の本性であって、重さをもたない物体を考えることはできなかった。他の惑星に関しても、地球と同様、それを構成する部分は、その全体の中心へ向かおうとするのであり、それゆえそれらも球形になるのである。だが地球全体としての運動、そして惑星全体としての運動はどのように考えればよいのだろうか。どうして地球を初めとする惑星は太陽を中心とする円運動をするのだろうか。ガリレオの返答は、地上の物体のよう円慣性によるものだった。だが、そこで前提とならねばならない地球全体の重さとは何なのだろうか。

ガリレオは地上の物体の運動論を黒点という天体上の物体へ適用しようとしたが、さらに天体自体へと拡張したのがニュートンだったといえよう。ニュートンでは、地上の物体も、惑星も同一の運動法則に従っている。そして、地上の物体が持つ「重さ」(gravitas)という自然的傾向は、惑星にも適用可能な概念、すなわち「万有引力」(gravitas universalis)に改鋳されねばならなかった。それは、重さという地上の物体に特有なもののみなされていた性質を、惑星を含む宇宙の全物体に適用可能な力として再定義することだった。地上界に天上界の規則を適用すること、いわば地上界の天上界化であったといえよう。そのためには、物体の本質的な性質としての重さを、質量から生じる二次的な性質として再定義することが不可欠だった。重量と質量を概念的に分離する

ことは、地上の物体の運動を第一に考えていたガリレオにとってはきわめて困難なことだったと考えられる。

[本研究は、JSPS 科研費 18K00256 の助成を受けたものです。]

文献一覧

1. ガリレオの原典・翻訳

『天文対話』(上・下), 青木靖三訳, 岩波文庫, 1959.

『新科学論議』(抄訳), 伊藤和行・斎藤憲・羽片俊一訳, 伊東俊太郎『人類の知的遺産 31 ガリレオ』, 講談社, 1985.

「太陽黒点に関する第二書簡」, 『星界の報告 他一編』, 山田慶児他訳, 岩波文庫, 1976.

『星界の報告』, 伊藤和行訳, 講談社学術文庫, 2017.

OGG = Galilei, Galileo (1890–1909): *Le opere di Galileo Galilei*, ed. by A. Favaro, Firenze: Giunti (reprinted 1929–1939, 1964–1968).

Galilei, Galileo (2015): *Sidereus nuncius, or The sidereal messenger*, 2nd Edition., tr. by A. Van Helden, Chicago: University of Chicago Press.

Galilei, Galileo and Christopher Scheiner (2010): *On sunspots*, tr. by E. Reeves and A. Van Helden, Chicago: University of Chicago Press.

2. 研究

ウェストフォール (1980): 『近代科学の形成』, 渡辺正雄・小川真理子訳, みすず書房.

リンドバーク (2011): 『近代科学の源をたどる』, 高橋憲一訳, 朝倉書店.

グラント (1982): 『中世の自然学』, 横山雅彦訳, みすず書房.

コイレ (1988): 『ガリレオ研究』, 菅谷暁訳, 法政大学出版会.

コイレ (1973): 『閉じた世界から無限宇宙へ』, 横山雅彦訳, みすず書房.

高橋憲一 (2006): 『ガリレオの迷宮』, 共立出版.

ドレイク (1984-5): 『ガリレオの生涯』(3巻), 田中一郎訳, 共立出版.

ファントリ (2010): 『ガリレオ』, 大谷啓治・須藤和夫訳, みすず書房.

Barcaro, Umberto (1983): “Riflessioni sul mito platonico del «Dialogo»”, in Galluzzi (1983), pp.117-126.

Blay, Michel (1995): *Les “Principia” de Newton*, Paris: PUF.

Blay, Michel (1999): *La naissance de la science classique au XVIIe siècle*, Paris: Nathan Université, 1999.

Camerota, Michele (2004): *Galileo Galilei e la cultura scientifica nell'eta della controriforma*. Roma: Salerno.

Carugo, Adriano (2017): “Galileo and Plato’s myth of the origin of the system of the world”, *Galilaeana*, 14, pp. 3-19.

Clavelin, Maurice (1968): *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris: Librairie Armand Colin.

Finocchiaro, Maurice A. (1997): *Galileo on the world systems : a new abridged translation and*

- guide*, Berkeley : University of California Press.
- Finocchiaro, Maurice A. (2014): *The Routledge guidebook to Galileo's Dialogue*, Abingdon, Oxon: Routledge.
- Galluzzi, Paolo (ed.) (1984): *Novità celesti e crisi del sapere : atti del convegno internazionale di studi galileiani*, Firenze: G. Barbèra.
- Heilbron, J. L. (2010): *Galileo*, Oxford : Oxford University Press.
- Hooper, Wallace (1998): “Inertial problems in Galileo’s preinertial framework”, in Machamer (1998), pp.146-174.
- Machamer, Peter (ed.) (1998): *The Cambridge companion to Galileo*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Meli, Domenico Bertoloni (2006): *Thinking with objects: The transformation of mechanics in the seventeenth century*, Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Newton, Isaac (2016): *The principia: mathematical principles of natural philosophy*, tr. by I. B. Cohen and A. Whitman, Los Angeles: University of California Press.
- Shea, William R. (1972): *Galileo's intellectual revolution*, London: Macmillan.
- Westfall, Richard S. (1971): *Force in Newton's physics: The science of dynamics in the seventeenth century*, London: Macdonald.