

ガリレオの天体観測と新しい宇宙論

伊藤 和行

一 序

ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei, 1564-1642) は、ニュートンとともに十七世紀科学革命を担った人物の一人として知られているが、彼の科学史上の業績は二つの分野に大別される。第一の業績は、落下法則や投射体の放物線軌道といった力学上の発見であり、それによって彼は近代力学の創始者と呼ばれる。第二には望遠鏡を用いた天体観測が挙げられ、木星の衛星や金星の満ち欠けなどの発見は近代観測天文学の始まりと評価されている。ガリレオは、天体観測の成果に基づいて太陽中心説を擁護し、さらに宇宙論の革命を主導したのだった。新しい宇宙論の試みはルネサンスの哲学者たちによつてすでになされていたが、それは純粹に思索的なものだった。一方、ガリレオは望遠鏡による天体観測から得られた経験的な根拠に基づいて新しい宇宙論を主張し、それを通じて自然研究における新たな地平を築いたのである。

ガリレオによる宇宙論革命の核心は、太陽中心説の主張とともに、階層的宇宙像の否定と、それに代わる均質的宇宙像の提唱にある。伝統的宇宙論では、宇宙は地球を中心とした階層的な構造を持ち、地上界と天上界に二分され、両者はまったく異なる世界とみなされていた。地上界が変化に満ちた不完全な世界であるのに対して、天上界

は変化のない完全な世界だった。ガリレオは、宇宙の中心を地球から太陽へ移すだけでなく、天上界の完全性および不変性を否定し、地上界と天上界に代表される宇宙の階層性を覆したのである。彼の試みは、地上の物体であれ、惑星すなわち天上の物体であれ、宇宙に存在するものはすべて同一の法則に従うというニュートンの考えを準備するものと評価される。

本稿では、ガリレオの天体観測の歩みを辿りながら、天上界の完全性・不変性の否定、そして均質的宇宙という考えが太陽中心説とともにどのように発展していたのかを考察する。

二 『星界の報告』 一月表面の起伏

ガリレオが望遠鏡による天体観測を開始したのは一六〇九年十一月末あるいは十二月初めのことである。⁽¹⁾ その年の八月にすでに九倍の望遠鏡を製作していたが、十一月末には二〇倍の望遠鏡を完成し、それを用いて本格的な天体観測を開始した。彼はまず望遠鏡を月へ向け、翌年一月初めには恒星の観察へと進み、一月中旬には木星の衛星を発見している。それらの成果は、観測を始めてから三ヶ月ほどしか経ていない三月中旬に刊行された『星界の報告』(Siderius nuncius, 1610) で公表された。

『星界の報告』は数十ページほどの小著であるが、掲載された月や恒星、木星の衛星の図版が見事なこともあって刊行後大きな反響を得て、ガリレオは一躍時代の寵児となった。前半では月の表面、後半では木星の衛星が扱われ、両者の間に挟まれる形で天の川などの恒星に関して述べられている。月の表面に関する記述は、月の明るい部分に散在している「小さな斑点」(クレターのこと)の記述から始まっている。この「小さな斑点」はこれまで誰にも見られたことがなく、望遠鏡によって初めて見いだされたものであって、古くから知られている「大きな斑点」あるいは「古い斑点」(海のこと)から区別される(OGG, III-1, p.62. 『星界の報告』、一二三頁)。そして月の表

面は滑らかではなく、地表のように起伏に満ちているのである。

月の表面は、多くの哲学者たちが月や他の天体について考えているような、磨かれたようでも、平坦でも、まったく正確な球形でもないと考え、たしかにそのことを確信している。反対に、不規則で、ごつごつしている、窪みや隆起で満ちており、それは、ちょうどこの地球の表面自体が山の連なりや谷の深みによって至る所で異なっているのと同様である。(OGG, III-1, pp.62-63. 『星界の報告』、一二二―一二三頁)⁽²⁾

この主張の根拠となったのは望遠鏡によって観察された次のような現象である (OGG, III-1, pp.63-64. 『星界の報告』、一二二―一二四頁)。

- 一 明暗部を分ける境界が滑らかな曲線ではなく、ぎざぎざになっていること。
- 二 数多くの小さな黒い斑点が明るい部分に散らばっていること。その明暗部の存在。
- 三 非常に多くの明るい点が暗部の中に現れること。その大きさと輝きの時間的変化。

これらの経験的な根拠に基づき、地表上の現象からの類推と、数枚の月の図版によって、ガリレオは月表面における起伏の存在を説明する。第一の根拠は、明暗部を分ける境界線の形状をめぐるものである。もし月が完全な球であつて、表面も滑らかであるとすれば、その境界線も滑らかな曲線となるはずであるのに、実際には「不規則でぎざぎざしており、大いに波打った線を描いている」のである (OGG, III-1, p.63. 『星界の報告』、一二三頁)。

第二の根拠としては、月表面の明るい部分に小さな黒い斑点が数多く散らばっていることがある。さらにそれら斑点の境界は太陽に向かう側では明るく、反対側では暗く見えるのである。一方斑点の中では反対に、太陽とは反対の部分が輝いており、太陽の側では暗くなっている。この現象は、ガリレオによれば、地上において、山に囲ま

れた平地に太陽の光が斜めに当たったときの様子に似ているのである。すなわち月表面で見られる小さな黒い斑点は山に囲まれた平地の姿に他ならない。

たしかに、数多くの小さな黒い斑点が、暗い部分からはまったく切り離されており、少なくとも大きな古い斑点によって占められている部分だけを除けば、太陽の光に満ちた平らな表面のほぼすべてにわたって至る所に散らばっている。さらに、今述べた小さな斑点はすべて、次の点でつねに一致していることに気づいた。すなわち、太陽のある場所に向かっては黒ずんだ部分を持つが、一方、太陽と反対の側では、ちょうど光り輝く連なりのような明るい境界によって取り囲まれているのである。だが、それとまったく似た光景が、地上において太陽が昇る際に起こっている。谷が光によって満たされておらず、一方、それらを囲む、太陽と反対側の山がすでに光り輝いているのが見られるときのことである。ちょうど地上の窪みの影が、太陽が高く昇るときに減っていくように、月の斑点も、明るい部分が增大するにつれて暗さを失うのである。(OGG, III-1, pp.63-64. 『星界の報告』、二二二-二四頁)

このような「小さな斑点」の中でも、とりわけガリレオが驚嘆したのは、上弦あるいは下弦において、中央付近に見られた「完璧に円い形」をした窪みだった。この見事な斑点の姿は、平野が高い山の連なりによって囲まれているポヘミア地方と似た地域がなす光景と同様であると説明されている(OGG, III-1, p.68. 『星界の報告』、二八頁)。⁽³⁾

第三の根拠は、月の暗い部分に非常に多くの明るい点が見えることである。それらの点は時間とともに大きくなり、数時間後には、広くなっている明るい部分と繋がるのである。この明るい点は、地上において、太陽が昇る前

に平地は暗いままで、高い山の頂だけが太陽光線に照らされているのに対応している。時間が経つにつれて山の裾野の方も照らされるようになり、太陽が昇ると平地も明るくなって山と繋がるが、それと同様のことが月でも起きていた。

以上のように、ガリレオは月表面の起伏を説明するに際して、もっぱら地上の現象からの類推によっていた。彼が望遠鏡によって観察したのは月表面の模様という二次元のものであったのに対し、それから彼が導き出した主張は月表面の起伏の存在という三次元のものであった。望遠鏡によって観察されたものと、それから導出された主張の間には飛躍があつたと言えよう。彼の天体観測は、望遠鏡という特殊な器械を使用する点においてそれまでの観測とは異質なものであった。それゆえに観測で得られた情報は、日常的世界の経験からの情報とは異なっており、それを理解するためには単に記述するだけでは不十分であり、解釈することが不可欠だった。月表面についての観察結果を解釈する際に彼が頼つたのは、地上の現象からの類推だったのである。

月と地球との類似性という考えはガリレオ独自のものではなく、彼は古代の著作から着想を得ていた。『星界の報告』の中で、古代のピュタゴラス主義者のものとして「月はもう一つの地球のようなものである」という考えに言及している (OGG, III-1, p.65. 『星界の報告』、二七頁)。たしかに、月表面にも地表面のように山や谷が存在するという考えはプルタルコス(4)の『月の表面について』 (De facie in orbe lunae) に見られ、そのラテン語訳をガリレオが所有していたことが知られている。また一六〇四年に出現した新星に関する論考の中では、月には地球と同じように大気があると述べられていた。(5)

『星界の報告』における月の議論の後半では、月と地球の類似性に基づいた三つの議論が展開されている。それらのうち二つは、月表面の起伏の存在に対して想定される疑問への返答として提示されていた。その疑問とは、もし月が無数の隆起や窪みに満ちているならば、月の輝いている側の円状の外縁に起伏がなく波打つてもおらず、正

確に円形をしているように見えるのはなぜかというものである (OGG, III-1, p.69. 『星界の報告』、三二―三三頁)。それに対する回答として、ガリレオは月の縁に起伏が見えないことに関して二つの理由を挙げている。

第一の理由とは、月の外縁近くでは、隆起の列が一つだけではなく、多くの連なりが重なっており、同じ列の上に並んだ山々の間の隙間は、他の連なりの隆起によって隠されていることである (OGG, III-1, pp.69-70. 『星界の報告』、三二―三三頁)。それは、ちょうど荒れた海において高い波の頂点が重なって、同じ平面上に拮がっているように見えるのと同じである。この場合にも波間には夥しい数の窪みがあり、大きな船の船体のみならず、甲板やマスト、帆も隠されるほどであつて、それらの波が重なっているために我々には見えないのである。

第二の理由としては、月の周りを、地球の周りのように「エーテルの他の部分よりもいっそう濃密な物質からなる球」、すなわち「蒸気の球」が取り囲んでいることが挙げられる (OGG, III-1, pp.70-71. 『星界の報告』、三二―三四頁)。この物質は太陽光線を吸収し反射することができ、太陽光線によって輝いており、月を本体よりも大きな球の姿に見せている。その層が厚いならば、我々の視線がその層によって遮られて月の固い本体を見ることができなくなる。したがつて月の周辺部では、その表面が深くて明るい蒸気の下に隠されているのである。月の周辺部では、我々に対して、この蒸気の層が相対的に厚くなること⁽⁶⁾が図によって説明されている。

月と地球の類似性に基づく第三の議論は、「もう一つ、感嘆に値するような月の現象に関して、その原因」を与えるものであり、その現象の説明は「月と地球の間の対応性と類似性」をさらに明らかにするものとされている (OGG, III-1, p.72. 『星界の報告』、三六―三七頁)。この現象は、現代では月の地球照と呼ばれており、ガリレオ以前から知られていた。月が太陽に近いとき、すなわち三日月などのときには、月の明るく輝いている部分以外の暗い部分も周囲の宇宙空間よりは僅かであるが明るく、とくに周縁はわずかな明るさで輝くことによって、月表面と周囲の宇宙空間とを区分している。当時は、この現象の理由として、月自体の輝き、金星の光が月に当たっている

こと、太陽の光が月本体に深く侵入していることなどが考えられていた。

それらの見解に対して、ガリレオはこの「二次的な輝き」は地球によるものであると主張する (OGG, III-1, pp.74-75. 『星界の報告』、三九一四一頁)。それを示すために、まずどのようにして地球が、月から反射された太陽光を受け取っているかということについて説明する。月が三日月、半月、満月と進むとき、太陽光線を受けて輝く部分が広くなり、それにつれて地球への反射光も強くなっていく。満月では地球に面している表面全体が太陽光線によって照らされるので、月からの光はもともと強くなり、地球の夜も明るくなるのである。ついで視点が地球から月へと移され、月から地球を見たときにどのようなことが生じるかが考えられている。月と地球を入れ換えると、月が満月のときは地球からの反射光は一番弱く、半月、三日月と進むにつれて強くなっていく。その結果、三日月のときには、月の暗い部分は地球からの強い反射光によって照らされることになり、地球から見たときにはまわりの宇宙空間よりも明るく見えるのである。以上の議論では月と地球はまったく同等のものともみなされ、地球から月へ視点が移されていた。

以上のように月をめぐる議論では、「月はもう一つの地球のようなもの」と考え、月と地球の類似性に基づいてその現象を考察するという立場は一貫していたと理解できる。この地球の現象からの類推による議論は、以下で検討するように、木星や太陽黒点、彗星について論じる際にも重要な役割を果たしており、いわば天上界の現象を考察する際の主要なツールだった。ガリレオは、このツールを用いて地上界を天上界へと拡張していくのである。

三 『星界の報告』二 木星の衛星

『星界の報告』の後半部分では、ガリレオが発見した木星の衛星の観測記録が載せられている。一月七日から三月二日までの衛星の姿が図で示されるとともに、それらの位置、大きさ、明るさについて報告がなされていた。そ

の最後に、月に対して用いていた地球からの類推を木星にも適用し、木星とその衛星の関係を地球と月の関係になぞらえて論じていた。そして木星の周りにも地球や月と同じように「エーテルの残りの部分より濃密な球」が存在するとした (OGG, III-1, p.96. 『星界の報告』、八二頁)。このことは、木星の衛星が木星の周りを巡る際に、二倍以上大きく見えることがあることの理由と考えられている。木星の衛星は、たしかにその回転の際に地球に近づいたり遠ざかったりするが、その軌道の大きさから考えて見かけの大きさに大きな変化を及ぼすことはない。木星の周りに蒸気の球があり、その外を衛星は回転しているので、遠地点ではその球のために小さく見えるが、一方近地点ではその球がないので大きく見えるとガリレオは主張する。この木星を囲む蒸気の球という考えは、月の場合と同様誤っていたが、ガリレオは、地球との類推による議論を月以外の天体にも適用することによって、太陽系を構成する他の天体の考察を進めていたのである。

木星の衛星の発見は、ガリレオにとっては、コペルニクス体系すなわち太陽中心説を擁護する上で大きな意味を持っていた。というのは、太陽中心説に対する反論の一つとして、もし地球が太陽の周りを回転しているとすれば、なぜ地球だけが月を引き連れて回転しているのかということが指摘されていたからである。月が地球の周りを回転し、同時にその回転の中心である地球が、月を従えて太陽の周りを回転するという機構は、他にそのような天体がない以上、たしかに技巧的だとみなされても仕方がないように思われる。地球中心説では、月や太陽、そして惑星が皆そろって地球の周りを回転していたのである。この反論に対して、木星の衛星の発見は、月に当たるものが地球以外の惑星にも存在し、地球だけが特別ではないことを示したのである。木星が衛星を引き連れて宇宙の中心の周りを回転しているのだから、地球が月を引き連れて太陽の周りを回転することもけっして特別ことではないことになる。ガリレオはコペルニクス体系について次のように述べている。

彼らは、コペルニクスの体系において惑星による太陽の周りの回転を平静的な気持ちで受け入れつつも、月が地球の周りを運動しつつ、両方とも太陽の周りを一年で回転するということには大いに困惑して、この宇宙の構造を不可能なものとして拒否すべきだと判断してしまふのである。しかし今や、一つの惑星「衛星」がもう一つの惑星の周りを巡りつつ、両方とも太陽の周りの大きな軌道を進む、そのような惑星はただ一つではないのである。実際、地球の周りを巡る月と同じように、木星の周りをめぐる四つの星「衛星」が感覚によって我々に示されており、この回転運動の間もそれらの星はすべて、木星とともに十二年という期間で太陽の周りの大きな回転を行っている。(OGG, III-1, p.95. 『星界の報告』、八一頁。角括弧は訳者による。)

地球を月や木星と同等のものとみなせることは、太陽中心説にとって重要な意味を持っていた。なぜなら、地球中心説では、地球は宇宙の中心にあつて唯一静止しており、太陽や他の惑星はすべて地球の周りを回転しているのである。地球は、他の天体とは異なる特別な存在だった。しかし太陽中心説では、地球は、他の惑星とともに太陽の周りを回転することによつて、それらと同じ地位に置かれ、その特権的な地位を失うことになる。地球と他の惑星を同等のものとして扱うことは、太陽中心説においては必然的な帰結だった。

ガリレオにとつて、木星の衛星の発見は、太陽中心説への批判に対して反論の根拠を提供するものだったが、太陽中心説を積極的に支持する根拠とはなり得ず、『星界の報告』では、太陽中心説については控えめにしか言及されていない。しかしながら、月面の起伏や木星の衛星の発見を通じて、地球が月や木星などの天体と同類のものであるという考えはより強固になつていたと言えよう。

ガリレオが太陽中心説を積極的に主張するようになったのは一六一一年に入つてからだったが、その契機となつたのは一六一〇年の十二月に金星の満ち欠けを発見したことだった。その月に、彼は弟子のカステッリ(Benedetto

Castelli, 1578-1643) から、太陽中心説が正しければ、金星も月と同じように満ち欠けをしているはずだという指摘を受けている。ガリレオは、その月と翌月の手紙の中で、金星の満ち欠けを発見したことを伝えている。金星は満ち欠けをするだけでなく、その大きさも著しく変化する。満ちているときは大きさが小さく、欠けるに従って小さくなる。また地球から見て太陽から一番遠いときには半月になり、近づくとつれて満ちるあるいは欠けるのである。このような金星の姿の変化は、プトレマイオス体系では説明が困難であり、コペルニクス体系によれば容易に説明可能である。⁽⁹⁾

金星の満ち欠けを観察するに当たって、ガリレオは、カステッリによって指摘される以前から、月の満ち欠けをモデルとして考えていたのではないだろうか。月が太陽の光を受けながら回転することによって満ち欠けを見せるように、金星も太陽の光を受けながら回転しているために満ち欠けを見せるのである。もちろん月と金星では、月が地球の周りを回転しているのに対し、金星は光源となる太陽の周りを回転している点で異なっているが、光源と反射する物体、そして観測者の位置関係によって満ち欠けが生じるという考えは、月の現象が出发点となっていたと考えることができよう。

ガリレオは、金星の満ち欠けから、それが太陽の周りを巡ること、そして太陽中心説を確信したが、しかしそれからは地球が太陽の周りを巡ることは導出できない。たしかに他の惑星は太陽の周りを巡っているかもしれない。しかし地球は特別な存在であり、他の惑星とは異なると思われることも可能であるし、その方が自然であるとも言えよう。また地球の運動を認めると自然科学的上困難な問題に直面することはよく知られていた。⁽¹⁰⁾ すなわち地球が西から東へ自転しているならば、なぜ地上の物体は外へ放り出されないのか。また落下物体は、落下中に地球が回転するので、落下を始めた所の真下ではなく西側に落下するのではないか。なぜ強い東風が吹かないのだろうか。こういった自然科学上の問題に答えるためには、新しい運動論、さらには新しい自然学を築く必要があった。しかし、ガ

リレオによつて新しい運動論の試みが提示されるのは、二〇年余り後に刊行される『世界系対話』⁽¹⁾を待たねばならない。

四 『太陽黒点論』

ガリレオが太陽黒点を本格的に観測するようになったのは一六一二年のことだった。その端緒となつたのは、イエズス会士シャイナー (Christoph Scheiner, 1573-1650) の著作『太陽黒点に関する三書簡』 (*Tres epistolae de maculis solaribus*, 1612) を受け取り、それに対する論評を求められたことである。黒点の存在自体は古代から知られており、実際大きな黒点は肉眼でも確認することができたが、水星あるいは金星が太陽表面を通過したものとみなされていた。太陽は天体である以上、完全であつて変化を被らないから、そのような変化は太陽には属さないと考えられたのである。⁽¹²⁾

シャイナーは望遠鏡によつて直接太陽を観察し、その日々の変化を図に記録し、その成果を三つの書簡としてまとめた。彼は、黒点は太陽の周りを回転しているのが確からしいと考えている。その理由として、黒点が太陽の縁の近くで細くなること、太陽の縁では複数の黒点の一つに集まつて大きなものになり、反対に中央では多くに分かれること、黒点は中央部では周縁部よりも速く動くことがあつた。黒点は太陽の周りを巡る天体であつて、水星や金星よりも太陽に近い所にある。この主張は伝統的な宇宙論を前提としていた。すなわち太陽は不変であるから、黒点のような変化する物は太陽表面上には存在し得ないのである。ただしこの主張も、太陽の周りを巡る天体の存在を仮定するという点において、伝統的な地球中心説を逸脱していたのであるが。

ガリレオは、シャイナーの著作を受け取つた後、黒点の観察を一六一二年二月に開始した。その成果は翌一六一三年三月に刊行された『太陽黒点論』(正確には『太陽黒点に関する論述と証明』 *Ustoria e dimostrazioni intorno*

alle machie solari) によって公表された。この著作は、シャイナーの二つの著作の内容を紹介し、それに反論する形式で書かれた三つの書簡からなっている。⁽¹³⁾そこでガリレオは、黒点が眼の錯覚やレンズによる幻影でも、地球の大気によるものでもなく、月より上の天上界で生じているという点ではシャイナーに同意しつつも、それが太陽の周りを回転する天体であるという主張は否定していた。ガリレオによれば、黒点は太陽表面の上か非常に近くにあり、太陽に属する現象なのである。

ガリレオの黒点観察は、投影法の採用によって二つの時期に分けられる。投影法とは、太陽の像を紙に投影するものであり、それを採用することによって、黒点を直視する危険を避けることができようになり、より正確な観察が可能になった。投影法は一六二二年五月初めに弟子のカステッリから教えられているが、それまでは日の出あるいは日の入りの際に望遠鏡によって太陽を直視しており、⁽¹⁴⁾当然観察できる時間は限られ、その精度も限定されていた。投影法では太陽を直接見ずに済むので観察に十分な時間を掛けることができた。また観察時刻も日昇時や日没時に限定されないので、天候による制約を受けづらく、観察機会を確保することが容易になった。さらに事前に紙に円を描いておき、それに太陽の像を一致させることによって、観察結果を標準化し、定量的に比較することが可能になったのである。第一書簡は投影法導入以前の観察によって書かれており、第二書簡・第三書簡は導入後の観察に基づいていた。実際、前者ではもっぱら議論が定性的なものだったのに対し、後者では定量的な考察が行われている。しかしながら、以下でも見るように、黒点の本性に関する基本的な主張は第一書簡においてすでに述べられており、第二書簡・第三書簡ではその主張を、詳細な観察結果と数量的考察によって補強する議論が展開されていた。

ガリレオの第一書簡は、五月初めまでの太陽を直視する観察に基づき、黒点が太陽の周りを回転する天体であるというシャイナーの主張に反論することを主な目的としていた。シャイナーの『三書簡』の内容を紹介し詳細に検

討した後で、ガリレオは、黒点の実体については確実な結論を主張する自信はないと述べている。なぜなら、黒点の実体は我々に知られておらず想像もできないものでありうるからである。このように述べながらも、続いてガリレオは、条件付きではあるが自分の考えを次のように表明している。

我々に馴染みのある既知のものとのある種の類推でもって、黒点がそうありうるように思われることについて何かを表明しようと望むのならば、アペッレ⁽¹⁵⁾とはまったく反対の見解を実際のところ持つだろう。というのは、黒点には、星辰に属する実体のいかなる特性も合うようには私には思われなからである。反対に、それらには、我々の雲において同様に見られることのない特質は何も見いだされないのである。(OGG, V, p.106)

「我々に馴染みのある既知のもの」とはもちろん地上の現象を指しており、それらの中で黒点と同じような属性を示すものを探すならば、それは雲だというのである。この主張の根拠として黒点の様々な属性が挙げられている。大小の期間でもって消滅すること、あるものは一緒になったり離れたりすること、形状が変化し、大部分は不規則な形をしていること、その暗さが場所によって異なること、太陽光を遮断する不透明さが変化することなどである。これらの性質は地上では雲が持つものに他ならなく、シャイナーの主張するように太陽の周りを回転する天体の性質とみなすことはできない。

ここでガリレオは、地球を太陽に喩える興味深い議論を行っている。地球が自ら輝いており、太陽からの光がないとしたと仮定したならば、地球の外で非常に遠くから雲を見ると、雲は黒点と似た姿を見せようというのである。雲によって妨げられた領域が黒点として現れ、雲の密度の大小に従って地球の輝きは妨げられるので、それによって黒点の暗さも変わるだろう。それらは数も変化し、また拡大縮小するだろう。

ガリレオは、実際に黒点が形状を変化している証拠として、四月から五月初めにかけての八枚の黒点スケッチを一枚の図にまとめて載せていた (OGG, V, p.107)。それらは二つのシリーズからなっている。一つは四月五日、六日、七日のものであり、もう一つは四月二十六日、二十八日、二十九日、三〇日、五月一日、三日のものである。どちらのシリーズも一つの大きな黒点の変化を追っている。これらの図によって、ガリレオは、黒点が日々形を変えていくこと、またその姿は雲のようであって、シャイナーが主張するような天体の影ではあり得ないことを読者に納得させようとしていた。第一書簡では太陽表面全体の図が載せられていないが、それは、ここでの彼の目的が個々の黒点の形状が時間とともにどのように変化することを示すことであつたからだと考えられる。一方第二書簡では、太陽表面全体の図が数多く載せられ、個々の黒点の位置変化や複数の個々の黒点間の距離の変化が容易にわかるようになっていた。

『太陽黒点論』の第二書簡には三五枚の太陽表面全体の図が掲載されている。それらは投影法を用いて描かれた精緻なものであり、それらを比較することによって太陽黒点の大きさや位置の変化を数量的に考察することができた。とくに黒点に共通する運動に注目し、それらが互いに平行に西から東へ十五日ほどで太陽表面を横断する過程が詳しく検討されている。それより、黒点が、シャイナーの主張するように太陽から離れた円上にあるのではないことが幾何学的に論証される。すなわち二つの黒点間の距離や黒点の速度が中央部では大きくなり、周縁に近くなると小さくなる度合から、黒点が表面上あるいはそのきわめて近くにあることが図によって示されるのである。

さらにガリレオは、黒点に共通の運動は太陽の自転によると結論する。黒点の運動の原因としては、二つの可能性が挙げられている (OGG, V, p.133. 「太陽黒点にかんする第二書簡」, 一一七頁)。

- 一 太陽本体自体が回転し、いっしょに黒点を運ぶ。
- 二 太陽本体は不動であるが、その周りを囲むものが回転し、黒点を運ぶ。

ガリレオは第一の方がはるかに確からしいと主張する。その根拠として、のちに慣性と呼ばれることになる物体のもつ運動の傾向が挙げられる。すなわち重い物体は地球の中心へ向かう自然な運動の傾向性を持つ一方で、水平方向に対しては無関心であり、運動への傾向も反感も持たず、静止あるいは運動の同じ状態を保持する。ここで水平方向とは、地球の中心から等距離である球面上にあり、したがって物体は地球の中心を中心とする円運動に対して無関心なのである。⁽¹⁶⁾ 同じように太陽を取り囲むものも太陽本体の運動を共有している。黒点はこの太陽を取り囲むものに含まれており、それとともに運動している。よって黒点の運動から、太陽本体の自転運動が導かれる。

しかし、このガリレオの慣性法則は本来地上の物体に関するものである。太陽表面上の物体も同じ運動の傾向を持つと、どうして言えるのだろうか。ガリレオの議論では、太陽表面上においても地表と同じ法則が成り立つことが前提とされていた。たしかに我々は彼の議論に違和感を感じないが、当時の哲学者にすれば、太陽と地球は天上界と地上界という異なる世界に属する以上、両者に同じ自然学的法則が適用されることを認めることはできなかったはずである。

最後にガリレオは、黒点が可变的であり、太陽表面に属することから、アリストテレスの学説に反して、太陽すなわち天上界も可変であることが観測によつて示されたと主張する。

ついに、正当にも最も純粹であると考えられるべき天の部分において、太陽自体の表面を言っているのだが、暗く、濃密で、曇った物質が数えられないほど多く絶え間なく生成し、短い時間で消滅することが発見されたのである。⁽¹⁷⁾ (OGG, V, p.140. 「太陽黒点にかんする第二書簡」、一二七頁)

ガリレオは、黒点の実体についてはわからないという立場を取りつつも、その振舞が地上の雲に似ていることか

ら、太陽すなわち天上界も地上界と同じように可変な世界であることを強く主張する。『太陽黒点論』では、『星界の報告』において月と木星に対して適用されていた地球との類似性が、太陽へも適用され、地上界の天上界への拡張がさらに進められていた。とくに注目すべきことは、慣性運動の法則が、太陽表面上の物体に対しても適用されていた点である。さらに『世界系対話』においては、地上の物体の落下法則が天体に適用されることになる。

五 『世界系対話』 新しい運動論の試み

『世界系対話』すなわち『プトレマイオスとコペルニクスの二大世界体系についての対話』(*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernico*, 1632) は、その標題のとおり、プトレマイオス体系とコペルニクス体系(すなわち地球中心説と太陽中心説)を比較検討することを主題としている。ガリレオは、一六一六年に枢機卿ベッラルミーノからコペルニクス説に関して訓告を受けており、この著作でも、あくまで天文学的仮説、すなわち実在世界には関わりのない天文計算のための道具として両体系を論じると述べている。⁽¹⁸⁾しかしながら、その隠された意図は、コペルニクス理論こそ実在世界を記述するものとして優れていることを、天文学的知見や運動理論に基づいて証明することにあつた。そのことは、地球の運動を証明するものとされる潮汐の理論からも窺われる。

コペルニクス体系が、天文学理論としては、逆行を合理的に説明できる点などにおいてプトレマイオス体系よりも優れていることは知られていたが(OGG, VII, pp.360-362, 『天文対話』(下)、九一九三頁)、一方地球の運動は大きな自然的な問題を引き起こすことが指摘されており、太陽中心説を受け入れる際に大きな障害となつていた。それらの問題を解決するために、ガリレオは、運動の相対性や慣性運動といった新しい運動論を展開する。まず地上にいる我々は、地球の運動を共有しているので、地球が動いていたとしても、それに気づくことはないことを指摘する。そして最後に地球の運動の積極的な根拠として彼独自の(誤った)潮汐論を提示している。

宇宙の中心が地球から太陽に移ることは宇宙構造全体の改変を余儀なくさせた。アリストテレス的宇宙像において核となっていた階層的宇宙構造、とりわけ地上界と天上界の区分は、地球が惑星の一つとなってしまうと、その存在根拠を失わねばならない。地球と諸惑星は同類のものになる以上、天上界少なくとも惑星の領域は地上界と同じような世界になるはずである。そのことを示すために、ガリレオは、『星界の報告』における月の起伏の存在、『太陽黒点論』における黒点の変化や運動などの他、新星や彗星の現象を取り上げ、天上界の不変性や完全性を否定する議論を展開する。彼によれば、近年の天文学的発見は、天上界の不変性を否定する証拠を提供しているのである。

われわれの時代に発見されたことは全哲学者をまったく満足させうるものであつたし、そうであると言いましよう。というのは、個々の天体、そして天の広大な拡がりにおいて、われわれの間では生成と消滅と呼ばれるものに似た現象が見られてきましたし、いつも見られるからです。たしかに、何の矛盾もなく、すべての惑星よりもはるかに高いとされた一五七二年と一六〇四年の二つの新星の他にも、多くの彗星が月の球よりも高い部分において生成し消滅するのがすぐれた天文学者たちによつて観察されています。また太陽自体の表面には、望遠鏡のおかげで、外見は地球の周りの雲に非常に似ている濃密で暗い物質が生成し消滅するのが見られます。(OGG, VII, p.76. 『天文対話』(上)、八四頁)¹⁹⁾

一五七二年に出現した新星が天上界に属することは、ティコ・ブラーエ (Tycho Brahe, 1546-1601) が視差を用いて論証していた。すなわち地球上の複数の地点から新星の位置を観測したとき、その視差が月よりも小さいことから、それは天上界で生じた現象であることを示したのである。また一五七七年に観測された彗星に関しても、同

様に視差からティコは天上界の現象とみなしていた。⁽²⁰⁾一方ガリレオは、彗星は、地上からの発散物が月の上まで上昇し、そこで太陽の光を反射して輝くことによつて生じるといふ独自の考えを持つていた。彗星の本性をめぐつては、一六一八年に相次いで三つの彗星が出現した後、イエズス会士とガリレオの間で論争が生じていた。『世界系対話』では、彗星に関しては僅かに触れるだけだったが、彼の彗星理論は地上界と天上界の区分を否定するものだった。⁽²¹⁾

当時彗星の本性に関しては、アリストテレスとティコの二つの説があつた。アリストテレスによれば、彗星は地上界に属する気象現象である。地上からの発散物が上昇し、火の領域で発火し、月の天球の回転によつて引きずられて円運動をしているのである。その物質が燃え尽きると彗星も消滅することになる。一方ティコによれば、彗星は月よりも視差が小さく、したがつて月よりも上の天上界に属している。惑星の領域とくに金星の近くにあり、地球との距離が一定でないことから太陽の周りを回転しているとされた。ガリレオは両者とも異なる説を主張していた。ティコの言うように、彗星はたしかに月より上の領域にあるが、しかし天体ではなく、地上を起源とする物質からなつていてと考えられている。地表からの発散物によるという点では、ガリレオの説はアリストテレスのものに似ているが、発散物が月より上の領域すなわち天上界まで上昇すること、燃烧するのではなく太陽光を反射していること、円運動をせず直線運動をしていることにおいて異なつていた。

ガリレオの彗星理論は誤つたものであるが、ここで彼は、地上界と天上界を厳格に区分していた伝統的な宇宙論を逸脱していた。それによれば、地上界が四元素（土・水・空気・火）から構成されているのに対し、天上界は第五元素（エーテル）から構成されており、両世界の間には交流は存在し得ないのである。ガリレオにとつては、地上界と天上界との区分は意味を持たなくなつていたと言えよう。

『世界系対話』では、天上界の不変性を否定する根拠として、太陽黒点と月表面の起伏が扱われている。太陽黒

点に関しては、『太陽黒点論』ですでに述べられていた議論が再び取り上げられていた。黒点が形状を変化し、生成消滅し、太陽表面に非常に近いところにあつて、地上の雲のようなものであること、さらに黒点の共通運動から太陽の自転運動が導かれるといったことである (OGG, VII, pp.76-80. 『天文対話』(上)、八四九〇頁)。これらは、太陽という天体に変化を伴うことの証拠として重要な意味を持つものと考えられている。

月をめぐることは、天上界の完全性・不変性への反論として詳しい議論がなされていた。『星界の報告』における月と地球の類似性の議論が再度なされることも、月の表面に起伏があることの論証が紹介されている。さらに月の二次光の問題が論じられている (OGG, VII, pp.112-120. 『天文対話』(上)、一三五―一四七頁)。その一方で、月の自転周期が公転周期と同一でほぼ一月であることなどから、月上の現象は地上でのものとは異なるはずであることが付け加えられていた (OGG, VII, pp.125-126. 『天文対話』(上)、一五四―一五六頁)。

ガリレオは、月、太陽黒点、新星、彗星に関する新しい天文学的知見、とりわけ望遠鏡による自らの観察の成果に基づき天上界の不変性を否定し、地球と月、さらには他の惑星の類似性を示すことによつて、地上界と天上界の同質性を導出していく。その議論は、天体観測による知見を経験的証拠とするいわば天文学的考察であり、それまでの著作で述べられていた議論をまとめたものだったが、さらに運動に関する新しい議論が導入されている。地球の運動が引き起こすとされた自然科学的問題を新しい運動論によつて解決しようとしたのである。船上での物体落下を用いた運動の相対性の議論はよく知られているが、ほかにも落下運動の法則や慣性の法則など、のちに『新科学論議』(*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638)において体系的に展開される運動論が断片的な形で提示されていた。そしてガリレオは、運動に関して、地上の物体と地球、そして惑星を同じ仕方でも論じている。彼の運動理論は、本来は地上の物体に関して考えられたものであるが、地球を含む惑星にも適用されていた。ここでは二つの議論を取り上げよう。

一つは、惑星は、各々特定の速さで円運動をしているが、その速さはどのようにして得られたかという逸話である。ガリレオによれば、惑星は、その円運動の中心にある太陽へ向けて落下していく運動の傾向を与えられ、それによって特定の速度を獲得したならば、その速度でもって円運動を始める (OGG, VII, p.53-54. 『天文対話』 (上)、五〇―五二頁)。その際の速さは、自然運動の加速の割合や落下する距離によって決定され、計算によって求められた値は木星を初めとする諸惑星について比較することができる。ここでガリレオが念頭に置いているのは、地上の物体が自然落下運動において加速運動をし、落下によって速度を得る際の法則である。ガリレオはすでに落下速度が落下距離の平方根に比例する (落下距離が落下速度の平方に比例する) ことを発見しており (OGG, VII, p.248. 『天文対話』 (下)、三三二頁)、その法則を惑星に適用したのである。もちろん以上の議論は、彼自身が述べているように想像上の話であるが、惑星であつても落下法則に従うと彼は考えていたのだつた。

もう一つは、ガリレオが地球の運動を論証する決定的な議論と考えていた潮汐の運動論的説明である。彼は、ケプラーのように潮汐を月の影響力によるとすることを認めず、潮汐は、地球が従う二つの運動、すなわち日周運動と年周運動の合成から生じるといふ純粹に運動論的な考えを持つていた。地球上にいる我々は地球の運動を共有しているため、地球が運動しているか静止しているかは判断できないが、この潮汐理論によれば、潮汐現象から地球の運動を確認できるのである。

容器に入った水の運動を考えよう。容器に不規則な運動をさせると、すなわち加速運動をさせると、水は一方に流れ、集まつた端では水位が高くなる。このようなことが、地球においても、日周運動と年周運動という二つの運動のために起こっており、それが潮汐の第一の原因なのである。具体的には、地球のある側では、年周運動と日周運動の方向が一致しているが、反対側では方向が逆になるので、それらの運動の混合によって生じる運動は異なるものになり、その結果、海水に流れが生じ、集まつた所では水位が高くなって満ち潮が生じる (OGG, VII, pp.450-

454. 『天文対話』(下)、110-1108頁)。

地球全体とその部分の各々が、単なる一年の運動であれ、ただ一日の運動であれ、一つの運動のみでもって動くことが本当なときには、その運動は均等で一樣であるように、これら二つの運動が混合するときには、その球の部分は、一日の回転と一年の回転が加えられたり引かれたりすることによって、加速あるいは減速される異なる運動が生じる。(OGG, VII, p.453. 『天文対話』(下)、1107頁)

この潮汐の説明は誤っているが、運動の合成という考えは近代力学史におけるガリレオの重要な業績であり、その考えによって投射体の軌道が放物線(パラボラ曲線)となることが導かれていた。しかし運動の合成は、慣性運動がそうであったように地上の物体を対象として考えられたものである。アリストテレス主義者でなくとも当時の哲学者は、地上の物体に関する議論を地球全体に適用することに対して異議を唱えたのではないだろうか。われわれが彼の主張に違和感を感じないのは、現代科学の観点からガリレオの考えが正しいと考えているからに他ならない。

『世界系対話』では、まず天上界の不変性が否定され、地上界と天上界の現象の間の類似性が主張された後、地上の物体に関して考えられた運動理論が地球を初めとする惑星まで拡張されていた。ガリレオは潮汐について論じるに際して、彼の運動理論が本来は地上の物体に関するものであることにはまったく触れておらず、天体を含めたすべての物体が同一の運動法則に従うものとして議論を進めている。運動論においても、地上界の天上界への拡張、あるいは天上界の地上化とでもいうべきことが行われていたと言えよう。

六 新しい宇宙論へ 均質的宇宙と太陽中心説

十七世紀における宇宙論の革命において、階層的宇宙像は均質的宇宙像に取って代わられた。地球中心説から太陽中心説への転換によって、それまで宇宙の中心にあった地球はその特別な地位を失い、惑星の一つとなつてしまつただけでなく、地上界と天上界という世界の区分はもはやその存在根拠を失わざるを得なかつた。新たな宇宙の秩序が求められたのである。新しい宇宙像は、ジョルダノ・ブルーノ (Giordano Bruno, 1548-1600) らのルネサンスの哲学者によつてすでに提唱されていたが、それは純粹に思索的なものだった。⁽²²⁾ 一方ガリレオは、望遠鏡を用いた天体観測による経験的根拠に基づいて、天上界の不変性・完全性を否定し、地上界と天上界の二分を核心とする階層的宇宙像を覆そうとしたのだった。

『星界の報告』における月表面の起伏の主張は、天上界における完全性を否定する最初の試みだった。望遠鏡による知見すなわち月表面の様子は、地上の現象からの類推によつて月表面の起伏として解釈される。望遠鏡によつて得られる情報は、まったく予想できない未知のものであり、それを理解するためには、地上の現象からの類推に頼らざるを得なかつたのである。ガリレオは、地球と月の類似性という考えを用いて、さらに月における蒸気球の存在や月の二次照の説明を導いたが、これは地上界の天上界への拡大に他ならなかつた。しかしこれらの議論は、伝統的な宇宙像を支持する者には認め難いものだったはずである。なぜなら、彼らから見れば、そもそも地球と月の間には類似性は存在し得ないからである。

木星の衛星の発見は、地球との類似性をさらに木星に適用する契機をガリレオに提供した。木星の周りにも地球や月のように「蒸気球」が存在すると考えられている。木星が、地球のように月を引き連れていることは、地球が特別なものではなく木星などの惑星と同類であつて特別な存在でないことを示しており、太陽中心説への批判に

対する反論の機会も提供していた。

太陽黒点の考察において、地上の現象からの類推はさらに太陽に拡張される。『太陽黒点論』では、太陽黒点が地上の雲との類似性によって考察され、太陽に変化が属することが示されているのである。とくに第二書簡では、黒点が太陽表面に非常に近い所にあることを観測結果から幾何学を用いて証明している。この数量的考察を可能にしたのは、投影法によって得られた精緻な観測結果の蓄積である。それによって、黒点の本性を確定できないとしても、黒点が、太陽の周りを回転する天体の影ではあり得ないことを論証できるとガリレオは考えたのだった。黒点の共通運動からの太陽の自転運動の導出は、望遠鏡による観測結果が提供した最も重要な結論であると言えよう。そして太陽自体が自転運動しているならば、地球が自転していても不思議ではないとガリレオは考えたはずである。

望遠鏡による観測データの蓄積は、天上界の不変性・完全性の否定という主張に対して経験的な根拠を提供し、地上界と天上界の同質性の考えはより大きな説得力を獲得したのであった。これによって、地球が宇宙の中心から外れ、惑星の一つになることへの宇宙論的な障害が取り除かれる道が切り開かれた。しかし太陽中心説が実在世界を記述するものであると主張するには、地球の運動が引き起こすとされた自然学的問題を解決せねばならなかった。アリストテレスに基づく伝統的な運動論に対抗する新しい運動論、引いては新しい自然学の構築が不可欠だったのである。ガリレオは、『世界系対話』においては、天上界の不変性および完全性の否定から運動論の問題へと進んでいった。そこでは地上の物体に関して運動の相対性、運動の慣性、そして運動の合成という考えが提示され、さらにそれらは、地球を初めとする惑星にも適用されている。ガリレオが地球の運動の決定的な証拠と考えた潮汐の説明は、地球の運動に運動の合成を適用したものであった。運動に関して、地球を初めとする天体が地上の物体とまったく同じように扱われていた。

ガリレオは、望遠鏡による観測結果を根拠としつつ、それを地上界の現象からの類推によつて理解することを通じて、新しい宇宙論を築いていった。天上界の完全性・不変性の否定は地上界の天上界への拡張に他ならず、同様の試みは彼の運動論においても見られる。落下法則、運動の慣性、運動の合成といった新しい運動理論は地上界の物体から天上界の天体へとその適用領域が拡張されている。彼の試みは最終的には均質的宇宙像として結実するが、地上界の天上界への拡張、さらには天上界の地上化として展開されていった。同時に太陽中心説によつて、地球はその特権的な地位を失い、惑星の一つとなったことから、地上界が天上化してしまったとも言うこともできよう。

〔本研究はJSPS科研費 26350362の助成を受けたものです。〕

注

- (1) 望遠鏡とガリレオの天体観測に関しては、近年いくつかの著作や論文集が刊行されている。Cf. Strano (2008), Galluzzi (2009), Van Heiden (2010), Baccantini (2015), 伊藤 (二〇一三) 参照。ガリレオの人生と業績に関しては、ファントリ (2012) 'Camerota (2004) が詳しい。
- (2) 訳文は邦訳『星界の報告』(二〇一七年刊行) によっている。月の表面の議論に関しては、伊藤 (二〇一四) 参照。
- (3) ガリレオは生涯イタリアを出たことがなく、ボヘミア地方に行ったこともなかった。しかし1595年に刊行されたブトレマイオスの『地理学』(イタリア語訳) には、ボヘミア地方の地図が載せられており、それからガリレオは着想を得たと推測されている。Cf. Galileo (2009a), pp.24-25.
- (4) Galileo (2009a), p.44, n.54. Cf. Shea (2000), pp.85-86.
- (5) OGG, II, p.282. Cf. Galileo (2009a), p.106, n.69.
- (6) 『世界系対話』(邦訳名『天文対話』) でも月の表面について詳しく論じられているが、ここでは「蒸気の球」には言及されておらず、ガリレオはそれまでにこの考えの誤りに気づいたと考えられる。
- (7) 実際には、そのようなことは起こらないはずであり、なぜガリレオがそのように考えたのかは不明である。

- (8) ガリレオは、月を囲む蒸気の球については、わが『体系』において詳しく論じると述べている (OGG, III-1, pp.95-96. 『星界の報告』、八二頁) が、『世界系対話』ではまったく触れられることがなかった。
- (9) プトレマイオス体系では、金星 (および水星) が太陽から一定角度以上離れないことを説明するために、金星の周転円の中心は、地球と太陽を結ぶ動径上にあるとされていた。また金星はつねに太陽より地球に近い、すなわち太陽より前にあるので、金星が大きく満ちることもないのである。プトレマイオス体系については、トゥーマー (二〇〇八) 参照。
- (10) 地球の不動性を救う理論として、ティコ・ブラーエの体系があった。それによれば、地球以外の惑星は太陽の周りを回転し、太陽はそれらの惑星を引き連れて地球の周りを回転するのである。ガリレオは、ティコの体系をまったく無視していた。スワドロー (二〇〇八)、二四九―二五一頁参照。
- (11) 邦訳 (岩波文庫版) では『天文対話』と題されているが、原題に従い、本稿では『世界系対話』と略する。
- (12) 太陽黒点観測の詳細に関しては、Galilei and Scheiner (2010) を参照。また注1の文献を参照。
- (13) 第二書簡のみ、邦訳が存在する (『太陽黒点にかんする第二書簡』、一九七六)。シャイナーは、一六一二年夏に新たに『より精緻な探求』 (*De maculis solaribus et stellis circa Iovis eruntibus accuratior disquisitio*) という著作を刊行していた。
- (14) 何らかのフィルターを使っていた可能性はあるが、ガリレイは何も述べていない。
- (15) 著者シャイナーのこと。シャイナーは偽名を用いていた。
- (16) これは、ガリレオが著作の中で慣性運動に言及した最初の箇所である。詳しい議論は、『世界系対話』において行われている。
- (17) 第二書簡からの引用文は拙訳である。
- (18) 一六一六年の出来事については、ファントリ (二〇一〇)、二七二―二七三九頁を参照。
- (19) 『世界系対話』からの引用文は拙訳である。
- (20) スワドロー (2008) 二四一―二四三頁、二四五―二四九頁を参照。
- (21) ガリレオは、自らの考えを、弟子のマリオ・グイドウッチの名前で刊行された『彗星論議』 (*Discorso delle comete*, 1619) において展開した。 Cf. Drake and O' Malley (1960), ファントリ (二〇一〇)、二七二―二八一頁。
- (22) ルネサンスの自然哲学に関しては、シュミット・コーペン・ハイヴァー (二〇〇三) を参照。

参考文献

- Opere di Galileo Galilei* (Edizione nazionale), a cura di A. Favaro, Firenze: Giunti, 1890-1909 (Quarta edizione 1968). (国定版全集[※] OGG-VI 略記^{※2})
- 『星界の報告』伊藤和行訳、講談社学術文庫、二〇一七。
- 「太陽黒点にかんする第二書簡」、山田慶児・谷泰訳、『星界の報告他一編』所収、岩波文庫、一九七六。
- 『天文対話』(上・下)、『岩波文庫』一九五九、一九六一。
- Galilei, Galileo (1957). *Discoveries and Opinions of Galileo*, tr. by S. Drake, New York: Anchor Books.
- (1989). *Sidereus nuncius, or The Sidereal Messengers*, tr. by A. Van Helden, Chicago: University of Chicago Press.
- (1992). *Sidereus nuncius: Le messenger celeste*, tr. par I. Pantin, Paris: Les Belles Lettres.
- (1993). *Sidereus nuncius*. a cura di A. Battisini, tr. di M. T. Cardini, Venezia: Marsilio.
- (2009a). *Galileo's Sidereus Nuncius, or a Sidereal Message*, tr. by W. R. Shea, Introduction and Notes by W. R. Shea and T. Bascelli, Segnore Beach: Science History Publications.
- (2009b). *Sidereus nuncius ovvero Avviso sidero*, tr. di T. Bascelli, introduzione e note di W. Shea e T. Bascelli, Venezia: Marcianum Press.
- Galilei, Galileo and Christopher Scheiner (2010). *On Sunspots*, tr. by E. Reeves and A. Van Helden, Chicago: University of Chicago Press.
- Biagioli, Mario (2007). *Galileo's Instruments of Credit: Telescopes, Images, Secrecy*, Chicago: University of Chicago Press.
- Bucciantini, Massimo et al. (2015). *Galileo's Telescope. A European Story*, tr. by C. Bolton, Cambridge, Mas.: Harvard University Press. (書籍
原本: *Il telescopio di Galileo: Una storia europea*, Torino: Einaudi, 2012)
- Camerota, Michele (2004). *Galileo Galilei e la cultura scientifica nell'eta della controvorsima*. Roma: Salerno.
- Drake, Stillman (1976). "Galileo's First Telescopic Observations," *The Journal for the History of Astronomy* 7, pp.153-168.
- Drake, Stillman and C. D. O., Malley (1960). Eds. *The Controversy on the Comets of 1618*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press.

- Galluzzi, Paolo (2009). Ed. *Galileo. Images of the Universe from Antiquity to the Telescope*, Firenze: Giunti.
- Righini, Guglielmo (1975). "New Light on Galileo, Lunar Observations," In *Reason, Experiment, and Mysticism in the Scientific Revolution*, ed. by M. L. Righini Bonelli and W. R. Shea, New York: Science History Pub., pp.59-76.
- Shea, William (2000). "Looking at the Moon as Another Earth: Terrestrial Analogies and Seventeenth-Century Telescopes," In *Metaphor and Analogy in the Sciences*, ed. by F. Hallyn, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp.83-103.
- Strano, Giorgio (2008). Ed. *Galileo's Telescope. The Instrument That Changed the World*, Firenze: Giunti.
- Van Helden, Albert et al. (2010), Eds. *The Origins of the Telescope*, Amsterdam: KNAW Press.
- Whitaker, Ewen (1978). "Galileo's Lunar Observations and the Dating of the Composition of *Siderius Nuncius*," *The Journal for the History of Astronomy* 9: pp.155-69.
- 伊藤和行 (二〇一三) 『ガリレオ―望遠鏡によって再発見された宇宙』、中央公論新社。
- 伊藤和行 (二〇一四) 「ガリレオの天体観測(一)―月―」『科学哲学科学史研究』、第9号、一〇三―一四頁。
- ウォーカー (二〇〇八) 『望遠鏡以前の天文学』、山本啓一・川和田晶子共訳、恒星社厚生閣。
- シュミット・コーペン・ハイヴァー (二〇〇三) 『ルネサンスの哲学』、榎本武文訳、平凡社。
- スワドロー (二〇〇八) 「ルネサンスの天文学」、ウォーカー編『望遠鏡以前の天文学』所収、山本啓一・川和田共訳、恒星社厚生閣、二二七―二七六頁。
- トウマー (二〇〇八) 「プトレマイオスとその先行者たち」、ウォーカー編『望遠鏡以前の天文学』所収、山本啓一・川和田共訳、恒星社厚生閣、六一―九二頁。
- フアントリ (二〇一〇) 『ガリレオ―コペルニクス説のために、教会のために』、大谷啓治監修、須藤和夫訳、みすず書房。
- ブレードカンフ (二〇一三) 『芸術家ガリレオ・ガリレイ―月・太陽・手―』、原研二訳、産業図書。
- (筆者 いたう・かずゆき 京都大学大学院文学研究科教授／科学史)

Galileo Galilei's Astronomical Observations and New Cosmology

by

ITO KAZUYUKI

Professor of Philosophy and History of Science
Graduate School of Letters
Kyoto University

At the beginning of the seventeenth century, Galileo Galilei made certain astronomical discoveries with his telescopes. Hence, he is said to be the founder of modern observational astronomy and to have led the cosmological revolution. He supported the Copernican theory, denied the hierarchical structure of the traditional Aristotelian universe, and insisted on the new notion of a homogeneous universe. Some Renaissance philosophers had displayed the new cosmology speculatively, but Galileo demonstrated his concept of the universe experientially, based on his telescopic observations.

The cosmological revolution of the early modern era occurred together with the astronomical revolution. Traditional cosmology positioned the earth centrally in the universe, dividing the universe into two different worlds – the celestial world that was perfect and eternal and the terrestrial world that was not. Since heliocentrism established the earth as a planet, the traditional division of the universe lost ground.

In this paper, I will consider how Galileo denied the perfectness and eternity of the celestial world and developed his concept of a homogeneous universe along with heliocentrism by examining his astronomical works – *Sidereus nuncius*, *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari*, and *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. When Galileo considered the celestial phenomena obtained by telescopic observations, he employed the analogy between the terrestrial world and the celestial world. He attempted to extend the terrestrial world into the celestial world.

In *Sidereus nuncius*, Galileo inferred the irregularity of the moon surface by utilizing the analogy between the earth and the moon. In *Alle macchie solari*, this analogy was applied to the sun and he indicated that sunspots were similar to clouds in the terrestrial world. In *Dialogo*, he applied his new laws of motion to planets although they had originally been developed for terrestrial bodies.