

ガリレオの望遠鏡—観測と理論—

伊藤 和行*

Galileo's telescope: Observation and theory

Kazuyuki ITO

§1 はじめに

近代科学の主なる特徴として、特別な機器を用いた観測や実験による理論の検証がある。近代科学が誕生した17世紀には、望遠鏡や顕微鏡、真空ポンプといった最初の科学的機器が世に現れている。ガリレオ・ガリレイにおいても、望遠鏡による天体観測は、太陽中心説の経験的証拠を提供するものと捉えられていた。¹

ガリレオは、『星界の報告』（1610年）における月表面の凹凸の、そして『太陽黒点論』（1613年）における黒点の運動や形状の変化といった発見を、伝統的な宇宙論、とくに天上界の不変性を否定する経験的証拠とみなしていた。しかし日常の世界からは遠く離れた天上界に関して望遠鏡が提供してくれる情報はまったく未知のものであり、その内容を解釈するためには何らかの理論的枠組が必要だったと考えられる。望遠鏡が提供する情報は理論的フィルターを介して理解されていたのではないだろうか。

本研究では、望遠鏡による天体観測から得られた経験的情報と、その理論的解釈という問題について、ガリレオの代表的な三つの著作、『星界の報告』、『太陽黒点論』、『世界系対話』の検討を通じて考察する。

§2 『星界の報告』

ガリレオが望遠鏡による天体観測を始めたのは、1609年12月のことだった。彼は、月表面において、肉眼では見られなかったものを発見したのである。明るい部分に点在する「小さな斑点」（クレーター）のほか、明暗部分の境界線におけるギザギザ模様、暗い部分における多数の輝点などだった。望遠鏡による観察から得られたのは月

* 京都大学大学院文学研究科

¹ 伊藤（2017b）を参照。

表面の模様だったが、ガリレオは、その情報から月表面の凹凸の存在を推論するのである。² 彼は、それまで知られていなかった「斑点」の存在を指摘し、それから月表面の凹凸の存在を確信するようになったと言う。

さて、それらの斑点を幾度も繰り返し眺めることから、我々は次のように確信するにいたった。すなわち、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、ごつごつしていて、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。この考えを抱くことができたのは、次のような現象によってである。³

ガリレオが見ていたのは「斑点」という模様であり、それから月表面が滑らかではなく、凹凸があるという「考え」を抱き、「確信」するようになったのである。月表面の凹凸という考えに導いた現象は、多くの小さな斑点の存在だけでなかった。ガリレオは、三つのものを挙げている。

1. 明るい部分に小さな斑点が散在すること。明るい部分と暗い部分の場所。
2. 明暗部を分ける境界線がギザギザになっていること。
3. 暗い部分に多くの明るい点が存在すること。その大きさと明るさの変化。

これらをガリレオは地上の現象とのアナロジーによって解釈する。第一の小さな斑点においては、太陽に向かって暗い部分があり、一方反対の部分に明るい境界が見られるが、それは地上において太陽が昇る際に見られる光景と似ているというのである。

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、

² ガリレオの月表面の議論に関しては、伊藤 (2017a) ; Shea (2000) などを参照。

³ OGG, III-1, pp. 62-63; 『星界の報告』, 22-23 頁。

明るい部分が增大するにつれて暗さを失うのである。⁴

ガリレオによれば、小さな斑点は、地上において周りを山に囲まれた盆地が示すのと同じ姿を呈しているのである。第三の、暗い部分に点在する明るい点は、早朝太陽が昇りかけたとき、非常に高い山の頂きが太陽光線によって照らされている姿に対応しており、これらの点は月にある山の頂きを示していると主張する。⁵

ガリレオは、月表面の凹凸の存在に対する一つの反論を想定し、それへの返答を月と地球の類似性から導き出していた。⁶ その反論とは、月に多くの山が存在するならば、その円状の外縁がでこぼこになっているはずなのに、そうではなくて円状なのはなぜか、というものである。それに対して、彼は二つの返答を用意していた。第一のものは、複数の山の連なりが重なっているために凹凸が打ち消されて見えないというものである。第二には、月の周りを囲む蒸気の球が存在しており、その蒸気の層のために凹凸が隠されているのである。惑星を囲む蒸気の層という考えは、木星へも拡張されていた、そこでは、ガリレオは、惑星としての地球と木星の間の類似性を念頭に置いていたと考えられる。地球が月という衛星を持ち、木星が四つの衛星を持つように、両者はともに蒸気の層によって囲まれているのである。

最後に、ガリレオは、現代では地球照と呼ばれる現象を取り上げ、この現象によって「月と地球の間の対応性と類似性」がいつそう明らかになるとしている。⁷ これは、三日月などにおいて、太陽の光が当たっていない部分も、周囲よりも明るく見える現象で、ガリレオは、その輝きは地球によって反射された太陽光が当たることによると主張する。一方地球も月からの反射光によって照らされており、満月では月の表面全体が照らされることによって、地表は明るく照らされるのである。すなわち月と太陽は相互に対照的な関係にあり、両者の役割は相互的なものなのである。

月表面の凹凸の存在をめぐって、ガリレオは、地上の現象とのアナロジーを介して、望遠鏡によって得られた情報を解釈し、その存在を導いていた。彼の議論は、天上界が完全なものとする哲学者にとっては、どれほどの説得力を持っていたのだろうか。というのも、天上界と地上界をまったく異なる者とする立場からは、そもそも地上の現象とのアナロジーは成立しないはずであり、それを前提とする、ガリレオの議論

⁴ OGG, III-1, p. 63; 『星界の報告』, 24頁。

⁵ OGG, III-1, p. 64; 『星界の報告』, 24-25頁。

⁶ OGG, III-1, pp. 69-71; 『星界の報告』, 31-34頁。

⁷ OGG, III-1, pp. 72-75; 『星界の報告』, 36-41頁。

は論点先取になっていたとみなされただろう。この批判に対しては、実際に月の表面を近くから見ることはできない以上、望遠鏡によって得られた図像の説得力に頼るしかなかった。実際『星界の報告』に載せられている月の図版では、クレーターが鮮やかに描かれており、ガリレオの議論に信憑性を提供している。ガリレオの議論に説得力を提供したのは望遠鏡の提供した情報であり、その情報を明示的に提示する図版こそ、彼の主張に信頼性を与えていたのではないだろうか。⁸

§3 『太陽黒点論』

ガリレオが太陽黒点の本格的な観測を開始したのは、『星界の報告』の刊行から2年近くを経た1612年初めのことだった。その年の1月にイエズス会士シャイナーの著作を贈られ、彼の見解に対して意見を求められたのだった。シャイナーは、黒点は、太陽の周りを回転する一群の小天体の影だと主張し、天上界の不変性を堅持していた。それに対して、ガリレオは、黒点は太陽表面のすぐ近くにあり、生成消滅し、形状も変化していくもので、地上の雲のようなものではないかと主張するのである。ガリレオは2月から黒点観測を開始したが、4月末の投影法という新しい観測方法の導入によって観測は大きく進展し、観測によって得られた情報から、黒点が太陽表面のすぐ近くにあることを幾何学的証明によって論証していた。

当初ガリレオは、シャイナーと同様、朝靄や雲を通して太陽を直接見ていたため、十分な時間を掛けてみるのができなかった。それでも、太陽黒点の形状が日々変化し、大きさが変わることに気付いており、何か雲のようなものではないかと推測している。しかし投影法の導入によって、スケッチの精度は段違いに向上し、連続した観測から、各黒点の位置や形状をより精確に記述することができるようになった。投影法とは、望遠鏡の接眼レンズの先に白い紙を置き、その上に描かれた円に太陽の像を合わせて、黒点の像をなぞるというものである。これによって、時間的な制約から解放されるとともに、毎日の観測で、同じ大きさの円に太陽を合わせることによって、観測データを規格化することが可能になった。⁹

投影法の採用から得られた最大の成果は、連続した観測結果を比較することによって、黒点の横幅や二つの黒点間の距離、黒点の移動する速度などが黒点の位置とともに

⁸ ガリレオの月の図版に関しては、ブレードカンブ(2012)を参照。

⁹ *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari*, in OGG, V, pp. 136-137; 「太陽黒点にかんする第二書簡」, 121-123頁。

に変化することだった。それらはみな太陽表面の中央で大きく、端に行くに従って小さくなっていく。その量的変化から、黒点は球面上を移動しており、その球面は太陽表面から非常に近いことが推論される。その議論の際に、ガリレオは図を用いた幾何学的な論証を行っていた。この論証は説得力のあるものだったが、それを可能にしたのは、精度の高い、規格化された観測データなのである。¹⁰

黒点の位置に関する幾何学的論証は大きな説得力を持つとガリレオも考えていたのではないだろうか。その一方、黒点の本質に関しては、彼の議論も暫定的なものだった。ガリレオによれば、我々は遠方の月や太陽のみならず、身近にある土や火の本質についても実は理解していないのであり、太陽黒点についても同様なのである。

それゆえ、私としては、太陽黒点の実体を追求しようとしてもむなしく終わるだけのように推察します。ですが、太陽黒点の持ついくつかの性質、たとえば位置や運動、形、大きさ、明るさ、変容性、そして生成消滅などについては、私たちにもそれを理解する余地は残されているでしょう。¹¹

これらの諸性質から導き出せることは、我々の身近にあるものの中には、雲以上に黒点に似ているものは見いだせないということである。¹² しかしながら、ガリレオは、黒点が「我々の雲と同じ実体からなる雲である」とは断言せず、我々には知られていないことが多くあるので、確定的ではないと述べている。¹³

このように、ガリレオは、望遠鏡による観察から得られた太陽黒点の諸性質を超えて、その本質へと進もうとしないが、その一方では、自分の研究の目的は、惑星の位置を計算し、予測することを主たる目的とする「純粋な天文学者」¹⁴のものとは異なると主張している。彼は、離心円や周転円、さらには天球も、天文学的計算のために仮定されたとして、それらの実在性を否定する。そして、自分のような「哲学的天文学者」は「現象を救う」ことを超えて、「宇宙の真の構成を究明」しようとする主張している。¹⁵

「哲学的天文学者」は天文学者と哲学者の間に位置づけられる。数学的機構を扱うだ

¹⁰ *Istoria*, OGG, V, pp. 121–124; 「太陽黒点にかんする第二書簡」, 97–103 頁。

¹¹ *Istoria*, OGG, V, p. 188.

¹² *Istoria*, OGG, V, p. 108.

¹³ *Istoria*, OGG, V, p. 108.

¹⁴ *Istoria*, OGG, V, p. 102.

¹⁵ *Istoria*, OGG, V, p. 102.

けでなく、宇宙の実在的な構造を論じ、太陽などの天体や黒点の性質を検討しつつも、それらの本質についての哲学的考察は目指さない。しかし、望遠鏡による観察から得られた情報から天上界の可変性が導かれることをガリレオは確信しており、天上界の不変性を堅持するアリストテレス学派の哲学者たちに対しては、「アリストテレス自身がこの時代にいたら、この考えを放棄するでしょう」¹⁶と主張するのである。

ここでガリレオが心に抱いていたのは、既存の哲学的体系性によって縛られていた伝統的な哲学とは異なり、望遠鏡を通じて得られた天上界についての新しい知見に即応できるような自然研究、いわば新しい天上の自然学だったと言える。そして、ガリレオによれば、それこそ、アリストテレス自身が目指したものはずなのである。

§4 『世界系対話』

宇宙論の問題が本格的に論じられた『世界系対話』が刊行されたのは、『太陽黒点論』からほぼ20年を経た1632年のことだった。その間ガリレオは表立って宇宙論を論じたことはなかった。というのは、1616年に、コペルニクスの惑星体系（太陽中心説）の擁護をめぐる、枢機卿ベラルミーノから訓戒を受けていたからである。¹⁷しかし宇宙論の問題に関心を向けていなかったわけではなく、1618年に出現した彗星の本性をめぐっては、イエズス会士と激しい議論を行っており、1623年に刊行された『偽金鑑識官』はその問題を主題としていた。しかしながら、そこでの議論は彗星の本性に限定されており、宇宙体系、とりわけ太陽中心説に関しては、仮説としても触れられていなかった。

『世界系対話』の序文では、プトレマイオスの体系とコペルニクスの体系を、天文学的な仮説として論じると述べられていたが、ガリレオの本意は、どちらが実在の体系を記述するものとして適切かを論じることにあった。四日にわたる対話編では、各々の観点から宇宙体系の問題が論じられていた。第一日では、望遠鏡による経験的知見に基づいて、天上界、とくに月が地球と似ており、地球を惑星の一つと考えても構わないことが主張される。第二日では、地球の運動が引き起こすと考えられていた自然学的な問題を検討し、第三日では、惑星運動の合理的な説明といった天文学的な観点からコペルニクスの惑星理論を擁護する。最後の第四日では、海の満干という現象が、地球の二つの運動すなわち日周運動（自転運動）と年周運動（公転運動）からの合成

¹⁶ *Istoria*, OGG, V, p. 231.

¹⁷ ファントリ（2010）などを参照。

運動によって説明されることを示し、コペルクスのできが優れていることを示唆するのである。

第一日では、『星界の報告』および『太陽黒点論』における議論が再度取り上げられ、天上界の不変性が批判される一方で、天上界と地上界の同質性の主張が展開されていた。

『星界の報告』からは月表面の凹凸の議論が取り上げられる一方で、木星の衛星は、金星の満ち欠けとともに第三日の天文学的議論の中で論じられていた。他には、太陽黒点や新星、彗星が取り上げられているが、短い議論しかなされていない。というのは、太陽黒点については、それが太陽表面上にあるというガリレオの主張はほぼ認められており、また黒点の本性については確固としたことがいまだわからなかったからである。また木星の衛星についても存在がすでに一般に認められており、再度詳しく論じる必要がなかった。そのため第三日において太陽中心説との関連で簡単に触れられただけだった。¹⁸

月表面に関する議論には多くの頁が割かれていたが、それは、地球と月との類似性を主張するためだった。『星界の報告』では、望遠鏡を通じて得られた情報から、月表面の凹凸の存在を論証することが問題だったが、それから20年を経て、その点はもう認められていた。そのため、第一日における議論では、月表面の凹凸の存在などから月と地球の類似性を論証することが主眼となったのである。『星界の報告』では、月と地球の類似性が月表面の凹凸の存在の説明のために用いられていたことを考えると、『世界系対話』では両者の位置づけが入れ替わったと言えよう。

『世界系対話』では、月と地球の類似点として次の7つの点が挙げられていた。¹⁹

1. 形状が球形であり、太陽からの光によって照明されていること。
2. 暗いこと。
3. 月の物質が密で、山が多いこと。
4. 明るい部分と暗い部分に分かれること。地球では海と地表面がそうである。
5. 大地の形状の変化は月と同じ期間で生じること。
6. 月と大地とは相互に照らし合うこと。
7. 月と大地とは相互に食し合うこと。二次光は月に固有のものである。

¹⁸ *Dialogo*, OGG, VII, pp. 368–369; 『天文対話』(下), 187–88頁。

¹⁹ *Dialogo*, OGG, VII, pp. 87–93; 『天文対話』(上), 101–109頁。

月の二次光に対しては、月表面には多くの凹凸があるにもかかわらず、あのよう
に太陽光線を反射して輝いているのはなぜかという問いについて、ガリレオはかなりの
頁数を割いて考察している。²⁰

月と地球の類似点について詳しく論じる一方で、相違点についても言及し、両者
とは自転の周期が異なり、月の自転周期がほぼ一月と長いことから月上での現象は地上
とは大きく異なっているだろうと推測する。²¹また月は地球と同じ物質からなるのでは
ないとも述べられている。さらに『星界の報告』では、月の周りを囲む蒸気の球の存在
が主張されていたが、『世界系対話』ではまったく触れられていなかった。以上のガ
リレオの議論を見ると、月と地球の類似性に関する彼の主張は、『星界の報告』にお
けるものよりも後退していると考えられる。『星界の報告』では、月表面の凹凸とい
った発見の承認を得るために、ガリレオは類似性を強調していたのではないだろう
か。それに対して『世界系対話』刊行の時点では、月の凹凸や木星の衛星といった
発見は一般に認められており、それらを論拠として、穏当な議論を展開することが
できたのである。

§5 まとめ

ガリレオの新しい自然研究は経験に基づいていたが、しかしその経験は日常的な
ものではなかった。天文学においては、肉眼による経験ではなく、望遠鏡という特殊
な機器によって得られた特異な経験なのである。それは、アリストテレスにとっては
未知の経験だったと言えよう。ガリレオは、伝統的な宇宙論の擁護者たちに対し
て、もしアリストテレス自身が望遠鏡を覗いたならば、自分の考えに同意するだろ
うと主張する。

したがって、もし彼が過去に諸天において何らの変化も見られなかったこと
から、諸天の不変性を推論したのであれば、我々にとって明らかになったこと
を、感覚が彼に示したとしたならば、彼は反対の見解に、すなわち驚くべき
発見でもって我々が導かれていった見解に従ったことでしょう。いや、さら
に言うなら、(現在の観察が正しいのですから) 天の物質が可変的であると
みなすことは、天の物質が不可変的であると主張しようとする人々よりも、
アリストテ

²⁰ *Dialogo*, OGG, VII, pp. 93–120; 『天文対話』(上), 109–147頁。

²¹ *Dialogo*, OGG, VII, pp. 125–126; 『天文対話』(上), 154–156頁。

レスの学説に反するところがはるかに少ないと私は思うのです。というのは、アリストテレスは、不可変性という結論を、あらゆる人間の議論は明白な経験に従わねばならないという結論ほどに確実なものとしていたわけでは決してないと確信しているからです。²²

ガリレオは、天文学者とも哲学者とも違う、第三の道を進むと主張する。その道とは、太陽・月・惑星といった天体の位置の観測と計算を中心とする数値天文学でも、日常的経験と形而上学的原理に基づく自然哲学でもなく、望遠鏡によって得られた新しい情報を、地上の現象とのアナロジーを用いて「合理的」に解釈するというものだった。その際に有効な考察ツールだったのが、精確な観測と数学的（幾何学的）論証である。視差による彗星や新星の高さの確定、太陽黒点の場所の確定などにおいて数学的（幾何学的）論証が果たした役割はきわめて大きかった。

数学的論証と結び付いた自然現象の考察は、従来の自然哲学の営みとは大きく性格を異にしていることは、ガリレオ自身がよく理解していた。彼によれば、哲学者は一般的なことを論じ、アリストテレスも、たとえば運動に関しては、その一般的な定義、自然的なものと暴力的なもの、単純なものと合成されたものといったことを論じることで満足している。加速運動については、加速を根拠づけることで満足しているのに対し、ガリレオは、それが従う数学的な法則といった現象の具体的な記述と説明を目指すのである。²³その際には、観測や実験で得られた情報の「合理的」説明が、自然科学全体の体系性よりも優先される。ガリレオにとって、第一原理から出発する哲学とは異なり、個々の現象の説明から出発するのが「新しい科学」の営みなのである。

[本研究は JSPS 科研費 18K00256 の助成を受けたものである.]

参考文献

- OGG = Galilei, Galileo. 1890–1909. *Le opere di Galileo Galilei*. a cura di A. Favaro, Firenze: Giunti (ristampate in 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.

²² *Istoria*, OGG, V, pp. 138–139; 「太陽黒点にかんする第二書簡」, 125–126 頁.

²³ OGG, pp.189–190; 『天文対話』上, 第2日, 249 頁.

- Galilei, Galileo and Christopher Scheiner. 2010. *On Sunspots*. Tr. by E. Reeves and A. Van Helden, Chicago: University of Chicago Press.
- Camerota, Michele. 2004. *Galileo Galilei e la cultura scientifica nell'eta della controriforma*. Roma: Salerno.
- 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.
- Ito, Kazuyuki. 2017. Galileo's Early Observations of Sunspots. *PHS Studies* (Philosophy and History of Science, Faculty of Letters, Kyoto University), 11: 55-64.
- 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.
- 伊藤和行. 2013 年. 『ガリレオ—望遠鏡によって再発見された宇宙—』, 中公新書.
- 伊藤和行. 2017 年 (a). 「ガリレオの天体観測 (1) 一月—」『科学哲学科学史研究』, 第 9 号, 103-114 頁.
- 伊藤和行. 2017 年 (b). 「ガリレオの天体観測と新しい宇宙論」『哲学研究』, 第 601 号, 29-55 頁.
- ガリレイ, ガリレオ. 2017 年. 『星界の報告』伊藤和行訳, 講談社学術文庫.
- ガリレイ, ガリレオ. 1976 年. 「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.
- ガリレイ, ガリレオ. 1959・1961 年. 『天文対話』青木靖三訳, 岩波文庫.
- ドレイク, スティルマン. 1984 年. 『ガリレオの生涯』田中一郎訳, 共立出版.
- ファントリ, アンニバレ. 2010 年. 『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.
- ブレーデカンフ, ホルスト. 2012 年. 『芸術家ガリレオ・ガリレイ—一月・太陽・手—』原研二訳, 産業図書.