

ガリレオの望遠鏡と天体観測

伊藤 和行

今年、ガリレオ (Galileo Galilei, 1564-1642) が、望遠鏡によって天体観測を始めてからちょうど400年にあたり、それを記念する「国際天文年」の様々な催しが行なわれている。ガリレオは、望遠鏡によって、月の凹凸、木星の衛星、金星の満ち欠けなどを短期間のうちに発見した。観測結果は『星界の報告』(1610)において公表されたが、彼はそれらを根拠として太陽中心説を主張し、それまで一般に認められていた宇宙像の革新を導いたのだった。



アリストテレス以来の伝統的な宇宙像は地球を中心とした同心的階層構造に基づいていた。宇宙の中心には地球が静止しており、恒星や惑星は、地球を中心とする球の上に載っており、それらの運動は球の回転運動によって説明され

ていた。世界は二つに分けられ、月より下の地上界(月下界)と、月より上の天上界(月上界)はまったく異なる世界とされている。地上界が物質の生成消滅や様々な変化が起こる世界であるのに対して、天上界は完全で不変な世界である。この地上界と天上界の二分は階層的宇宙構造の核心ともいべきものだった。ガリレオは、望遠鏡による観測結果から、天上界が地上界と異ならず、地球も他の惑星と同じ世界であることを主張し、太陽中心説を擁護したのだった。

ガリレオは1609年から1610年にかけて望遠鏡によって新しい知見を次々と得ていったが、彼は望遠鏡の発見者ではなかった。彼のみが望遠鏡という装置を利用できたのではないのである。それにもかかわらず、彼が最初に月の凹凸などの発見をできたのはどうしてののだろうか。以下では、ガリレオが望遠鏡の存在を知ったのは1609年夏から、観測結果を公表した『星界の報告』が出版された1610年3月までの数ヶ月の彼の行動をたどることによって、この疑問を解いていこう。

1. 望遠鏡の製作

望遠鏡は1608年9月にオランダで出現したが、またたく間に望遠鏡の情報はヨーロッパに広まっていった。1609年春にはパリの眼鏡店で、倍率3倍程度の望遠鏡が販売されていたという。イタリアにもその知らせは伝えられていたが、ガリレオは、望遠鏡の話は初めて聞いたのは1609年7月にヴェネツィアを訪れたときのことだった。彼は、その後すぐに

実物を見ることなく自らの力で製作したと書簡の中で述べている。望遠鏡を製作した経緯については、『星界の報告』や『黄金計量者』（1623）の中でも触れられているが、ガリレオは、その話を聞くと、現物を見ることなく「光学」（la scientia di prospettiva）あるいは「屈折理論」（doctrina de refractionibus）に基づいて製作したという。鉛の筒を用意し、その両端に二枚のレンズを取り付けた。一方のレンズは、片面が平らでもう片面は凸である（平凸レンズ）のに対し、他方のレンズは、片面が平らでもう片面は凹である（平凹レンズ）。前者を眼から遠くに置き、後者を眼の側に置くことによって正立像が得られた。

ガリレオが製作した望遠鏡は、焦点距離の長い凸レンズ（対物レンズ）と焦点距離の短い凹レンズ（接眼レンズ）とからなり、今日「ガリレイ式望遠鏡」と呼ばれている。最初の望遠鏡の倍率は3倍だったが、8月後半までには9倍の性能をもつものを完成していた。彼はそれをヴェネツィア政府の高官たちに実演したが、非常に好評であり、その功績によって大幅な昇給を得ている。ガリレオは望遠鏡の発見者ではなかったが、実物を見ずに独力で製作したことは間違いない。そして彼は偶然に望遠鏡を発見したのではなく、望遠鏡を「光学」の理論に基づいて製作したことを強調していた。『黄金計量者』においても、望遠鏡について触れた際に、偶然に望遠鏡を発明した最初の製作者よりも、理論に基づいて改良した自分の方が称賛に値すると主張している。しかしこの「光学」の理論とはどのようなものなのだろうか。ガリレオは何も具体的なことを述べておらず推測するしかない。第一に考えられるのは、二つのレンズの焦点距離の比（対物レンズの焦点距離／接眼レンズの焦点距離）が倍率に等しいという法則であり、それに彼が気づいていたというように書かれていることがある。しかしこの時代には、まだ焦点距離、とりわけ凹レンズの焦点距離の概念は明確でなく、そのような数量的法則を彼がはっきりと気づいていたというのは考えづらいのである。彼は、焦点距離の長いすなわち曲率の小さな凸レンズと、焦点距離の短いすなわち曲率の大きな凹レンズを組み合わせたときに大きな倍率が得ることを経験的に知ったのではないだろうか。しかしなぜそのようなことが成り立つかは、ガリレオにはわからなかったと思われる。光学に関しては、ガリレオは実験家であって理論家ではなかったのである。

ガリレオと対照的だったのがケプラーである。彼は光の屈折理論について研究し、近代の幾何光学の基礎を築いたといわれる。『ウエテロへの補遺』（1604）では、鏡での光の反射やレンズによる屈折、また眼球内で網膜上に倒立像が生じることを論じていた。ガリレオの望遠鏡に刺激されて書かれた『屈折光学』（1611）においては、レンズによって像ができる仕組みを考察し、対物レンズも接眼レンズも凸レンズである、現在「ケプラー式望遠鏡」と呼ばれる屈折望遠鏡を考案している。しかし彼自身は実際に望遠鏡を製作することはなかった。『星界の報告』を読んだ後でも、その記述を確認したいが、性能の良い望遠鏡を入手できないので、望遠鏡を送ってくれるようにガリレオに頼んでいるのである。ガリレオは大学で数学を講じる一方で、経済的な理由から自宅に裕福な学生を下宿させ、彼らに築城術や測量術のような、数理工学に当たるものを個人的に教授していた。また一種の計算尺ともいべき「軍事・幾何学コンパス」を考案し、職人を雇って、金属製のコンパスを製作させて販売していたのである。このような技術的関心が、ガリレオをして望

遠鏡の製作を可能にしたと考えられる。

2. 望遠鏡の改良—月の観測

ガリレオは1609年夏には9倍の望遠鏡を手にしてはいたが、この時点ではまだそれを天界には向けていなかったし、その性能には満足できなかった。ガリレオの望遠鏡による天体観測の記録が始まるのは1609年12月にはいつからである。彼以前に望遠鏡を月に向けていた天文学者がイギリスにいた。トマス・ハリオット (Thomas Harriot, 1560頃-1621) は、8月初めには望遠鏡を月に向けていたことが知られている。ガリレオは望遠鏡を発明したのではないだけでなく、最初に望遠鏡による天文観測を行なったのでもないのである。ハリオットは何枚かの月のスケッチを残しているが、彼の望遠鏡の倍率が6倍ということもあって、スケッチはガリレオのものと比較すると稚拙であり、それから月の表面の凹凸の存在を導き出すこともなかった。また彼はその成果を生前に公表することもなかった。

ガリレオは、自らのスケッチを元にして月の凹凸の存在を主張し、山の高さの推測まで行なっている。そのように詳細な観測が可能だったのは、彼が最初の望遠鏡に満足せずに、その改良に取り組んだことにある。彼がいつ初めて望遠鏡を月に向けたのかははっきりとはわからない。彼の観測記録が始まっている12月よりも前に月を見ていたのかもしれないが、9倍の望遠鏡では、ハリオットと同様、月に向けても重要な発見はできなかったのではないだろうか。月の観測記録が始まる直前の11月末に倍率20倍の望遠鏡を完成したと推測される。このように望遠鏡の改良に時間が掛かったのはなぜだろう。16世紀には、市中には眼鏡店が存在していたことが知られており、そこからレンズを購入すれば、すぐに望遠鏡の倍率を上げることができるように思われるかもしれない。しかし眼鏡店で入手できるレンズでは、性能のよい望遠鏡は製作できなかったのである。眼鏡店で販売されていたレンズは視力補正用と拡大用のものだったが、その精度はあまり高くなく、さらには望遠鏡に必要な焦点距離のレンズが入手できなかったのである。例として現在フィレンツェ科学史博物館に残されている20倍の望遠鏡のレンズのデータをみよう。対物レンズ (凸レンズ) の直径は37mm、焦点距離は980mmであり、接眼レンズ (凹レンズ) の直径は22mm、焦点距離は47.5mmである。凸レンズは入手可能ではないかと推測されるが、そのように焦点距離の短い凹レンズは眼鏡屋では扱っておらず、精度のよいものを磨くことも容易ではなかった。ガリレオは望遠鏡の改良のために、どのようにしてレンズを入手したのだろうか。考えられるのは、市中からレンズを集

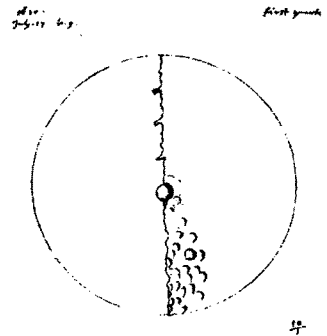


図1 ハリオットによる月のスケッチ

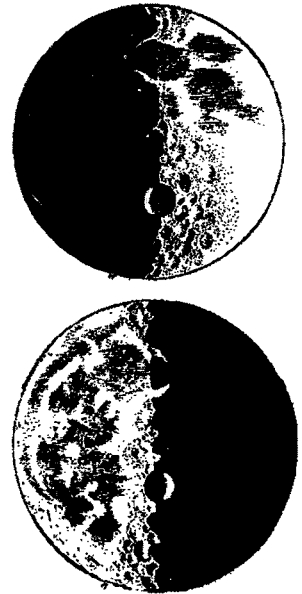


図2 月—「星界の報告」より

めること、レンズ職人に磨き方を指示すること、さらに自らレンズを磨くことである。そのようにして入手した多くのレンズの中から精度のよいものを選び、それを組み合わせて望遠鏡を製作したと思われる。彼の製作した望遠鏡が優れたものであったことは、1610年3月に『星界の報告』が出版された後も、1610年末頃までは、彼が製作した望遠鏡でなければ、彼の観測結果の確認ができなかったこと、また新たな発見が生まれることはなかったことから覗かれる。

3. 望遠鏡のさらなる改良—木星の「月」の発見

倍率20倍の望遠鏡を得たガリレオは、12月初めから集中的に月の観測を行ない、その各相の姿を素描している。それらの観測から、月の明暗部の境界線のなだらかではなくぎざぎざになっていること、輪郭線が太陽の光が当たる角度が変わるにつれて広がったり狭くなったりすること、暗い部分の中に小さな明るい部分が存在することなどを認め、それらから月には山や谷、平地があることを推論したのである。

これらの観測結果に関する最初の報告は1610年1月7日付けの書簡で行なわれ、そこで述べられたことは、木星の衛星を除き『星界の報告』の概要となった。さらにこの書簡では望遠鏡の新たな改良についても触れられている。彼の望遠鏡では、レンズの曲率が一定ではなくむらがあるために、鮮明な像が結ばれにくかった。さらには完全な球面のレンズであっても、通過した光は必ずしも一点に収斂せず、そのために像がぼやけてしまうのである。この現象は収差と呼ばれ、主要なものとして球面収差や色収差がある。そのために月以外の小さな天体では、惑星と恒星の見かけの違いも見出すことは難しかった。彼が望遠鏡に加えた改良は、対物レンズの前に中くらいの穴を明けた厚紙を置いて、レンズの周囲側からの光を遮るということである。こうしてレンズを絞ることによって、見ている対象はくっきりと明瞭になる。というのは、レンズの中心すなわち光軸付近の光線だけを通すことによって、像は暗くなるが収差の影響を抑え、像を鮮明にすることができるのであ

RECENS HABITAE. ²⁵
dentalis proxima min. 2. ab hac vero elongabatur oc-

Ori. * ○ * * Occ.

cidentalior altera min: 10. erant præcisè in eadem re-
cta, & magnitudinis æqualis.

Die quarta hora secunda circa Iouem quatuor sta-
bant Stellæ, orientales duæ, ac duæ occidentales in

Ori. * * ○ * * Occ.

eadem ad vnguem recta linea dispositæ, vt in proxi-
ma figura. Orientalior distabat à sequenti min. 3. hæc
verò à Ioue aberat min. 0. sec. 40. Iuppiter à proxima
occidentali min. 4. hæc ab occidentali min. 6. ma-
gnitudine erant ferè æquales, proximior Ioui reliquis
paulo minor apparebat: Hora autem septima orienta-
les Stellæ distabant tantum min. 0. sec. 30. Iuppiter

Ori. ** ○ * * Occ.

ab orientali viciniore aberat min. 2. ab occidentali ve-
rò sequente min. 4. hæc verò ab occidentali dista-
bat min. 3. erantque æquales omnes, & in eadem recta
secundum Eclipticam extensa.

Die quinta Cælum fuit nubilosum.

Die sexta duæ solummodo apparuerunt Stellæ me-

Ori. * ○ * Occ.

dium

図3 木星とその衛星—「星界の報告」より

る。このことをガリレオは経験的に知ったのだと思われる。

絞りを付けるという改良によって、月以外の小さな天体を詳しく観測することが可能になった。惑星と恒星の区別もその成果であった。しかし最も重要な成果は、木星の「月」すなわち衛星の発見だった。1月7日の書簡では、ガリレオは木星には3つの恒星が寄り添っているとだけ述べ、まだ衛星とは気づいていなかった。それから、彼はほぼ毎日可能な限り木星に寄り添う恒星を観測し、翌週にはそれらが4つであり、木星のそばで、直線上を動いていることに気づいた。そして15日までには、それらが木星の周りをめぐる「月」であるという結論を導いたのだった。この木星の「月」の発見は、コペルニクスの太陽中心説に対する反論への返答となるものだった。その反論によれば、もし地球が惑星であるならば、なぜ地球だけがその周りをめぐる月をもっているのか、もしそうならば宇宙には二つの運動の中心があることになるのではないか、というものだった。もちろん木星が「月」を持っているということは地球の特権性を奪いはしても、太陽が宇宙の中心という地位を占めていることを積極的に支持するものではなく、あくまで反論に対する返答でしかなかった。しかしガリレオにとっては、太陽中心説を推進する大きな一歩と思われたのである。

ガリレオが太陽中心説の決定的な確証ともいうべきものを手に入れたのは、約一年後の1610年12月のことである。彼の弟子だったカステッリが書簡で、太陽中心説が正しければ、金星は月のように満ち欠けを示すのではないかと問うてきたのに対し、ガリレオはそのことを観測によって確認したと返答している。金星が月のようにすべての相を示し、満ちているときには小さく、欠けているときには大きく見えることは地球中心説によっては説明できず、太陽中心説によらなければならならなかった。

4. 『星界の報告』—先取権と検証の問題

ガリレオはこうして短期間の間に多くの重要な発見を行なったが、そのために用いた望遠鏡はけっして彼にしか製作できないものではなかった。すぐにも誰かが同じ発見を行なう可能性があったのであり、ガリレオにとって先取権の確保は最重要課題だった。彼は書物として公表することによって自らの先取権を確保しようとした。望遠鏡による観測結果を報告した『星界の報告』は、1610年の1月から2月にかけて執筆され、早くも3月にはヴェネツィアで出版されている。それは、ガリレオが本格的な天文観測を始めてからまだ半年も経っていなかった。彼はその執筆の間も、平行して木星の観測を続けていたことが観測記録から知られる。

『星界の報告』が非常に短期間で書かれ、その内容もほとんど観測結果の報告であるということは、彼が先取権を確保することにどれだけ躍起となっていたかを示している。彼の懸念は、『星界の報告』が出版された後になって、彼よりも先に木星の衛星を発見していたと主張する者が現われていることからけっして根拠のないものではなかったといえよう。そして『星界の報告』はまた、パトロンを獲得するための切り札という重要な役割を担っていた。彼は1609年秋に、製作した望遠鏡をトスカナ大公コジモ2世 (Cosimo II dei Medici) に送っていたが、さらに望遠鏡による天文学的発見を、大公から庇護を得る好機をもたらすものと考えたのである。彼は1月末には発見を書簡で報告し、さらに2月

には大公の秘書に、木星の「月」の呼び名として「コジモ星」と「メディチ星」のどちらがよいかを尋ねている。木星の衛星にトスカナ大公の名前あるいは家名を付けることによって、彼はトスカナ大公からの庇護を期待したのである。『星界の報告』は550部が印刷されたが、またたく間に売り切れ、その成功は、ガリレオにトスカナ宮廷において「大公付き数学者兼哲学者」という地位をもたらしたのだった。

『星界の報告』で報告された観測結果は画期的なものだったが、望遠鏡という器械を用いることによって初めて得られるものであったがゆえに、その信憑性に対して疑問が投げかけられた。望遠鏡は我々の感覚を拡張し、裸眼では見られなかったものを見えるようにするという最初の科学装置だったが、それが感覚を欺いていないことを保証する科学理論は存在しなかった。ガリレオが観測結果から導き出したものが、天上世界の完全性の否定という当時の伝統的な宇宙像の核心を揺るがすものであったため、望遠鏡の信頼性の問題はガリレオの主張への反論の中心となった。とりわけガリレオの望遠鏡と同じ性能をもつ望遠鏡を当初は誰も入手できなかったことは、彼の観測結果の評価を困難なものにしたのである。

『星界の報告』の出版まで、ガリレオは望遠鏡をトスカナ大公に送る以外誰にも提供することもなかったが、出版後は、観測結果の確証を得るためにも、望遠鏡を他の人に提供する必要に迫られた。彼は『星界の報告』とともに、自らが製作した望遠鏡をヨーロッパの諸侯にトスカナ公国の外交経路を通じて送っている。彼はケプラーらの学者から要請されても望遠鏡を直接送ることはなく、望遠鏡はトスカナ大公から諸侯への贈り物として献上された。学者たちは、宮廷から提供されたガリレオの望遠鏡を利用し、彼の観測結果を検証することになった。1610年末までには望遠鏡の信頼性は認められ、木星の衛星の存在も多くの者が確認している。

5. ガリレオの望遠鏡の限界

『星界の報告』出版以後も、ガリレオは木星の衛星の周期を決定するための観測を継続したほか、1610年末に金星の満ち欠けを発見し、1612年には太陽黒点の観測といった業績を残している。だが、これらを最後にしてガリレオはもう大きな天文学的発見をすることはなかった。その理由として見逃せないのは、彼の望遠鏡の性能では、それ以上のものを発見することはできなかったという点である。実際ガリレオは、土星について不思議な三つ子のような姿をしている述べるにとどまり、それが輪であることには気づかなかった。土星の輪の発見は、ホイヘンスがさらに倍率の高い「ケプラー式望遠鏡」を用いて1656年になしとげている。

ガリレオの望遠鏡は対物凸レンズと接眼凹レンズからなるが、非常に視野が狭く、また暗いという性質を持っていた。より多くの光を集めて明るくするためには口径を大きくする必要があったが、そうするとレンズの歪みと収差のために像が不鮮明にならざるを得なかったのである。また倍率を上げることによって視野はますます狭くなった。ガリレオが『星界の報告』において述べている30倍という倍率が彼の望遠鏡の限界だったといえよう。

ケプラーのように望遠鏡に関する光学な理論をもたず、経験に基づき試行錯誤を経て望遠鏡を改良していったガリレオには、彼の望遠鏡の限界を超えるような理論的な革新は無

理だった。ケプラーの考案した望遠鏡、対物凸レンズと接眼凸レンズからなる「ケプラー式望遠鏡」は、「ガリレオ式望遠鏡」よりも視野が広く、より大きな倍率が可能だったのである。しかし倒立像を与えることの他、焦点を合わせるのが難しいこと、接眼レンズが対物レンズの歪みを増幅し、観察対象の周囲に色の付いた縁取りを生じさせることといった欠点があったために、最初は「ガリレオ式望遠鏡」が好まれた。しかしレンズの研磨技術が改善され、より性能の高いレンズが入手できるようになると評価が一転し、1630年代には「ケプラー式望遠鏡」がその座を取って代わっていくのである。

ガリレオの望遠鏡による天体観測を可能にしたのは、彼において学問的な関心と技術的な能力がうまく結びついていたことだった。どちらを欠いても、彼の発見は成し遂げることではできなかつたらう。彼はたしかにケプラーのような光学の理論家ではなかったが、経験的な探求に基づき、実際に器械を製作する技量を備えていた。彼の望遠鏡の改良は試行錯誤に基づくものであったかもしれないが、偶然を見逃さない態度は、望遠鏡の改良とそれに基づく観測方法の改善にも現われていた。ガリレオは、レオナルドに代表されるルネサンスの技術者の伝統を受け継いだ数理工学者と呼ぶことができよう。

(京都大学文学研究科教授)

<参考文献>

☆研究書

伊藤和行「ガリレオ」、『哲学の歴史4：ルネサンス』所収、中央公論新社、2007。

マクラクラン『ガリレオ・ガリレイ—宗教と科学のはざままで—』、野本陽代訳、大月書店、2007。

青木靖三『ガリレオ・ガリレイ』、岩波新書、1965。

田中一郎『ガリレオ—庇護者たちの網のなかで』、中公新書、1995。

ドレイク『ガリレオの生涯』、田中一郎訳、共立出版、1984。

Il telescopio di Galileo. Lo strumento che ha cambiato il mondo, a cura di G. Strano, Giunti, 2008. (英語版：Galileo's Telescope. The instrument that changed the world, Giunti, 2008.)

Galileo. Immagini dell'universo dall'antichità al telescopio, a cura di P. Galluzzi, Giunti, 2009. (英語版：Galileo. Images of the universe from antiquity to the telescope)

☆テキスト・翻訳

『星界の報告 他一編』、山田・谷共訳、岩波文庫、1976。

Sidereus nuncius. Test originale a fronte, a cura di M. Battistini, e tradotto da M. Timpanaro Cardini, Marsilio, 2001.

Sidereus Nuncius or The Sidereal Messenger, tr. by A. Van Helden, Univ. of Chicago Pr., 1989.

Opere, a cura di F. Brunetti, 2 voll., UTET (collana classici del pensiero), 2005.