

連載

望遠鏡 400 年【1】

望遠鏡の発明とガリレオの初めての天体観測

秋山 晋一（株：オプトワークス アキヤマ）

はじめに

ガリレオ・ガリレ
(1564–1642 : 図 1)
育った故郷フィレン
ェの科学史研究博物
には、ガリレオ自身
製作した 2 つの望
鏡と数々の有名な天
の発見に用いた対物
レンズが保存されてい
ず (図 2)。



図 1

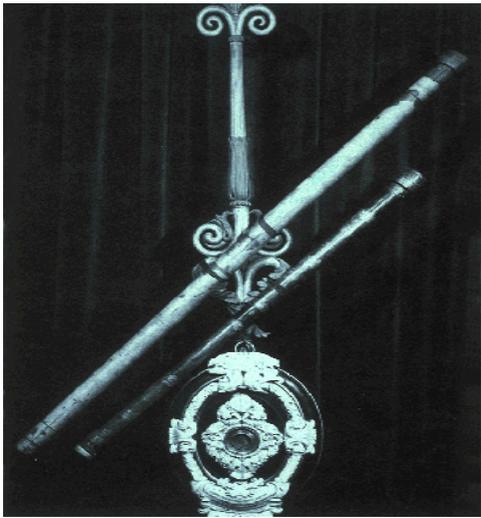


図 2 ガリレオ製作の 14 倍 (上) 20 倍
(下) 望遠鏡と対物レンズ

ガリレオはこれらの望遠鏡で人類初といえる本格的な天体観測を行い、その記録を 1610 年『星界の報告』に著して発表しました。筆者はガリレオが製作した望遠鏡を復元し、ガリレオが見た天体を実際に観察したので、ガリレオの最初の天体観測を具体的に紹介し、彼の宇宙観の芽生えや功績を辿ってみます。

1. オランダの眼鏡師が望遠鏡を発明

1608 年、オランダ・ミデルブルグの眼鏡製作者リッパージェイが望遠鏡の特許を申請したことが、望遠鏡の発明といわれています。当時の眼鏡師は、レンズ研磨を行い枠入れすることが主な仕事だったので、レンズの製作は容易でした。リッパージェイの発明については次のような逸話があります。

ある日、リッパージェイは初めて訪れた客から数多くの度数の凸レンズと凹レンズの注文を受けました。しばらく経って完成した注文品を受け取りに来た客は、出来上がったレンズの中から一対の凹凸レンズを手に取り、2 枚を組み合わせて戸外を眺めてから代金を払い立ち去りました。不思議に思ったリッパージェイは、自分でもレンズを組み合わせて覗いてみると、拡大した景色が見えるではありませんか。さっそく多くのレンズを組み合わせては、苦心してさらに良く見えるようにしたのです。この話の真偽は定かではありません。

さて、リッパージェイは望遠鏡の特許を政府に申請したのですが、半月後には他にも望遠鏡の特許を申請する者が現れました。特許について政府の見解は、「望遠鏡は 2 枚のレンズに筒という単純な構造のため、簡単に真似ることが出来る」という理由で、リッパージェイだけでなく誰にも望遠鏡発明の特許は与えられませんでした。

一方、望遠鏡はイギリスで 16 世紀に発明されたという説もありますが、望遠鏡自体は無論のこと、それを証明する物も現存していません。また、1600 年前後には他にも幾つかの望遠鏡の発明説はありましたが、いずれ

も十分な信憑性に乏しいものでした。リッパージェイ発明の根拠は、保存されていた政府への特許申請の記録が決め手でした[4] [7] [8] [10]。

2. ガリレオの望遠鏡製作とイタリアのガラス工業

オランダで望遠鏡が発明されたという噂は、たちまちヨーロッパ各地へ広がりました。そのうえ、2枚のレンズに筒だけでするので簡単に製作できたのです。早くも1609年の夏には、パリで3~4倍の小型望遠鏡が売り出され、すぐにイタリア各地にも出回り始めました。

当時ガリレオはパドゥバ大学の数学科教授でしたが、地元ヴェニスの中世ヨーロッパ随一のガラス生産地であり、レンズの材料になるガラス素材は非常に品質が優れていました。また、フィレンツェも良質のガラスの生産地で、後にガリレオはフィレンツェからガラス材を取り寄せて研磨しました[13]。

ところで、接眼レンズに使う凹レンズの発明は、凸レンズに比べかなり遅かったのです。

16世紀初、後にローマ教皇になったレオ10世（フィレンツェ・メディッチ



図3 レオ10世

家出身で浪費家で有名でした)は、狩猟に使う眼鏡を作りました。近視の単眼鏡(モノキュール)を持つレオ10世の肖像画が、ラファエロによって描かれました(図3

<http://www.artchive.com/artchive/R/raphael/popeleox.jpg.html>) [5]。このように16世紀初頭に、ようやく近視に使う凹レンズが実

用化になったのです。ヨーロッパ随一であるイタリアのガラス工業と凹レンズの発達のおかげで、ガリレオは望遠鏡の製作を容易に取りかかることができ、数ヶ月で当代一の精度を誇る望遠鏡を作り上げたのです。

さて、1609年の夏、望遠鏡のうわさを聞いたガリレオは、さっそく眼鏡屋で凸レンズと凹レンズを買い求めて3倍の小型望遠鏡を作りました。注目すべきは「望遠鏡の倍率は、2枚のレンズの焦点距離の比である」という光学的構造をガリレオが明らかにしたことです。そして、ガリレオはさらに高倍率を求めて新たな望遠鏡の製作に取りかかったのですが、高倍率への挑戦は思いのほか困難でした。

3. ガリレオが製作した望遠鏡

3.1. 望遠鏡の復元—難しかったレンズ研磨—

図2はフィレンツェ科学史研究博物館に保存されている望遠鏡の有名な写真です。上の長い筒は14倍望遠鏡、下は20倍望遠鏡で、いずれも飾り台に紐で吊られています。望遠鏡の下にあるのは、象牙の枠に収められた「割れた対物レンズ」です。この対物レンズの望遠鏡でガリレオは多くの発見を行ったので、その記念にスポンサーであったフィレンツェのメディッチ家が保存してきました[4]。1990年代には、イタリア国立光学研究所で14倍と20倍望遠鏡の光学スペックが測定されました。表1は14倍望遠鏡の主なデータです[7]。

表1 ガリレオ14倍望遠鏡の光学系の主なデータ [7]

	焦点距離	外径	有効径	屈折率
対物	1330	51	26	1.5284
接眼	-94.0	26	11	1.5156

2001年に筆者はその光学データを元に近似スペックでレンズを製作し、望遠鏡を復元

しました。図4の左が復元14倍望遠鏡で、今回の観測に使用しました。この対物レンズはレンズカーブが非常に浅く（フラットに近い）、そのうえ中心厚が僅か2.5mmと薄いために研磨し難いレンズでした。実際の製作は、まず始めに眼鏡レンズ工場に対物・接眼レンズともベテランのレンズ技術者が機械研磨しました。



図4 復元した14倍望遠鏡（左）と20倍望遠鏡（右）、中央は20倍望遠鏡を製作した横尾武夫氏

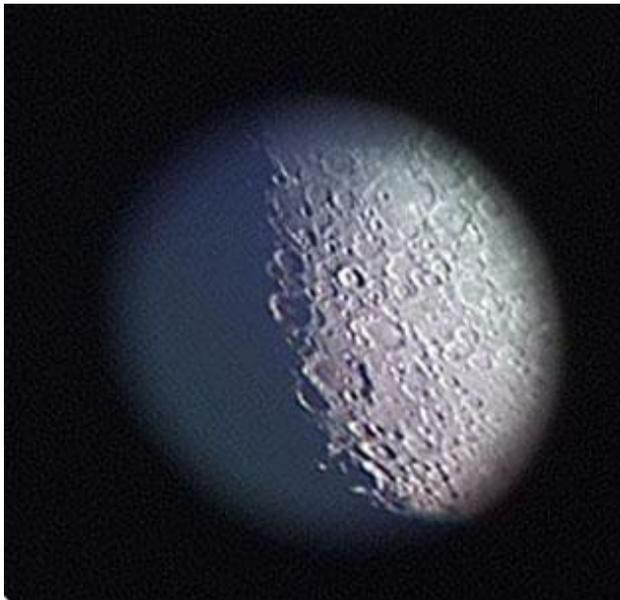


図5 月面写真 修正研磨による対物レンズ使用 [3]

当初、この対物レンズで月面を撮影しましたが、クレーターが良く見えませんでした。

その後、この機械研磨の対物レンズを反射鏡研磨の熟練者が、フーコーテストを行いながら手磨きで修正研磨しました。修正された対物レンズで撮影した月面画像では、図5のように小さなクレーターまで見事に確認できました[2] [3]。

一方、接眼鏡の凹レンズは焦点距離が94mmで、近視眼鏡レンズとしては非常に強い度数です。レンズカーブが強いために当時は製作が難しく、ガリレオは研磨皿に小さい球を使いました。高い倍率を得るために、高精度の長焦点の対物凸レンズと短焦点凹レンズの難しい研磨をガリレオは行いました。研磨技術は数を重ねれば上達するのですが、問題はガラス素材でした。その当時の世界一のガラスといえども、現代の物に比べれば不均一で脈理などもあったので「望遠鏡作りの問題点は、良質のガラス素材の入手が難しいことだ。」とガリレオは記しています[13]。

ガリレオによれば、「100台ほど製作した中で、木星衛星の確認に役立った望遠鏡はわずか10台であった」と苦労を述べています。400年前は光学検査の方法も無かったため、研磨したレンズを1枚ずつ望遠鏡に組み込み、覗いては光学性能を調べるという大変根気がいる仕事でした。しかし、ガリレオが100台もの望遠鏡をわずか3ヶ月で製作したことは、驚異的としか言えません[13]。

3.2. きわめて狭い望遠鏡の視界

ガリレオ式望遠鏡の視界は、対物レンズの口径と焦点距離、そして倍率で決まります。復元した14倍望遠鏡の視界は、わずか8分角でした。ガリレオ式望遠鏡は、アイポイントをずらして視野の端を覗くと中心視野より外が見えるのですが、それでも僅か15分ほどの視界しかありません。このような小口径・長焦点で、しかも極端に狭い視界では実用的ではありません。このためガリレオ式望

遠鏡は衰退し、倒立像を我慢しても視界が広く高倍率のケプラー式望遠鏡が発達していったのです。現代では、ガリレオ式は殆どが低倍率のオペラグラスにしか使われていません。ガリレオは望遠鏡の操作について、次のように述べました。「動脈の振動や呼吸から望遠鏡の揺れを避けるため、しっかりした場所に筒を固定すると良いでしょう」。当時は微動装置もない架台だったので、狭い視野の望遠鏡の操作は大変な作業でした。復元 14 倍望遠鏡は、現代の微動の付いた赤道儀に載せましたが、「ひょっとすると、ガリレオは操作には助手を付けていたのかも?」、私は 130 cm ある鏡筒の操作をしながら、ガリレオが苦勞した観測に思いを馳せました[1] [2] [3] [13]。

4. ガリレオの天体発見

『星界の報告』において、ガリレオは「重要な 3 つの発見を行った。」と述べています。新しい発見は、それまで科学者が信じてきたことを覆したのです。

4. 1. 1 番目の発見—月には地球と同じように山や谷があった—

望遠鏡で月面を見たガリレオは「地球と同じように月にも山や谷がある。」と表現しました。その当時、天体と地球はエーテルという大気で仕切られており、月は滑らかな球体であると考えられていました。望遠鏡での観測により「月も地球と同じような地形をもつ天体である」という、重要な概念がガリレオに生まれたのです。

次に、ガリレオは月の欠けぎわを望遠鏡でよく観察しました。影の部分に輝く小さな点がいくつも見え、時間とともに大きな輝きとなり、2~3 時間後には太陽光に包まれました。このことを地球に当てはめ、「日の出前に平野はまだ薄暗いのに、高い山の頂上は陽

光を浴び、やがて山々の中腹へ、そして麓まで光に包まれ、太陽が高くなると平野も照らすことと同じではないか。」とガリレオは考えたのです。さらに、月の直径を地球の 7 分の 2 と考えたガリレオは、幾何学的に月の山の高さを計算しました[6] [9]。

月面の観測記録から、ガリレオが使用した望遠鏡は、図 5 のように、小さなクレーターまで確認できる高い分解能を持っていたと推察できます[3]。

4. 2. 2 番目の発見—天の川や星団は星の密集であった—

当時、「天の川の存在は何なのか」という議論が行われていました。ガリレオが望遠鏡で見ると、天の川は肉眼では見えない多数の星の密集であることを発見しました。また、当時は星雲と呼ばれていたプレセペやプレアデスなども（当時は散開星団などを星雲と呼んでいた）、数十個の星の集まりであることも発見したのです。

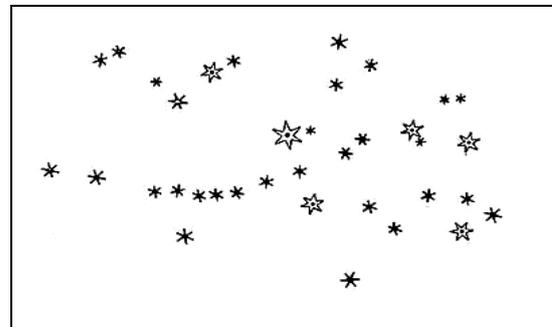


図 6 ガリレイが描いたプレアデスのスケッチ [6]

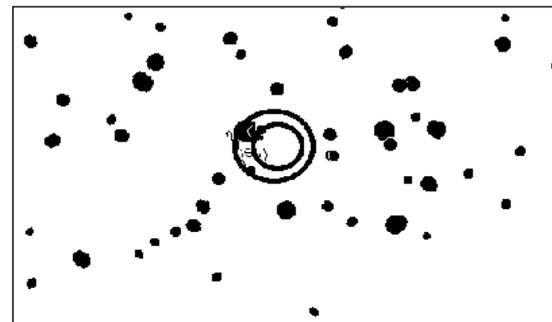


図 7 プレアデスの星図と 14 倍望遠鏡の視野円

図 6 は、ガリレオが描いたプレアデスのスケッチです。図 7 はプレアデスの星図で、中央に描いた内側の円は 14 倍望遠鏡の 8 分角の視界で、外円は眼をずらして見える 15 分角の視界です。スケッチを星図と比べてみると、星の位置が相対的にややずれています。望遠鏡の視界が大変狭いために、視野を僅かずつ移動しながら日周運動の追尾も行わねばなりません。このため方位や距離角を正確に描くことは、難しい作業だったのです。ガリレオは他にも、オリオンの三ツ星～大星雲付近やプレセペなどのスケッチを残しています[6]。

4. 3. 3 番目の発見—木星衛星—

『星界の報告』には、ガリレオの木星衛星の発見と位置観測が克明に記されています。ガリレオの描いた衛星の位置をパソコンで再現しましたが、いずれも図 8 (末尾) のように正確に記録されていました[6]。

1610 年 1 月 7 日、日没後に東の空から昇ってきた木星へ、ガリレオは初めて望遠鏡を向けました。望遠鏡の狭い視野には、木星の東に 2 個、西に 1 個の星が見えており、いずれも黄道に沿って並んでいました。実は、木星のすぐ東にある星は 1 つではなく、イオとエウロパが数秒以内に接近していたのです。しかし、わずか口径 3 センチ程度で単レンズの望遠鏡では、分離せずに 1 つに見えていました。望遠鏡の分解能の参考に、復元した 14 倍望遠鏡で撮影した木星と衛星の写真が図 9 にあります。木星の右にあるイオは、木星本体に非常に接近しており、写真のようにイオの存在がぎりぎり確認できました[3]。

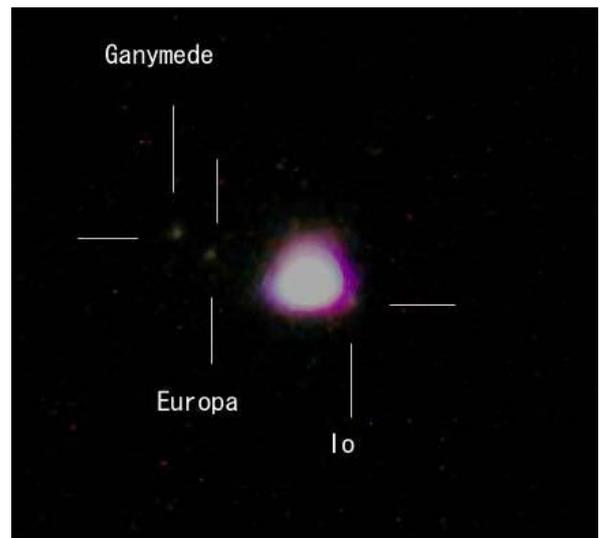


図 9 木星と衛星 復元 14 倍望遠鏡で撮影 [3]

翌、1 月 8 日、再び望遠鏡を木星に向けると、昨日見えていた星の位置が全く変わっており、黄道に沿ってはいましたが、星は木星の西に 3 個見えました。図 8 の左側はパソコンで再現した当時の衛星位置ですが、右側のガリレオの記録は大変正確であったことが分かります。大変な驚きと興味を持ったガリレオは、この後、3 月まで木星の観測を続けて、最外部を回る衛星の周期を半月と求めたのでした (実際は 16.69 日)。図 10 は、現存するガリレオ自筆の木星と衛星のスケッチです[13]。

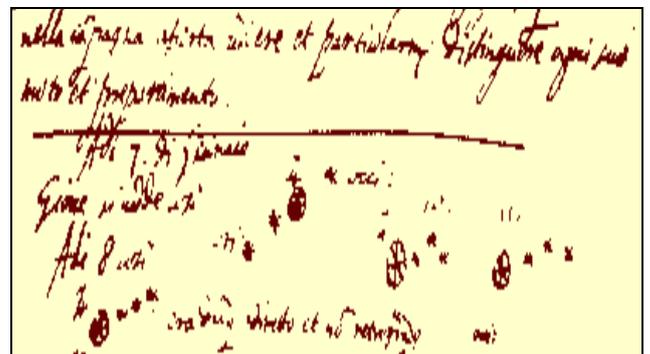


図 10 ガリレオ自筆の木星衛星の観測記録 [13]

月が地球の周りを回っているのと同様に、4 つの衛星は木星を中心に回っている。その木星は太陽を中心に 12 年で回っている。4 つの衛星の観測から、新たな宇宙の体系がガリレオに生まれ始めたのでした[3] [9]。

5. ガリレオの功績

ガリレオはコペルニクス以来の宇宙観を観測によって体系づけ、また物理学の多くの分野で活躍しました。以下では発明後間もない望遠鏡で天体観測を行ったガリレオの功績についてまとめてみました。

第一の功績は、望遠鏡をガリレオ自身の光学理論に基づいて製作し、天体観測に耐えうる精度の高い近代科学器械にした点です。発明されて間もない望遠鏡はヨーロッパ各地に広がりましたが、その多くは玩具や遊具程度の扱いで低い性能でした。ガリレオが良い望遠鏡を作れた要因は、先述のイタリアのガラス工業力だけではありません。ガリレオは当時としては珍しく、助手に職人を雇って自ら実験器具を作ったり、軍事用の計算尺も製作販売していたので、理論的に器械の完成度を高める経験が十分あったことも見逃せません[9]。

次の功績は、観測データを取り整約計算や研究考察するという近代科学の手法をいち早く実践したことです。当時の大学では物理学は哲学の一部で、力学をはじめ事象を解析することは殆ど無く、実験や観察とはかけ離れた存在でした。ガリレオが初めて行った天体観測は、観測・発見・測定・整約・解析という、近代の天体観測の始祖と言えます。

3 つ目の功績は、天体発見の結果をいち早く出版して発表したことです。ガリレオ著『星界の報告』は 550 部印刷されましたが、たちまち売り切れしました。ガリレオの発見は、それまでの天体の概念を大きく変えたので、ヨーロッパの天文学者に大きな反響を呼び、

一躍ガリレオは有名になりました。ガリレオの発見は賛否を巻き起こし、彼の望遠鏡と観測への疑念もありましたが、大きな影響を与えたケプラーから賛同を得ました。現在では、新たな科学発見はメディア発表などが行われますが、まさにガリレオは先駆けだったので[11] [12]。

また、ガリレオが望遠鏡の発明の話を聞いてから、望遠鏡の製作・天体発見・出版まで、ここで紹介した一連の仕事がわずか半年の間で迅速に行われたことも高く評価されます。このあと、ドイツの天文学者マリウスと木星衛星の発見の栄誉はどちらかという論争になりましたが、天体観測への望遠鏡の効用をいち早く察知していたガリレオは、ライバルの出現を予期していたのかもしれない。いつの時代も、発見や発明の競争は早さが勝負になります[13]。

最後に、復元望遠鏡で撮影した土星の画像(図 11)とガリレオのスケッチ(図 12)を紹介します。復元 14 倍望遠鏡でもガリレオのスケッチの通り、輪は見えず紡錘形をしており、きわめて僅かですが輪と本体の隙間が感じられました(印刷では分からないでしょう)。



図 11 土星 復元 14 倍望遠鏡で撮影。輪は本体に付いて紡錘形に見える [3]

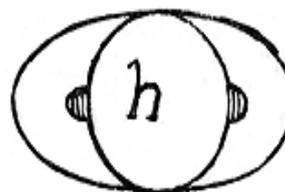


図 12 土星のスケッチ ガリレオ画 [9]

参考文献

- [1] 秋山晋一・横尾武夫・今井陽子
2002 春季天文学会ポスター発表
ガリレオ・ガリレイ望遠鏡の光学系の復元
と彼の天体観測を再現
- [2] 秋山晋一 ガリレオ・ガリレイの望遠鏡
の再現と木星衛星観測
天文教育普及研究会・2001 集録 p.99-
104
- [3] 秋山晋一 ガリレオ・ガリレイの望遠鏡
の復元とその観測を再現 続編
天文教育普及研究会・2002 集録 62-66
- [4] Alvert Van Helden Catalogue of
early telescopes 6-8,30-33
1999 INSITUTO E MUSEO DI STORIA
DELLA SCINZA ,Firenze
- [5] B.Michael Anderessen Brillen 13-16
1998 Arnoldshe Art Publisher
- [6] ガリレオ・ガリレイ 『星界の報告』
14,19-20,29-31,38-41,42-43
1976 岩波文庫
- [7] 吉田正太郎 『望遠鏡発達史(上)』
32-39,47 1994 誠文堂新光社
- [8] 吉田正太郎 『アマチュアのための望
遠鏡光学・屈折編』 3-6
1989 誠文堂新光社
- [9] 豊田利幸 『ガリレオ』 55-56,82-83,
523 1979 中央公論社
- [10] 広瀬秀雄 『望遠鏡』 10-13
1975 中央公論社
- [11] M、サジェット 『ガリレオと近代科
学の誕生』 1993 玉川大学出版
- [12] リチャード パネク 『望遠鏡が宇宙を
変えた』 2001 東京書籍
- [13] スティルマンドレイク 『ガリレオの
生涯 2・木星の衛星と太陽黒点』
183,188,191-193,196 1985 共立出版

秋山 晋一

