

# 世界天文年 ガリレオの望遠鏡 精密復元プロジェクト

秋 山 晋 一

〈(株)オプトワークスアキヤマ 〒591-8021 堺市北区新金岡町 3-4-8〉  
e-mail akiyama@sportsglasses.jp

清 水 浩 次・西 田 省 三

〈(株)京都科学 〒612-8388 京都市伏見区北寝小屋町 15〉

井 上 毅

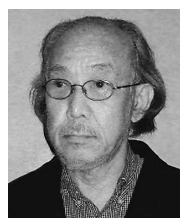
〈世界天文年日本委員会企画委員 明石市立天文科学館  
〒637-0877 明石市人丸 2-6〉  
e-mail inoue@star.nifty.jp



秋山



清水



西田



井上

イタリア・フィレンツェの科学史研究博物館にはガリレオが製作した 14 倍・20 倍の 2 本の望遠鏡が所蔵されている。世界天文年 2009 日本委員会では、国内主催企画として二つの望遠鏡をできるだけ精密に復元製作を行った。本企画の目的は、国内の科学館・博物館や天文台などにおいてガリレオの復元望遠鏡を世界天文年でメイン展示とすること、さらに 14 倍望遠鏡では光学系の復元も行い、観望会で多くの人に 400 年前のガリレオの発見や観測を追体験してもらうことを目指した。14 倍・20 倍の復元望遠鏡はそれぞれ 30 本製作した。(14 倍は希望が多くさらに 6 本追加製作した。)

## はじめに

400 年前のガリレオによる「望遠鏡作り」は、ガリレオが科学の変革を成し遂げた足跡をたどるうえで重要な意味をもつ。

17 世紀初頭、発明されて間もない望遠鏡はヨーロッパ各地へ急速に広がったが、そのほとんどは倍率が低いうえに性能が悪いため玩具程度の扱いであった。望遠鏡の製作はガリレオにとって未知の分野であったが、自身の光学理論に基づいて望遠鏡を試作し技術力を高めながら改良を行った。当時の学者としては珍しく、ガリレオは望遠鏡の製作以前にも物理の実験道具の製作や主に軍用の計算尺の製作販売を行っており、その経験も望遠

鏡製作に影響を与えたと思われる。こうしてガリレオは着手から数カ月という短期間で、望遠鏡を天体観測に耐えうる精度の高い近代科学器械に仕上げた。

われわれは実際の復元作業を通して、ガリレオが「望遠鏡作り」に注いだ技術向上の努力や創意工夫の幾つかを知ることができた。またガリレオが成し得た手作業による「望遠鏡作り」の高い技術を、当時と同じ手法で再現することは現代でも容易でないことがよくわかった。ガリレオの科学技術の知恵に触れたことは大きな意味をもつ。こういった点についても望遠鏡の仕様とともに紹介したい。

## 1. 復元製作プロジェクトチームについて

世界天文年日本委員会企画委員の井上は、2007年6月に同委員会の国内主催企画として「ガリレオ望遠鏡精密復元」を立案した。そして本企画における望遠鏡製作者の選定から広報活動や頒布販売の計画など、広範囲にわたって運営を行った。

鏡筒の製作は文化財や歴史遺産の複製や修復などで著名な(株)京都科学(京都市)が行った。同社はこの分野では長年にわたり実績をもつ本邦でも有数の企業で、同社の清水・西田が担当した。

14倍望遠鏡の光学系の調査・復元は、その製作経験があり研究を行った秋山が担当した。2002年から天文学会年会や天文教育普及研究会にて、ガリレオの望遠鏡と観測記録の検証を発表した。

レンズの製作は菊池光学精工(株)(大阪府堺市)が行った。同社は主に大手メーカーの工業用/生物顕微鏡・測定器機・半導体関連・眼科医療機器などの光学系を生産し、レンズの製作に長年の実績をもつ。

復元望遠鏡の販売は(株)アストロアーツにより行われた。

これまでガリレオの望遠鏡を精密に復元する取り組み例は少なく、また14倍・20倍望遠鏡をそれぞれ30本という量産は前例がないため、われわれは詳細な資料や製作方法、望遠鏡の仕様などを調査し、問題点も検討して製作に取り組んだ。

## 2. 14倍望遠鏡の復元

図1上の長い鏡筒は復元製作した倍率14倍の望遠鏡である。実物の鏡筒および光学系の特徴と、復元製作について述べる。

### 2.1 14倍望遠鏡 鏡筒の特徴

性能は倍率14倍、対物レンズは有効径26mm、焦点距離1,330mmで、ガリレオがパドヴァにいた1609-1610年頃に製作したと言われている<sup>1)</sup>。

実物の長い鏡筒部分は木製で、その構造は半円



図1 復元したガリレオの望遠鏡。  
(上) 14倍望遠鏡。(下) 20倍望遠鏡。

表1 14倍望遠鏡 光学スペック(単位mm)

	対物レンズ両凸	接眼レンズ平凹
焦点距離	1,330	-94
外径	51(有効径26)	26(有効径11)
中心厚	2.5	3.0
曲率半径 第1面	950	∞(平面)
曲率半径 第2面	2,700	48.5

筒を二つ合わせて円筒を作っている。半円筒は木材の削り出しによって作られており、熟練の技術と根気の要る仕事で現代でも製作は容易ではない。二つの半円筒を合わせて作られた円筒に、上から紙を巻いてできている。さらに鏡筒の数カ所を針金で縛って補強している。鏡筒部分の直径は対物側が50mm、接眼側が40mm、このようにわずかにテーパが付いた鏡筒部分の形状だが、テーパは均一ではない。また対物枠・接眼枠とも木製で、引き出してピントを合わせる。

この鏡筒の特筆すべき構造は、表1で「有効径」とあるように、対物・接眼レンズにそれぞれ「絞り」を設けている<sup>1),2)</sup>。単レンズは色収差や球面収差が大きいため、かなり絞らないと実用にならないことは現代ではよく知られている。ガリレオは望遠鏡の発明を1609年7月に知り、製作を始めてから僅か半年ほど経った1610年1月までに

は、レンズの「絞り」を考案したことにたいへん驚く。対物レンズの「絞り」の有効性については、1610年1月7日付（木星衛星発見当日！）の書簡でガリレオは記している。それでは、どうしてレンズの「絞り」を考案したのか？ この疑問については次の推論がある。実はガリレオは若い頃からの眼病のため、明るい光を見るとその周りに光芒（ハロー）が出た。このような疾患では、眼を細めたり狭い隙間を通して見ると光芒は軽減されることが多い。ガリレオは自身の体験から「絞り」による像の改善を考案した可能性が十分考えられる<sup>3)</sup>。

## 2.2 14倍望遠鏡 鏡筒の復元製作

図1上の復元した14倍望遠鏡は、各部品をはじめ鏡筒部分のテーパ形状や古色塗装の仕上げまで、すべて1本ずつ手作りで製作した。実物の鏡筒部分では先述のとおり、半円筒の部材は木材の削り出しという非常に手間のかかる製法であった。この製法では時間と費用はかかるが単品程度の復元製作は可能である。しかし今回は短期間で30本の量産のため、鏡筒本体のコアには樹脂製パイプを用い、鏡筒形状はコーティングを施してテーパなどの成形を行った。小さな部品ではレンズの「絞り」、対物・接眼レンズを枠に止める金属製リングや鏡筒を補強する針金なども実物と同様に製作した。

## 2.3 14倍望遠鏡 光学系の特徴

ガリレオ式は正立像であるが、14倍望遠鏡は長焦点と高倍率（ガリレオ式としては）のため、視野が十数分と極端に狭くたいへん使いにくい。ガリレオの著書「星界の報告」に記した自身の月面のスケッチ、プレアデスやオリオン座中心部など広い星野の観測にたいへん苦心したことである<sup>4), 5)</sup>。

ガリレオが作った望遠鏡の光学性能について紹介する。図2は復元した試作レンズで2008年4月に撮影した土星だが、輪の傾きは小さくガリレオが最初に土星を見た1610年頃と同程度である。

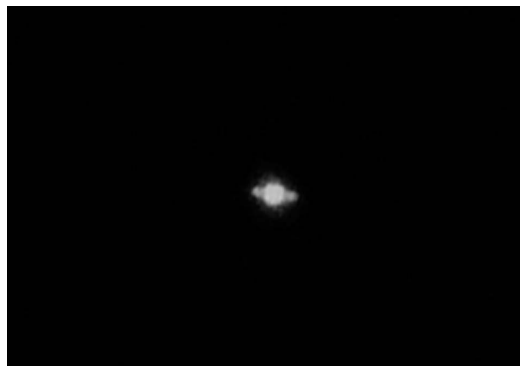


図2 試作14倍復元望遠鏡で撮影した土星。ガリレオの1610年頃のスケッチでは、輪の傾きが画像のように小さかったため、輪を土星本体に近接した2つの星と描いていた。<sup>7)</sup>

ガリレオはスケッチで、輪を画像のように土星本体に近接した二つの星と描いた。<sup>4)</sup> この画像とスケッチより、ガリレオが作った望遠鏡は現代でも実用に耐えるものと考えられる。ただしガリレオの土星スケッチは14倍望遠鏡を用いたことを特定する資料はない。

対物レンズは表1のように両凸レンズで、その特徴は両面ともレンズカーブが非常に浅く（曲率半径が大きい）外観は平面に近い。レンズの研磨精度は、強いカーブに比べ、この対物レンズのように平面に近づくほど格段に難しくなる。復元レンズを製作した菊池光学精工(株)からは、「この対物レンズは両面ともに曲率半径が大きいため、芯出し（光学中心を決める）作業は、現代の技術でもかなりの精度が必要である。400年前の光学検査のない時代に、このような高い精度の研磨が手作業で行われていたことは驚異的である。」との感想を聞いた。ガリレオは1609年12月からわずか3カ月間ほどで100以上の望遠鏡を試作したが、木星衛星の観測に使えた物は10台ほどであったとの記述からも、レンズ研磨の難しさが伺える。<sup>4)</sup> 事実17世紀の頃、ガリレオの製作した望遠鏡はヨーロッパでトップクラスの性能だった。この時代、ガリレオの死後も高性能の望遠鏡製作者は少なかったようである<sup>1), 3)</sup>。

一方の接眼レンズは焦点距離 $-94\text{ mm}$ で、第2面が強いカーブの平凹レンズである。当時の凹レンズの需要は主に眼鏡用と思われるが、近視のレンズでは $-10.5\text{ D}$ （ディオプリー）というかなり強い度数に相当し、該当度数の人は現代でも少数である。当時はこのような強いカーブの研磨皿の入手は難しかった模様で、ガリレオは研磨皿の代わりに小さい球を用いた<sup>3)</sup>。

ガラス素材の入手にもガリレオは苦労した。ガリレオがいたパドヴァのあるベネチア共和国は、ヨーロッパのガラス生産の中心で、入手は容易だったと思われる。しかし優秀なベネチア製といえども当時のガラスは脈理が多く不均一な上に気泡や異物が混入し、望遠鏡のレンズには不適な物が多かった。そこでフィレンツェで生産していたガラスも用いた<sup>4)</sup>。

#### 2.4 14倍望遠鏡 光学系の復元製作

復元製作したレンズは表1に近似したスペックだが、実物の対物レンズは中心厚 $2.5\text{ mm}$ とかなり薄く衝撃に弱い。復元した対物レンズでは中心厚を実物より $1\text{ mm}$ 厚く、 $3.5\text{ mm}$ として強度と耐久性を高めて安全面に配慮した。ガラス素材には、鉛やヒ素などを含まないエコガラスを使用した。

復元した光学系を実際に使用してみると、対物レンズは単レンズにもかかわらず、F50という長い焦点比に助けられ色収差などによる支障は実用上少ない。しかしピント幅（合焦幅）は約 $20\text{ mm}$ もある。これは対物レンズのF50という大きな焦点比により、焦点深度が長いと考えられる。

さらに色収差による波長別の焦点距離の違いも調べてみた。色の異なる恒星や月を実視観測し、各々のピント位置を測定した。しかし前述の焦点深度の長さが影響して、波長（色）による正確な焦点距離の違いは認められなかった。なお復元した対物レンズでは波長の違いによる焦点距離の差は、計算値では、赤（c線）と紫（g線）の間で約 $34\text{ mm}$ ある。

### 3. 20倍望遠鏡の復元

図1下の短い鏡筒は復元した20倍望遠鏡で、こちらは展示専用には製作した。このためレンズはなく、鏡筒の特徴と復元製作について述べる。

#### 3.1 20倍望遠鏡 鏡筒の特徴

ガリレオの支援者であった、フィレンツェ・メディッチ家のトスカナー大公コジモ2世へ献上したもので、ガリレオが1610年頃に製作したと言われている<sup>4)</sup>。

実物の鏡筒部分はやはり木製であるが、その製法は14倍望遠鏡と全く異なる。多くの細長い木材を樽や桶のように合わせて円筒を作り、外側に紙を貼っている。さらにその上から革で被って仕上げている。そして対物部から接眼部まで鏡筒全体に金による華麗な装飾を描き、トスカナー大公への献上品として相応しい美術工芸品の価値をもつ。なお、この鏡筒部分もわずかにテーパーが付いている（鏡筒直径：対物側 $45\text{ mm}$  接眼側 $38\text{ mm}$ ）。また、対物枠・接眼枠は木製である。

実物の20倍望遠鏡ではオリジナルの接眼レンズが18世紀末までに紛失した。現在付いている接眼レンズは早くとも1800年頃のものと思われる<sup>5)</sup>。

#### 3.2 20倍望遠鏡 鏡筒の復元製作

図1下の復元した20倍望遠鏡では、革による鏡筒の外装には合成皮革を用い、金の細密な装飾も再現した。図3は復元した望遠鏡の対物部で、対物レンズの周りには星型モチーフの金の装飾が描かれている。また図4は接眼部で、先端の淡く見える模様はマール紙による装飾である。

このマール紙、鏡筒に使われた革製品、そして装飾に用いた金細工の三つは、フィレンツェ伝統の名産品として世界的に有名である。これら3大名産品を使用した望遠鏡こそ、フィレンツェの名門メディッチ家への献上品としての象徴であり、ガリレオがいかにメディッチ家へ心遣いをしたかを偲ぶことができる。



図3 復元した20倍望遠鏡の対物部分。対物レンズの周囲には星型モチーフの金の装飾が施されている。<sup>5)</sup>



図4 復元した20倍望遠鏡の接眼部。先端はマール紙で飾っている。ガリレオが鏡筒装飾に使った、革製品、金細工、マール紙、これらはフィレンツェ伝統の名産品である。



図5 製作中の20倍望遠鏡。世界天文年事務局・小野智子さん（左）に鏡筒製作を説明する京都科学の西田省三さん。

この綿密な調査・復元製作は京都科学の清水・西田によって行われたが、これまで国内での前例はないようである（図5）。

この望遠鏡も30本の量産のため、14倍望遠鏡と同様の方法により鏡筒部分を製作し形状を成形した。なお、この復元望遠鏡は展示専用のため、レンズの代わりにアクリル製平面を装着している。

#### 4. 復元製作の苦心

通常、文化財の模造製作においては、実物の調査や測定を行ってから製作になるのだが、今回は実物を見ることができないという制約の中での作業であった。所蔵館の図録をはじめ、海外でのガリレオ望遠鏡復元を紹介したwebサイト等も含め、出来る限り資料を集めて調査した。<sup>6)</sup> 実物を見ることができないうえに、資料の中には一部に正確でない記述もありわれわれを悩ませた。例えば、所蔵館が従来発表していた鏡筒の全長に誤りがあった（2008年12月に訂正された）。このためデータや記述を逐次確認しながら作業を進めた。

#### 5. ガリレオ復元望遠鏡の反響

2009年3月から復元望遠鏡の販売が(株)アストロアーツにより行われた。多くは科学館や博物館・天文台に納入したが、個人の購入もあった。

復元望遠鏡を使用した展示や観望会が各地で開催され、その多くは世界天文年公認イベントとしても行われた。観望会では月面や木星衛星などを観測して、多くの参加者にガリレオの発見や狭い視野で苦勞した観測を体験してもらうことができた。また「日本天文学会創立100周年記念・世界天文年2009巡回企画展」では、14倍望遠鏡によるガリレオ体験や20倍望遠鏡の展示が行われた。これらの催しは新聞やテレビ、天文雑誌、インターネットなどで広く取り上げられた。

一方、われわれは「ガリレオの望遠鏡精密復元」



図6 NHK 国際放送局の撮影取材。レンズ研磨を説明する菊池光学精工・菊池敏則社長(右)と撮影中のNHK スタッフ。

について日本天文学会 2009 年春季年会で講演発表を行い、完成したばかりの 2 本の復元望遠鏡を講演会場とポスターセッション会場にて披露した。また復元望遠鏡プロジェクトはテレビで放送された。NHK 国際放送局(英語放送)では、レンズや鏡筒の製作現場から天文学会年会発表まで数日間撮影取材を行い、「NHK ワールド」で世界天文年のニュースとして海外に向け 3 月末に放送した(図 6)。読売系「ニュース・ザ関西」は京都科学で製作現場を取材し、世界天文年と復元望遠鏡のニュースをたいへんわかりやすく 2 月下旬に放送した。

## 謝 辞

今回の復元製作にあたり、光学系の試作にご尽力いただいた堺市教育センター・熊森照明氏、現地より資料や情報を送ってくださったフィレンツェ在住イタリア文化財修復士・田中 慧女史、ご指導をいただいた横尾武夫元大阪教育大学教授の皆様へ御礼申し上げます。

世界天文年以降も、これらの復元望遠鏡を長く活用されることを願っております。

## 参 考 文 献

- 1) Alvert Van Helden, Catalogue of Early Telescopes, 1999, INSITUTO E MUSEO DI STORIA DELLA SCINZA, Firenze, 32, 33, 34, 84, 30
- 2) 吉田正太郎 望遠鏡発達史(上), 1994, 誠文堂新光社, 47
- 3) スティルマンドレイク(田中一郎訳), ガリレオの生涯 2・木星の衛星と太陽黒点, 1985, 共立出版, 189, 201, 302, 181, 183
- 4) Giorgio Strano, Galileo's Telescope, 2008, INSITUTO E MUSEO DI STORIA DELLA SCINZA. Firenze/Giunti Editor S.p.A, 47-50, 52-53, 45
- 5) ガリレオ ガリレイ, 星界の報告(山田慶次 谷泰訳), 1976, 岩波文庫
- 6) Antiques of Science and Technology Jim&Rhoda Morris, <http://www.scitechantiques.com/resume/index>
- 7) 田中一郎, 「ガリレオ・ガリレイ」星ナビ 2009 年 12 月号, アstroアーツ, 27
- 8) 井上 毅, 「世界天文年」ガリレオの望遠鏡精密復元プロジェクト, 天文月報, 2009 年 12 月号, 807