

国友一貫斎グレゴリー望遠鏡の光学特性評価

○萩野正興(国立天文台/日本スペースガード協会)、都築俊宏、石川直美(国立天文台)、
富田良雄(元京都大学)、岡本千秋(長浜城歴史博物館)、宮良碧(シグマ光機)、
渡部啓介、村山花(ドキュメンタリージャパン)、宇治田曜(NHK 大阪放送局)

概要(Abstract)

長浜城歴史博物館所蔵の国友一貫斎が天保七年に製作したグレゴリー式望遠鏡の性能調査を行った。2019 年度には主鏡の面精度と面粗さの測定を行ったが、今回は望遠鏡全体の光学特性評価を目的とする。国立天文台先端技術センターのフィゾー干渉計を用いて、全光学系の透過波面誤差、望遠鏡光学系の透過波面誤差、副鏡の面精度を測定した。この望遠鏡は回折限界指標には及ばないものの、月の表面を観測するのに十分な解像度であることが示された。

1. はじめに

調査の目的は長浜城歴史博物館の国友一貫斎が天保七年(1836)に製作したグレゴリー式天体望遠鏡(以下、国友望遠鏡)の光学性能を評価することである。2019 年度に行った調査では主鏡の面精度や面粗さを測定したが、今回(2021 年度)は望遠鏡全体の性能評価を目的とした。

国友一貫斎(1778-1840)は 6 台ほどの反射式望遠鏡を作成したとされるが、現存するものは上田市歴史博物館(1 号機、天保五年)、長浜城歴史博物館(2 号機、天保七年)、彦根城博物館(3 号機、天保十三年)、国友一貫斎家(4 号機)の 4 台である。いずれも放物面凹面鏡を主鏡とするグレゴリー式望遠鏡(口径 60mm)である。これら望遠鏡の調査については、最初に山本一清(1937)がシカゴにて国友望遠鏡の高い性能を報告した。富田良雄(1998)は国友望遠鏡 1 号機の調査を行い、主鏡は放物面、副鏡は球面、レンズ 2 枚からなる接眼鏡という構成であることを報告した。坂井義人(2018)は 4 号機のフーコーテストを行い、主鏡は $1/3\lambda$ の放物面であることを報告した。萩野正興(2019)は Zygo 社製フィゾー干渉計を用いて 2 号機の主鏡の面精度を測定し、PV0.67 λ の放物面という結果を報告した。またこの調査では Zygo 社製 NewView 8300 を用いた面粗さも測定され、Sq が 3.7nm であったことも報告された。

今回の調査では長浜城歴史博物館所蔵の 2 号機について、それぞれの光学素子の測定だけでなく望遠鏡全体の性能測定を行った。

2. 測定

調査は 2021 年 7 月 19 日から 2 日間にわたって国立天文台先端技術センターで行われた。測定装置はフィゾー干渉計 4D Technology AccuFiz 4 インチを使用した。測定対象は望遠鏡全体の透過波面誤差と副鏡面精度である。以下に測定セットアップについて記載する。

2.1 望遠鏡全体の透過波面誤差

平行に調整した透過平面原器と反射平面原器の間に国友望遠鏡を設置した。この際、測定精度に影響

を及ぼす室内の空気揺らぎを最小にするため、光学素子間の距離を可能な限り近づけて行った(図1左)。干渉測定方式は位相シフト方式とし、64回測定の平均を評価値とした。

2.2 副鏡の面精度

鏡筒内に副鏡がある状態では測定に必要なF比光の入射が困難だったため、副鏡は取り外して単体で測定した(図1右)。干渉測定方式は前述と同様に位相シフト方式とし、64回測定平均を評価値とした。

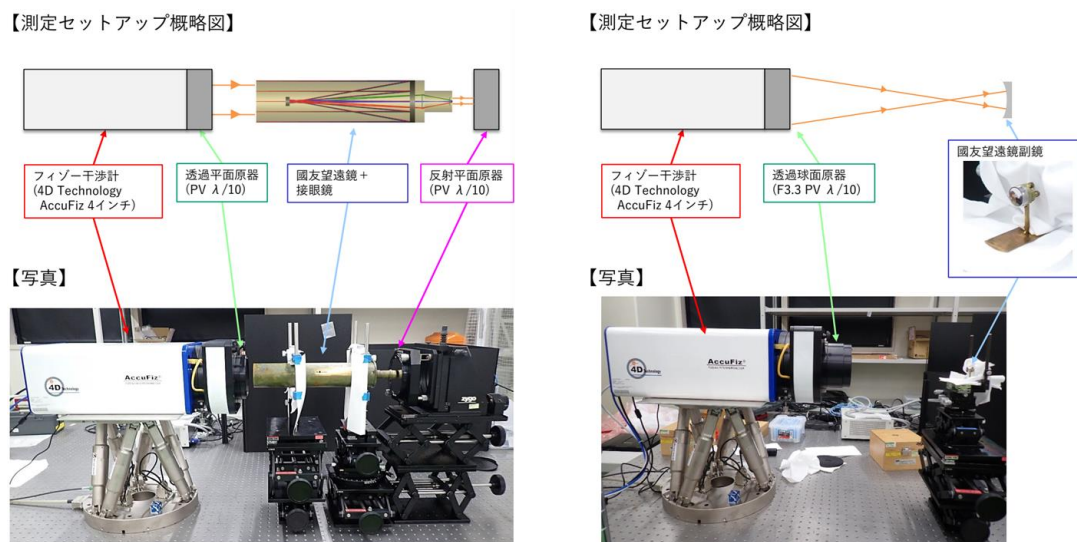


図1 測定セットアップ。(左) 望遠鏡全体の測定。(右) 副鏡のみの測定。

3. 結果

3.1 全体光学系の透過波面誤差

望遠鏡と接眼鏡の両方を合わせた状態で透過波面誤差を測定した結果を図2に示す。PVrの値は 1.76λ 、RMSは 0.30λ であり、回折限界指標(0.070λ RMS)には届かなかった。なお、接眼鏡内のレンズが傾いていたため、測定を行うためには反射原器を大きく傾ける必要があった。

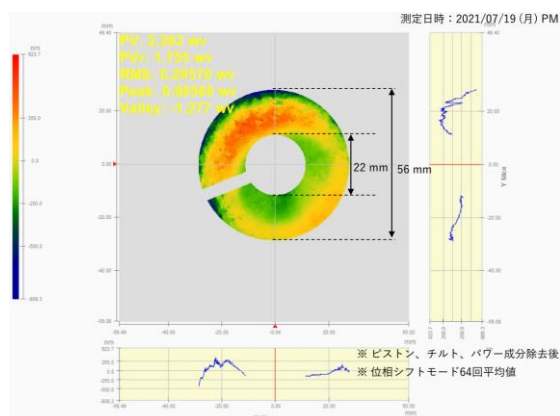


図2 全体光学系の透過波面測定結果。

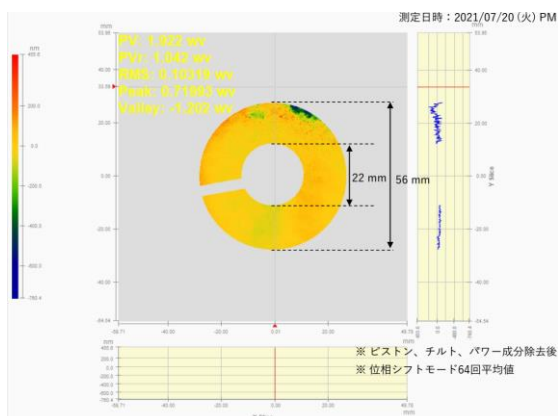


図3 望遠鏡光学系の透過波面測定結果。

3.2 望遠鏡光学系のみの透過波面誤差

接眼鏡を除いた主鏡と副鏡のみの透過波面誤差を測定した結果を図3に示す。PVrの値は 1.0λ 、RMSは 0.10λ であり、この値も国友望遠鏡の回折限界指標(0.070λ RMS)には届かなかった。この測定では、

適切な原器の不足によりキャッツアイ反射測定ため参考値という扱いとする。

3.3 副鏡の面精度

副鏡のみで測定した光線使用領域のみの結果を図4に示す。副鏡全体($\phi 9.3\text{mm}$)の透過波面誤差はPVrで 0.52λ 、RMSは 0.088λ となった。この結果は2019年に行った国友望遠鏡の主鏡の値、PVrが 0.69λ 、RMSが 0.13λ と同程度である。また、光線使用領域($\phi 5.0\text{mm}$)のみでの測定結果はPVrが 0.27λ 、RMSが 0.039λ となった。

3.4 シミュレーションと実際の観測

国友望遠鏡で実際に撮影した月面の観測像と今回の測定波面誤差の結果をもとにシミュレーションを行った結果を比較し、測定結果の正常性を確認する。

まず、シミュレーションの手法を説明する。まず、富田良雄の先行研究(1998)のデータより設計推測を行い、国友望遠鏡の光学パラメータを推測する。これにより得られた設計モデルと光学パラメータを図5に示す。次に今回の透過波面誤差結果に対して干渉計付属ソフトウェア4SIGHT ANALYSIS SOFTWAREを用いてゼルニケ35項でのフィッティングを行う。フィッティング後のPV値は 1.62λ 、RMSは 0.28λ となり、計測値とほぼ一致した。フィッティング結果を光学設計ソフトウェアOptic Studioを用いて国友望遠鏡と同じ光学パラメータを持つ理想望遠鏡に波面誤差として付与し、軸上の点像関数(PSF)を求める。このようにして求めたPSFを実際に国立天文台の望遠鏡にて撮影した月画像に付与し、国友望遠鏡で見える月面のシミュレーション像を作成した。なお、国友望遠鏡の軸上のストレール比は 0.138 であり、このシミュレーション像は色収差の影響は含まれていない。

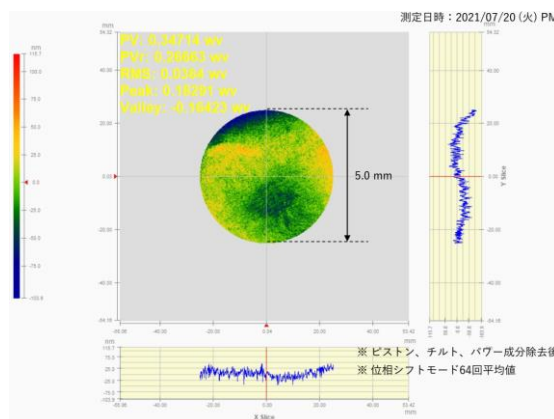


図4 副鏡のみの透過波面測定結果。

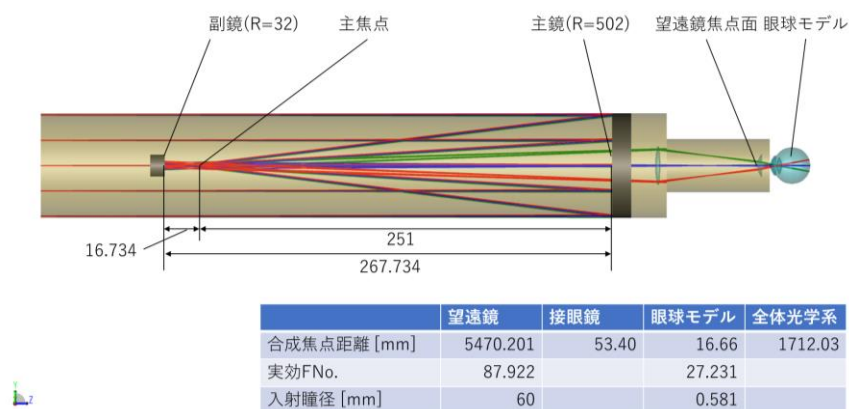


図5 国友望遠鏡光学パラメータ設計予測。

また、ほぼ同じ時間にドキュメンタリージャパンの撮影スタッフと協力して実際の国友望遠鏡を用いた月面の撮像に成功した。撮影時刻は2021年7月19日19:15(JST)であり、月齢9.4、視半径 $987.3''$ 、方位 179.4 度、高度 36.3 度であった。この月面像のリムに対して円をフィッティングして求めたピクセル分解能は約 $1.5''/\text{pixel}$ である。月面観測像とシミュレーション結果を図6に示す。月面観測像は接眼鏡による色収差による色にじみの影響が顕著に見られるが、シミュレーション結果に近い分解能である。月の表面を観測するのに十分な解像度であるといえる。



図 6 (左)国友望遠鏡で撮像された月面像。(右) シミュレーションで求めた点像関数を施した月面像。

4. まとめ

国立天文台先端技術センターのフィゾー干渉計を用いて、全光学系の透過波面誤差、望遠鏡光学系の透過波面誤差、副鏡の面精度を調査した。その結果全体光学系の透過波面誤差は $PVr\ 1.8\lambda$ 、 $RMS\ 0.30\lambda$ となった。これは回折限界指標 ($RMS\ 0.070\lambda$) には及ばないが、シミュレーションと実際の観測から、月の表面を観測するのに十分な解像度であることが示された。この研究で残された課題は、接眼鏡の色収差の測定、星をなどの点像を観測した際の像の形状や光学系が与える影響の測定、他の国友望遠鏡との比較が挙げられる。

本研究の測定の様子と結果はドキュメンタリージャパンが作成した NHK BS プレミアム/BS4K「コズミック フロント」(2021 年 11 月 18 日放送) と NHK 大阪放送局による「歴史探偵」(2021 年 11 月 24 日放送) にて紹介された。今回のようなメディアとの協力体制は、我々の研究が江戸時代の技術力の高さを評価するだけでなく、山本一清(1937)で言及されている天文学の啓発という大きな意味を持つと考える。

参考文献

- Yamamoto, I., “Kunitomo and His Astronomical Activities in the Pre-Meizi Era.”, *Isis* 26, 2 (1937)
- 坂井義人、中村和幸、廣瀬一實、第 5 回「歴史的記録と現代科学」研究会集録(2017)
- 富田良雄、久保田諄、坂井真人、坂井義人、鈴木美好、寺島隆史、富井洋一、中村和幸、中村 士、松田勝彦、横尾広光、渡辺文雄「國友藤兵衛製作グレゴリー式反射望遠鏡の学術調査」 国立天文台報, 4, 9-41(1998)
- 萩野正興、都築俊宏、篠田一也、石川直美、小野智子、太田浩司、岡本千秋、富田良雄、廣瀬一實、吉田一郎、国友武宏、野澤恵、宮良碧、宮崎将、石村周平、岩橋清美、木村剛一、大辻賢一、大山真満、島田佑香里「長浜城歴史博物館既有の国友一貫斎作反射望遠鏡の主鏡の性能評価」第 39 回天文学に関する技術シンポジウム 2019 集録 (2020)

謝辞：本研究は国立天文台・先端技術センター共同利用で設備を利用して行われました。