

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

○萩野正興、都築俊宏、篠田一也、石川直美、小野智子(国立天文台)、太田浩司、岡本千秋(長浜城歴史博物館)、富田良雄、廣瀬一實、吉田一郎、国友武宏(国友一貫斎再評価委員会)、野澤恵、宮良碧、宮崎将、石村周平(茨城大学)、岩橋清美(国文学研究資料館)、木村剛一、大辻賢一(京都大学)、大山真満、島田佑香里(滋賀大学)

概要(Abstract)

国友一貫斎は江戸時代に天体望遠鏡を自作し観測した人物である。国友一貫斎が作成した反射望遠鏡は4台現存しており、主鏡は金属鏡であるが約200年たった今でも輝きを失っていない。最古の上田市立博物館の主鏡は富田ら(1998)により調査された。国立天文台先端技術センターにて長浜城歴史博物館の主鏡の面精度と面粗さを測定した。

1. はじめに

江戸時代後期に国友藤兵衛一貫斎(1778-1840、以下国友一貫斎)は鉄砲鍛冶の技術を応用した反射望遠鏡を自作し、太陽黒点をはじめとする天体観測を行った(有馬成甫, 1932 山本一清, 1933)。この国友一貫斎の偉業(山本謙一, 2015)を全国に広めるために、滋賀県長浜市、商工会議所、国友町自治会、国友鉄砲研究会が中心となって、国友一貫斎再評価委員会が発足した。この委員会では史料の学術調査、イベントなどを行っている。本研究は国友一貫斎再評価委員会の協力のもと実現した。

現存する国友一貫斎の望遠鏡(以下国友望遠鏡)4基は、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)にある。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11.1mm)である。国友望遠鏡1号機の調査として富田良雄(1998)が、4号機の調査として坂井義人(2018)が報告している。これらの報告によると1号機主鏡の面精度が $\lambda/4$ 、4号機主鏡の面精度が $\lambda/3$ であった。富田(2015)では国友望遠鏡1号機の主鏡は、Cu-Sn合金(重量パーセンテージ比 Cu67wt%Sn33wt%)の金属鏡であることが報告されている。

国友望遠鏡2号機の主鏡の性能評価調査を目的として、2019年10月30日に国立天文台先端技術センターの共同利用研究(代表:野澤恵)で面精度と面粗さの測定が行われた。

2. 測定

今回の測定では国友一貫斎の望遠鏡の主鏡のほかに現代の市販の凹面鏡をリファレンスとして、光学メーカー Sugitoh 社の市販の球面凹面鏡(TS-0947R 以下、サンプル#1 と呼ぶ)と光学メーカーシグマ光機社製球面凹面鏡基板(TCBS-50C08-600 波面精度 $\lambda/2$)に京都大学附属天文台でアルミ蒸着した球面凹面鏡(サンプル#2 と呼ぶ)を用い

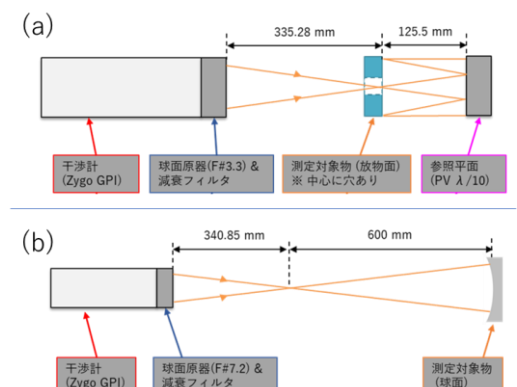


図 1: 測定セットアップの概略図。

て比較した。それぞれリファレンスの凹面鏡サイズは $\phi 50\text{mm}$ 、中心厚は 3mm と 7.5mm (コバ厚 8mm)、曲率半径は 600mm である。基盤素材はどちらもBK-7である。

2.1 面精度測定

面精度の測定に用いた使用装置は国立天文台先端技術センターの Zygo 社製フィゾー干渉計である。測定時のセッティングの概略図を図 1 に示す。国友一貫斎の主鏡は穴あき放物面鏡であるため、図 1(a)のように鏡面に 2 回反射する null 光学系を構築して測定した。この鏡の有効径は不明のため、鏡の境界部分を 1mm 程度マスクした領域で解析を行った。一方で、現代の市販の凹面鏡は球面であるため、図 1(b)のように鏡面に 1 回反射する null 光学系を構築した。市販反射鏡は有効径(外形の 85%)で解析を行った。

2.2 面粗さ測定

面粗さ測定は天文台先端技術センターの表面粗さ/形状測定機 Zygo 社製 NewView 8300 を用いて行った(図 2)。測定倍率は最大の 50 倍とし、測定範囲 $166.6\text{um} \times 166.6\text{um}$ における面粗さ(Sq, RMS)を測定した。曲率成分はソフト上で除去した。国友望遠鏡主鏡表面は全面にわたり経年劣化によるサビやヒビが存在したが、製作当時の面粗さを評価するために比較的サビが少ない部分を用いて面粗さ測定を行った。



図 2 : (左) NewView8300 にセットされた国友望遠鏡の主鏡。(右) クリーンルーム内での測定の様子。

3. 結果

3.1 面精度測定

図 3 にフィゾー干渉計で測定した面精度の結果を示す。図 3 (左) が国友望遠鏡の結果で、この凹面鏡の表面形状は富田(1998)で報告された 1 号機の主鏡と同様に放物面であることが判明した。また、PV 値(一番高い所(Peak)と一番低い所(Valley)の差)は 0.67λ ($\lambda = 632.8\text{nm}$) である。この凹面鏡はコマ成分が支配的である。一方、2 種類の現代の市販の凹面鏡は、どちらも球面の表面形状であった。それぞれの PV 値はサンプル#1 が 0.88λ 、サンプル#2 (図 3 (右)) が 0.30λ という結果

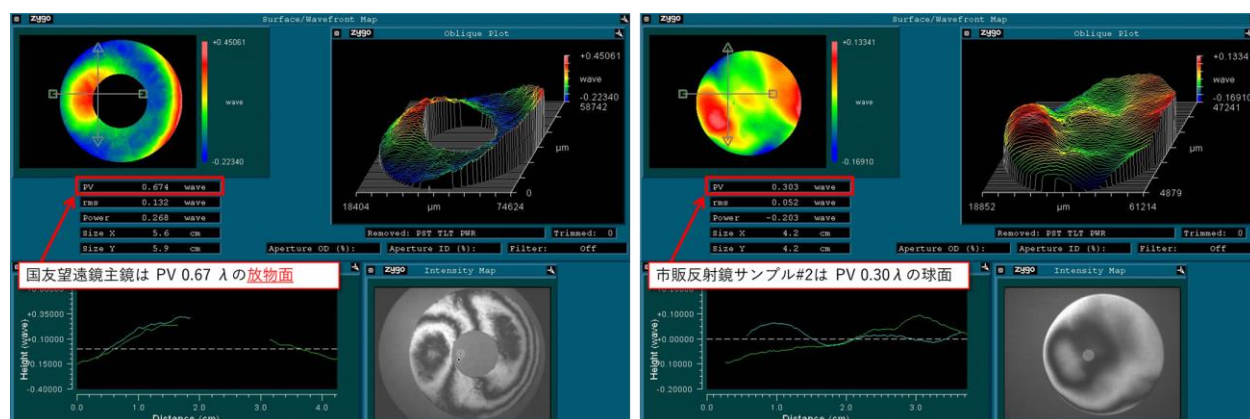


図 3 : 面精度測定結果。(左) 国友望遠鏡。(右) サンプル#2。

になった。サンプル#1 はアス成分が支配的である。サンプル#2 ではアス成分が大きい。

3.2 面粗さ測定

図 4 に表面粗さ/形状測定機で測定した結果を示す。この図の左列が国友望遠鏡の主鏡の結果で、右列がサンプル#2 の反射鏡の結果である。上の列は倍率 50×での拡大像である。国友望遠鏡主鏡の拡大像（図 4 左上）を見ると、作成時の研磨による筋状のパターン、経年劣化と見られる線状のひび、斑点状の錆が見られた。一方で、現代の市販反射鏡の拡大像（図 4 右上）では、国友望遠鏡で見られたパターンが見られない。

図 4 の下行に、面粗さの測定結果を示す。この図の左下の国友望遠鏡の面粗さパラメータ S_q （平均面からの距離の標準偏差）は 3.7nm であった。 S_z （表面の最も高い点から最も低い点までの距離）は 27.6nm という結果になった。現代の市販の反射鏡サンプル#1 は S_q が 0.58nm で S_z が 3.6nm であった。サンプル#2 は S_q が 0.55nm で、 S_z が 4.1nm という結果であった。現代の市販の反射鏡はどちらも同程度の面粗さであることがわかる。

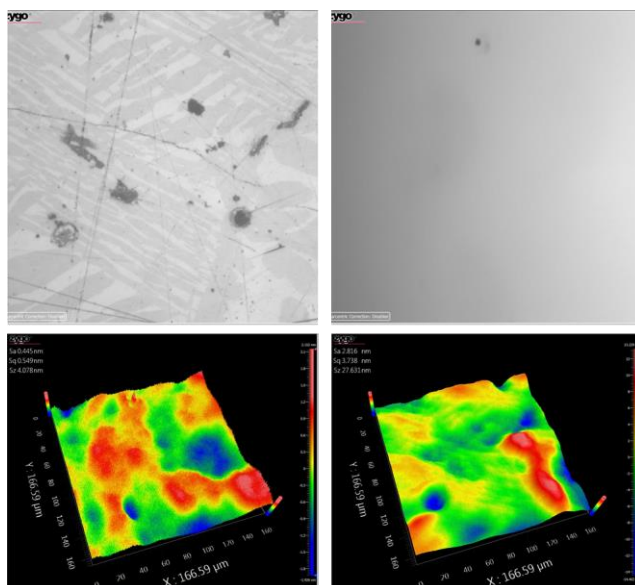


図 4：面粗さ測定結果。上行が表面を顕微鏡（倍率 50×）での拡大像。下行が面粗さ測定（倍率 50×）結果。左列が国友望遠鏡、右列がサンプル#2 の結果。

4. まとめ

国友望遠鏡主鏡の面精度の測定結果は 0.67λ であり、現代の市販反射鏡サンプルの測定結果（それぞれ 0.88λ 、 0.30λ ）の中間の値となった。面粗さの測定結果は S_q で 3.7 nm であり、現代の市販反射鏡サンプルの測定結果（それぞれ 0.6 nm、0.5 nm）に比べて大きな値となった。国友望遠鏡主鏡表面の顕微鏡拡大画像からは、研磨で使用する砥粒の大きさによる形状パターンや、鏡の経年劣化による亀裂や錆（さび）の発生を確認した。本測定により作成時に研磨で使用した砥粒大のパターンが面粗さの値を小さくしているものの、この国友望遠鏡 2 号機の主鏡が高い面精度であることが示された。

参考文献

- 有馬成甫, 「一貫斎国友藤兵衛傳」 東京武蔵野書院, 1932
- 坂井義人, 第 5 回「歴史的記録と現代科学」研究会 集録 (2018/3/22-24), 2018
- 富田良雄, 国立天文台報, 4, 9-41, 1998
- 富田良雄, Bull. Natl. Mus. Nat. Sci., Ser. E, 38, pp. 178, December 22, 2015
- 山本一清, 天界 昭和 8 年 2 月号, 1933
- 山本謙一, 「夢をまことに」 文藝春秋, 2015

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遂行されました。

付録1：国友一貫斎のレプリカ反射鏡の面精度・面粗さ測定

廣瀬による国友望遠鏡の主鏡の再現試験で作成されたレプリカ鏡も本論文のその他の鏡と同様に行われた面精度、及び面粗さの測定結果（図 A.1）を示す。レプリカ鏡は面形状が面精度 PV 値 0.87λ の放物面であり、コマ成分が支配的である。また、面粗さは S_q が 12.7nm であり、 S_z が 96.0nm という結果になった。拡大像では研磨による筋状のパターンが見られた。これは国友望遠鏡の主鏡と比較すると面精度・面粗さの値が大きく、再現の難しさや国友望遠鏡の高い性能を示す結果である。

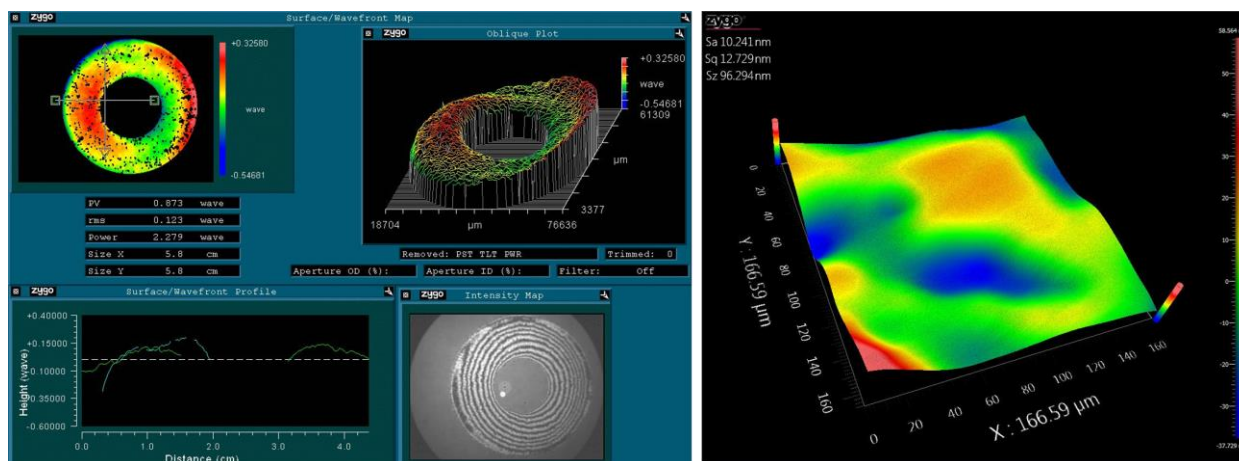


図 A.1：国友レプリカ望遠鏡の主鏡の測定結果。（左）面精度。（右）面粗さ。

付録2：国友一貫斎の「ゾングラス」の波長特性

ソングラス（サングラス）とは国友一貫斎が太陽の観測を行うために作成した減光フィルターで、接眼部分に組み込んで用いる。富田(1998)によると、英国製望遠鏡付属の赤色硝子と同様に、水晶硝子、白色硝子、錫灰、銅粉末などで作成されたのではないかと報告されている。実際の眼視観測では赤色が強く見えるため、近赤外域の波長に対して減光されていないことは明らかである。そこで、Ocean Optics

社製の小型分光器（Maya 2000 pro）を用いて広い波長でのゾングラスの透過を確認した。この小型分光器は $200\text{-}1100\text{nm}$ の範囲で測定が可能である。波長分解能は 0.4nm である。図 A.2 は国友一貫斎のゾングラスの透過波長をこの小型分光器で測定した結果である。光源はハロゲンライトを用いた。分光器のノイズが大きい短波長域を省いた 400nm から 1100nm の波長範囲で表示している。縦軸は透過率である。

400nm から 650nm の帯域ではかなりの光量が減少しているのに対して、 650nm

から 800nm 付近にかけて急激に透過率は増加し、それよりも長波長域では透過率は単調増加している。この結果より、国友一貫斎が作成したゾングラスは可視光域では減光フィルターとしてかなりの太陽光をカットできるが、近赤外域以上の波長域では効率の良い減光フィルターとして機能しない。

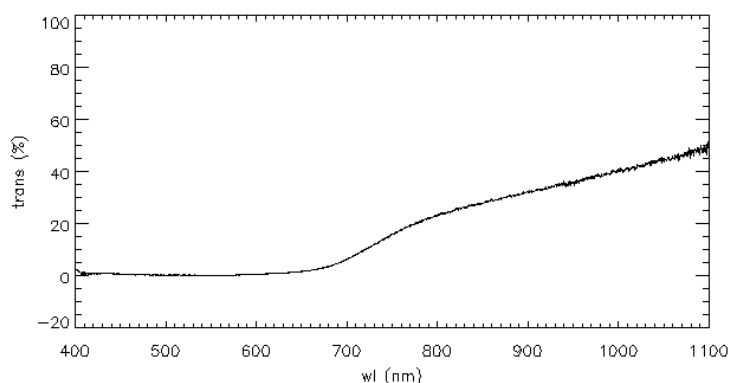


図 A.2：国友一貫斎のゾングラスの透過波長。