

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654066

研究課題名(和文)大型宇宙望遠鏡光学試験への適用を目指した新しい波面縫い合わせ計測法の開発

研究課題名(英文)Experimental and numerical studies of stitching interferometry for optical testing of large space telescopes

研究代表者

金田 英宏 (Kaneda, Hidehiro)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30301724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：一般に宇宙望遠鏡の光学試験では、レーザー干渉計を用いて、平面鏡で光を折り返したオートコリメーション法による波面誤差測定を行う。しかし、1mを超える大きな望遠鏡では、同等サイズの平面鏡の製作が非常に困難である。そこで、小さな平面鏡を動かして多数回の部分開口データを測定し、それらを縫い合わせることで、開口全面の波面誤差を得る。本研究では、この原理に基づいて、望遠鏡を試験するためのソフトウェアアルゴリズムを開発し、実験で測定方法の検証を行った。また、面精度の悪い平面鏡を用いた時の、結果への誤差伝搬を評価し、その誤差を改善する新アルゴリズムの提案を行った。実際に試験を行い、新手法の有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：In general, the wave-front error of a telescope is measured by using an optical interferometer through autocollimation by reflecting flat mirrors. For a large (>1 m) telescope, however, it is difficult to manufacture accurate flat mirrors with sizes comparable to the telescope and thus to measure the full aperture of the telescope at one time. Instead, small mobile flat mirrors are used to measure the sub-pupils and then stitch them to the whole aperture. In this study, stitching measurements of a 80-cm telescope with a 30-cm flat mirror were conducted with our software. The measurements were repeated with a high-precision flat mirror and then with another flat mirror which has a designed large deformation. As a result, the feasibility of the stitching interferometry is verified. It is also found that the error of the flat mirror gives a serious impact on the stitching result. Finally, a new algorithm is implemented in the software to find that it mitigates the flat mirror error.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：宇宙望遠鏡 干渉計測定 波面縫い合わせ

1. 研究開始当初の背景

望遠鏡の光学試験方法として、一般的にオートコリメーション法が用いられる。これは、望遠鏡焦点位置に干渉計の光学系を設置し、その光軸上に望遠鏡と同じサイズの高精度平面鏡を置くことで光を折り返し、望遠鏡の透過波面誤差マップを一度に測定する方法である。この方法では、大型の望遠鏡になるほど大きな平面鏡が必要になるが、口径1mを超えると、その大きさに匹敵するサイズで精度の良い平面鏡の製作は非常に困難である。そこで、将来の大口径宇宙望遠鏡の光学試験に適用できる波面誤差測定法の確立が必要である。

2. 研究の目的

大型望遠鏡の透過波面を測定する手法として、波面縫い合わせ法を開発した。これは、望遠鏡開口面の一部だけを測定できるような小さな平面鏡を用いて、開口全体を埋め尽くすように複数領域の透過波面誤差マップを取得し、それらを開口面全体の測定結果につなぎ合わせる方法である。このときに問題になるのが、波面縫い合わせ法で得られた結果の精度である。とくに熱制御しながら試験する宇宙望遠鏡の場合、測定時の平面鏡の形状を知るのが困難であり、縫い合わせ時の測定誤差伝播は大問題である。例えば、極低温下の試験では、熱収縮や重力によって平面鏡がゆがみ、測定結果に悪影響を及ぼすことが予想される。

本研究では、縫い合わせアルゴリズムを開発して、この方法に付随する測定誤差を評価する。また、誤差を改善する新しいアイデアを試すために、実際に小型モデルを製作し、実験で新手法の検証を行う。将来的には、次期赤外線天文衛星計画 SPICA などの大型望遠鏡の光学試験で適用できる基盤技術を確立する(図1)。

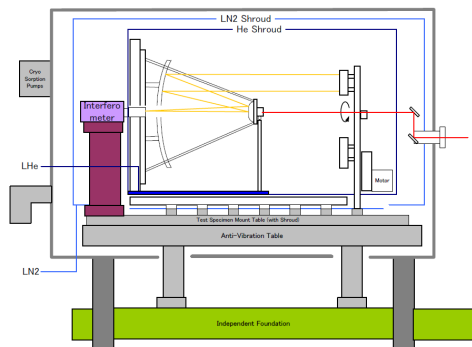


図1: SPICA 望遠鏡で計画されている光学測定コンフィギュレーション。

3. 研究の方法

JAXA 筑波宇宙センター6 m chamber 試験室のスペース、および望遠鏡・平面鏡・干渉計などのリソースを借用して、実験を行った。小型平面鏡の回転機構や、波面縫い合わせの新アルゴリズムなどの開発は、本研究経費で

行った。波面縫い合わせ法が実際の光学試験に適用できることを実証するために、図2に示すように、口径80 cmの望遠鏡と30 cm平面鏡を用いて、常温・常圧下での波面縫い合わせ測定を行った。望遠鏡光軸を中心に平面鏡を22.5度刻みで回転させ、合計16か所の領域から部分開口の波面データを取得した。また、図3のように2種類の小型平面鏡を用いた。高精度平面鏡(面精度10 nm RMS)によって、波面縫い合わせ法の測定原理そのものに付随する誤差を、低精度平面鏡(面精度590 nm RMS)によって、部分開口データに含まれる系統誤差の伝播を評価した。



図2:(上)本研究における実験セットアップ。右側奥に口径30 cm小型平面鏡と回転ステージが設置されており、左側手前に干渉計が光学調整ステージ上に設置されている。回転ステージは望遠鏡光軸を中心に回転し、各回転位置で望遠鏡の透過波面の測定を行う。(下)口径90 cm大型平面鏡による、望遠鏡開口全面の測定。

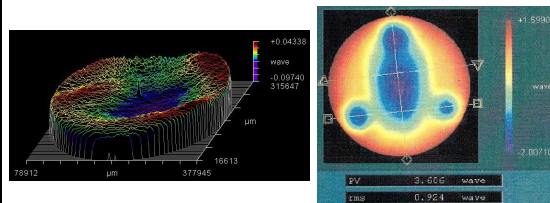


図3: 試験で用いた2種類の30 cm平面鏡。(左)高精度平面鏡の面形状誤差マップ。誤差は10 nm RMS。(右)低精度平面鏡の面形状誤差マップ。誤差は590 nm RMS。

4. 研究成果

(1) 本研究で開発した波面縫い合わせソフトウェアを使って、高精度小型平面鏡によって得られた部分開口データをつなぎ合わせ、望遠鏡開口全体の透過波面誤差マップを取得した。その結果の代表例を図4に示す。望遠鏡の波面誤差は1079 nm RMSと求まった。

一方、同じ望遠鏡に対して、口径 90 cm の大型平面鏡を用い、オートコリメーション法で測定を行った結果、望遠鏡の波面誤差は 1087 nm RMS と求めた（図 4 下）。図 4 に示すとおり、両者で得られた波面誤差マップはほぼ一致しており、その差は測定誤差の範囲内であるため、波面縫い合わせ法の妥当性を実証することができた。

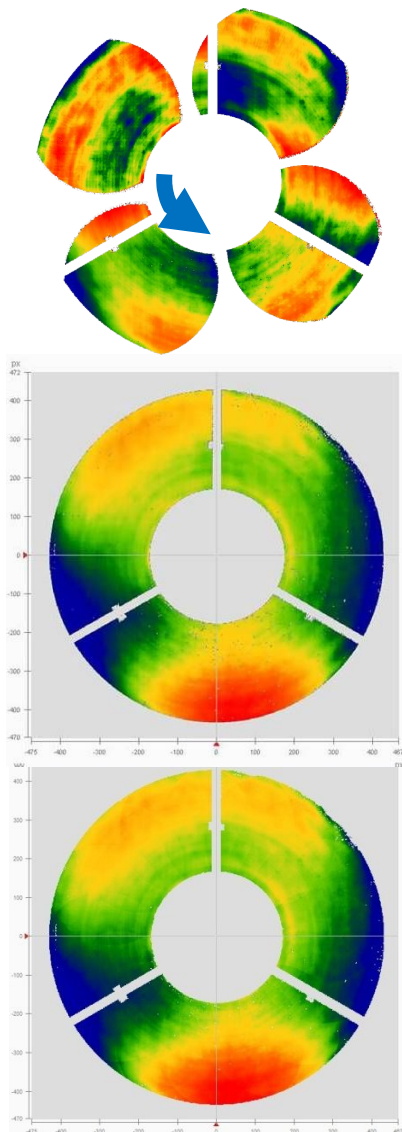


図 4: (上)高精度小型平面鏡で得られた、部分開口 4 箇所での波面誤差マップ。(中央)16 箇所の部分開口データを縫い合わせた結果、得られた望遠鏡波面誤差マップ(透過波面誤差 1079 nm RMS)。(下)口径 90 cm 大型平面鏡で得られた、望遠鏡全面開口の波面誤差マップ(透過波面誤差 1087 nm RMS)。カラースケールは共通。

(2) 低精度小型平面鏡を用いて、同様に部分開口データを取得し、波面データを縫い合わせた結果、得られた望遠鏡波面誤差マップを図 5 上に示す。高精度平面鏡で得られたマップ(図 4)とは明らかに異なることが分かる。両者の差分を示したのが図 5 下である。局所的な差分の構造から分かるように、低精

度小型平面鏡の面形状誤差(図 3 右)の影響を強く受けており、小型平面鏡のゆがみに伴う誤差伝搬は深刻であることが分かる。そこで、縫い合わせアルゴリズムに、小型平面鏡のゆがみによる測定結果への悪影響を取り除く新たな手法を導入した。その結果、得られた望遠鏡透過波面誤差マップを図 6 に示す。本来の誤差マップである図 4 の結果に近いものとなっていることが分かる。以上のことから、本研究で提案する新しい手法によって、波面縫い合わせ誤差が大幅に完全されることが確認された。

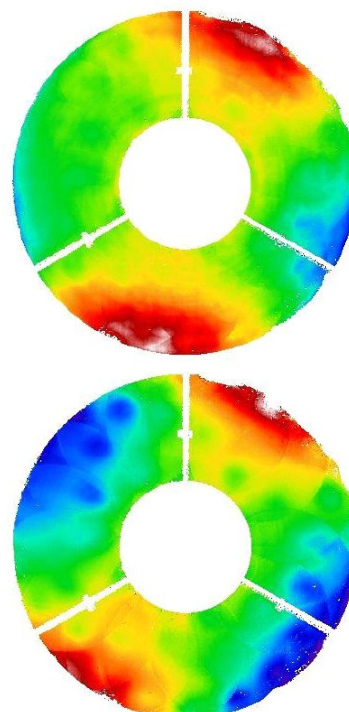


図 5: (上)低精度小型平面鏡を用いて測定した 16 箇所の部分開口データを縫い合わせた結果、得られた望遠鏡波面誤差マップ(透過波面誤差 1600 nm RMS)。(下)高精度平面鏡で得られた誤差マップとの差分形状。

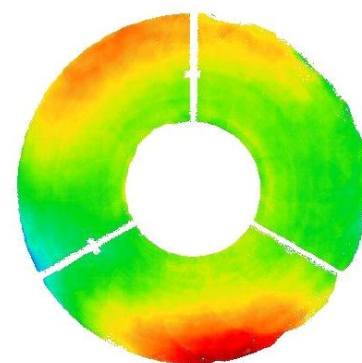


図 6: 図 5 と同じ測定に対して、波面縫い合わせの新しいアルゴリズムを用いて、得られた結果(透過波面誤差 1089 nm RMS)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6件)

M. Kotani, Y. Muta, A. Yoshimura, S. Ogiwara, T. Imai, H. Katayama, Y. Yui, Y. Tange, K. Enya, H. Kaneda, T. Nakagawa, "Evaluation of Spaceborne SiC Mirror Materials Using Samples Cut from the Periphery of a Mirror Body", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.23, 850-858, (2014), 査読有

DOI:10.1007/s11665-013-0827-1

H. Kaneda, M. Naitoh, T. Nakagawa, T. Imai, H. Katayama, M. Sugauma, Y. Tange, R. Sato, K. Enya, M. Kotani, K. Maruyama, T. Onaka, T. Kokusho, "Manufacturing and optical testing of 800 mm lightweight all C/SiC optics", *Proceedings of the SPIE*, Vol.8837, 88370I.1-10, (2013), 査読無

DOI:10.1117/12.2025259

M. Kotani, T. Imai, H. Katayama, Y. Yui, Y. Tange, H. Kaneda, T. Nakagawa, K. Enya, "Quality Evaluation of Spaceborne SiC Mirrors (II): evaluation technology for mirror accuracy using actual measurement data of samples cut out from a mirror surface", *Applied Optics*, Vol. 52, 6458-6466, (2013), 査読有

DOI:10.1364/AO.52.004797

M. Kotani, T. Imai, H. Katayama, Y. Yui, Y. Tange, H. Kaneda, T. Nakagawa, K. Enya, "Quality evaluation of spaceborne SiC mirrors (1): analytical examination of the effects on mirror accuracy by variation in the thermal expansion property of the mirror surface", *Applied Optics*, Vol.52, 4797-4805, (2013), 査読有

DOI:10.1364/AO.52.006458

T. Onaka, H. Kaneda, M. Kawada, K. Enya, T. Nakagawa, "Cryogenic silicon carbide mirrors for infrared astronomical telescopes: lessons learnt from AKARI for SPICA", *Proceedings of the SPIE*, vol 8837, 88370K.1-7, (2013), 査読無

DOI:10.1117/12.2026662

H. Kaneda, M. Naitoh, T. Imai, H. Katayama, T. Onaka, T. Nakagawa, M. Kawada, M. Yamagishi, T. Kokusho, "Experimental and numerical study of stitching interferometry for the optical testing of the SPICA telescope", *Proceedings of the SPIE*, Vol.8842, 84423T.1-6, (2012), 査読無

DOI:10.1117/12.926879

[学会発表](計 6件)

國生拓摩、金田英宏、「大型望遠鏡の光学試験のための新しい波面縫い合わせ法の開発」、可視近赤外線観測装置技術ワークショップ、2013年12月17日、京都大学

T. Kokusho, H. Kaneda, M. Yamagishi, M. Naito, T. Imai, H. Katayama, T. Onaka, T. Nakagawa, "An experimental study of stitching interferometry for the SPICA telescope", *From Planets to Distant Galaxies: SPICA's New Window on the Cool Universe*, 18 Jun 2013, Tokyo

國生拓摩、金田英宏、山岸光義、内藤聖貴、今井正、片山晴善、中川貴雄、尾中敬、「大型宇宙望遠鏡の光学試験のための新しい波面縫い合わせ法の開発」、第13回JAXA宇宙科学シンポジウム、2013年1月8日、JAXA宇宙科学研究所

H. Kaneda, M. Naitoh, T. Imai, H. Katayama, T. Onaka, T. Nakagawa, M. Kawada, M. Yamagishi, T. Kokusho, "Experimental and numerical study of stitching interferometry for the optical testing of the SPICA Telescope", *SPIE*, 1 July 2012, Amsterdam, the Netherlands

金田英宏、「SPICA望遠鏡：技術検討状況と低温光学試験計画」、第12回JAXA宇宙科学シンポジウム、2012年1月5日、JAXA宇宙科学研究所

金田英宏、「SPICA搭載冷却望遠鏡 検討状況と低温光学試験計画」、日本天文学会、2011年9月20日、鹿児島大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

金田 英宏 (Kaneda Hidehiro)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：30301724