

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21883

研究課題名（和文）低温光学計測の革新的な多様化をもたらす大口径熱遮断光学窓の実現

研究課題名（英文）Development of an entrance window for cryogenic optical testing with a He-Ne laser interferometer

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：低温真空チャンバーとレーザー干渉計を用いて、非球面鏡に対して低温光学面形状の測定を実施できるシステムを構築した。熱遮断入射光学窓を設計・製作し、低温での実用性を確認した。中心波長がHe-Neレーザー633 nmのバンドパスフィルターを検討した。それ以外の可視・赤外線波長帯の阻止能を上げ、より長い波長の遠赤外線での阻止能もできるだけ高くするために基板および金属膜の素材を選定した。試作した入射光学窓の透過率の波長依存性を測定して、要求仕様を満足することを確認した。並行して、CGH干渉計による非球面鏡の低温面形状測定のための光学アラインメント調整の技術開発を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年は、天文観測のみならず、さまざまな光学計測分野において、広視野・高解像度が求められており、光学系の複雑化が進んでいる。その一方で、性能を向上させるためには、熱的に安定な光学系の実現が強く求められる。とくに宇宙赤外線観測では、装置からの熱放射による赤外線フォトンノイズを軽減するために極低温に冷やす必要がある。多彩な低温光学計測を可能にするためには、熱をできるだけ遮断した環境下での低温チャンバーによるレーザー干渉計測の実現が必要不可欠であり、本研究ではその原理実証を行った。

研究成果の概要（英文）：The measurement system consisting of a cryo-chamber and a He-Ne laser interferometer has been established for optical testing of aspherical mirrors at low temperatures. In particular, special entrance windows have been developed to prevent thermal radiation from outside the chamber as much as possible, which are installed at the entrance of the innermost low-temperature shroud of the cryo-chamber. More specifically, a band-pass optical filter tuned at the central wavelength of 633 nm (He-Ne) is fabricated on the substrate of selected fused silica with metal meshes. In parallel, the method of optical alignment with a CGH interferometer is studied for the aspherical mirror to be measured at low temperatures in the cryo-chamber with the special entrance windows.

研究分野：天文学

キーワード：低温光学系 光学窓 宇宙赤外線観測

1. 研究開始当初の背景

近年は、天文観測のみならず、さまざまな光学計測分野において、広視野・高解像度が求められており、精密加工技術の目覚ましい進歩とともに、光学系の複雑化・高度化が進んでいる。その一方で、光学性能を極めるには、熱的に安定な光学評価システムの確立が強く求められる。例えば、宇宙用途では、天文・太陽観測・太陽系探査・地球観測のいずれも、熱的に高度に制御された真空チャンバーを用いた光学試験が必須である。とくに宇宙赤外線観測では、観測装置や望遠鏡からの熱放射による赤外線フォトンノイズが問題となり、その影響を軽減するために、光学系全体を低温に冷やす必要がある。しかし、熱擾乱を与えずに、安定冷却状態を保った状態で、光学系の各要素を高精度で評価することは至難の業である。一般には、熱入力を最小限に抑えるべく低温シユラウド壁に微小の穴を開け、その近傍で焦点を結ぶ光学系を組んで、外部からレーザー干渉計を用いて光学測定を行う。しかし、この方法では単純な球面波しか使用できないため、非球面はおろか平面鏡ですら低温計測は非常に困難になる。一方、日欧の国際協力が進められている次期赤外線天文衛星 SPICA 計画に搭載される中間赤外線観測装置 SMI には、複雑な面形状を持つ鏡が複数枚用いられるため、これらの非球面鏡の低温測定システムの確立は急務である。

2. 研究の目的

天文観測において、観測装置の光学系の複雑化が進んでおり、かつ熱的に安定な光学系の実現が求められている。とくに宇宙赤外線観測では、装置からの熱放射による影響を軽減するために、極低温に冷やして光学系を評価する必要がある。非球面鏡の低温光学計測を可能にするためには、できるだけ熱を遮断した環境下で、低温チャンバーとレーザー干渉計を組み合わせ、フレキシブルな光学系評価システムの実現が必要不可欠であり、本研究ではそのための原理実証を行う。具体的には、干渉計で用いる He-Ne レーザーの波長を選択的に透過し、熱赤外線などその他の光をできるだけ遮断する極低温用の入射窓を開発する。これが実現できれば、入射窓を大きくできるため、入熱を気にせず幅の広い光束を極低温部に導入でき、複雑な面形状を持つ光学系の多彩な低温測定が可能となる。本研究では、CGH (Computer Generated Hologram) 干渉計を用いた軸外し放物面鏡の低温測定のためのセットアップを構築する。その応用先として、次期赤外線天文衛星 GREX-PLUS 計画 (研究開始当初の計画であった日欧協力の SPICA は、研究期間中に国際パートナーの事情により計画が中断したため、対象プロジェクトを変更) に搭載予定の、中間赤外線高分散分光装置に採用される鏡の評価に必要な低温光学試験を念頭に置く。

3. 研究の方法

(1) He-Ne レーザー波長 (633 nm) 近傍の波長帯だけを通す光学窓を開発する。既存の極低温チャンバーの外壁の制約から、口径は最大で 50 mm と設定する。構造は、誘電体多層膜フィルターおよび金属膜と熔融石英基板を組み合わせであり、紫外線から遠赤外線の波長域を 3 桁ないし 4 桁以下に落とす。設計の詳細については光学メーカーとの打ち合わせによって決定する。誘電体干渉膜によって、波長 633 nm のナローバンドフィルター (目標バンド幅 80 nm 以下) を形成し、近赤外線および中間赤外線帯の熱リークを落とす。一方、熔融石英によって、おもに遠赤外線帯の熱リークを遮断する。石英は一般的なガラスに比べて、幅広い温度範囲で熱膨張係数が小さく低温での熱的安定性が高いこと、および、より長波長まで透過率を低く抑制できることが長所である。しかし、長波長端の抑制には非結晶度の高さが鍵であり、制御が困難な製造プロセスに依存する。そのため、独立に製造された複数の熔融石英窓を入手し、透過率を実測して選別したのちに、誘電体干渉膜を蒸着する。その一方で、熱遮断光学窓を温度 10 K シユラウドへ固定するための治具、および、被検鏡を測定するための支持治具を作成する。また、既存のチャンバーで使用している常温真空入射窓を口径 50 mm に変更する。さらに、低温シユラウド内の温度を測定するために、低温用シリコンダイオード温度計やコネクタなどを調達する。

(2) 既存の低温真空チャンバーと CGH レーザー干渉計を用いて、光学測定を行うためのセットアップの整備を進める。まず、SPICA 衛星搭載 SMI 観測装置に採用予定であった軸外し放物面鏡の試作品を JAXA より入手し、その鏡面に対して波面を生成するための CGH を新たに製作する。また、軸外し放物面鏡を低温真空チャンバー内の光学ベンチにインストールするための保持治具を用意する。レーザー干渉計に新しい CGH 素子を組み込み、常温常圧下で光学調整を繰り返すことにより、測定系の光学アラインメント方法を確立する。調整を終えたのち、まずは従来セットアップ (低温シユラウド開口部は単純な 10 mm 径の穴) で軸外し放物面鏡の低温測定を行い、参照データを取得しておく。続いて、(1) で製造した熱遮断光学窓に対して、冷却試験を実施し、冷却サイクルに対して耐性があることを確認する。その後、チャンバー内の 10 K シユラウドに取り付け、軸外し放物面鏡に対して同じ低温測定を行う。従来セットアップで得

られた結果が再現することを確認し、および、10 K シュラウド内の被検鏡を含め多数個所に温度計を設置し、熱擾乱が無視できることを実証する。

4. 研究成果

(1) 既存の低温真空チャンバーと He-Ne レーザー-CGH 干渉計を用いて、軸外し放物面鏡に対して低温光学面形状の測定を実施できるシステムを構築した。とくに本研究では、口径 2 インチの熱遮断光学窓を設計・製作し、低温での実用性を確認した。光学メーカーと議論を重ね、分光設計シミュレーションを実施して、中心波長が He-Ne レーザー波長 633 nm、半値幅が 80 nm 以下のバンドパスフィルターの実現を検討した。それ以外の可視・赤外線波長帯（波長 10 ミクロンまで）の阻止能を 0.1% 以下に設定し、より長い波長の遠赤外線帯の阻止能をできるだけ高くするために熔融石英を基板に使う設計とした。金属膜として、Ag タイプと Al タイプの異なる 2 種類のものを最終的に選択し、これらを使用した 2 種類のフィルターの製作を完了した。Ag タイプは光学性能が相対的に優れていることが期待されるが、長期信頼性に若干の懸念がある。一方、Al タイプはアルミの吸収のため透過率性能が相対的に劣ることが予想されるが、長期信頼性・耐久性に関しては優れていることが分かっている。

(2) 製作した 2 種類の光学入射窓に対して、赤外線フーリエ分光器を用いて透過率の波長依存性を測定した。結果を図 1 に示す（上が Ag タイプ、下が Al タイプ）。両者ともに、He-Ne レーザー波長 633 nm における透過率、および、可視・赤外線波長帯（波長 10 ミクロンまで）における阻止能 0.1% 以下を満足することを確認した。得られた透過率特性は上述の予想と矛盾のない結果となった。低温冷却試験を行い、冷却サイクルに対して耐性があることを確認した。今後は、これらの熱遮断光学窓を低温真空チャンバー内の温度 10 K シールド開口部に設置して、熱遮断フィルターとしての性能評価を行う予定である。

(3) 並行して、CGH 干渉計による非球面鏡の低温面形状変形測定のための光学アライメント調整の技術開発を進めた。低温真空チャンバーに軸外し放物面鏡を設置して冷却し、チャンバー外側に配置した干渉計からの He-Ne レーザー光をチャンバー内に導入して面形状測定を行う。そのための鏡保持治具の製作や、放物面の波面生成のための CGH 素子の製造、光学アライメント手順の検討などを実施し、常温常圧下における光学調整方法を確立した。まずは光学窓が無い従来のセットアップで測定を実施し、その後、上述の熱遮断光学窓を 10 K のシュラウドに取り付けて、面形状測定を行う予定である。

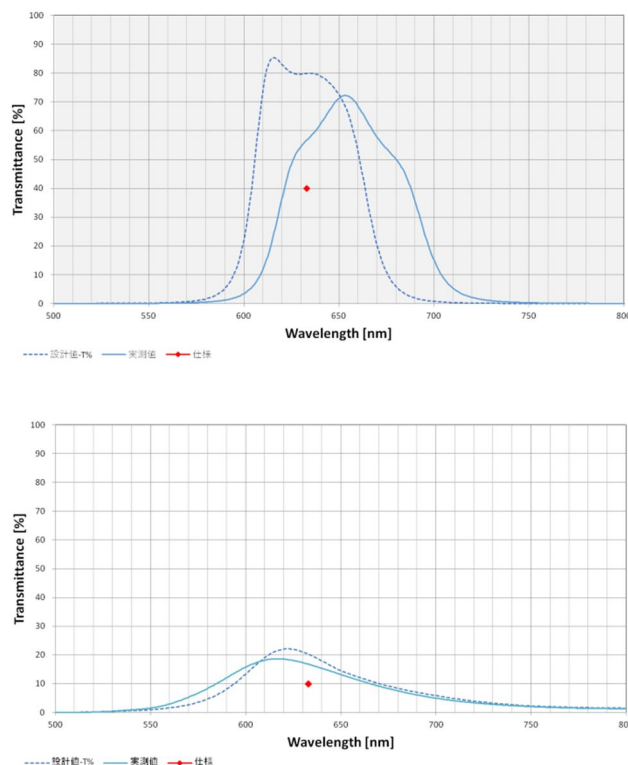


図 1: (上) 金属膜が Ag タイプの光学入射窓に対して、赤外線フーリエ分光器を用いて、透過率の波長依存性を求めた結果（実線）および、設計値（点線）との比較。赤点は He-Ne レーザー波長 633 nm における透過率の要求仕様値。(下) 金属膜が Al タイプの入射窓に対する同様の結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 近藤翼、國生拓摩、金田英宏、石原大助、木野勝
2. 発表標題 極低温における自由曲面鏡の表面形状測定に向けたCGH干渉計の開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤翼、國生拓摩、金田英宏、石原大助、木野勝、脇田愛未
2. 発表標題 極低温における自由曲面鏡の表面形状測定に向けたCGH干渉計の開発
3. 学会等名 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------