

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13471

研究課題名(和文) 宇宙望遠鏡の新しい開発思想：逆研磨鏡による波面補正の開発実証

研究課題名(英文) Development of wave-front error correction mirror

研究代表者

塩谷 圭吾 (Enya, Keigo)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：40392815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙望遠鏡における波面誤差を補正するための、小型の逆研磨鏡の開発を行った。シミュレーションで波面誤差を想定し、それを相殺するように素子を設計した。制作法の比較等のうち、有効径30mmの素子を制作し、鏡面形状を干渉計で計測した。いくつかの仮定のもと、得られたデータは、赤外線宇宙望遠鏡で太陽系外惑星を直接観測するのに有効であることが示された。

研究成果の概要(英文)：For wave-front correction of a space borne telescope, small correction mirror was developed. Wave-front error was defined by simulation. Then the correction mirror was designed in order to cancel the wave-front error. 30 mm diameter device was manufactured and measured. Based on some assumptions, simulation shows that wave-front correction with this mirror is useful for exoplanet observation using a space infrared telescope.

研究分野：天文学

キーワード：波面補正 鏡 開発 宇宙望遠鏡 系外惑星

1. 研究開始当初の背景

ハッブルなどの宇宙望遠鏡は、大気揺らぎや大気透過率の制約から完全に開放される宇宙空間に位置することによって、地上望遠鏡では代替の効かない極めて有効な観測を供する。

宇宙望遠鏡においても、前世代より高い性能を追求すると、大型、超高精度が求められる傾向がある。しかしそれに伴って高コスト化、計画の超長期化、技術的リスク等も深刻になる。宇宙望遠鏡の設計・開発では徹底的な堅実性が求められる。そのため複雑な調整・駆動機構を導入して望遠鏡の性能を補完しようとしても、却ってコスト、リスクの増大、実現性の低下に直結しかねない。いっぽう、宇宙望遠鏡の形状誤差は、地上望遠鏡における大気擾乱のような高速では変動せず、むしろ変動しない成分が大きい。

そのような状況のもと、世界の加工技術の進歩も把握し、申請者らは本研究を開始するにいたった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙望遠鏡の性能を改善する「逆研磨鏡」を開発実証することである。そのコンセプトを、図1に示す。これは、高精度の宇宙望遠鏡を製造する代わりに望遠鏡の形状誤差を相殺するように研磨した小型鏡を追加するもので、いわばコンタクトレンズの働きをする。高精度の宇宙望遠鏡は地上望遠鏡では代替できない観測を供するが、近年とくにコスト、開発期間、技術的リスクの増大が深刻な問題となっており、ある意味で実現性の限界状態にある。本研究はこの問題にたいする対策となることを目指す。

本研究のコンセプトは、科学衛星から実用衛星まで広く適用できる可能性がある。そのなかで例として、本研究を具体的に進めるにあたっては、赤外線宇宙望遠鏡での系外惑星観測を想定する。

3. 研究の方法

まず必要なのは、逆研磨鏡を高い精度で実現するための、加工条件の研究、最適化であった。材料については、BK7 ガラス、石英、金属（アルミ、銅、ステンレス）その他について比較した。それらの材料にたいして、文献調査および小片サンプルを制作し、研磨条件、研磨面の微細な表面構造および大局的形状を、表面粗さ測定装置（ZYGO 社製 NewView）およびレーザー干渉計（ZYGO 社製 GPI-ZP）で計測した。比較検討の結果、BK7 ガラスを基盤として用いることが、本研究には最適と判断した。

本研究で目指す逆研磨鏡は、宇宙望遠鏡の形状誤差を補正するものであるが、実証において宇宙望遠鏡を用いることはできない。したがってその代わりに、コンピューターシミュレーションにて乱数を用いて鏡面誤差を発生させることで定義した。より具体的には、まず、波面誤差の RMS (root mean square) を 350 nm と定めた。これは赤外線天文衛星搭載の大型望遠鏡における値として典型的なものである。ただし、RMS だけでは波面誤差の空間分布までは規定できない。そのため Power Spectrum Density を以下の関数形で規定した。

$$PSD(x) = PSD(0) / \{1 + (x / \lambda_c)^2\}$$

ここで、 x は空間周波数、 $PSD(0)$ 、 λ_c および λ は望遠鏡ごとに異なるパラメータであり、ハッブル望遠鏡においてそれぞれ $2.2 \text{ nm}^2\text{m}^{-2}$ 、 4.3 m^{-1} 、 $2.9 \mu\text{m}$ であり、VLT (Very Large Telescope) では $1.7 \text{ nm}^2\text{m}^{-2}$ 、 0.35 m^{-1} 、 $3.1 \mu\text{m}$ である。これらを参考に、本研究では $\lambda_c = 1.2 \text{ m}^{-1}$ 、 $x = 3.0$ を用いた。 $PSD(0)$ は $RMS = 350 \text{ nm}$ となるように規格化する。

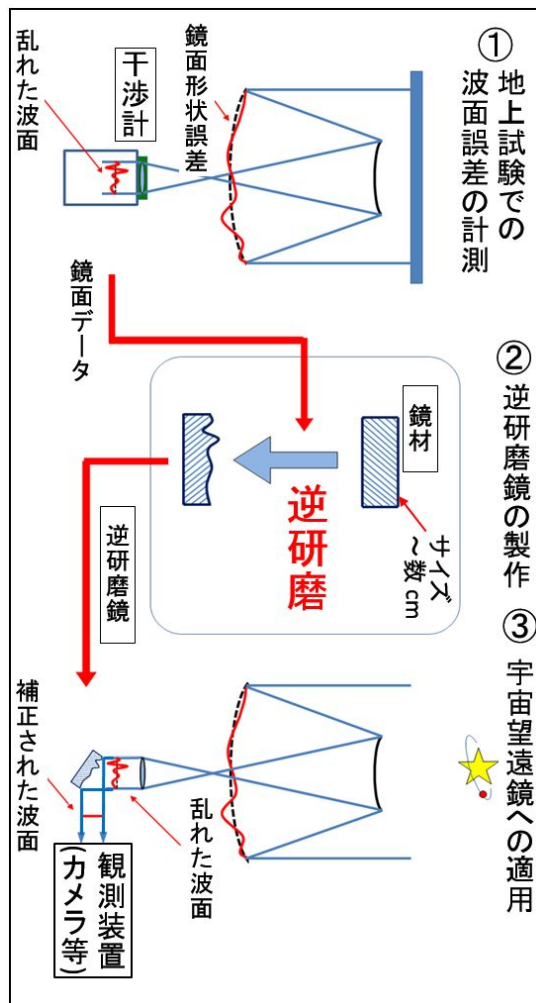


図 1. 本研究で目指す逆研磨鏡のコンセプトの概略図。

鏡面誤差を定義したら、それを用いて、逆研磨鏡の試作鏡の設計を行った。同じ鏡面誤差にて鏡の直径は任意なので、制作実現性と精度を考慮して実サイズを決定する。ここで実サイズが小さ過ぎると直径に対して製造可能な鏡面誤差の空間周波数成分が限定されてしまう。いっぽう実サイズを大きくし過ぎると製造実現性や重量、コンパクトさ等が悪くなる。検討の結果、有効径 30 mm, 端部も含めた物理径 50 mm とした。厚さは加工との相性を考慮し、15 mm とした。なお、ここで想定した加工法は、磁気流体を利用するものである。

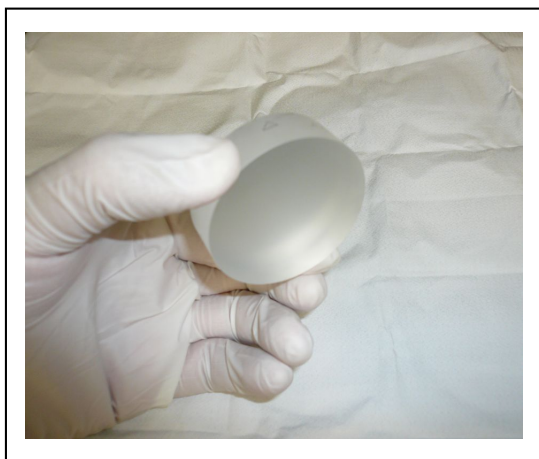


図 2. 試作した素子の例（これは BK7 ガラスによる 50mm のもの）。磁気流体を利用した加工法を用いている。

逆研磨鏡の母材の加工が完了したら、鏡面側の全体にアルミニウムを蒸着して鏡面化する。アルミニウム膜の厚さは 200 nm 程度とした。

逆研磨鏡の鏡面に対して、レーザー干渉計 (Zygo 社製 GPI-XP) を並行光モードで用いて鏡面形状を計測する。そして得られたデータを設計と比較し、波面誤差を補正する能力を評価する。

4. 研究成果

本研究で制作したサンプルの一例を図 2 に示す。これは BK7 ガラス材を用いたものである。また、試作した逆研磨鏡をレーザー干渉計 (ZYGO GPI-XP) で計測したデータ (3次元形状データ) の例を図 3 に示す。ここでカラーコントラストは、青が低地を、赤が高地を表す。

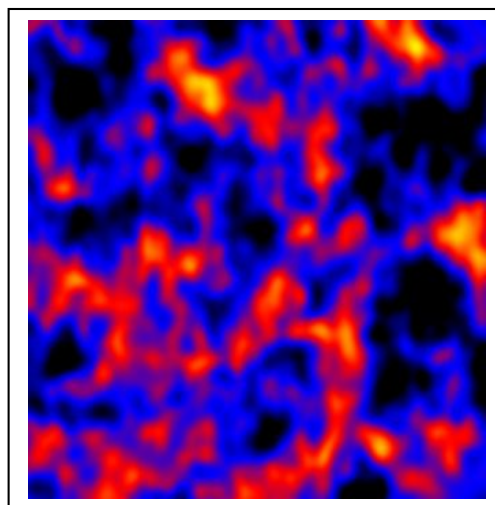


図 3. 試作した逆研磨鏡をレーザー干渉計で計測したデータの例。加工の空間分解能 (最小加工サイズ) の制約の範囲において、設計とよく一致していることが解った。

この計測結果から、加工の空間分解能 (最小加工サイズ) の制約の範囲において、設計とよく一致していることが解った。設計上の鏡面形状と計測で得られた鏡面形状の差分をとることで、逆研磨鏡による波面補正の残存誤差成分の最小値を導出した。ここで「最小値」と言うのは、逆研磨鏡の適用時のアライメントの精度、ビームサイズとの一致の精度、などは存在しない、理想的な状況における波面補正の精度に相当するためである (また、これは研究開始段階より承知の上のことではあるが、逆研磨鏡による波面補正は予測された鏡面誤差成分に対してのみ有効である)。

この理想的な想定のもと、試作した逆研磨鏡による波面補正が太陽系外惑星の高コントラスト観測における有効性について解析した。より詳しくは、高コントラスト観測のためチェッカーボード型のバイナリ瞳マスクコロナグラフを想定した。ここで言うコロナグラフとは、主星の光を、波動光学的効果によって選択的に何桁も低減し、主星のごく近傍にある太陽系外惑星の直接観測を可能にする光学系のことである。バイナリ瞳マスクとは、光学系の瞳面 (入射開口) の形状を制御するマスクである。透過率が 1 または 0 の部分からなる。チェッカーボード型というのは、バイナリ瞳マスクの形状が、長方形の微小開口から成っていることを意味する。ここで想定したプラットフォームは赤外線宇宙望遠鏡であり、観測波長は 10 micron である。

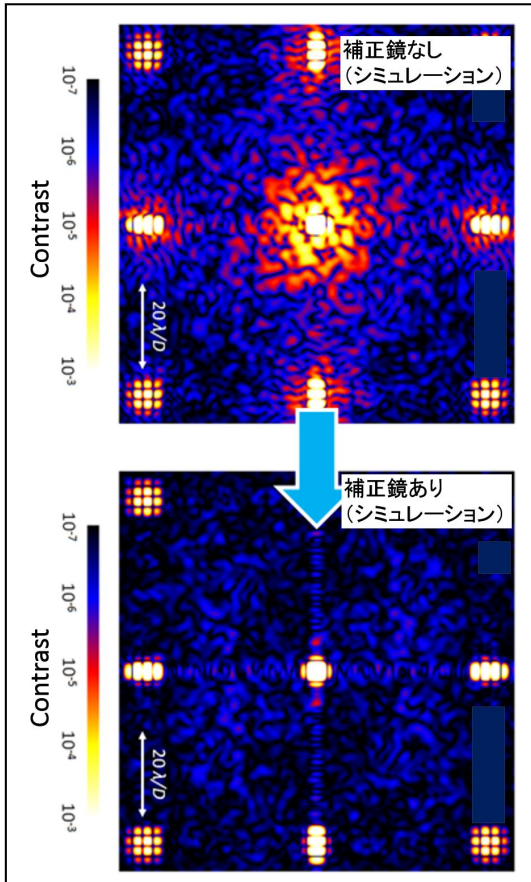


図 4. 補正鏡の効果を示すシミュレーションの結果の一例。

このような想定のもの、逆研磨鏡による補正ありの場合となしの場合において、コロナグラフによる高コントラスト像をシミュレーションによって解析した結果を図 3 に示す。中心部にある最もあかるい部分が主星像位置に対応している。設計上の星像は、その上下左右など図の周辺に近い部分にスポットを持ち、XY 対象である。そして主星像中心の右上、左上、左下、右下の領域に、主星からの光量が極めて小さい部分（暗領域/dark region）が生成されている。これがコロナグラフの効果で、じゅうぶんにコントラストが高い暗領域に系外惑星が位置していれば、直接観測が可能になるという狙いである。

ここで、逆研磨鏡なしの場合には、主星像のまわりに、主星光のしみ出しが生じていることが解る。これは波面誤差によるスペックルとして解釈できる。その結果、主星近傍のコントラストは 4 ~ 5 桁に留まっている。中間赤外域における系外惑星観測のコントラストとして求められる値は 6 桁であるから、この状況では系外惑星の直接観測能力は非常に限定的である（画像差分などの解析的手法を併用すれば可能性は高まるが、観測時間の増加、差分法にともなう誤差などの新た

な課題が生じる）。

いっぽう、図 4 の下段は、逆研磨鏡で波面補正をした場合の解析結果を示したものである。波面補正の結果、スペックルが大幅に低減されており、コロナグラフの設計上の高コントラスト像に近づいている。主星像の周辺のコントラストは 6 桁程度以上となっており、系外惑星を直接観測することが（差分法を併用することなしでも）可能なレベルになっている。

さらに本研究では、「鏡面形状の測定 + シミュレーションによる解析」を超えて、実験的に評価する光学系の製作を進めた。それを用いた実験、および研究全体を発表することは今後の課題であり、今後も研究を継続する。

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 2 件)

Keigo Enya & Naofumi Fujishiro, “Wideband spectral disperser of ZnS for exoplanet characterization”, Publications of the Korean Astronomical Society (2016) in press

Keigo Enya, “Legacy of the SPICA Coronagraph Instrument (SCI): toward exoplanet science with space infrared telescopes in future”, Publications of the Korean Astronomical Society (2016), in press

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩谷 圭吾 (ENYA, Keigo)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：40392815

(2) 研究分担者

櫛 香奈恵 (HAZE, Kanae)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50635612

(平成 27 年度)

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者：

村上 浩 (MURAKAMI, Hiroshi)