

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03957

研究課題名(和文) 極限補償光学のための高空間・時間分解能を持つ点回折干渉型波面センサの開発

研究課題名(英文) Development of the point-diffraction type wavefront sensor with high spatial resolution and high time resolution

研究代表者

木野 勝 (Kino, Masaru)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：40377932

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：点回折干渉型波面センサにおいて最も重要な光学素子であるピンホール付き偏光ビームスプリッタとして、当初はワイヤグリッドを応用した形式を採用し試作を行った。しかし光学特性を評価したところ、本来遮蔽すべき偏光成分の漏れ込みがやや大きく、また漏れ光の位相が本来の透過成分とずれているため、目標とする性能に達しないことが判明した。そこで代替案として複屈折結晶を用いたピンホール付き偏光ビームスプリッタを考案した。数値シミュレーションの結果ではワイヤグリッド型を上回る性能が達成できる見込みである。波面センサとして完成には至らなかったが、本成果を活かし開発を今後も継続していく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系外惑星の観測は現在の天文学における重要な研究課題の一つである。その実現には高性能な補償光学が必須であり、その性能は波面センサによって制限されている。点回折干渉方式をはじめとする位相測定型の波面センサは、地球型惑星の直接撮像など今後の太陽系外惑星研究において不可欠であるが、現状では世界で数例が稼働を始めた段階である。その中でも点回折干渉方式は点回折素子の制作が困難な反面、測定精度やレンジ、光の利用効率の点で他の方式に勝っている。本研究で得られた知見は今後の点回折干渉型波面センサの実用化において大いに活用できる。

研究成果の概要(英文)：In the initial plan, we were going to apply the wiregrid type polarizer to the pinhole element. The optical performance of the prototype pinhole element was insufficient, we devised an alternative method using a birefringent crystal. Numerical simulation revealed that the birefringent method pinhole-element has higher performance than the wire grid method. The wavefront sensor has not been completed, we will continue the development using the result.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：補償光学 波面センサ 光干渉

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

地上からの天体観測では大気の揺らぎにより結像性能が悪化する。そこで入射光の波面揺らぎをリアルタイムに計測し、補償することで回折限界に近い星像を取得する補償光学(Adaptive Optics : AO)装置が開発され使用されてきた。現在中の AO の多くは結像性能の向上という点において十分な性能を発揮しているが、残存した波面誤差が散乱光となり星像の周囲に広がるため、太陽系外惑星の検出など高いコントラストが要求される観測には不十分であった。

そこで、従来の AO よりも高い空間・時間周波数まで波面形状を計測し補償することで残存波面誤差を減らした極限補償光学(ExAO)装置の開発が進められている。我々の研究グループでは ExAO にコロナグラフを組み合わせる太陽系外惑星の検出を目指す装置”SEICA”(Second-generation Exoplanets Imaging with Coronagraphic Ao)を開発しており、この装置に組み込む高精度な波面センサの開発も並行して行う必要があった。

AO を構成する 2 つの重要な要素である波面センサ(WaveFront Sensor:WFS)と可変形鏡(Deformable Mirror:DM)のうち、DM については近年の微細加工技術の進歩により性能向上が著しく、素子数 4000、応答速度 50kHz を有する製品が市販されている。現状において AO の性能を制限しているのは WFS であり、これを向上させることが ExAO 実現の鍵となる。WFS の性能を示すパラメータとして、①測定点数、②測定時間、③測定精度、④感度が挙げられる。天文用の AO では微弱な星の光を波面計測に使用するため①・②と③・④は排他関係となり両立が難しい。本研究では原理的に測定誤差が小さく高速読み出しに適した干渉方式の採用、および入射光の利用効率の向上と使用する波長の広帯域化によりこの問題を解決を目指した。

## 2. 研究の目的

光の利用効率を極限まで高めた新しい点回折干渉(PDI)型 WFS を開発する。この WFS は測定点数 492 点を精度 20nm で毎秒 8,500 回測定可能な性能を持つ。完成した WFS 別予算で開発中の系外惑星探査装置 SEICA[研究業績 6]に組み込み、十分な性能を発揮することを確認する。最終的に京都大学が開発した口径 3.8m のせいめい望遠鏡(2019 年より稼動)に搭載予定の SEICA に組み込み、性能を評価することまでを目的としていた。

## 3. 研究の方法

PDI-WFS の中で最も重要な光学素子は参照星の焦点に置かれるピンホール偏光ビームスプリッタ(ピンホール PBS)である。通常の PDI-WFS ではピンホール内部/外部を通る光に対して位相差をつけた上で干渉させるが、本 WFS では偏光を利用してピンホール内部/外部を通る光に対して位相が異なる複数の干渉光を作り出し同時に取得すること特長とする。

中心のピンホールを通った偏光成分は空間フィルタとしての作用により高精度な球面波に整形される。一方外周部を通る偏光成分は入射光の波面形状を維持する。検出器の直前に 45° の角度で置かれたサバール板により二つの光の共通ベクトル成分を抽出し干渉させる。ピンホール PBS での透過光・反射光がサバール板によりそれぞれ 2 つに分離されるため、最大で 4 つの異なる位相状態を同時に取得できる。

当初はピンホール PBS としてピンホール内部と外部で偏光方向が直交したワイヤグリッドを使用する計画であったが、性能評価を進める中で目標性能に到達しない可能性が濃厚となったため、代替案である複屈折結晶を用いた方式に移行した。

## 4. 研究成果

### 4.1 ワイヤグリッド型ピンホール PBS

ピンホール内部と外部で偏光方向が直交したワイヤグリッドを使用したピンホール PBS を実際に制作するにあたり、透過光と反射光でともに高い偏光分離度を得ることが難しく、描画条件を変えての試行錯誤に予定外の時間を費やすこととなった。最終評価を行った試作ピンホール PBS の描画パラメータを表 1 に、顕微鏡による拡大写真を図 1 に示す。

表 1 ワイヤグリッド型ピンホール PBS のパラメータ

基板材質	合成石英
薄膜材質	金
膜厚	60 nm
線幅	100 nm
線ピッチ	230 nm
ピンホール径	10 $\mu\text{m}$
ワイヤグリッド描画領域	600 $\mu\text{m}$

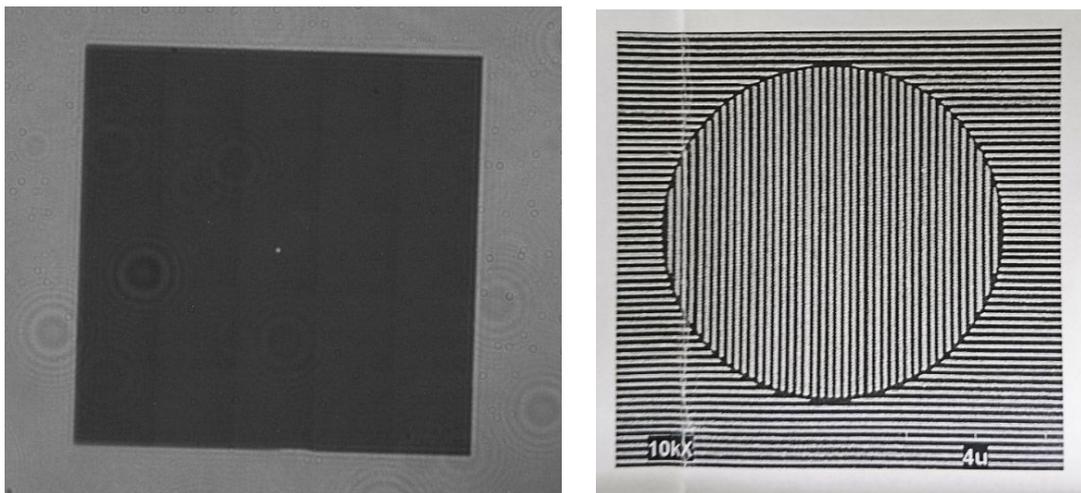


図 1 制作した WG 式ピンホール PBS の全体像(左)とピンホール部分の電子顕微鏡写真(右)  
描画領域の外形は 600  $\mu\text{m}$ 、ピンホール部分は 10  $\mu\text{m}$

制作したピンホール PBS の偏光分離度を光学的に測定したところ、ピンホール内部では縦偏光と横偏光の光量比が 4.7:1、ピンホール外部では同 1:3.0 であった。初期設計段階のシミュレーションでは消光比が 1:3 以上であれば補償光学で必要な波面測定精度 rms ~ 60 nm が達成されると試算しており、上記測定結果は辛うじてこれを満たす値である。

次に、この素子に対し PDI で使用する場合と同じ F/30 で収束する直線偏光を入射し、干渉光を評価したところ、設計時のシミュレーションとは異なり十分な干渉縞のコントラストが得

られなかった。本干渉計は位相が90度ずつ異なる4つの干渉縞を同時に取得する方式であるが、0度の干渉縞のコントラスト(半振幅/平均強度)は設計値が0.6に対して0.29、90度では0.11、180度では0.20、270度では0.58であり、全て設計値を下回った。より詳細にピンホールPBSの偏光特性を測定した結果、本来遮蔽されるべき偏光方向の光が漏れ込む時に、透過した光と同じ位相であると想定していたが、実際には大きく位相が異なっていることが原因と判明した。

以上の測定結果より、漏れ光の位相のずれも考慮して4つの干渉縞画像から波面形状を求め式を作り直した。この式では入射光の位相によって測定誤差が発散する場所があるため、補償光学への適用には好ましくない、また干渉縞のコントラストが低いため、暗い星を光源とした場合には発散部分以外であっても十分な測定精度とは言い難い。そのためワイヤグリッド方式による実用的なピンホールPBSの作成は断念した。ワイヤグリッド型ピンホールPBSの光学評価と位相再構築の計算手法については参考文献[1]、[2]にまとめられている。

#### 4.2 複屈折型ピンホールPBS

ワイヤグリッド方式に替わるピンホールPBSとして、複屈折結晶を用いた方式を考案し制作を進めている。複屈折結晶を利用することで制約が多かった薄膜の微細加工( $\sim 0.1\mu\text{m}$ の構造)を避け、図2に示すように $24\mu\text{m}$ 、深さ約 $1\mu\text{m}$ の穴加工と充填のみとなる。透過光は常光・異常光の2成分で異なる位相差を持つのに加え、位相差ほぼ0の反射光も使うことで計3位相の干渉縞を形成する。この方式は入射光が直線偏光ではなく無偏光光なので光の利用効率が高い利点もある。基板材質には $\text{TiO}_2$ (ルチル結晶)を用い、ピンホール部分の加工は反応性イオンビームエッチングで穴あけ加工する[5]。続いて $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 層をスパッタリングで形成した後に表面を平らに研磨する。

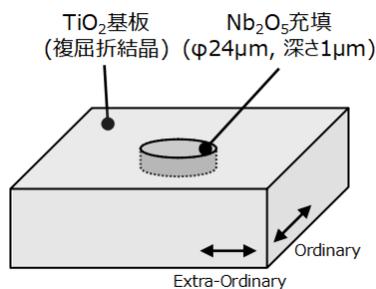


図2 複屈折結晶を用いたピンホールPBSの模式図

透過光の直線偏光2成分と反射光で計3位相を同時に取得する

研究期間後半での方針変更であったため、本方式での実機制作には至らなかったが、数値シミュレーションにおいては5等級程度の参照星に対して全幅1波長の測定レンジ全域で要求仕様であるrms 60 nmの測定精度が達成できることが確認できた。なお、ピンホールでの透過光・反射光の両方を更に偏光2成分に分離するという方式はワイヤグリッド型と共通であるため、ワイヤグリッド型を想定して構築したPDI-WFSの周辺光学系や性能評価のための光学系は大半をそのまま使用できる。本研究で得られた知見・設備を活用し、研究期間終了後も開発を継続していく。

## 参考文献

1. 西岡秀樹、木野勝、山本広大, "極限補償光学装置の開発：直接位相計測型波面センサの開発", 日本天文学会 2018 年秋季年会 V251b
2. 西岡秀樹, "点回折干渉計を用いた極限補償光学用波面センサの開発", 京都大学大学院理学研究科 2019 年度 修士論文
3. 山本広大、津久井遼、木野勝、他 8 名, "せいめい望遠鏡搭載にむけた太陽系外惑星撮像装置の開発", 日本天文学会 2019 年秋季年会 V204a
4. 津久井遼、山本広大、木野勝、栗田光樹夫, "点回折干渉計方式を用いた補償光学用波面センサの開発", 日本天文学会 2020 年春季年会 V222b
5. Akihiro Matsutani et al., 2012, "SF6-Based Deep Reactive Ion Etching of (001) Rutile TiO<sub>2</sub> Substrate for Photonic Crystal Structure with Wide Complete Photonic Band Gap", Japanese Journal of Applied Physics 51, 098002
6. 津久井遼, "点回折干渉計方式を用いた極限補償光学用波面センサの開発", 京都大学大学院理学研究科 2020 年度 修士論文

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西岡秀樹、木野勝、山本広大
2. 発表標題 極限補償光学装置の開発：直接位相計測型波面センサの開発
3. 学会等名 日本天文学会 2018 年秋季年会V251b
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本広大、津久井遼、木野勝、他8名
2. 発表標題 せいめい望遠鏡搭載にむけた太陽系外惑星撮像装置の開発
3. 学会等名 日本天文学会 2019年秋季年会V204a
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津久井遼、山本広大、木野勝、栗田光樹夫
2. 発表標題 点回折干渉計方式を用いた補償光学用波面センサの開発
3. 学会等名 日本天文学会 2020年春季年会V222b
4. 発表年 2020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
研究分担者	入部 正継  (Iribe Masatsugu)  (60469228)	大阪電気通信大学・工学部・教授    (34412)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	山本 広大 (Yamamoto Kodai)  (70738319)	京都大学・理学研究科・研究員    (14301)	