

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287033

研究課題名(和文)小口径望遠鏡用の低コスト可視補償光学装置の開発

研究課題名(英文)Development of a low-cost adaptive optics system in optical for small telescopes

研究代表者

峰崎 岳夫 (Minezaki, Takeo)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60292835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は市販製品を応用して中小口径望遠鏡に適した安価な補償光学装置を開発し、ハッブル宇宙望遠鏡、あるいは高価な補償光学装置を搭載した大口径望遠鏡によってのみ達成されている高い角度分解能に匹敵する画像の取得を、安価かつ容易に実現することを目的としている。補償光学装置の鍵となる可変形鏡については、 piezoelectric actuatorを使用した市販の製品を採用し、口径1-1.5m望遠鏡による可視観測を想定した補償光学システムを構築し、実験室内での調整と性能評価を行っている。今後、国内小口径望遠鏡に搭載して試験ののち、気象条件の良い海外小口径望遠鏡に搭載して試験を行い、補償光学装置としての性能評価を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：We develop a low-cost adaptive optics system in optical wavelength for small telescopes. It aims to obtain high angular-resolution images that are only achieved by the Hubble space telescope or by the giant telescopes with sophisticated and expensive adaptive optics systems in near-infrared. Commercially available components will be extensively used in our system for cost reduction, in particular, we adopt a inexpensive piezoelectric deformable mirror as a key component. The fabrication of a adaptive optics system for the optical observations using the telescopes with an aperture diameter of 1-1.5 m was completed. We are making an adjustment and examining its performance in laboratory, and after that, we are planning to carry out a test observation using a small telescope in Japan. We are also preparing an observation using a small telescope built at the site where the weather condition is excellent in the world to examine the real performance of our low-cost adaptive optics system.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：補償光学 光赤外線天文学

1. 研究開始当初の背景

1990年代以降の技術発展により主鏡口径8-10m級の大型望遠鏡が多数建設され、非常に暗い天体の観測が実現されるようになった。しかし、大気の影響によって天体の像は揺らぐ(シーイングと呼ばれる)ため、地上望遠鏡では角度分解能は望遠鏡の光学上の限界(回折限界)ではなく、大気のシーイングによって制限されてしまう。このため大型望遠鏡によっても角度分解能の大きな向上はなく星像の半値全幅(FWHM)で1角度秒程度であり、ハッブル宇宙望遠鏡(HST)の後塵を拝してきた。

この状況を覆しつつある技術が補償光学である。シーイング、すなわち本来平行であるはずの星からの光の波面は大気によって歪んでしまうが、これをリアルタイムに測定し、表面形状を大気揺らぎに追従して高速に変化させることができる鏡(可変形鏡)によって波面揺らぎを補償する技術が補償光学である(図1)。これにより望遠鏡の回折限界に迫る星像を実現し、これにより宇宙望遠鏡を凌ぐ角度分解能を達成することが可能となる。補償光学技術は大型望遠鏡の建設と同時期に技術開発が始まっていたが、とくに近年には高精度の補償光学装置の開発が進み、大気による波面揺らぎが比較的小さい近赤外線波長域において、FWHM~0.1角度秒に迫る、回折限界に近い角度分解能を得ることができるようになった。このようにして角度分解能の観点からもハッブル宇宙望遠鏡に迫る性能が実現されつつある。

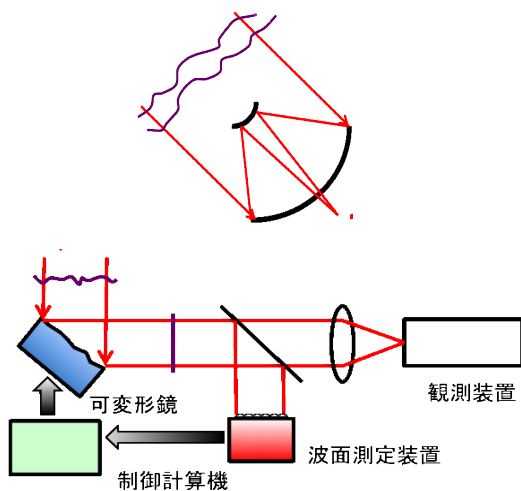


図1: 補償光学装置の概念図。大気揺らぎによる天体からの光の波面の揺らぎを測定し、リアルタイムでこれを補償して、星像を改善する。

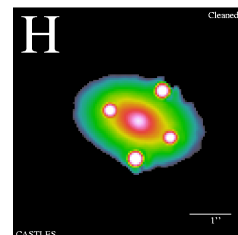
実はこれまでの補償光学装置のほとんどは大口径望遠鏡での運用に限られていた。このため多数の研究者の求める多様な天文学的需要に答えるには難しい状況にある。その大きな理由の一つは補償光学装置が非常に高価であることにあった。しかし、最近の技術の進展はこういった状況をも変える可能性を示している。補償光学を支える主要技術は可変形

鏡、制御計算機、波面測定装置であるが、とくに可変形鏡については最近の微小電気機械素子(MEMS)技術の発展により、小開口ながら多素子かつ安価な製品が生産されるようになった。近年のコンピュータ技術の発展が制御計算機に大きな進展をもたらしていることは言うまでもない。波面測定装置についてもCCD/CMOSカメラ技術の進展から安価で高感度な製品が実現されつつある。こういった状況を背景に天文学分野のみならず、医療分野においても補償光学技術の応用が検討され、さらに関連装置の入手も容易になることが期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、補償光学装置を構成する部品に安価な市販製品を積極的に採用し、観測適地に設置された小口径(主鏡口径1-2m級)望遠鏡による可視光波長域での観測を想定した、安価な補償光学装置を製作することを目的とする。本装置によってもFWHM~0.1-0.2角度秒という、ハッブル宇宙望遠鏡や巨大望遠鏡に搭載された補償光学装置に迫る角度分解能を達成できると期待される。

天体が明るくとも角度分解能が研究の進展を阻んでいる天文学の分野は多く、比較的豊富に観測時間を費やすことのできる小口径望遠鏡において高い角度分解能が実現できれば、天文学研究上の多様な展開が期待できる。遠方の明るいクエーサーの手前にある銀河の重力によってクエーサーからの光が曲げられ、クエーサーが2ないし4個の像に分裂して見える現象(重力レンズクエーサー)の研究はその好例である。クエーサーの各像の明るさは一般的に時間変化するが、クエーサーから観測者に届くまでの光路が異なるため、各像の明るさの変化には時間差が生じる。また重力源となっている手前の銀河中の星の重力の影響によってもクエーサー像の明るさは微妙に変化する。これらの現象を捉えるにはクエーサー像のそれぞれを分離して明るさを測定する必要があるが、像間の離角は1角度秒程度以下しかないため良好な観測条件下におけるシーイングと同程度であり、高度で微妙な画像解析技術が必要とされる。小口径望遠鏡に補償光学が搭載され、定常的に高角度分解能が実現されれば、このような観測に大きな



進展が見込まれる。

図2: 重力レンズクエーサー像の例(The CfA-Arizona Space Telescope Lens Survey[<http://www.cfa.harvard.edu/castles/>]より)。

### 3. 研究の方法

#### (1) 想定する大気揺らぎと望遠鏡口径

大気揺らぎの細かさの指標としてフリードパラメータ ( $r_0$  と表記) という量が使われる。 $r_0$  より小さい範囲の大気を通過した天体からの光の波面はおおよそ揃っており、その光を取り出して結像させれば、 $r_0$  に対応した回折限界に相当する角度分解能が達成できると期待される。従って補償光学では可変形鏡によって、大気を通過した天体の光線について主鏡口径に対して  $r_0$  サイズの空間スケールまで波面を分割して補正することが求められる。世界最高レベルの観測サイトの場合、大気シーイングは星像 FWHM が 1 角度秒を下回る。例えば波長  $0.5 \mu\text{m}$  の可視波長域においてシーイング FWHM  $\sim 0.5$  角度秒の場合、フリードパラメータは可視波長域で  $r_0 \sim 0.2 \text{ m}$ 、波長  $2 \mu\text{m}$  の近赤外線波長域で  $r_0 \sim 1 \text{ m}$  となる (図 3)。従って、天体からの光線 (瞳) の分割の細かさに関する条件は、巨大望遠鏡で運用されている近赤外線観測を目的とした補償光学装置と小口径望遠鏡で運用する可視観測を目的とした補償光学装置は同等であることがわかる。可視観測装置は近赤外線観測装置と比べて同等の視野・性能に対してはるかに安価・軽量にできることから、本研究では世界有数の観測サイトにおける小口径望遠鏡・可視観測装置の運用を想定し、シンプルかつ安価な補償光学装置を目指す。

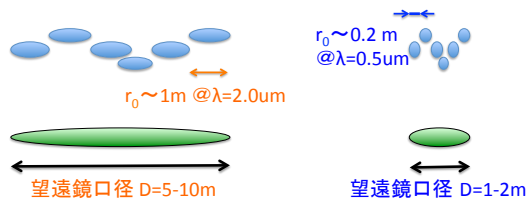


図 3: 大気揺らぎと観測波長、望遠鏡口径の関係。大気の屈折率がおおよそ揃っている空間スケールの指標となるフリードパラメータ  $r_0$  は観測サイトのシーイングに反比例し、観測波長の 1.2 乗に比例する。

#### (2) 可変形鏡についての検討

前述の大気条件の検討から波面補正における波面分割数は  $N \sim (D/r_0)^2 \sim 25$  (主鏡口径 1m の場合) 以上が必要となり、これはそのまま可変形鏡の鏡面制御素子数についての必要条件となる。また可変形鏡は天体からの光の波面揺らぎを補正できるだけの十分な変形量が必要である。前述のような大気条件を仮定した場合、大気揺らぎの性質から波面の傾きの補正のためには  $\sim \pm 4.0 \mu\text{m}$  の補正量が、また焦点ずれや非点収差など低次の光学収差に相当するモードについて  $\sim \pm 0.5 \mu\text{m}$  程度の補正量が必要である。また大気の揺らぎは時々刻々と変化していくため、波面の補正をそれに追従させるために 10 ms 以下の応答時間で高速に鏡面形状を制御する必要がある。

これらの性能要件を満たし、なおかつ安価な市販製品として我々はソーラボ社で販売さ

れている piezo 素子型可変形鏡 DMP40 を採用した (図 4)。本製品は 3 素子のアクチュエータによる  $\pm 20 \mu\text{m}$  の傾斜補正に加え 40 素子のアクチュエータにより  $\pm 6 \mu\text{m}$  以上の焦点ずれ・非点収差の補正能力を持ち、アクチュエータの全制御範囲の動作について 0.5 ms (傾斜補正については 5 ms) の応答時間を実現している。従って DMP40 は本研究の補償光学装置が可変形鏡に必要とする性能要件を十分に満たしている。

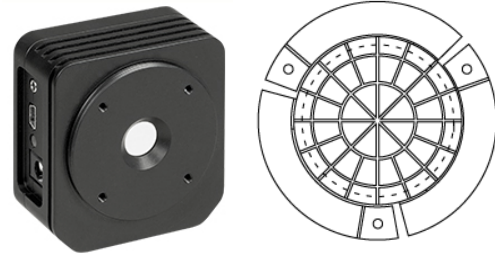


図 4: 可変形鏡 DMP40 外観とアクチュエータ配置図 (ソーラボ社ホームページより)。

#### (3) 波面センサーについての検討

大気揺らぎによる天体からの光の波面誤差の測定のためには、大気揺らぎがなければ本来波面の乱れがないと見なすことのできる、天体 (星) 自身の光を波面センサーに導入し、その波面誤差を測定する。

波面センサーには大振幅・低次の光学波面誤差の測定に一般的に使用される、シャックハルトマン (SH) 型式を採用することとした。SH センサーは光学瞳の位置にマイクロレンズアレイ (MLA) を置き、その各レンズレットによって結ぶ星像の位置をカメラで測定することで、その位置における波面の傾きを測定するものである。光学瞳上のレンズレットの大きさのなかで大きな波面誤差が存在するとそれによる星像が悪化し位置測定が困難になる。従って SH センサーのレンズレット数は  $N \sim (D/r_0)^2 \sim 25$  (主鏡口径 1m の場合) 以上が必要となる。そこで本研究では光学瞳上のレンズレット数が 100 個以上程度になるように MLA を選定した。

刻々と変化する大気揺らぎによる波面誤差を測定するには SH センサーのカメラは高速である必要がある。さらに科学観測のために必要な非常に暗い参照星を使った観測を可能にするには SH センサーのカメラは高感度であることが望ましい。しかしフレームレートが 1kfps を超える、入射光子 1 個までも測定可能な高感度カメラは現在でも非常に高価である。そこで本研究では、製作する補償光学装置を明るい星を参照星とした補償光学機能実証のための実験機と位置づけ (後述)、安価ながらもそこそこの性能をもつアライドビジョンテクノロジー社の Prosilica GE680 を採用した (図 5)。このカメラは  $640 \times 480$  画素を 200 fps のフレームレートで読み出すことが可能であり、観測波長  $0.65 \mu\text{m}$  における量子効率 は 30% 程度、読み出しノイズ 18 e 程度

の性能を持ち、京都産業大学や北海道大学などで大気揺らぎ測定用の SH センサーのカメラとしての実績を持つ製品である。



図 5: アライドビジョンテクノロジー社 Prosilica GE680 カメラの外観 (レンズ部分は附属せず; 同社ホームページより)。

#### (4) 補償光学装置設計の方針

本研究で製作する補償光学装置は、小口径望遠鏡による可視観測における補償光学機能の実証実験機と位置づけた。すなわち広汎な天文学研究への本機の直接の応用は考えず、感度についてはある程度割り切り、シンプルで小型の装置を安価に実現することを基本設計の目標とした。

本研究で採用した可変形鏡 DMP40 は傾斜補正機能と収差補正機能を兼ね備えているところに大きな特徴がある。これまでの多くの補償光学装置の場合、必要とされる補正量の大きい傾斜機能については、より高次の収差補正機能とは分けて専用の補償装置を設置する必要があった。このため装置内の 2 箇所光学瞳を構成する光学系が必要であり、光学系が複雑・大型化する一因となっていた。本機では DMP40 の採用によりその鏡面上に光学瞳を 1 箇所構成するだけでよく、シンプルな光学系の構成に大きく貢献している。

また、通常の補償光学装置では天体からの光を波長で分割し、波面センサーと科学観測用のカメラのそれぞれに導入することが多い。これは科学観測のために天体からの光の損失を極力抑えるためである。しかし本機は実証実験機であるため、科学観測カメラに導入する光の損失を許容し、その損失分を SH センサーに導入することとする。これにより安価なビームスプリッタ、安価な可視波長域の科学観測カメラが利用できた。

#### 4. 研究成果

以上のような基本設計方針および主要コンポーネントの選定に基づき、光学系の詳細設計と本体の製作を西村製作所(京都府京都市)に依頼し、本機を製作した(図 6, 図 7)。

図 6 に本研究で製作した補償光学装置内部配置を示す。望遠鏡からの光は折り返し鏡(M1)にて光学系に導入され、平行光にコリメート後、可変形鏡(DM)上に光学瞳を結ぶ。DM で波面補償された光はカメラレンズによりサイエンスカメラ検出器上に再結像する。その光線の一部はビームスプリッタで SH センサーに

導入される。DM 上の光学瞳は SH センサーの MLA 上に瞳を結び、SH センサーによる測定波面に基づき DM を制御する。また望遠鏡との光軸合わせ用にレーザー発振器を、波面測定校正用にレーザーとピンホールを利用した光源を内蔵している。校正光源は直径  $5\mu\text{m}$  のピンホールにレーザー光を当てて生成した疑似点光源を、ビームスプリッタを用いて望遠鏡搭載時の焦点面と共役な位置に設置した。ピンホールのサイズは回折限界以下であるため収差のない光学波面を生成し、それが望遠鏡搭載時の天体像と同一の光学系を通過し、SH センサーによる波面測定の校正が可能になる。

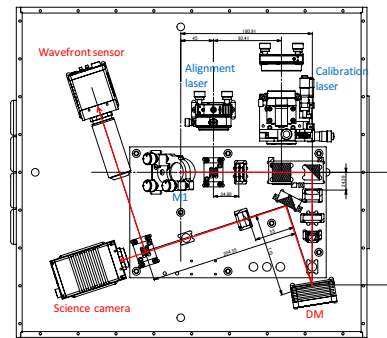


図 6: 補償光学装置の部品配置図。

特殊な光学レンズ・反射鏡を使用せず光学部品は全面的に安価な市販品を採用し、にもかかわらず主要部分が 20 cm x 30 cm 程度の寸法に収まる小型な光学系を実現できた。また多くの光学素子の設置精度を機械工作精度によって確保し、極力調整部分・可動部分を減らすことで調整の簡便化と振動等に対する信頼性の向上をはかった。望遠鏡搭載時・観測開始時の調整を迅速に行うため、光学調整用のレーザー光源と SH センサー・可変形鏡の校正用光源も内蔵した。これらを含めても本体は 50 cm 四方・高さ 20 cm (突起部込み) の寸法に収まる小型のものとなり、小口径望遠鏡にも容易に搭載可能なサイズとなっている。

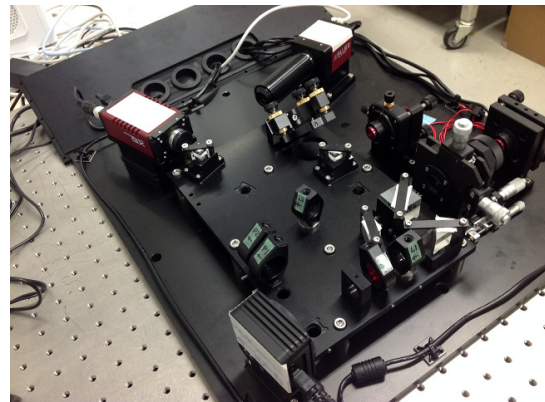


図 7: 完成した補償光学装置の内部構造。

次に実験室内において光学調整ののち、校正光源を使って光学系の性能確認を行った。図 8 に光学調整後の校正光源による SH セン

サーのカメラ画像（MLA の各レンズレットが結像している）を、図 9 にその時のサイエンスカメラの画像を示す。DMP40 の各チャンネルに与える制御パラメータの基準値に近い値にて波面誤差の小さい像が得られ、回折限界に近い像が得られた。

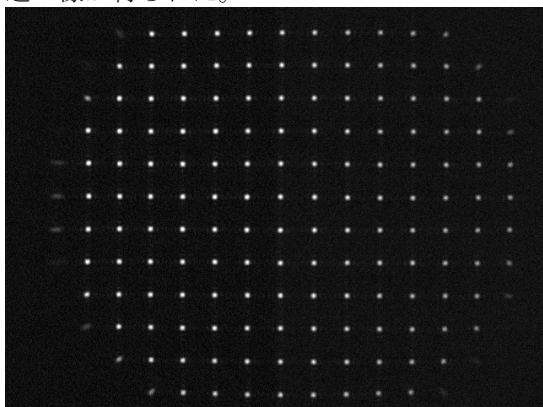


図 8:校正光源による SH センサーカメラの画像（波面フィードバック制御なし、初期値）。

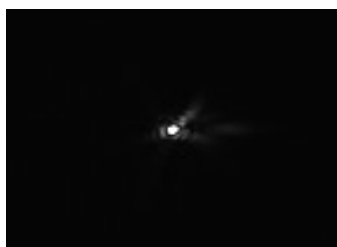


図 9:校正光源によるサイエンスカメラ画像（波面フィードバック制御なし、初期値）。

さらに波面フィードバック制御の動作確認を行った。普通の計算機により、SH センサーカメラフレームレートに近い、 $\sim 200$  Hz の繰り返し周波数にて波面誤差測定・可変形鏡駆動を動作させることができ、大気揺らぎの補償のために必要な速度が実現できていることを確認した。

今後、まず国内の小口径望遠鏡に本機を搭載し、実際の天体と大気揺らぎのもと動作確認と性能評価を行う。世界有数のサイトと比べればシーイング条件が劣るため、本機の性能は十分には引き出せないものの、シミュレーションより予想される性能と比較検討する。最終的には海外の世界有数のシーイング条件を誇るサイトに設置された小口径望遠鏡に本機を搭載し、回折限界の星像 FWHM $\sim 0.15$  角度秒に迫る高い角度分解能の補償光学性能を実証したい。これらの試験観測のため、関係各所と順調に交渉を進めている。

## 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 0 件）

〔学会発表〕（計 8 件）

- (1) 大屋 真、他 10 名、1 グループ、「RAVEN プロジェクト延長の結果」、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学（兵庫県神戸市）
- (2) 大屋 真、「RAVEN プロジェクト II」、第 6 回補償光学研究開発に関する情報交換会、2015 年 9 月 8 日、京都大学（京都府京都市）
- (3) 大屋 真、他 10 名、1 グループ、「RAVEN プロジェクトの進展」、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 19 日、大阪大学（大阪府吹田市）
- (4) 大屋 真、「RAVEN プロジェクト」、すばるの次期補償光学装置と大学における基礎開発研究の連携検討会 III、2015 年 3 月 17 日、京都産業大学（京都府京都市）
- (5) 峰崎 岳夫、「東大 miniTAO 望遠鏡用可視 AO の開発」、すばるの次期補償光学装置と大学における基礎開発研究の連携検討会 III、2015 年 3 月 17 日、京都産業大学（京都府京都市）
- (6) 大屋 真、他 9 名、1 グループ、「RAVEN 試験観測報告」、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月 11 日、山形大学（山形県山形市）
- (7) 大屋 真、他 9 名、1 グループ、「RAVEN の状況」、日本天文学会 2014 年春季年会、2014 年 3 月 21 日、国際基督教大学（東京都三鷹市）
- (8) 大屋 真、「多天体補償光学実証試験機 RAVEN」、すばるの次期補償光学装置と大学における基礎開発研究の連携検討会 II、2014 年 3 月 18 日、国立天文台（東京都）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

峰崎 岳夫 (MINEZAKI, Takeo)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：60292835

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

大屋 真 (OYA, Shin)  
国立天文台・TMT 推進室・特任准教授  
研究者番号：80399287