

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月13日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340038

研究課題名（和文） 太陽multi-conjugate補償光学系の実用化

研究課題名（英文） Implementation of solar multi-conjugate adaptive optics system

研究代表者

三浦 則明 (MIURA NORIAKI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：30209720

研究成果の概要（和文）：

補償光学(AO)は、地球大気ゆらぎの影響による観測像の劣化を実時間で補正する技術である。本研究では、京都大学飛騨天文台の60cmドームレス太陽望遠鏡で多目的に使用できるAOの設計を行った。また、補償が有効に働く視野を広げるためのマルチコンジュゲート補償光学系(MCAO)の開発も進めた。MCAOの光学設計には上空ゆらぎ層の高さの情報が必要である。ここでは、従来夜の観測で二重星を用いて開発されてきたSCIDAR技術を太陽観測にも適用できるように修正した。この方法を用いて、飛騨天文台の上空ゆらぎ層の高さを測定した。さらに、上空波面センサの開発し、MCAO装置を太陽観測に適用した。

研究成果の概要（英文）：

Adaptive optics (AO) is a technique of correcting images degraded with terrestrial atmospheric turbulence in real time. In this study, we designed a solar adaptive optics system that is useful to several purposes at the 60cm domeless solar telescope of the Hida observatory. We developed a multi-conjugate AO (MCAO) system for widening the field-of-view within which compensation by AO is effective. To design the MCAO system, information on heights of turbulent layers is necessary. We modified a SCIDAR technique, which was developed for night-time observations using a binary star, so as to apply it to solar observations, and then applied it to solar observations. Using the modified technique, we measured the heights of turbulent layers over the Hida observatory. We also developed an upper-layer wavefront sensor and then applied a MCAO system to solar observations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学、天文学

キーワード：補償光学、太陽観測、多層共役

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

### 1. 研究開始当初の背景

補償光学系 (Adaptive Optics 以下 AO) は、大気ゆらぎによる画像劣化をリアルタイムで補償するための装置として、太陽望遠鏡においても必須の装備となってきた。しかしながら、太陽が大きく広がった天体であり、従来の AO を単に用いたのでは太陽面のごく狭い領域しかゆらぎ補償がされない、という大きな問題がある。太陽の活動領域に相当する広い領域で波面補償を行うには、上空の大気ゆらぎ層を含む複数の共役面でゆらぎ補償を行うシステム、つまり Multi-conjugate 補償光学系 (MCAO) が必要である。

### 2. 研究の目的

従来太陽観測用に開発してきた AO 装置を発展改良し、MCAO を開発することを目的としていた。具体的な研究課題は以下の通りである。

- (1) 飛騨天文台では、垂直分光器および水平分光器の両者に AO を適用することで、さらに AO を太陽研究に有効活用するため、より本格的な常設 AO システムをドームレス太陽望遠鏡棟の 2 階に設置するプロジェクトを実施することになった。本計画も 2 F に AO 装置があるという前提のもとで MCAO の設計を最初からやり直す必要がある。これに必要な、光学系の設計および必要な素子の購入を実施する。
- (2) MCAO の設計にあたり、上空ゆらぎ補償用の可変形鏡の位置を決定するため、ゆらぎ層の高さの情報が必要である。そのために必要な方法を開発する。
- (3) 従来、夜の MCAO に開発されてきた、CT の原理を用いた波面センサは、太陽が連続的に大きく広がった物体であるため、上手く動作しないことが分かった。これに対して、ここでは主に像の伸縮を補償することを目的とした簡素な上空波面センサを開発する。さらに、開発して方法の性能を、太陽観測において検証する。

### 3. 研究の方法

- (1) 常設 AO 装置に必要なスペックを決定すると共に、4 つの観測モード (AO 使用 / 不使用、垂直分光器 / 水平分光器) を可能にする光学設計を行う。また、AO に必要な素子の性能調査を実施する。
- (2) 従来夜の観測において、二重星を用いて

行なわれる SCIDAR 技術を太陽観測に適用できるように修正し、必要な装置を開発し、太陽観測に適用する。

- (3) 上空波面ゆらぎが存在すると、観測像は局所的に伸縮する。逆に、この伸縮の度合いを計測することによって上空波面のゆらぎを導出することができる。計算機シミュレーションおよび太陽観測を通してこの方法を開発する。さらに、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に開発した MCAO 装置を設置し、太陽観測に適用する。

### 4. 研究成果

#### (1) 常設 AO 設計

図 1 は飛騨天文台 60cm ドームレス太陽望遠鏡の観測室近辺のレイアウトである。観測室の 2 階に新しい常設 AO 装置を置き、真空筒を抜けた直後の光波を鏡を使って AO に導く。波面補償を行った後、垂直分光器または水平分光器に光を導入する。図 2 は、光学設計の結果である。ここでは、レンズを一切使わず、反射率の高い鏡のみを使っている。この結果、全体のスループットとして 50% 以上を達成した。この航路図中、M14 の脱着によって水平分光器か垂直分光器かを切り替えることができる。M1 と M16 を取り外すと、ビームは直接垂直分光器に入射する。また、この状態で別のミラーを挿入すれば AO を介さず水平分光器にビームを導くことができる。

この AO に使用する、新しい可変形鏡および tip-tilt 鏡を入手し、そのテストを行った。可変形鏡には Xinetics 社製の 97 素子のものを採用した。テストの結果、ステップ応答が 0.45ms であり、従来使用していたものより 2.5 倍高速であることがわかった。さらにゼルニケパターンの再現能力について、少なくとも 36 項までモード間のクロストークを無視できることが判明した。これによって、AO 性能の大幅な向上が期待できる。

また、本研究で購入した高速 CMOS カメラと新しい tip-tilt 装置 (PI 社製) を用いて、太陽観測において位置ずれ補償効果のテストを実施した結果、最も良い条件のときには、補正しきれなかった位置ずれ量の RMS が 0.07 秒角以下であることが分かった。これは望遠鏡の分解能以下であり、位置ずれ補正についても大きな効果を期待できる。

MCAO の光学系は、将来的に現在の AO 装置がある場所 (垂直分光器のターンテーブル上) に展開するように設計を行っている。常設 AO 装置完成後、すぐに実験を開始することができる。

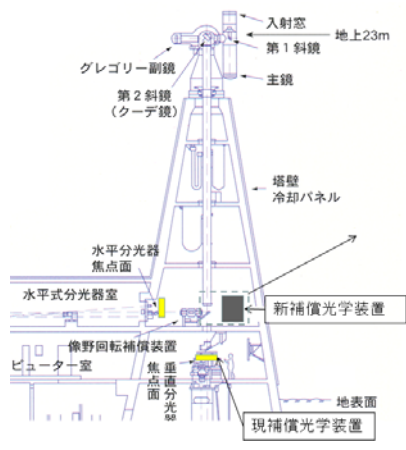


図1 ドームレス望遠鏡概略図

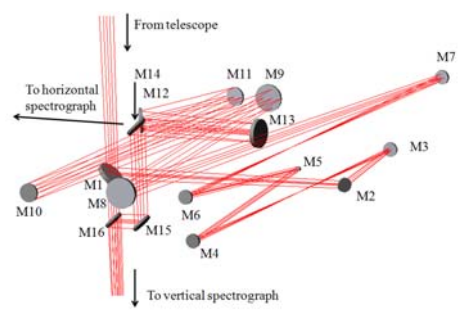


図2 新AOの光学系と鏡の配置

(2) ゆらぎ層の高さの計測

太陽観測において、SCIDARの原理に基づいて上空の揺らぎ層の高さを測定する方法を新たに開発し、その定式化および装置開発を行った。図3は開発した装置の概略図である。望遠鏡焦点上に結像した太陽像を一旦コリメートし、ビームスプリッターで2分割した後、それぞれ視野絞り上に太陽像を結像させる。このとき片方の視野絞りを少しずらすことによって、疑似的に2重星をつくることができる。視野絞りを通過したビームを、ビームスプリッターによって同一光路に戻し、レンズによって瞳像をカメラ上で結像するようにする。ビームスプリッターを少し傾けることで、二つの瞳像を同時に別々に観測できる。このようにして多数枚の瞳像を記録する。

開発した方法においては、同一フレーム内の二つの瞳像の相互相関をとり、それをフレームに渡って平均化することによって、最終的な結果を得ることができる。図4は集合平均相互相関の例である。中心から左側に明瞭なピークが現れており、この位置から揺らぎ層の天文台からの高さを約2.4kmと決定することができる。

この方法を用いて、2012年5~6月に実際に観測を実施した。3日間の観測において125回にわたる計測を実施した。そのうち74データにおいてピークの検出に成功し、揺らぎ層の

高さを求めることができた。図5は、これを表示したもので、天文台上空1~3kmにわたってゆらぎ層が存在していたことがわかった。さらに上空の揺らぎ層の検出が行われた例もあった。

以上により、開発した方法が揺らぎ層の高さ検出に有用であることを確認した。

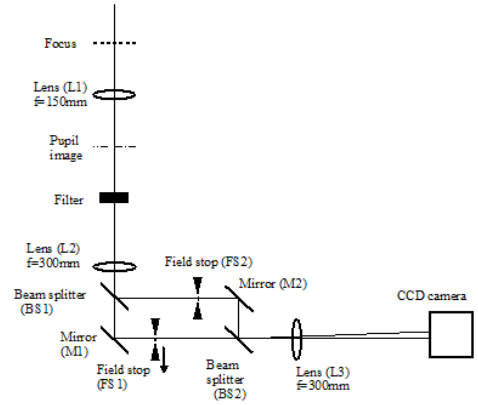


図3 太陽SCIDAR光学系

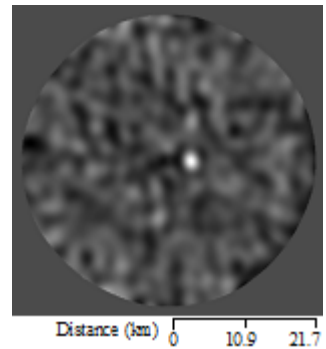


図4 データ処理(集合平均相互相関)の例

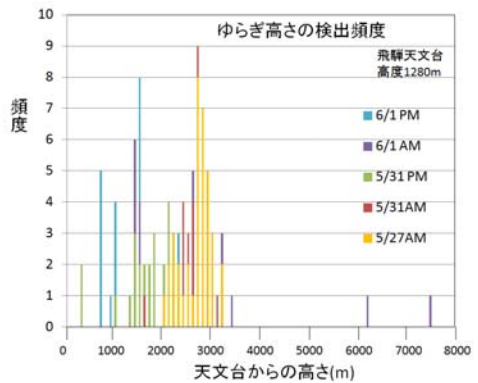


図5 ゆらぎ層高さの検出頻度

(3) 上空波面センサ開発、MCAO実験

ここで開発した新しい上空波面センサは太陽像の伸縮の補正を主目的としたものである。図6は開発する方法の原理図である。上空に揺らぎが存在する場合、経路によって開口内の平均的な傾きが異なる。この結果、観測する点毎に像のずれが異なり、全体としてみる

と、太陽像が局所的に伸縮することになる。  
 逆に、太陽像の伸縮を計測すれば、上空のゆらぎを求めることができる。上空にゼルニケ成分のゆらぎが存在すると仮定した場合、各計測点での位置ずれ量をあらかじめ計算しておき、位置ずれ量とゼルニケ係数との関係性を求めておく。MCAO動作時には、計測点の位置ずれを入力として、行列計算をすれば簡単に上空由来のゼルニケ成分が求められる。この方法では、太陽像上の計測点位置の時間変動を測定するだけでよいので、センサが簡単になるというメリットがある。

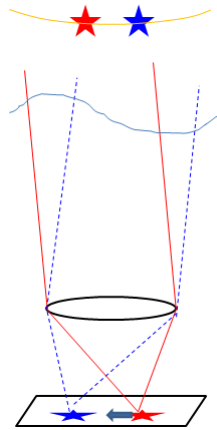


図6 上空波面センサの原理

このセンサを用いたMCAO装置を2012年9月に飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に設置し、実験を行った。図7は実験に用いた太陽像の例である。ここでは、MCAOの効果を評価するために左右の黒点の距離の時間変動を測った。MCAOがうまく動作すれば、この距離の時間変動が小さくなるはずである。図8は結果の例である。横軸がフレーム（時間）、縦軸が黒点間の相対距離である。400フレームのうち前半1/3はAOおよびMCAO両方が動作している場合、中間は通常のAOのみ動作している場合、最後の1/3はどちらもOFFの場合である。前1/3とそれ以外で大きな違いは見られず、MCAOの効果を確かめることはできなかった。

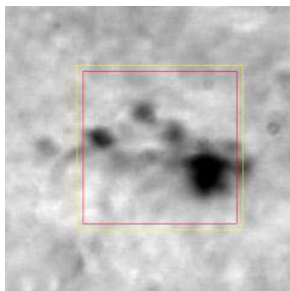


図7 実験に用いた太陽像

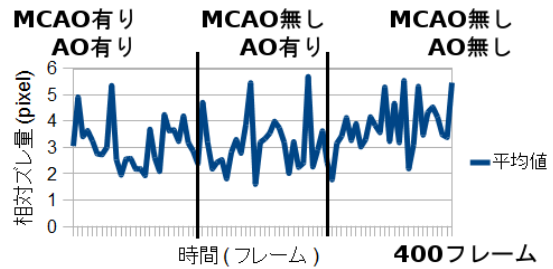


図8 実験結果

良好な結果が得られなかった原因について、詳細な計算機シミュレーションによって調査を行った。この結果、主な原因としては観測時の計測点の数（25点）が少なすぎたことがわかった。また、上空ゆらぎに用いた可変形鏡（MEMS型）のストロークが小さすぎて十分な補償ができなかったことが判明した。さらに、計測点位置の時間変動を求めるために相関を取る際、大きなゆらぎが入ると像が大きく歪んでしまい、精度の良い計測が難しくなることもわかった。

可変形鏡のストローク不足には、常設AO装置が完成後、現AOに用いている電磁型のものを流用することで対処できる。また、計測点不足には、もちろん点数を増やせばいいのであるが、単純に増やすと計算時間がかかってしまい、十分な性能が得られなくなる。この計算時間の問題と相関計算の安定性の問題については対処を既に考えてあり、すでに予備観測を実施して効果を確かめている。近い将来、MCAOを動作させることができると考えている。

## 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6件）

- ① "Solar SCIDAR Technique for Measuring Turbulent-Layer Heights," N. Miura et al. (8名), MNRAS (査読あり), in print (2013)
- ② "Solar Adaptive Optics at the Hida Observatory: Latest Achievements of Current System and Design of New System," N. Miura, J. Miyazaki, S. Kuwamura, N. Baba, et al. (12名), Proc. SPIE, **8447**, 8447-162 (2012). (査読なし), DOI: 10.1117/12.925848
- ③ "Seeing measurements using the solar limb – I. Comparison of evaluation methods for the differential image motion monitor," T. Kawate, Y. Hanaoka, K. Ichimoto and N. Miura, MNRAS, **416**, 2154-2162 (2011). (査読あり), DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.19192.x
- ④ "Solar adaptive optics system and observations at the Hida observatory," N. Miura, F.



- Yokoyama, J. Miyazaki, et al. (12 名), *Imaging and Applied Optics Technical Digest, JWA26* (Toronto, Canada, 2011). (査読なし),  
<http://dx.doi.org/10.1364/AOPT.2011.JWA26>
- ⑤ “Tomographic implementation of astronomical speckle imaging from bispectra,” S. Kuwamura, Y. Yoshinoya, N. Miura, et al. (7 名), *Opt. Rev.*, Vol.8, No.1, pp.19-26 (2011). (査読あり)  
<http://annex.jsap.or.jp/OSJ/opticalreview/TOC-Lists/vol18/18a0019tx.htm>
- ⑥ “Optical setup and wavefront sensor for solar adaptive optics at the Domeless Solar Telescope, Hida Observatory,” N. Miura, F. Yokoyama, M. Nefu, S. Kuwamura, et al. (12 名) *Proc. SPIE*, Vol. 7736, pp. 7736-191 (2010) (査読なし), DOI: 10.1117/12.856791

[学会発表] (計 17 件)

- ① 「飛騨天文台補償光学系と関連技術の開発」三浦則明、太陽研究シンポジウム (2013 年 2 月、東京)
- ② 「波面センサー情報を用いる太陽画像のデコンボリューション」塩野谷慎吾他 (5 名、5 番目)、応用物理学会北海道支部学術講演会 (2013 年 1 月、釧路)
- ③ 「太陽観測に向けた補償光学」、三浦則明、可視赤外線観測装置ワークショップ (2012 年 12 月、三鷹)
- ④ 「飛騨天文台における太陽補償光学系の開発」三浦則明、補償光学研究会 (2012 年 9 月、三鷹)
- ⑤ 「異なる複数枚の shift-and-add 画像からの回折限界像再生」、東泰之、桑村進他 (6 名、3 番目)、日本天文学会秋季年会 (2012 年 9 月、大分)
- ⑥ 「太陽 SCIDAR 技術によるゆらぎ層の高さの測定」、三浦則明他 (8 名)、日本天文学会秋季年会 (2012 年 9 月、大分)
- ⑦ 「太陽補償光学系 KIT-AO の開発：装置開状況 (5)」、三浦則明他 (13 名)、日本天文学会秋季年会 (2012 年 9 月、大分)
- ⑧ 「太陽観測のための補償光学系の開発」、三浦則明、可視化情報シンポジウム (2012 年 7 月、東京)
- ⑨ “Solar Adaptive Optics at the Hida Observatory: Latest Achievements of Current System and Design of New System,” N. Miura, J. Miyazaki, S. Kuwamura, N. Baba, et al. (12 名), *SPIE Astronomical Instrumentation*, (2012 年 7 月、アムステルダム、オランダ)
- ⑩ 「飛騨 AO 装置の開発実験報告および太陽 AO の動向」、三浦則明、太陽研究会 (2012 年 1 月、名古屋)
- ⑪ 「太陽望遠鏡における補償光学装置の開

発」宮崎順一、三浦則明、応用物理学会北海道支部学術講演会 (2012 年 1 月、札幌)

- ⑫ 「太陽補償光学系 KIT-AO の開発：装置開状況 (4)」、三浦則明他 (11 名)、日本天文学会秋季年会 (2011 年 9 月、鹿児島)
- ⑬ 「相互相関型 shift-and-add 法によるスペックル像再生の問題点とその改善」、東泰之、桑村進他 (6 名、3 番目)、日本天文学会秋季年会 (2011 年 9 月、鹿児島)
- ⑭ “Solar adaptive optics system and observations at the Hida observatory,” N. Miura, F. Yokoyama, J. Miyazaki, et al. (12 名), *OSA Topical Meetings* (2011 年 6 月、トロント、カナダ)
- ⑮ 「太陽補償光学系 KIT-AO の開発：装置開状況 (3)」、三浦則明他 (11 名)、日本天文学会秋季年会 (2010 年 9 月、金沢)
- ⑯ 「投影スペックルバイスペクトルからの回折限界像再生」桑村進他 (6 名、3 番目)、日本天文学会秋季年会 (2010 年 9 月、金沢)
- ⑰ “Optical setup and wavefront sensor for solar adaptive optics at the Domeless Solar Telescope, Hida Observatory,” N. Miura, F. Yokoyama, M. Nefu, S. Kuwamura, et al. (12 名), *SPIE Astronomical Instrumentation* (2010 年、サンディエゴ、アメリカ)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/general/facilities/dst/Hida-DST-AO.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三浦 則明 (MIURA NORIAKI)  
 北見工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：30209720

### (2) 研究分担者

桑村 進 (KUWAMURA SUSUMU)  
 北見工業大学・工学部・助教  
 研究者番号：20271538

一本 潔 (KIYOSHI ICHIMOTO)  
 京都大学・理学研究科・教授  
 研究者番号：70193456

### (3) 連携研究者

馬場 直志 (BABA NAOSHI)  
 北海道大学・工学研究科・教授  
 研究者番号：70143261

花岡 庸一郎 (HANAOKA YOICHIRO)  
国立天文台・太陽プラズマ研究部・准教授  
研究者番号：10238040

高見 英樹 (TAKAMI HIDEKI)  
国立天文台・ハワイ観測所・教授  
研究者番号：00270455