

平成22年6月7日現在

研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2007～2009
課題番号：19340042
研究課題名（和文） 太陽 multi-conjugate 補償光学系の開発と効果の検証
研究課題名（英文） Development of Solar Multi-Conjugate Adaptive Optics and Investigation of Its Usefulness
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、太陽表面上の微細構造の観測を可能するため、京都大学飛騨天文台の60cmドームレス太陽望遠鏡に設置する補償光学系を開発した。開発した装置を太陽観測に適用し、太陽黒点および粒状斑を対象とした場合に装置が有効に動作することを実証した。また、補償が有効に働く視野を広げるために必要な波面センシング技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Adaptive optics is a technique of correcting images degraded with terrestrial atmospheric turbulence in real time. In this study, we developed a solar adaptive optics system at the 60cm domeless solar telescope of the Hida observatory in order to make fine structures on the solar surface observable. We applied it to solar observations and then confirmed that the system worked well using sunspots or granules as a target. Moreover, we developed a wavefront sensing technique that is needed to widen the field of view within which wavefront correction is effective.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
20年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
21年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野：画像工学、天文光学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：補償光学、太陽地上観測

1. 研究開始当初の背景

補償光学 (AO) 系は、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、大口径望遠鏡では必須の装置となっている。また、太陽望遠鏡においても幾つかの AO 装置がすでに稼動を始めている。しかしながら、太陽 AO における大きな問題点は、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、太陽面のごく一部の領域しかゆらぎの補償がされないという点である。この問題を解決するため、Multi-conjugate 波面補償を行い、補償される領域を広視野化する試みが行われ始めている。ここで、Multi-conjugate とは、複数の大気ゆらぎ層に対して共役な複数の面に可変形鏡を設置して波面補償を行うことである。太陽物理学上重要な知見を得るためには、AO の Multi-conjugate 化は重要な課題である。

2. 研究の目的

従来太陽観測用に開発してきた AO を発展改良し、Multi-conjugate AO を開発することが目的である。具体的な研究課題としては、以下のとおりである。

- (1) 現有の AO 装置を改良・再設計し、飛騨天文台の分光器などを用いた科学的な観測にも使用できるように常設装置として利用できるようにする。
- (2) 太陽面上の複数点で波面検出を行うため新しい波面センサの開発を行う。このセンサで必要となる、高速波面検出および鏡の制御を行うためのソフトウェアを完成させる。これを用いて、飛騨天文台で Multi-conjugate 波面補償を行うために必要なパラメータ (ゆらぎ層の高さなど) を決定する。
- (3) Multi-conjugate AO の開発を、実験室でのシミュレーション実験、および飛騨天文台での太陽観測を通して実施する。

3. 研究の方法

- (1) 常設装置用に光学系の再設計を行うと共に、新しい可変形鏡の特性実験を行う。干渉計を用いて印加電圧に対する可変形鏡の形状の変化を調査すると共に、ステップ応答も計測する。
- (2) サブアパーチャ上の複数の計測点で波面センシングを行い、CT の原理を基に、瞳面と上空の波面位相を同時に求める手法の開発を行う。さらに、絶対差和演算および相関演算に基づく波面検出法の開発を行い、高速化のための最適化も行う。開発した手法を試験観測で得られたデー

タに適用する。ゆらぎ層の高さを様々に変えながら、データ処理を繰り返すことで、最も有効に波面補償ができる高さを見つけ出す。

- (3) 実験室に、multi-conjugate 補償の実験ができるような模擬光学系の設置を行う。これにより実験を進め、開発した装置を飛騨天文台での太陽観測に適用することで、問題点を洗い出す。

4. 研究成果

(1) 設計、計測および観測

飛騨天文台の 60cm ドームレス太陽望遠鏡用に光学系の設計を行った。図 1 は垂直分光器まわりの光路図である。望遠鏡からの光は第 1 の鏡によって AO 装置に導入され、ゆらぎ補償の後に、第 2 のミラーによって、本来の望遠鏡焦点上で結像する。

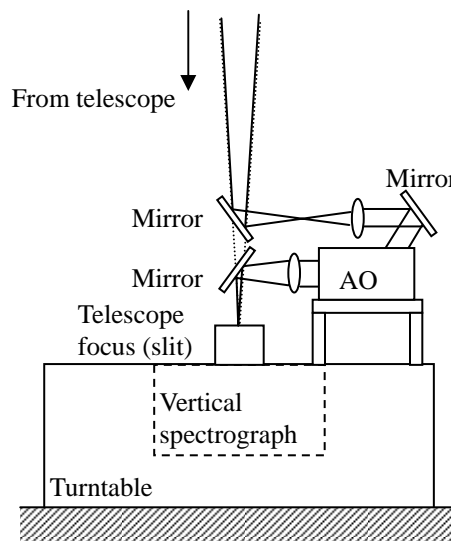


図 1 垂直分光器周りのレイアウト

図 2 は AO 内の光学系の配置である。望遠鏡からの光はリレーレンズ群によって、順に Tip-tilt 鏡、可変形鏡、スキャン鏡で順に反射する。これらの鏡はすべて望遠鏡の瞳の共役面に置かれている。Tip-tilt 鏡は像の全体的な位置ずれを直すために使われ、可変形鏡は波面の凹凸を補正し像の劣化を補償する。スキャン鏡は分光器のスリット上で、太陽面を走査するために使用される。可変形鏡を反射した光の一部は、波面の凹凸を検出するための波面センサと像の位置連れを補正するための位置ずれセンサに導入される。

この AO 装置は、波面補正と位置ずれ補正を行うための二つの独立した closed-loop 制御系となっている。AO 動作は、個々の計算機単体、またはネットワーク経由で制御され、いずれの場合でも共通の GUI が利用できる。

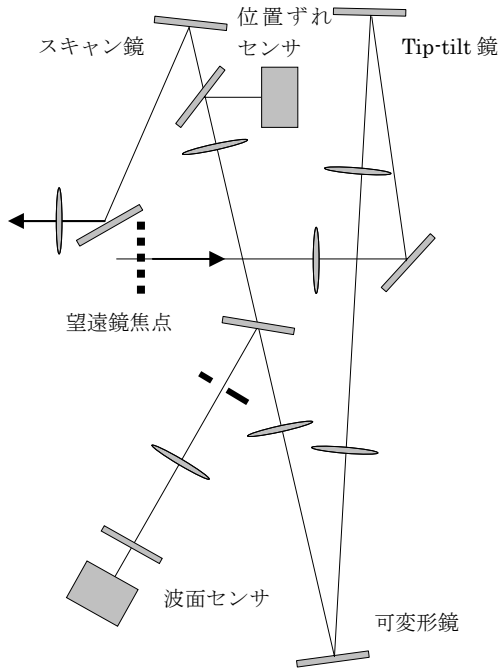


図2 AO装置光学系

ここで用いている可変形鏡は、電磁タイプで52個のアクチュエーターを持つものである。まず、この可変形鏡のステップ応答を波面センサを用いて計測し、**delay time**が1.1ミリ秒以下であることがわかった。次に、干渉計を用いて、ミラーの平面度を計測したところ、rmsで 0.032λ 、PVで 0.197λ であった。さらに、干渉計によってゼルニケパターンの再現性を計測したところピストンを除く第9項までは比較的良好な結果となっていることがわかった。このため、開発中の補償光学装置では第9項まで使用することにした。

開発した垂直分光器用のAO装置を用いて飛騨天文台において太陽観測を実施した。図3は補償光学系が動作していない場合(a)と、動作していないとき(b)の太陽黒点像である。AOが動作していない場合には、細かな構造が全く見えないのに対して、動作させた場合はコントラストが向上し粒状斑などの細かな構造が見えるようになっている。観測波長は650nm、視野は70.7x53.5秒角であった。可視光でのisoplanatic領域は典型的には10秒角程度であるが、今回の結果ではかなり広い視野に渡って波面補正の効果が見られる。これは、開発した装置では比較的低次の項だけを補正しているからである。

図4は太陽粒状斑に適用した場合の結果である。観測波長は430nm、視野は39x31秒角である。太陽粒状斑は黒点に比較してコントラストが低くシーイングの影響を受けやすいため、波面センシングが難しいのである

が、ここでは、AOが有効に働き、細かな構造がはっきりと観察できる。太陽粒状斑は太陽全面に分布しているため、太陽面上の任意の場所で波面センシングが可能になったことを表しており、AOのmulti-conjugate化に向けて大きな進展である。

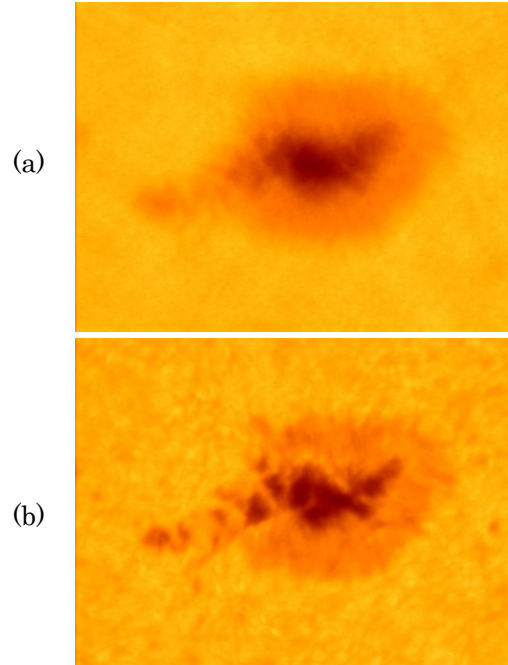


図3 補償光学の効果 (太陽黒点)

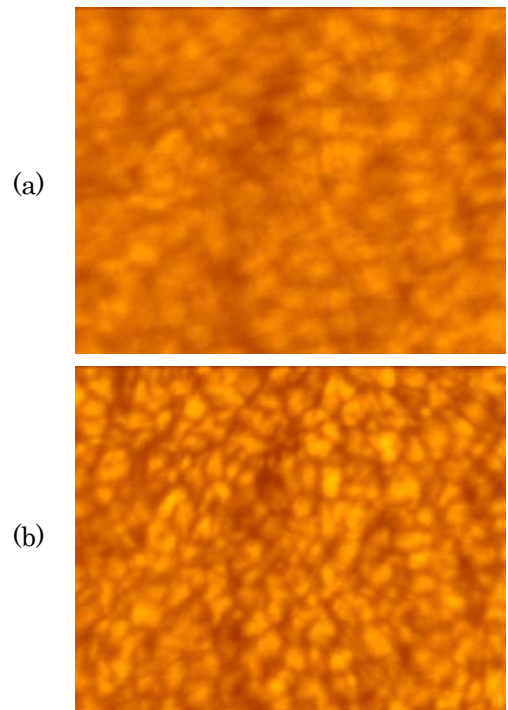


図4 補償光学の効果 (太陽粒状斑)

(2) 波面センシング法の開発

ここで開発した手法は、太陽面上の複数の地点で波面センシングを行い、異なる幾つかの角度から上空のゆらぎ情報を収集する。これらから、CTの原理を用いて上空での波面位相を求めるものである。具体的には、図5に示すように、基準となるサブアパーチャ上で特徴的な模様を参照点として数点をしてする。これらの参照点ごとにすべてのサブアパーチャでの参照点のずれ量を計算する。そのずれ量からゼルニケ多項式の係数を推定できる。

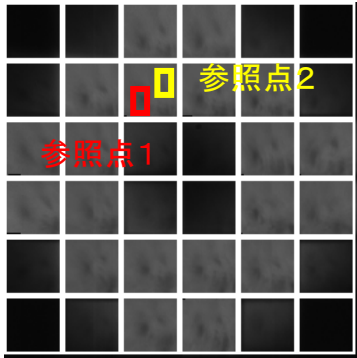


図5 波面センシング手法

計算機シミュレーションによって、開発した手法の検証を行った。大気の2層モデルを仮定し、上空と瞳面の波面揺らぎを計算機上で発生させ、それらを合わせて観測される位相を作成した。そのデータに対して開発した手法を適用し、再現された波面位相の精度を観測点の数を変えて評価した。

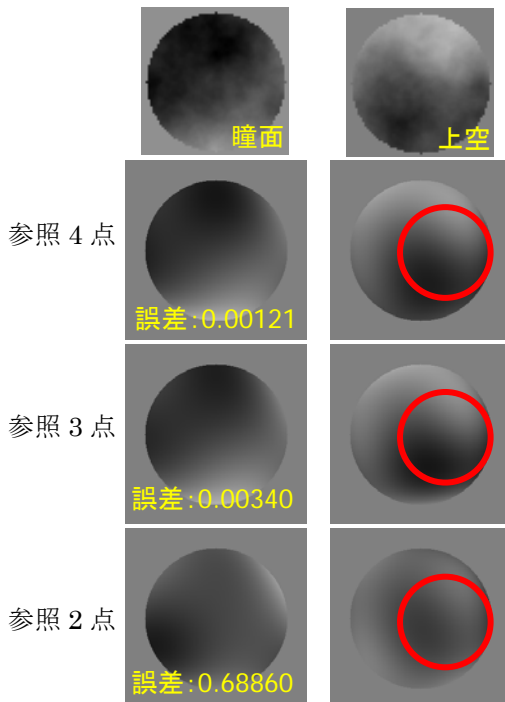


図6 計算機シミュレーション結果

図6から参照点数が多いほど、瞳面および上空の波面位相の推定が精度よく行われることがわかる。特に、計測点が2になった場合に急激に精度が悪くなる。これは、上空層における波面を求める領域の面積に対して、計測に関わる面積の割合が小さくなるためである。波面補償が有効に働く領域を広げれば広げるほど、十分な計測点数を確保する必要があることがわかる。

(3) 模擬光学系の設置

実験室に multi-conjugate 模擬実験系を設置した(図7)。レーザー光をピンホールを通してコリメートした後、2つに分割する。分割した光をそれぞれ透過軸が90度異なる変更フィルタを通し、ビームを少し傾けて合成する。これを2つの可変形鏡で反射させた後、レンズを通して集光する。可変形鏡1上では二つのビームが少しずれるようにし、可変形鏡2上では両者がちょうど重なるようにする。これらはそれぞれ上空および瞳面に対応する揺らぎを与える。可変形鏡1の波面位相には、横方向に正弦状に変動する変化を与えた。可変形鏡2には主に回転する非点収差と変動するデフォーカスを合わせた変化を与えた。

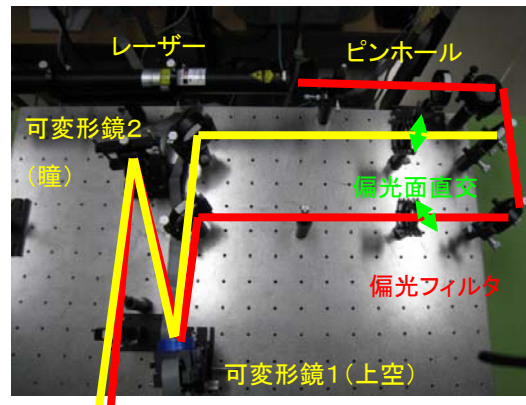


図7 模擬光学系

この模擬光学系の後ろに開発したAO装置を設置し、波面補償を実施した。まず、可変形鏡1と可変形鏡2を同時に動作させ、観測される二つのレーザースポット間の相対距離を計測した。図8からわかるように、AOを動作させてもさせなくても、2点間の相対変動はほとんど変わらないことがわかる。このような位置関係の相対変動は上空波面ゆらぎによって生じており、通常のAOを単に用いたのでは、太陽像の局所的な伸縮をじよきよできないことがわかる。

次に、片方のレーザースポットを使用して波面センシングし、AOを動作させた。こうして150枚の画像を取得し、それを平均して、各スポットの平均像のストレール比を求めた。得られた結果を表したのが、図9で、ス

ポット1 (赤) が波面センシングに使用した方である。波面センシングに使用していない方のストレール比(青)が赤よりも低下しており、波面センシングの基準点から離れるとAOの効果が低下することが再現できていることがわかる。これより、開発した模擬光学系が multi-conjugate AOの開発に利用できることが示された。

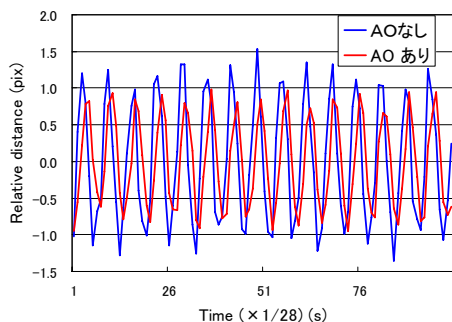


図8 スポット間の相対位置変動

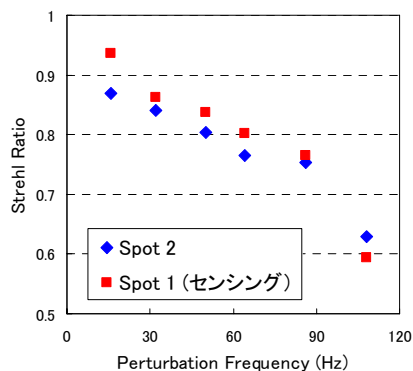


図9 スポットのストレール比

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. N. Miura et al., “Performance of software-based solar adaptive optics system,” *Opt. Rev.*, 14, 2007, 159-160, 査読有
2. S. Kuwamura et al., “Image restoration of Io by shift-and-add method and deconvolution,” *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 120, 2008, 348-357. , 査読有
3. R. Maimaiti, N. Miura, T. Eisaka, Solar adaptive optics system at the Hida Observatory,” *Int. J. Circuit, Systems and Signal Processing*, 1, 2009, 18-27. , 査読有
4. N. Miura et al., “Solar adaptive optics system using an electromagnetic deformable mirror,” *Opt. Rev.*, 16, 2009, 558-561, 査読有
5. S. Kuwamura et al., “Deconvolution of background-subtracted shift-and-add image by a modeled point-spread function,” *Opt. Rev.*, 16, 2009, 587-593, 査読有

[学会発表] (計 20 件)

1. 三浦則明他、“太陽補償光学系におけるソフトウェアと光学系の改良” 日本天文学会 2007 年秋季年会 (2007 年 9 月、岐阜)
2. 桑村進他、“VTOS によって得られたスペクトルデータの処理、” 日本天文学会 2007 年秋季年会 (2007 年 9 月、岐阜)
3. 三浦則明他、“補償光学装置の開発状況と観測報告、” 飛騨・乗鞍 UM (2008 年 3 月、東京)
4. N. Miura et al., “Solar adaptive optics system at the Hida Observatory,” *Proc. SPIE* (2009 年 6 月、マルセイユ、フランス)
5. 能任祐貴、三浦則明他、“太陽補償光学系 KIT-AO の開発：装置開発状況 (1)” 日本天文学会 2008 年秋季年会 (2008 年 9 月、岡山)
6. 加藤秀輔、三浦則明他、“太陽補償光学系 KIT-AO の開発：multi-conjugate 波面センシング(1),” 日本天文学会 2008 年秋季年会 (2008 年 9 月、岡山)
7. 川手朋子他、“飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡でのシーイングモニタ、” 日本天文学会 2008 年秋季年会 (2008 年 9 月、岡山)
8. 高橋昌也、馬場直志他、“SAA 法とセルフデコンボリューション法によるイオの像再生、” 日本天文学会 2008 年秋季年会 (2008 年 9 月、岡山)
9. R. Maimaiti, N. Miura and T. Eisaka, “Simple robust controller design for an adaptive optics system,” *IWMST* (2008 年 11 月、ハルビン、中国)

10. R. Maimaiti, N. Miura and T. Eisaka, "Tunable robust compensator design for an adaptive optics system," WSEAS (2008年12月、カイロ、エジプト)
11. 吉野谷侑樹、桑村進他、“積木法によるバイスペクトルからの天体像再生、”第44回応用物理学会北海道支部学術講演会(2009年1月、函館)
12. 桑村進、円谷文明他、“モデル化された点広がりに関数による shift-and-add 像のデコンボリューション、”第44回応用物理学会北海道支部学術講演会(2009年1月、函館)
13. 三浦則明、“補償光学装置の開発状況と今後の課題、”太陽研究会(2009年3月、京都)
14. N. Miura et al., "Advances in solar adaptive optics system at the domeless solar telescope of the Hida observatory," Proc. SPIE(2009年8月、サンディエゴ、アメリカ)
15. Y. Yoshinoya et al., "Image reconstruction of Io from the bispectrum using building block method," Proc. SPIE(2009年8月、サンディエゴ、アメリカ)
16. 横山文人、三浦則明他、“太陽補償光学系 KIT-AO の開発:装置開発状況(2)、”日本天文学会 2009 年秋季年会(2009年9月、山口)
17. 三浦則明、横山文人他、“太陽補償光学系 KIT-AO の開発:マルチコンジュゲート模擬光学系の設置、”日本天文学会 2009 年秋季年会(2009年9月、山口)
18. 三浦則明、横山文人他、“60cm 太陽望遠鏡用の補償光学系の開発、”第2回スペースガード研究会&1m望遠鏡による天体観測研究会(2009年12月、札幌)
19. 三浦則明、横山文人他、“飛騨天文台における補償光学装置の開発 2009、”太陽研究会(2009年12月、東京)
20. 横山文人、三浦則明他、“ドームレス太陽望遠鏡用補償光学系の開発、”第45回応用物理学会北海道支部学術講演会(2010年1月、札幌)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/general/facilities/dst/Hida-DST-A0.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

(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
永田 伸一 (NAGATA SHINICHI)
京都大学・理学研究科・助教
研究者番号: 30362437