

## 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：35302

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707007

研究課題名(和文) 補償光学による高解像度惑星撮像モニター観測システムの構築

研究課題名(英文) Development of Hi-resolution Solar Planet Image Monitoring System with Adaptive Optics

研究代表者

渡邊 誠 (Watanabe, Makoto)

岡山理科大学・理学部・准教授

研究者番号：10450181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、北海道大学1.6mピリカ望遠鏡にて可視光0.5 $\mu$ mより長波長側で木星視直径程度の視野(50秒角)に渡って0.4秒角の分解能で惑星大気運動の撮像モニター観測を可能とする大気ゆらぎ補償光学装置として、地表層(高度0km)と高度2.6kmにそれぞれ共役する2枚の140素子MEMS型可変形鏡と4台の11 $\times$ 11素子の面光源用相関追跡シャックハルトマン波面センサによる多層共役補償光学装置の開発を推進した。今後、実験室における閉ループ試験の実施と望遠鏡に搭載しての性能評価試験観測を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：We are developing a multi-conjugate adaptive optics system with two 140-element MEMS deformable mirrors optically conjugated to different turbulence layers at the ground and 2.6 km altitude and four 11 $\times$ 11-element correlating Shack-Hartmann wavefront sensors for extended sources, as the adaptive optics system capable of image monitoring the large-scale motions of atmosphere of solar planets with an 0.4 arcsec resolution over a field of view of about 50 arcsec as much as the Jovian apparent diameter at the longer wavelength than 0.5 micron on the 1.6 m Pirka telescope of the Hokkaido University. We are going to do the closed-loop tests of this adaptive optics system in laboratory and the test observations on the telescope.

研究分野：補償光学、天文観測機器開発、光学赤外線天文学

キーワード：補償光学 波面センサー 惑星観測 地上観測 光学赤外線天文学 天文観測機器開発

### 1. 研究開始当初の背景

惑星の大気循環メカニズムの解明には、大気の動きを長期にわたってモニターすることが不可欠である。そのため、古くより地上望遠鏡や探査機による観測が試みられてきたが、地上観測では望遠鏡時間の不足、探査機では重量やサイズ制限による搭載可能な測定機能の制限や軌道の制限による監視可能な視野の制限のために、いまだデータ不足の状態である。北海道大学では、探査機との共同観測を行いながら、連続的なモニター観測を行うため、惑星観測を主目的とした口径1.6 mの地上望遠鏡（ピリカ望遠鏡）を北海道名寄市に建設した（図1）。惑星大気の観測では、大気組成やその高度方向の分布や変化の情報を得るために、多数の波長を用いて観測することも重要である。そのための観測装置として、任意波長を連続的に選択可能な液晶フィルターを用いて分光撮像を行う可視光マルチスペクトル撮像装置 MSI を独自開発した（Watanabe et al. 2012; 図1）。このような惑星観測を主目的とし、惑星観測に最適化された観測装置を搭載した1 mクラスの望



図1: 北海道大学1.6mピリカ望遠鏡と可視光マルチスペクトル撮像装置 MSI (写真中央下部)

遠鏡は世界的にも唯一である。

しかしながら、地上望遠鏡における観測は、リソースの限られた探査機では搭載困難な大型かつ先端的な測定装置による高度なデータが取得可能である一方、地球大気のゆらぎによる解像度の劣化（日本の観測サイトでは1-3秒角程度）のため、大気の運動を追跡するには解像度が十分ではないという問題がある。例えば、木星では、1000 kmスケールの積乱雲の観測的な理解が、縞模様や大赤斑などの大規模構造の生成メカニズムの理解に本質的であるという指摘がなされているが、このスケールを分解するには、0.4-0.7

秒角の解像度が必要である。しかし、近年、この問題を克服する技術として、波面補償光学装置（Adaptive Optics: AO）が実用化されてきている。図2にすばる望遠鏡188素子補償光学系による恒星像の補正例を示す。

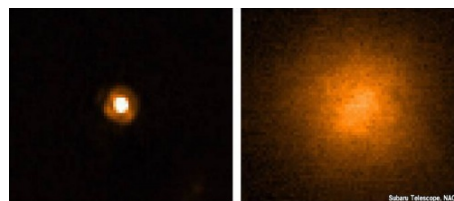


図2: 補償光学により補正された恒星像（左）と補正前の乱れた恒星像（右）（画像は国立天文台提供）

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では可視光0.5 μmより長波長側で、木星サイズ程度の視野（50秒角）に渡って、0.4秒角の分解能の達成を目標とした惑星モニター観測用の大気ゆらぎ補償光学装置の開発を計画した。本研究による補償光学装置と可視光マルチスペクトル撮像装置 MSI を組み合わせることで、0.4秒角という探査機にほぼ匹敵するほど高い解像度で、惑星全体の大気の運動を多波長でモニター観測できる観測システムの構築を行った。

### 3. 研究の方法

研究代表者は、これまで、すばる望遠鏡の188素子補償光学系を開発し（大屋・渡邊, 2007）、天文分野における高解像度観測システムを実現させてきた。しかし、これら従来の補償光学系を惑星観測に用いるには、以下に詳しく述べるように、(1) 波面測定用の参照星が見つからない、(2) 視直径の大きな金星（最大で約60秒角）や木星（最大で約50秒角）に対しては補正可能な視野サイズが不十分であるという2つの問題がある。

従来の天文用補償光学装置では波面測定のために望遠鏡開口の光を複数の小開口に分け、小開口ごとに点光源の像の動きを重心計算で求める。そのため、波面測定に点光源（恒星）が必要で惑星のような広がった天体を利用できない。木星などの場合は、ほぼ点光源とみなせる衛星を利用できるが（Wong et al., 2008, de Pater, et al., 2010）、惑星と衛星の位置関係が都合の良い配置となることが限られた条件の場合（期間）に限られ、時間的に連続したモニターは困難である。そこで、この装置では惑星自身を波面測定用の参照光源として利用する方法を検討した。方法として、狭い視野絞りによって惑星像をマスクして疑似的に点光源に近い状態にした上で、その瞳像面の前後での強度分布測定から波面の曲率を求める方法（狭い視野絞り付き波面曲率測定）と、木星など惑星表面模様のある天体において模様画像の相関計算による模様の像の動きの測定から波面の傾きを

求める方法（相関追跡による波面測定）の2つを検討した。検討に当たっては、理論的な計算による見積もりに加え、各方式の波面センサの試作機を製作し、ピリカ望遠鏡にて試験観測を行うことで、実現性の検証を行った。

観測対象が波面測定に使った波面参照点から離れると地球大気を通る光路が異なってきたり波面参照点の光路との波面の違いが大きくなるために波面補正が有効な視野は制限される。波面が同一とみなせる視野サイズ（等位相角）は、近赤外  $2\ \mu\text{m}$  では4-12秒角程度、可視光  $0.5\ \mu\text{m}$  では1-2秒角程度しかない。そこで、この装置では複数の波面センサにより惑星表面上で離れた複数の参照点を使った波面測定から、高度の異なる複数のゆらぎ層の波面ゆらぎを求め、各高度に光学共役する複数の可変形鏡を用いて波面補正を行うことで広い補正視野を得る多層共役補償光学系（Multi-Conjugate Adaptive Optics: MCAO; Beckers 1988; Rigaut et al., 2000; 図3）の構成を採用した。

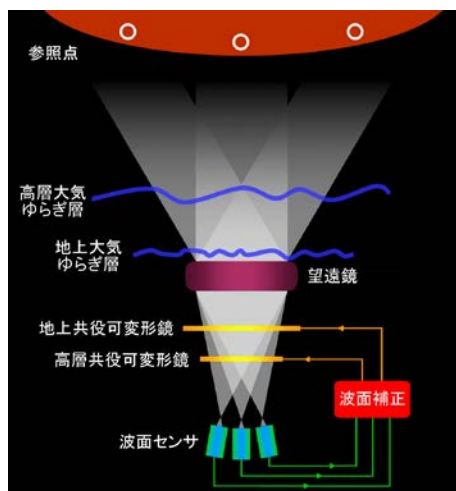


図3: 多層共役補償光学系 (MCAO) の概念図 (ESOによる図を改変)

なお、1.6 m 望遠鏡設置サイトでは等位相角を決める大気ゆらぎ層の実効的な高度が不明であったため、MASS-DIMM (Kornilov et al. 2007) を用いて天文台上空の大気ゆらぎ強度の高度プロファイルの測定も行った。その結果を基にした大気ゆらぎモデルを入れた多層共役補償光学系の計算機シミュレーションを行って補償光学装置の性能を見積もり、可変形鏡の枚数・共役高度・補正素子数とストローク、波面センサの個数・素子数、システムの制御バンド幅などを決定した。そして、装置の全体設計・光学系・機械系・制御系の設計・製作を行った。

さらに、既存の可視光マルチスペクトル撮像装置 MSI を高解像度観測に対応させるため、MSI への高分解能撮像モードの導入も行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 大気ゆらぎ高度プロファイルの測定

国立天文台ハワイ観測所より MASS-DIMM 装置、なよろ市立天文台より 28cm 反射望遠鏡を借用し、名寄サイトの大気ゆらぎ高度プロファイルの測定を2013年9月から2014年10月まで約1年間にわたって行った。その結果、計45夜のデータの取得に成功し、このサイトの大気ゆらぎの強さの指標であるシーイングの中央値として  $2.01 \pm 0.76$  秒角の値を得た。そして、平均的に、全大気ゆらぎの内、50.6%が地表層に、16.8%が高度0.5 km 付近に、14.9%が2 km 付近に集中していることが分かった (合田他、学会発表⑩、⑪)。半分以上のゆらぎが地表層付近に集中していることから、このサイトにおける広い補正視野の実現には地表層付近に共役した可変形鏡による補正が有効であるという見込みを確認できた。

##### (2) 惑星自身を参照光源とした波面測定方法の検討

狭い視野絞り付き波面曲率測定方法については、波面伝播の計算機シミュレーションでは波面センサへの入力波面の変化に対して有効な応答出力が得られたが、ピリカ望遠鏡に波面センサ試作機を搭載して月を参照光源として行った波面測定実験ではシミュレーションと異なり小さな応答しか得られなかった (仲本他、学会発表⑫)。

惑星表面模様を相関追跡による波面測定方法については、波面測定誤差について誤差モデルからの見積値とピリカ望遠鏡にシャックハルトマン波面センサ試作機を搭載して行った月と木星を用いた波面測定実験の結果が一致することを確認できた。さらに、木星を観測対象とした場合の波面測定の誤差をモデル化し、木星全体の約半分の領域が目標とする補正性能をみたすための波面測定用の参照光源として利用可能であるという見積もり (図4) を得ることができた (合田他、学会発表⑬、合田 修士論文)。

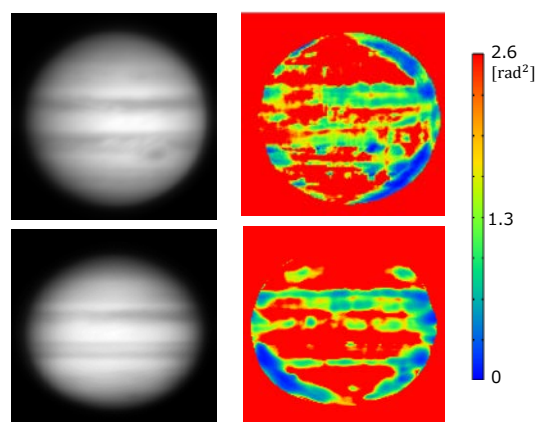


図4: 木星表面模様を相関追跡による波面測定における参照点ごとの波面誤差の見積結果。赤色以外の領域（波面測定誤差  $< 2.6\ \text{rad}^2$ ）が波面測定に利用可能な参照点となることを示している。



(3) 惑星観測用補償光学装置の開発

名寄サイトの大気ゆらぎモデルを入れた補償光学系の計算機シミュレーションによる性能見積りから、システムの基本構成を地表層（高度 0 km）と高度 2.6 km にそれぞれ共役する 2 枚の 140 素子 MEMS 型可変形鏡と 4 台の 11×11 素子のシャックハルトマン波面センサを用いた多層共役補償光学システムとして、全体設計を確定させた。光学系と光学機械系の詳細検討の結果、約 18×18 秒角の幾分広い視野を持つ波面センサにて、全体視野 60 秒角を 4 分割した分割視野内（30×30 秒角）から波面測定に適した惑星表面模様像を選択導入して波面測定を行うことのできる設計を得た（図 5、渡邊他、学会発表①、②）。しかし、補正光学系の設計において最適設計解を得るのが当初の想定より難易度が高く、補正光学系の光学レイアウトと光学素子のパラメータの最適解を得るのに時間を要したため、それに続く、光学素子の製作や機械系などの設計・製作が遅れた。光学系・光学機械系や全体機械構造などの個別要素の設計と光学素子と光学機械部品の調達および全体機械構造などの機械部品製作までは完了したが、実験室における閉ループ試験の実施までは至らなかった。今後、装置の組立・調整と制御ソフトウェア作成を進め、1 年以内での実験室における閉ループ試験の実施を目指す。さらに、望遠鏡に搭載しての実際の天体を用いた試験観測の早期実現を目指して開発を進めている。

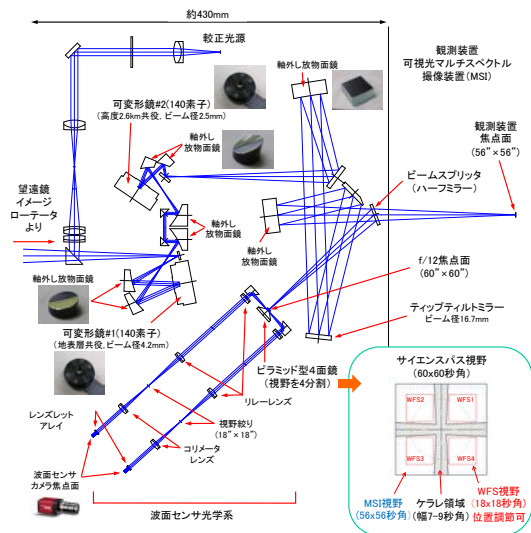


図 5: 惑星観測用多層共役補償光学装置の光学系レイアウト

なお、可視光マルチスペクトル撮像装置には高分解能撮像モードカメラレンズとレンズ交換ステージを導入し、天体を用いての高分解能モードの試験の実施と大気ゆらぎの影響の評価用撮像データの取得ができた。

〔引用文献〕

① Watanabe et al., Proceedings of SPIE,

8446, 844620, (2012)

- ② 大屋・渡邊, 光技術コンタクト, 45, 165, (2007)
- ③ Wong et al., 40th Annual Meeting of Division for Planetary Sciences of American Astronomical Society, Ithaca NY, Poster 41.14, (2008)
- ④ de Pater, et al., Icarus, 210, 742, (2010)
- ⑤ Beckers, Proceedings of ESO Conference, 30, 693, (1988)
- ⑥ Rigaut et al., Proceedings of SPIE, 4007, 1022, (2000)
- ⑦ Kornilov et al., Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 382, 1268, (2007)

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 3 件)

- ① 森貞翔太、惑星観測補償光学用 140 素子 MEMS 型可変形鏡の性能評価、岡山理科大学 卒業論文、査読なし、2017 年
- ② 合田周平、惑星観測用大気揺らぎ補償光学系のための惑星表面模様の相関追跡による波面測定方法の研究、北海道大学 修士論文、査読なし、2016 年、[http://sana.ep.sci.hokudai.ac.jp/nayoro/publications/thesis/goushu\\_M.pdf](http://sana.ep.sci.hokudai.ac.jp/nayoro/publications/thesis/goushu_M.pdf)
- ③ 合田周平、MASS-DIMM による大気擾乱高度プロファイルの測定、北海道大学 卒業論文、査読なし、2014 年、[http://sana.ep.sci.hokudai.ac.jp/nayoro/publications/thesis/goushu\\_B.pdf](http://sana.ep.sci.hokudai.ac.jp/nayoro/publications/thesis/goushu_B.pdf)

〔学会発表〕(計 19 件)

- ① 渡邊誠、森貞翔太、大屋真、惑星用補償光学系の開発の進捗状況(2)、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月 15-18 日、九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)
- ② 渡邊誠、惑星用補償光学系の開発の進捗状況、第 9 回「補償光学研究開発のための情報交換会」、2016 年 9 月 17 日、東京大学天文学教育研究センター (東京都三鷹市)
- ③ 森貞翔太、可変形鏡 BMC Multi-3.5 の性能評価、第 8 回「補償光学研究開発のための情報交換会」、2016 年 9 月 17 日、岡山理科大学 (岡山県岡山市)
- ④ 渡邊誠、惑星観測用補償光学系の開発状況、第 8 回「補償光学研究開発のための情報交換会」、2016 年 9 月 17 日、岡山理科大学 (岡山県岡山市)
- ⑤ 合田周平、惑星表面模様の相関追跡による波面測定方法の研究、第 7 回「補償光学研究開発に関する情報交換会」、2016 年 3 月 18 日、国立天文台三鷹キャンパス

- (東京都三鷹市)
- ⑥ 渡辺誠、合田周平、大屋真、北大惑星用 A0 の開発進捗、第 7 回「補償光学研究開発に関する情報交換会」、2016 年 3 月 18 日、国立天文台三鷹キャンパス (東京都三鷹市)
  - ⑦ 合田周平、渡辺誠、大屋真、木星面模様を利用した波面測定実験、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9-11 日、甲南大学 (兵庫県西宮市)
  - ⑧ 合田周平、渡辺誠、大屋真、木星面模様を利用した波面測定実験、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 (京都市京都府)
  - ⑨ 渡辺誠、合田周平、仲本純平、大屋真、北大惑星用補償光学系の開発の進捗状況、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 18-21 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)
  - ⑩ 合田周平、渡辺誠、仲本純平、大屋真、MASS-DIMM による名寄の大气擾乱高度プロファイルの測定(2)、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 18-21 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)
  - ⑪ 合田周平、名寄サイトの大气揺らぎ測定、補償光学研究会「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)
  - ⑫ 渡辺誠、北大惑星用補償光学装置の開発進捗状況、補償光学研究会「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)
  - ⑬ 渡辺誠、表泰秀、寺田宏、服部堯、早野裕、美濃和陽典、工藤智幸、森井幹雄、橋本淳、すばる望遠鏡近赤外線撮像分光観測装置 IRCS 用偏光撮像モードの開発、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月 11-13 日、山形大学 (山形県山形市)
  - ⑭ 渡辺誠、北海道大学惑星用補償光学系の開発、補償光学シンポジウム「すばる望遠鏡から顕微鏡へ：次世代三次元補償光学系を用いた生体イメージング・光操作へ向けて」、2014 年 8 月 20-21 日、国立天文台三鷹キャンパス (東京都三鷹市)
  - ⑮ 渡辺誠、合田周平、仲本純平、大屋真、渡部重十、北海道大学惑星観測用補償光学系の開発計画 補償光学シンポジウム「すばる望遠鏡から顕微鏡へ：高解像・高感度観測を可能にする次世代補償光学系に向けて」、2014 年 3 月 24-25 日、国立天文台三鷹キャンパス (東京都三鷹市)
  - ⑯ 合田周平、渡辺誠、仲本純平、大屋真、渡部重十、MASS-DIMM による名寄の大气擾乱高度プロファイルの測定、日本天文学会 2014 年春季年会、2014 年 3 月 19-22 日、国際基督教大学 (東京都三鷹市)
  - ⑰ 合田周平、渡辺誠、仲本純平、大屋真、MASS-DIMM による名寄の大气擾乱高度プ

- ロファイルの測定、補償光学研究会「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、国際基督教大学 (東京都三鷹市)
- ⑱ 仲本純平、渡辺誠、合田周平、大屋真、渡部重十、北大惑星用補償光学系の開発：面光源用ピンホール波面センサの実証実験、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月 10-12 日、東北大学 (宮城県仙台市)
  - ⑲ 渡辺誠、仲本純平、合田周平、大屋真、渡部重十、北大惑星用補償光学系の開発：計画の概要、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月 10-12 日、東北大学 (宮城県仙台市)

[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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 誠 (WATANABE, Makoto)  
岡山理科大学・理学部・准教授  
研究者番号：10450181

### (2) 研究分担者

該当者なし

### (3) 連携研究者

該当者なし

### (4) 研究協力者

大屋 真 (OYA, Shin)  
国立天文台・TMT 推進室・特任准教授  
研究者番号：80399387

仲本純平 (NAKAMOTO, Junpei)

合田周平 (GODA, Shuhei)

森貞翔太 (MORISADA, Shota)