

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01941

研究課題名(和文) 惑星観測用補償光学系の波面センサの広視野化と高速化

研究課題名(英文) Development of wide-field and fast wavefront sensor of adaptive optics system for monitoring of solar system planets

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) 9,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、我々がこれまで開発してきた惑星モニター観測用多層共役大気ゆらぎ補償光学装置の波面センサの視野をこれまでの約3倍に広視野化し、かつセンサのデータ取得速度を約3倍に高速化するための開発を推進した。これにより、波面センサの視野が惑星像全体をカバーして波面測定点の間隔を密にかつ測定点数を増やすことができ、また大気ゆらぎの時間変化に十分に追従できる補正速度を得ることによって、補償光学装置の補正性能を大きく向上できる。今後、実験室における閉ループ試験を経て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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星の大気構造の生成メカニズムの解明には惑星を高解像度でモニター観測する必要があるが、地上観測では地球大気のゆらぎによって惑星からの光の波面が乱され解像度が劣化し、必要なデータが取れないという問題がある。本研究で開発している惑星観測用補償光学装置によって、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連続的かつ高い観測効率でモニター観測可能となる。また、本研究で提案する広視野波面センサによる多層共役補償光学系は同じく広がった観察対象である生物細胞や網膜観察の顕微鏡用補償光学装置への応用も期待できる。

研究成果の概要(英文)：We are developing a new wide-field and fast wavefront sensor of our multi-conjugate adaptive optics (MCAO) system for monitoring of the solar system planets. The new wavefront sensor has a three times wider field of view and three times faster data acquisition speed than those of the current sensor. It can take the entire image of the planet at once, and therefore could increase the number of data points for wavefront measurements in field and arrange them more densely. It also enables the system to correct wavefront fast enough to follow variation in atmospheric turbulence. This upgrade would improve the correction performance of our MCAO system largely. We are going to do the closed-loop tests of this MCAO system in laboratory and the test observations on the telescope.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：光赤外線天文学 補償光学 波面センサ 惑星観測

1. 研究開始当初の背景

木星や土星などに見られる縞模様や渦といった大気構造の生成メカニズムの解明には、数時間から数日、数日から数か月、数か月から数年といった様々なタイムスケールに渡って、大気の動きや突発的に起こる大気現象を継続的にモニター観測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(例えば、Barrado-Izaguirre et al., 2013, *Astronomy & Astrophysics*, **554**, A74; Simon-Miller et al., 2012, *Icarus*, **218**, 817)。しかし、探査機では高解像度なデータが得られる一方、探査機の寿命、重量やサイズ制限による搭載可能な測定機能(例えば観測波長)の制限や軌道の制限による観測視野の制限のために、限られた期間の限定された情報のデータの取得に留まってしまう。一方、地上観測では、観測時間の豊富な中小口径望遠鏡と、探査機には搭載困難な大型かつ先端的な測定装置によって高度なデータを取得可能である一方、地球大気のゆらぎによって天体の光の波面が乱されて大幅に解像度が劣化し(日本の観測サイトでは1-3秒角程度に)、惑星大気の運動を追跡するには解像度が十分でないという大きな問題がある。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。

近年、天文分野において、この大気ゆらぎの問題を克服する技術として、光波面の乱れをリアルタイムに測定し補正する波面補償光学装置(Adaptive Optics; AO)が実用化された(図1に補正例; 渡邊, 2016, 計測と制御, **56**, 435)。しかし、これら従来の天文用AOを惑星観測に用いるには、(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(約60秒角)や木星(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AOでは、波面測定のために観測対象のごく近傍に点光源(観測対象自身あるいは近傍の恒星)が必要である。

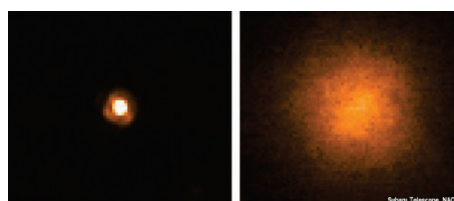


図1: すばる望遠鏡188素子補償光学装置による恒星像に対する大気ゆらぎの補正例(左図が補正あり, 右図が補正なし)
(画像は国立天文台提供)

天文用AOで一般的に使用されるシャックハルトマン波面センサでは、マイクロレンズアレイによって望遠鏡開口の光を複数の小開口に分割し、小開口ごとにマイクロレンズにて結像した点光源の像位置の基準位置からのずれ(波面の局所的な傾きに対応)を重心計算で求める。しかし、惑星のような大きく広がった天体では波面センサの視野全体が照らされてしまい、重心計算では像位置を測定できない(すなわち、惑星自身を波面参照光源として利用できない)。また、観測対象が波面測定に使った参照光源から離れると地球大気を通る光路が異なってきた測定波面との違いが大きくなるため、たとえ参照光源があったとしても、補正の有効な視野は参照光源近傍の数秒角から10秒角程度の領域に制限される。

そこで、我々は惑星本体を波面測定の参照光源として用いるため、シャックハルトマン波面センサにて惑星の表面模様の像位置のずれを小開口ごとに画像相関計算(相関追跡)で求めることによって波面測定することを提案した。さらに、補正視野を広げるために、惑星表面上の複数点での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多層共役補償光学系(Multi-Conjugate Adaptive Optics; MCAO; 図2に概念図を示す)の構成を提案し、これらのアイデアに基づいた、4個の波面センサをもつ惑星観測用MCAO装置の開発を進めている(渡邊 2018, 日本写真学会誌, **81**, 351)。

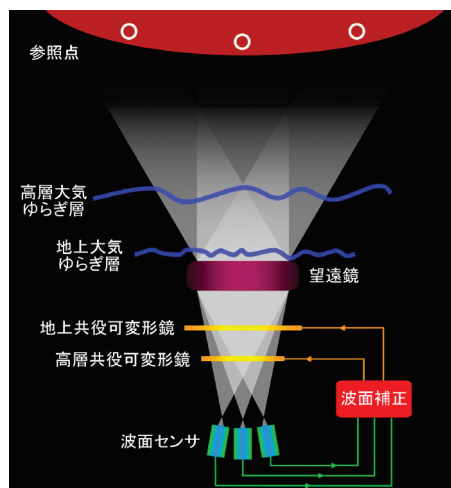


図2: 多層共役補償光学系(MCAO)の概念図
(欧州南天天文台による図を改変)

しかし、現状の惑星用MCAO装置には、惑星像全体に渡って十分な解像度へ補正するには惑星像上における波面測定点の間隔が十分に密でないことと測定点の数が不十分であるという問題がある。木星視直径の視野50秒角程度に渡って十分な解像度まで補正するには、観測視野全域に10秒角程度の間隔で密に波面測定の参照点が必要である。一方、現状の惑星用MCAO装置の4個の波面センサはそれぞれ約18秒角の視野(位置は調節可能)を持ち、図3のようにそれぞれの視野にて複数の波面測定点(サイズ6秒角程度の像)を測定可能であるが、4個の波面センサへ光を分けるための視野分割鏡により視野境界付近に光のケラレが生じ、波面測定を密に行えない領域がある(特に視野中心付近)。惑星の視直径が大きいほど

ど、この影響はより顕著になる。さらに、波面センサの検出器(カメラ)のデータ取得レートが現状 200 Hz に留まっており、大気ゆらぎの時間変化スケール 1-2 ms (500-1 kHz) に比べて遅く、大気ゆらぎの時間変化に追従するのに速度が不十分である。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、現状の惑星用 MCAO 装置の波面センサの視野を惑星像全体 (約 50-60 秒角) をカバーできるよう、これまでの約 3 倍に広視野化し、かつ 1-2 ms スケールの大気ゆらぎの時間変化に追従できるよう、センサのデータ取得レートをこれまでの約 3 倍に高速化した波面センサの開発を推進した。そして、この広視野高速波面センサにより、惑星表面上の様々な視野位置にある表面模様 (輪郭含む) を漏れなく利用して、多数の視野位置にて密にかつ高速に波面測定することにより大気ゆらぎの補正性能を向上させる。これにより、可視光 0.5 μm より長波長側で、木星サイズ程度の広い視野 (50 秒角) に渡って 0.4 秒角程度の一様な解像度を達成する。

3. 研究の方法

本研究では、現状の惑星用 MCAO 装置 (図 4 に光路図を示す) の 4 個の波面センサを単一の広視野高速波面センサへ置き換える形で、開発を進めた。広視野波面センサの小開口の数 (素子数) はこれまでと同じく 11 \times 11 素子もしくはそれ以上とした。その 1 素子 (1 小開口) ごとの視野を約 60 秒角 (50 秒角+マージン)、ピクセルスケールをこれまでと同じ約 0.4 秒角/ピクセルとした場合、波面センサのカメラに必要な画素数は約 1650 \times 1650 ピクセルとなる。このような多画素数を低ノイズ ($\leq 10 e^-$) で高速 (\geq 約 500 Hz) に読み出し可能なカメラは以前は存在しなかったが、ごく最近、条件を満たす CCD/CMOS カメラが登場し、波面センサの広視野化と高速化が実現可能となった。

しかし、波面センサのデータ取得フレームレートを高くするとフレーム当たりの光量が減って信号対ノイズ比が下がり波面測定精度を損なってしまいます。そこで、現在の惑星 MCAO 装置の軸外し放物面鏡 8 枚をより高反射率 (かつ低散乱損失) のものへ交換することで、光学系の透過効率を向上させ、光量低下を避けることを試みた。これら 8 枚はいずれも反射コートが保護膜付きアルミ (反射率 92%) であるため、保護膜付き銀コート (反射率 98%) への変更を検討した。また 8 枚のうち 6 枚は表面粗さによる散乱損失 (約 12%ロス) のある金属鏡であるため、これらを表面粗さ精度の高いガラス鏡へ交換すれば散乱損失も減らすことができる。こうすることにより、効率を現状の 22% (反射率 92% \times 2 面+80% \times 6 面) から 85% (反射率 98% \times 8 面) と 4 倍近くの改善が見込まれ、高フレームレート化による光量低下を補うことができる。

4. 研究成果

(1) 広視野波面センサの設計製作

まず広視野波面センサの仕様 (小開口数、ピクセルスケールなど) を決定するため、波面センサの小開口の数 (素子数) をこれまでと同じく 11 \times 11 素子もしくはそれ以上で、その 1 素子 (1 小開口) ごとの視野を約 55 秒角 (50 秒角+マージン) とすることとして、モンテカルロ法による惑星観測用多層共役補償光学装置の大気ゆらぎ補正の計算機シミュレーションを行い、補正性能を見積もった。その結果、波面センサのピクセルスケールを約 0.6 秒角/ピクセルとすることとした。このとき広視野波面センサのカメラに必要な画素数は 1000 \times 1000 ピクセル程度となるため、その画素数を低ノイズ (10e $^-$ RMS 程度以下) で高速 (\geq 約 500Hz) に読み出し可能なカメラとして、浜松ホトニクス社の sCMOS カメラ C14120-20P を選定した。

そして、広視野波面センサの光学設計を行い、小開口の数 (素子数) を 11 \times 11 素子、その 1 素子 (1 小開口) ごとの視野を 54 秒角、ピクセルスケールを 0.50 秒角/ピクセルと決め、選定した sCMOS カメラの諸元に合わせて、波面センサのコリメータレンズの焦点距離、マイクロレン

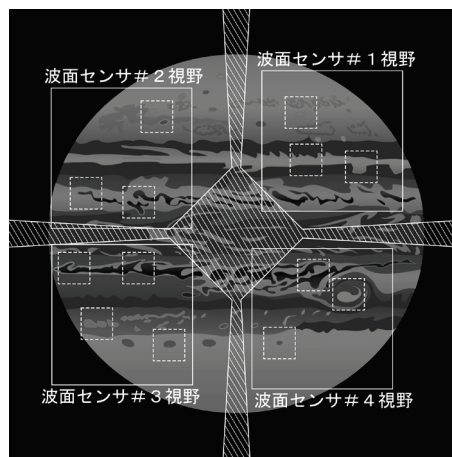


図 3: 現在の惑星用 MCAO 装置の波面センサの視野配置と波面測定点 (点線) の例。木星にて平均視直径 40 秒角の場合。斜線領域は視野分割鏡の光のケラレにより波面参照点として選択できない領域。

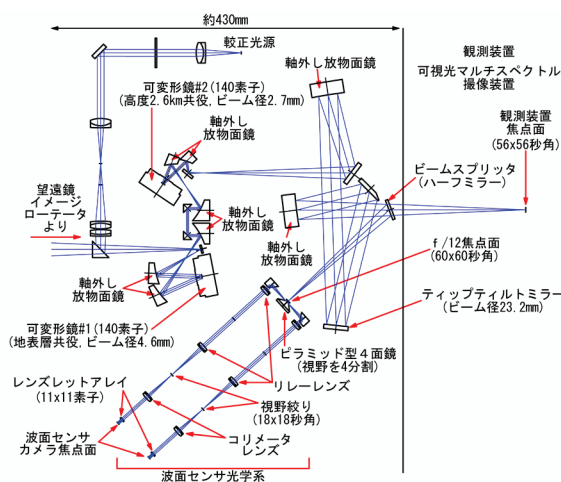


図 4: 現在の惑星用 MCAO 装置の光路図。波面センサ光学系の部分 (ピラミッド型 4 面鏡から先) を広視野波面センサに置き換える。

ズアレイ（レンズレットアレイ）のピッチと焦点距離などの光学パラメータを決定した。マイクロレンズアレイは国内外の既存の市販品には光学パラメータが適合する製品が見当たらなかったため特注にて製作し、市販品のコリメータレンズとの組み合わせにて光学パラメータを最適化した。その結果、カメラの検出素子面上で波面センサのデータとして使用する範囲（センサ画像サイズ）を1212×1280ピクセルに収めることができ、カメラ現物においてもその範囲の部分読み出しにて500fpsのフレームレートを達成できることを確認できた。図5と図6にそれぞれ選定したsCMOSカメラと製作したマイクロレンズアレイの写真を示す。

広視野波面センサの光学素子とカメラのマウントの機械設計については、計画最終年度内に機械設計を完了するまでに至らなかったため、次年度以降に引き続き機械設計を進め、機械部品の製作、広視野波面センサの組立・調整、および装置本体への組み込みと試験を行う予定である。

(2) 軸外し放物面鏡の交換

軸外し放物面鏡については、製作検討を行った結果、8枚のうち散乱損失のある金属鏡の6枚について、表面粗さ精度の高いガラス鏡で保護膜付き銀を反射膜とした軸外し放物面鏡を製作して交換した。図7に製作した軸外し放物面鏡の一部の写真を示す。残り2枚の放物面鏡は交換しないこととしたが、それでも波面センサを広視野化したことで視野分割鏡や視野ごとのリレー光学系など反射面2面とレンズ透過面4面が不要になり、さらにカメラ検出素子の量子効率が現状のものより約1.3倍向上したことなどにより、装置全体の効率は2.8%から11.2%へと約4倍の向上を見込むことができた。

(3) 装置エンクロージャの改修

広視野波面センサの光学素子とカメラのマウントの機械設計および新しい軸外し放物面鏡のマウントの機械設計を進めた結果、カメラの機械的スペースの取り合いや電気配線取り回し、排熱、および新軸外し放物面鏡の最適な光学位置配置のためには、現在の既存の惑星観測用補償光学装置の筐体（エンクロージャ）の改修を共に行う方が機械設計の複雑化を避ける上でも最良であることが判明した。そのため、現装置のエンクロージャの光学ベースプレート、上面プレート、側面プレートの一部を広視野波面センサと新軸外し放物面鏡の導入に合わせて交換することとし、交換用のエンクロージャ部品も設計・製作した。

今後、広視野波面センサの機械部品の製作、組立・調整、新エンクロージャへの波面センサ組み込みを進め、実験室における閉ループ試験を経て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。

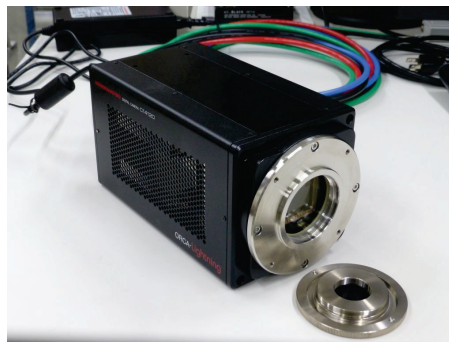


図5：広視野波面センサのsCMOSカメラ。

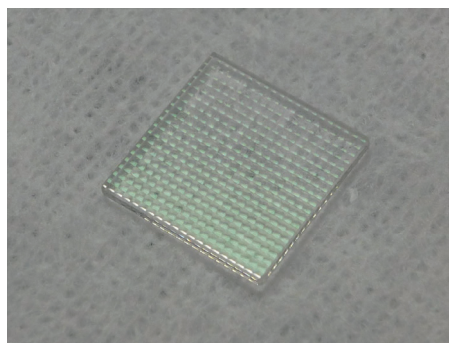


図6：広視野波面センサのマイクロレンズアレイ。外形サイズは12×12 mm。

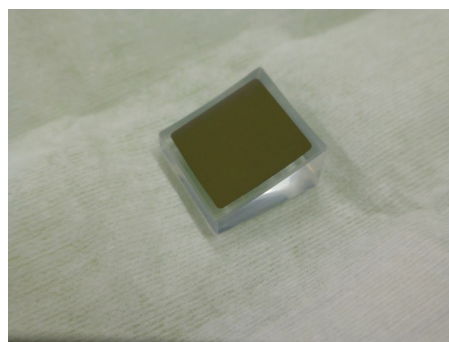


図7：製作した軸外し放物面鏡の一つ。焦点距離52 mmで、外形サイズは14×14 mm。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Makoto Watanabe, Shin Oya, Shuhei Goda, Jumpei Nakamoto, Keisuke Teraji, Hiroaki Ishikoso, Shouta Morisada, Hiroshi R. Kamakari, Fuka Mizukose, Hiromasa Yamane, Kanta Sagisaka, Masaru Yokoyama, Koji S. Kawabata	4. 巻 11448
2. 論文標題 Development of multi-conjugate adaptive optics system for monitoring of solar system planets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1144877-1--8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2561196	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 渡邊誠
2. 発表標題 MASSとDIMMによる大気揺らぎ高度プロファイル計測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊誠
2. 発表標題 惑星モニター観測用MCAOの波面センサの広視野化・高速化計画
3. 学会等名 第15回「補償光学研究開発のための情報交換会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Watanabe, Shin Oya, Shuhei Goda, Jumpei Nakamoto, Keisuke Teraji, Hiroaki Ishikoso, Shouta Morisada, Hiroshi R. Kamakari, Fuka Mizukose, Hiromasa Yamane, Kanta Sagisaka, Masaru Yokoyama, Koji S. Kawabata
2. 発表標題 Development of multi-conjugate adaptive optics system for monitoring of solar system planets
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2020 (Online)（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊誠, 寺地慶祐, 石社裕章, 水小瀬ふうか, 山根大昌, 大屋真, 川端弘治
2. 発表標題 惑星観測用補償光学系の開発の進捗状況(4)
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊誠
2. 発表標題 惑星モニター観測用MCAOの開発の進捗状況：実験室における閉ループ試験について
3. 学会等名 第13回「補償光学研究開発のための情報交換会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺地慶祐
2. 発表標題 惑星モニター観測用MCAOにおける波面測定用表面模様の配置に対する補正性能の見積方法
3. 学会等名 第13回「補償光学研究開発のための情報交換会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石社裕章
2. 発表標題 惑星モニター観測用MCAOにおける最小平均二乗誤差推定による波面再構築と波面測定誤差の影響
3. 学会等名 第13回「補償光学研究開発のための情報交換会」
4. 発表年 2019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
研究協力者	大屋 真 (Oya Shin) (80399287)	国立天文台・TMTプロジェクト・特任准教授 (62616)	
研究協力者	川端 弘治 (Kawabata Koji) (60372702)	広島大学・宇宙科学センター・教授 (15401)	
研究協力者	寺地 慶祐 (Teraji Keisuke)	岡山理科大学・大学院理学研究科・大学院生（修士課程） (35302)	
研究協力者	石社 裕章 (Ishikoso Hiroaki)	岡山理科大学・大学院理学研究科・大学院生（修士課程） (35302)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------