

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月19日現在

機関番号：10101
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23740139
 研究課題名（和文） すばる望遠鏡および宇宙望遠鏡計画のための8分割位相マスクコロナグラフの開発
 研究課題名（英文） Development of an eight-octant phase-mask coronagraph for the Subaru Telescope and future space telescope missions
 研究代表者
 村上 尚史（MURAKAMI NAOSHI）
 北海道大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号 80450188

研究成果の概要（和文）：系外惑星の直接観測を目指し、すばる望遠鏡のための8分割位相マスクコロナグラフの開発を行った。まず、8分割位相マスクコロナグラフの性能を最大限引き出すため、望遠鏡瞳変換レンズを製作した。また、フォトリソグラフィ技術を利用した1.6 μ m波長帯用8分割位相マスクを設計、製作した。フォトリソグラフィマスクは、地上観測だけでなく、将来のスペース系外惑星探査計画においても利用できると期待される。さらに、低次の光波面乱れを高精度に測定するための低次波面センサの開発を行った。

研究成果の概要（英文）：An eight-octant phase mask (80PM) coronagraph for the Subaru Telescope has been developed for direct detection of extrasolar planets. First, pupil-shaping lenses were manufactured to maximize the achievable performance of the 80PM coronagraph for the Subaru Telescope. An 80PM optimized for the 1.6 μ m observational band was also designed and manufactured based on photonic crystal technology. It is expected that the photonic crystal masks will be useful not only for ground-based observations but also for future space-based planet-finding missions. In addition, a coronagraphic wavefront sensor for accurately measuring low-order wavefront aberrations was developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：

光赤外線天文学，応用光学・量子工学，惑星探査

1. 研究開始当初の背景

(1) 1995年の第一発見以降、系外惑星（太陽以外の恒星がもつ惑星）の発見数は着実に増加し、研究開始当時に500個近くに上っている（現在では、800個にもなる）。系外惑星の観測には、ドップラー法（惑星引力による恒星のふらつきを検出する手法）やトランジット法（惑星が恒星前面を通過することによる恒星減光を検出する手法）など、間接法が主に用いられている。一方、系外惑星からの光を直接観測することができれば、そのスペクトルにより大気組成を解明する手掛かりを得ることができ、その意義は極めて大きい。

(2) 系外惑星を直接観測するためには、圧倒的に明るい恒星光を除去する高コントラスト観測装置が必要不可欠である。2008年秋、恒星から数10天文単位に木星質量の惑星の直接観測に成功したとの報告がなされるなど、系外惑星研究は新たな展開を迎えている。

(3) 現在、幾つかの地上大型望遠鏡では、優れた観測性能をもつ高コントラスト観測装置の開発が進められている。日本のすばる望遠鏡では、188素子補償光学（大気

揺らぎによる像劣化を補正する装置)と古典的リオコナグラフ(明るい主星光を掩蔽板で隠す装置)によるHiCIAOの開発が完了し、世界に先駆けて観測を開始している。さらに、HiCIAOのアップグレード装置として、より小離角で高いコントラストを目指したSCExAO(Subaru Coronagraphic Extreme AO)の開発が進められている。SCExAOでは、高性能の発展型コナグラフ「PIAA(Phase-Induced Amplitude Apodization)法」を、AO188-HiCIAO間に搭載する。SCExAO/HiCIAOなどの次世代高コントラスト観測装置では、恒星から数天文単位における木星質量の若い惑星の直接検出が期待されている。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第一の目的は、すばる望遠鏡SCExAOに、申請者らが提案した8分割位相マスク(80PM, 8-Octant Phase Mask)コナグラフを搭載するための技術開発を行うことである。すばる望遠鏡SCExAOに80PMコナグラフを搭載するため、いくつかの主要なコンポーネントの開発を実施する。その詳細については、「3. 研究の方法」で述べる。

(2) 80PMコナグラフは、地上観測装置としてだけでなく、将来のスペース望遠鏡用観測装置としても有用であると期待される。宇宙空間からの高コントラスト観測では、地球型惑星の直接観測が究極目標となる。本研究の第二の目的は、将来のスペース望遠鏡計画に向けた80PMコナグラフの技術開発を推進することである。

3. 研究の方法

(1) 図1に、80PMコナグラフの光学系を示す。本手法は、恒星像を8領域に分割し、交互に $0, \pi$ の位相変調を与える手法であり、打ち消し合う光波干渉を利用して、恒星光を強力に除去することができる。80PMコナグラフは、技術的にシンプルで高い惑星検出能力をもつ。

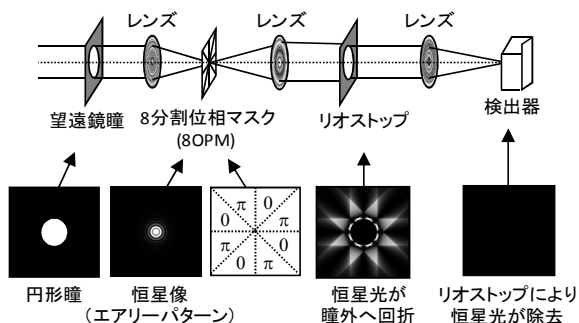


図1: 80PMコナグラフの原理。

(2) 図2に、すばる望遠鏡SCExAOのための80PMコナグラフの光学系を示す。80PMコナグラフは、望遠鏡瞳が円形の場合に高い性能を発揮

する。しかしながら、すばる望遠鏡瞳は副鏡と支持機構(スパイダ)の影を持つため、十分な性能が得られない。80PMコナグラフをすばる望遠鏡に導入するためには、副鏡とスパイダをもつ望遠鏡瞳を円形瞳に変換するための補正光学系が必要となる。スパイダを除去する補正光学系SRP(Spider Removal Plate)は、SCExAO開発において既に製作されている。したがって、副鏡の影を除去するMPIAA(Modified PIAA)の開発が必要となる。本研究では、MPIAAの設計および製作を行う。

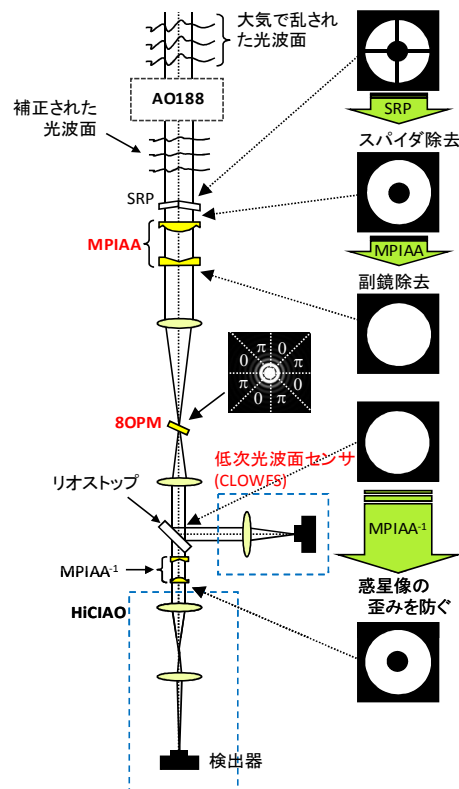


図2: すばる望遠鏡用80PMコナグラフの光学系。

(3) すばる望遠鏡用80PMとして、偏光を利用した波長に依存しない手法を検討している(図3)。これは、主軸方位が $\pm 45^\circ$ の8分割半波長板を2枚の直交する偏光子で挟んだ構成をもつ。本研究では、観測はHバンド($1.6 \mu\text{m}$ 波長帯)で行うことを想定しているため、Hバンド用80PMの開発を実施する。

(4) 80PMコナグラフによる地上観測では、大気揺らぎによる光波面乱れ、特に空間スケールの大きな低次乱れがあると性能が著しく劣化してしまう。そこで、低次乱れを高精度で測定するための低次波面センサ(CLOWFS, Coronagraphic Low-Order Wave-Front Sensor)の開発を行う。

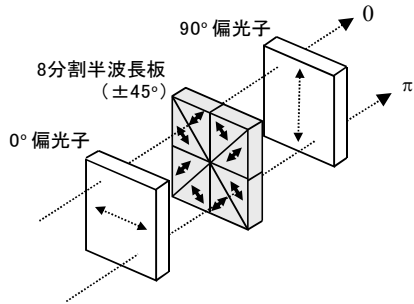


図3: 波長に依存しない80PMの原理。

4. 研究成果

(1) 副鏡の影を除去するためのMPIAA補正光学系の設計を行った。設計した補正光学系は、2枚の特殊形状凹凸非球面レンズで構成される。図4に、MPIAA補正光学系の模式図を示す。1枚目の凸レンズにより中心の副鏡の影を埋め、2枚目の凹レンズにより平行光に戻して出射する。設計した補正レンズを、フッ化カルシウムにより製作した。フッ化カルシウムは屈折率分散が小さく、広帯域のHバンド観測において有用であると期待される。さらに、可視光（He-Neレーザ、波長 $0.633\mu\text{m}$ ）を用い、製作した補正レンズの室内実証試験を実施した。その結果、副鏡の影が除去されることを確認した（図5）。

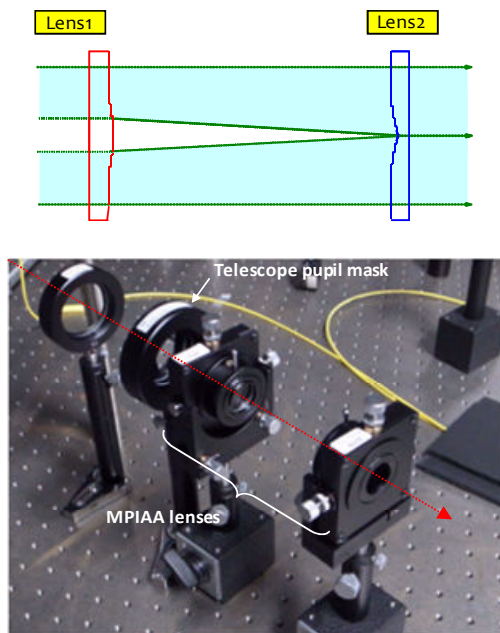


図4: MPIAA補正光学系。上の模式図のように、2枚の特殊形状凹凸レンズにより、中心に副鏡の影をもつ望遠鏡瞳を円形瞳へ変換する。下の写真は実証実験の様子。

(2) フォトニック結晶技術を利用した、Hバンド80PM（8分割波長板）の開発を実施した。フォトニック結晶とは、屈折率が光の波長以下のスケールで周期的に変化する人工結晶であり、光を自在に制御できるデバイスとして注目されてい

る。フォトニック結晶技術により、8分割の位相境界や中心の位相特異点を非常に微細に製作することが可能となる。SCEXA0において、装置の制約により80PMは僅かに斜めに置く必要がある（図2）。そこで、マスクのサイズ・位相差・軸方位など各パラメータを、斜め入射に対して最適化した。図6に、製作したすばる望遠鏡用80PMを示す。

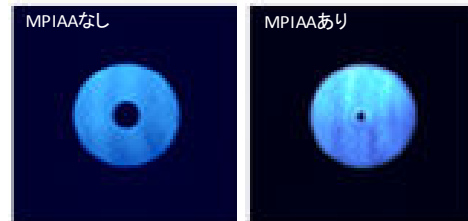


図5: MPIAA補正光学系の実証実験。(左)MPIAAなしと、(右)MPIAAありのときに得られた瞳像。副鏡の影が除去されている。

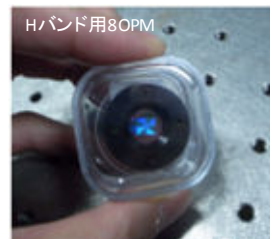


図6: 製作したすばる望遠鏡用80PMの写真。

(3) 低次波面センサCLOWFSの検討は、計算機シミュレーションを通じて実施した。80PMコロナグラフにおいて、瞳再結像面で瞳外に回折する光（図1参照）は、リオストップにより遮蔽される。CLOWFSは、この不要な回折光を利用する。そこで、リオストップとして、瞳外の光のみを反射するミラーを設置し、別光路にて像を検出する。入射波面に低次収差があると、この像が特徴的な乱れ方を示す。低次収差に対する像乱れの情報を予め得ておき（ライブラリ画像）、実際の観測像と比較する。相互相関計算などのパターンマッチングにより、観測像に含まれる低次収差を、ライブラリ画像から見積もる。シミュレーションでは、光波面乱れの中でもっともコロナグラフ性能に影響を与える、Tip-Tilt（傾き）成分のみを想定した。恒星光のフォトンノイズを仮定し、Tip-Tilt誤差 $0.05\lambda/D$ に対して30回の測定を行なった。その結果、 $0.0023\lambda/D$ の精度でTip-Tilt誤差を測定できることが示唆された。

(4) 以上、MPIAA、Hバンド用80PM、CLOWFSの研究開発により、すばる望遠鏡SCEXA0に80PMコロナグラフを導入するための技術的

見通しを得ることができた。これまで、80PMコロナグラフは高い観測性能をもつ半面、望遠鏡瞳に制約がある（副鏡とスパイダの影をもつ一般的な望遠鏡には使用できない）という問題があった。本研究の成果は、80PMコロナグラフのような発展的手法が既存の地上望遠鏡へ適用できる可能性が示されたという点において、大きな意義をもつ。フォトニック結晶技術による80PMは、将来のスペース惑星探査計画においても有用であると期待される。今後の展望としては、地上観測のための技術開発だけでなく、地球型惑星発見とその特徴づけを目指したスペース観測のための技術開発も推進していく。

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) N. Murakami, S. Hamaguchi, M. Sakamoto, R. Fukumoto, A. Ise, K. Oka, N. Baba, M. Tamura, 「Achromatic design of the vector vortex coronagraph」, Optics Express, 査読有, 21巻, 2013, 7400-7410頁
DOI: 10.1364/OE.21.007400

(2) N. Murakami, J. Nishikawa, W. A. Traub, D. P. Mawet, D. C. Moody, B. D. Kern, J. T. Trauger, E. Serabyn, S. Hamaguchi, F. Oshiyama, M. Sakamoto, A. Ise, K. Oka, N. Baba, H. Murakami, M. Tamura, 「Coronagraph focal-plane phase masks based on photonic crystal technology: recent progress and observational strategy」, Proceedings of SPIE, 査読無, 8442巻, 2012, 844205頁
DOI: 10.1117/12.925613

(3) D. Mawet, N. Murakami, 他41名, 「Taking the vector vortex coronagraph to the next level for ground- and space-based exoplanet imaging instruments: review of technology developments in the USA, Japan, and Europe」, Proceedings of the SPIE, 査読無, 8151巻, 2011, 815108頁
DOI: 10.1117/12.896059

〔学会発表〕（計10件）

(1) 村上尚史, 平翼, 馬場直志, O. Guyon, F. Martinache, 西川淳, 田村元秀, 松尾太郎, 「すばる望遠鏡搭載に向けた8分割位相マスクコロナグラフの開発」, 日本天文学会2012年秋季年会, 2012年9月19日, 大分大学（大分県）

(2) N. Murakami, 他15名, 「Coronagraph focal-plane phase masks based on photonic crystal technology: recent progress and observational strategy」, SPIE Conference: Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2012年7月1日, Amsterdam RAI Convention Center (Netherland)

(3) 村上尚史, 西川淳, W. Traub, D. Mawet, D. Moody, B. Kern, J. Trauger, E. Serabyn, 田村元秀, 馬場直志, 村上浩, 「High Contrast Imaging Testbed (HCIT)を用いた8分割フォトニック結晶マスクコロナグラフの実証実験」, 日本天文学会 2011年秋季年会, 2011年9月20日, 鹿児島大学（鹿児島県）

(4) D. Mawet, N. Murakami, 他41名, 「Taking the vector vortex coronagraph to the next level for ground- and space-based exoplanet imaging instruments: review of technology developments in the USA, Japan, and Europe」, SPIE Conference: 2011 Optics + Photonics (招待講演), 2011年8月23日, San Diego Convention Center (米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上尚史 (MURAKAMI NAOSHI)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 80450188