

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840063

研究課題名（和文） 太陽系外惑星探査のためのスペースコロナグラフの開発

研究課題名（英文） Development of space coronagraph for study of extrasolar planets

研究代表者

小谷 隆行 (KOTANI TAKAYUKI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：40554291

研究成果の概要（和文）：

太陽系外惑星は恒星に比べて非常に暗いため、コロナグラフを用いて恒星の光を弱めることで、初めて発見できる。しかしそのためには超高精度の望遠鏡が必要であり、製作が難しい。そこで鏡面を変形できる可変形鏡を用い、望遠鏡などの製作誤差を補正することで、惑星探査を可能にする。本研究では、実験室において可変形鏡を用いた恒星の散乱光低減実験を行い、レーザー光で6桁以上、広帯域光で4桁以上、恒星より暗い惑星を検出可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Extrasolar planets are extremely faint compared to a star. Hence it is needed to use a coronagraph to block the star light. However, for this purpose we need a telescope with extremely high accuracy, which is difficult to fabricate. We proposed to use a deformable mirror, which can deform the shape of the mirror, to cancel out the surface figure errors of a telescope. By the laboratory experiment, we showed that a planet which is  $10^{-6}$  and  $10^{-4}$  fainter than a star can be detected at the He-Ne laser wavelength and the broad-band light respectively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21年度	900,000	270,000	1,170,000
22年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：赤外線天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽系外惑星、コロナグラフ、補償光学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 1995年に太陽系外の惑星（系外惑星）発見されて以来、これまで500個以上の系外惑星が見つかっているが、そのほとんどが視線速度測定などの間接的な方法による発見である。これは惑星そのものの光を見るのではなく、惑星の影響を受けた主星からの光であり、そのため惑星大気の化学組成は未だよく

わかっていない。よって次のステップとして、惑星からの光を直接検出して分光分析することが、惑星の大気組成・多様性を理解するためには非常に重要であり、現代天文学の最大の課題の一つとなっている。

(2) しかし、系外惑星の直接検出は非常に難しい。惑星は恒星に比べて可視光で5桁～9

桁も暗いと予想されており、惑星の光は恒星の回折光や大気ゆらぎによる散乱光に埋もれてしまう（図1）。

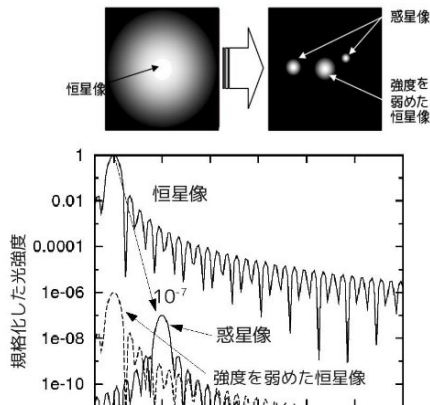


図1：恒星光を低減し、系外惑星を検出する模式図

## 2. 研究の目的

(1) SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が 2010 年代後半に打ち上げを計画している、口径3メートル級の赤外線宇宙望遠鏡である。SPICA は太陽系外惑星の直接撮像を目標の一つにしており、本研究計画では、SPICA 宇宙望遠鏡に搭載するためのコロナグラフシステムを開発し、木星型惑星の直接検出に必要な6桁のコントラストを達成することを目的とする。

(2) 惑星の直接撮像には、大気の揺らぎの影響を受けない宇宙空間からの観測が非常に重要であり、また強い恒星光を除去するために、埋もれていた惑星の光を直接検出するコロナグラフの使用が必須である。コロナグラフにおいて6桁以上のコントラストを達成するには、不完全な光学素子による波面誤差を、波長の1/100以下にすることが必要である。そして、宇宙望遠鏡をそのような超高精度で製作することは現実的ではないため、能動的に波面を補正する、補償光学（図2）が必須である。本研究では、補償光学により、恒星光の散乱光を低減し、6桁という非常に大きなコントラストを達成できることを室内実験により示すことを目標とする。

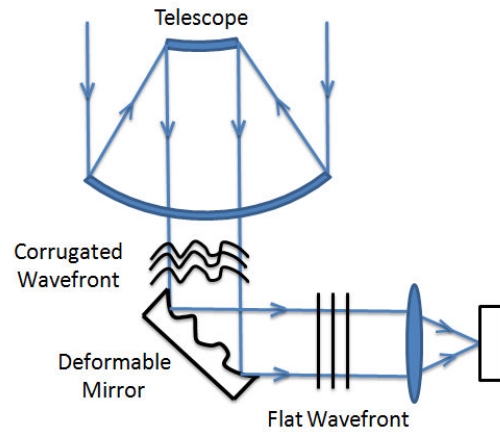


図2：補償光学の模式図

## 3. 研究の方法

(1) 常温常圧の環境で SPICA の主鏡精度をシミュレートするために、波長の 1/20 程度の鏡面精度を持つ光学系を導入し、 $32 \times 32$  素子の可変形鏡を用いた、散乱光低減実験を行った。この補償光学（可変形鏡と波面センサー）の導入により、空間周波数 16 周期まで波面を補償して、像面で  $0-16 \lambda/D$  のコントラストを6桁以上とする。

(2) コロナグラフは、安定・堅牢さが特徴であるチェッカーボードマスクを用いた。可変形鏡で空間周波数 16 周期までの波面を補償して、焦点面で 0 から  $16 \lambda/D$  の散乱光レベルを下げる。波面補償アルゴリズムとしては Speckle Nulling 法を用いた。広帯域光源は通常ランプを使うが、本研究のように6桁以上も暗い惑星光を捕らえようとする、CCDカメラで写し出すのに10時間の露出をかける必要が出てくるので、迅速な実験のために超高輝度 Supercontinuum 源を用いた。

## 4. 研究成果

(1) He-Ne レーザーを用いた波面補償実験では、 $3-10 \lambda/D$  という領域において、6-8 桁のコントラストを達成した。これは、波面補償前に比べて最大 1000 倍のコントラストの向上である。6 桁というコントラストは、系外惑星を検出するのに十分な性能である（図3）。

(2) 広帯域光源を導入し、広帯域スペckル低減実験光学系の立ち上げ、波面補償実験を行った。その結果、中心波長 650nm、10nm のバンド幅の広帯域光で4桁のコントラストを達成した ( $>3 \lambda/D$ )。さらにアルゴリズムの改良により6桁のコントラストに到達する見込みが得られた。

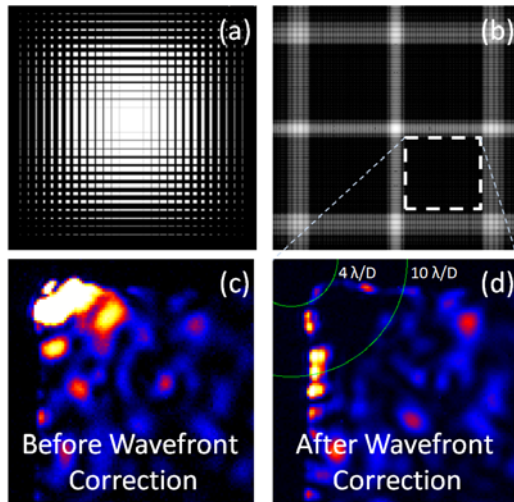


図3：実験室でのスペックル低減デモンストレーション。(a) コロナグラフマスク (b) 焦点面像 (c) 波面補償前の焦点面像の一部を拡大したもの。(d) 波面補償後の焦点面像の一部。3-10 $\lambda$ /Dにおいて、6桁以上のコントラストを達成している。

(3) これまで波面補正に用いたアルゴリズム (Malbet et al. 1995, PASP, 107, 386) は、高コントラストに達するまでに数百回の Iteration を行っており、最終像を得るまでに数時間という調整時間を必要としていた。本年度は、波面補償アルゴリズムの改良により (Borde & Traub, 2006, ApJ, 638, 488)、Iteration 数を 1/10 へと大幅に低減できることを、シミュレーションにより示した (図4)。

(4) 宇宙望遠鏡の鏡は、ある程度の製作誤差を持つため、波面は完全にはクリーンではない。現実的な鏡面精度を考慮に入れた場合に、像がどのような影響を受けるかを数値シミュレーションにより見積もった (350nm rms、像は  $5\mu\text{m}$  で評価)。その結果、波面補償を行わない場合、最大でも 4桁程度のコントラストしか得られないことがわかった。続いて、可変形鏡による波面補償のシミュレーションを行い、この場合十分に 6桁のコントラストを達成できることを示した (図4)。

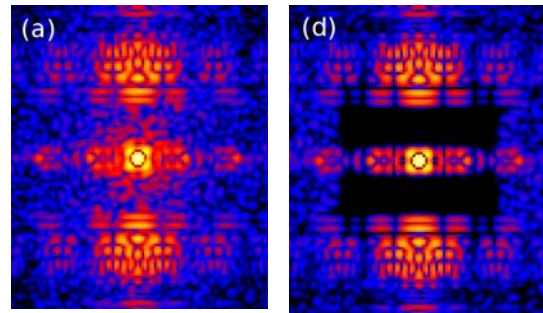


図4：左：波面補償前の像。コントラストは4桁程度。右：波面補償後の像。暗い矩形の領域内で、6桁以上のコントラストを達成している。

(4) 口径 3m 宇宙望遠鏡・中間赤外線にて近傍の木星型系外惑星を検出するための観測ターゲットリスト作成を行った。主に近傍の若い星 (<50pc, <1Gyr) から 200 個と、より近傍の比較的年老いた星 (<10pc, <5Gyr) から 20 個を選び、2種類のカタログを作成した。また検出可能な惑星の数を見積もるために、ターゲットの年齢・距離、装置の性能を考慮に入れたシミュレーションを行い、6桁コントラストの場合、十分な数の惑星を検出することが可能であることを示した。

これらにより、現実的な条件下での宇宙用波面補償光学系の実現に向けて、大きく前進したと言える。

## 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 松尾太郎、深川美里、小谷隆行他5名、Direct detection and spectral characterization of outer exoplanets with the SPICA coronagraph instrument (SCI)、Advances in Space Research、査読あり、Vol. 527、2011、1455-1462
- ② Makoto Kishimoto、S. Honig、R. Antonucci、R. Barvainis、小谷隆行、K. Tristram、G. Weigelt、K. Levin、The innermost dusty structure in active galactic nuclei as probed by the Keck interferometer、Astronomy & Astrophysics、査読あり、Vol. 527、2011、

- A121-1 - A121-7
- ③ 小谷隆行、塩谷圭吾、中川貴雄、他 4 名、Development of a wavefront correction system for the SPICA coronagraph instrument、Proceedings of SPIE、査読なし、Vol. 7731、2010、77314F-77314F-6
  - ④ 小谷隆行、Lacour Sylvestre 他 17 名、Development of a high-dynamic range imaging instrument for a single telescope by a pupil remapping system、Proceedings of SPIE、査読なし、Vol. 7734、2010、773430-773430-6
  - ⑤ 小谷隆行、塩谷圭吾、中川貴雄、他 7 名、A Wavefront Correction System for the SPICA Coronagraph Instrument、ASPC, Proc. Of Pathway Towards Habitable Planets、査読なし、Vol. 430、2010、477-479
  - ⑥ 小谷隆行、Elodie choquet、Sylvestre Lacour 他 4 名、A Laboratory Demonstration of High Dynamic Range Imaging using the Single-mode Fiber Pupil Remapping System (FIRST)、ASPC, Proc. Of Pathway Towards Habitable Planets、査読なし、Vol. 430、2010、480-482
  - ⑦ 塩谷圭吾、小谷隆行、Techniques to realize high contrast imaging for the SPICA infrared coronagraph、J. Jpn. Soc. Infrared Science、査読あり、Vol. 19、2010、61

[学会発表] (計 4 件)

- ① 小谷隆行、SPICA coronagraph instrument for the direct imaging and spectroscopy of exo-planets、Conference of SPIE, Astronomical Instrumentation、2010 年 6 月 28 日、San Diego, USA
- ② 小谷隆行、A Cryogenic active optics for the SPICA coronagraph instrument、Conference of In the Spirit of Lyot 2010、2010 年 10 月 29 日、Paris, France
- ③ 小谷隆行、Development of a wavefront correction system for the SPICA coronagraph instrument、Conference of SPIE, Astronomical Instrumentation、2010 年 6 月 27 日、San Diego, USA
- ④ 小谷隆行、SPICA コロナグラフ観測装置用補償光学系及び Tip-tilt 鏡システムの開発、日本天文学会秋季年会、2010 年 9 月 24 日、金沢大学

小谷 隆行 (KOTANI TAKAYUKI)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
宇宙航空プロジェクト研究員  
研究者番号：40554291

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者