

機関番号：82645

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19204021

研究課題名 (和文) スペース赤外線コロナグラフの開発：系外惑星の直接観測を目指して

研究課題名 (英文) Development of Space Infrared Coronagraph toward Direct Observations of Extra Solar Planets

研究代表者

中川 貴雄 (NAKAGAWA TAKAO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：20202210

研究成果の概要 (和文)：太陽系外惑星 (系外惑星) の直接観測は、惑星の誕生から進化、多様性、また究極的には地球外生命の兆候にも迫る、人類の宇宙観に関わる重要な研究テーマである。しかし、主星光と惑星光のコントラストが極めて大きいことが直接観測の障壁となっている。大気の影響のないスペースから、コントラストの点から有利となる赤外線領域で、我々の太陽系外の惑星を直接検出することを目指して、ステラー・コロナグラフの開発に取り組んだ。その結果、今までにない高いコントラスト達成の実証実験に成功し、波面補償の基本アルゴリズムを開発し、赤外線実験用環境を構築し冷却実験に成功するなどの成果を上げられた。これらの成果は、将来のスペースからの系外惑星観測の貴重な基礎技術獲得となる。

研究成果の概要 (英文)：Direct observation of extra solar planets is one of the key subjects of astronomy, which are linked to our cosmology: That can offer us clues to formation and evolution of planets, their diversity and ultimately evidence of extra-terrestrial life.

However, high contrast between the central stars and planets poses a challenge to the observation. To address the problem, we have been working on developing a stellar coronagraph. With the instrument, we aim to directly observe extra solar planets from the space in the infrared spectral range, which gives us condition free from atmospheric influence and favorable in contrast.

Consequently, we have achieved concrete results in a demonstration test of unprecedentedly-high contrast, development of wavefront compensation, and a cooling test in the infrared experimental environment. These achievements of ours established basic technology for observation of extra solar planets from the space in the future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	16,000,000	4,800,000	20,800,000
2008 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2009 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2010 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
総計	34,100,000	10,230,000	44,330,000

研究分野： 赤外線天体物理学

科研費の分科・細目： 天文学・天文学

キーワード： 系外惑星・コロナグラフ・赤外線・波面補償・SPICA

1. 研究開始当初の背景

我々の住む地球を含む太陽系、このような惑星系は、唯一無二のものだろうか？ それとも、宇宙にありふれて存在するものなのだろうか？そして生命は…？これは自然科学が21世紀中に回答すべき、もっとも重要な課題の一つである。

太陽系以外の恒星系にも観測されていた惑星の数は、ほとんどが間接的な証拠であるが、研究開始時でおおよそ200個、いまや凡そ500個にも上っている。しかしながら、そのほとんどは、ドップラー法に代表されるような間接的手法によるものであり、分かっていることは惑星の軌道と質量（の下限）である場合がほとんどであり、惑星自身の性質（大気組成等）については未知のままに残されている。

系外惑星の性質を明らかにするためには、惑星を直接に観測し、その大気の分光観測を行うことが必須である。しかしながら、それには、主星と惑星の圧倒的な明るさの比（コントラスト）が障害となる。例えば、太陽系の例では、太陽と惑星とのコントラストは、可視光線領域では 10^{-10} にもものぼり、その観測は非常に困難である。一方、これが赤外線領域となると、そのコントラストは 10^{-6} と大幅に緩和され、その実現可能性は一挙に向上する。ただし、実現性が高いとは言え、 10^{-6} にもおよぶ大コントラストに打ち勝たなければならない。そのために必要になるのが、高コントラスト観測を可能とする「ステラー・コロナグラフ」である。

本研究では、系外惑星直接検出の実現性の高い赤外線領域に最適化したコロナグラフを開発することを目指す。具体的には、2010年代半ばの打上げを目指して開発が進められているSPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) (Nakagawa et al. 2002) に搭載することを想定し、特に木星型の惑星の検出を目指す。具体的には、口径3.5m(その後3.2mに変更)の大型望遠鏡が搭載される予定であり、SPICAと本研究で開発するコロナグラフとの組み合わせには、以下の3つの優れた特徴がある。

- (1) 大気の擾乱などのない宇宙という優れた環境からの観測
- (2) すぐれた特性(PSF)をもつ大型の望遠鏡の使用
- (3) 系外惑星検出の実現性の高い赤外線領域に最適化した観測機器

本研究は、このように、系外惑星の直接検出という最重要テーマに真正面から挑むことができる千載一遇のチャンスを活かそうとするゴールにむけて、必須のステップとなるものである。

2. 研究の目的

従来のコロナグラフの研究は、ほとんど実験の行いやすい可視光線、近赤外線に限られていた。我々は、これを本質的に観測条件が良くなる中間赤外線にまで将来的には拡張可能な形にして、研究を行おうとするものである。

ただし、中間赤外線では、光学系の冷却が必要である等、実験的な困難がある。したがって、効率的な開発を行うためには、様々な方式のコロナグラフを同じ環境で評価・比較できる自由度と信頼性の高いテスト・ベンチを構築することが、重要となる。

さらに、高性能コロナグラフの性能を実証するためには、それに応じた精度の高い波面を作る必要がある。そのために、高精度の波面補償光学系の開発を同時に進める。

これらを進めることにより、研究終了時の獲得目標として、少なくとも以下の4点を達成する。

- (1) 1000素子クラスの波面補償法の比較実験ができるシステムの構築
 - (2) 波面補償方式の確立
 - (3) 中間赤外線にも適用可能なコロナグラフにより6桁以上のコントラストを実証
 - (4) 人工衛星への搭載性を検討
- さらに上記の実績を基に、将来の地球型惑星の検出にむけて、以下にも挑戦する。
- (5) 10桁を超えるコントラスト実現に挑戦し、そのための技術課題を明確にする。

3. 研究の方法

・極低温真空テスト・ベンチの開発：

本研究における一連の実験のプラットフォームとして、極低温真空テスト・ベンチを開発する。すでに保有している真空チャンバーを活用することで、比較的短期間で真空・低温(4K)の環境を得る。その後、コロナグラフ用の光学系を組み込み、高コントラスト実験を行うことができる環境を整える。

・高コントラスト実験：

上記で導入したテスト・ベンチに導入するコロナグラフの製作を行う。提案されている

さまざまな原理によるコロナグラフのうち、中間赤外線実験にまで拡張可能であると判断して、理論、実験の両面から追求してきているバイナリ瞳マスクを用いる方式を採用する(e.g. Tanaka et al. 2006, Enya et al. 2006, 2007)。

鍵となるデバイスである、低温・赤外用の瞳マスクは、金属の薄板にフォトソングラフイーの技術を用いて製作する。得られたマスクを赤外テスト・ベンチに導入し、誤差対策およびアラインメント調整を行い、コロナグラフの性能を評価、改善する。

さらに、将来の中間赤外線での実験を目指して、単色での実験を多波長での実験に拡張し、波長に対する依存性を調べる。

・波面補償法の実証実験：

スペースでの波面補償実験に必要な、1000素子クラスのデフォーダブルミラーとして、MEMを用いる。具体的には、駆動装置からの入力信号にたいしてどのような変形_大きさ、面形状、安定性_が生じるかを、可視干渉計を用いて評価する。これにより、コロナグラフの擾乱要因となっている波面誤差をどのように計測して、デフォーダブルミラーをどのような形状に変形させればコロナグラフの性能が最大となるかを決定・実行する方法(アルゴリズム)を確立する。

特にここでは実際のスペース赤外コロナグラフを想定して 10^{-6} のコントラストを、いかに短時間で実現し、安定に維持するかを、実現が期待できる第一の目標として設定する。

・超高コントラストの追求：

高いコントラストを達成するためには、コロナグラフとしての性能を追求することも必要であるが、コロナグラフに入射する望遠鏡の破面誤差を小さく抑えることも必要である。そのために、破面補償を上記のように本研究では扱っているが、それと並行して、星像差分法にも取り組んだ。これは、スペースでは上記の望遠鏡等による波面誤差が安定していることを利用して、観測対象となる星系と参照星の像等を差し引きすることで、波面誤差のうち安定した成分をキャンセルして、より高いコントラストより高いコントラストを得ようとする方法である。

さらに、高いコントラストを目指して、多段化によりコントラストを高めることができる PALC (Prolate Apodized Lyot Coronagraph) という方式のコロナグラフの基礎実験も進める。

・衛星搭載性の検証：

本研究で開発しているコロナグラフデフが、実際の衛星に搭載することができるかを

多面的に検討する。特に電気回路の I/F 適合性に着目する。

4. 研究成果

スペース・コロナグラフの実現を目指し研究を進め、主に以下の成果をあげた。

・極低温真空テスト・ベンチの開発：

メンバーのうち塩谷が中心になって開発を進め、開発したテスト・ベンチが、所定の冷却性能を持つことを確認した。

・高コントラスト実験：

Enya et al. (2007)により、常温大気中・可視光(He-Ne レーザー)・バイナリ瞳マスクを用いたコロナグラフ実験では、 1.1×10^{-7} のコントラストが達成され、少なくとも単は超ではバイナリ瞳マスクコロナグラフが原理実証されている。

ただし、実際の観測では、単波長の観測ではなく、バンド幅を持った観測が必要であり、かつ、マルチバンドでの観測が有益である。原理的には、バイナリ瞳マスクコロナグラフは、波長によらず(回折パターンは波長に比例して大きくなるが)に機能する。それを実証するために、これまで単色レーザー光のみで行なっていた実験系に、新たにマルチカラー・ブロードバンド光源(中心波長: 650, 750, 800, 850nm)を導入した。その結果、バイナリ瞳マスクコロナグラフは実験に用いたすべての波長帯において、有意なコントラスト改善効果があることを初めて実証した。

なお、本研究においては、本科研費の研究メンバーに加え、大学院学生の樋香奈恵が重要な役割を果たした。

・波面補償法の実証実験：

スペースでの波面補償実験に必要な、1000素子クラスのデフォーダブルミラーとして、MEM 技術を用いたデフォーダブルミラーを導入し、He-Ne レーザーを用いた室内実験において、チェッカーボード型コロナグラフマスクとデフォーダブルミラーを組み合わせた波面補償を行った。その結果、実際にスペックルノイズを軽減し、像のコントラストを最大 1000 倍改善し、 $3.5 \lambda/D$ という中心像に非常に近い領域において、6 桁以上のコントラストの画像を得ることに成功した。さらに、そのアルゴリズムの確立を行い、効率的に波面補償を行うことができた。本研究はメンバーの中で小谷が中心になって進めた。

・超高コントラストの追求：

超高コントラストを達成するために、星像

差分法を用いた。そのためには、光学系全体の安定性が重要なパラメータとなる。そこで、大型で真空排気と温度制御可能な真空チャンバーを用い、その内部にコロナグラフ光学系を構築することによって、光学系全体の温度安定性を、0.05K 以下になった(peak-to-peak)。

その結果、コントラストは 1.3×10^{-9} と、ゴールであるコントラスト要求 10^{-10} に迫る値を達成することができた。本研究では、本科研費研究メンバーに加え大学院学生：樋香奈恵が重要な役割を果たした。

また PALC については、まず単段での基礎実験を行い、多段化にあたっての課題を抽出した。本科研費研究メンバーに加え大学院学生：樋口慎が重要な役割を果たした。

・衛星搭載性の検証：

衛星(SPICA)の電子回路シミュレータを用いて、本研究で開発しているコロナグラフの電子回路系が衛星と適合した電氣的 I/F を持つことが確認できた。

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 12 件)

- ① Kotani, T.; Enya, K.; Nakagawa, T.; Abe, L.; Miyata, T.; Sako, S.; Nakamura, T.; Haze, K.; Higuchi, S.; Tange, Y., A Wavefront Correction System for the SPICA Coronagraph Instrument, Pathways Towards Habitable Planets, proceedings of a workshop held 14 to 18 September 2009 in Barcelona, Spain. Edited by Vincent Coudé du Foresto, Dawn M. Gelino, and Ignasi Ribas. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 無, 2010, p. 477-479.
- ② Haze, K.; Enya, K.; Kotani, T.; Abe, L.; Nakagawa, T.; Higuchi, S.; Sato, T.; Wakayama, T.; Yamamuro, T., A Coronagraph Experiment in a High Thermal Stability Environment with a Binary Shaped Pupil Mask, Pathways Towards Habitable Planets, proceedings of a workshop held 14 to 18 September 2009 in Barcelona, Spain. Edited by Vincent Coudé du Foresto, Dawn M. Gelino, and Ignasi Ribas. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 無, 2010, p. 457-459.
- ③ Enya, K.; Kotani, T.; Nakagawa, T.; Kataya, H.; Komatsu, K.; Uchida, H.; Haze, K.; Higuchi, S.; Miyata, T.; Sako, S.; and 22 coauthors, SPICA Coronagraph, Pathways Towards Habitable Planets, proceedings of a workshop held 14 to 18 September 2009 in Barcelona, Spain. Edited by Vincent Coudé du Foresto, Dawn M. Gelino, and Ignasi Ribas. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 無, 2010, p. 284-290.
- ④ Kotani, Takayuki; Enya, Keigo; Nakagawa, Takao; Abe, Lyu; Haze, Kanae; Higuchi, Shin; Tange, Yoshio, Development of a wavefront correction system for the SPICA coronagraph instrument, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Edited by Oschmann, Jacobus M., Jr.; Clampin, Mark C.; MacEwen, Howard A. Proceedings of the SPIE, 有, Volume 7731, 無, 2010, pp. 77314F-77314F-6.
- ⑤ Takao Nakagawa, The next-generation space infrared astronomy mission SPICA, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Edited by Oschmann, Jacobus M., Jr.; Clampin, Mark C.; MacEwen, Howard A. Proceedings of the SPIE, 有, Volume 7731, 2010, pp. 773100-773100-8.
- ⑥ 中川 貴雄, 次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics), 日本赤外線学会誌, 無, Vol. 19, No. 1&2, 2010, pp. 53-56.
- ⑦ Enya, Keigo; SPICA Working Group, SPICA infrared coronagraph for the direct observation of exo-planets, Advances in Space Research, 有, Volume 45, Issue 8, 2010, p. 979-999.
- ⑧ Haze, K.; Enya, K.; Abe, L.; Tanaka, S.; Nakagawa, T.; Sato, T.; Wakayama, T.; Yamamuro, T., An A0-free coronagraph experiment in vacuum with a binary-shaped pupil mask, Advances in Space Research, 有, Volume 43, Issue 1, 2009, p. 181-186.
- ⑨ Swinyard, Bruce; Nakagawa, Takao;

Merken, Patrick; Royer, Pierre; Souverijns, Tim; Vandenbussche, Bart; Waelkens, Christoffel; Davis, Peter; Di Francesco, James; Halpern, Mark; and 168 coauthors, The space infrared telescope for cosmology and astrophysics: SPICA A joint mission between JAXA and ESA, *Experimental Astronomy*, 有, Volume 23, Issue 1, 2009, pp.193-219.

- ⑩ Enya, K.; Abe, L.; Haze, K.; Tanaka, S.; Nakagawa, T.; Kataza, H.; Higuchi, S.; Miyata, T.; Sako, S.; Nakamura, T.; and 10 coauthors, Mid-infrared coronagraph for SPICA, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter*. Edited by Oschmann, Jacobus M., Jr.; de Graauw, Mattheus W. M.; MacEwen, Howard A. *Proceedings of the SPIE*, 有, Volume 7010, 2008, pp. 70102Z-70102Z-10.
- ⑪ Enya, K.; Abe, L.; Tanaka, S.; Nakagawa, T.; Haze, K.; Sato, T.; Wakayama, T., High contrast experiment of an A0-free coronagraph with a checkerboard pupil mask, *Astronomy and Astrophysics*, 有, Volume 480, Issue 3, 2008, pp.899-903.
- ⑫ Nakagawa, Takao, SPICA mission for mid- and far-infrared astronomy, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter*. Edited by Oschmann, Jacobus M., Jr.; de Graauw, Mattheus W. M.; MacEwen, Howard A. *Proceedings of the SPIE*, 有, Volume 7010, 2008, pp. 70100H-70100H-8.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 中川貴雄, SPICA プリプロジェクトチーム, SPICA タスクフォース、次世代赤外線天文衛星 SPICA の概要、宇宙科学シンポジウム、2011 年 1 月 5-7 日、JAXA 相模原キャンパス
- ② Takao Nakagawa, The next-generation space infrared astronomy mission SPICA, 8-th EAMA (East Asian Meeting on Astronomy) Symposium, 10-15 October 2010, Shanghai, China

③ 中川貴雄、天文学・宇宙物理学長期計画と赤外線天文衛星計画、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 23-28 日、千葉県幕張

④ 中川貴雄、宇宙から宇宙を探る、JAXA シンポジウム 2009「きぼう」から遙かなる宇宙へ、2009 年 7 月 9 日、有楽町朝日ホール

⑤ Takao Nakagawa, The next-generation infrared space mission SPICA, *Interstellar Matter and Star Formation - A Multi-Wavelength Perspective*, October 5-7, 2009, HYDERABAD, INDIA

⑥ Takao Nakagawa, Japanese Space Activity on Exoplanets and SPICA, *Pathways towards habitable Planets*, September 14-18, 2009, Barcelona, Spain

⑦ Enya K., Kotani T., Nakagawa T., Kataza H., Haze K., Higuchi S., Miyata T., Sako S., Nakamura T., Yamashita T., et al., SPICA Coronagraph Instrument (SCI) for the Direct Imaging and Spectroscopy of Exo-Planets, SPICA joint European/Japanese Workshop, 6/7/8th July 2009, Oxford University, UK

[図書] (計 2 件)

- ① 青木和光、家正則、岩室史秀、大石雅寿、片坐宏一、佐々木敏由紀、高田唯史、高遠徳尚、田村元秀、中川貴雄、西川淳、早野裕、宮崎聡、八木雅文、安田直樹、山下卓也、山下泰正、吉田道利、日本評論者、宇宙の観測 I-光・赤外天文学シリーズ現代の天文学第 15 巻、2007 年、p. 7-225.
- ② 寛本宣久、田中耕一郎、斗内政吉、中川貴雄、他、エヌジーティー、テラヘルツ技術総覧、2007 年、p. 572-574.

[その他]

ホームページ等

http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 貴雄 (NAKAGAWA TAKAO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：20202210

(2) 研究分担者

塩谷 圭吾 (ENYA KEIGO)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・助教
研究者番号：40392815

小谷 隆行 (KOTANI TAKAYUKI)
独立行政法人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