

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成27年 6月 3日現在

機関番号：12601
研究種目：特別推進研究
研究期間：平成22年度～平成26年度
課題番号：22000005
研究課題名（和文） 赤外線新技术による太陽系外惑星研究の展開
研究課題名（英文） Development of Exoplanet Researches
with New IR Technologies
研究代表者 東京大学大学院理学系研究科 教授
田村 元秀 (TAMURA, Motohide)
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：396,900,000円

研究成果の概要（和文）：高コントラスト赤外線装置を用いて、すばる望遠鏡における戦略枠プロジェクト SEEDS を完了し、直接撮像により4つの惑星と3つの褐色矮星の発見・確認に成功した。また、約30天体の星周円盤の微細構造を描き、太陽系スケールの空隙構造や渦巻腕構造を初めて系統的に解明した。さらに、系外惑星用高精度赤外線ドップラー観測装置の開発を進めた。赤外線新技术により広帯域光周波数コム、新規回折格子、セラミック光学系、低振動真空冷却槽等を開発した。

研究成果の概要（英文）： Using a high contrast IR-imager, we have completed the Subaru Strategic Program, SEEDS and found or confirmed 4 planets and 3 brown dwarfs via direct imaging technique. We have also revealed fine-structures within the 30 circumstellar disks, reported for the first time the gaps and arms of the solar-system scale. Furthermore, we have developed a precision IR spectrometer for exoplanet detection including wide-band laser frequency comb, echelle grating, ceramic optics, low-vibration cryostat, and others.

研究分野：天文学

キーワード：光学赤外線天文学、太陽系外惑星、補償光学、赤外線素子、波長校正

1. 研究開始当初の背景

1995年の太陽以外の恒星を周回する惑星（系外惑星）の間接的発見以来、系外惑星の研究は天文学における最重要課題のひとつとなった。太陽系では8個しかない惑星が、わずか15年余のあいだに数百個を超える候補が発見された今、最も重要な次のマイルストーンは巨大系外惑星を直接的に多数観測し、それらの惑星の性質を明らかにする「直接撮像」と、より軽い「地球型惑星」の検出である。我々はこの双方に対して、赤外線の新技術に基づく天文観測的手法により挑戦する。

2. 研究の目的

本研究は、太陽系外惑星、および、その誕生の場である原始惑星系円盤の双方の直接撮像観測（すばる戦略枠 SEEDS プロジェクト）を進め、惑星の多様性の起源を探ることを目指す。さらに、高精度赤外線ドップラー観測分光器 IRD を開発し、M型星などの低質量星の周りの生存可能領域にある（ハビタブル

な）地球型惑星を検出可能とする。

3. 研究の方法

高コントラスト赤外線装置 HiCIAO と補償光学技術を用いて、恒星近傍にある系外惑星を直接撮像する。従来の間接検出法と相補的な遠方惑星を開拓する。また、同半径領域にある原始惑星系円盤の詳細構造を直接観測によって描き、円盤から惑星が形成される過程を観測する。さらに、高精度赤外線ドップラー観測装置を開発する。そのために、波長校正、赤外線検出器、分散素子、赤外波面補償光学という赤外線の新技術開発を推進する。

4. 研究成果

(1) 系外惑星およびその誕生現場の直接観測を第一回すばる戦略枠プロジェクト SEEDS として、本チームが開発・保守・運用する HiCIAO カメラを用いて、極めて順調に進めた。その結果、4つの惑星と3つの褐色矮星の直接撮像に成功した。これは世界の同種のサ

一ペイでは最も成功したものと言える。中でも、太陽型恒星 GJ504 の惑星の発見は「第二の木星」の撮像とも呼べるものであり、400 以上のメディアで扱われた。SEEDS で発見した惑星は、いずれも恒星から数 10AU 離れた距離にある 3-20 木星質量の巨大惑星であり、コア集積モデルでその形成を説明することは難しく、既存の惑星形成理論では説明できない。

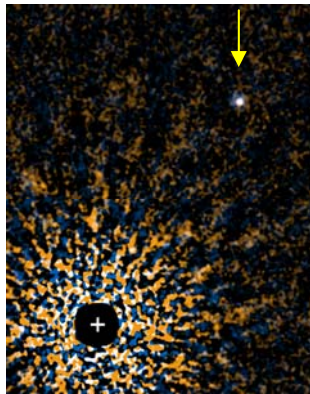


図1 太陽型恒星 GJ504 のまわりで発見した巨大惑星の赤外線画像。黄色の矢印の先が惑星。

(2) 間接法で発見された惑星系 HAT-P-7 のまわりで伴星を直接撮像により初めて発見し、逆行惑星の形成原因となり得ることを示した。

(3) 惑星形成現場である若い恒星のまわりの原始惑星系円盤の「太陽系スケール」の微細構造を世界で初めて 0.1 秒角以下の解像度で、かつ多数 (30 例以上) 検出し、惑星存在の間接証拠と成り得ることを示した (図2)。また、得られた小規模渦巻構造に密度波理論を応用した。この結果は、直接撮像で発見された遠方巨大惑星の形成と関連し、標準的惑星形成理論に見直しを迫るものである。

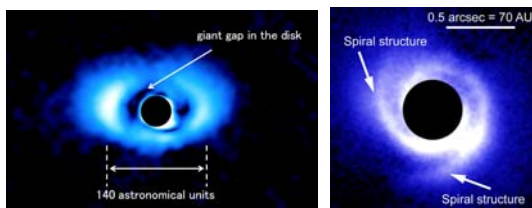


図2 ギャップ構造および渦巻腕構造を持つ原始惑星系円盤の高解像度画像。

(4) 高精度分光器 IRD の設計・製作を進めた (図3)。国際レビューにより科学目標と装置仕様の第三者評価を行い、プロトタイプ分光器を製作した。広ピッチエシエル回折格子、セラミック光学系、低振動真空冷却槽などを開発・製作した。天体光・コム光導入のためのファイバ評価を進めた。IRD 装置の技

術検討チームと同装置を用いたサイエンスワーキンググループを結成し、装置と科学の両方の進捗状況を学会等で報告するなど、次期すばる戦略枠提案の準備を進めた。



図3 赤外線分光器 IRD。

(5) 周波数間隔が大きく広帯域な光周波数コムを発生するために、独自のアイデアである SC 光発生法を提案した。実際にコム発生系を構築するとともに、広帯域化に最適な非線形ファイバの性質について検討した。その結果、周波数間隔 12.5 GHz、周波数帯域 1030 -1750 nm、周波数安定性 (確度) 1MHz 以下と、当初の目標を超えた周波数コムの発生に成功した。また、これを観測システムとして組上げた。

(6) 系外惑星に関する国際研究会を主催し、200 名近くの参加者を得た。系外惑星大研究会を年一回のペースで記載した。また、SEEDS 国際会議をプリンストン大学、MPIA、国内でのべ5回行った。

(7) プレスリリースは合計 14 回行った。SEEDS および IRD プロジェクトの成果・進捗の広報については、記者発表、WEB リリース、講演会などで広範囲に発信している。

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 100 件)

主たる論文のみ。研究代表者の順番は、特に記載が無い場合は、統括者として著者末尾になっている。

- 1) Follette, K. B., Grady, C. A., ほかに 61 名、SEEDS Adaptive Optics Imaging of the Asymmetric Transition Disk Oph IRS 48 in Scattered Light, *The Astrophysical Journal*, 査読有、798 巻、2014、article id. 132、17 pp、DOI: 10.1088/0004-637X/798/2/132
- 2) Currie, T., Muto, T., ほかに 23 名、Recovery of the Candidate Protoplanet

- HD 100546 b with Gemini/NICI and Detection of Additional (Planet-induced?) Disk Structure at Small Separations, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有、796 巻、2014、article id. L30, 6 pp、DOI: 10.1088/2041-8205/796/2/L30
- 3) Brandt, T. D., McElwain, M. W., ほか 51 名、A Statistical Analysis of SEEDS and Other High-contrast Exoplanet Surveys: Massive Planets or Low-mass Brown Dwarfs?, *The Astrophysical Journal*, 査読有、794 巻、2014、article id. 159, 25 pp、DOI: 10.1088/0004-637X/794/2/159
 - 4) Kotani, T., Tamura, M., ほか 52 名、Infrared Doppler instrument (IRD) for the Subaru telescope to search for Earth-like planets around nearby M-dwarfs, *Proceedings of the SPIE*, 査読無、9147 巻、2014、id. 914714 12 pp、DOI: 10.1117/12.2055075
 - 5) Brandt, T. D., Kuzuhara, M., ほか 53 名、The Moving Group Targets of the SEEDS High-contrast Imaging Survey of Exoplanets and Disks: Results and Observations from the First Three Years, *The Astrophysical Journal*, 査読有、786 巻、2014、article id. 1, 25 pp、DOI: 10.1088/0004-637X/786/1/1
 - 6) Tsukagoshi, T., Momose, M., ほか 56 名、High-resolution Submillimeter and Near-infrared Studies of the Transition Disk around Sz 91, *The Astrophysical Journal*, 査読有、783 巻、2014、90 (10pp)、DOI: 10.1088/0004-637X/783/2/90
 - 7) Bonnefoy, M., Currie, T., ほか 68 名、Characterization of the gaseous companion κ Andromedae b. New Keck and LBTI high-contrast observations, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有、562 巻、2014、A111 (20pp)、DOI: 10.1051/0004-6361/201322119
 - 8) 黒川 隆志, 柏木謙, 小谷隆行, 西川淳, 田村元秀「系外惑星観測のための光周波数コム光源の開発」レーザー研究、査読有、42 (9)、706-710、2014
 - 9) Janson, M., Brandt, T. D., ほか 55 名、Direct Imaging Detection of Methane in the Atmosphere of GJ 504 b, *The Astrophysical Journal*, 査読有、778 巻、2013、L4 (6pp)、DOI: 10.1088/2041-8205/778/1/L4
 - 10) Kuzuhara, M., Tamura, M., ほか 55 名、Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504, *The Astrophysical Journal*, 査読有、774 巻、2013、11 (18pp)、DOI: 10.1088/0004-637X/774/1/11
 - 11) Yamamoto, K., Matsuo, T., ほか 53 名、Direct Imaging Search for Extrasolar Planets in the Pleiades, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有、65 巻、2013、90 (19pp)、DOI: 10.1093/pasj/65.4.90
 - 12) Takami, M., Karr, J. L., ほか 51 名、High-contrast Near-infrared Imaging Polarimetry of the Protoplanetary Disk around RY Tau, *The Astrophysical Journal*, 査読有、772 巻、2013、145 (17pp)、DOI: 10.1088/0004-637X/772/2/145
 - 13) Follette, K. B., Tamura, M., ほか 51 名、Mapping H-band Scattered Light Emission in the Mysterious SR21 Transitional Disk, *The Astrophysical Journal*, 査読有、767 巻、2013、10 (26pp)、DOI: 10.1088/0004-637X/767/1/10
 - 14) Sato, B., Omiya, M., ほか 12 名、Planetary Companions to Three Evolved Intermediate-Mass Stars: HD 2952, HD 120084, and ω Serpentis, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有、65 巻、2013、Article No.85, 12 pp、DOI: 10.1093/pasj/65.4.85
 - 15) Carson, J., Thalmann, C., ほか 54 名、Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-type Star κ And, *The Astrophysical Journal*, 査読有、763 巻、id. 32, 2013、DOI: 10.1088/2041-8205/763/2/L32
 - 16) Grady, C. A., Muto, T., ほか 72 名、Spiral Arms in the Asymmetrically Illuminated Disk of MWC 758 and Constraints on Giant Planets, *The Astrophysical Journal*, 査読有、762 巻、id. 48, 2013、DOI: 10.1088/0004-637X/762/1/48
 - 17) Narita, N., Takahashi, Y. H., ほか 52 名、A Common Proper Motion Stellar Companion to HAT-P-7, PASJ, 査読有、64, id. L7, 2012、DOI: 10.1093/pasj/64.6.L7
 - 18) Mayama, S., Hashimoto, J., ほか 53 名、Subaru Imaging of Asymmetric Features in a Transitional Disk in Upper Scorpius, *The Astrophysical Journal*, 査読有、760 巻、id. 111, 2012、DOI: 10.1088/2041-8205/760/2/L26
 - 19) Hashimoto, J., Dong, R., ほか 53 名、Polarimetric Imaging of Large Cavity Structures in the Pre-transitional

- Protoplanetary Disk around PDS 70: Observations of the Disk, *The Astrophysical Journal*, 査読有、758 巻、id. L19、2012、DOI:10.1088/2041-8205/758/1/L19
- 20) Kusakabe, N., Grady, C. A., ほか 53 名、High-contrast Near-infrared Polarization Imaging of MWC480, *The Astrophysical Journal*, 査読有、753 巻、id. 153、2012、DOI:10.1088/0004-637X/753/2/153
- 21) Muto, T., Grady, C. A., ほか 60 名、Discovery of Small-scale Spiral Structures in the Disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the Physical State of the Disk from Spiral Density Wave Theory, *The Astrophysical Journal*, 査読有、748 巻、id. L22、2012、DOI:10.1088/2041-8205/748/2/L22
- 22) Tamura, M., Suto, H., ほか 52 名、Infrared Doppler instrument for the Subaru Telescope (IRD), *Proc. SPIE*, 査読無、8446 巻、id. 84461T、2012、DOI:10.1117/12.925885
- 23) Thalmann, C., Janson, M., ほか 49 名、Images of the Extended Outer Regions of the Debris Ring around HR 4796 A, *The Astrophysical Journal*, 査読有、743 巻、id. L6、2011、DOI: 10.1088/2041-8205/743/1/L6
- 24) Hashimoto, J., Tamura, M., ほか 50 名、Direct Imaging of Fine Structures in Giant Planet-forming Regions of the Protoplanetary Disk Around AB Aurigae, *The Astrophysical Journal*, 査読有、729 巻、id. L27、2011、DOI: 10.1088/2041-8205/729/2/L17
- 25) Janson, M., Carson, J., ほか 47 名、Near-infrared Multi-band Photometry of the Substellar Companion GJ 758 B, *The Astrophysical Journal*, 査読有、728 巻、id. 85、2011、DOI: 10.1088/0004-637X/728/2/85
- 26) Thalmann, C., Grady, C. A., ほか 48 名、Imaging of a Transitional Disk Gap in Reflected Light: Indications of Planet Formation Around the Young Solar Analog LkCa 15, *The Astrophysical Journal*, 査読有、ApJ, 査読有、718 巻、L87-L91、2010、DOI: 10.1088/2041-8205/718/2/L87
- [学会発表] (計 239 件)
- 1) Tamura, M., ほか、Extra-solar planets exploration using frequency comb: Infrared Doppler instrument for the Subaru telescope (IRD), OFC 2015 (招待講演)、2015 年 3 月 24 日、Los Angeles Convention Center、USA
- 2) 工藤 智幸, 田村 元秀 ほか、すばる望遠鏡戦略枠観測「SEEDS」による原始惑星系円盤および系外惑星探査 V、日本天文学会、2015 年 3 月 20 日、大阪大学、大阪府
- 3) 佐藤文衛、平野照幸 ほか、トランジット惑星候補を有する巨星の視線速度精密測定: Kepler-91 と KOI-1894、日本天文学会、2015 年 3 月 21 日、大阪大学、大阪府
- 4) 黒川隆志, 柏木謙, 小谷隆行, 西川淳, 田村元秀、系外惑星探査のための近赤外ドップラー分光と光周波数コム、応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)、2015 年 3 月 12 日、東海大学、神奈川県
- 5) M. Tamura ほか、Five years of SEEDS、平成 26 年度 系外惑星大研究会、2015 年 3 月 2 日、東京大学、東京都
- 6) Takayuki Kotani ほか、Infrared Doppler project for a survey of M dwarfs to detect Earth-like planets in the habitable zone、系外惑星大研究会、2015 年 3 月 2 日、東京大学、東京都
- 7) 田村元秀、太陽系外惑星の観測と装置、第 3 回 NINS コロキウム (招待講演)、2014 年 12 月 2 日、プリンス箱根、神奈川県
- 8) 田村元秀、20 Years since First Exoplanet Discovery: Current Status and Future Perspectives、宇宙理学談話会 (招待講演)、2014/12/3、宇宙科学研究所、神奈川県
- 9) 田村元秀、Direct imaging explorations of exoplanets/disks and future Earth-like planet studies with Subaru、China-Subaru Workshop (招待講演)、2014 年 11 月 30 日、上海、中国
- 10) 田村元秀、Exoplanet and Disk Imaging with Subaru、WFIRST Workshop (招待講演)、2014 年 11 月 17 日、Pasadena Hilton、USA
- 11) 田村元秀、太陽系外惑星と生命探査、第 7 回アストロバイオロジーワークショップ (招待講演)、2014 年 11 月 1 日、東京大学、東京都
- 12) 田村元秀、太陽系外惑星一発見 20 年で見てきたもの、日本気象学会シンポジウム (招待講演)、2014 年 10 月 22 日、福岡国際会議場、福岡県
- 13) 田村元秀、惑星形成観測の現状と展望: 系外惑星と円盤の直接観測、名古屋大学南半球研究センター研究会 (招待講演)、2014 年 10 月 3 日、名古屋大学、愛知県

- 14) 小谷隆行ほか、地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 8、日本天文学会、2014年09月11日、山形大学、山形県
 - 15) Tamura, M., Direct Imaging of Giant Exoplanets, COSPAR (招待講演), 2014年8月7日、Moscow、Russia
 - 16) Tamura, M., SEEDS, Origins 2014, 2014年7月7日、奈良県新公会堂、奈良県
 - 17) Tamura, M., SEEDS: Direct Imaging of Exoplanets and Their Forming Disks with the Subaru Telescope, AAS (招待講演)、2014年6月4日、Boston、USA
 - 18) 田村元秀、TMTが拓く宇宙の「新世界」: 太陽系外惑星と宇宙における生命、宇宙天文光学 EXPO 開催記念特別講演会 (招待講演)、2014年4月25日、パシフィコ横浜、神奈川県
 - 19) 小谷隆行、田村元秀 他、地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 7、日本天文学会、2014年3月21日、国際基督教大学、東京都
 - 20) 小谷隆行、田村元秀、ほか、地球型系外惑星観測装置ワークショップ、2014年02月23日、札幌、北海道
 - 21) 田村元秀、系外惑星観測、第26回理論懇シンポジウム (招待講演)、2013年12月25日、東京大学柏キャンパス、千葉県
 - 22) Guyon, O., AO for direct imaging from ground and space, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II (招待講演)、2013年12月10日、Kona、USA
 - 23) 田村元秀、生命の「はじまり」条件: ハビタブル惑星の誕生、総研大創立25周年記念事業「はじまり」シンポジウム (招待講演)、2013年11月25日、総研大葉山、神奈川県
 - 24) Tamura, M., Exoplanets and Disks Studies with SEEDS and Steps toward TMT, Astronomy in the TMT Era, 2013年10月17日、Tokyo、Japan
 - 25) 小谷隆行、田村元秀ほか、地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 6、日本天文学会、2013年9月12日、東北大学、宮城県
 - 26) 田村元秀ほか、すばる戦略枠観測 SEEDS による原始惑星系円盤および系外惑星探査 IV、日本天文学会、2013年9月11日、東北大学、宮城県
 - 27) Tamura, M., Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru, IAU Symposium 299: Exploring the formation and evolution of planetary systems, 2013年6月3日、Victoria、Canada
 - 28) 奥山康志ほか、系外惑星検出のための広帯域光周波数コム特性、第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月29日、神奈川工科大学、神奈川県
 - 29) 小谷隆行ほか、地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 5、日本天文学会、2013年03月21日、埼玉大学、埼玉県
 - 30) 田村元秀、Exoplanet Detections: Past and Future、将来装置による地球型系外惑星直接検出および撮像、2013年01月24日、国立天文台、東京都
 - 31) Tamura, M., SEEDS (Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru), Tamura, M., New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era, 2012年12月05日、箱根、神奈川県
 - 32) Tamura, M., Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru (SEEDS), APCTP workshop, 2012年11月19日、POSTECH、Korea
 - 33) Tamura, M., SEEDS, Subaru-KASI workshop, 2012年11月15日、SNU、Korea
 - 34) 佐藤文衛ほか、すばる IRD によるサイエンス: サイエンス検討のまとめと今後の計画、日本天文学会、2012年9月21日、大分大学、大分県
 - 35) 田村元秀、惑星形成現場の偏光観測、日本天文学会、2012年09月19日、大分大学、大分県
 - 36) Tamura, M., Near-IR High-Contrast imaging polarimetry of protoplanetary disks - SEEDS Disk Results, AOGS-2012 PS, 2012年08月14日、Resorts World Convention Centre、Singapore
 - 37) 佐藤文衛ほか、新赤外線ドップラー分光器によるサイエンス、日本天文学会、2011年3月18日、筑波大学、茨城県
 - 38) Tamura, M., First Results from SEEDS、ほか、Lyot 2010、2010年10月25日、Paris、France
 - 39) Tamura, M.ほか、Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru (SEEDS), International Conference "Evolving Theory for Planet Formation、2010年6月23日、石垣島、沖縄県
- 〔図書〕 (計4件)
- ① 田村元秀、光文社、第二の地球を探せ! 「太陽系外惑星天文学」入門、2014年、246
 - ② 池内了ほか、東京大学出版会、「はじまり」を探る、2014年、224
 - ③ 立花隆ほか、講談社、地球外生命9の論

点、2012年、256

- ④ 田村元秀ほか、NHK 出版、地球外生命体を探せ、2011年、120

[その他]

(1) SEEDS および IRD プロジェクトの成果・進捗については、以下の WEB ページで発信している。

<http://esppro.mtk.nao.ac.jp/>

(2) プレスリリースは、研究期間中に合計 14 回行った。以下に主なものをリストする。

- ① 「すばる望遠鏡 SEEDS プロジェクト、「第二の木星」の直接撮影に成功」、400 以上のメディアで紹介、2013年8月4日。
- ② 「太陽系外惑星が作る「腕」の検出に成功」、読売・毎日・神奈川・赤旗・産経・朝日、2013年2月8日。
- ③ 「すばる望遠鏡が解き明かす逆行惑星の成り立ち」、WSJ 日本語 WEB 版・マイナビ、2013年1月25日。
- ④ 「重い恒星の巨大な惑星、すばる望遠鏡が直接観測で発見」、赤旗・Scientific American・CNN・PBS・Discovery News・New Scientist・Astronomy・Forbes・Los Angeles Times・NBC News・Science Daily・NASA (以上、米国)・Mail・Huff Post (以上、英国)・The Times of India (インド)、2012年11月20日。
- ⑤ 「すばるがとらえた塵のリングと見えない惑星のきざし：HR 4796 A の残骸円盤の超高コントラスト画像」、毎日・朝日・科学新聞 2012年01月12日。
- ⑥ 「若い星のまわりの小さなうずまき腕」、朝日・マイナビ・SKY & TELESCOPE・NASA ムービー、2011年10月26日。
- ⑦ 「すばる望遠鏡、惑星と恒星のはざまを繋ぐ：木星のわずか6倍の浮遊惑星も直接観測」、2011年10月12日。
- ⑧ 「世界で最も鮮明な惑星誕生現場の画像～巨大惑星が描く円盤の模様を写す～」、毎日・日経・産経・赤旗・PhysOrg.com・SpaceRef.com、2011年2月17日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 元秀 (TAMURA, Motohide)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：00260018

(2) 研究分担者

臼田 知史 (USUDA, Tomonori)
国立天文台・光赤外研究部・教授

研究者番号：10311177

佐藤 文衛 (SATO, Bun-ei)
東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：40397823

早野 裕 (HAYANO, Yutaka)
国立天文台・ハワイ観測所・助教
研究者番号：80390623

ギュヨン オリビエ (GUYON, Olivier)
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 研究員
研究者番号：90399288

黒川 隆志 (KUROKAWA, Takashi)
東京農工大・大学院工学研究院・名誉教授
研究者番号：40302913

(3) 連携研究者

青木 和光 (AOKI, Wako)
国立天文台・光赤外研究部・准教授
研究者番号：20321581

周藤 浩士 (SUTO, Hiroshi)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号：50300710

西川 淳 (NISHIKAWA, Jun)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号：70280568

小久保 英一郎 (KOKUBO, Eiichiro)
国立天文台・光赤外研究部・教授
研究者番号：90332163

柏木 謙 (KASHIWAGI, Ken)
東京農工大・大学院工学研究院・助教
研究者番号：10509730

(4) 研究協力者

小谷 隆行 (KOTANI, Takayuki)
国立天文台・光赤外研究部・助教