

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360029

研究課題名(和文)地球型系外惑星直接検出のための高消光ダブル波面計測制御光学系の研究

研究課題名(英文)High extinction optics with double wavefront sensing and control for direct detection of Earth-like exoplanets

研究代表者

西川 淳(Nishikawa, Jun)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：70280568

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：系外惑星直接観測のための、望遠鏡、可変形鏡1、前置コロナグラフ、可変形鏡2、主コロナグラフ、最終焦点面検出器、で構成される高コントラスト光学系において、超高精度な波面計測制御法を探索した。主コロナグラフのマスクを外せば、可変形鏡1によって望遠鏡と前置コロナグラフの波面誤差が、主コロナグラフにマスクを挿入すれば、2つの可変形鏡によって主コロナグラフの波面誤差が、焦点面検出器のみを用いたダークホール制御によって行え、搭載機器として洗練されたセンサーが少ない構成で、より高いコントラストに到達できる。また、モデルの補助なしで広い面積を速く制御するSpeckle Area Nulling法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at development of high-precision wavefront measurement and control method in the high-contrast optics for direct observations of exoplanets, which consisted of the telescope, the deformable mirror 1, the pre-coronagraph, the deformable mirror 2, the main coronagraph, and the final focal-plane detector. When the mask of the main coronagraph is ejected, the wavefront aberrations of the telescope and the pre-coronagraph can be compensated using the deformable mirror1, and when the mask is inserted, the aberrations of the main coronagraph can be corrected using the deformable mirrors by the dark-hole control with the focal plane detector. The contrast will be improved along the two steps by the architecture suitable for a space telescope with a small number of detectors. We also developed the speckle area nulling (SAN) method which can extinguish wide area quickly without optical model.

研究分野：光赤外天文学・天文光学

キーワード：応用光学・量子光工学 超精密計測 波面センシング 補償光学 ナル干渉計 惑星探査 系外惑星
光学赤外線天文学

1. 研究開始当初の背景

2008年に、恒星から極めて遠くを周回している明るい巨大惑星が初めて直接撮像観測された。恒星に近接する小さな地球型の系外惑星を直接検出・分光し、生命の痕跡を調べることは、現代天文学の最大の課題の1つである。

恒星より約10桁も暗い地球型惑星を直接検出するためには、可視光全域に涉って、恒星の回折光を消光する光学系「コロナグラフ」とともに、光波面を超高精度で測定・補正しスペックル雑音を抑制する「補償光学制御系」が必須である。両者にまたがった現実的な複合構成法の研究は、我々の非対称ナル干渉法（前置コロナグラフ法）とNASA等によるダークホール法の2種類である。ダークホール法は消光された最終撮像面に残ったスペックル測定の露出時間と信号対雑音比が問題になる。一方、非対称ナル干渉法は波面センサーで測定できない波面誤差（非共通光路誤差）が問題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、露光時間が30分以上という極微弱光下において、10桁消光できる地球型系外惑星の直接観測装置を開発し、望遠鏡搭載の目処を得ることにある。そのために、望遠鏡全体で生じる変化の速い波面誤差と、コロナグラフで生じる非常に変化の遅い波面誤差を独立に制御できる、高消光なダブル波面計測制御光学系を新たに開発する。

3. 研究の方法

望遠鏡光学系の波面誤差の性質に着目し、望遠鏡で生じる速い波面の変化は、光量の比較的大きい非対称ナル干渉段階で波面センサーを用いて補正し、時間的に非常にゆっくりと変化するコロナグラフ内の非共通光路の波面誤差は、最終撮像面での波面センシングでダークホール法によって補正する。本研究では、望遠鏡、可変形鏡1、前置コロナグラフ、可変形鏡2、主コロナグラフ、最終焦点面検出器、で構成される光学系における、超高精度な波面計測法と可変形鏡の制御法を探索する。

4. 研究成果

図1は、最終的に到達した制御光学系の模式図である。当初の制御光学系では、前置コロナグラフ内部の波面誤差は、可変形鏡1(DM1)とその波面センサーにとって非共通光

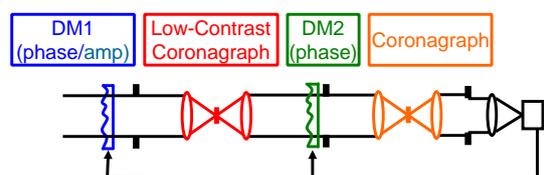


図1 発展したダブル制御光学系

路誤差でありダークホール法も使えないため、可変形鏡2(DM2)制御の負担となっていた。また、時代とともに、最終撮像面検出器のノイズが1光子を切る可能性が高まり、波面センサーを用いる利点が失われてきた。結論として、焦点面マスク交換装置を2つのコロナグラフに導入し、前置コロナグラフを用いた我々の制御光学系をダークホール法のみで制御可能にすることにより、上記の弱点を克服しつつ光子ノイズ限界で決まる速度での制御を可能にした。すなわち、第1段階として、主コロナグラフのマスクを外し、前置コロナグラフのマスクを完全なナル干渉を起こすものとし、焦点面検出器によるダークホール制御で可変形鏡1を制御すれば、望遠鏡と前置コロナグラフの波面誤差が除去できる。第2段階として、前置コロナグラフは非対称ナル干渉を起こすマスクに交換して波面を残すようにし、主コロナグラフにマスクを挿入し、2つの可変形鏡と焦点面検出器を使ってダークホール制御を再び行えば、残りの光学系の波面誤差が除去でき、前段との相乗効果で、より高いコントラストに到達できる。可動の光学素子交換装置の信頼性は、NASAの衛星であれば十分高いと考えられる。このようにして可変形鏡1に付随する波面センサーを撤廃し、非対称ナル干渉法を用いながらも、搭載機器としては洗練された構成となった。当初計画から発展した先端的なダブル制御光学系である。本構成は、国内外の研究者から高い評価を受け始めている。

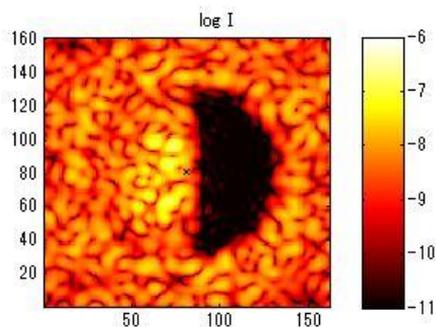


図2 SAN法によるダークホール

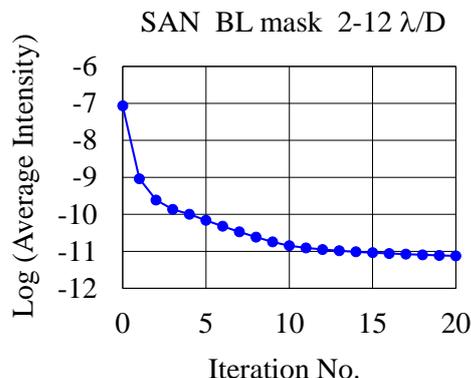


図3 SAN法によるコントラスト

焦点面波面センシングによる可変形鏡の制御によって高いコントラストを得るダークホール法においては、Speckle Area Nulling (SAN) 法を開発した。本法は、光学モデルによる数値の補助を必要としない Speckle Nulling 法と、広い面積を速く制御する Electric Field Conjugation 法の、両方の利点を備える新しい方法である。シミュレーションでは、初期波面誤差 $\lambda/600\text{rms}$ で初期コントラストが 10^{-7} のとき、10 回程度の制御で 10^{-11} のコントラストまで到達し、4 桁の改善が達成できた (図 2、図 3)。本法についても、国内外の研究者から高い評価を受け始めている。

光学実験では、初期スペックルレベル 10^{-5} に対して 10^{-7} 程度までの消光に成功した (図 4)。10 桁のコントラストに到達しない原因の一つは、使用できる汎用光学素子の波面誤差であり、初期スペックルレベルの高さに影響している。制御を繰り返すことによる消光がシミュレーションほどに進まなかった原因の一つは、可変形鏡の素子数の少なさであることが分かっている。いずれも将来的には改善の見通しがある。

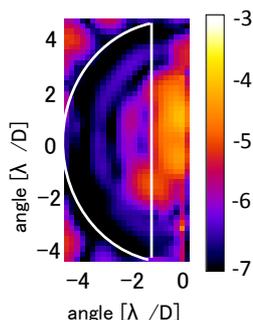


図 4 光学実験によるダークホール

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 11 件)

- ① J. Nishikawa, M. Oya, M. Horie, K. Sato, M. Fukase, N. Murakami, T. Kotani, S. Kumagai, M. Tamura, Y. Tanaka, T. Kurokawa, “A coronagraph system with unbalanced nulling interferometer: progress of optics and control method”, Proc. SPIE, 査読有, 9143 (2014) 91433A, DOI: 10.1117/12.2055636
- ② M. Oya, J. Nishikawa, M. Horie, K. Sato, M. Fukase, N. Murakami, T. Kotani, S. Kumagai, M. Tamura, Y. Tanaka, T. Kurokawa, “Adaptive optics operation with focal wavefront sensor in a coronagraph for direct observation of exoplanets” Proc. SPIE, 査読有 (2014) 91433B, DOI: 10.1117/12.2055670
- ③ N. Murakami, J. Nishikawa, M. Tamura, E. Serabyn, W. A. Traub, K. M. Liewer, D. C. Moody, J. T. Trauger, O. Guyon, F. Martinache, N. Jovanovic, G. Singh, F. Oshiyama, H. Shoji, M. Sakamoto, S. Hamaguchi, K. Oka, and N. Baba, “Recent progress on phase-mask coronagraphy based on photonic-crystal technology,” Proc. SPIE, 査読有, 9143, 914334 (2014). DOI: 10.1117/12.2054790
- ④ T. Currie, T. Muto, T. Kudo, M. Honda, T. D. Brandt, C. Grady, M. Fukagawa, A. Burrows, M. Janson, M. Kuzuhara, M. W. McElwain, K. Follette, J. Hashimoto, T. Henning, R. Kandori, N. Kusakabe, J. Kwon, K. Mede, J.-i. Morino, J. Nishikawa, T.-S. Pyo, G. Serabyn, T. Suenaga, Y. Takahashi, J. Wisniewski, and M. Tamura, “Recovery of the Candidate Protoplanet HD 100546 b with Gemini/NICI and Detection of Additional (Planet-induced?) Disk Structure at Small Separations,” Astrophys. J. Let., 査読有, 796, L30 (2014). DOI: 10.1088/2041-8205/796/2/L30
- ⑤ F. Oshiyama, N. Murakami, O. Guyon, F. Martinache, N. Baba, T. Matsuo, J. Nishikawa, and M. Tamura, “Central-Occultation Removal Plates for Focal-Plane Phase-Mask Coronagraphs with a Centrally-Occulted Telescope,” Publ. Astron. Soc. Pacific, 査読有, 126, 270-279 (2014). DOI: 10.1086/675807
- ⑥ J. Nishikawa and N. Murakami, “Unbalanced nulling interferometer and precise wavefront control,” Optical Review, 査読有, 20, 453-462 (2013) (Invited). DOI: 10.1007/s10043-013-0078-2
- ⑦ J. Nishikawa, K. Yokochi, N. Murakami, L. Abe, T. Kotani, M. Tamura, T. Kurokawa, A.V. Tavrov, M. Takeda, H. Murakami, “A coronagraph system with unbalanced nulling interferometer: progress of dynamic range,” Proc. SPIE, 査読有, 8442, 84425D (2012). DOI: 10.1117/12.925792
- ⑧ M. Oya, J. Nishikawa, M. Horie, N. Murakami, T. Kotani, L. Abe, S. Kumagai, M. Tamura, T. Kurokawa, H. Murakami, “Adaptive optics operation with two wavefront sensors in a coronagraph for

exoplanet observations”, Proc. SPIE, 査読有, 8442, 844255 (2012).
DOI: 10.1117/12.925858

- ⑨ M. Horie, J. Nishikawa, M. Oya, R. Waki, S. Kumagai, M. Tamura, T. Kurokawa, N. Murakami, H. Murakami, L. Abe, “Wavefront correction inside unbalanced nulling interferometer”, Proc. SPIE, 査読有, 8445, 84452E (2012)
DOI: 10.1117/12.926737
- ⑩ T. Kobayashi, J. Nishikawa, T. Yosuke, T. Kurokawa, K. Kashiwagi, M. Tamura, N. Murakami, N. Baba, N. Hashimoto, “Unbalanced nulling interferometer with four-quadrant phase mask,” Proc. SPIE, 査読有, 8421, 84213D (2012)
DOI: 10.1117/12.975179
- ⑪ N. Murakami, J. Nishikawa, W. A. Traub, D. 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,” SPIE, 査読有, 8442, 844205 (2012).
DOI: 10.1117/12.925613

[学会発表] (計 29 件)

- ① 西川淳, 大矢正人, 堀江正明, 佐藤克磨, 深瀬雅央, 村上尚史, 小谷隆行, 熊谷紫麻見, 田村元秀, 田中洋介, 黒川隆志, “超高コントラスト系外惑星直接撮像のための非対称ナル干渉法とダークホール制御”, 日本天文学会 2015 年春季年会, W210b, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市), 2015/3/18-21.
- ② 大矢正人, 西川淳, 堀江正明, 佐藤克磨, 深瀬雅央, 村上尚史, 小谷隆行, 熊谷紫麻見, 田村元秀, 田中洋介, 黒川隆志, “系外惑星直接観測のための Speckle Area Nulling を用いたダークホール制御”, 日本天文学会 2015 年春季年会, W217a, 大阪大学 豊中キャンパス (大阪府豊中市), 2015/3/18-21.
- ③ 村上尚史, 赤岩夏海, 馬場直志, 西川淳, 田村元秀, “瞳再配置型位相マスクコロナグラフの提案”, 日本天文学会 2015 年春季年会 W216a, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市), 2015/3/18-21.
- ④ 田村元秀, 村上尚史, 馬場直志, 西川淳, 小谷隆行, 成田憲保, 塩谷圭吾, O. Guyon, 河原創, 権静美, 松尾太郎, 住貴宏, 山田
- 亨, ほか WFIRST チーム, “WFIRST/AFTA Coronagraph (WACO)”, 日本天文学会 2015 年春季年会 W215a 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市), 2015/3/18-21.
- ⑤ 西川淳, “系外惑星直接観測のための高コントラスト撮像光学系,” 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-B3-1(招待講演), 東海大学 湘南キャンパス (神奈川県平塚市), 2015/3/11-14.
- ⑥ 大矢正人, 西川淳, 堀江正明, 佐藤克磨, 深瀬雅央, 村上尚史, 小谷隆行, 熊谷紫麻見, 田村元秀, 田中洋介, 黒川隆志, “系外惑星直接観測のためのダークホールアルゴリズムによる補償光学制御” Optics & Photonics Japan 2014, 6aB10, 筑波大学 東京キャンパス文京校舎(東京都文京区), 2014/11/5-7.
- ⑦ J. Nishikawa, N. Murakami, M. Oya, K. Sato, M. Horie, T. Kurokawa, Y. Tanaka, M. Tamura, T. Kotani, S. Kumagai, “Dark-hole control without modeling and enhanced extinction by pre-DM and pre-coronagraph”, Wide-field InfraRed Surveys: Science and Techniques, Pasadena (USA), 17-20 Oct 2014.
- ⑧ 村上尚史, 西川淳, 田村元秀, 押山史佳, Eugene Serabyn, Wesley A. Traub, Kurt M. Liewer, Dwight C. Moody, John T. Trauger, 庄子隼斗, 坂本盛嗣, 岡和彦, 馬場直志, “系外惑星の直接撮像を目指した高コントラスト極限補償光学”, シンポジウム「すばる望遠鏡から顕微鏡へ: 高解像・高感度観測を可能にする次世代補償光学系に向けて」, 国立天文台 (東京都三鷹市), 2014/3/24-25. (招待講演)
- ⑨ 佐藤克磨, 西川淳, 大矢正人, 堀江正明, 田中洋介, 熊谷紫麻見, 黒川隆志, 村上尚史, “高コントラスト撮像光学系における焦点面波面センシングによるスペックルノイズ低減”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 18a-E4-6, 青山学院大学相模原キャンパス (神奈川県相模原市), 2014/3/17-20.
- ⑩ 大矢正人, 西川淳, 堀江正明, 佐藤克磨, 深瀬雅央, 村上尚史, 小谷隆行, 熊谷紫麻見, 田村元秀, 田中洋介, 黒川隆志, “系外惑星直接観測のための焦点面波面センシングを用いた補償光学制御法(2)”, 日本天文学会 2014 年春季年会, W222a, 国際基督教大学 (東京都三鷹市), 2014/3/19-22.
- ⑪ 村上尚史, 西川淳, 田村元秀, Eugene Serabyn, Wesley A. Traub, Kurt M. Liewer, Dwight C. Moody, John T. Trauger, 押山

- 史佳, 庄子隼斗, 坂本盛嗣, 岡和彦, 馬場直志, “フォトニック結晶技術による焦点面マスクコロナグラフの開発状況”, 日本天文学会 2014 年春季年会 W220a, 国際基督教大学 (東京都三鷹市), 2014/3/19-22.
- ⑫ 押山史佳, 村上尚史, 平翼, 馬場直志, Olivier Guyon, Nemanja Jovanovic, Garima Singh, Frantz 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(III)”, 日本天文学会 2014 年春季年会 V214a, 国際基督教大学 (東京都三鷹市), 2014/3/19-22.
- ⑬ J. Nishikawa, M. Ohya, M. Horie, K. Sato, M. Fukase, N. Murakami, T. Kotani, M. Tamura, Y. Tanaka, T. Kurokawa, S. Kumagai, “A coronagraph system with unbalanced nulling interferometer : upgrade of 2013”, The 5th Subaru International Conference “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II” P49 Kona(USA), 8-12 Dec 2013.
- ⑭ M. Oya, J. Nishikawa, M. Horie, K. Sato, M. Fukase, N. Murakami, T. Kotani, M. Tamura, Y. Tanaka, T. Kurokawa, S. Kumagai, “Adaptive optics operation with a focal plane wavefront sensing in a coronagraph”, The 5th Subaru International Conference “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II” P54, Kona(USA), 8-12 Dec 2013.
- ⑮ 堀江正明, 大矢正人, 西川淳, 田村元秀, 藤井紫麻見, 村上尚史, 黒川隆志, “系外惑星直接撮像のための高コントラスト光学系の研究:初段補償光学による干渉計内部の波面補正”, 応用物理学会第 52 回光波センシング技術研究会, LST52-7, 東京理科大学 (東京都新宿区), 2013/12/3-4.
- ⑯ 大矢正人, 西川淳, 堀江正明, 佐藤克磨, 深瀬雅央, 村上尚史, 小谷隆行, 熊谷紫麻見, 田村元秀, 田中洋介, 黒川隆志, “系外惑星直接観測のための焦点面波面センシングを用いたダークゾーンコロナグラフ” Optics & Photonics Japan 2013, 14aC4, 奈良公会堂 (奈良県奈良市), 2013/11/12-14.
- ⑰ K. Sato, J. Nishikawa, M. Ohya, M. Horie, Y. Tanaka, S. Kumagai, T. Kurokawa, N. Murakami, “Speckle noise reduction by focal plane wave-front sensing in high contrast imaging optics,” 18th Microoptics Conference (MOC’ 13), K3, 東京工業大学(東京都目黒区), 27-30 Oct, 2013.
- ⑱ 堀江正明, 大矢正人, 西川淳, 田村元秀, 藤井紫麻見, 村上尚史, 黒川隆志 “系外惑星直接撮像のための高コントラスト光学系の研究・初段補償光学による干渉計内部の波面補正”, 日本天文学会 2013 年秋季年会, W230a, 東北大学(宮城県仙台市), 2013/9/10-12.
- ⑲ 押山史佳, 村上尚史, 平翼, 馬場直志, Olivier Guyon, Frantz Martinache, Nemanja Jovanovic, Garima Singh, 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(II)”, 日本天文学会 2013 年秋季年会 V239a, 東北大学(宮城県仙台市), 2013/9/10-12.
- ⑳ 佐藤 克磨, 西川淳, 大矢 正人, 堀江 正明, 田中 洋介, 熊谷 紫麻見, 黒川隆志, “高コントラスト撮像光学系における焦点面波面センシングによるスペックルノイズ低減”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、27p-G6-5、神奈川工科大学(神奈川県厚木市)、2013/3/27-30.
- ㉑ 大矢正人, 堀江正明, 西川淳, 田村元秀, 藤井紫麻見, 村上尚史, 黒川隆志, 小谷隆行, 中川貴雄, “系外惑星直接観測のための焦点面波面センシングを併用したコロナグラフの開発”, 日本天文学会 2013 年春季年会 W14a, 埼玉大学 (埼玉県さいたま市)、2013/03/20-23.
- ㉒ 西川淳、“系外惑星直接観測のための高コントラスト干渉光学系”, 2013 年電子情報通信学会総合大会、C-3-67, 岐阜大学 (岐阜県岐阜市)、2013/03/19-22, (依頼講演).
- ㉓ 小林拓自, 西川淳, 田中洋介, 黒川隆志, 柏木謙, 田村元秀, 村上尚志, 馬場直志, 橋本信幸, “4 分割位相マスクコロナグラフを応用した非対称ナル干渉計”, 第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 国立天文台(東京都三鷹市)2012/12/17-18.
- ㉔ 大矢正人, 堀江正明, 西川淳, 田村元秀, “新しい焦点面波面センシング法によるダークゾーンコロナグラフ”, 第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 国立天文台(東京都三鷹市)2012/12/17-18.
- ㉕ 堀江 正明, 西川淳, 大矢 正人, 脇 亮, 藤井 紫麻見, 田村 元秀, 黒川隆志, 村上尚史, 村上浩, Lyu Abe, “ナル干渉

計内部波面誤差の干渉計外部補償光学による補正”，第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ、国立天文台（東京都三鷹市）2012/12/17-18.

②⑥大矢 正人，堀江 正明，西川 淳，田村元秀，村上 尚史，小谷 隆行，Lyu Abe，熊谷 紫麻見，黒川 隆志，村上 浩，“系外惑星直接観測のための焦点面波面センシングを用いた2波面センサー法”，応用物理学会第50回光波センシング技術研究会，LST50-32，東京理科大学（東京都新宿区），2012/12/4-5.

②⑦大矢正人，堀江正明，西川 淳，田村元秀，藤井紫麻見，第56回日本大学工学部学術講演会，“系外惑星直接観測のための高コントラストコロナグラフシステムの開発”，0-28，日本大学（東京都千代田区），2012/11/28.

②⑧堀江 正明，西川 淳，大矢 正人，脇 亮，藤井 紫麻見，田村 元秀，黒川 隆志，村上 尚史，村上 浩，Lyu Abe，“系外惑星直接観測のための高コントラスト光学系の開発”，第56回日本大学工学部学術講演会，日本大学（東京都千代田区），2012/11/28.

②⑨小林拓自，西川淳，田中洋介，黒川隆志，柏木謙，田村元秀，村上尚志，馬場直志，橋本信幸，“4分割位相マスクによる非対称ナル干渉計を用いた高ダイナミックレンジ光学系” 応用物理学会第49回光波センシング技術研究会 LST49-5、東京理科大学（東京都新宿区），2012/6/5-6.

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

○取得状況（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川 淳 (NISHIKAWA, Jun)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：70280568

(2) 研究分担者

黒川 隆志 (KUROKAWA, Takashi)

東京農工大学・工学研究院・名誉教授

研究者番号：40302913

（平成26年度より連携研究者）

(3) 連携研究者

村上 尚史 (MURAKAMI, Naoshi)

北海道大学・工学研究科・助教

研究者番号：80450188

田村 元秀 (TAMURA, Motohide)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号：00260018