

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06206・20K20287

研究課題名（和文）ミリ波補償光学の創成

研究課題名（英文）Development of Millimetric Adaptive Optics

研究代表者

田村 陽一（Tamura, Yoichi）

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10608764

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,700,000円

研究成果の概要（和文）：電波望遠鏡の建設に際し鏡面精度を担保したままアンテナを大口径化・高周波化することは、あらたな天文学領域を開拓するうえで重要である。本研究では、既存あるいは将来の地上ミリ波サブミリ波望遠鏡に搭載し、風負荷・熱変形・重力変形による鏡面精度の低下を実時間で補償する光学システム「ミリ波補償光学」の基礎研究を行った。本研究では、電波天文学のネイティブな波面計測技術である開口合成干渉法を利用した波面計測システムを提案し、低周波数(20GHz)かつ少数素子(5素子)の波面計測システムを開発し、野辺山45m望遠鏡に搭載した。この結果、8 μm r.m.s.の精度で実時間の波面測定が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波・サブミリ波は、あらゆる天体の材料であるガスや塵や、高温のプラズマの検出に長けている。ミリ波補償光学の実現は、将来の大型サブミリ波望遠鏡の実現に直結し、引いては世界最大のサブミリ波干渉計ALMAと同等の集光力を持ちながら、視野を10 \times に、分光帯域幅を10 \times に拡大する、電波天文学の悲願ともいえる宇宙探査性能の獲得につながると期待される。これは、惑星科学、星形成論、星間化学、宇宙マイクロ波背景放射や銀河・銀河団の探索とそれをういた宇宙論研究など、波及効果が高い。本研究成果は、既存・将来のミリ波・サブミリ波望遠鏡の大型化・高周波化に分け隔てなく応用し、性能を向上させることが可能である。

研究成果の概要（英文）：In the construction of radio telescopes, it is important to increase the diameter and frequency of antennas while maintaining the accuracy of the mirror surface in order to open up new fields of astronomy. In this study, we conducted basic research on "millimetric adaptive optics", an optical system that can be installed on existing or future ground-based submillimeter-wave telescopes to compensate for the loss of mirror surface accuracy due to wind loading, thermal deformation, and gravitational deformation in real time. We proposed a wavefront sensor using aperture-plane interferometry, which is an application of a native wavefront sensing technique in radio astronomy, and developed a low-frequency (20 GHz) and small-element (5-element) wavefront sensor, which was installed on the Nobeyama 45-m telescope. As a result, real-time wavefront measurement with an accuracy of 8 μm r.m.s. was demonstrated.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 補償光学 ミリ波 電波望遠鏡 計測工学

1. 研究開始当初の背景

望遠鏡の大型化、すなわちより高い集光力・空間分解能の獲得は、観測天文学の発展の歴史そのものだ。電波のなかで波長の最も短いサブミリ波・テラヘルツ波(波長 $100\ \mu\text{m}$ – $1\ \text{mm}$; 以下、サブミリ波に統一)においても、鏡面精度を担保したままアンテナを大口径化することは、あらたな天文学領域を開拓するうえできわめて重要である。

そもそも電波望遠鏡の大型化・高周波化をリミットする要因は、望遠鏡周辺環境の変化に伴う光学性能の低下にある。電波望遠鏡は、大型構造を前提として製作されてきたが、それを覆う巨大なドームを建設するには、莫大なコストを要する。したがって、屋外に“吹きさらし”のアンテナを建設し、その鏡面を数十 μm の精度で担保することこそが、高精度サブミリ波望遠鏡を建設する上での課題であった。この課題を克服するためには、重力変形や熱変形などの遅い変形をパッシブにコントロールするための大胆な構造設計の変革に加え、風や日射に伴う速い変形を計測しコントロールするための「補償光学」と呼ばれるアクティブな波面補償技術の獲得が必要不可欠である。

光学赤外線天文学から始まった補償光学技術は、望遠鏡の大型化・低コスト化に欠かせない技術革新である。今や補償光学は、従来の大型光学/赤外線望遠鏡に例外なく実装され、将来の 30 m 超級の超大型光学/赤外線望遠鏡の時代を支えるインフラ的技術基盤となった。しかし、光赤外天文学分野と異なり、電波天文学では、波面参照が可能なほどに明るい天体もなければ、CCD 等の廉価な撮像検出器に依拠する波面センシング技術の実現も困難である。一方、電波天文学にはそのネイティブな波面センシング技術がある。すなわち、2 系統の信号の到達時刻差を精密に計測する「電波干渉法」である。また、大気による波面劣化を主な補償対象とする光赤外望遠鏡と異なり、電波望遠鏡が相手にすべきは光学系そのものの性能低下である。

2. 研究の目的

以上の通り、望遠鏡の集光性能をリミットする要因は、重力・熱・風による光学系の変形である。その変形を検出し(波面計測)、可変型鏡で波面補正(波面制御)するミリ波補償光学が実現すれば、次世代サブミリ波望遠鏡への扉が開く。

本研究では、前者に注目し、波面計測法の考案と 20 GHz で駆動する 5 素子波面センサを試作し、これを国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載して、次世代サブミリ波望遠鏡が目指す鏡面精度 ($40\ \mu\text{m}$ r.m.s.) と同程度の精度で、風負荷に対する光路長変化(波面の歪み)が計測可能なことを実証することを目的とした。ミリ波補償光学では、参照光源(微弱なミリ波広帯域雑音源)を主鏡に置き、主鏡面(開口面)から焦点に至るまでの信号到達時間を精密に計測し、光路長を実時間で計測するという方式(開口面干渉法, aperture plane interferometry)を採用することにした。

また、光赤外天文学から生まれた補償光学は、フォトリソ(光工学)の一分野にまで昇華した。現在では広く、産業、特に生命・医療分野への応用が目覚ましい。こうした革新を電波天文学“発”でも巻き起こすのもまた、ミリ波補償光学創成のねらいである。

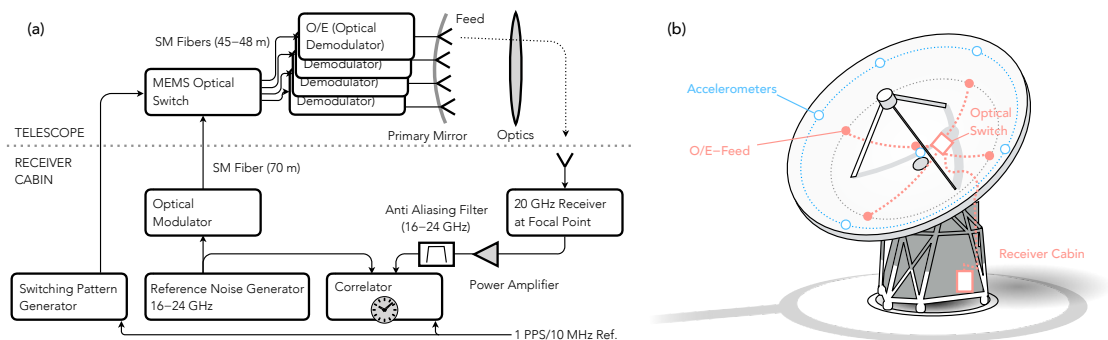


図1：5素子波面計測システムの概略図。(a) システムのブロック図。16-24 GHz の広帯域雑音を発生させ(reference noise generator)、光変調して主鏡面(primary mirror)からフィードホーンにより自由空間に挿入させ、望遠鏡の光学系を介して受信機へ導く。受信機で検波された信号は、相関器(correlator)によってもとの信号との相関を取ることで到達時刻を計測する。(b) 野辺山 45m 電波望遠鏡における波面計測システムの配置。

3. 研究の方法

本研究では、「開口面干渉法」による実時間の波面センシングを実証するための5素子波面計測システム（図1）を開発し、国立天文台野辺山45m電波望遠鏡に搭載して、原理実証を行うこととした。

広帯域雑音は自分自身としか干渉（相関）しない。この性質を利用し、計測のロバスト性の向上、低電力化、天体信号や周辺機器への非電磁干渉を担保した。広帯域雑音を発生させ、2分配し、一方を相関器へ入力、もう一方を光変調して主鏡面へ伝送、自由空間へ放射して光学系を介して焦点へ導く。焦点に設置した冷却受信機で雑音を検波し相関器へ入力して、もとの広帯域雑音と相関させることで、到達時刻差を精密に計測する。

以上を実現するため、(1) 波面計測システムの試作と実験室における性能評価、(2) 野辺山45m電波望遠鏡との光学系結合試験、(3) 2素子波面センサの試作と野辺山45m電波望遠鏡における波面勾配計測試験、(4) 5素子波面センサの試作と野辺山45m電波望遠鏡における波面歪曲計測試験を行うこととした。

4. 研究成果

(1) 波面計測システムの試作と実験室における性能評価

Johnson-Nyquist 雑音を利用した参照雑音発生器、産業用マイクロ波光変調器・光スイッチ・光復調器によるマイクロ波信号光伝送システム、位相安定化光ファイバケーブル、軽量・耐候・高利得フィードホーン、16-24GHz高速デジタル変換器とFPGAを用いた相関器の開発を行った。この結果、本方式によるロバスト性の高い波面計測が可能であることを示した。特に、光路長変化に対する線形性が $40\mu\text{m}$ を十分下回る誤差で計測可能であることを示した。

(2) 野辺山45m電波望遠鏡との光学系結合試験

試作したフィードホーンを国立天文台野辺山45m電波望遠鏡に設置し、参照雑音信号を光学系に挿入して、同望遠鏡の20GHz帯受信機で検波した。1温度チョッパーホイール法による信号強度測定を行った結果、自由空間損失が72dBであることを示した。これは、電磁界シミュレーションによる予測と整合的であった。

(3) 2素子波面センサの試作と野辺山45m電波望遠鏡における波面勾配計測試験

開口面干渉法による2素子波面センサを試作して野辺山45mミリ波望遠鏡に搭載した。センサ素子は、主鏡中央付近（半径 $\sim 4\text{m}$ ）、及び上端（半径 $\sim 17\text{m}$ ）に設置し、各センサから焦点までの光路長をモニタし、風負荷に伴う光路長変化を検出した（図2）。さらに、2つの光路長差（超過経路長）による波面「勾配」の検出感度を評価した結果、参照信号源の光子雑音から予測される感度と整合的な $8\mu\text{m r.m.s.}$ という高い感度が得られることがわかった。風負荷による望遠鏡光学系の変形の時間スケールは、典型的に $\sim 1\text{sec}$ 以上であり、風負荷が望遠鏡に与える直流（DC）的な風圧が望遠鏡変形を支配することがわかった。

(4) 5素子波面センサの試作と野辺山45m電波望遠鏡における波面歪曲計測試験

波面センサを5素子に拡張し、波面勾配のみならず、波面の2次元的歪曲を計測できるシステムに拡張した。これを同望遠鏡に設置し、5素子波面計測が可能であることを示した。

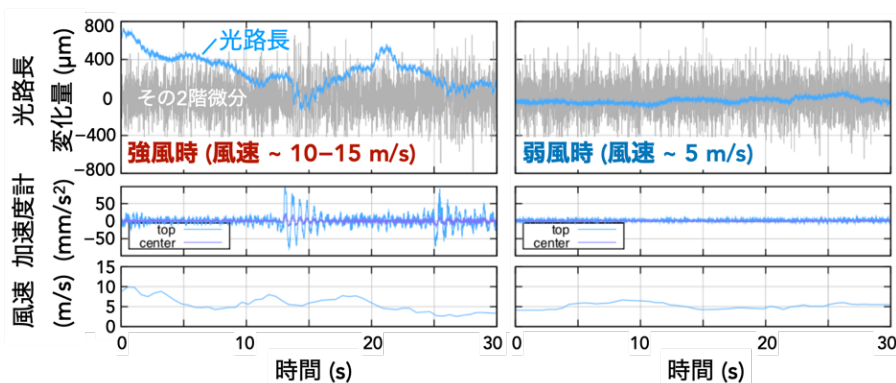


図2：波面センサによって得られた光路長変化量(上)とセンサと同じ箇所に設置した加速度計出力(中)及び風速(下)。左が強風時、右が弱風時の測定結果。風速が速く、加速度計による風負荷が検出されている時間で光路長変化が大きく変化していることが認められる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoichi Tamura, Ryohei Kawabe, Yuhei Fukasaku, Kimihiro Kimura, Tetsutaro Ueda, A. Taniguchi, N. Okada, H. Ogawa, I. Hashimoto, T. Minamidani, N. Kawaguchi, N. Kuno, Y. Togami, M. Hagimoto, S. Nakano, K. Matsuda, S. Okumura, T. Nakamura, M. Kurita, T. Takekoshi, T. Oshima, T. Onishi, K. Kohno	4. 巻 11445
2. 論文標題 Wavefront sensor for millimeter/submillimeter-wave adaptive optics based on aperture-plane interferometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 114451N-1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2561885	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Klaassen, Pamela D.; Mroczkowski, Tony K.; Cicone, Claudia; Hatziminaoglou, Evanthia; Sartori, Sabrina; De Breuck, Carlos; Bryan, Sean; Dicker, Simon R.; Duran, Carlos; Groppi, Chris; Kaercher, Hans; Kawabe, Ryohei; Kohno, Kotaro; Geach, James	4. 巻 11445
2. 論文標題 The Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 114452F-1~20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2561315	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Masakatsu Chiba; Ikumi Hashimoto; Nozomi Okada; Hideo Ogawa; Ryohei Kawabe; Tetsuhiro Minamidani; Yoichi Tamura; Kimihiro Kimura	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Wind- and Operation-Induced Vibration Measurements of the Main Reflector of the Nobeyama 45 m Radio Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Vibration Engineering & Technologies	6. 最初と最後の頁 n/a
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42417-020-00202-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計34件（うち招待講演 9件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Satoya Nakano
2. 発表標題 Characterization of sensitivity and responses of a 2-element prototype wavefront sensor for millimeter-wave adaptive optics attached to the Nobeyama 45 m telescope
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野寛矢
2. 発表標題 ミリ波補償光学の開発 VII. アンテナ鏡面-受信機間の超過経路長の測定による鏡面変形の評価
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村友子
2. 発表標題 ミリ波補償光学の開発 VI. 20 GHz波面センサの複素帯域透過特性の較正方法とその時間安定性の検証
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野寛矢
2. 発表標題 ミリ波補償光学(MAO) の実現に向けた波面センサーの開発と実証
3. 学会等名 2021年度宇宙電波懇談会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 The Large Submillimeter Telescope (LST計画)
3. 学会等名 2021年度宇宙電波懇談会シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 大型サブミリ波望遠鏡LST計画とミリ波補償光学の開発
3. 学会等名 国立天文台先端技術センター談話会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 Millimeter-wave Adaptive Optics for Future Large Submillimeter Telescopes
3. 学会等名 国立天文台NRO談話会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 次世代大口径サブミリ波望遠鏡Large Submillimeter Telescope (LST)ってなに？
3. 学会等名 電波天文・干渉計サマースクール2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 Large Submillimeter Telescope (LST): 7. 望遠鏡仕様
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoichi Tamura
2. 発表標題 Millimeter-wave Adaptive Optics for Future Large Submillimeter Telescopes
3. 学会等名 Joint ALMA Observatory APG Advanced Technical Talk (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoya Nakano
2. 発表標題 Development of Millimetric Adaptive Optics (MAO): Characterization of Wavefront Deformation with the Nobeyama 45 m Radio Telescope
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoichi Tamura
2. 発表標題 Millimetric Adaptive Optics: Current Status
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 次世代大口径サブミリ波望遠鏡 Large Submillimeter Telescope (LST) ってなに？
3. 学会等名 JCMT Workshop 「北半球で口径最大&焦点面装置とっても充実サブミリ波単一鏡 JCMT を使ってみよう & 使い倒そう!!」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 ミリ波補償光学の開発 V. 野辺山45mミリ波望遠鏡における開口面干渉法波面センサの実証実験
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Kawabe
2. 発表標題 Future Large Submillimeter Telescopes: Concept, Progress, and Developments
3. 学会等名 Joint ALMA Observatory APG Advanced Technical Talk (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 サブミリ波単一鏡の革新
3. 学会等名 国立天文台研究集会「(サブ)ミリ波単一鏡の革新で挑む, 天文学の未解決問題」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川邊 良平
2. 発表標題 Large Submillimeter Telescope (LST) 計画
3. 学会等名 国立天文台研究集会「(サブ)ミリ波単一鏡の革新で挑む, 天文学の未解決問題」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoichi Tamura
2. 発表標題 Wavefront sensor for millimeter/submillimeter-wave adaptive optics based on aperture-plane interferometry
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 Millimetric Adaptive Optics: Current Status
3. 学会等名 野辺山サイエンスワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 Large Submillimeter Telescope
3. 学会等名 2020年度宇宙電波懇談会シンポジウム「極限性能で切り開く電波天文学」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川邊 良平
2. 発表標題 LST検討状況とB4R/LMTによる科学評価観測
3. 学会等名 Nobeyama Science Workshop 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 ミリ波補償光学の開発 III. 開口干渉型波面センサの概要
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深作悠平
2. 発表標題 ミリ波補償光学の開発 IV. 波面センサ用送信機サブシステムの開発
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 ミリ波補償光学の開発 I. プロジェクトの概要
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田哲太郎
2. 発表標題 ミリ波補償光学の開発 II. 波面センサ用GPU相關器
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 ミリ波補償光学の創成
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウムFY2017 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田哲太郎
2. 発表標題 Correlator for Millimetric Adaptive Optics
3. 学会等名 ALMA/NRO/ASTEユーザーズミーティング
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 Millimetric Adaptive Optics
3. 学会等名 台湾中央研究院天文及天体物理学研究所 special seminar (台北, 台湾) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本育実
2. 発表標題 野辺山45 m電波望遠鏡における主鏡の変形測定
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川邊良平
2. 発表標題 Large Submillimeter Telescope (LST): 4) Recent Progress
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本育実
2. 発表標題 野辺山45 m電波望遠鏡における主鏡の変形計測(2)
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 Millimetric Adaptive Optics: The Concept and Current Activities
3. 学会等名 International Workshop on Submillimeter Astronomy (南京, 中国) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村陽一
2. 発表標題 Millimetric Adaptive Optics: Development of Microwave Wavefront Sensor
3. 学会等名 Nobeyama/ASTE Single Dish Science Workshop (長野, 日本) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川邊良平
2. 発表標題 New 50-m-class single dish telescope: Large Submillimeter Telescope (LST)
3. 学会等名 A workshop to discuss science/technical aspects of the Atacama Large-Aperture Submm/mm Telescope (AtLAST) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Large Submillimeter Telescope https://www.lstobservatory.org/</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川邊 良平 (Kawabe Ryohei) (10195141)	国立天文台・科学研究部・教授 (62616)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	谷口 暁星 (Taniguchi Akio)	名古屋大学・理学研究科・研究員 (13901)	
研究協力者	奥村 幸子 (Okumura Sachiko)	日本女子大学・理学部・教授 (32670)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	久野 成夫 (Kuno Nario)	筑波大学・数理物質系・教授 (12102)	
研究協力者	千葉 正克 (Chiba Masakatsu) (10179955)	大阪府立大学・工学研究科・教授 (24403)	
研究協力者	木村 公洋 (Kimura Kimihiro)		
研究協力者	岡田 望 (Okada Nozomi)		
研究協力者	小川 英夫 (Ogawa Hideo)		
研究協力者	南谷 哲宏 (Minamidani Tetsuhiro)		
研究協力者	川口 則之 (Kawaguchi Noriyuki)		
研究協力者	栗田 光樹夫 (Kurita Mikio)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	竹腰 達哉 (Takekoshi Tatsuya)		
研究協力者	大西 利和 (Onishi Toshikazu)		
研究協力者	河野 孝太郎 (Kohno Kotaro)		
研究協力者	深作 悠平 (Fukasaku Yuhei)		
研究協力者	上田 哲太郎 (Ueda Tetsutaro)		
研究協力者	橋本 育美 (Hashimoto Ikumi)		
研究協力者	戸上 陽平 (Togami Yohei)		
研究協力者	萩本 将都 (Hagimoto Masato)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中野 覚矢 (Nakano Satoya)		
研究協力者	松田 慧一 (Matsuda Keiichi)		
研究協力者	中村 友子 (Nakamura Tomoko)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	National Institute for Astrophysics			
ドイツ	European Southern Observatory			
英国	Royal Observatory Edinburgh			