

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22224002

研究課題名(和文) 秒角撮像遠赤外線干渉計による星生成領域核心部の観測

研究課題名(英文) Observational Study of the Hearts of Star-Forming Regions by a Far-Infrared Interferometer with Arcsecond Resolution

研究代表者

芝井 広 (Shibai, Hiroshi)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70154234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 151,300,000円

研究成果の概要(和文)：星惑星誕生過程の解明のためには遠赤外線(テラヘルツ波)において高い「解像度」の観測が必要である。このため、秒角オーダーの解像度が得られる世界唯一の装置FITE(気球搭載遠赤外線干渉計)の高性能化を行った。具体的には遠赤外線センサーのピクセル数増加(15素子から75素子)、データ処理系の高ダイナミックレンジ化、放物面鏡駆動機構(準パラレルメカニズムの発案)開発、2ビーム同時干渉計調整機構の開発などである。宇宙物理学・天文学の進展方向を考えると、近い将来、宇宙空間における干渉計望遠鏡を実現することは必然であり、本研究によってこの大きい目標に向かって前進することができた。

研究成果の概要(英文)：Observations with high spatial resolution in far-IR spectral domain have become critically important in contemporary astronomy, especially for investigations of star and planetary-system formation. FITE (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment) is a balloon-borne telescope, and has a unique capability of several arc-seconds resolving power in this domain. This research has increased the performance and reliability of FITE in several points; increasing the pixel format of the far-infrared array sensor, increasing the dynamic range of post electronics of the sensor, development of a new mirror alignment mechanism and a new interferometer adjustment mechanism. The result of this research will contribute to future space-borne interferometric telescopes.

研究分野：宇宙遠赤外線観測による星惑星形成、特に惑星の材料である宇宙固体微粒子(ダスト)に焦点を当てた研究

キーワード：遠赤外線 光赤外線天文学 テラヘルツ波 原始惑星系円盤 残骸円盤 分子雲コア 遠赤外線干渉計
科学観測用大気球

1. 研究開始当初の背景

わが国初の本格的赤外線衛星「あかり」の成功など、波長1ミクロンから1mmまで赤外線全域にわたる高感度観測が実現し、天文学・宇宙物理学の多くの分野で新しい発見が相次いでいる。また、従来のミリ波、サブミリ波の分子輝線観測およびダスト連続波観測から、星生成コアの中心や原始惑星系円盤の構造が明らかになってきた。

例えば図1の観測例は若い恒星周囲の円盤の近赤外線(1.6ミクロン)撮像結果である。ダストによって散乱された近赤外線によって円盤の構造が複雑であることが明らかになった。また大電波干渉計ALMAなどによって低温ダストの観測が進んできた。しかしこれらの観測データからはダスト密度と温度の縮退が解けず、ダストサイズの不定性も加わり、ダスト総量が不明のままである。一方のガス総量についても、定量測定する有効な手段がない。このような状況から、ダストの熱放射ピークとその短波長側(遠赤外線)を測定して温度と密度の両方を求めることは、星・惑星形成の母胎である分子雲コアや円盤の解明において極めて重要である。そこでわれわれの研究グループは、1秒角の空間分解能を目指して世界初の宇宙遠赤外線干渉計(Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE)を開発した。

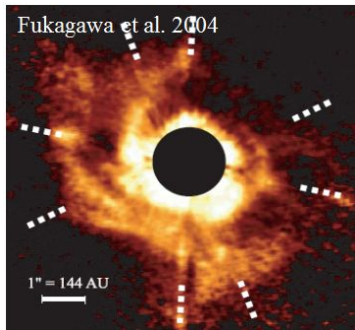


図1. 星周円盤の例(ぎょしゃ座AB星)

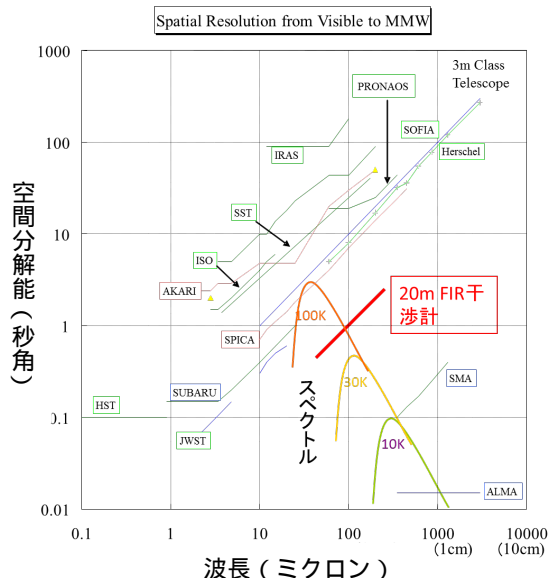


図2. 種々の望遠鏡の解像度の比較

2. 研究の目的

(1) 星惑星形成現場の物理状態の解明

本研究の主目的は、星惑星形成現象の現場(星生成分子雲コア、原始惑星系円盤)のダスト(固体微粒子)の温度分布と密度分布を知るために、気球搭載型遠赤外線干渉計FITEを用いて高空間分解能の観測をすることであった。図2に示すように、星間空間の平均的な低温状態(10K)から、密度と温度が上昇する過程を解明するためには、放射ピークとその短波長側である遠赤外線を観測する必要がある。これによって温度分布がわかれば、その後の星惑星形成過程の時間変化をより高精度にシミュレーションで予測できると期待される。

(2) 宇宙干渉計観測技術の発展

特に長波長の電磁波においては、高い空間分解能を得るために干渉計技術が必須である。しかしながら宇宙干渉計観測はこれまでに我が国のVSOP衛星などによる電波観測しか実現できていない。より短波長の遠赤外線では、高精度のアライメントが必要であるため、本研究が初めての試みである。欧米では巨大な遠赤外線干渉計衛星プロジェクトが提案されているが、科学観測用大気球に搭載する遠赤外線干渉計を成功させて、将来の宇宙干渉計望遠鏡実現への第一歩を踏むことがもう一つの目的である。

3. 研究の方法

(1) ブラジル気球キャンペーン

我が国の大気球フライト施設では搭載重量に限界があるため、2010年にブラジル・サンパウロ近郊の気球フライト基地から遠赤外線干渉計FITEを搭載して、上空35000メートルから宇宙観測を計画した。



図3. 打上直前試験(ブラジル気球基地にて)

フライトはJAXA 宇宙研とブラジル宇宙科学研究所 INPE の共同で実施される計画であった。本研究のチームは干渉計望遠鏡本体を準備した。干渉計は2ビームの Fizeau 型干渉計であり、焦点部に設置された遠赤外線アレイセンサーによってフリンジ(干渉縞)を測定することで、鮮鋭度を測定する方式である。アレイセンサーを用いるために遅延線装置は不要である。(ただし基線長を変えて観測を繰り返す必要はある。)ビームの直径は40cm、観測波長 150 ミクロン、基線長 8m である。遠赤外線センサーは超流動ヘリウムで極低温に冷却される。観測天体候補は調整及び校正用に海王星を観測したのち、晩期型赤色巨星である IRC + 10216 を観測し、さらに主目的的天体である、オリオン KL 周辺の星生成領域、大マゼラン雲の 30 Dor などを予定した。図3が打ち上げ前の試験の様子である。しかしながら打ち上げ直前に重要装置に不具合が発生し、急遽改修を試みたがフライトには至らなかった。

(2)オーストラリア気球フライト用の改造

JAXA 宇宙科学研究所がオーストラリア・アリススプリングス気球基地からフライトするキャンペーンを行うことになり、本研究もこれに参加することとした。

オーストラリアは気球フライト条件が良いものの、以下の点で本研究の干渉計望遠鏡の改修が必要となった。例えばフライト時の安全性確保のために、より高強度の構造物にすることが求められた。そのために基本構造全体を CFRP パイプで構成した(図4)。他にも多くの要改修項目があったため、これらを行ってフライト準備を整えた。

また性能向上を図って、遠赤外線センサーの高精度化(図5)、干渉計光学調整の効率化(図6) その他多くの改造を行い、信頼性を高めることができた(後述)。また基線長の延伸は比較的容易にできるような設計を行っていた。

しかしながら、本研究期間を一年延長したものの気球フライト実施ができず、残念ながら観測データ取得には至らなかった。理由はオーストラリアでのフライト実施準備(条約締結を含む)に当初想定以上の期間を要した



図4 . CFRP 製主構造体。白色遮熱塗装済。

こと、本研究チーム側の体制が研究の長期化のために十分に整わない期間があったことなどである。いずれにしても、確実に成功が見込まれる状態で実施するべきであると判断し、次のフライト機会を追求することとした。

4 . 研究成果

フライトが延期された研究期間を利用して、宇宙遠赤外線干渉計装置の高性能化を行った。以下に述べるこれらの研究成果については、査読付き論文、及び多数の国際・国内学会で発表を行った。なお同種の研究は最近米国で始められた(BETTI プロジェクト、NASA)が、そちらも実施には至っていない。我々のグループが依然として世界的にユニークである。早期にフライトする機会を得て世界初の遠赤外線高空間分解能観測を実現すべく努力を続ける。

(1)遠赤外線センサーの高性能化

これまでに一列 15 素子のアレイセンサーを開発して用いてきた。今回の装置である 2 ビーム Fizeau 型干渉計においては、焦点面に基線長方向の干渉縞が生成される。この干渉縞の明暗コントラスト(鮮鋭度)を測定し天体の空間的広がりを求めるという原理である。この遠赤外線センサーは極低温(絶対温度 2K)まで冷却する必要があり、この制約から、Ga を少量ドープした Ge 単結晶を加圧したものが素子として用いられる。極低温下で安定に加圧する機構をコンパクトに作り込むことが最大の眼目であった。我々は世界最小で稠密の二次元アレイ機構を発案し、今回初めて 15 素子×5 段 = 75 素子を実現した(図5)。これによって、基線長と直交する方向の冗長が増し、観測データの質と信頼性を向上することができる。なお、この新しい加圧方式によってピクセル間隔が従来の半分以下になり、結果的にカメラ光学系も含めた装置の体積、重量をほぼ 1/10 以下にすることが可能になった。特殊仕様の極小皿バネをはじめ、構造物全体を総インコネル合金製とした。

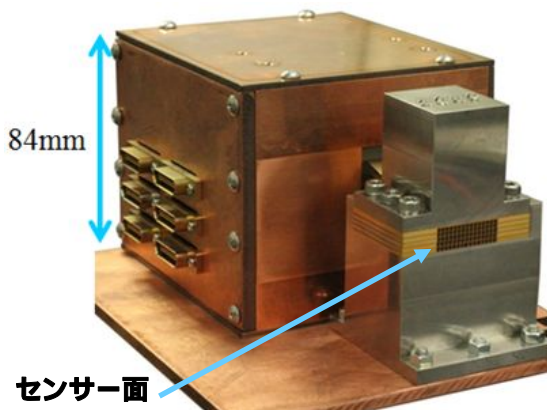


図5 . 新遠赤外線アレイセンサー。超流動ヘリウムによる 2K 冷却下で使用される。

(2) 2 ビーム同時干渉計調整機構の開発

干渉計を高性能に動作させるには光学素子の位置と角度の調整（アライメント）が必須である。この目的のためにはシャックハルトマン波面センサーが広く用いられるが、今回のような Fizeau 干渉計の複数のビームを同時に調整することはできず、個別に調整したのちに、両者の関係を合わせるという手順を踏まざるを得なかった。

そこで今回、2 ビーム同時に光学アライメントを測定できる装置を開発した（図6）これには F/比 0.5 で 300mm 径という特殊な参照球面鏡も必要であり、新たに専用のものを製作した。また波面センサー素子の上で離れた二つの光学素子について、各波面の相対位相を求めること可能にするような試験光学系を提案した。これによってアライメント測定が効率化でき、観測フライト前の調整作業期間の大幅短縮が可能になった。

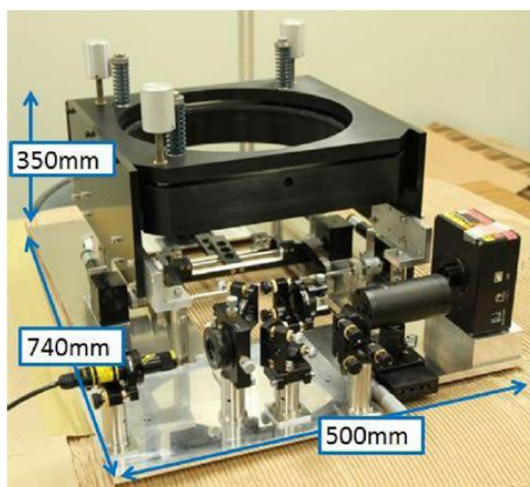


図6 . 2 ビーム同時アライメント測定装置

(3) 準平行メカニズムの発案と開発

一般に光学素子は剛体としての6つの自由度を持つ。干渉計を構成する光学系、特に今回の場合は、二つの軸外放物面鏡の位置と姿勢の合計6自由度を精密に駆動する必要がある。

このような駆動機構はシリアル機構と平行機構に大別される。後者が原理的には優れているが、実現機構は容易ではない。商品化されているものは軸受け部が特殊なために極めて高価か、駆動範囲の小さいもののみである。

そこで我々は新たに「準平行機構」と呼ぶべき新しい機構を提案した。これは平行機構の長所を持つが純粋な平行機構ではない。また市販の安価な部品を用いて構成できるとともに、駆動範囲に制限が無い。ペナルティーは剛体の6自由度と駆動への対応が複雑なことであるが、通常の PC で容易に計算できる範囲である。

この新しい方式の原理実証に成功するとともに、軸外放物面鏡の6軸アライメント

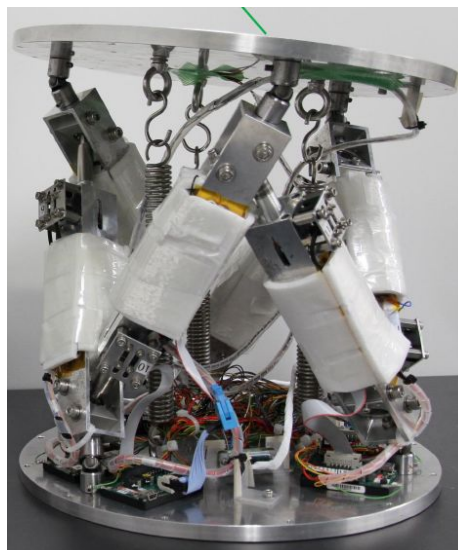


図7 . 「準平行メカニズム」方式の軸外放物面鏡6軸調整機構。

調整機構として、本干渉計に実用化した（図7）。ちなみに本装置は低温真空環境下でも安定かつ確実に動作が可能である。

(4) 遠赤外線干渉計観測手法の発展に寄与

米国 NASA の Goddard 宇宙飛行センターは独自で同種のプロジェクトを開始した。開始にあたっては、芝井が共同研究者として参加し、我々の到達点・重要知見を彼らに提供した。

将来の宇宙物理学・天文学の進展方向を考えると、近い将来、宇宙空間における干渉計望遠鏡を実現することは必然であり、本研究の取り組みである気球搭載干渉計望遠鏡による高解像観測研究は、その実現に向かって半歩前進することができたといえる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Sasaki, Shibai, Fukagawa, Sumi, et al., "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: Optical Adjustment System," IEEE Transactions on Terahertz Sci. Tech., 査読有、4(2), 179-183, 2014
DOI: 10.1109/TTHZ.2013.2296996

Leisawitz, Shibai, et al., "Advancing toward farinfrared interferometry in space through coordinated international efforts," UV/Optical-IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts, 査読無、SPIE-8860, 2013
DOI: 10.1117/12.2024432

Sasaki, Shibai, Sumi, Fukagawa, et al., "Development of new optical adjustment system for FITE (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment)," Optical and Infrared

Interferometry III, 査読無、SPIE-8445, 2012
DOI: 10.1117/12.925836

[学会発表](計 35 件)

Sasaki, "Far-infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE," Pathways towards habitable planets II, Jul.13-17, 2015, Bern, Switzerland

Itoh, "FITE optical adjustment tolerance," Pathways towards habitable planets II, Jul. 13-17, 2015, Bern, Switzerland

Terano, "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE," Ground and space observatories: a joint venture to planetary science," Mar. 2-5, 2015, Santiago, Chile

Nakamichi, "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE," FISICA workshop Instrument Simulation and Preliminary Technology Development Activities, Jan. 28-29, 2015, Maynooth, Ireland

Shibai, "Far-Infrared Astronomical Interferometer onboard Balloon," International Symposium on Research Frontiers of Physics, Earth and Space Science, Dec. 17-18, Osaka, Japan

Sasaki "Development of New Optical Adjustment System for FITE," International Symposium on Research Frontiers of Physics, Earth and Space Science, Dec. 17-18, Osaka, Japan

Sasaki, "Development of New Optical Adjustment system for FITE (Far-Infrared Interferometric Experiment)," International Symposium on Space Terahertz Technology, Apr. 8-10, 2013, Groningen, The Netherlands

Leisawitz, "Is Spacebased Interferometry Dead?" Am. Astron. Soc., AAS Meeting #218, BAAS, 43, 2011, Baltimore, USA

伊藤, 「FITE: スターカメラ用星像中心検出プログラムの高速化」, 日本天文学会, 2015年9月9-11日, 甲南大学(神戸)

芝井, 「気球搭載遠赤外線干渉計と南極天文学への応用」, 南極で切り開くテラヘルツ天文学, 2015年11月18-19日, 国立天文台(東京・三鷹)

芝井, 「気球搭載遠赤外線干渉計 FITE」, 大気球シンポジウム, 2015年11月5-6日, 宇宙科学研究所(相模原)

土居, 「気球 VLBI ミッション」, 大気球シンポジウム, 2015年11月5-6日, 宇宙科学研究所(相模原)

寺農, 「遠赤外線干渉計FITE: 放物面鏡調整機構の開発」, 日本天文学会, 2014年9月11-13日, 山形大学(山形)

伊藤, 「気球搭載型遠赤外線干渉計FITE: 結像光学系の要求性能評価と公差解析」, 日本天文学会, 2014年9月11-13日, 山形大学(山形)

寺農, 「気球搭載遠赤外線干渉計 FITE: 放物面鏡調整機構の開発」, 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 2014年12月3-4日, 国立天文台(東京・三鷹)

中道, 「FITE 用遠赤外線圧縮型 Ge:Ga 二次元アレイセンサ開発の現状」, 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 2014年12月3-4日, 国立天文台(東京・三鷹)

寺農, 「気球搭載遠赤外線干渉計 FITE: 放物面鏡調整機構の開発」, 大気球シンポジウム, 2014年11月6-7日, 宇宙科学研究所(相模原)

芝井, 「気球搭載遠赤外線干渉計 FITE」, 大気球シンポジウム, 2014年11月6-7日, 宇宙科学研究所(相模原)

芝井, 「FITE 用圧縮型 Ge:Ga 二次元遠赤外線アレイの開発-II」, 日本天文学会, 2014年3月19-22日, 国際基督教大学(東京・調布)

芝井, 「気球搭載型遠赤外線干渉計 FITE: 次期フライト計画と高強度フレームの開発」, 日本天文学会, 2013年9月10-12日, 東北大学(仙台)

⑳佐々木, 「遠赤外線干渉計 FITE: 新干渉計調整機構の開発」, 日本天文学会, 2013年9月10-12日, 東北大学(仙台)

㉑芝井, 「気球搭載型遠赤外線干渉計 FITE: 次期フライト計画と高強度フレームの開発」, 大気球シンポジウム, 2013年11月14-15日, 宇宙科学研究所(相模原)

㉒佐々木, 「遠赤外線干渉計 FITE の新干渉計調整機構とその光学系の開発」, 日本天文学会, 2013年3月20-23日, 埼玉大学(さいたま)

㉓叶, 「遠赤外線干渉計 FITE: 新長軽量平面鏡の開発」, 日本天文学会, 2013年3月20-23日, 埼玉大学(さいたま)

㉔片多, 「新放物面鏡調整機構の開発」, 日本天文学会, 2013年3月20-23日, 埼玉大学(さいたま)

②⑥秋山、「FITE 用遠赤外線圧縮型 Ge:Ga 二次元アレイセンサの開発」、日本天文学会、2013 年 3 月 20-23 日、埼玉大学(さいたま)

②⑦秋山、「宇宙遠赤外線観測用 圧縮型 Ge:Ga 二次元アレイセンサの開発」、日本赤外線学会、2012 年 11 月 1-2 日、関西大学(大阪・吹田)

②⑧佐々木、「気球搭載型遠赤外線干渉計 FITE の光学調整機構の開発」、日本赤外線学会、2012 年 11 月 1-2 日、関西大学(大阪・吹田)

②⑨芝井、「宇宙遠赤外線干渉計(FITE)プロジェクト：次回フライトに向けて」、大気球シンポジウム、2012 年 10 月 16-17 日、宇宙科学研究所(相模原)

③⑩芝井、「気球搭載型遠赤外線干渉計 FITE：2010 年実験結果と次期フライト計画」、日本天文学会、2013 年 3 月 19-22 日、龍谷大学(京都)

③⑪佐々木、「WFS を用いた遠赤外線干渉計 FITE の光学調整方法の開発」、日本天文学会、2013 年 3 月 19-22 日、龍谷大学(京都)

③⑫金子、「FITE 計画に向けた遠赤外線二次元アレイ検出器の開発状況」、日本天文学会、2013 年 3 月 19-22 日、龍谷大学(京都)

③⑬芝井、「メタマテリアルの宇宙観測技術への応用研究」、レーザー研シンポジウム 2011、2011 年 4 月 27-28 日、大阪大学(大阪・吹田)

③⑭叶、「気球搭載遠赤外線干渉計 FITE 次回フライト計画」、大気球シンポジウム、2011 年 10 月 6-7 日、宇宙科学研究所(相模原)

③⑮叶、「遠赤外線干渉計 FITE のフライト計画」、大気球シンポジウム、2010 年 9 月 30 日-10 月 1 日、宇宙科学研究所(相模原)

〔図書〕(計 3 件)

芝井 広、東大出版会、「宇宙生命論」、2015、編集、分担執筆 136-143

芝井 広、日本赤外線学会、日本赤外線学会誌、第19巻、2010、「特集：日本の宇宙科学・天文学における赤外線技術」(74ページ)の編集、「赤外線・サブミリ波天文学の発展」9-12ページの執筆

芝井 広、名大出版会、「宇宙史を物理学で読み解く：素粒子から物質・生命まで」、2010、74-81 ページの執筆

〔その他〕

ホームページ

http://www-ir.ess.sci.osaka-u.ac.jp/www_fit_e/

6. 研究組織

(1)研究代表者

芝井 広 (SHIBAI, Hiroshi)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：70154234

(2)研究分担者

川田 光伸 (KAWADA, Mitsunobu)
名古屋大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号：50280558
(平成22年度のみ)

住 貴宏 (SUMI, Takahiro)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：30432214
(平成23年度から)

深川 美里 (FUKAGAWA, Misato)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：40509840
(平成26年度まで)

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

吉田 哲也 (YOSHIDA, Tetsuya)
斎藤 芳隆 (SAITO, Yoshitaka)
成田 正直 (NARITA, Masanao)
土居 明広 (DOI, Akihiro)
河野 裕介 (KOHNO, Yusuke)
松尾 太郎 (MATSUO, Taro)
加藤 恵理 (KATO, Eri)
叶 哲生 (KANO, Tetsuo)
幸山 常仁 (KOHYAMA, Tsunehito)
伊藤 優佑 (ITO, Yusuke)
中島亜沙美 (NAKASHIMA, Asami)
山本 広大 (YAMAMOTO, Kodai)
金子 有紀 (KANEKO, Yuki)
下浦 美那 (SHIMOURA, Mina)
KONTOPOULOS, Dimitrios
栗田 嘉大 (KUWADA, Yoshihiro)
會見 有香子 (AIMI, Yukako)
小西 美穂子 (KONISHI, Mihoko)
佐々木 彩奈 (SASAKI, Ayana)
秋山 直樹 (AKIYAMA, Naoki)
須藤 淳 (SUDO, Jun)
寺農 篤 (TERANO, Atsushi)
伊藤 哲司 (ITO, Satoshi)
中道 みのり (NAKAMICHI, Minori)
大山 照平 (OYAMA, Teruhira)
MAGALHAES, Antonio Mario
SOOD, Ravi