

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01255

研究課題名（和文）遠赤外線点源の気球搭載干渉計による高解像観測

研究課題名（英文）Hi-resolution Imaging of Far-Infrared Point Sources with Balloon-Borne Interferometer

研究代表者

芝井 広 (Shibai, Hiroshi)

大阪大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：70154234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円

研究成果の概要（和文）：科学観測用大気球に搭載する宇宙遠赤外線干渉計（FITE）を、オーストラリア・アリスプリングス気球基地から打上げ、晩期型赤色超巨星の高解像秒角撮像を行う計画を進めた。気象条件が適わずに打上は実施できなかったが、次の機会のために装置の整備・維持を継続した。これによって、複雑かつ精密な光学装置を、打上基地現地で短期間で調整する方法を確立し、遠赤外線において高解像撮像をするシステムの開発を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の諸現象はあらゆる電磁波を発生する。遠赤外線には原子・分子や有機物質のスペクトルが多く属しており、物質、惑星、生命誕生課程の研究には欠かせない波長帯である。しかしこの波長帯の解像度の点については、地球大気による吸収と回折限界の壁によって進んでいない。この限界を乗り越えるために世界初の遠赤外線干渉計望遠鏡技術を実証したことに意義がある。将来の本格的スペース干渉計望遠鏡実現への重要な一歩である。

研究成果の概要（英文）：FITE (Far-infrared Interferometric Telescope Experiment) is a balloon-borne telescope on a stratospheric balloon for science, and was scheduled to be launched from the base at Alice Springs, Australia. The purpose was arc-second scale imaging of late-type red supergiants. The launch was not executed due to unsuitable weather during that season. The telescope is maintained for the next opportunity. This research demonstrated the method of the optical adjustment for high-resolution imaging before launch at the site.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：遠赤外線干渉計 宇宙赤外線望遠鏡 気球搭載望遠鏡 晩期型星ダスト 星生成領域

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の赤外線天文観測衛星「あかり」や Spitzer 望遠鏡により、対象天体を全体として赤外線測光し、SED を求めてモデルと比較する研究は進んできたが、解像度の欠如による結論の不確かさは時として大変歯がゆいものがある。2009 年打ち上げの Herschel 望遠鏡、10 年後打上げ予定の SPICA でさえ、望遠鏡口径が 3m 級であるために、回折限界によって解像度 10 秒角が限界である。近赤外線、サブミリ波では 0.1 秒角あるいは 0.01 秒角の高解像観測が実現されているが、多くの重要天体で放射エネルギーのピークである遠赤外線が高解像観測をしない限り、ダストの温度分布、密度分布の精密決定には届かない。

このような状況で我々のグループは、3-5 秒角の空間分解能を目指して世界初の遠赤外線干渉計を完成させた。これを科学観測用大気球に搭載して上空 35000m から観測する。2018 年 4 月にオーストラリア気球基地から初フライトを行う計画である。ちなみに我々の開発の進展に触発された NASA/GSFC のグループがほぼ同様な気球搭載干渉計プロジェクト (BETTI) を進め 2017 年に初観測を行ったが、干渉フリンジの検出には至っていない。

## 2. 研究の目的

このままでは宇宙遠赤外線観測の空間分解能は 10 年後も 10 秒角程度にとどまる。唯一、本研究で用いる FITE、NASA の BETTI のみが、秒角オーダーの空間分解能を目指して開発された。解像度の大幅な改善によって、星惑星形成現象の詳細な解明につながるとともに、予想されなかったまったく新しい現象が見えてくることも期待される。

さらに技術面において、我々は新しい干渉計による観測手法を創案した。従来の電波干渉計や光赤外線干渉計はいわゆる Michelson 型であり、干渉フリンジを得るためには、高精度の長い遅延線装置が必要であり、この装置の開発が最重要な技術課題でもあった。一方、我々は Fizeau 型干渉計の焦点にアレイセンサーを配置することによって、アレイ方向に光路差の変化による干渉フリンジが発生する (いわゆる Young のスリット実験と同じ) ため遅延線が不要であることに気づいた。さらにこのフリンジの鮮鋭度 (Visiblity) 分布から Fourier 変換によって像再生できること、およびそれが可能な条件 (視野、バンド幅など) を定式化した (Matsuo, et al. 2008)。この新しい原理を用いて実際の装置としたのが本研究で用いる、世界唯一の気球搭載型遠赤外線干渉計 FITE である。将来の天文学においては、かならずや宇宙空間に本格的干渉計を実現する時代が来る筈であり、これを目指して一歩進むことの技術的意義は極めて大きいと考えらる。

## 3. 研究の方法

最初のフライトでは、波長 150 ミクロンの遠赤外線で基線長 6.5m (分解能 4-5 秒角) で観測を行う。目的は観測手法・技術の実証と IRC+10216 の観測である。基線長固定であるが、ほぼ球対称とみなせる IRC+10216 について、中温ダスト (30-100K) の空間分布に対して有意なデータを得ると期待できる。同時に、銀河系中心方向の多数の星生成領域や大マゼラン雲の 30Dor から観測対象を選んでデータを取得する。これによって、対象天体の中温ダスト分布についてユニークで重要なデータを取得することが可能と期待する。また、実際の観測が成功することによって、我々が発案した新しい干渉計が天文学研究で有効であることを実証できる。なおフリンジ検出の予想感度は、1 分間の観測で S/N 約 4 である。10 分単位の観測を時間が許す限り繰り返す計画であり、観測計画として成立している。

FITE (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment) 干渉計はすでに完成しており (Kohyama, et al. 2008)、2017 年 12 月にオーストラリアに向けて発送する。2 月には現地 Alice Springs の気球フライト基地に到着し、3 月までに実験準備を完了する計画である。2018 年 4 月-5 月が JAXA 宇宙科学研究所のフライト予定期間 (ロンチウィンドウ) である。一年のうちで最も観測条件 (上層風 + 地上気象) が良いため、この期間が設定されている。この間に地上気象と上層風の状況を観測して、打ち上げ日を決定する。打ち上げは地上風が収まる未明に行われるので、打ち上げ約 2 時間後に所定高度 35km に達してから約半日、上空で待機し、日没後に観測を始める。6-10 時間の観測時間が計画されている。観測中は Alice Springs または Long Reach の地上局からリモートコントロールで干渉計を制御するとともに、観測データを地上局に送信する。観測終了後には 500 km から 1000 km 離れた地点にパラシュートで着地させて回収する。

今回が初フライトであるので、装置の試験も兼ねて、代表的晩期型星である IRC+10216 を観測対象とする。これは近赤外から遠赤外にかけて極めて明るい AGB 天体であり、観測手法の検証のために好都合である。さらにサブミリ波、近赤外、可視では 1 秒角を切る解像度の観測結果がある一方、遠赤外では Herschel 宇宙望遠鏡による 10 秒角解像度の観測があるのみであるため、FITE のデータはユニークで価値のあるものになる。加えてほぼ球対称の分布構造であると考えられるために、uv プレーンを密に埋めなくても、遠赤外輝度分布の広がりに関する知見を得ることができる。すなわち基線長 1 種類のみデータではあるが、ビジビリティ (鮮鋭度) を点状天体と比較することによって、広がりに関する制限をつけることができると期待される。さらに銀河系中心方向の星生成領域、大マゼラン雲 30 Dor などが観測可能であり、多数の候補から、対象天体を精査して観測する計画である。また、観測手法の実証と較正のために、同じフライトで木星、土星、火星、海王星を観測し、ビジビリティを測定する。なお海王星のみ視直径が小さい。視直径が大小の両方の天体を参照天体として観測する。観測データは、遠赤外線アレ

イセンサーで取得できる干渉縞（一次元強度分布）である。この強度分布からいわゆる「鮮鋭度 Visibility」を求め、観測対象の微細な広がりについての制限を加えることができる。さらに、日周運動を追尾しながら観測を行うので、異なる空間方向（Position Angle）での「鮮鋭度」が得られる。すなわちいわゆる「uv プレーン」上を固定基線長で埋めていくことが出来る。これによって、遠赤外線強度分布の集中度の位相角依存性が得られると期待される。

気球フライト終了後に、着地点において観測装置を回収し、機材を我が国に返送する。2019年、2020年度はデータの解析、成果のとりまとめ、成果の公表を計画であった。なおこの干渉計は新しい手法（像面上の光路差を利用する2ビーム Fizeau 型干渉計）を用いるために、データ解析のプログラムを新たに製作するとともに、参照天体のデータと比較しつつ十分慎重な解析を行う必要がある。

遠赤外線（テラヘルツ波）帯における宇宙干渉計は、世界的に類をみないものであり、地球大気の吸収を避けて宇宙に装置を打ち上げるしかない。このプロジェクトが成功すれば、さらに発展させて、本格的なスペース宇宙干渉計の時代への最初の展望が開かれると期待される。



#### 4. 研究成果

2018年5,6月にオーストラリア・Alice Springsの気球フライト基地から打ち上げ、代表的晩期型星である IRC+10216などを対象として観測する計画であった。しかしながら JAXA 宇宙科学研究所が設定したフライト予定期間（ロンチウィンドウ）内で、干渉計が打ち上げ可能でかつ気象条件が良い機会を得ることができなかつたため、フライトするに至らなかつた（写真は打ち上げ直前試験の様子）。2018年度の打ち上げは断念し、2019年度以降の機会を探ることとした。機材は2018年度中に、国内に返送を完了した。機材は適切な環境の中で、保管された。

2019年度に打ち上げ機会を求めたが、JAXA 宇宙科学研究所及びオーストラリア気球打ち上げ機関（ニューサウスウェールズ大学）においてキャンペーンを実施しなかつたため、そのまま日本国内にて待機した。2020年度からは名古屋大学にて待機をすることになった。そのため、観測装置一式と周辺実験機器すべてを名古屋大学に輸送し、次の気球打上の機会を待つこととした。2020年度は、名古屋大学における装置の維持管理、改良などを行った。次の打ち上げ機会は2022年度以降（JAXA 宇宙研及びオーストラリア対応機関の計画）であるので、本研究としては、打ち上げ準備を完了しておくこととした。次の打ち上げ機会を得るべく、研究目的の更新、観測計画の精密化などは継続する予定である。このため、2021年度からは名古屋大学の研究者がプロジェクトを引き継いで発展させることとした。

また、この科学観測用大気球搭載型宇宙遠赤外線干渉計のために、新たに多ビーム同時干渉計調整装置を開発したが、この成果を取りまとめて査読付き雑誌論文にて公表した（Sasaki et al., 2020）。この成果は、気球搭載望遠鏡だけでなく、将来のスペース干渉計の調整法にも応用可能な新手法である。

#### <参考文献>

"Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment (FITE): sensor optics"

T. Kohyama, H. Shibai, M. Kawada, T. Watabe, T. Matsuo, A. Ohkubo, E. Katoh, T. Kanoh, M. Suzuki, S. Mochizuki, Y. Matsumoto, H. Morishita, K. Yamamoto, R. Kanoh, A. Nakashima, M. Tanabe, Y. Doi, and M. Narita

Optical and Infrared Interferometry. ed. Schöller, Markus; Danchi, William C.; Delplancke, Françoise. Proc. SPIE, 7013, article id. 70133O, 10 pp. (2008).

"Optical Adjustment of the FITE Interferometer"

A. Sasaki, H. Shibai, T. Matsuo, T. Sumi, S. Itoh, T. Ohyama, Y. Tani, M. Saiki, T. Tsuboi, and M. Narita

Journal of Astronomical Instrumentation, (2020), 10.1142/S2251171720500026

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Sasaki Ayana, Shibai Hiroshi, Matsuo Taro, Sumi Takahiro, Itoh Satoshi, Ohyama Teruhira, Tani Yoshito, Saiki Morito, Tsuboi Takahiro, Narita Masanao	4. 巻 9
2. 論文標題 Optical Adjustment of the FITE Interferometer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Instrumentation	6. 最初と最後の頁 2050002 ~ 2050002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S2251171720500026	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐々木彩奈、松尾太郎、芝井 広、伊藤哲司、金田英宏
2. 発表標題 宇宙遠赤外線干渉計(FITE)プロジェクト：次期フライト計画
3. 学会等名 大気球シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芝井 広、住 貴宏、松尾太郎、須藤 淳、伊藤哲司、大山照平、大塚愛里梨、谷 貴人、佐伯守人、坪井隆浩、吉田哲也、齊藤芳隆、成田正直、佐々木彩奈、土居明広、河野裕介
2. 発表標題 気球搭載遠赤外線干渉計FITE実験経過
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 佐々木彩奈、芝井 広、住 貴宏、松尾太郎、伊藤哲司、大山照平、谷 貴人、佐伯守人、坪井隆浩、成田正直
2. 発表標題 気球搭載型遠赤外線干渉計 FITE のフライトに向けた干渉計調整結果
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 芝井 広、佐々木彩奈、伊藤哲司、大山照平、大塚愛里梨、谷 貴人、佐伯守人、坪井隆浩、住 貴宏、松尾太郎、成田正直、土居明広、吉田哲也、斎藤芳隆、河野裕介、Stephen Reinhart
2. 発表標題 気球搭載遠赤外線干渉計 FITE 実験結果
3. 学会等名 大気球シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木彩奈、芝井 広、住 貴宏、松尾太郎、須藤 淳、伊藤哲司、大山照平、佐伯守人、坪井隆浩、成田正直
2. 発表標題 遠赤外線干渉計 FITE : 豪州での光学系調整結果
3. 学会等名 大気球シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	松尾 太郎  (Matsuo Taro)  (00548464)	名古屋大学・理学研究科・准教授    (13901)	変更：2019年11月1日 (0) 大阪大学 (0) 名古屋大学

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		
米国	NASA/GSFC		
オーストラリア	University of New South Wales		