

気球搭載遠赤外線干渉計 FITE 実験結果

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（阪大理）、成田正直、土居明広、吉田哲也、斎藤芳隆（ISAS/JAXA）
河野裕介（国立天文台）、Stephen Reinhart（NASA/GSFC）

0. 概要

気球搭載遠赤外線干渉計（Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE）は、基線長 6m（ゴール 20m）の Fizeau 型 2 ビーム干渉計であり、焦点面におかれた遠赤外線アレイセンサーによって取得された干渉パターンから、新像再生法を用いて波長 150 ミクロンで 4 秒角（ゴール:1 秒角）の空間分解能の達成が可能である。各ビームの集光鏡は口径 40cm である。科学観測用大気球によって宇宙遠赤外線がほぼ透過してくる 30km 以上の高度に打ち上げられ、地上局からのリモート制御で高精度の指向を行う。打ち上げ準備段階において、各ビームの結像精度と干渉計としての光路差調整（佐々木他の講演参照）、新三軸姿勢制御システムの精度、モニター用カメラ（3 台）の画像処理・伝送動作、遠赤外線センサーの感度・高ダイナミックレンジと低ノイズ性能、リチウムイオン電池を用いた電源装置、地上へのデータ送信と多くのモニター表示装置、その他科学観測用大気球搭載装置としての機能と性能が備わっていることを確認した。

2018 年 4、5 月にオーストラリア・アリスプリングス気球基地において、システム性能の立証も兼ねて、明るい惑星と晩期型星（IRC+10216 など）を観測対象とし、この波長帯で初の干渉計観測（フリンジ検出）を成功させべく、初フライトをめざした。しかしながら器材を発送する直前及

び器材運送中の二度にわたってセンサー冷却用クライオスタットが損傷を受けてそれらの修理に日数を要したことなどのために、当初計画より打ち上げ準備完了が遅れた。このために JAXA 宇宙研の気球観測キャンペーン期間内に打ち上げ可能な気象条件に遭遇することができず、宇宙遠赤外線干渉計をフライト実証するに至らなかった。FITE 全般については[1]を、干渉光学系については[2]を参照されたい。図 1 に打ち上げ前の吊下げ試験時の様子を示す。

1. フライト計画

豪アリスプリングス気球基地の気象条件から、朝（日出前）打ち上げにせざるを得ないため、FITEは打ち上げ後、ほぼ12時間、上空で夜が来るまで待たなければならぬ。その間に回収予定地域の中にまで到達し、観測時には遠方の Long Reach 基地局との直接リンクになると予想される。従って、Alice Springs 基地まで、高速のデータ伝送（800kbps）回線が使い、コマンド送信とデータ受信を行う。

観測天体については、最初のフライトでもあるので、確実に姿勢制御がかかり、センサーで捕捉できるもの、しかも科学的に価値があるものとして、代表的な晩期型星である IRC+10216 を観測する。これは全天で 2 番目に明るい太陽系外赤外線天体（中間赤外線）であり、代表的な AGB 星である。主系列星段階の安定期を終えて巨星化し、周囲に大量の質量放出を繰り返しつつあり、いず

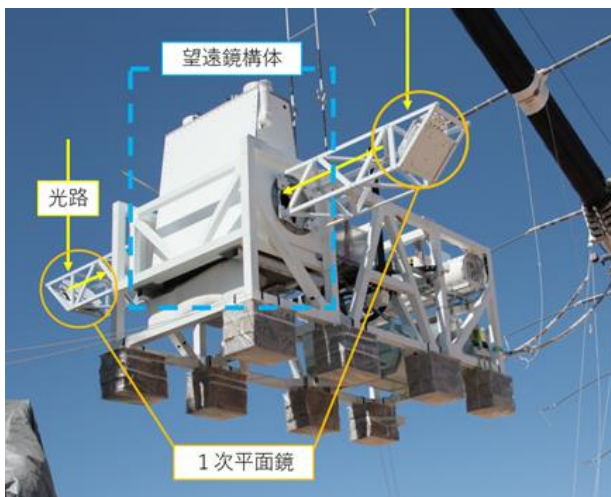


図 1. 現地吊下げ試験の様子

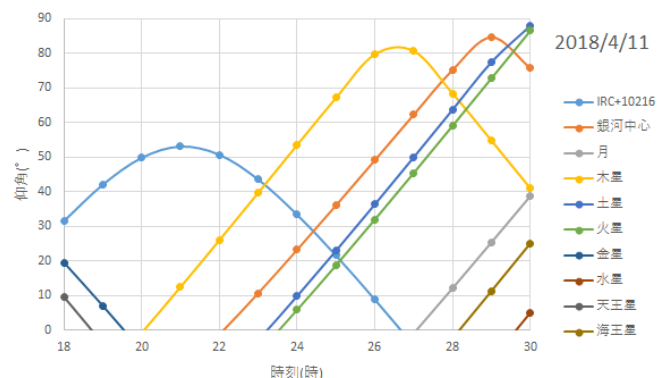


図 2. 観測予定天体の仰角変化

これは惑星状星雲を形成すると考えられる。周囲に星間塵が分布していることが確実である。遠赤外線強度分布の高解像観測によって、暖かい星間塵（30K-100K）の分布が得られれば、質量放出活動に関する制限が得られると期待される。FITEはFizeau干渉計であり、鮮鋭度の値から「星の直径」を知ることができる。IRC+10216の星間塵が星のすぐ周辺だけに分布している場合は、天王星より高い鮮鋭度がえられるであろうし、広く分布している場合はより低い鮮鋭度が得られるであろう。このように、光源の輝度分布パターンを仮

定することで、基線一点の観測からその広がり方についての情報が得られると期待される。

観測可能時間帯は24時までである。その後は、銀河系の中心方向のM17、NGC6357等の代表的星形成領域が十分に高い仰角になるために、観測対象にはことかかない。また25時以降には土星、火星も観測可能である。ただし、これらの惑星はいずれもFITEの分解能より大きいサイズであるので、干渉計の参照「点源」としては使用できない。唯一海王星が明け方に観測可能である。図2にこれら候補天体の仰角変化の予想図を示す。

表 1 : FITE の主要諸元

| | | |
|------------------------------|----------------|--|
| Structure | Dimension | 6.5m x 4.4m x 3m (H) |
| | Dry Weight | 1760 kg (without Ballast) |
| | Structure | CFRP Pipes |
| Telescope/ Interferometer | Type | Two-Beam Interferometer |
| | Mirrors | Four Plane Mirrors (SiC) Two Off-Axis Parabolas (Zerodur) |
| | Aperture | 40 cm (dia) |
| Sensors | Far-Infrared | 15x5 pixel array (newly developed) |
| | Beam Monitors | MIR 320x240 array + 4 CCDs |
| | Cryostat | Super-fluid He (30 ltrs) |
| Control System | Onboard System | 9 CPUs + Functions |
| | Moving Part | 25 actuators |
| | Battery | 250 AH @ 24 volts (Li-Ion, rechargeable) |
| | Data Rate | 6 kbps + 800 kbps |
| | Ground System | 8 QL Monitors + Video Camera Monitor |

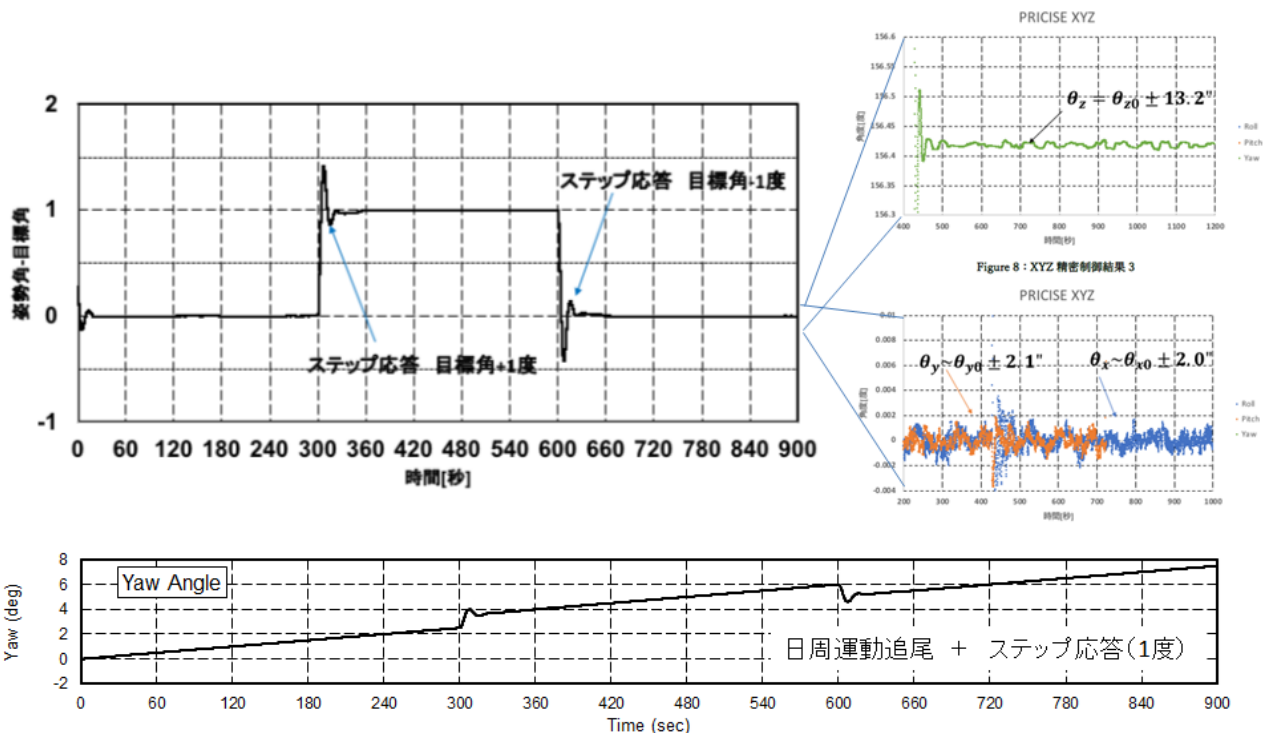


図 3. 姿勢制御試験結果の例 (ステップ応答、日周運動追尾)

2. FITE システム

FITE の主要諸元を表 1 に示す。

3-1. 干渉計

望遠鏡は Fizeau 型の 2 ビーム干渉計である。各ビーム径は約 40cm、基線長は 6.5m とする。これを平面鏡で干渉計部に導入し、焦点を共有する二つの軸外によって焦点面で干渉させる。干渉計の新しい原理[3]、光学調整精度要求[2]については別の文献を参照されたい。

3-2. 遠赤外線アレイセンサー

干渉計の焦点部に生じる干渉縞の強度分布を測定するために、横 15 ピクセル、縦 5 ピクセルの二次元アレイセンサーを新規開発した ([4])。全体が超流動ヘリウムで 2K に冷却される。クライオスタットの外観を図 4 に示す。内部の光学系については[5]を参照されたい。

検出素子は Ge:Ga であり、加圧機構 (インコネル製) によって感度波長帯の延伸と高感度化を達成した。また低レベルの信号を直近で低インピーダンス化するために、市販のオペアンプ (LF444) を用いた初段 TIA アンプを、100K 以下で動作させている。センサーと前置光学系全体が、専用のクライオスタットで極低温冷却される。ただし残念ながら 3-5 段目の初段アンプ回路系が動作しなくなっており、15 素子×2 段のアレイとして使用することとした。

高安定高精度の直流信号処理回路をあらたに開発した。地上観測はもとより、気球高度からの



図 4. クライオスタット

観測においても、望遠鏡をはじめとする観測装置の熱放射は、観測天体よりも、最大 5 桁程度強い。今回は完全な直流測定を行くことによって干渉縞の検出をより精度よくできると考えている。このために、市販の 24 ビット A/D 変換 IC を 80 個並列にした回路を製作した。

現地で実測したノイズ性能 (15 秒積分で $12\mu\text{Vrms/pixel}$) から、観測候補である IRC+10216 ($2.1\mu\text{V/pixel}$) に対する合計強度の予想 S/N は積分時間 20 分 (実効値) として約 4~5 であった。干渉フリンジの振幅は無干渉の場合の強度の 2 倍であることなどから、点源のフリンジ測定の S/N はさらに $\sqrt{2}$ 倍程度が期待できる。

3-3. 姿勢制御

FITE の姿勢制御システムは新開発の重心懸下型 3 軸姿勢制御方式である。アクチュエーターにはリアクションホイールを、アンローディングのためには、気球本体を足場とする「より戻し」機構 (ヨー軸) と重力を利用する錘移動ステージ (ロール軸、ピッチ軸) を搭載する。また姿勢センサーとして、制御のフィードバック用にはリングレーザージャイロ、絶対指向方向決定用に、3 台のモニターカメラを用いる。

主アクチュエーターである 3 軸のリアクションホイール、及び方位角周りのアンローディング機構の出力をそれぞれ 2 倍以上に増強した。結果として、瞬時最大トルクが約 3 倍、最大蓄積角運動量が約 1.5 倍になり、姿勢制御の安定性の向上が期待できる。またモーターを PWM 方式に変更したが、ドライバー回路をモーターの至近に設置して電磁干渉を抑制した。

図 3 に、国内、及び現地で行った姿勢制御試験結果の例を示す。姿勢モニター用カメラのオンボードデータ処理については[6]を参照されたい。

4. 実験経過

実験前年の国内における準備中に発生した以下の問題については既報である。

- ・一次平面鏡 (SiC 製) の片方が破損。急遽、アルミ合金製のミラーを調達した。
 - ・機構部重要部品 2 点について SUS304 製を新規製作して交換した。
 - ・アーム構造について 10g 荷重に耐える機構を新規製作して交換した。
- これらはいずれも対処できた。

しかしながら以下に記述するように、発送直前になってクライオスタットが故障した。交渉箇所は超流動ヘリウムタンクであり、タンクを形成するための溶接部が破断していた。原因は判明していないが、約 12 年にわたって多数回使用（常圧と真空の繰り返しが数 100 回）したことによる中期故障かもしれない。従って急遽、遠赤外線センサーや光学系をすべて取り外し、メーカーで分解修理と再組立てを行った。その後、センサーと光学系を再度組み付けて、航空便で豪州に発送した。豪州国内では到着地のブリスベーンから長距離をトラック輸送（エアサス無し）したが、おそらくその間の機械的衝撃で、クライオスタットの断熱支持柱が損傷（接着部の分離）した。現地で、再度クライオスタットからセンサーと光学系を取り外し・分解して、損傷部を再接着した。その後、組立ててセンサーと光学系を取付け、修理作業が完了した。

この時点で当初予定より 50 日遅れとなり、約一か月かけてフライトレディーの状態にしたものの、5 月 13 日にはキャンペーン期限までに気象条件が整わないことが判明し、フライトを断念した。装置一式を日本に返送し、保管中である。

2008 年のブラジルキャンペーン時にも輸送による損傷が主原因でフライトを断念したが、今回は別モードの故障が国内で発生したことが発端であり、残念ながら予期と対処ができなかった。

また主要器材を船便+エアサス車トラック便で輸送したが、今回も予想以上の機械的衝撃を受けた様であり、一部構造物が損傷を受け、現地での修復を必要とした。

（経緯抜粋）

2017 年

12/14（全器材発送 5 日前）

クライオスタットのヘリウムタンク溶接部損傷
→ 急遽メーカーに送付して修理

12/19 主要器材、海上便で発送

2018 年

2/ 7 修理完了。光学系、検出器類を再取り付け。

3/ 5 航空便で発送。オーストラリア国内 2500km をトラック輸送（エアサス無し）。

3/23 クライオスタット現地到着

4/ 6 クライオスタット内部の断熱支持柱損傷判明
→ メーカーと連絡を取り現地で分解修理。

4/11 クライオスタット修理完了。

4/12-19 クライオスタット・センサー試験

4/20-25 光学系調整・試験

4/26-30 姿勢制御試験

5/1-7 恒星を用いた光学試験、姿勢追尾試験

5/8-9 気球工学との総合試験。

5/10 フライト準備完了。

5/13 フライト断念（5/15 が期限）

5. 総括

世界初の気球搭載干渉計開発に成功したが、観測・成果創出に至らなかった。技術的成果は多数得られ、NASA が独自プロジェクトを始めるきっかけを作った。

この間に受領した研究費は、特別推進研究、基盤研究 A、S、B 各 1 件であり、研究成果発表は査読有論文数 5 編、査読無し論文+国際学会発表 7 編、国内学会発表 42 件、博士論文 1 編、修士論文 28 編、卒業研究 15 件であった。

参考文献

- [1] 気球搭載遠赤外線干渉計 FITE、芝井 他、大気球シンポジウム、isas17-sbs-022、2017年、相模原

"Far-infrared Interferometric Telescope Experiment : FITE," Sasaki, A., et al., Pathways towards habitable planets II, July13-17, 2015 Bern, Switzerland

- [2] 気球搭載型遠赤外線干渉計 FITE: オーストラリアでの光学系調整結果、佐々木 他、大気球シンポジウム、isas18-sbs-018、2018年、相模原

"Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: Optical Adjustment System," Sasaki, et al., IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, 4, 179, 2014.

"FITE optical adjustment tolerance," Itoh, S., et al., Pathways towards habitable planets II, July13-17, 2015 Bern, Switzerland

- [3] "Novel Spectral Imaging Method for Fizeau Interferometers," Matsuo, et al., Publ. Astron. Soc. Jp., 60 (2), 303, 2008.

- [4] FITE用信号読み出し回路の改良と遠赤外線センサーの感度測定、大山 他、日本天文学会 2016年秋季年会

- [5] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment (FITE): II. Sensor Optics," Kohyama, et al., Trans. JSASS Space Tech. Japan, 7, Tm_55, 2009.

- [6] FITE : スターカメラ用星像中心検出プログラムの高速化、伊藤哲司、他、日本天文学会秋季年会、V229b、甲南大学（兵庫）、2015