

気球搭載遠赤外線干渉計 FITE の準備状況報告

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）

我々は、波長 100 ミクロンを中心とする遠赤外線において、世界で初めての干渉計望遠鏡を開発した。最初のフライトでは、波長 150 ミクロン、基線長 6.5m で、空間分解能 4.5 秒角を達成したい。これでも *Herschel* 宇宙望遠鏡の解像度より 2 倍高い。2018 年春、オーストラリアでフライトするために、準備を進めている。この状況と期待される成果について報告する。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。

1. フライト計画

FITEとしては2018年4,5月にオーストラリアからフライトができるように、装置全体の準備を進めている。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は上空で夜が来るまで待たなければならぬ。その際に解決すべき問題点として、

- 日照中の温度環境に耐えることができるか。
- バッテリー容量が十分か。
- 遠方までフライトした状態で、観測運用が可能か。

がある。Aについては構造フレームに白色塗装を施すなどの対策を行った。Bについては日中の消費電力を最小限にすることで対応する。Cについては、遠方の Long Reach 基地局から Alice Springs 基地まで、高速のデータ伝送 (800kbps) 回線が使えとのことで、実験可能と判断した。

観測天体については、最初のフライトでもあるので、まず日没前後に金星が観測可能であり、姿勢制御の対象天体として絶好である。21時頃からは木星も観測可能になる。次に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。4月11日の場合に、観測可能時間帯は18-24時である。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。

IRC+10216 は、全天で2番目に明るい赤外線天体（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。

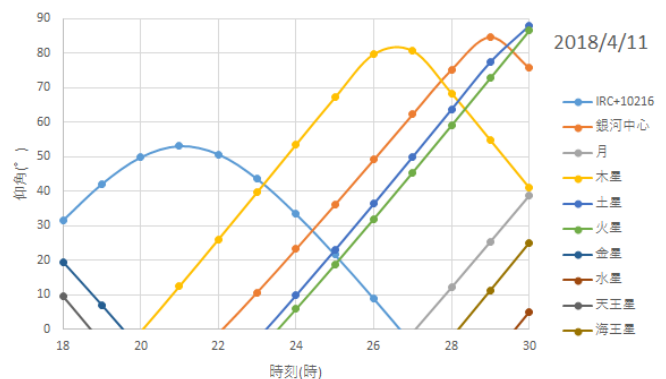


図1. 観測対象天体の仰角変化

2. 研究目的

遠赤外線領域で世界最高の空間分解能を達成し、原始惑星系円盤や星生成領域、晩期型星ダストシェルなどの詳細観測研究をすることを目的とする装置である。

星生成領域、原始惑星系円盤、銀河核スターバーストなど、星間塵熱放射がきわめて重要な役割を果たしている天体について、秒角スケールの角分解能の観測を行い、各天体において星間塵温度分布を明らかにすることが主目的で

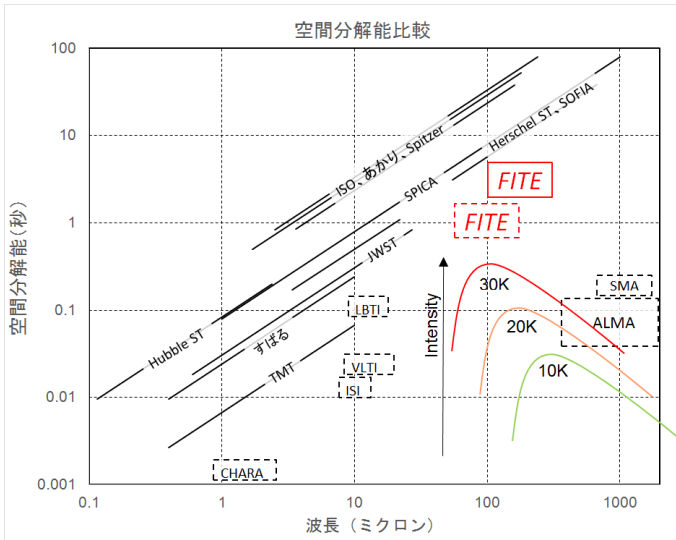


図 2. 既存／計画中の望遠鏡の空間分解能

ある。これらの天体の星間塵雲の輻射輸送＋密度構造については、理論的シミュレーションの結果を間接的な方法で検証するしかなく、熱放射のピークが来る遠赤外帯においての高解像直接的観測はきわめて重要である。最初のフライトでは、波長 150 ミクロン、基線長 6.5m で、空間分解能 4.5 秒角を達成したい。この値は 2009 年に ESA が打ち上げた Herschel 宇宙望遠鏡の解像度より約 2 倍高い。

本研究では遠赤外帯で他のどの観測装置よりも 5 倍以上高い空間分解能（解像度）を持つ遠赤外線干渉計を開発する。図 2 に示されるように、他の波長に比べて格段に劣っていた遠赤外線波長帯の解像度を格段に向上させることで、天文学の多くの多くの観測研究分野で、かけがえのないユニークな貢献ができることが期待できる。さらに遠赤外波長帯で初めて干渉

計を実現することで、将来の本格的な宇宙干渉計への足がかりとなり、大変重要な意味を持つであろう。現在計画中の SPICA ミッション以後は、格段に大きい宇宙望遠鏡を遠赤外線を実現するのは大変難しくなり、何らかの意味の干渉計技術を導入することは避けられないからである。

スペースにおいて宇宙観測用干渉望遠鏡を実現することは、世界的な大目標である。FITE プロジェクトは世界で最初のステップを踏むことを目指してきた。我々の後を追ってスタートした GSFC の BETTI プロジェクトが 2017 年 6 月に初めてのフライトを行い、観測データを取得できた。現在フリンジ検出のための解析を行っている状況である。

3. 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。この間隔は 1.5m である (Pupil Remapping)。干渉計の新しい原理[3]、光学調整精度要求[4]については別の文献を参照されたい。

この二つの軸外放物面鏡の焦点を、観測中に所定の精度（波長の数分の一以下）で一致させる必要がある。このための装置が、干渉計調整装置と放物面鏡調整装置である。2008 年、2010 年のブラジルキャンペーンでの経験を踏まえて、現地で短期間に調整できる装置を新規に開発した。干渉

表 1 : FITE の主要諸元

Structure	Dimension	6.5m x 4.4m x 3m (H)
	Dry Weight	1700 kg (without Ballast)
	Structure	CFRP Pipes
Telescope/ Interferometer	Type	Two-Beam Fizeau-Type Interferometer
	Mirrors	Four Plane Mirrors (SiC) Two Off-Axis Parabolas (Zerodur)
	Aperture	40 cm (dia)
Sensors	Far-Infrared	15x3 pixel array (newly developed)
	Beam Monitors	MIR 320x240 array + 3 CCDs
	Cryostat	Super-fluid He (30 ltrs)
Control System	Onboard System	6 CPUs + Functions
	Moving Part	25 actuators
	Battery	270 AH @ 24 volts (Li-Ion, rechargeable)
	Data Rate	6 kbps + 800 kbps
	Ground System	8 QL Monitors + Video Camera Monitor

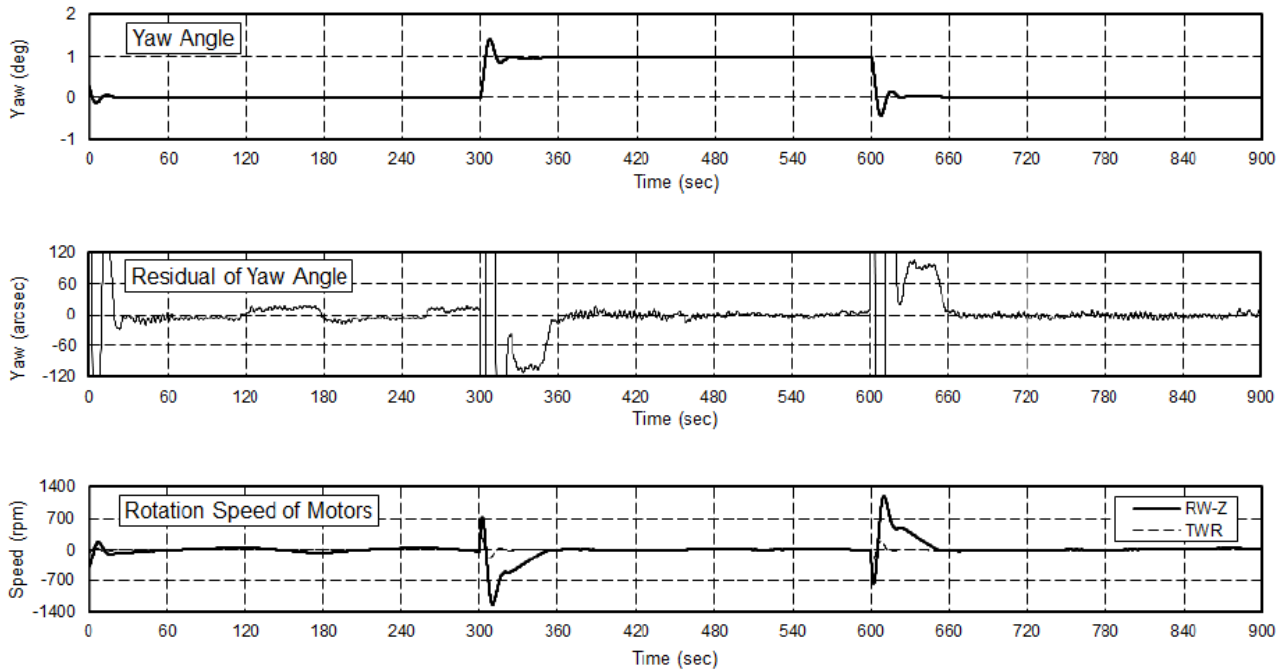


図 3. 姿勢制御試験結果の例（1度ステップ応答）

計調整装置 ([5]) は、市販のシャックハルトマン波面センサーを改造し、視野内の 2 ビームを独立かつ同時に波面計測する装置である。これらの装置によって、2 週間程度かかっていた現地の調整期間を半分以下に短縮することが期待される。

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 ([6])。全体が超流動ヘリウムで 2K に冷却される。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を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、80K 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 [7] で極低温冷却される。ただし残念ながら 4、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×3 段のアレイとして使用する予定である。

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再作した。

実測したノイズ $29\mu\text{Vrms}$ から、観測候補である IRC+10216 の S/N が以下のように推定できる。この天体の波長 $155\mu\text{m}$ での推定フラックスは 600Jy 程度である。1 分間の積分時間で 1 ピクセル当たりの S/N は約 4 になる。ピクセル数（干渉縞に沿って最大 3 ピクセル）と積分時間（10 分観測を繰り返す）によるゲイン（いずれも $\sqrt{\quad}$ に比例）を考慮すると、十分な S/N でフリンジの測定が可能であるといえる。

3-3. 姿勢制御

FITE の姿勢制御システムは新開発の重心点懸下型 3 軸姿勢制御方式である [7]。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

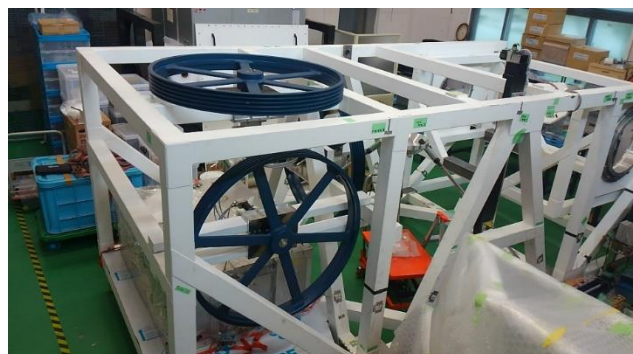


図 4. リアクションホイール（3軸）取付状態

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。

ペイロードの重心で懸下するためには、バラスト投下による重心の鉛直移動を補正する必要がある。今回、能動的な制御システムを使用することとした。これによって、フライト前の作業期間の短縮が期待される。

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に姿勢制御試験結果例、図4にリアクションホイールをフレームに取り付けた状態を示す。

3-4. 構造系

今回新たに、白色塗装したCFRP角パイプフレーム構造を採用した。補足的な強度解析、細部の設計、組み立てなどを進めている。また、バラストの取付方法を変更して、バラストの荷重がフレームにかからないようにした結果、フレームに必要とされる強度が従来の70%でよいと考えられ、安心である。

また、設計時にはバラスト重量を含んで静荷重10gで破壊しないことが条件であったが、その後、「バラスト重量を除いて静荷重10gで破壊しないこと」と緩和されたことも、構造強度に余裕をもたらした。

3-5. オンボード制御システム・通信系

オーストラリアでは800kbpsのデータ送信容量が使用可能と聞いており、FITEとしては十分対応可能である。遠赤外線センサー及び姿勢データなどの量は100kbps以下であるが、中間赤外線アレイ、3台のカメラが発生する画像データは、大きい送信量を必要とする。そこでオンボードでデータ圧縮をすることで、必要なときに必要な画像データが、必要な頻度で地上に送信できるようにする予定である。

4. 準備状況

最近、以下の問題が立て続けに発生した。

- ・一次平面鏡 (SiC 製) の片方が、不注意によ

り落下し破損した。急遽、アルミ合金製のミラーを発注し、11月中に完成予定である。

- ・ペイロードを吊る機構部の重要部品2点についてS45Cを用いたが、低温脆性により荷重に持たない恐れが指摘された。急遽、SUS304で同じ部品を製作することとした。12月10日前後に完成予定である。
- ・干渉光学系に天体からの赤外線を導入するための構造である「アーム」について10gの荷重試験を実施したところ、破壊した。急遽、アルミアングルで再製作を開始した。来週には完成する予定である。

2点目、3点目は機械構造設計に関する者であるが、新しい設計では静荷重10gで破壊しないことという基準を満たしている。これらのトラブルのために準備がかなり遅れてしまったが、12月中旬の発送には間に合わせる計画である。

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、2016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] 遠赤外線干渉計FITEの干渉光学系状況報告、佐々木 他、大気球シンポジウム、isas17-sbs-023、2017年、相模原
- [2] "Novel Spectral Imaging Method for Fizeau Interferometers," Matsuo, et al., Publ. Astron. Soc. Jp., 60 (2), 303, 2008.
- [3] 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、伊藤 他、日本天文学会2014年秋季年会
"FITE optical adjustment tolerance," Itoh, S., et al., Pathways towards habitable planets II, July13-17, 2015 Bern, Switzerland
- [4] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: Optical Adjustment System," Sasaki, et al., IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, 4, 179, 2014.
- [5] 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
- [6] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment (FITE): II. Sensor Optics," Kohyama, et al., Trans. JSASS Space Tech. Japan, 7, Tm_55, 2009.
- [7] 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