

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、住 貴宏、松尾太郎
須藤 淳、辰巳耕介（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）

遠赤外線干渉計 FITE (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment) について、研究目的、装置の設計仕様、開発・準備状況、フライト計画について記述する。FITE 全般については[1]を参照されたい。

1. 次期フライト計画

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、装置全体は準備を進めている。以下では、2018年4-5月期にキャンペーンが実施される前提で記述する。仮に、10月期に実施される場合は、観測天体を変更する可能性がある。科学目的達成可能な観測対象は、いずれの時期でも存在する。また、夕方打ち上げの機会が少ないとされている。もし朝（日出前）打ち上げにせざるを得ない場合は、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、

- A. 日照中の温度環境に耐えることができるか。
- B. バッテリー容量が十分か。
- C. 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については白色塗装を施すなどの対策を行った。Bについてはバッテリー個数を増やした。Cについてはアリススプリングス基地と遠方の基地局との間で、高速のデータ伝送（数100kbps）回線が使えるとのことなので実験可能と判断できる。

観測天体については、最初のフライトでもあるので、まず日没後に海王星、木星が観測可能である。次に確実に姿勢制御がかり、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。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の観測を行う。なお後半夜には土星、火星が観測可能である。ちなみに惑星はいずれもFITEの分解能より大きいサイズであるので、参照「点源」としては使用できない。現在、参照点源として使えそうな天体を選んでいくところである。

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。今回、調整のために観測する天王星は視直径が約4秒角である。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。

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。

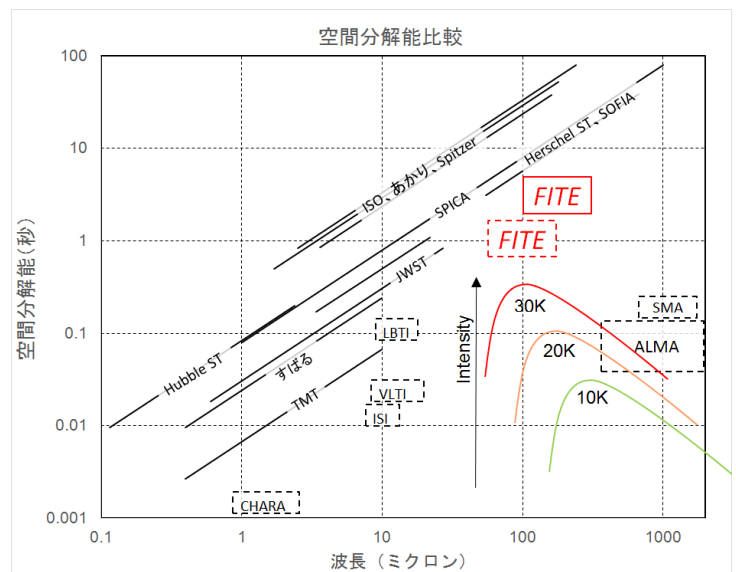


図 1. 既存／計画中の望遠鏡の空間分解能

表 1 : FITE の主要諸元

Structure	Dimension	7m x 4m x 2.5m (H)
	Dry Weight	1600 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	15x5 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	300 AH @ 24 volts (Li-Ion, rechargeable)
	Data Rate	56 kbps + 800 kbps
	Ground System	8 QL Monitors + Video Camera Monitor

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 1 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で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。まともにこれを実現するには、数多くのステップを踏んだうえで、巨額の費用と多くの人員と長年月の開発

期間が必要であろう。この FITE プロジェクトはこのための世界で最初のステップを踏むことを目指している。ただし我々の後を追って、NASA/GSFC の BETTI プロジェクトが数年前にスタートした。これも同様の遠赤外線（サブミリ波）の大気球搭載型干渉計である。彼らは 2016 年中にニューメキシコでフライトする計画であり、残念ながら先を越される可能性がある。ただし先陣争いが本質ではないし、お互いに共同研究者として協力する関係である。この分野の基礎開発、技術開発、人材育成、さらには学術的成果の積み上げが、将来の天文学の展望を大きく開くうえで極めて重要であることについて、共通の認識を持って進めている。

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[2]、光学調整精度要求[3]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。干渉計調整装置 ([4]) 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 ビームを独立する同時に波面計測する装置であり、高精度の参照球面も新規開発した。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 ([5])。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 [6] で極低温冷却される。

この遠赤外線センサーの性能をより十分に引き出すために、高安定高精度の直流信号処理回路をあらたに開発した。衛星の極低温冷却望遠鏡 (「あかり」など) を除く一般の赤外線天体観測は、けた違いに強いバックグラウンドの中に埋もれた微弱な天体成分を取り出すことになる。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 個並列にして使用する。プリアンプや帯域フィルターアンプなどすべてにわたって、低雑音かつ高安定である必要がある。現時点でこの開発、製作に成功しており、次のフライトではこれを使用する予定である。



図 2. リアクションホイール (3 軸) 取付状態

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。これは世界的に例のない方式である。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。リングレーザージャイロに関しては独自のデータ処理によって、0.1 秒角の精度が得られること、ドリフトはとても小さいことがわかっている。2010 年のブラジルキャンペーンにおいて、現地で 2 回の独立な故障が起きた。また故障調査の過程で、新たな部品破壊 (外形的性能には影響しない) が発覚した。これらについては専門家とメーカーで詳細な調査を行い、対処方法を決定した。

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。従来はバネを利用した受動的なシステムを用いていたが、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



図 3. 方位角アンローディング機構

として、瞬時最大トルクが約3倍、最大蓄積角運動量が約3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するので電磁干渉が生じにくいと考えられる。

図2にリアクションホイールをフレームに取り付けた状態、図3に方位角のアンローディング機構（新規開発）を取り付けが状態を示す。

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。

ペイロード懸下部は、従来、2本のトレインを最小幅10cmで吊っていたが、ペイロードの地上移動や、ローンチ直前のブーム回転時の取り扱いが困難であった。この幅を50cmに広げたので、問題は大幅に解消された。

3-5. オンボード制御システム・通信系

2010年までは6台の小型CPU等をすべて、大型の与圧容器に収納して用いていた。今回は、低温から低圧環境で使用できる小型車載用CPUシステムを採用する。これについては、2種類各2台、計4台の実機について、真空低温（+高温）試験を行い、使用可能であることを確認した。また同時に、光ファイバーによるI/Fシステムも使用可能であることを確認した。

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. 2010年からの変更点（項目のみ）

- －重量削減
- －フレーム構造の強化、白色塗装
- －バラスト取り付け位置の変更
- －リングレーザージャイロの不具合対策
- －遠赤外線アレイセンサーの高性能化

- －姿勢制御性能の増強
- －現地光学調整期間の短縮
- －重心調整の効率化（鉛直方向錘移動機構）
- －制御CPUの更新、光ファイバーI/Fの使用
- －懸下部のスパンを50cmに拡大
- －バッテリーの能力アップ
- －日照中の待機を許容

参考文献

- [1] "Balloon-borne far-IR telescope," Shibai, SPIE Newsroom, 16 April 2010
 気球搭載遠赤外線干渉計FITE、芝井 他、大気球シンポジウム、2015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] "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.
 Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE, Terano, A., et al., ESO/ESA/ALMA/NRAO-NAASC Workshop, February, 2015, Chile
- [5] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE, Nakamichi, M., et al., FISICA workshop, January 28-29, 2015, Maynooth, Ireland
 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] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment (FITE): Three-Axis Stabilized Attitude Control System," Nakashima, et al., Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 8, Tm_19, 2011
 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年9月9-11日