

遠赤外線干渉計 FITE の光学系状況報告

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、大塚愛里梨、谷 貴人、佐伯守人、坪井隆浩（阪大理）、成田正直（ISAS/JAXA）

1. 概要

遠赤外線干渉計 FITE（Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment）は遠赤外線領域で、従来の観測装置にはない高空間分解能観測の達成を目指している。FITE は惑星形成過程を解明するために、ダスト放射領域に相当する遠赤外線波長帯で、原始惑星系円盤を空間分解能 $4''$ で観測を行う。このサイエンスを達成するために、気球フライト前に、干渉光学系を高精度に調整する必要があり、重要な技術課題である。従来は、古典的ハルトマンテストを用いて調整していた[1]。しかし、ハルトマンテストによる調整では、各ビームの焦点を一致させることが容易ではなく、現地でのフライト前の調整に数週間時間がかかった。

科学観測用大気球の打ち上げは地上及び上空の風速により期間が限定される。数週間という調整期間はフライトの時期を逃すことになる。そこで、新しい調整手法として、シャックハルトマン波面センサーによる調整手法を考案した。新しい

干渉計調整機構では、従来の1ビームごとの光学調整だけでなく、2ビーム同時に調整を行うことを可能にした。測定試験の結果から、現時点でFITE光学系は干渉に必要な要求精度を満たしていることがわかっている。現地でフライト前に再調整を行い、フライトに臨む。

2. FITE 光学系概要

FITE 光学系は、干渉光学系と冷却光学系から成る。

干渉光学系は、4枚の平面鏡と、2枚の軸外し放物面鏡から構成される。干渉計の新しい原理[2]については別の文献を参照されたい。図1はFITE干渉光学系を表す。天体からの遠赤外線放射を、アームの先に取り付けられている2枚の一次平面鏡（基線長6.5m）で反射させ、望遠鏡構体に導く。その後、望遠鏡構体内にある、2枚の二次平面鏡で再度反射させる。二次平面鏡は45度傾いており、反射した光は望遠鏡構体上面に鉛直下向きに取り付けられた2枚の軸外し放物面鏡に入射し、集光する。二枚の軸外し放物面鏡は各

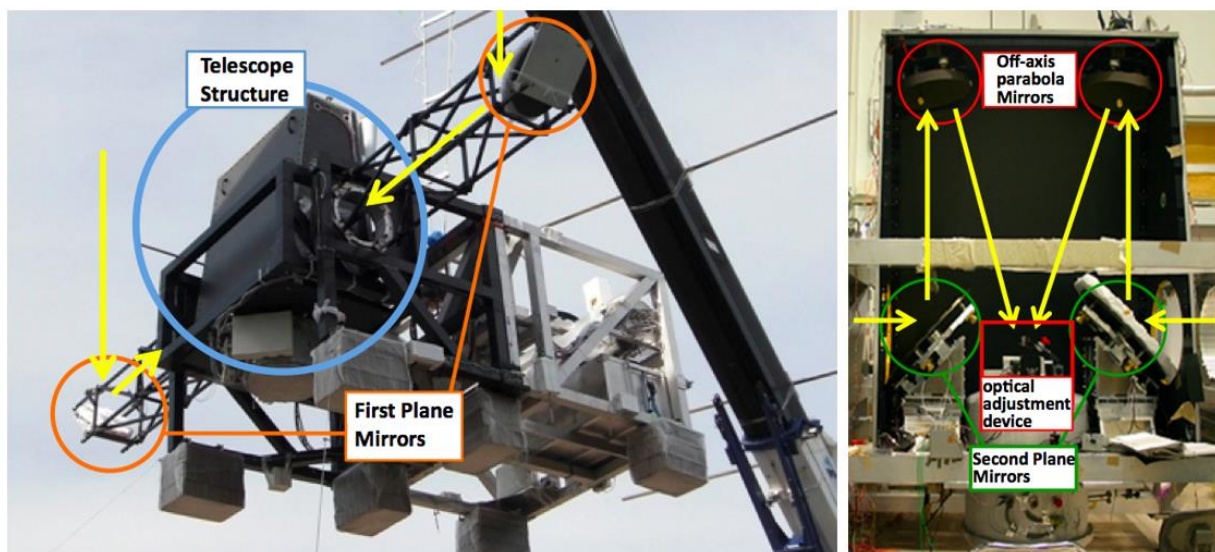


図1 FITE 干渉光学系

口径 400mm で中心間距離が 1200mm であり、一枚の軸対称放物面鏡（口径 1500mm）のうち、必要な 2 か所を切り取ったものとみなせるように配置されている。集光した光はクライオスタット内にある冷却光学系に導入される。

冷却光学系は図 2 のように構成されている[3]。冷却光学系内で一旦コリメートされた後、リオストップと、シャッターを通過し、再度カメラ光学系で集光され、2 個のダイクロイックビームスプリッターで、遠赤外線 (155 μm)、中間赤外線 (波長 25 μm)、可視光に分割され、各センサーに結像する。中間赤外線を搭載している理由は、遠赤外線の干渉フリンジ測定が正しく行われていることを、中間赤外線センサーで干渉縞を得ることによって確実にするためである。可視光のセンサーは星像を正しくとらえていることを確認するためにある。

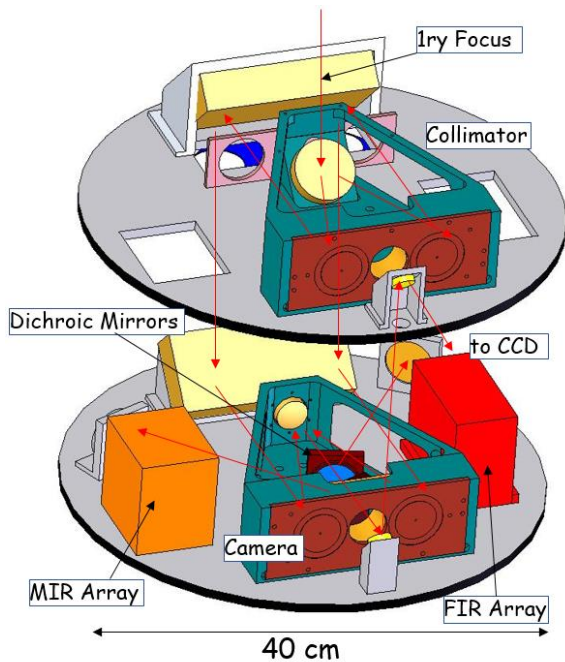


図 2 冷却光学系

打ち上げ後、気球観測高度で干渉計として動作するためには、高精度に光学系が調整されている必要がある。冷却光学系はクライオスタット内に収められており、シャッター以外の可動部が無いため、地上における光学調整で十分な精度が保証されている。図 3 は実験室で可視光を冷却光学系

に入射させ、干渉縞の測定に十分な光学性能を有しているか確認した結果である。中心波長 600nm で写真のような干渉縞を得ることができた。また、測定波長からエアリーディスクの理論値サイズを算出、比較したところ、同程度であることがわかった。一般的にエアリーディスクと同程度の収差の場合は、ストレール比が 0.8 程度であることから、FITE が目指す中間赤外線(25 μm)での干渉縞測定に、冷却光学系は十分な光学性能を有していることがわかった。

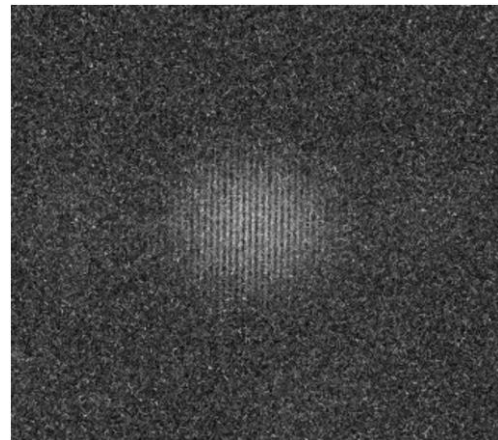


図 3 可視光での冷却光学系光学精度の確認実験で得られた干渉縞

干渉光学系については、打ち上げ前の調整と、打ち上げ後、そして気球観測高度での再調整が必要である。干渉光学系の調整目標 (= 要求精度) を以下表 1 に記載する。この要求精度は、中間赤外線波長で干渉縞を得るために必要な精度から求めている[4]。

表 1 干渉光学系光学要求精度

1 光束の波面位相誤差	19.7 λ (@632.8nm)
2 光束の結像性能	4.3"
2 光束の光路差	312.5 μm

3. 新干渉光学系調整方法の開発

FITE はスペースも含めて地上で無いところに浮いた状態での初めての遠赤外線干渉望遠鏡である。打ち上げ前の精密な光学調整が必要であるが、2008 年、2010 年のブラジルでの実験準備

では、現地の悪天候や停電が原因で思うように光学調整を進めることが出来なかった。

そこでもっと短時間で効率の良い調整作業ができるように、新しい調整装置を開発した[5][6]。これは、「2ビーム同時シャックハルトマン波面計測装置」と呼べるものであり、左右の放物面鏡の波面誤差（つまり鏡の調整誤差）を同時に計測できる装置である（図4）。

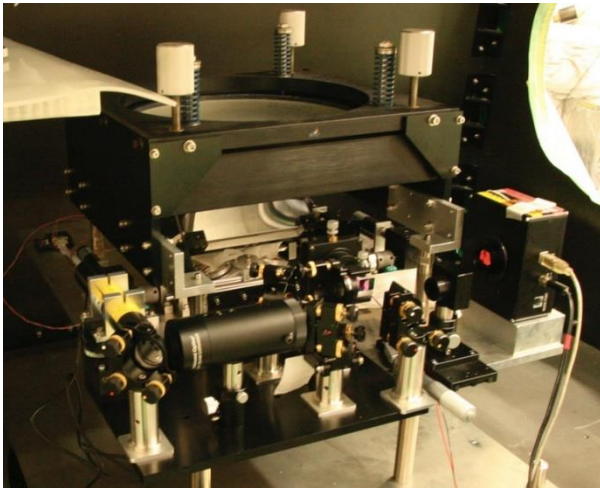


図 4 2ビーム同時波面測定装置外観図

2ビーム同時に計測を行うためには特殊な基準球面鏡（300mm 径で F/0.5 より明るい）が必要であったので、図5のように製作した。さらに、一つの波面センサーで、2つの波面誤差を計測

するシステムを構築するために、2ビーム同時波面測定装置の光学系を図6のように概念設計し、光学系を配置した。また、FITE 干渉光学系専用の解析プログラムを作成した。



図 5 基準球面鏡

3. 干渉光学系の調整結果

9月に輸送前の干渉計調整試験を行った。図7は新干渉計調整機構で取得したFITE干渉計のデータである。2枚の軸外放物面鏡を反射してきた光がシャックハルトマン波面センサーに入射し、スポットデータとなっている。このデータと、参照面で取得したデータからベクトルマップを算出した結果が図8である。このベクトルマップから、画像向かって左側の鏡はデフォーカスの収差、

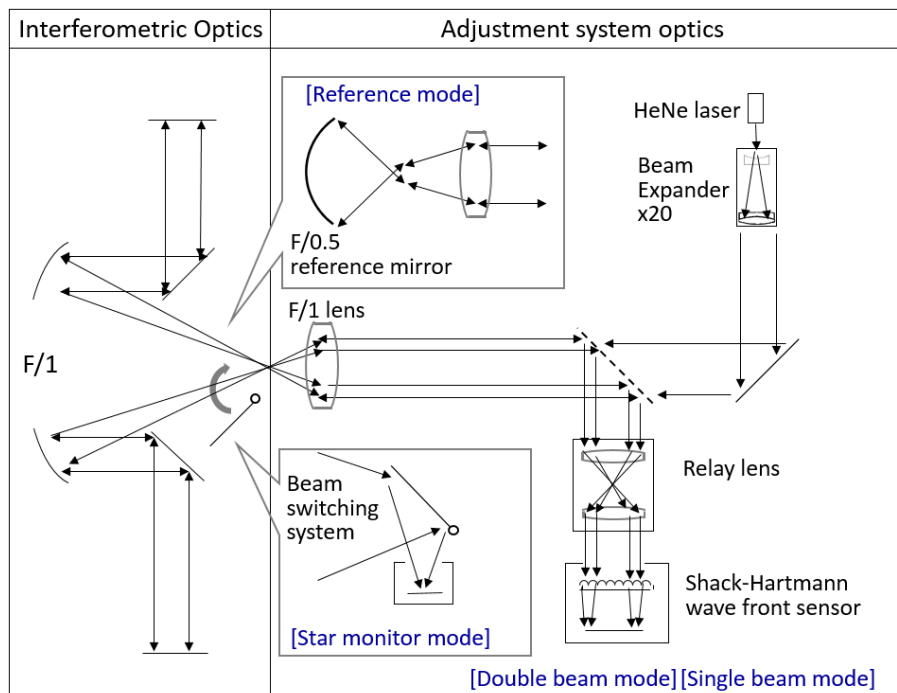


図 6 FITE 干渉光学系調整機構概念設計図

右側の鏡は非点収差をもっていることは明らかである。1ビーム、2ビーム両方の測定データから解析プログラム内で規格化 zernike 多項式を展開し、波面誤差と結像性能を算出した結果が表 2 である。この結果から、中間赤外線で干渉縞を得るのに必要な要求精度を、現時点で満たしていることがわかった。

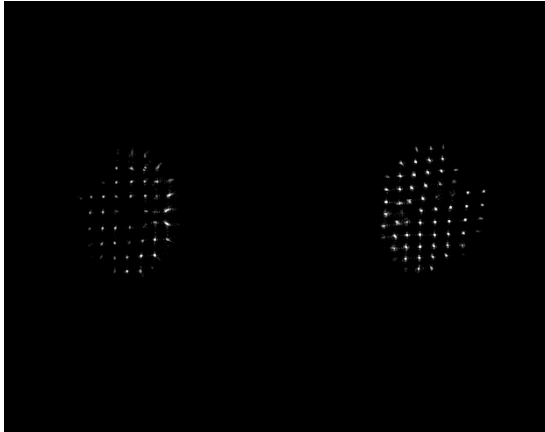


図 7 調整機構で取得した FITE 干渉光学系のスポットデータ

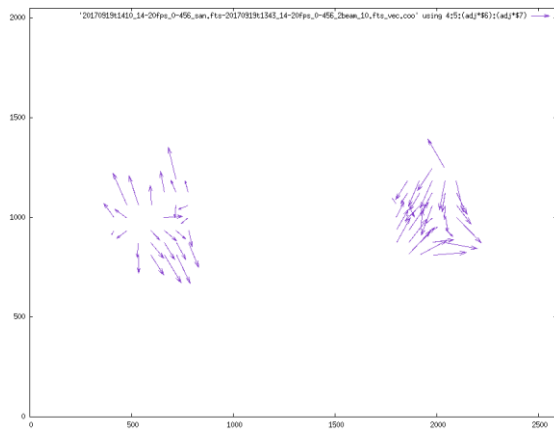


図 8 収差ベクトルマップを表示した結果

表 2 干渉光学系の収差解析結果

1 光束の波面位相誤差(右)	1.46 λ
1 光束の波面位相誤差(左)	2.36 λ
2 光束の結像性能	0.48"

4. 2018 年フライトに向けた調整作業

FITE の干渉光学系と冷却光学系はともに中間赤外線干渉縞を取得するために必要な光学要求精度を満たしていることがわかった。豪州輸送後に再度干渉光学系について調整を行ったあと、アームの先に取り付けられる一次平面鏡と、望遠鏡構体内に設置される二次平面鏡の傾き調整を行い、フライトに臨む予定である。

光学系以外の FITE ペイロード準備状況については、別の文献[7]を参照されたい。

参考文献

- [1] " Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: I . Interferometer Optics", E. Kato, et al., Transactions of Space Technology Japan, 7, 47, 2009
- [2] " Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment (FITE): Sensor Optics", T. Kohyama, et al., Transactions of Space Technology Japan, 7, 55, 2009
- [3] " Novel Spectral Imaging Method for Fizeau Interferometer", T. Matsuo, et al., SPIE 7013, 2008
- [4] 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
- [5] "Development of New Optical Adjustment System for FITE (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment)" A. Sasaki, et al., SPIE 8445, 2012
- [6] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment : Optical Adjustment System", A. Sasaki, et al., IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, 4, 179, 2014
- [7] 気球搭載型遠赤外線干渉計FITEの準備状況報告 芝井 広 他、大気球シンポジウム 2017 年