

## 遠赤外線干渉計 FITE : 豪州での光学系調整結果

佐々木彩奈 (ISAS/JAXA)、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 (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 Fizeau 型干渉計であり、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った。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開発し、2018年豪州気球実験キャンペーンの輸送前後で開発した干渉計調整機構を用いて調整を行った。結果、遠赤外線波長  $150\ \mu\text{m}$  での干渉縞が得られる要求精度を満たすように調整を終えた。FITEはフライトをすることができなかつたが、豪州実験場で実施した光学系調整試験(軸外し放物面鏡調整、一次平面鏡・二次平面鏡調整、光路差調整)に要した日数は5日間

であった。これは、過去のフライト準備時に要した2週間という期間を短縮している。

### 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。調整機構を含めた全光学系の概念図を図2に載せる。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。干渉計の新しい測定原理については文献[1]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 6m)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  $45^\circ$  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

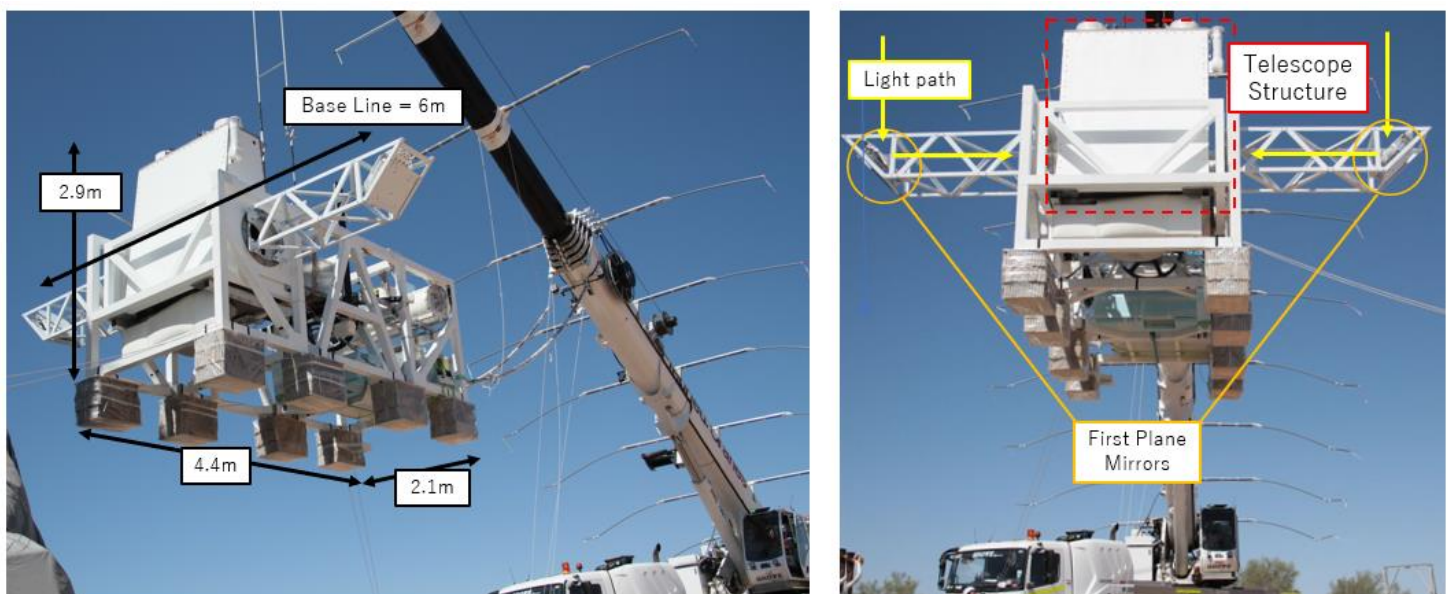


図1 (左) FITE ゴンドラの全体像と大きさ。(右) 干渉計の観測時光路。観測天体からの光は、一次平面鏡で反射した後、干渉計構体に入射する。

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[2]。FITE冷却光学系を含む光学系概要を図2に載せる。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ミラーで、各センサーに結像する。

打ち上げ後、気球観測高度で干渉計として動作

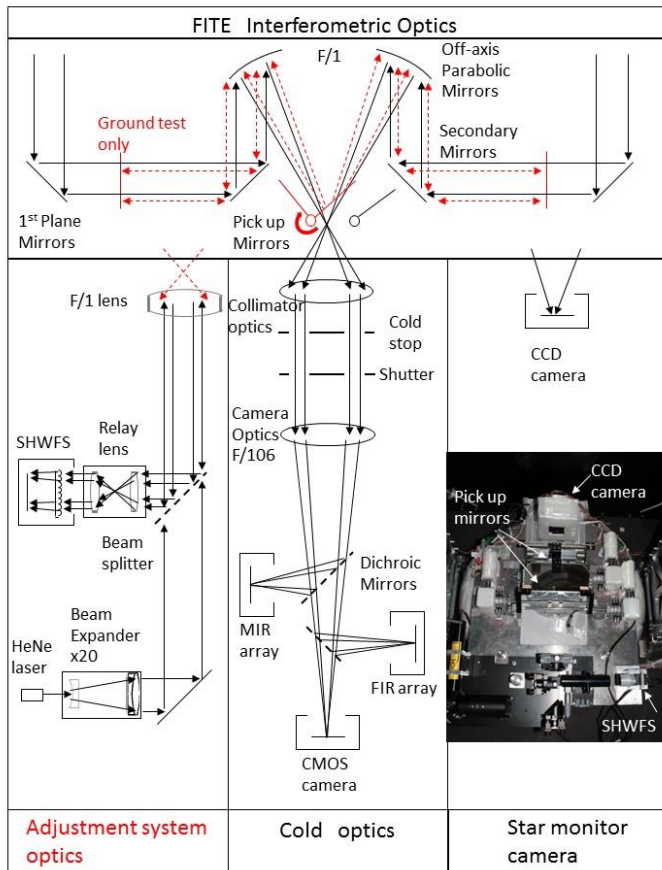


Figure 2 FITE 搭載光学系概念図。上に描かれているのが FITE 干渉光学系であり、下左から順に、地上試験時に使用する干渉光学系調整機構[3][4]、観測中に使用する冷却光学系、フライト中に観測方向を確認するスターカメラである。

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。

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、遠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[5]。

表 1 干渉光学系光学要求精度

1 光束の波面位相誤差	19.7λ (@632.8nm)
2 光束の結像性能	4.3"
2 光束の光路差	250 μm

### 3. 放物面鏡の調整結果

2017年9月に輸送前の最終干渉計調整試験を行い、問題ないことを確認した。輸送前に行った光学調整試験の結果は別の文献[6]を参照されたい。

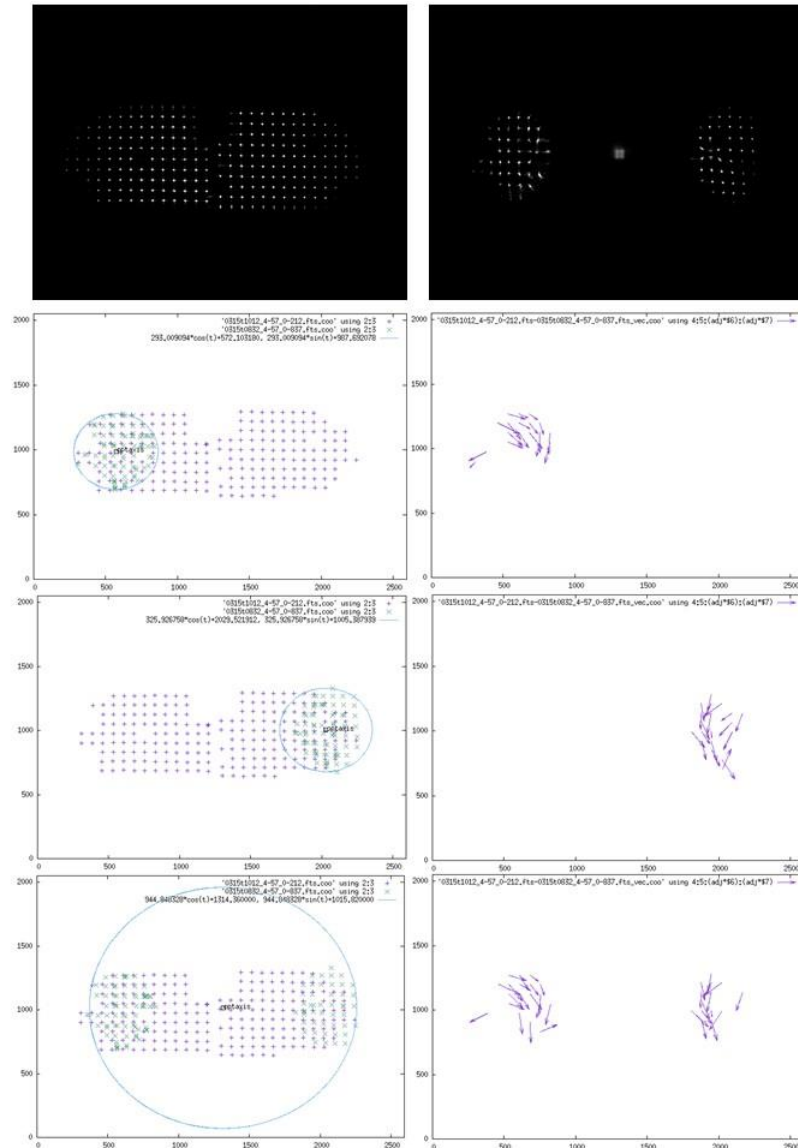
豪州輸送後、フライト前に実施した最終干渉計結果を図3に載せる。このベクトルマップから、画像向かって左側の鏡は x 軸方向ティルト収差、右側の鏡は x 軸 y 軸ティルト収差と、非点収差をもっていることは明らかである。1 ビーム、2 ビーム両方の測定データから解析プログラム内で規格化 zernike 多項式を展開し、波面誤差と結像性能を算出した結果が表1である。収差が見えていても、この結果は、遠赤外線干渉縞を得るのに必要な要求精度を、十分に満たしている。

Table 1 zernike 多項式による収差解析結果。

Aberration	Order	Port Side
Piston or bias	Z[0]	Z[0]INACTIVE
X tip, tilt	Z[1]	Z[1] 0.180385[μm]
y tip, tilt	Z[2]	Z[2]-0.144402[μm]
Astigmatism (45)	Z[5]	Z[5]-0.012559[μm]
Defocus + Piston	Z[3]	Z[3]-0.043825[μm]
Astigmatism (XY)	Z[4]	Z[4]0.109538[μm]
trefoil	Z[8]	Z[8]-0.084734[μm]
Coma(X)+x-tilt	Z[6]	Z[6]-0.031785[μm]
Coma(Y)+y-tilt	Z[7]	Z[7]0.039864[μm]
trefoil	Z[9]	Z[9]0.134853[μm]
*****		
RMS wavefront error		0.162727[λ]
P-V wavefront error		0.650909[λ]
RMS radius		1.644957["]
*****		
2beam RMS radius		1.709854["]

### 4. 一次・二次平面鏡の調整

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った。試験には、星からの平行光の代わりになる、平行な2ビームをアームの先に取り付けら



**Figure 3** シャックハルトマン波面センサーで取得した画像の波面解析結果。(上段左) 参照球面鏡で取得した参照面。(上段右) 軸外し放物面鏡からの反射光で取得した被検面。(二段目左) 参照面と Port 側ビームのみにフォーカスしたスポットデータ。紫のスポットが参照面で取得したスポット、緑色のスポットが被検面で取得したスポットデータ。横軸縦軸の値は iDS カメラのピクセル番号を示す。イラスト中に描かれている円と黒色のマークは、ゼルニケ多項式展開するにあたって使用した原点と範囲を示す。(二段目右) 参照面と Port 側データ被検面で取得したスポットデータから得られるベクトルマップ。ベクトルマップから x 軸ティルトの収差が見られる。(三段目左) 参照面と Starboard 側ビームのみにフォーカスしたスポットデータ。(三段目右) 参照面と Starboard 側データ被検面で取得したスポットデータから得られるベクトルマップ。(最下段左) Port 側,Starboard 側両方のビームを合わせて、一つの放物面鏡とみなして取得したスポットデータ。ゼルニケ多項式の展開中心は光軸と一致させている。(最下段右) 参照面と 2 つのビーム合わせて取得したスポットデータから得られるベクトルマップ。2 ビーム同時の解析では、光軸を中心としたときの結像性能 RMS を算出する。それぞれのビームが持っている収差は 2 ビーム合わせた収差解析ではわからないが、このベクトルマップから各ビームが持っている収差を直感的に判断することができる。



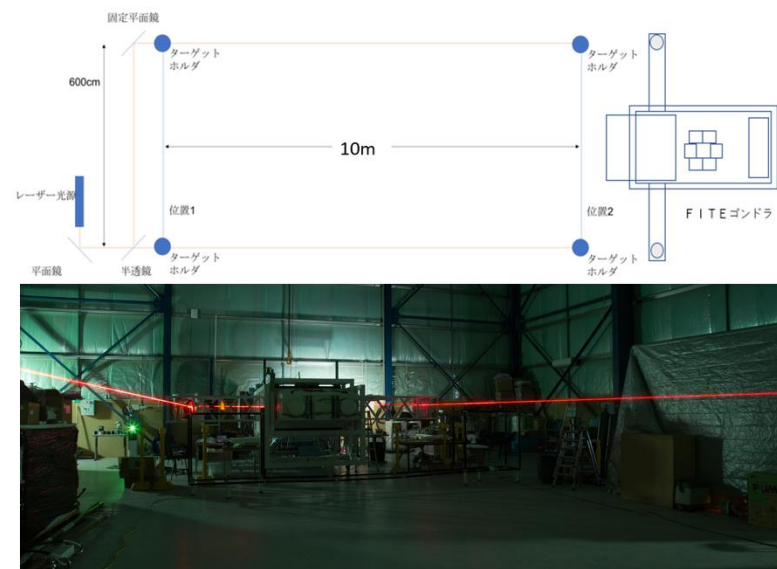
れている1次平面鏡に入射させる必要があるため、平行な2ビームを地上でつくる必要がある。要求される角度精度は $20''$ である。この要求精度は、遠赤外線での2ビームをエアリーディスク半径内に像面で重ねることを条件としている。エアリーディスク半径は、観測波長 $\lambda$ 、口径を $D$ として、 $1.22 \times (\lambda/D)$ なので、 $91.5''$ となり、像面で干渉縞を得る条件を満たす。光軸調整の概要図と、実際にハンガー内で試験を実施している時の写真を図4に載せる。水平基準精度10秒角の高精度レーザーすみ出し機を基準面として使用し、その基準面内に光軸調整用のレーザーでつくった2ビームが通過するように光路を設置した。光源から Gondola までの距離10mの間を、距離の変わらないリジッドな構造の上に置かれているターゲットホルダを移動させ、2ビームがターゲットホルダに当たる様に、光源の平面鏡と半透鏡を微調整する。これを繰り返すことで、ビームの平行からのズレを $1\text{mm}/10\text{m}=10^{-4}\text{rad}\sim 20''$ 以下の平行2ビームを達成した。最終的に南極点付近の星を一次焦点面にあるスターカメラで観測、結像状態を確認することで、問題ないことを確認した。

## 5. 光路差の調整

光軸調整でつくった2ビームが、FITE干渉計構体と何度ズレがあるかを測定することで、光路の測定を行い、光路0となるように2次平面鏡の位置を調整した。遠赤外線チャンネルの観測中心波長は $155\mu\text{m}$ 、フィルターの帯域幅は $30\mu\text{m}$ 、位相差 $1\text{rad}$ に光路差を合わせることを条件とすると、可干渉距離 $d=\lambda^2/\pi \cdot \Delta\lambda=254.9[\mu\text{m}]$ である。つまり、光路差を $250\mu\text{m}$ 以内に収めれば、像面で光は強め合うため、干渉縞が生成される。観測中は、光路の測定誤差範囲内で $250\mu\text{m}$ 二次平面鏡をステップさせ、 $\pm 125\mu\text{m}$ 以内に光路差0の場所がくるように観測計画を立てた。これにより、天体のビジビリティを2点以上測定することができ、天体の視直径測定に必要な情報を得ることが可能である。

光学系以外のFITEペイロード準備状況については、[7][8]を参照されたい。

Figure 4 一次・二次平面鏡調整実験概要図と実験時の様子。



## 参考文献

- [1] "Novel Spectral Imaging Method for Fizeau Interferometer",  
T. Matsuo, et al., SPIE 7013, 2008
- [2] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment (FITE): Sensor Optics",  
T. Kohyama, et al., Transactions of Space Technology Japan, 7, 55, 2009
- [3] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: I. Interferometer Optics",  
E. Kato, et al., Transactions of Space Technology Japan, 7, 47, 2009
- [4] "Development of New Optical Adjustment System for FITE (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment)"  
A. Sasaki, et al., SPIE 8445, 2012
- [5] "Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: Optical Adjustment System",  
A. Sasaki, et al., IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, 4, 179, 2014
- [6] 気球搭載型遠赤外線干渉計FITEの光学系状況報告  
佐々木彩奈 他、大気球シンポジウム 2017年
- [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
- [8] 気球搭載型遠赤外線干渉計FITE実験結果  
芝井 広 他、大気球シンポジウム 2018