気球搭載型遠赤外線干渉計(FITE)干渉光学系の進捗報告

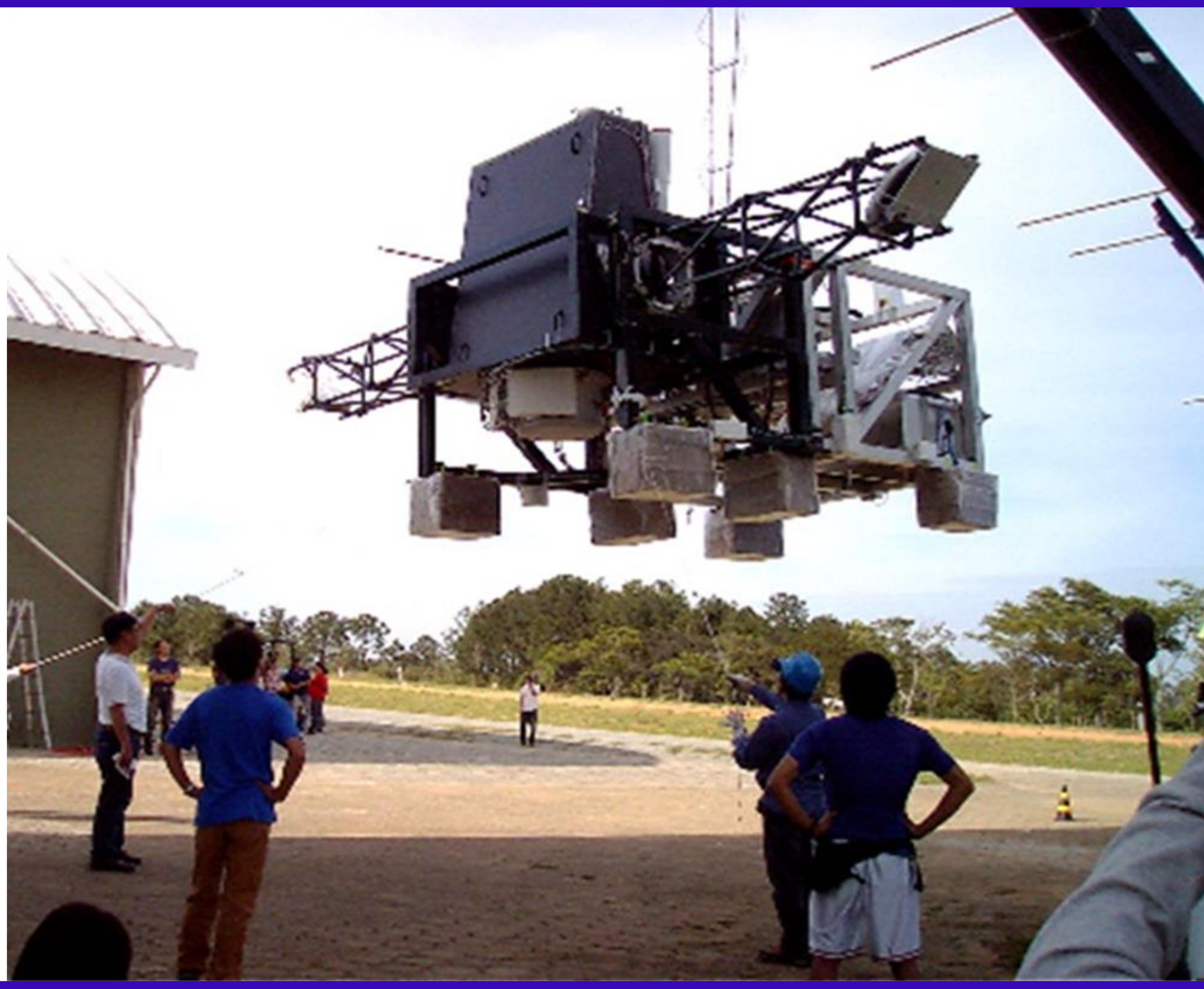
Current Progress in Optical Adjustment of Far−Infrared Interferometiric Telescope Experiment (FITE)

○佐々木彩奈, 芝井 広, 伊藤哲司 大山照平, 大塚愛里梨, 谷 貴人, 須藤 淳, 住 貴宏, 松尾太郎(大阪大), 成田正直(宇宙研/JAXA)

我々は気球搭載型遠赤外線干渉計（Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment: FITE）を開発している。FITE はFizeau 型の2 ビーム干渉計であり、2 枚の軸外し放物面鏡で集光し、2 ビームを焦点で干渉させる。このため、光学調整が重要な技術課題である。

現在、調整時の光学系評価手段としてシャックハルトマン波面センサーを用いて、2 ビーム同時測定・評価をする方法を開発している。シャックハルトマン波面センサーは、光学系から集光してきた波面の形状状態をハルトマンテストと比較して短時間で測定・解析可能であり、光学調整の効率化(数日→数時間)が期待できる。また、2 ビームの波面同時測定だけでなく、1 ビームごとの波面測定も可能な方法を考案し、シャックハルトマン波面センサーを用いた新しい放物面鏡調整方式の概念の実証実験を行った。これに基づいて、新干渉計調整機構の光学系詳細設計を完了した。

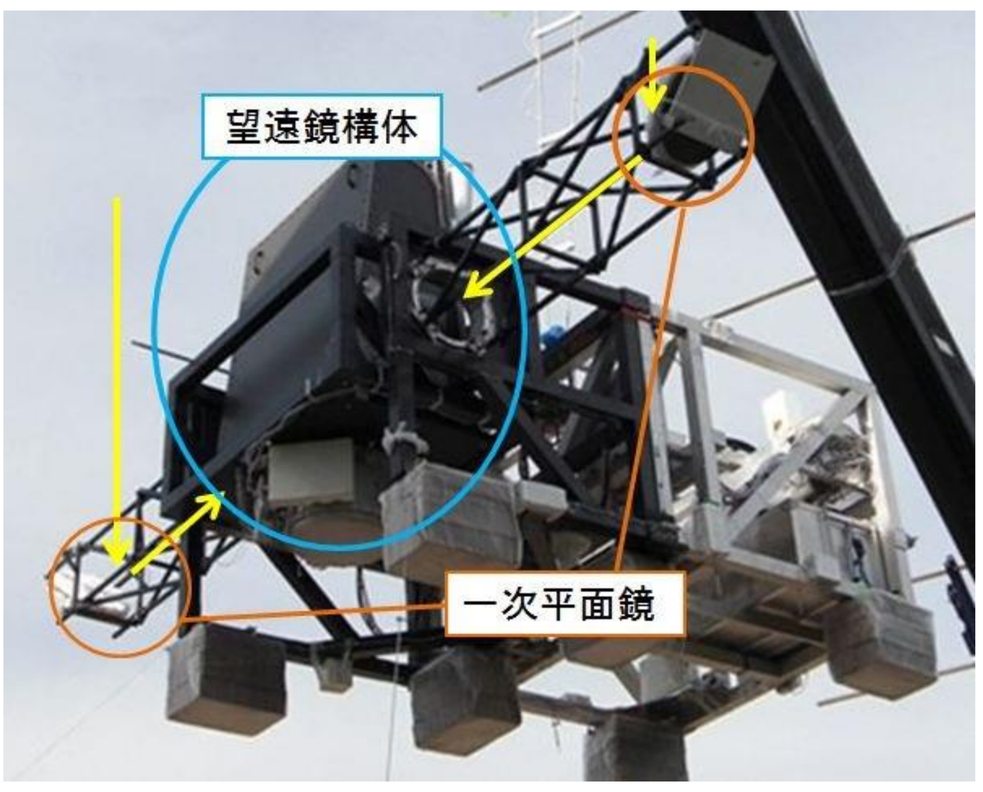
現時点で、ハルトマンテストの結果から各ビームが結像性能1.5"をきっていることが分かっている。2ビーム同時に調整を行うために、波面センサーの専用解析プログラムを作成し、プログラムが正常動作を行っているかを確認するため、人工的に光学収差を作成し作ったダミーデータによる解析を行った。結果、解析プログラムが正しく動作していることを確認した。



FITE干渉光学系と要求精度

FITEはFizeau型Michelson天体干渉計で、4枚の平面鏡と2枚の軸外しの放物面鏡から構成されている。私たちはFITEを気球に搭載し、高度35km上空で観測を行う予定である。FITEの基線長はファーストフライト時には8mあり、λ = 150μmで4arcsecondの分解能を達成する[Shibai et al., 2010]。

図 1. (下)FITE望遠鏡構体 (右)干渉計システム



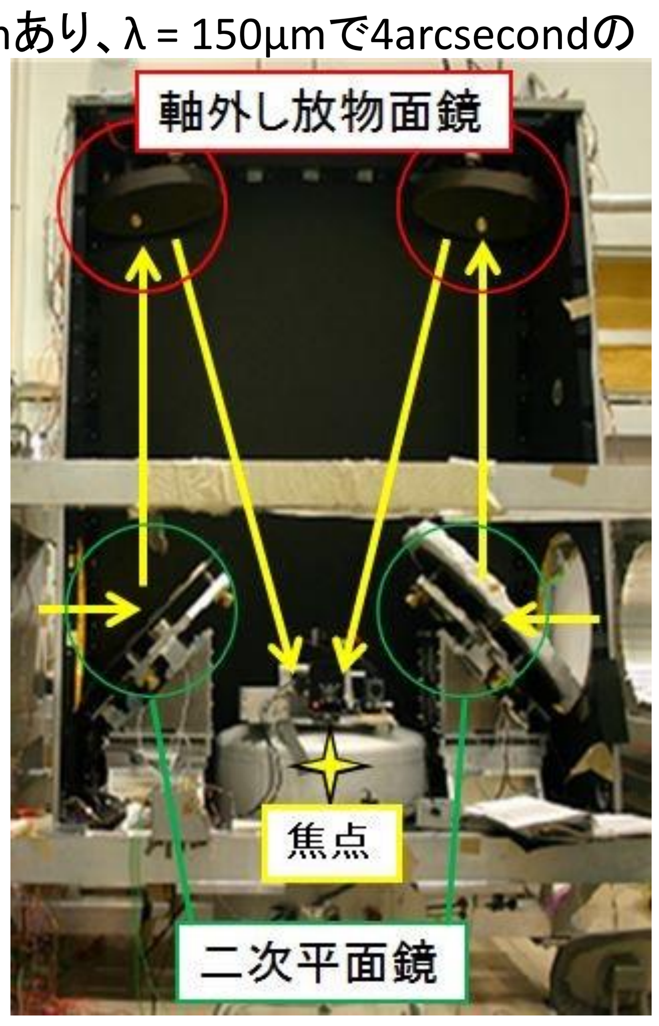


表 1. FITEの中間赤外線カメラ (λ = 25μm)で干渉縞を得る為の要求精度

1ビーム毎の波面位相誤差	λ/4(@25μm)
2ビームの結像性能	4.3"
2ビームの光路差	312.5μm

新干渉計調整機構

シャックハルトマン破面センサーを使用した新干渉計調整機構の原理実証を行い、1ビーム波面解析モードと2ビーム同時の波面解析モードで切り替えてスポットイメージを得た[Sasaki et al., 2012]。実証実験に基づいて光学系概念図を考案し、干渉計調整機構の3次元CADイメージを作成し、実機を組み立てた。

図 3. 新干渉計調整機構

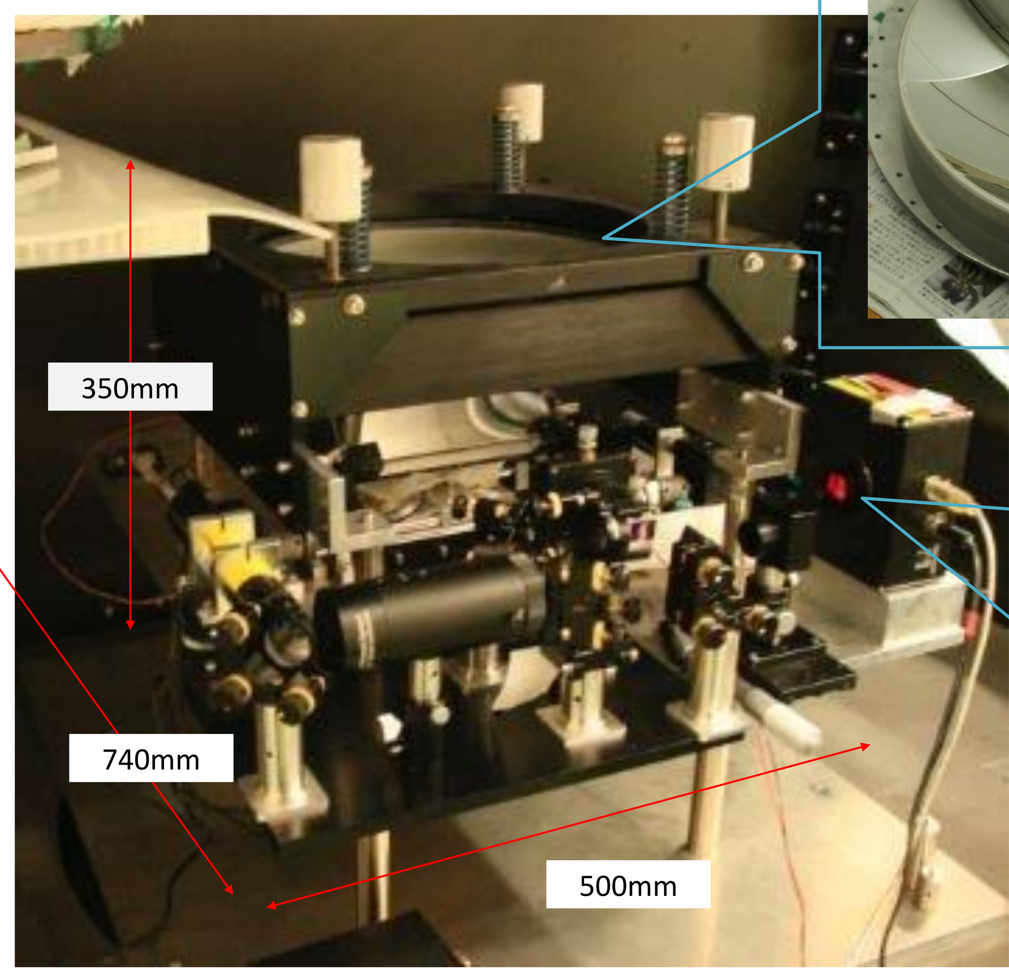
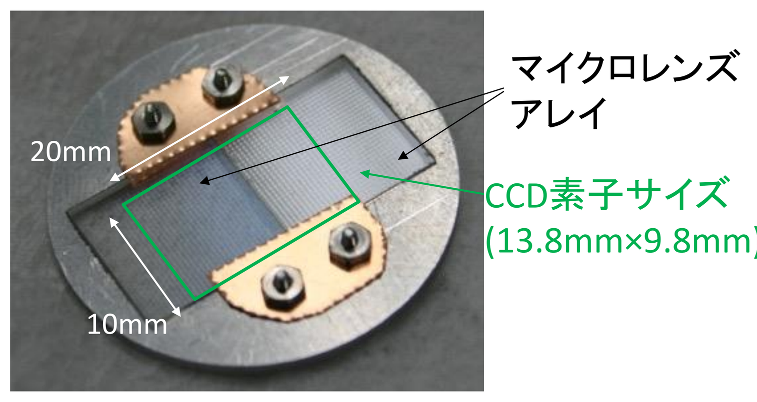


図 4. 参照球面鏡の写真と性能一覧

有効径	300mm
焦点距離f	150mm
曲率中心R	300mm
面精度	λ/15
材質	ホウケイ酸ガラス (PYREX)
鏡面	アルミ蒸着 (SiO2保護膜)
コバ厚	57mm
IK技研製	

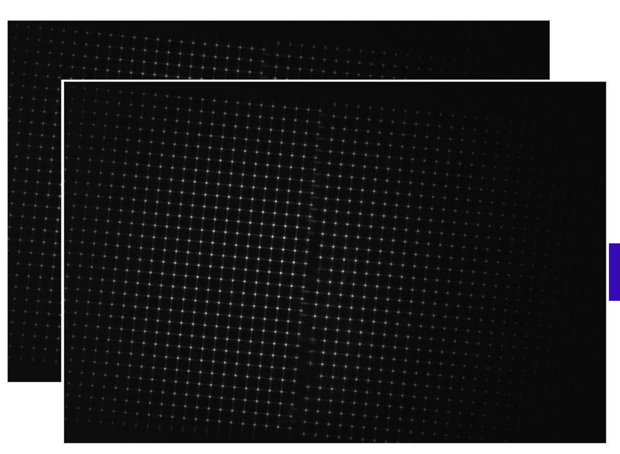
図 5.シャックハルトマン波面センサー用マイクロレンズアレイ



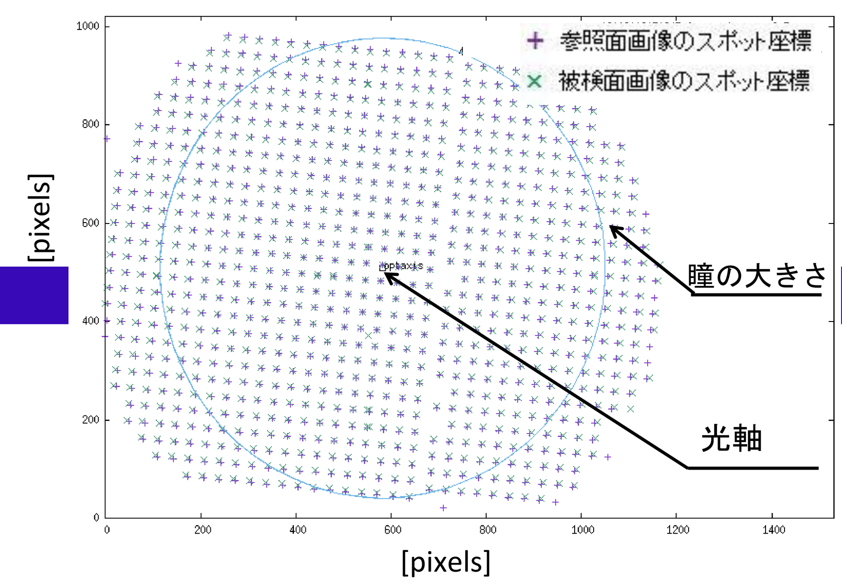
新干渉計調整機構光学系の解析プログラム概要とダミーデータ解析結果

組み立てた干渉計光学系を用いて、FITE実機でデータを取得した。取得したデータを人工的にズラしてダミーデータを作成することで、FITE干渉計専用の収差解析プログラムが正しく動作するか。確認を行った。

①波面センサーで取得した参照面と被検面のスポット画像データから、全スポットの位置座標を検出



②規格化に必要な瞳の大きさと展開中心（光軸）を求める。



③被検面のスポットに対応する参照面の各スポットを探し、位置座標ズレ量*dr, dθ*を求めて、ベクトルを出す。

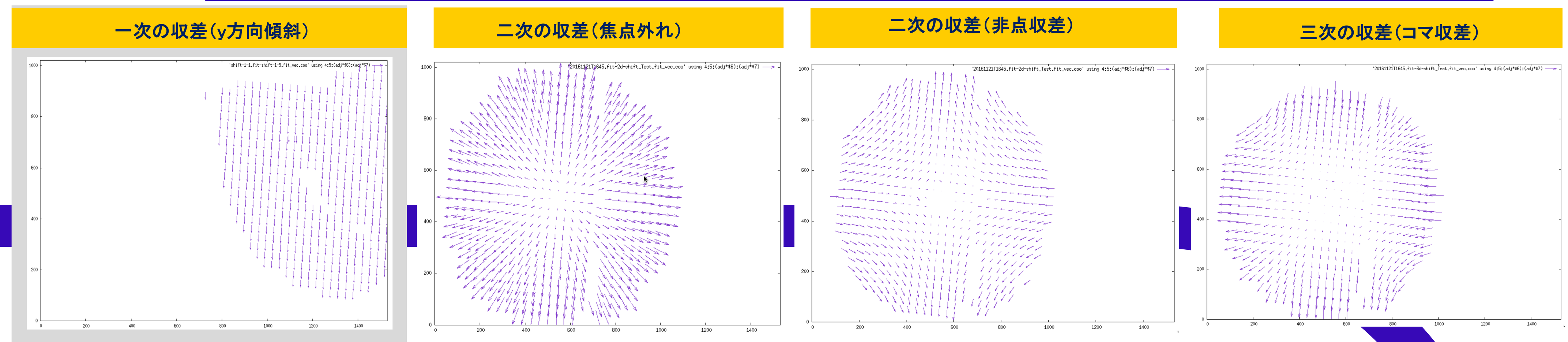


図6. センサー上でY方向に-40μm意図的に移動させた時のベクトルマップ

④ゼルニケ多項式を解き、波面収差を表すゼルニケ係数を求める。

波面の形状*W(x,y)*をzernike多項式で展開し、その微分値と測定値を比較する。微分式の係数を最小二乗法で求めることでフィッティングを行う。Zernike多項式は下記のように定義されている。

$$\left.\begin{aligned} Z_{even\ j} &= [2(n+1)]^{\frac{1}{2}} R_n^m(r)\cos m\theta \\ Z_{odd\ j} &= [2(n+1)]^{\frac{1}{2}} R_n^m(r)\sin m\theta \end{aligned}\right\} m \neq 0$$

$$Z_j = [(n+1)]^{\frac{1}{2}} R_n^m(r) \qquad m = 0$$

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s!\left[\frac{(n+m)}{s} - s\right]!\left[\frac{n-m}{2} - s\right]!} r^{n-2s}$$

ここで、nはradial degree, mはazimuthal frequencyを表す。
*W*を*r*成分とθ成分に分け、測定量をφ_i、zernike係数をa_jとして、zernike多項式で展開すると、

$$\boldsymbol{\varphi_i(r)} = \sum_{j=1}^{N} a_j Z_j(\boldsymbol{r_i}) \qquad i = 1, 2, \ldots, M,$$

*N*は展開する次数によって決まる数(3次までの収差を求める場合、N=9), *M*はデータ点の数×2である。この式を行列形式で書き直すと、

$$\boldsymbol{\Phi = Za}$$

一般に、未知数である*N*個のzernike係数よりも、*M*個の方程式の数(スポット数の2倍)の方が多いので、最小二乗法を使用して係数を求めると、

$$\Delta = \sum_{i=1}^{M} [a_j Z_j(\boldsymbol{r_i}) - \varphi_i]^2$$

最小二乗解は、次の行列計算形式で求めることができ、

$$\boldsymbol{z^T Z a = z^T \Phi}$$

$$\boldsymbol{a = (z^T Z)^{-1} z^T \Phi}$$

となる。

⑤収差解析結果を出力する

算出したZernike係数はザイデル収差と対応している。
Z[1] : X方向傾斜
Z[2] : Y方向傾斜
Z[3] : 焦点外れ
Z[4] : 非点収差(0, 90度)
Z[5] : 非点収差(±45度)
Z[6] : コマ収差X方向＋X方向傾斜
Z[7] : コマ収差Y方向＋Y方向傾斜

一次の収差（y方向傾斜）	二次の収差（焦点外れ）	二次の収差（非点収差）	三次の収差（コマ収差）
Z[1] = 0.0000[um]	Z[1] = -0.004[um]	Z[1] = -0.005[um]	Z[1] = -0.396[um]
Z[2] = -1.1728[um]	Z[2] = 0.025[um]	Z[2] = 0.013[um]	Z[2] = -0.399[um]
Z[3] = -0.0000[um]	Z[3] = 0.693[um]	Z[3] = 0.002[um]	Z[3] = 0.031[um]
Z[4] = -0.0000[um]	Z[4] = 0.000[um]	Z[4] = -0.675[um]	Z[4] = -0.015[um]
Z[5] = -0.0000[um]	Z[5] = 0.002[um]	Z[5] = 0.001[um]	Z[5] = 0.002[um]
Z[6] = 0.0000[um]	Z[6] = 0.001[um]	Z[6] = 0.001[um]	Z[6] = -0.205[um]
Z[7] = -0.0000[um]	Z[7] = 0.001[um]	Z[7] = 0.002[um]	Z[7] = -0.206[um]

10nmの単位で誤差が載る

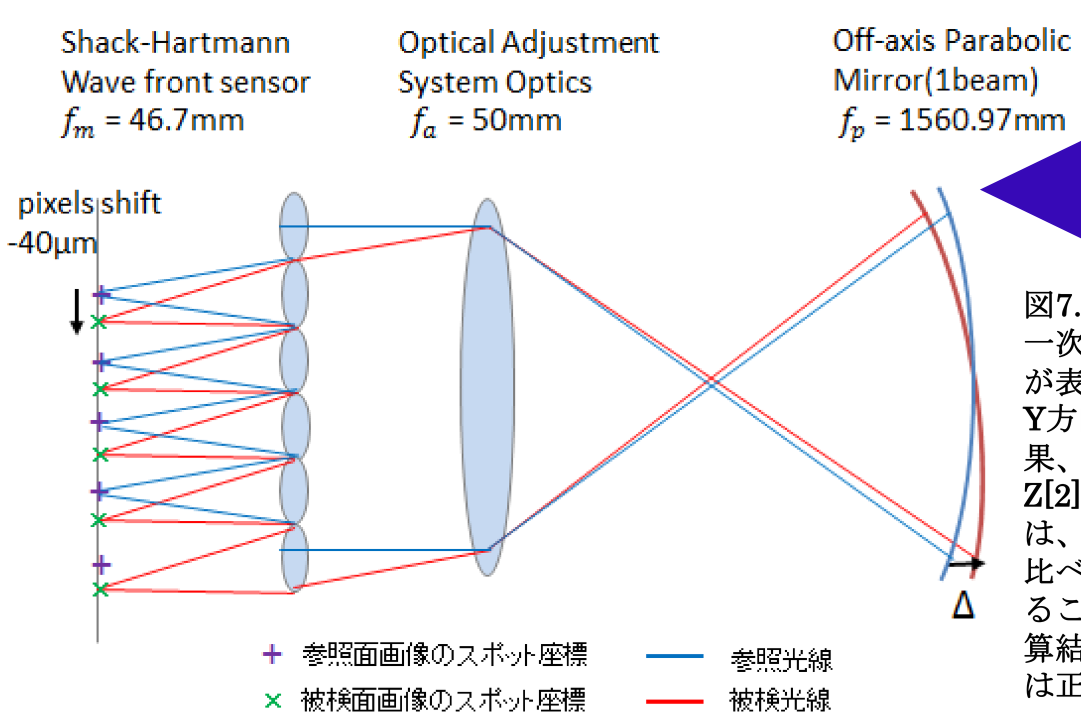


図7.
一次の収差をもつダミーデータ(図6)が表す光学系の概要図。センサー上でY方向に-40μm意図的に移動させた結果、解析プログラムで出力された値はZ[2]=-1.17[um]となった。この結果は、FITE干渉光学系で鏡が参照面と比べてY方向にΔ=-1.17[um]傾いていることを意味する。このΔの値が、計算結果と一致すれば、解析プログラムは正常に動作していると確認できる。

一次の収差についてのみ計算結果を載せる。
光学調整機構の合成焦点距離は、図7より、マイクロレンズアレイの焦点距離距離$f_m = 46.7mm$、ダミーデータの移動量は$-40\mu m$、光学調整機構の合成焦点距離は$f_a = 50mm$、FITE放物面鏡の焦点距離は$f_p = 1560.97mm$なので、放物面鏡の傾斜θ_Pは、

$$\theta_p = \frac{f_a \cdot -40[\mu m]}{f_m \cdot f_p} = -2.74 \times 10^{-5} rad$$

1ビームの半径はR= 180mmであることから、鏡の端を原点として放物面鏡がθ_p傾いているとすると、原点からもっとも離れた鏡の端でのズレ量Δは、

$$\Delta = \theta_p \cdot R = -4.93 \times 10^{-3} mm \sim -5\mu m$$

干渉計調整機構では被検面である放物面鏡を2回反射した波面を測定しているので、波面の変位は鏡の変位の4倍となる。これを考慮にいれると、求めたい鏡の変位量Δ_pは、$\Delta_p = \frac{-5\mu m}{4} = 1.23\mu m$
この値は、解析ソフトを通して出力されたZ[2]の値Z[2] = -1.17[um]とほぼ一致している。