

## 大型望遠鏡光学試験のための新しい波面縫い合わせ法の開発

山中 阿砂（名古屋大学大学院 理学研究科）

### Abstract

我々は大型望遠鏡（口径～1 m 以上）の光学試験のため、波面縫い合わせ法という測定手法を開発した。通常、望遠鏡の光学試験ではオートコリメーション法が用いられる。この方法では望遠鏡のサイズに匹敵する平面鏡が必要となるが、高精度かつ大きな平面鏡の製作は困難である。一方、波面縫い合わせ法では小型の平面鏡を用いて望遠鏡開口面全体の測定結果を得る方法のため、大型望遠鏡の光学試験を行うことができる。また、極低温下・真空中で試験する場合、熱収縮や重力変形による小型平面鏡の歪みが測定結果に悪影響を及ぼすので、その影響を取り除く新たな手法も開発した。

### 1 大型望遠鏡の光学試験

一般的に、望遠鏡の透過波面誤差は大型平面鏡を用いたオートコリメーション法で測定される（図 1）。これは、望遠鏡焦点位置に干渉計を設置し、その光軸上に望遠鏡と匹敵するサイズの高精度平面鏡を置くことで光を折り返し、望遠鏡の透過波面誤差を一度に測定する方法である。この方法では、大型の望遠鏡（口径～1 m 以上）になるほど大きな平面鏡が必要になるが、大型で精度の良い平面鏡の製作は困難である。

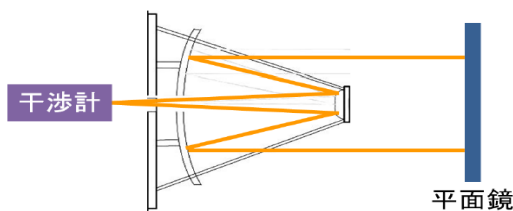


図 1: 大型平面鏡を用いたオートコリメーション法の概略図。望遠鏡焦点位置に干渉計を配置し、望遠鏡と正対している平面鏡で光を折り返して干渉させ、望遠鏡の透過波面を一度に測定する。

そこで我々は大型望遠鏡の光学試験方法として、波面縫い合わせ法を開発した。これは、望遠鏡開口面の一部分だけを測定できるような小さな平面鏡を用いて複数領域の透過波面誤差データを取得し、開口面全体の測定結果につなぎ合わせる方法である。

### 2 波面縫い合わせ法

以下では、波面縫い合わせ法の原理と検証結果を紹介する。検証は JAXA 筑波宇宙センターにて行い、直径 30 cm の高精度平面鏡を使って口径 80 cm の望遠鏡の測定を行った（Kaneda et al. 2012）。

#### 2.1 波面縫い合わせ法の原理・検証

波面縫い合わせ測定の設定アップを図 2 に示す。

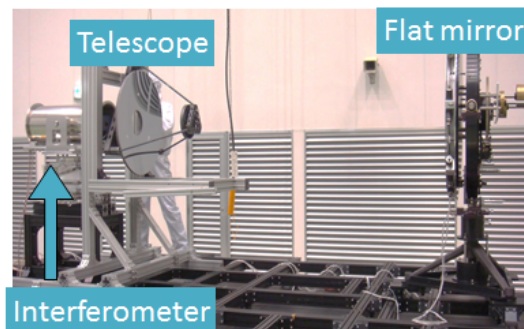


図 2: 波面縫い合わせ測定の設定アップ。

大型平面鏡を用いたオートコリメーション法と同じく、望遠鏡の焦点位置に干渉計を設置し、高精度の小型平面鏡と望遠鏡を正対させる。望遠鏡光軸を中心に小型平面鏡を 22.5 度ずつ回転させ、望遠鏡の全開口面をカバーする 16 領域を測定する（図 3）。

波面縫い合わせ法はこの 16 データをつなぎ合わせる方法である。測定が同時ではないことと、回転ステージの機械誤差のため各データには補正すべきオフセットと傾きが生じる。そこで、あるデータを基準にして他のデータとの共通領域の差が最小となるよう、基準とするデータ以外のすべてのデータの傾きとオフセットを最小二乗法で求め、データ同士をつなぎ合わせる。こうして望遠鏡開口面全体の透過波面誤差を取得する。

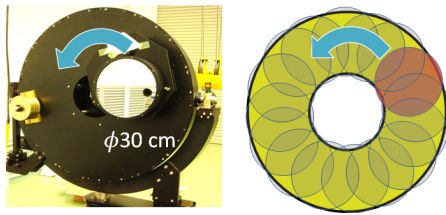


図 3: 小型平面鏡は矢印方向に 22.5 度ずつ回転し、16 個のサブアパーチャーデータを取得。

望遠鏡の光学試験における波面縫い合わせ法の有効性を検証するため、直径 90 cm の大型平面鏡を用いた測定 (図 4) と波面縫い合わせの結果を比較する。それぞれの方法から得られた結果を図 5 に示す。図 5 左は小型平面鏡で得られた 4 方向位置での測定結果例であり、このような 16 個のサブアパーチャーデータをつなぎ合わせて図 5 中央の結果を得た。図 5 右は大型平面鏡での測定結果である。両者の結果はよく一致しているため、波面縫い合わせ法は望遠鏡の透過波面測定に有効であることが確かめられた。



図 4: 直径 90 cm の平面鏡を用いたオートコリメーション法での測定。

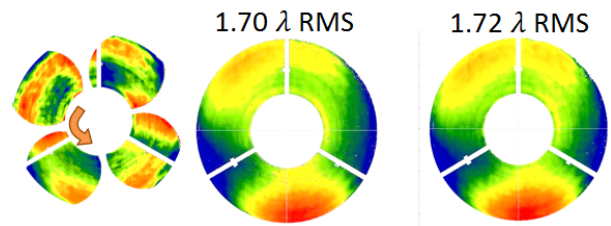


図 5: 左: 小型平面鏡で得られた 4 方向位置でのサブアパーチャーデータ。中央: 波面縫い合わせの結果。右: オートコリメーション法の結果。図上の値は、波面誤差を二乗平均平方根で表している ( $\lambda=633$  nm)。両者の結果はよく一致していることがわかる。

## 2.2 真空下での測定

赤外線宇宙望遠鏡は低温・真空下で運用しなければならないため、実際の光学試験も同じ環境下で行う必要がある。そこで、先行実験として JAXA φ6 m スペースチャンバーに図 2 の測定系を入れ、常温・真空下で高精度平面鏡を用いて波面縫い合わせ測定を行った (図 6)。

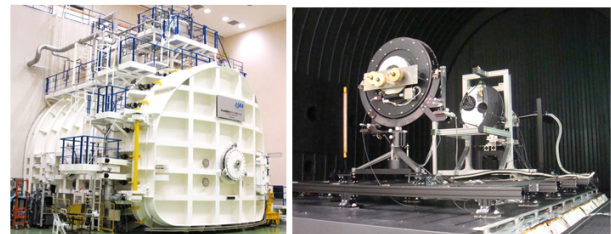


図 6: 左: JAXA φ6 m スペースチャンバーの外観。右: 内観。

チャンバー内での真空下 (0.45 Pa) と大気圧下 (1014 hPa) の測定結果を図 7 に示す。RMS 値を比較すると大きな変化はないが、両者の差分を取ると図 8 となり、違いが生じているのがわかる。この原因として、干渉計の与圧容器が気圧差で変形し、望遠鏡と干渉計の位置関係がずれてしまったことが考えられる。

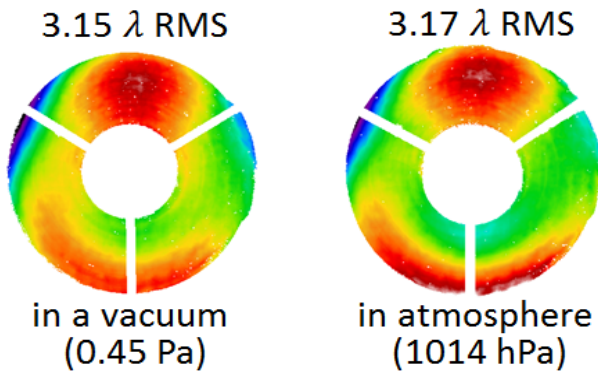


図 7: 波面縫い合わせの結果. 左: 真空中. 右: 常圧下.

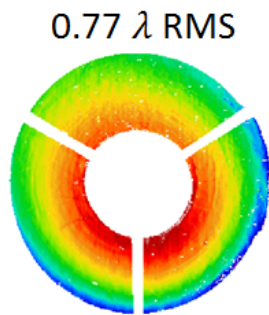


図 8: 図 7 の真空中と大気圧下の結果の差分.

### 3 Shearing 法

低温・真空中では熱収縮や重力変形による小型平面鏡の歪みが測定結果に影響を及ぼすため、波面縫い合わせの結果から平面鏡の表面形状を抜き出し (Shearing 法), この影響を緩和する方法を考案した。

#### 3.1 Shearing 法の原理

望遠鏡開口面のある位置  $(x, y)$  における小型平面鏡の表面形状誤差を  $S(x, y)$ , 望遠鏡の波面誤差を  $W(x, y)$  とすると, 得られる透過波面は  $S(x, y) + W(x, y)$  となる. ここで小型平面鏡を  $x$  軸に関して  $(\Delta x = |x - x'|)$  だけ微小移動させる. そのとき得られる望遠鏡の波面誤差は同じものであるため, 移動前後の測定結果を引き算すると小型平面鏡の表面形

状誤差の差分が得られる.

$$[S(x', y) + W(x, y)] - [S(x, y) + W(x, y)] \quad (1)$$

$$= S(x', y) - S(x, y) \quad (2)$$

式 (2) を  $\Delta x$  で割り, 移動距離に沿って積分すると  $x$  方向の表面形状誤差を再現したマップが得られる.

$$\frac{S(x', y) - S(x, y)}{\Delta x} \approx \frac{\partial S(x, y)}{\partial x} \quad (3)$$

$$\int \frac{\partial S(x, y)}{\partial x} dx = S(x, y) \quad (4)$$

同様の微小移動を  $y$  軸方向でも行うことで,  $y$  方向の表面形状誤差マップが得られる. これらのマップを貼り合わせることで, 小型平面鏡全体の表面形状誤差を得ることができる.

#### 3.2 低精度平面鏡での Shearing 法の検証

Shearing 法の検証のため, 図 9 左の低精度平面鏡を用いて波面縫い合わせ測定を行ったところ, 図 10 右が得られた.

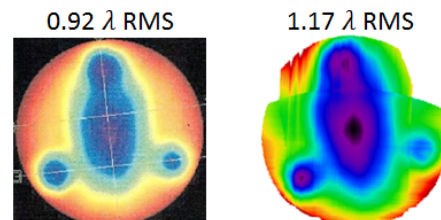


図 9: 左: 低精度平面鏡の形状誤差. 右: Shearing 法で得られた平面鏡の形状誤差.

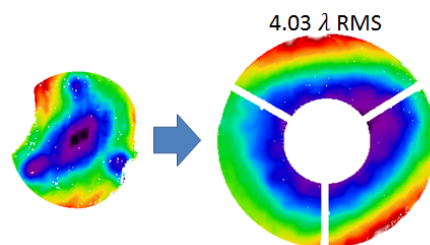


図 10: 左: 低精度平面鏡によるサブアパーチャーの例. 右: 低精度平面鏡での波面縫い合わせの結果.

これを図 5 と比較すると，平面鏡の形状誤差の影響を受けていることがわかる．また，Shearing 法で低精度平面鏡の形状誤差を計算すると，図 9 右の結果が得られ，同図左の形状をよく再現できていることがわかる．平面鏡の形状誤差を取り除くために各サブアパーチャーからこの形状誤差を差し引き（図 11），得られたサブアパーチャーで再び波面縫い合わせを行った結果を図 12 左に示す．同図右の高精度平面鏡での結果と比較すると RMS 値は一致しなかったが，差し引き前の結果（図 10 右）と比べると明らかに平面鏡形状の影響が取り除かれているのが確かめられる．以上の検証より，Shearing 法の有用性を確認した．また，Shearing アルゴリズムと測定手法の更なる改善が必要であることがわかった．

## 4 まとめ

波面縫い合わせ法は，大型望遠鏡の光学試験に有効であることがわかった．また，赤外宇宙望遠鏡の光学試験の前段階としてチャンバー内で常温・真空下で測定を行った．今後は低温・真空下での試験を行う予定である．低温・真空下での波面縫い合わせの結果は，平面鏡の自重変形や熱収縮起因の歪みの影響を受けるので，その影響を軽減させる Shearing 法を開発した．低精度平面鏡の結果に Shearing 法を適用すると，平面鏡による影響は改善されたが（ $4.03 \rightarrow 1.95 \lambda \text{RMS}$ ），高精度平面鏡の結果の RMS 値を再現しなかった．現在は Shearing アルゴリズムおよび測定手法の改善を進めている．

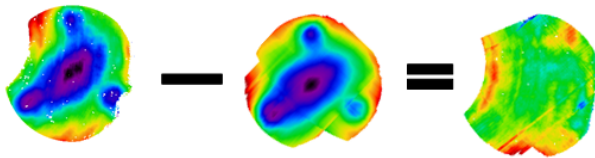


図 11: Shearing 法で得た平面鏡形状（図中央）を各サブアパーチャーから差し引く．一番右のようなサブアパーチャーを 16 データ作成し，波面縫い合わせを行った．

## Reference

1. Kaneda.H, Proc.SPIE 8442, id.84423T-84423T-6 (2012)
2. 國生拓摩, 名古屋大学修士論文 (2014)

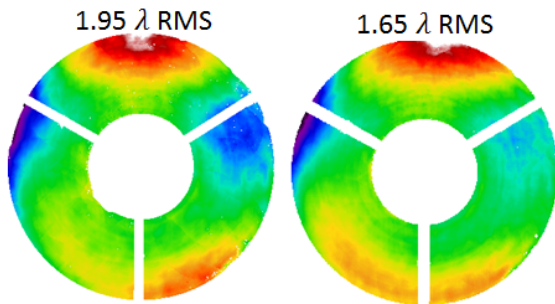


図 12: 左：Shearing 法を波面縫い合わせに適用した結果．右：高精度平面鏡での波面縫い合わせの結果．