

# SPICA 中間赤外線検出器の地上実験のための低温光学系の開発

西山 美穂 (名古屋大学大学院 理学研究科)

## Abstract

次世代赤外線天文衛星 SPICA に使用する中間赤外線検出器 (Si:As および Si:Sb) の、波長感度特性を測定したい。そのためには、冷却した検出器に波長を変えながら単色光を入射し、光応答を測定する必要がある。測定系全体を極低温に冷却できれば、低背景環境で S/N の高い測定が可能となる。本研究では、このための低温光学系をアルミ切削鏡で製作し、性能を評価した。低温光学系は、ランプとピンホールを用いた赤外光源からの光を、軸外し放物面鏡でコリメートし、光学フィルターを通過させて単色光にし、検出器上で結像させる仕組みである。まずは、製作したアルミ切削鏡の表面精度を、干渉計と非接触三次元測定器を利用して測定した。次に、鏡をアセンブリして光学系を組み立て、ナイフエッジ法を用いて結像性能を常温で評価し、シミュレーションで冷却時の光学性能を見積もった。最後に、光学系を実際に冷却して、極低温における光学系の性能を評価し、Si:As 検出器の波長感度特性の測定に必要な結像性能を有することを確認した。

## 1 イントロダクション

### 1.1 目的

次世代赤外線天文衛星 SPICA に使用する IBC 型の検出器は、高バイアス電圧を印加することで、長波長側に感度が伸びることが知られており、これを定量評価することが課題の一つである。波長感度特性を測定するためには、様々な波長の光を検出器に入射して、検出器の光応答を調べる。検出器は極低温 ( $\sim 6$  K) で動作させる必要があるが、先行研究では室温部にある市販の分光器 (モノクロメータ) を使って単色光を作り、クライオスタット内の検出器に光を入射していた。しかし、目的波長 ( $20\text{-}37 \mu\text{m}$ ) は室温の  $300$  K 放射のピーク波長より長いため、高背景環境となり、S/N の高い測定ができなかった。よって、本実験では検出器を含む測定系全体を極低温まで冷却し、低背景環境 ( $\sim 6$  K) での高精度な測定を目指す。今回は、その測定に用いる低温光学系の設計・評価を行う。

### 1.2 低温光学系

図 1 に低温光学系の概念図を示す。低温光学系は以下の特徴を持つように設計した。

- 瞳部分に光学フィルターを挿入することにより、検出器に特定波長帯の光を入射する
- 単色光が検出器上で点像として写ることにより、一度の撮像で光応答 (ON 点と OFF 点) を評価する
- 測定系全体が  $\phi 8$  インチのクライオスタットに収まるサイズにする
- 冷却時のアラインメント崩れを最小限にするため、筐体にアルミ材を使用し、光学系にはアルミ切削鏡を使用する

## 2 低温光学系の評価方法

### 2.1 鏡の表面形状誤差評価

製作したアルミ切削鏡 3 枚の表面形状誤差を、フィゾー干渉計及び非接触三次元測定器 (NH-6) を用いて測定する。フィゾー干渉計とは、参照面からの反射光と被検面からの反射光の光路差から干渉画像を得、その干渉画像から表面形状を測定するものである。一方、NH-6 は、シングルビームを一定間隔で動かして、被検面をスキャンし、表面の凹凸を測定するものである。今回は原理の異なる 2 つの方法を用

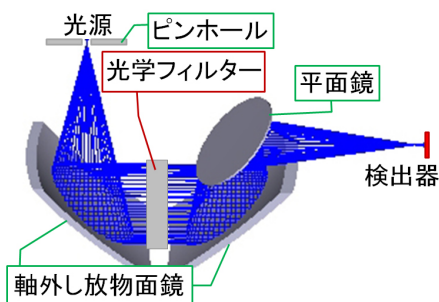


図 1: 光学系の概略図。光学系は 2 枚の軸外し放物面鏡と 1 枚の平面鏡から構成されている。ランプ (光源) からの光を軸外し放物面鏡でコリメートし、光学フィルターを通過して単色光にし、検出器上に集光させる仕組みになっている。

いて測定結果を検証する。個々の鏡の測定結果から光学系の全波面誤差を見積り、検出器実験に使用できる表面精度をもっているか確認する。目的波長が  $20\text{--}37\ \mu\text{m}$  であるため、 $\lambda/14$  ( $\sim 1.4\text{--}2.6\ \mu\text{m}$ ) の全波面精度を目標とする。

## 2.2 常温での光学アラインメント

次に、表面形状を測定した鏡を組み合わせて光学系を組み、ナイフエッジ法を用いて、焦点での edge transfer function (ETF) を求め、常温での光学性能評価をする。ナイフエッジ法とは、図 2 に示したように、像を遮るようにナイフを動かした際の光強度の落ち方をみる方法である。焦点面像が点であった場合、光強度は急激に落ちるが、焦点面像が広がっている際には、ゆるやかな光強度の減少となる。図 3 に示したコンフィグレーションで、600 K のはんだごととピンホールで光源を作り、赤外線カメラ (波長  $8\text{--}13\ \mu\text{m}$ ) とナイフを動かして、光集中度の光軸方向依存性から焦点を求める。そして、焦点で得られた ETF をシミュレーションで作製したプロファイルと比較することで、Point Spread Function (PSF) の半値幅 (FWHM) を評価する。

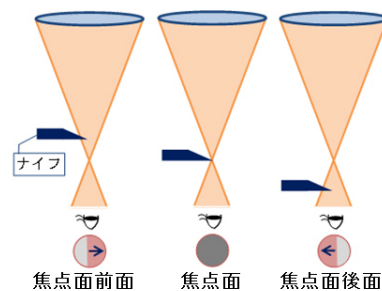


図 2: ナ이프エッジ法の原理。

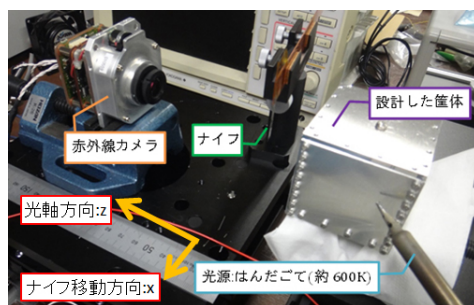


図 3: 常温での光学アラインメント時のコンフィグレーション。

## 2.3 極低温での結像性能評価

Si:As 検出器及び低温光学系を極低温 (6 K) まで冷却し、取得したピンホール像から結像性能を評価する。クライオスタット内のアラインメントを図 4 に示す。その際、Zemax を用いて、冷却した際の像歪みの影響をシミュレーションした。シミュレーション結果より、冷却時の像サイズ変化は約 3% 以下であることと、像サイズが約  $600\ \mu\text{m}$  であることを見積もった。

## 3 結果

### 3.1 鏡の表面形状誤差

表 1 に、フィゾー干渉計と NH-6 で求めた平面鏡の表面形状誤差をまとめる (いずれも RMS)。また、図 5 に NH-6 で測定した表面形状誤差マップを示す。表面形状誤差は 2 つの測定から  $350\ \text{nm}$  前後であることがわかる。全ての鏡を測定したが、表面形状誤差を求めることができたのは平面鏡のみであった。その原

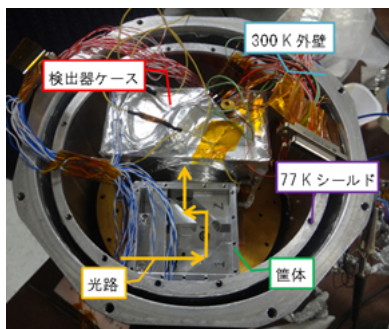


図 4: 極低温での結像性能評価時のコンフィグレーション。クライオスタット内に検出器ケースと筐体を設置したところ。

|     |         |        |
|-----|---------|--------|
|     | フィゾー干渉計 | NH-6   |
| 平面鏡 | 310 nm  | 380 nm |

表 1: 表面形状誤差の測定結果 (RMS)。

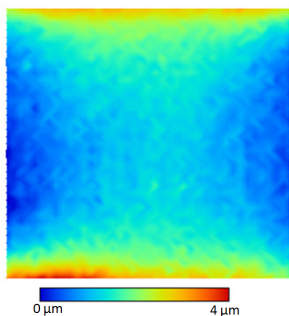


図 5: 平面鏡の表面形状誤差 (NH-6 による測定結果)。

因については 4 章で考察する。全ての鏡が同じ業者の同じ製法で製作されたため、同じ表面精度だと仮定すると、光学系の全波面誤差は  $\sim 1.3 \mu\text{m}$  (RMS) となる。目的波長  $20\text{-}37 \mu\text{m}$  の  $\lambda/14$  よりも小さく、実験に必要な波面精度を満たす。

### 3.2 常温での光学性能

光学系を組み上げて、焦点位置で測定した ETF を図 6 に示す。また、FWHM の設計値及び、測定結果をまとめたものを表 2 に示す。図 6 において、得られた ETF と、設計値の FWHM でのシミュレーション結果を比較すると、大きく異なっていることがわかる。よって、FWHM を  $55\text{-}220 \mu\text{m}$  の間で変化さ

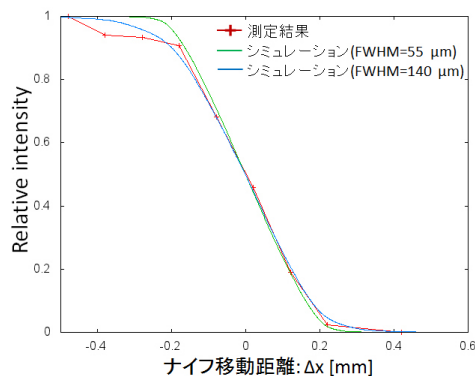


図 6: ピンホール ( $\phi 500 \mu\text{m}$ ) 像の ETF。焦点位置 ( $\Delta z=0$ ) でのデータを赤で示し、設計値の PSF を緑で示す。FWHM= $140 \mu\text{m}$  の時の PSF のシミュレーション結果を紫で示す。

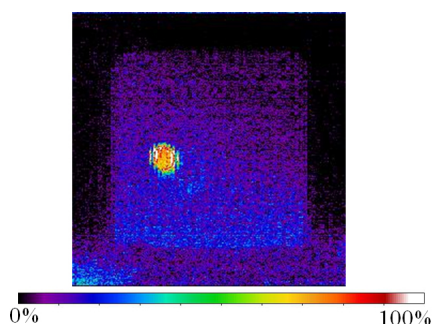
|      |                  |                   |
|------|------------------|-------------------|
|      | 設計値              | 測定結果              |
| FWHM | $55 \mu\text{m}$ | $140 \mu\text{m}$ |

表 2: PSF の FWHM の設計値と測定結果。

せ、実験データを説明できる PSF を調べた。その結果、FWHM =  $140 \mu\text{m}$  の時に説明できることがわかった。検出器上に像が収まることは確認できたが、FWHM は設計値より約  $100 \mu\text{m}$  ほど大きくなってしまった。その原因は 4 章で考察する。

### 3.3 極低温での結像性能

図 7 に光学系を 6 K に冷却し、Si:As 検出器 ( $256 \times 256$ ) で取得したピンホール像を示す。この時、ピンホール像は  $< 810 \mu\text{m}$  で、 $S/N=110$  であり、 $S/N$  の高い信号を得ることができた。像は検出器全面に広がることなく点像として写っており、一度の撮像での光応答評価が可能となる。よって、この光学系は極低温における目的波長 ( $20\text{-}37 \mu\text{m}$ ) での実験要件を十分満たす。像サイズがシミュレーション結果よりも大きくなってしまった原因については 4 章で考察する。

図 7: 6 K でのピンホール ( $\phi 500 \mu\text{m}$ ) 像

## 4 考察

### 4.1 表面形状が測定できなかった原因

今回、2 枚の軸外し放物面鏡については干渉計での表面形状測定ができなかった。測定では、光源に He-Ne レーザー ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) を使用している。平面鏡の測定はできたが、RMS で  $\sim 350 \text{ nm}$  であり、 $\lambda/14$  より非常に悪い。製作したアルミ鏡はいずれも、レーザー光を、鏡として反射できず、散乱してしまい、その結果、表面形状が測定できなかったと考えられる。赤外の波長においては、この粗さでも鏡として機能するが、その評価を可視光で行うことは非常に困難である。

また、NH-6 はその測定原理から、傾いた面の測定が難しい。軸外し放物面鏡を測定するには、被検面がほぼ水平になるように設置したうえで、その設置角度を精確に測定する等の工夫が必要となる。

### 4.2 PSF が広がってしまった原因

常温での光学性能評価で、FWHM が設計値の 2.5 倍も広がってしまった原因と、冷却試験でシミュレーション結果よりも像が大きくなってしまった原因を考察する。常温での試験は、赤外線カメラ (波長  $8\text{-}13 \mu\text{m}$ ) を使用した。光学系の全波面誤差は、少なくとも  $1.3 \mu\text{m}$  (RMS) 以上であり、光学系の収差や鏡のアラインメント誤差を考慮すると、これよりも大きいと考えられる。波面誤差が、波長  $8\text{-}13 \mu\text{m}$  に対して、 $\lambda/14$  を逸脱しているため、結像性能が悪化したと考えられる。

しかし、極低温での評価では波長  $\sim 28 \mu\text{m}$  の赤外光を使用しており、波面誤差による散乱は支配的ではないと考えられる。そこで別の原因を考える。結像性能評価では、光源に  $\phi 500 \mu\text{m}$  のピンホールを使用しているため、光軸中心から  $250 \mu\text{m}$  ずれた角度からの光も入射してしまう。光軸中心からずれた角度から入射した光の結像性能を、Zemax でシミュレーションした。影響がわかりやすいように、光軸中心から  $3 \text{ mm}$  離れた場所の PSF を図 8 に示す。  $250 \mu\text{m}$  のオフセットしたことによる収差の影響は  $\Delta \text{FWHM}$  で  $100 \mu\text{m}$  程度と見積もられ、実験結果と一致する。従って、光源が有限のサイズを持つ際は、光軸中心からずれた光による収差も考慮しなければならない。

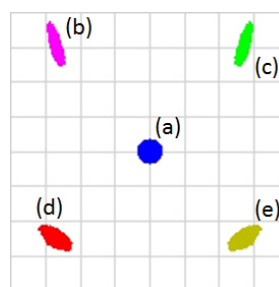


図 8: 光軸中心からの像 (a) と、光軸からずれた光 (b) ~ (e) が入射した際の像の Zemax によるシミュレーション結果。視野サイズは Si:As 検出器と同じ  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  となっている

## 5 まとめ

SPICA 中間赤外線検出器の波長感度特性を測定するため、低温光学系を設計した。製作した鏡の表面形状誤差を測定し、光学系を組み上げて、常温及び  $6 \text{ K}$  で光学性能の評価を行った。その結果、鏡・光学系はともに波長  $20\text{-}37 \mu\text{m}$  での検出器実験に十分な性能を有し、像の広がり収差の影響で説明できることを確認した。今後はこの光学系を用いて、SPICA 検出器の実験を行っていく。

## Reference

森大輔, 2012, 名古屋大学修士論文