

## 「あかり」衛星搭載遠赤外線観測装置

芝井 広・川田 光伸

### Far-Infrared Surveyor (FIS) Onboard the Infrared Astronomical Satellite, AKARI

Hiroshi SHIBAI and Mitsunobu KAWADA

The Far-infrared surveyor (FIS) is a focal plane instrument of the "AKARI," the first Japanese infrared astronomical satellite. FIS is designed primarily for all-sky survey at wavelength regions of 50-200 microns. In order to achieve high sensitivity enough to detect faint astronomical far-infrared sources, the instrument is required to be operable at 2 K. The two-types of far-infrared array sensors were successfully developed for FIS. In addition to the all-sky survey with photometric bands, FIS has spectroscopic capability incorporating a Fourier spectrometer with the spectral resolution of  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ . AKARI was successfully launched on February 22, 2006 from Uchinoura Space Center by an M-V rocket, and the FIS instrument is being operated for far-infrared astronomical observation in space. The observed data are being analyzed by an international team as collaboration with European countries and South Korea. In the present paper, we mainly describe the optics of FIS.

**Key words:** infrared instrumentation, infrared astronomy, far-infrared sensor, satellite, Fourier interferometer

可視光から始まって電波、X線、赤外線と電磁波全域、さらにはニュートリノ、重力波とその研究手段を拡大し続けている観測天文学・天体物理学にあって、赤外線観測の占める比重はますます高まってきている。赤外線のうちでも近赤外線と中間赤外線の一部は地上から観測可能であり、国立天文台の「すばる」望遠鏡<sup>1)</sup>が威力を発揮している。しかしながら、地上からは全く観測できない遠赤外線や、地上からの観測では感度が高くない中間赤外線では、スペース望遠鏡が必要である。このため、日本初の赤外線天文観測衛星「あかり」が、2006年2月22日に内之浦宇宙センターからM-Vロケットによって打ち上げられた\*1。「あかり」には2種類の観測装置が搭載されているが、そのひとつが、遠赤外線サーベイ装置 (FIS) である。FISは波長帯50~200  $\mu\text{m}$ での全天サーベイを主目的として設計された。

1983年に、米英蘭が共同で世界初の赤外線天文衛星

IRAS<sup>2)</sup>を打ち上げ、中間赤外線、遠赤外線の全天サーベイに成功したが、それ以降、このサーベイを超えるサーベイ観測は実現されていない。そこで、遠赤外線観測装置FISを開発、搭載し、IRASより高感度、高解像度、多バンドで、新しい全天サーベイを行うことが目的である。ちなみに、FISの開発には、名古屋大学、宇宙航空研究開発機構、東京大学、情報通信研究開発機構、自然科学研究機構など、多くの研究機関の多くの研究者が参加しており、観測データ処理・解析にはヨーロッパと韓国を含む国際共同研究チームが当たっている。

本稿では、FISの光学系を中心に記述する。FISのために新規開発された2種類の遠赤外線アレイセンサーについては藤原<sup>3)</sup>、土井<sup>4)</sup>、極低温プリアンプについては平尾<sup>5)</sup>、フーリエ分光器については高橋<sup>6)</sup>、FIS全体の設計については川田<sup>7)</sup>、遠赤外アレイセンサーの性能については金田<sup>8)</sup>、松浦<sup>9)</sup>、白旗<sup>10)</sup>らの論文を参照のこと。また、NASA

名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 (〒464-8602 名古屋市千種区不老町) E-mail: shibai@nagoya-u.jp

\*1 <http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Outreach/index.html>

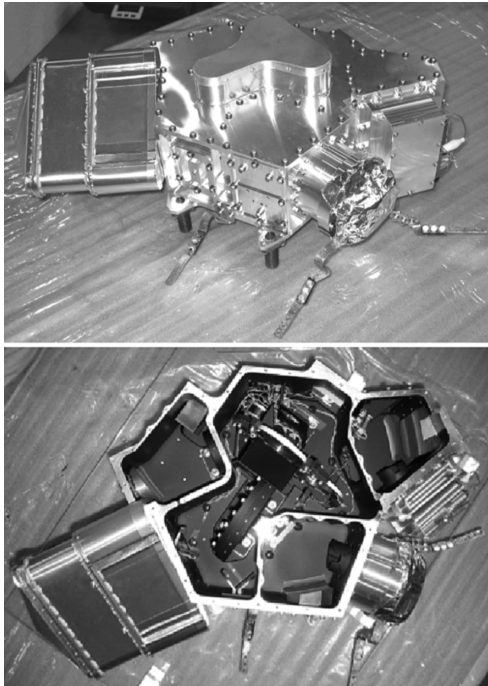


図1 FISの概観写真。(上)全体図。銅製ストラップはセンサーを極低温冷却するためのもの。(下)蓋を開けたところ。

が2003年に打ち上げたスピッツァー宇宙望遠鏡<sup>11)</sup>は、同じ宇宙赤外線観測を目的としているが、全天サーベイを目的としたものではなく「あかり」とは相補的な役割を担っている。

## 1. FISの目的

1983年のIRASによる赤外線全天サーベイにより、エネルギーの大半を遠赤外線で放射する、「赤外線銀河」が宇宙に多数存在することが明らかになった<sup>12)</sup>。その後の研究により、この赤外線銀河は、われわれの銀河系より数百倍から数千倍も活発に、大規模な星生成を起こしており、宇宙の中で銀河が形成され成長していく過程をあらわすと考えられている。このことは、赤外線銀河の大半が、複数の銀河の衝突・合体による複雑な形状をもっていることでも支持される。すなわち、銀河どうしの衝突・合体が、大規模な星生成の引き金として働くからである。宇宙の初期においては、この大規模星生成がもっと活発に起こっていたはずであり、赤外線銀河の全天サーベイが、この宇宙全体の現象を研究するためには、最重要の観測データとなることが期待される。これが、「あかり」に遠赤外線観測装置FISを搭載して全天サーベイを行う主目的である。

## 2. FISの光学系設計概要

FISの概観写真を図1、主要性能を表1に示す。FISは

表1 FISの性能。

バンド名	N60	WIDE-S	WIDE-L	N160
観測波長 ( $\mu\text{m}$ )	50~70	60~110	110~180	140~180
検出素子	Ge:Ga		圧縮型 Ge:Ga	
ピクセル数	20×2	20×3	15×3	15×2
ピクセルサイズ (秒角)	26.79		44.20	
ピクセルピッチ (秒角)	29.47		49.11	
読み出し回路	Capacitive Trans-Impedance Amplifier (CTIA)			
サンプリング周期 (Hz)	25.28		16.86	

全体を極低温で動作させる必要があること、ロケット打ち上げ時の機械的振動などに耐えなければならないこと、何よりも軽量でなければならないことなど、厳しい条件が求められる。これらいずれの条件も満たす設計を得ることができた。ちなみに、重量は5.3 kgにおさまっている。また、外部からの迷光を防ぐために、内部光学系は厳重なシールドによって覆われている。

光学系を概念を図2に示す。FISは2種類の装置、すなわちサーベイ用測光装置と分光装置を一体として実現したものである。この2つの機能は、フィルターを切り替えることで選択される。「あかり」望遠鏡の焦点はFISの入射窓の位置にあり、ここに入射・結像した遠赤外線は軸外放物面鏡によって一旦コリメートされる。主鏡の像ができる位置にはマスク (Lyot Stop) がおかれ、主鏡開口のサイズでマスクされる。

ここでまず、測光モードについて説明する。この場合、遠赤外線ビームは最初にフィルターホイール上の穴を通して、平面鏡で折り返されたあと、再度フィルターホイール上のフィルターに達する。このフィルターはダイクロイック (二色性) フィルターであり、 $110\ \mu\text{m}$ 以下の短波長を反射、 $110\ \mu\text{m}$ 以上の長波長を透過する。それぞれのビームは軸外放物面鏡で集光され、平面鏡で折り返された後にアレイセンサーに達する。

もうひとつの分光モードにおいては、コリメートされた遠赤外線ビームは最初、フィルターホイール上におかれた偏光子に入射する。この偏光子は紙面に平行な偏光面をもつ。偏光子を透過した成分は直後の吸収面ですべて吸収される。一方、反射した偏光成分はMartin-Puplett型干渉計に導かれる。これは、3枚の偏光子と固定ルーフトップ鏡、移動ルーフトップ鏡を組み合わせたものであり、偏光子として広い帯域のものをいれれば高い効率のフーリエ分光器が実現できるものである。原理の詳細は省略する。移動ルーフトップ鏡は、光路差ゼロ位置に対して最大光路差2.76 cmが得られる。干渉計の出力ビームは最後の偏光子

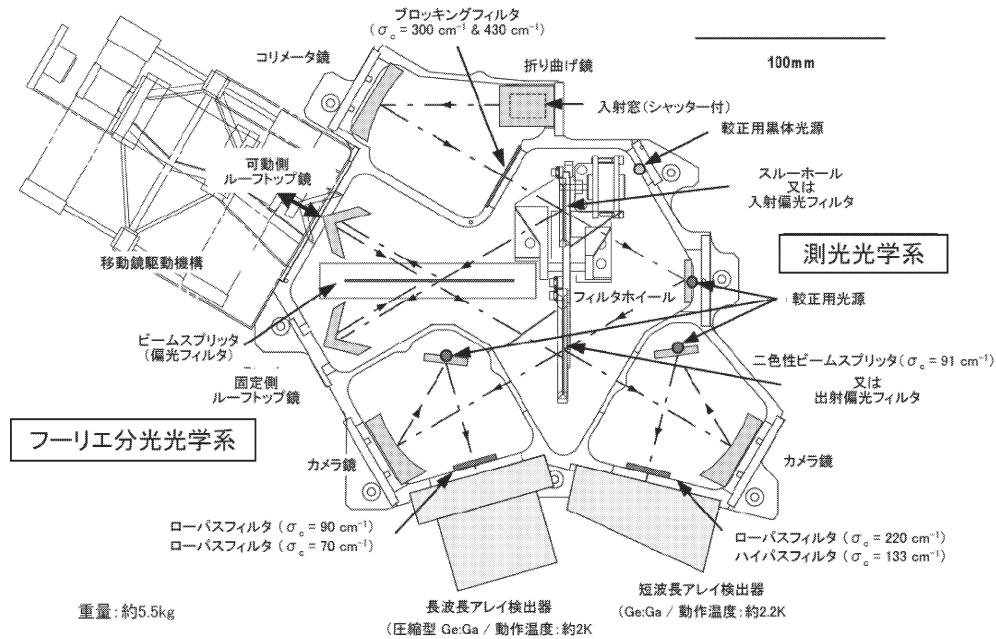


図2 FISの全体図.

により直交した2成分に分割され、それぞれSWアレイとLWアレイに導かれる。偏光子は両方のアレイに全帯域のビームを割り振るため、効率的には半分のロスをしている。

このように、測光と分光の2つの機能を、1つのホイールの回転によるフィルターの選択のみで切り替えることが、コンパクトに実現できている。また、50~180  $\mu\text{m}$  全域で有効な屈折系は素材とコーティングの点で不可能であり、反射系の光学系を採用した。反射鏡はすべてアルミ合金の機械加工によるものであり、表面は金コートされている。分光器のルーフトップ鏡だけは、超軽量が求められたため、ベリリウム合金に金コートが施されたものである。

### 3. 光学系の精度

前章で述べた光学系について、結像精度、像面の湾曲、歪みなどについて光学シミュレーションを行った。結果を図3に示す。この計算では、FIS光学系だけでなく、望遠鏡の結像精度も評価に含められている。また、以下で示す結果は、すべて「測光モード」のときのものである。

短波長 (SW)、長波長 (LW) それぞれの光学系について、スポットダイアグラムと像面の歪みのシミュレーション結果が示されている。スポットダイアグラムの結果から、幾何光学的結像精度はアレイのピクセルサイズ (SW: 0.5 mm, LW: 0.9 mm) より十分小さいこと、回折限界 (SW: 0.55 mm, LW: 1.0 mm) と比較しても小さ

く、光学系として十分な精度が達成できる設計であることが確認された。ちなみに、分光モードの場合についても同様のシミュレーションを行い、十分な精度が達成されることが確認された。

### 4. フィルター・偏光子

FISで用いられたフィルターと偏光子を表2に示す。また、フィルターシステムの構成、総合性能について、図4、図5に示す。これらに対しては、高い効率・透過率が要求されることはもちろんであるが、対象波長以外の光の遮断性 (中間~遠赤外線領域で  $10^{-1}$ 、10  $\mu\text{m}$  付近で  $10^{-5}$ 、可視光領域で  $10^{-9}$  以上) も必要となる。さらに、真空・極低温下での使用、衛星打ち上げ時の振動に耐える、斜入射特性がよい、散乱を起こさないなどの性能も考慮して、金属メッシュを多層積層したフィルター、金属ワイヤメッシュの偏光子を用いた (QMC Instruments 社製)。その結果、総合効率は、3つのバンドについてほぼ50%を達成することができた。残り1つのバンドについても30%を達成した。

また、フィルターホイール駆動機構も小型軽量、極低温での安定した動作が必要であり、極低温で動作するステッピングモーター (住友重機械工業社製) を用いた。写真を図6に示す。

### 5. 移動ミラー駆動機構

分光器の移動ミラー駆動機構には厳しい条件が課され

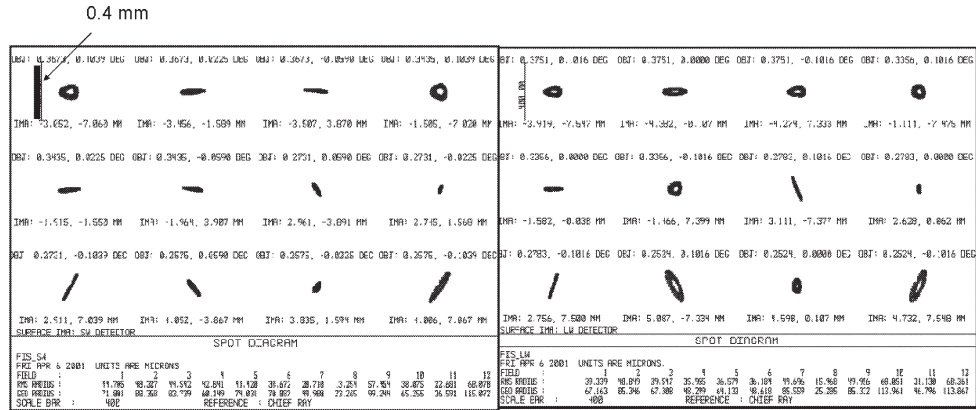


図3 測光モードにおける光学系のシミュレーション結果。(上) スポットダイアグラム。左上端に示された縦棒の長さがセンサー面上で0.4 mmに対応。(下) センサー面上での像の歪み。ほぼ長方形のものが天球に投影した元の像、曲がった長方形がセンサー面に結像された像。(左) 短波長 (SW)、(右) 長波長 (LW)。

表2 フィルター・偏光子の性能。

名称	種類	サブストレート	用途	パスバンド	入射角
600BKF	マルチメッシュ金属フィルター	無	短波長光のブロッキングフィルター	600 cm <sup>-1</sup> LowPass	90°
300BKF	マルチメッシュ金属フィルター	無	短波長光のブロッキングフィルター	300 cm <sup>-1</sup> LowPass	90°
DBS	マルチメッシュ金属フィルター	無	二色ビームスプリッター	90 cm <sup>-1</sup> LowPass	30°
90LPF	マルチメッシュ金属フィルター	無	Wide-L用フィルター	90 cm <sup>-1</sup> LowPass	90°
60LPF	マルチメッシュ金属フィルター	ポリエステル	N170用フィルター	60 cm <sup>-1</sup> LowPass	90°
220LPF	マルチメッシュ金属フィルター	無	Wide-S用フィルター	220 cm <sup>-1</sup> LowPass	90°
133HPF	KRS-5に反射防止コート	ポリエステル	N60用フィルター	133 cm <sup>-1</sup> HighPass	90°
Main BS	金属グリッドフィルター	ポリエステル	MPIF用ビームスプリッター		30°
InputPol	金属グリッドフィルター	ポリエステル	MPIF用入力偏光器		60°
OutputPol	金属グリッドフィルター	ポリエステル	MPIF用出力偏光器		30°

た。たとえば、軽量化(約1 kg)、低消費電力化(約2 mW)、ロケット打ち上げ時の振動への耐性、振動を発生しない、磁場の漏れだしが無い、極低温・真空での動作などである。これらの条件を満たすために、新しい方式を採用・開発した。

極低温での動作を考えた場合、通常のモーターは使用できないうえ、ベアリングなど機械的に摩擦の生じる機構は

避ける必要がある。このため、ボイスコイルと同様に、永久磁石の中を通るコイルに電流を流すことによって生じるローレンツ力を駆動力とし、平行4枚の三叉形状のリン青銅製板パネで駆動軸を支持する方式を採用した。図7、図8に、可動鏡駆動機構の構造と動作原理、プロトモデルの写真を示す。

フーリエ分光器の移動鏡として用いるためには、移動中



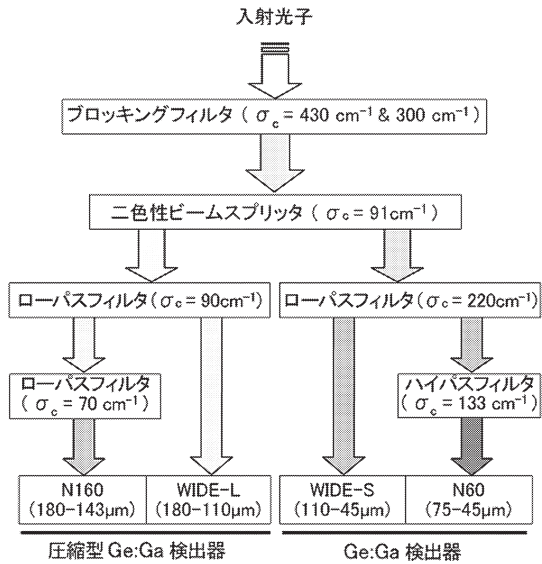


図4 フィルターシステム。

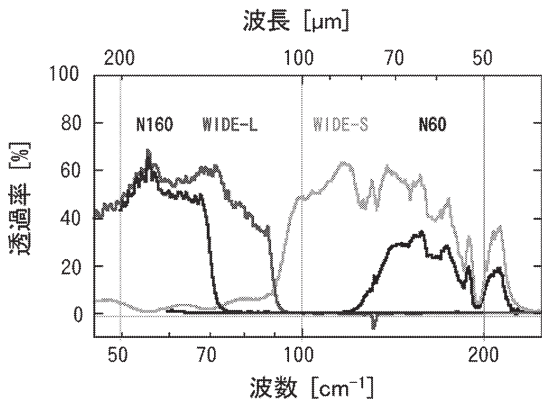


図5 各測光バンドの総合透過特性。

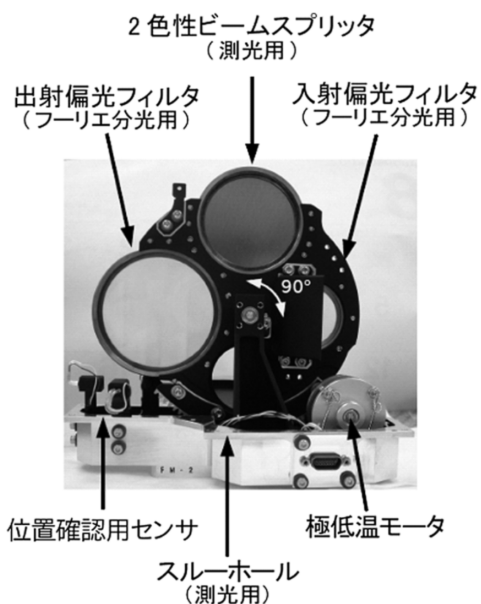


図6 フィルターホイール。矢印方向の90度回転によって、測光モードと分光モードを切り替える。

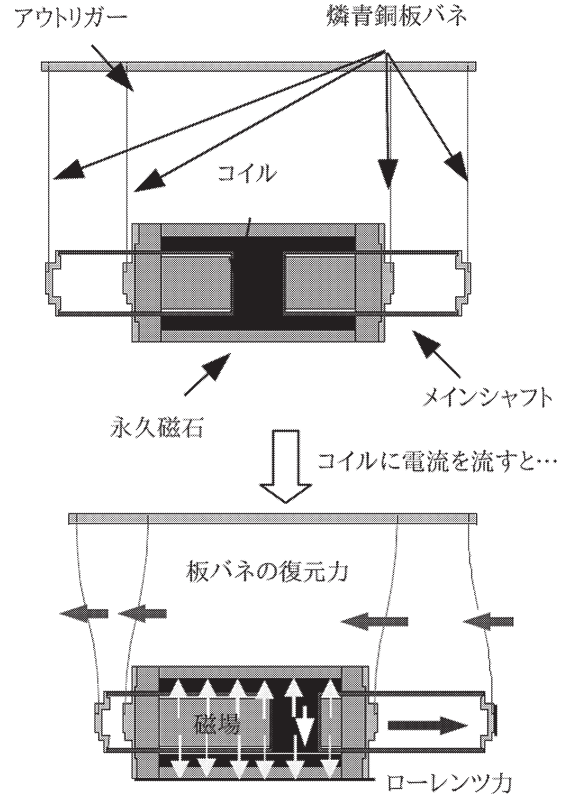


図7 分光器用駆動機構の原理。ローレンツ力を利用して分光器移動鏡を平行移動。

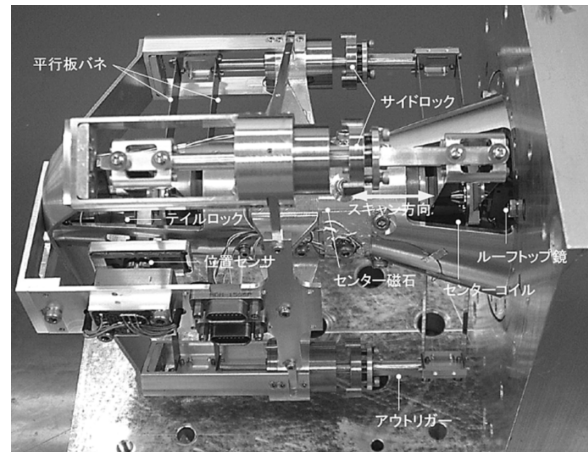


図8 分光器移動鏡駆動機構。打ち上げ時に移動鏡を固定するためのロック機構が備えられている。

のミラー位置を正確に知る必要がある。そのため、ハイデンハイン社製ガラス光学スケールと、極低温で動作する光源とセンサーを組み合わせたセンサーヘッドを開発し、位置分解能  $1 \mu\text{m}$  (光路差で  $2 \mu\text{m}$ ) を達成した。遠赤外線線のフーリエ分光用としては十分な精度である。

移動ミラーの制御はコイルに流す電流によって行うが、制御システムの簡略化のため、位置センサーによる閉ル

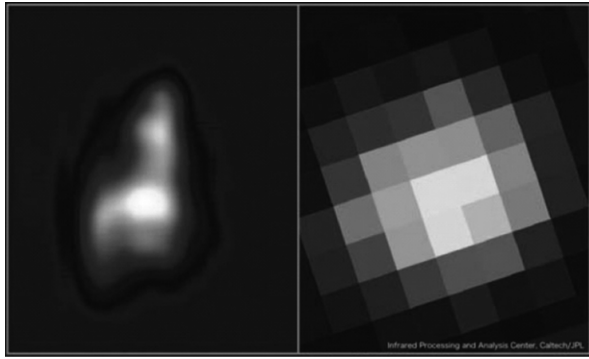


図9 打ち上げ後の初期試験観測時に撮影された、反射星雲 IC4954 の遠赤外線 (WIDE-S バンド) 画像 (左). 比較のために、IRAS 衛星による画像を示す (右). (JAXA 提供)

ブ制御は行わず、一定パターンによる駆動を行っている。この駆動パターンの生成には、まず電流と位置の関係を計測し、そこから一定速度で駆動するための電流パターンを求める方法をとっている。駆動特性は安定しており、駆動速度のゆらぎは5%以下、長期安定性は2年間5000往復以上の実績がある。

移動ミラー駆動機構の可動部は、低消費電力化のために変形しやすい構造になっている。ロケットによる打ち上げ時の機械的振動から精密な移動機構を保護するために、固定用のロック機構も備えた。これにより、打ち上げ直前に電磁石により可動部分を固定し、打ち上げ後に解除することとした。

## 6. 遠赤外線アレイセンサー

FIS の最重要の部品は遠赤外線センサーである。FIS のためには、新規に短波長遠赤外線アレイ<sup>3)</sup> (以下 SW アレイ) と長波長遠赤外線アレイ<sup>4)</sup> (以下 LW アレイ) が開発された。それぞれ波長 50~110  $\mu\text{m}$ 、110~180  $\mu\text{m}$  をカバーする。SW アレイは、20×3 ピクセルのセンサーがモノリシックに形成されたものを、極低温プリアンプとバンピングしたものを2組用いている。LW アレイは、0.5 mm の Ge:Ga 結晶を圧縮して波長感度を長波長側にシフトさせるもので、この圧縮機構も含めて 15×5 ピクセルのアレイを用いる。これらのアレイについては、参考文献に詳しく記述されている。

## 7. 軌道上での性能

本年2月の打ち上げ後、FIS は宇宙においてほぼ所期の

性能を実現できている。図9に、試験観測によって得られた反射星雲 IC4954 の遠赤外線画像を示す。右が従来の遠赤外線画像、左が「あかり」FIS が作成したものである。「あかり」による解像度の改善は顕著であり、宇宙の研究における今後の成果が期待される。

本文の執筆にあたっては、引用論文のほかに、中川貴雄 (ISAS/JAXA)、松尾宏 (国立天文台)、都竹泰、宇津野博士、村上紀子、小沢啓太 (名古屋大学)、Jongjoo Sohn (ソウル大学) 各氏の貢献が大きかったことを記す。

## 文 献

- 1) N. Kaifu, T. Usuda, S. Hayashi, *et al.*: "The first light of the Subaru telescope: A new infrared image of the Orion Nebula," *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **52** (2000) 1-8.
- 2) G. Nuegebauer, H. J. Habing, R. van Duinen, *et al.*: "The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission," *Astrophys. J. (Lett.)*, **278** (1984) L1-L6.
- 3) M. Fujiwara, T. Hirao, M. Kawada, *et al.*: "Development of a gallium-doped germanium far-infrared photoconductor direct hybrid two-dimensional array," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 2166-2173.
- 4) Y. Doi, S. Hirooka, A. Sato, *et al.*: "Large-format and compact stressed Ge:Ga array for the ASTRO-F (IRIS) mission," *Adv. Space Res.*, **30** (2002) 2099-2104.
- 5) T. Hirao, Y. Hibi, M. Kawada, *et al.*: "Cryogenic readout electronics with silicon P-MOSFETs for the infrared astronomical satellite, ASTRO-F," *Adv. Space Res.*, **30** (2002) 2117-2122.
- 6) H. Takahashi, M. Kawada, N. Murakami, *et al.*: "FTS: Fourier transform spectrometer onboard ASTRO-F/FIS," *Proc. SPIE*, **4850** (2003) 191-201.
- 7) M. Kawada, H. Shibai, H. Kaneda, *et al.*: "Far-Infrared Surveyor: Design, operation, and performance," *Proc. SPIE*, **5487** (2004) 359-368.
- 8) H. Kaneda, Y. Okamura, T. Nakagawa, *et al.*: "Transient response of stressed Ge:Ga detector for ASTRO-F," *Adv. Space Res.*, **30** (2002) 2105-2110.
- 9) S. Matsuura, Y. Isozaki, M. Shirahata, *et al.*: "Monolithic Ge:Ga two-dimensional array detector for FIS instrument on ASTRO-F," *Proc. SPIE*, **4850** (2003) 902-909.
- 10) M. Shirahata, S. Matsuura, S. Makiuti, *et al.*: "Preflight performance measurements of a monolithic Ge:Ga array detector for the Far-Infrared Surveyor onboard ASTRO-F," *Proc. SPIE*, **5487** (2004) 369-380.
- 11) M. W. Werner, T. L. Roellig, F. J. Low, *et al.*: "The Spitzer Space Telescope Mission," *Astrophys. J. Suppl.*, **154** (2004) 1-9.
- 12) B. T. Soifer, G. Neugebauer, G. Helou, *et al.*: "The remarkable infrared galaxy ARP 220=IC 4553," *Astrophys. J. (Lett.)*, **283** (1985) L1-L4.

(2006年6月30日受理)