

# 地球観測用小型赤外カメラ (CIRC)の開発

○加藤恵理, 片山晴善, 内藤聖貴, 原田昌朋, 中村良子,  
佐藤亮太, 中右浩二 (宇宙航空研究開発機構)

Development of the Compact Infrared Camera (CIRC)

Eri Kato, Haruyoshi Katayama, Masataka Naitoh, Masatomo Harada, Ryoko Nakamura,  
Ryota Sato, and Koji Nakau (Japan Aerospace Exploration Agency)

Key Words: Remote Sensing, Uncooled Infrared Detector, Wildfire Detection

## Abstract

We have developed the compact infrared camera (CIRC) to especially detect wildfires, which are major and chronic disasters affecting many countries in the Asia-Pacific region. The CIRC is an infrared camera equipped with an uncooled infrared array detector (microbolometer), and also achieves small size, light weight and low electrical power by employing athermal optics and shutter-less system. In addition, another purpose of CIRC is the low-cost and early development of a thermal infrared imager. The CIRC is designed based on a commercial infrared camera and is employing commercial-off-the-shelf (COTS) parts to reduce cost and time for development. In order to demonstrate the potential of microbolometers to thermal infrared imaging from space, the CIRC will be carried as a technology demonstration payload of ALOS-2 and JEM/CALET, which will be launched in 2013. We will conduct experiments for calibration with the CIRC PFM in January 2012. In this paper, we show the current status of the CIRC development, and the calibration results of the CIRC ground test model which was made to establish a prelaunch calibration method.

## 1. 概要

地球観測用小型赤外カメラ (CIRC: Compact Infrared Camera)では, 非冷却赤外検出器(ボロメータ)を採用している. ボロメータは民生品や軍事用途で一般的に広く使用されているものである. ボロメータの利点は冷却機構を必要としないことであり, そのためセンサの小型軽量, 低消費電力を達成することができる. 感度については, 冷却を必要とするHgCdTe赤外検出器と比べて低いが, 冷却機構を必要とせず小型軽量であることは, リソースの限られた小型衛星や副ミッションに適している.

我々はボロメータを利用した宇宙用熱赤外イメージャの実証センサとしてCIRCを開発している<sup>1)</sup>. CIRCの主要目的は, 森林火災の検知である. 森林火災は東南アジア諸国やシベリアなどで深刻な問題となっており, 早期検知が重要な課題となっている. 早期検知には, 観測頻度を向上させることが有効な手段であり, 我々はCIRCの小型軽量・低消費電力のメリットを活かし, 将来的に複数の衛星にCIRCを搭載することで高頻度の観測を狙っている. さらに, CIRCの他のミッションとして火山やヒートアイランド現象についても観測を目指している. なお, CIRCは陸

域観測技術衛星2号(ALOS-2)と, 国際宇宙ステーション(ISS)のきぼう船外実験プラットフォーム(JEM-EF)設置されるカロリメータ型宇宙電子線望遠鏡(CALET)に搭載され, 2013年に打上げ予定である.

## 2. ALOS-2とCALET

### 2.1 ALOS-2

ALOS-2<sup>2)</sup>は, 陸域観測技術衛星(ALOS)の後継機である. ALOSは2006年の打ち上げ以降, 地図作成・地域観測・災害状況把握・資源探査の幅広い分野で利用されている. JAXAでは, ALOSの広域観測と高空間分解能観測の技術を発展させ, 社会的ニーズに答えるために研究開発を進めている. これらの社会的ニーズは, 1) 広域かつ詳細な被災地の災害状況把握, 2) 国土と基幹施設の情報継続的な更新, 3) 農作地の効果的な把握, 4) CO<sub>2</sub>吸収量を特定する熱帯雨林の地球規模の把握である. ALOS-2は2013年打上げ予定である.

ALOS-2は, ALOSのレーダセンサ(PALSAR)を高性能化したLバンド合成開口レーダ(SAR)を搭載している. Table 1はALOS-2の主要諸元を示す. CIRCは図1の通り設置される. CIRCはSARがオフナデ

ニア角右 30 度を向いている間にターゲット領域を撮像する。

表 1 ALOS-2 の主要諸元

パラメータ	仕様
サイズ	9.9 m × 16.5 m × 3.4 m
質量	< 2000 kg
バス電力	> 5200 W
通信量	< 800 Mbps
軌道	628 km

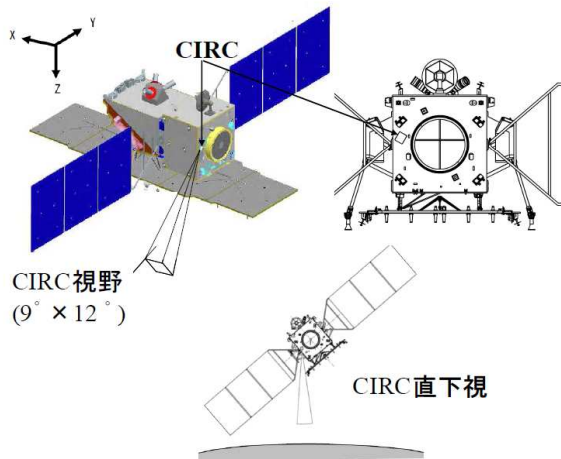


図 1 ALOS-2 の概略図と CIRC の設置場所

## 2.2 CALET

CALET<sup>3)</sup> は ISS の国際的なプログラムである。ISS は、暗黒物質の痕跡や高エネルギー宇宙線の直接観測から、銀河の局所的領域における高エネルギー粒子の加速機構を解明することを目指している。CALET では、高エネルギー電子や $\gamma$ 線に加えて、陽子、原子核成分や太陽変動を受けた電子の観測もあわせて実施する。これらの多岐にわたる観測を行うことにより、未解決な重要課題である(1) 宇宙線源の同定、(2) 宇宙線源の加速機構及び伝播機構の解明、(3) 各種の $\gamma$ 線放射源における生成過程の研究、(4) 暗黒物質の探索、(5) 太陽磁気圏に関する研究を実施する。CALET は 2013 年の打ち上げを予定している。

CALET の主要諸元を表 2 に示す。CIRC は CALET の底面に取り付けられる(図 2)。

表 2 CALET の主要諸元

パラメータ	仕様
大きさ	9.9 m × 16.5 m × 3.4 m
質量	< 2000 kg
バス電力	> 5200 W
通信量	< 800 Mbps
軌道	628 km

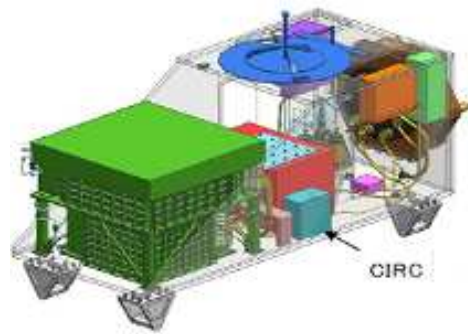


図 2 CALET の概念図と CIRC の設置場所

## 3. CIRC ミッション

CIRC の主要ミッションは、ボロメータを使用した森林火災検出の実証を行うことである。森林火災は、東南アジア諸国やシベリアなどで影響を与えている深刻な災害の一つであり(図 3 参照)、地球温暖化や気候変動に悪影響を及ぼすと考えられている。世界的にも東南アジア地域においてリアルタイムで災害情報を分かち合うセンチネルアジア計画(Sentinel Asia project)があり、森林火災検知は重要な活動として採択されている。また火山や都市部のヒートアイランド現象も CIRC のミッションである。熱赤外イメージャを用いたこれらの観測は、火山のモニタリングや、またヒートアイランド問題を解決するための観測において有効な手段である。

CIRC の特徴として、アサーマル光学系とシャッターレス方式がある。CIRC の光学系はゲルマニウムとカルコゲナイドガラスの 2 種類の赤外硝材を組み合わせたアサーマルな設計となっている。このため、ヒータ等による光学系の温度制御を必要とせず、小型で省電力を実現している。また、シャッターを使用しないことで駆動系をなくし、さらなる小型軽量化を実現している。もう一つの大きな特徴として、CIRC は民生品赤外カメラをベースとした設計であることが挙げられる。民生品を利用することで、短期間・低コストの開発を目指している。

以上のような CIRC の小型軽量・低消費電力の特徴を活かして様々な衛星に搭載し、森林火災の観測頻度を増やすことを目標としている。CIRC を ALOS-2 と ISS/CALET に搭載したとき、平均観測間隔はロシ

ア, 東京, ブルネイにおいてそれぞれ 39 (h), 97(h), 196 (h)となる(図 4 参照). 将来的にはさらに複数の衛星で観測することで, 観測頻度の向上を目指している.



図 3 森林火災の一例

カリフォルニア森林火災の衛星画像(ASTER)

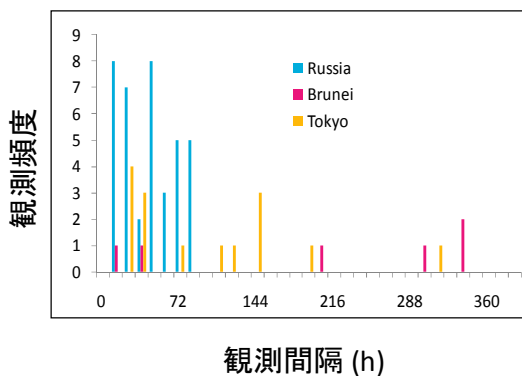


図 4 観測間隔

#### 4. CIRC の主要諸元

CIRC の主要諸元を表 3 に示す. CIRC の主要諸元は森林火災検知の要求を満たすように設定されている. 検出器は, 地球観測用として最大フォーマット(640×480)の非冷却検出器である. 森林火災検知に重要なパラメータである空間分解能については, それぞれ 600 km の高度(ALOS-2)において 200 m, 400 km の高度(CALET)において 130 m である. また冷却機構を用いないことで, 小型(110 mm×180 mm×230 mm)・低消費電力(< 20 W)を実現している.

表 3 CIRC の主要諸元

パラメータ	仕様
大きさ	110 mm×180 mm×230 mm
質量	3 kg
検出器	非冷却赤外検出器
波長	8–12 μm
ピクセル数	640×480
空間分解能	< 200 m @600 km (ALOS-2) < 130 m @400 km (CALET) (< 0.33 mrad)
視野	12°×9°
露光時間	33 ms
ダイナミックレンジ	180 K–400 K
NEΔT	0.2 K @300 K
消費電力	< 20 W

#### 5. CIRC 地上検証用モデルの校正

図 5 は CIRC 地上検証用モデルの写真である. 我々は JAXA 筑波宇宙センターにおいて, CIRC 地上検証用モデルの真空中校正試験を進めている. 本章では, センサ系の結像性能を示す変調伝達関数(MTF)について報告する.



図 5 CIRC 地上検証用モデル

##### 5.1 セットアップ

試験のセットアップの概略図とコンフィギュレーションを図 6, 7 に示す.

CIRC は実験室の真空チャンバ内に設置され, かつ, ヒータやクーラーにより温度コントロールされているシュラウドによって囲われている. 黒体(CI Systems SR800)から放射された赤外線は, 反射コリメータシステム(CI Systems ILET-5-1.1)により平行光となり, ゲルマニウム(Ge)窓を通して真空チャンバ内の CIRC に入射する. コリメータに取り付けられた 4 パターゲットの取得画像から, CIRC の MTF を測定

した(図 8). スリット間隔の異なる 4 種の 4 バーターゲットを用意し, 1, 1/2, 1/4, 1/6 ナイキスト周波数における MTF を求めた. また, シュラウド直下の回転ステージにより, 光軸調整ならびに入射角の調整を行った.

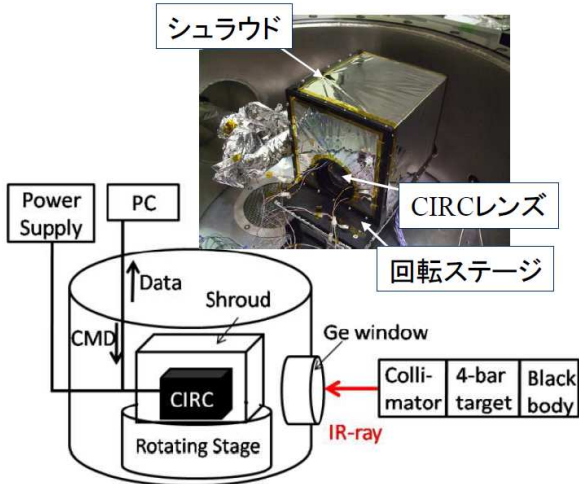


図 6 試験のセットアップの概略図

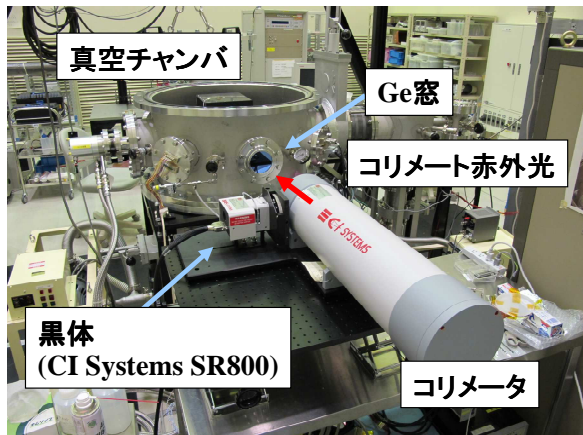


図 7 試験コンフィグレーション

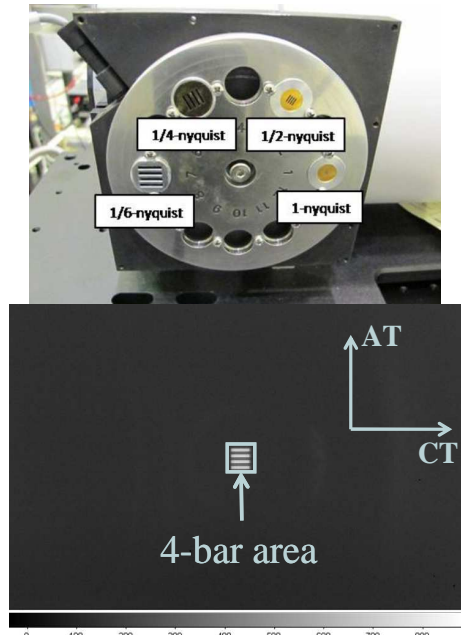


図 8 (上図)コリメータシステムに設置されている 4 バーターゲット. それぞれ 1/6, 1/4, 1/2, 1 ナイキスト周波数に対応している. (下図)CIRC で撮った 4 bar ターゲットのイメージ.

## 5.2 測定データ

我々は真空中において MTF を測定した. 図 9 に示すように, 測定した画角位置は中心, クロストラック(CT)方向の $\pm 5 \text{ deg}$ , アロングトラック(AT)方向の $\pm 3.5 \text{ deg}$ である. また, それぞれの画角位置において 4 バーターゲットを 90 度回転させ, スリット方向が CT/AT 方向それぞれの MTF を測定した. 測定環境は表 4 に示している. なおシュラウドの温度は, CIRC の温度許容範囲に合わせて,  $-10$  から  $50^\circ\text{C}$ まで変化させた.

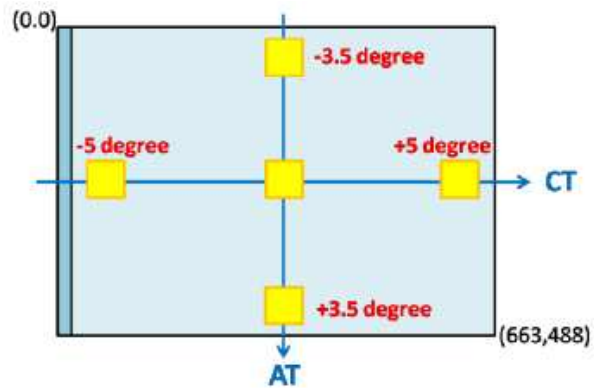


図 9 CIRC 取得画像における MTF 測定の画角位置



表 4 測定環境

画角 \ °C	-10	0	22	40	50
0 deg	○	○	○	○	○
±5 deg	○	○	○	○	○
±3.5 deg	○	—	○	—	○

### 5.3 MTF 測定結果

5つの画素位置においてCT/AT方向のMTFを測定した。図10は画角中心のMTF測定結果を示す。色は温度の違いを表す。図10上下の図は、それぞれCT, AT方向の結果である。実線と破線は異なるコンフィグレーション(CIRCをシュラウド底面, 側面に設置)のMTFを示す。CT方向のMTFは、異なる温度やコンフィグレーションにおいても似た傾向をもち、-5deg低温のMTF以外は誤差の範囲内で等しい。一方、AT方向のMTFは温度や画角位置によって変化する。また低温環境におけるナイキスト周波数のMTFは、CT/AT方向かつすべての画角で、常温や高温のMTFよりも低い。

図11は1ナイキスト周波数のアサーマル光学系の温度特性を示す。色の違いは画角位置の違いを表す。上, 下図は、それぞれCT, AT方向の結果を示す。例外(CT 0deg, AT -5 deg)を除き常温付近にピークがきており、CT/AT方向ともに低温側ほどMTFが悪くなっている。

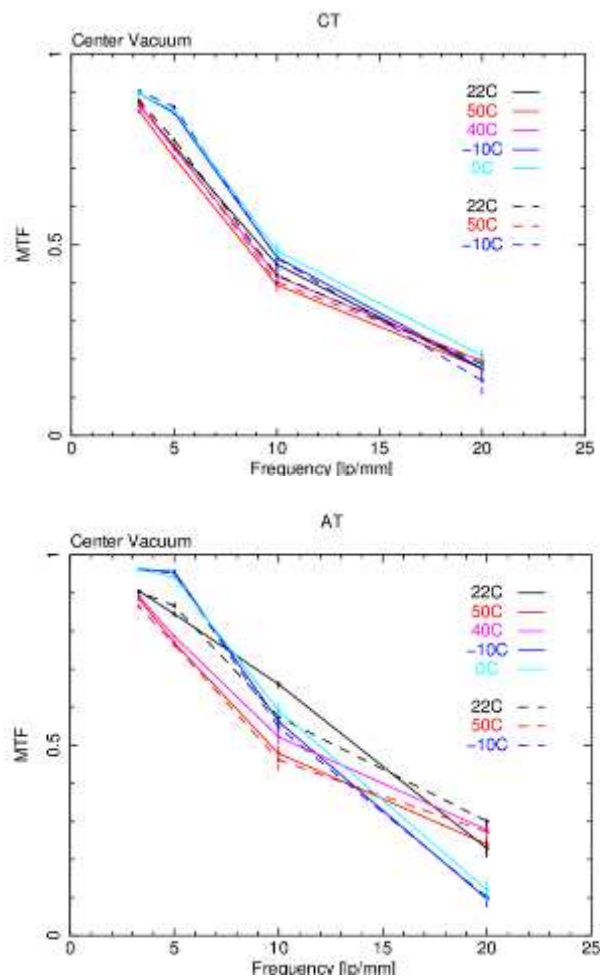


図10 画角中心のMTF測定結果。(上図)CT方向,(下図)AT方向のMTF結果。常温, 低温, 高温環境での測定結果はそれぞれ黒, 青, 赤である。実線と破線は異なるコンフィグレーション(CIRCをシュラウド底面, 側面に設置)でのMTFを示す。

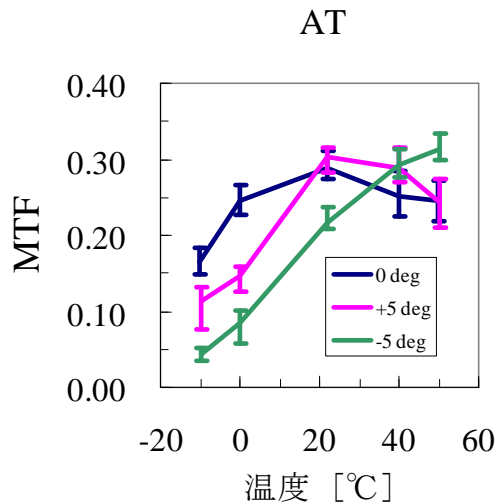
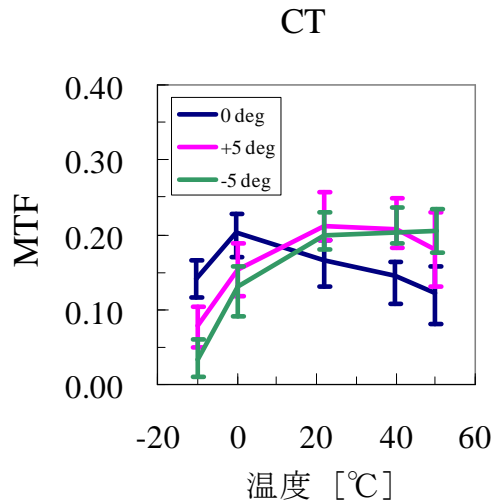


図 11 1 ナイキストのアサーマル特性. CT, AT 方向における異なる画角位置(0, ±5 deg)での MTF 温度特性を示す.

## 6. 議論と結論

我々は CIRC の MTF 特性を測定し, CIRC のアサーマル特性を測定した. 特に低温環境において, 常温時より MTF の低下している. これは, レンズ設計を若干見直すことにより, PFM では改善される見込みである.

また CIRC 地上検証用モデルを用いてシャッタを使用しないラジオメトリック校正も進めている. 現在我々は, CIRC の PFM の製作を進めており, 地上検証用モデルの校正試験結果をもとに, 2012 年 1 月より PFM の真空中校正試験を実施する予定である.

## 参考文献

- 1) H. Katayama, M. Naitoh, M. Suganuma, M. Harada, Y. Okamura, Y. Tange, and K. Nakau,; Development of the Compact Infrared Camera (CIRC) for Wildfire Detection, Proc. SPIE, vol 7458, 2009, pp. 745806-1-745806-8
- 2) S. Suzuki, Y. Osawa, Y. Hatooka, Y. Kankaku, and T. Watanabe,; "Overview of Japan's Advanced Land Observing Satellite-2 Mission", Proc. SPIE, vol 7474, 2009, pp. 7474Q-1-10
- 3) S. Torii, et al,; CALET mission on ISS, Proc. SPIE, vol 7021, 2008, pp. 702114-11