

1X01 CALET 搭載地球観測用小型赤外カメラ(CIRC)の開発

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

中右浩二 (北海道大学)

Development of the Compact Infrared Camera (CIRC) on board CALET
Michito Sakai, Haruyoshi Katayama, Masataka Naitoh, Masatomo Harada,
Ryoko Nakamura, Eri Kato, Ryota Sato (Japan Aerospace Exploration Agency), and
Koji Nakau (Hokkaido University)

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

Abstract

The compact infrared camera (CIRC) is an uncooled infrared array detector (microbolometer) with the main aim of detecting wildfires, which are major and chronic disasters affecting many countries in the Asia-Pacific region. Eliminating the cooling system reduces the size, cost, and electrical power of the sensor. The CIRC also achieves small size and light weight by employing athermal optics and shutter-less system. The CIRC is mounted on the Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) and will be launched in FY2013. Also, the other CIRC is mounted on the CALorimetric Electron Telescope (CALET) of the Japanese Experiment Module (JEM) for the International Space Station (ISS) and will be launched in FY2014.

We have finished the ground calibration test of the CIRC Proto Flight Model (PFM) on board ALOS-2 and CALET. Imaging quality and radiometric quality have been confirmed. We obtained the data for image correction and created the data correction algorithm. In this paper, we show the results of calibration test for the CIRC PFM on board CALET.

1. 概要

マイクロボロメータは民生品や軍用途で一般的に広く使われている赤外センサである。赤外線が入射すると、素子の温度が上昇しその温度変化を電気信号に変換、検知することで赤外線の検出を行う。検出感度は冷却型の赤外センサに比べて劣るが、マイクロボロメータは冷却機構を必要としない分、検出器の小型軽量化、コスト削減、消費電力の低減が可能であり、小型衛星やリソースの限られたシステムへの搭載に適している。

我々は、ボロメータを利用した宇宙用熱赤外イメージャーの実証センサとして CIRC を開発している^{1,2)}。CIRC の主要目的は、東南アジア諸国やシベリアなどで頻発する森林火災の検知である。火災発生時には早期検知、および正確な位置情報把握が望まれる。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、低消費電力を活かし、将来的には複数の衛星に CIRC を搭載することで高頻度な観測を行いたいと考えている。また、火山やヒートアイランド現象も CIRC の観測ターゲットとしている。

CIRC は ALOS-2 衛星³⁾に搭載され、2013 年度に打ち上げ予定である。

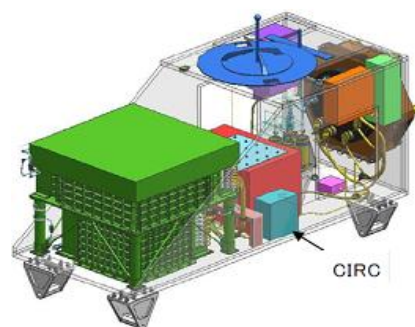


図 1 : CALET 概略図と CIRC の設置場所

また、CIRC は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)に設置されるカロリメータ型宇宙電子線望遠鏡(CALET)⁴⁾にも搭載される予定であり、更なる観測頻度向上が期待されている。CIRC の CALET への搭載位置を図 1 に示す。

2. 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を実証することである。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 1 つであり、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。

CIRCの特徴は、(i)アサーマル光学系、(ii)シャッタレス方式である。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・低コストの開発を実現している。CALET搭載用CIRC PFMを図2に示す。

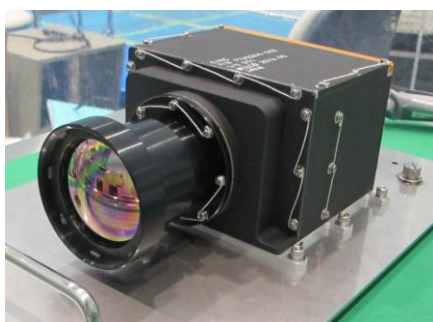


図2：CALET搭載用PFM

3. CIRCの主要緒元

CIRCの観測緒元を表1に示す。CIRC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、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。図3にLANDSAT/ETM、CALET/CIRC、Terra/ASTERの1シーンの観測エリアの比較を示す。

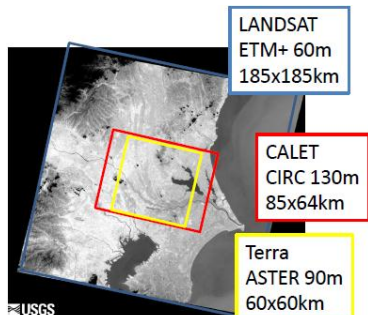


図3：観測エリアの比較。青：LANDSAT/ETM、赤：CALET/CIRC、黄色：Terra/ASTER。

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1：CIRC 観測緒元

パラメータ	仕様
検出器	非冷却赤外検出器
ピクセル数	640×480
波長	8–12 μm
大きさ	110 mm×180 mm×230 mm
質量	3 kg
消費電力	< 20 W
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
NEdT	0.2 K @ 300 K
FPN	0.3 K @ 300 K
温度精度	4K (goal : 2 K @ 300 K)

4. PFMを用いた地上校正試験

打上げに先立ち、PFMを用いた地上校正試験を行った。校正試験の目的は、結像性能・ラジオメトリック性能の確認、軌道上補正用データの取得と補正アルゴリズムの構築である。

5.1 結像性能

結像性能は変調伝達関数(MTF)を用いて評価した。なお、MTFの仕様はどの画角においても0.3以上となっている。

5.1.1 試験セットアップ

図4に試験セットアップの概略図を示す。測定は真空環境下で行い、CIRCをシュラウドで囲みシュラウドの温度を-15度から50度まで変化させることで様々な温度環境でのMTF測定を行った。

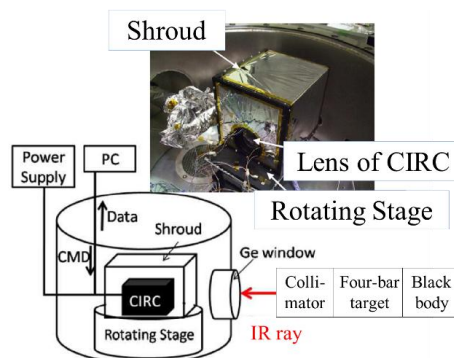


図4：MTF測定セットアップ概略図

黒体から放射された赤外線は図 5 に示す 4 バーターゲットを通り、CIRC で検出される。

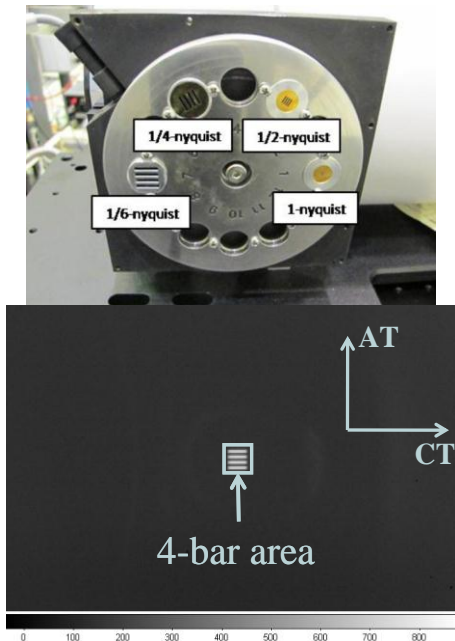


図 5 : (上図)コリメータシステムに設置されている 4 バーターゲット. それぞれ 1/6, 1/4, 1/2, 1 ナイキスト周波数に対応している. (下図)CIRC で撮った 4 bar ターゲットのイメージ

測定は図 6 に示す検出器面上の 9 か所で行った。

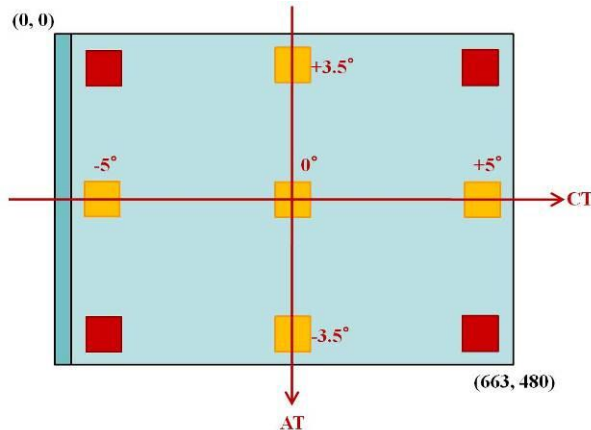


図 6 : CIRC 検出器面上での MTF 計測位置

5.1.2 試験結果

ナイキスト周波数(20 lp/mm)での MTF の計測結果を図 7, 図 8 に示す. CT 方向(4 バーを縦方向に配置)の MTF は温度によらずほぼ一定の値を取っているのに対し, AT 方向(4 バーを横方向に配置)の MTF は低温環境下での MTF が低くなっている. しかしながら, 画像取得の観点では MTF の数値として問題はなく, また CIRC のアサーマル性が確認された.

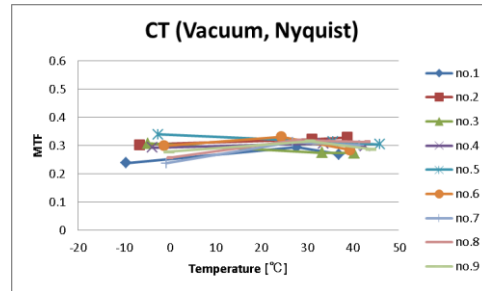
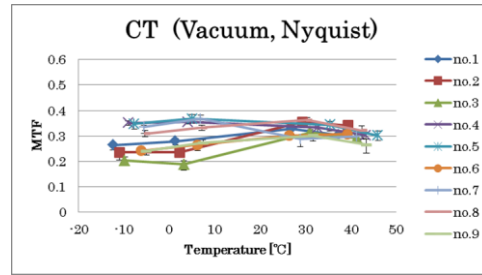


図 7 : CT 方向の MTF 測定結果. 色の違いは測定箇所を表している. (上図)ALOS-2/CIRC. (下図)CALET/CIRC.

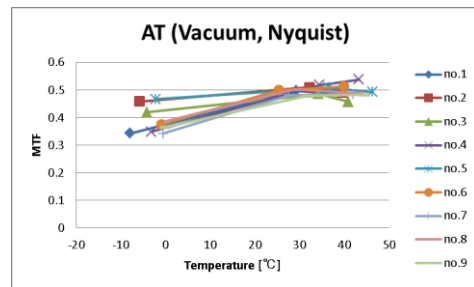
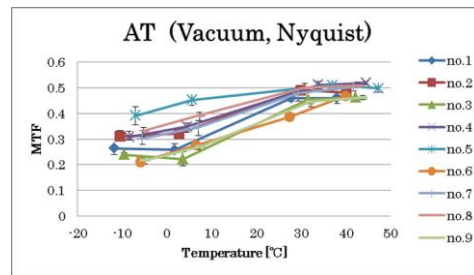


図 8 : AT 方向の MTF 測定結果. 色の違いは測定箇所を表している. (上図)ALOS-2/CIRC. (下図)CALET/CIRC.

5.2 ラジオメトリック性能

等価雑音温度差(NEDT), 固定パターンノイズ(FPN), および校正精度の確認を行った. それぞれの仕様は, NEDT : 0.2K 以下, FPN : 0.3K 以下, 校正精度 : 4K 以下である.

5.2.1 測定セットアップ

図 9 に測定セットアップを示す。測定は真空環境下で行い、CIRC をシュラウドに収納し、検出器前面に平面黒体を設置して測定を行った。黒体温度を-10 度から 50 度、シュラウド温度を-15 度から 50 度まで変化させて、それぞれの温度環境下での黒体画像の取得を行った。

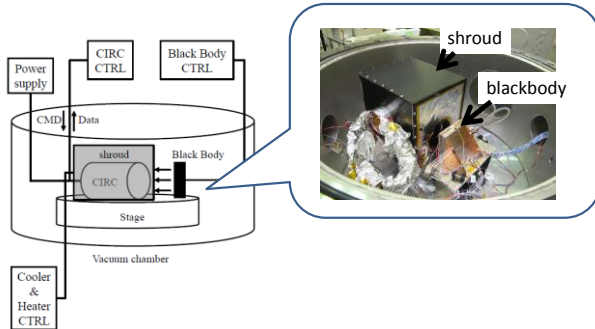


図 9：ラジオメトリック補正用測定セットアップ概略図

5.2.2 ラジオメトリック補正

CIRC はシャッタを持たず暗時画像が取得できないため、迷光成分(ターゲット以外の放射成分)を補正によって取り除く必要がある。我々は迷光成分が CIRC のレンズ温度とパッケージ温度の関数で表せると仮定し、黒体温度、CIRC の温度を変化させた画像データから、補正用データベースの作成および補正アルゴリズムを構築した。補正の手順を図 10 に示す。

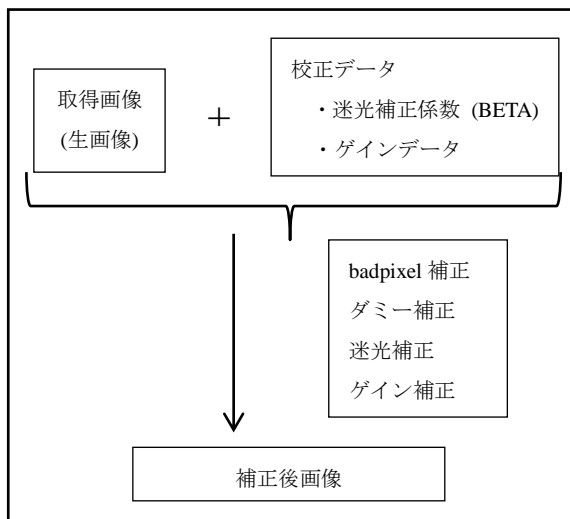


図 10：ラジオメトリック補正手順

取得画像と、校正データから算出した迷光補正係数およびゲインデータを用いて、badpixel 補正、ダミー補正、迷光補正、ゲイン補正を行う。各補正の詳細は下記である。

A) bad pixel 補正

まわりの画素に比べて輝度が高く、もしくは低く出る画素を bad pixel とし、周辺の正常な輝度値の平均を代入することで補正を行う。

B) ダミー補正

図 6 の検出器面左端に示した 19×480 ピクセルの領域は、検出器内部の回路等に起因するノイズ成分をモニタするためのダミーとして出力している。ダミー画素領域を用い、回路起因のノイズを補正する。

C) 迷光補正

校正データを用いて算出した迷光補正係数(BETA)による迷光補正を行う。

D) ゲイン補正

上記 3 つの補正を行った上で、輝度値を放射輝度、および温度に変換するための補正を行う。

5.2.3 試験結果

取得画像を補正した上で、性能評価を行った。

NEdT, FPN については、ダミー補正済みデータを用いて算出した結果を表 2 に示す。NEdT, FPN ともに仕様を満たしていることがわかった。

表 2：NEdT, FPN の結果

	NEdT [K]	FPN [K]
ALOS-2/CIRC	0.19	0.27
CALET/CIRC	0.18	0.21

図 11 には CALET/CIRC のラジオメトリック補正前、補正後の画像を示した。補正前画像には輝度ムラが生じているが、補正後はフラットな画像が得られている。また校正精度については、ターゲットである黒体温度と補正後の画像の温度の差が < 2K(ALOS-2/CIRC)、0.5 ~ 2.8K(CALET/CIRC) となっており、仕様である 4K を満たしていることがわかった。

6. まとめ

CIRC は森林火災検知を主目的とした非冷却型の小型赤外カメラであり、ALOS-2 に搭載され 2013 年度打上げ予定である。また、CIRC は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) に設置されるカロリメータ型宇宙電子線望遠鏡 (CALET) にも相乗りミッションとして搭載される予定である。

CIRC の性能確認、および軌道上でのデータ補正を目的とした地上試験を行った。結像性能については画像取得に問題ないこと、およびアサーマル性を

確認した。ラジオメトリック性能については、NEdT は 0.19K(ALOS-2/CIRC), 0.18K(CALET/CIRC), FPN は 0.27K(ALOS-2/CIRC), 0.21K(CALET/CIRC), 校正精度は $< 2K(ALOS-2/CIRC)$, $0.5 \sim 2.8K(CALET/CIRC)$ とそれぞれ仕様を満たしていることを確認した。また軌道上補正に必要なデータ取得およびアルゴリズム構築を行った。今後は地上系の整備を進め、打上げ後のデータ取得、処理、配信環境を整え打上げに向けた準備を進める。

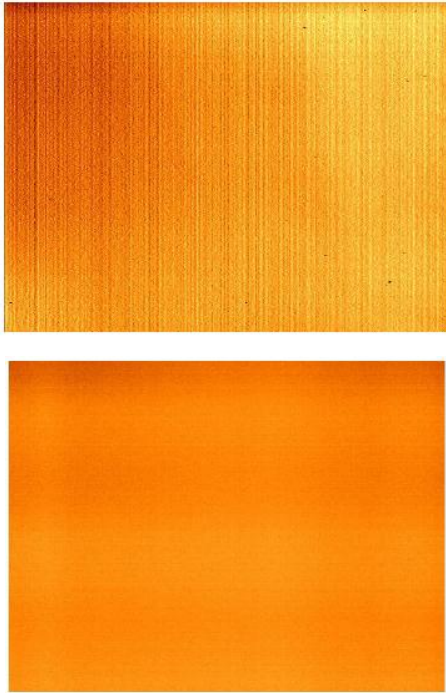


図 11 : CALET/CIRC の黒体画像。(上図)ラジオメトリック補正前。(下図)ラジオメトリック補正後。

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) E. Kato, H. Katayama, M. Naitoh, M. Harada, R. Nakamura, and R. Sato. “Development of the Compact Infrared Camera (CIRC) for earth observation”, Proc. SPIE 8353, 8353J1
- 3) 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
- 4) S. Torii, et al,: CALET mission on ISS, Proc. SPIE,