

2F04 ALOS-2 搭載地球観測用小型赤外カメラ(CIRC)の開発

○中村良子, 片山晴善, 内藤聖貴, 原田昌朋, 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 ALOS-2
Ryoko Nakamura, Haruyoshi Katayama, Masataka Naitoh, Masatomo Harada,
Eri Kato, Ryota Sato (Japan Aerospace Exploration Agency) , and
Koji Nakau (Hokkaido University)

Key Words: Remote Sensing, Uncooled Infrared Detector, Wildfire Detection, ALOS-2

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 ALOS-2 and will be launched in FY2013.

We have finished the ground calibration test of the CIRC Proto Flight Model (PFM) on board ALOS-2. 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 and the observational simulation.

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。CIRC の ALOS-2 への搭載位置を図 1 に示す。CIRC は衛星直下から 30 度傾いた向きに設置され、基本的に SAR がオフナディア角右 30 度を向いている間に直下のターゲットを撮像する。

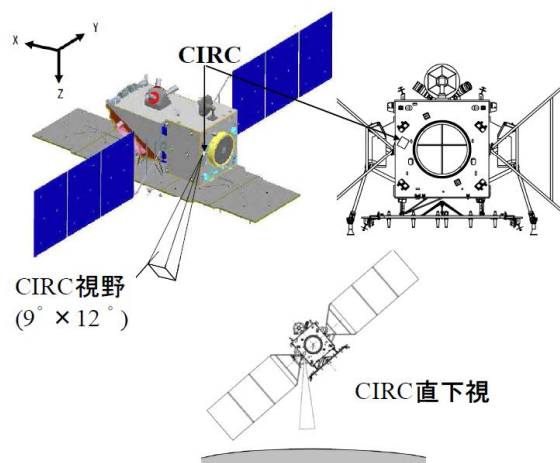


図 1 : ALOS-2 概略図と CIRC の設置場所

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。

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)アサーナル光学系、(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ナ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。ALOS-2搭載用CIRC PFMを図2に示す。

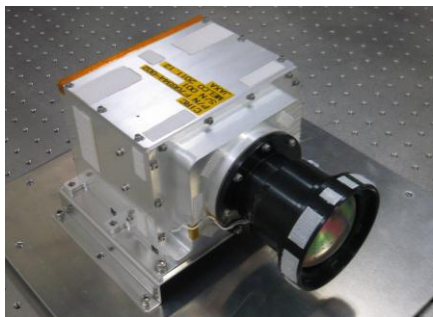


図2：ALOS-2搭載用PFM

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、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。図3にLANDSAT/ETM, Terra/ASTERの1シーンの観測エリアの比較を示す。

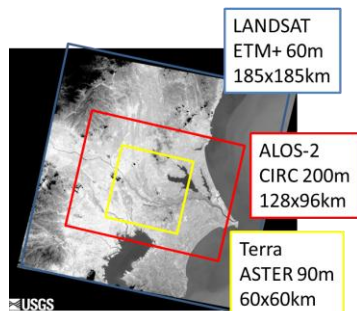


図3：観測エリアの比較。青：LANDSAT/ETM，赤：ALOS-2/CIRC，黄色：Terra/ASTER。

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
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
1シーンの観測エリア	128(CT) x 96(AT)km (ALOS-2) 85(CT) x 64(AT)km (CALET)
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

4. 観測シミュレーション

ALOS-2にCIRCを搭載した場合の観測頻度についてシミュレーションを行った。CIRCはノミナル観測で16シーンを連続して撮像する。図4に日本上空を16シーン撮像した場合の観測領域を示す。衛星進行方向に約1500kmの観測が可能である。

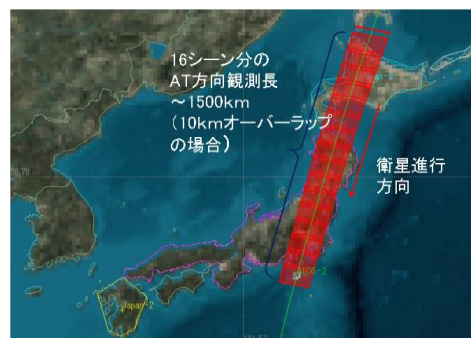


図4：日本上空での16シーンの観測領域

CIRCの基本観測計画は、各観測対象に対して下記の地域を対象に立案する予定である。

- 森林火災
MODISの過去の火災検知結果から月毎に火災検知の多いエリアを抽出し観測を行う。
- 火山
国内外の活動が活発な火山を中心に観測を行う。
- ヒートアイランド
国内都市部を観測する。

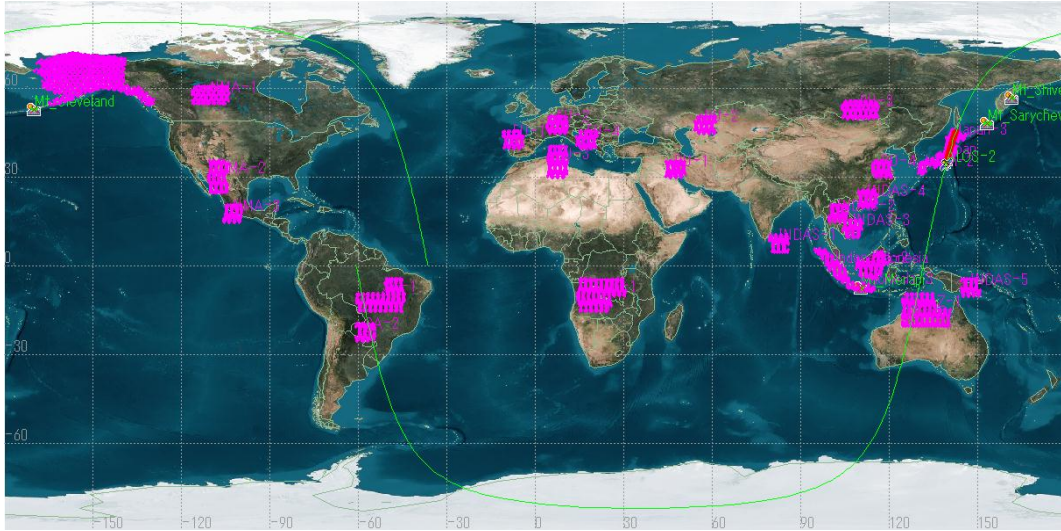


図 5 : CIRC 観測 1 か月分のシミュレーション結果

図 5 に CIRC 観測 1 か月分のシミュレーション結果を示す。1 日の観測シーン数は平均約 420 シーン程度となった。また、火山等のポイントに着目した場合、平均観測頻度は週 1 回程度となる。

黒体から放射された赤外線は図 7 に示す 4 パターゲットを通り、CIRC で検出される。

5. 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 6 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。

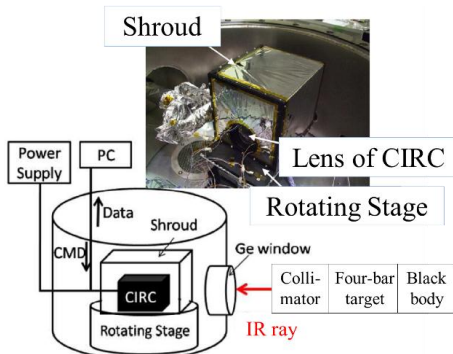


図 6 : MTF 測定セットアップ概略図

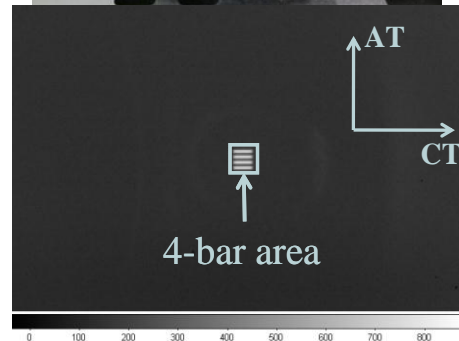
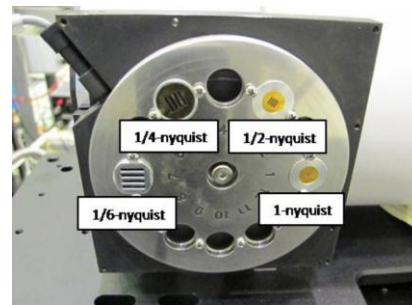


図 7 : (上図)コリメータシステムに設置されている 4 パターゲット。それぞれ 1/6, 1/4, 1/2, 1 ナイキスト周波数に対応している。(下図)CIRC で撮った 4 bar ターゲットのイメージ

測定は図 8 に示す検出器面上の 9 か所で行った。

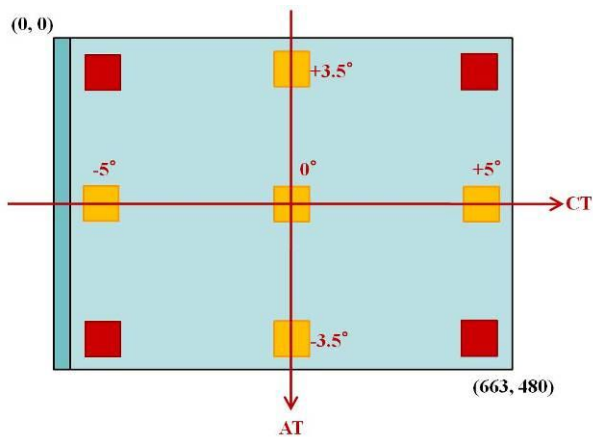


図 8 : CIRC 検出器面上での MTF 計測位置

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9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 のアサーナル性が確認された。

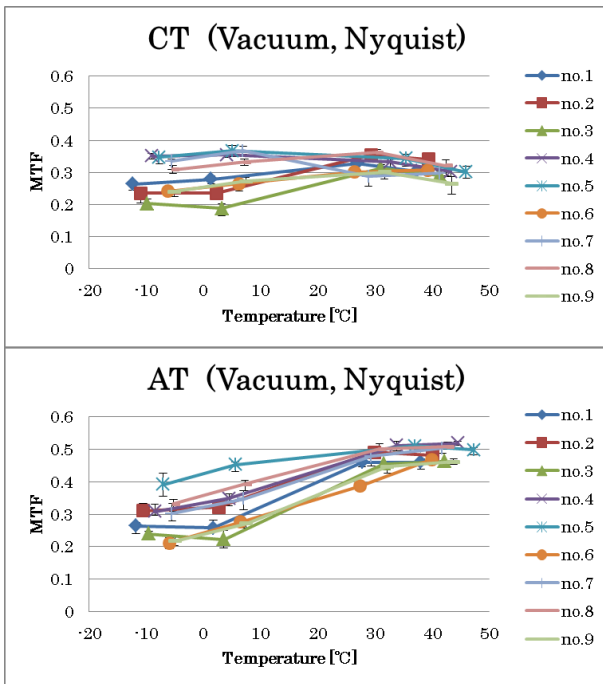


図 9 : MTF 測定結果. 色の違いは測定箇所を表している。(上図)CT 方向 MTF. (下図)AT 方向 MTF.

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 : 0.3K 以下, FPN : 0.2K 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。

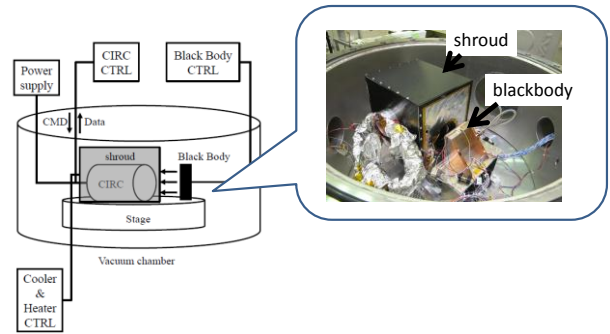


図 9 : ラジオメトリック補正用測定セットアップ概略図

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。

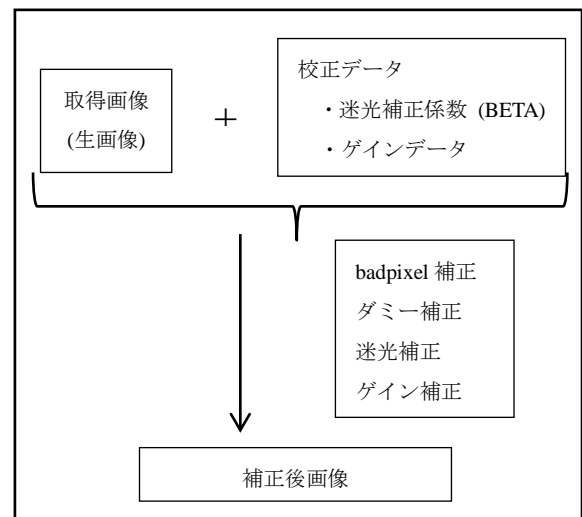


図 10 : ラジオメトリック補正手順

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 8 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.

NE Δ T, 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, NE Δ T は 0.19K, FPN は 0.27K と仕様を満たしていることがわかった.

図 11 には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 以内に収まっており, 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. 1 日の観測シーンは平均 420 シーンとなり, 火山等のポイントにターゲットを絞ると週 1 回程度の観測が可能である.

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ermal性を確認した. ラジオメトリック性能については, NE Δ T は 0.19K, FPN は 0.27K, 校正精度は 2K 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.

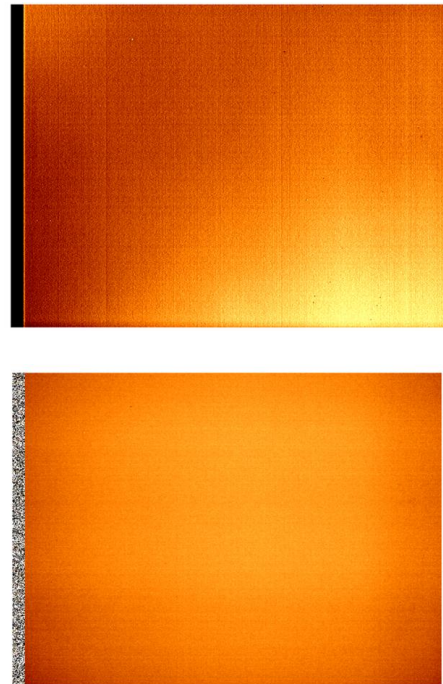


図 11 : 黒体画像. (上図)ラジオメトリック補正前. (下図)ラジオメトリック補正後.

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.

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, vol 7021, 2008, pp. 702114-11