

## 地球観測用小型赤外カメラ(CIRC)の進捗報告

### (Progress Report of Compact Infrared Camera (CIRC) for Earth Observation)

ご所属 宇宙航空研究開発機構

(Japan Aerospace Exploration Agency)

ご執筆者名 加藤 恵理 (Eri Kato)

## 1. 概要

我々は、非冷却のマイクロ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地球観測用小型赤外カメラ(CIRC)を開発してきた<sup>1,2,3,4)</sup>。マイクロボロメータは民生品や軍事用途で一般的に広く使われている赤外センサである。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、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。

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、CIRCの小型軽量、低消費電力を活かし、複数衛星にCIRCを搭載することで高頻度な観測を行う。また、火山やヒートアイランド現象の観測もCIRCのミッションである。

CIRCは陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)<sup>5)</sup>に搭載されているほか、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戦望遠鏡(CALET)<sup>6)</sup>にも搭載されており、更なる観測頻度の向上が期待される。CIRCのALOS-2及びCALETへの搭載位置を図1、2に示す。

## 2. CIRCの主要諸元

CIRCの特徴は、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)を実現している点にある。また小型軽量を実現するために、(1)

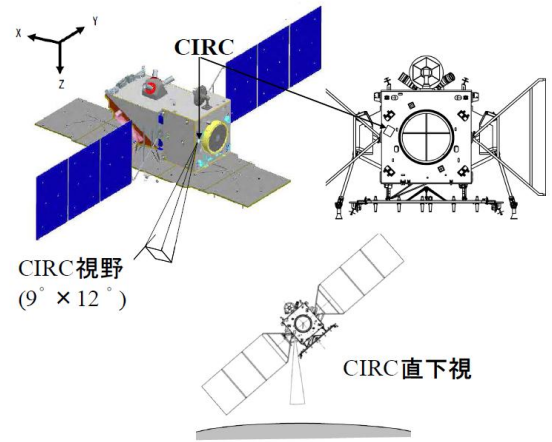


図1 ALOS-2の概略図とCIRCの設置場所  
ALOS-2が右観測を観測する際にCIRCが直下を向くように、30度傾けて設置されている。CIRCはPALSAR-2が右観測(CIRCが直下)または非観測(CIRCが30度ポインティング)時に主に観測を行う。

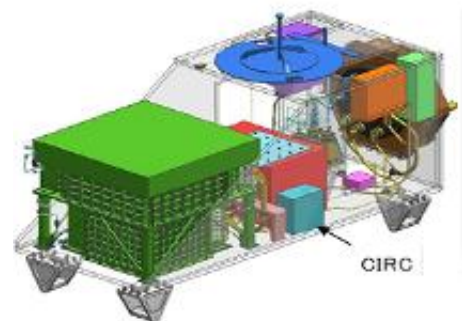


図2 CALETの概念図とCIRCの設置場所

アサーマル光学系、(2)シャッターレス方式を採用している。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ることで温度変化に対して光学系の性能劣化が少ない設計となっている<sup>4)</sup>。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、小型で低消費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た。もう一つの大きな特徴として、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 ALOS-2 及び CALET に搭載することが可能となった。ALOS-2 搭載及び CALET 搭載用 CIRC プロトフライトモデルを図 3 に示す。

CIRC の観測諸元を表 1 に示す。CIRC は地球観測用として最大フォーマット(640×480)の非冷却検出器を採用している。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、628 km 高度(ALOS-2)において約 210 m、400 km の高度(CALET)において約 130 m である。

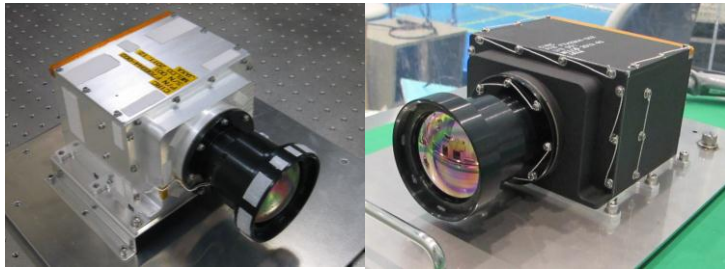


図 3 ALOS-2 搭載 (左) 及び CALET 搭載(右)用 CIRC プロトフライトモデル

### 3. PFM を用いた地上校正試験

打ち上げに先立ち、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。

#### 3.1 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。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。

ナイキスト周波数(20 lp/mm)での MTF の計測結果を図 4、5 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。

表 1 CIRC 観測諸元

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 $\mu\text{m}$
大きさ	110 mm×180 mm×230 mm
質量	3 kg
消費電力	< 20 W
空間分解能	約 210 m @628 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
NE $\Delta$ T	0.2 K @300 K
FPN	0.3 K @300 K
温度精度	4K (goal : 2 K @300 K)

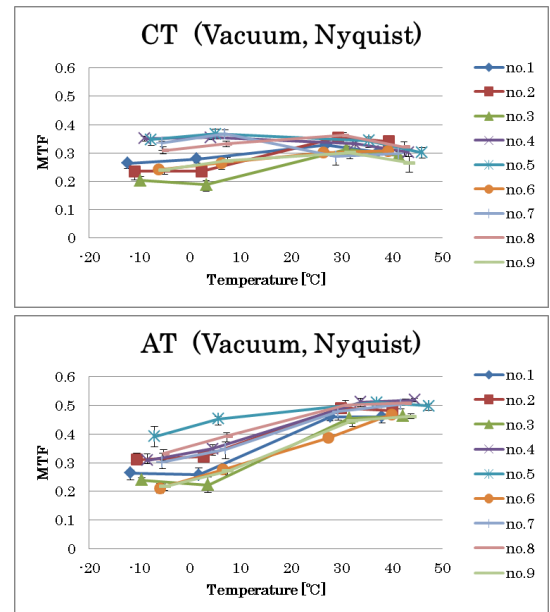


図 4 MTF 測定結果 (ALOS-2 搭載 CIRC) 色の違いは測定箇所を表している。(上図)CT 方向 MTF、(下図)AT 方向 MTF。

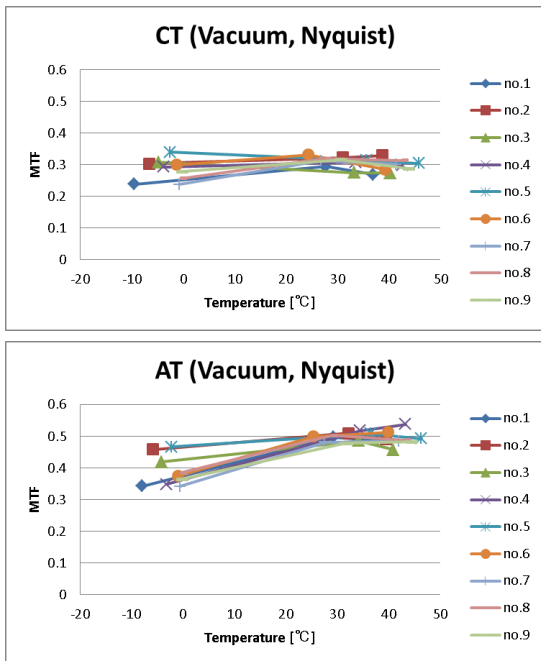


図5 MTF測定結果 (CALET搭載CIRC)  
色の違いは測定箇所を表している。(上図)CT方向MTF、(下図)AT方向MTF。

### 3.2 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)、及び校正精度の確認を行った。それぞれの仕様は、NEdT : 0.2 K以下、FPN : 0.3 K以下、校正精度 : 4 K以下である。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。

CIRCはシャッター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性分)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及び補正アルゴリズムを構築した。取得画像と、校正データから算出した迷光補正係数及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<sup>4)</sup>。

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、ダミー画素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分かった。

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6にはラジオメトリック補正前、補正後の画像例を示した。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差が2K以内(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分かった。

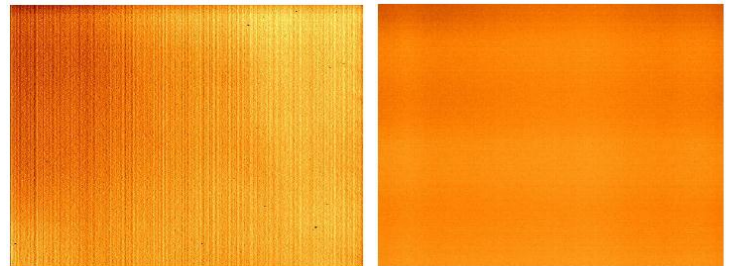


図6 黒体画像。(上図)ラジオメトリック補正前、(下図)ラジオメトリック補正後の画像。

## 4. ALOS-2搭載CIRCの初期評価結果

ALOS-2搭載CIRCの初期評価(初期チェックアウト)は、2014年7月4日から7月14日にかけて行われた。初期チェックアウトでは、

1. CIRCの基本機能評価
2. CIRCの運用シーケンスでの機能・性能評価(取得画像の品質評価等含)
3. 指向決定精度の確認

を行った。基本機能の評価では軌道上でCIRCをONして撮像まで行いテレメトリ等が正常値の範囲内であることを評価した。運用シーケンスでの機能・性能評価では、実際の運用シーケンスに従ったコマンドを送信し、撮像を含めてCIRCが正しく機能することを評価した。また画像から指向決定精度の確認も行っている。

図7は初期チェックアウト期間中に撮像した中四国地方の画像を示す。撮像時間は日本時間の深夜23時44分であるが、夜間でも撮像できる熱赤外線の特徴を良く表



している。またシャッタレスの補正方式が正しく機能していることも分かる。図8に図7の領域Aの拡大を示す。赤外線画像は対象の温度を反映しており、大山を代表とする中国山地の山々は温度が低いため主に青で表示されている。また宍道湖、中海も見えており、日本海と温度が違っていることが分かる。

一連の初期チェックアウトの結果として、CIRCは当初の予定通りの機能・性能を軌道上でも発揮していることが確認され、8月20日のALOS-2定常運用移行に伴いCIRCも定常運用へ移行した。

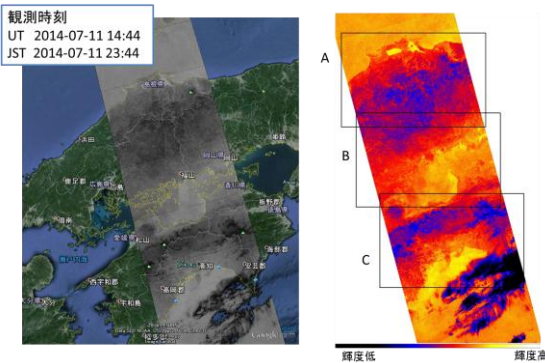


図7 CIRCによって撮像された夜間の中四国地方の画像

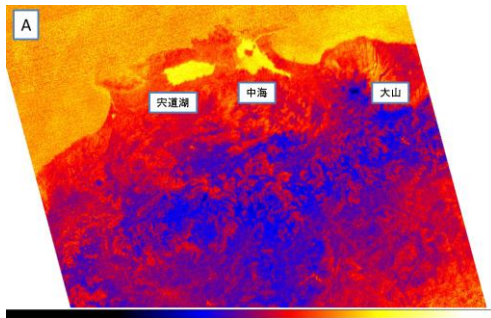


図8 図3の領域Aの拡大

## 5. ALOS-2 搭載 CIRC の運用と基本観測計画

定常運用段階の観測は、CIRC基本観測計画に基づいており、森林火災、火山、ヒートアイランドのミッションに応じた観測地域を設定し、それらを観測する。森林火災はTerra/Aqua衛星搭載のMODISセンサの過去10年のホットスポット検知数の月平均の上位10%の地域を観測対象とし、月ごとに異なる火災多発地域を観測する。火山は国内外の活動の活発な火山30程度を通年で観測する。またヒートアイランドに関しては、日本およびアジア域の大都市を観測することとしている。この他に日本の離島を含む陸域や、定常モニターに必要な校正

サイトは必ず観測を行う。

図9には1月と7月のCIRCの基本観測計画の比較を示す。森林火災は乾季に発生しやすいため地域や気候帯によって月ごとに異なる領域を観測する。

図10に9月の基本観測計画と、基本観測計画を基に1回帰分(14日間)の観測を立案した結果を示す。観測可能地域はPALSAR-2の観測計画により影響を受けるが、一回帰でおおむね観測領域の半分程度はカバーできる。また場所によっては2回以上観測できる地域もある。

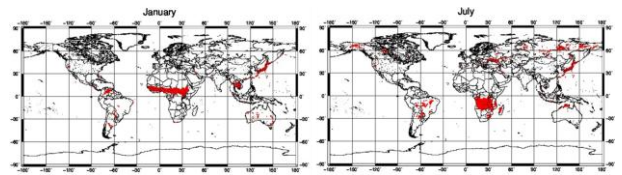


図9 CIRCの1月と7月の基本観測計画

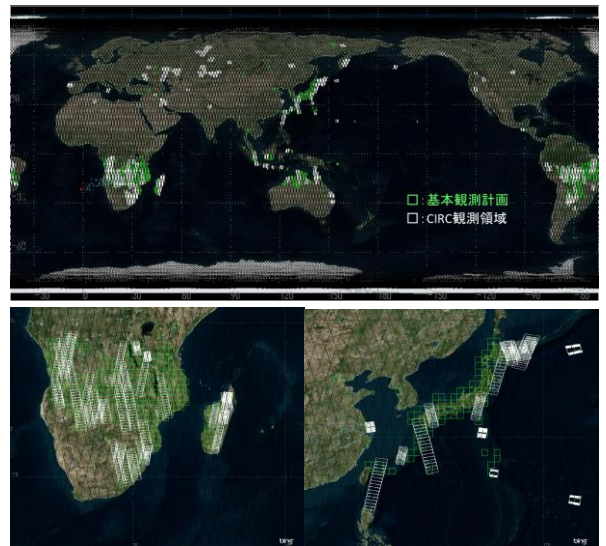


図10 CIRCの9月の基本観測計画(緑枠)と基本観測計画に基づき1回帰分の観測を立案した結果(白枠)

以降では、CIRC基本観測計画に基づき観測された森林火災の観測例を示す。

### (a) 森林火災

CIRCは初期チェックアウト開始から2014年9月1日現在までで100件以上の森林火災を検知している。図11には2014年8月31日UT10時30分(現地時刻11時30分)ごろにCIRCにより撮影されたアンゴラの森林火災の様子を示す。図11右はMODISにより同日に撮影された可視画像と、MODISの赤外波長を用いて検出された火災地域を赤枠で示す。CIRC画像で高温を示す黄

色の地域は MODIS の火災検知結果と良く一致することが分かる。

初期校正運用ではこのように他の衛星の検知結果と比較しながら、火災検知アルゴリズムの検証を行っていく予定である。

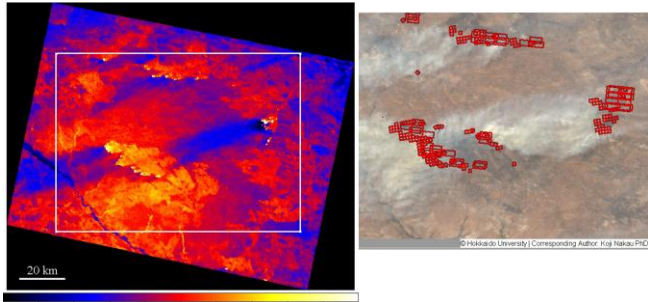


図 11 2014 年 8 月 31 日に観測したアンゴラの森林火災の画像。(左) CIRC で撮影された熱赤外画像。(右) 左図白枠部分の MODIS 可視センサの画像。赤枠は MODIS 赤外センサで検出された火災の位置を示す 8)。

## 6. CIRC データ一般公開

温度精度等の校正検証を行う初期校正運用段階が 2014 年 12 月で終了し、2015 年 1 月に CIRC データの一般公開を開始した。CIRC 観測データは CIRC データ公開サーバより web 上に公開している 9)。表 3 は公開するデータリストを、図 12 は CIRC データ公開サーバ画面を示す。

表 3 CIRC データ種別

データ種別	詳細
L1 データ	輝度補正及び幾何補正処理が施された画像データ (GeoTiff 形式)
L2 データ	火災検知情報 (火災位置、火災燃焼温度等) を含むデータ (csv 形式)

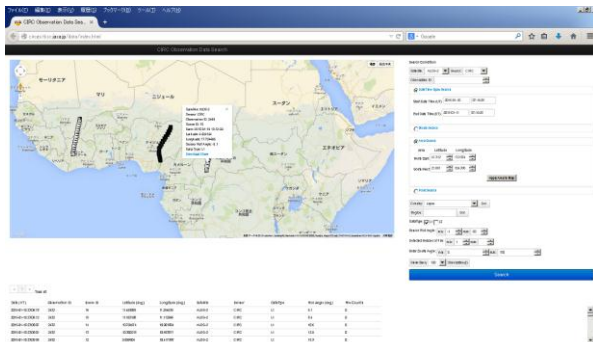


図 12 CIRC データ公開サーバ画面

## 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**, 2012, 8353J1
- 3) R. Nakamura, H. Katayama, M. Naitoh, M. Harada, E. Kato, K. Nakau, and R. Sato. “Ground Calibration of Compact Infrared Camera (CIRC) for Earth Observation”, *Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2013, pp. 4435-4438
- 4) E. Kato, H. Katayama, M. Naitoh, M. Harada, Ryoko Nakamura, K. Nakau, Y. Tange and R. Sato. “Radiometric Calibration of Compact Infrared Camera (CIRC) for Earth Observation”, *Sensors and Materials*, **26**, No.4, 2014, pp. 199-214
- 5) 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
- 6) S. Torii, et al, : CALET mission on ISS, Proc. *SPIE*, vol **7021**, 2008, pp. 702114-11
- 7) 片山晴善、酒井理人、加藤恵理、中島康裕、木村俊義, ”地球観測用小型赤外カメラ (CIRC) の初期評価結果”, *宇宙科学技術連合講演会講演集*, **58**, 5p, 2014
- 8) Wildfire Database  
<http://fire.cris.hokudai.ac.jp>
- 9) CIRC データ公開ページ  
<http://circgs.tksc.jaxa.jp/index.html>