宇宙赤外線背景放射観測実験CIBER-2の装置感度較正

野田千馬, 松浦周二, 瀧本幸司, 橋本遼, 木田有咲, 河野有哉, 松見知香, 中川智矢, 長尾亜美, 萩原里紗(関西学院大学),津村耕司(東京都市大学), 佐野圭(九州工業大学), 高橋葵(ABC), 松本敏雄, 和田武彦(ISAS/JAXA), Michael Zemcov (RIT),James Bock (Caltech)

Calibration of the Cosmic Infrared Background ExpeRiment-2 (CIBER-2)

Kazuma Noda, Shuji Matsuiura, Kohji Takimoto, Ryo Hashimoto, Arisa Kida, Yuya Kawano, Chika Matsumi, Tomoya Nakagawa, Ami Nagao, Risa Hagihara(Kwansei Gakuin University),Kohji Tsumura (Tokyo City University), Kei Sano (Kyushu Institute of Technology), Aoi Takahashi(ABC), Toshio Matsumoto,Takehiko Wada (ISAS/JAXA), Michael Zemcov (RIT),James Bock (Caltech)

This document is provided by JAXA.

1. 背景と目的

宇宙赤外線背景放射(Cosmic Infrared Background: CIB)とは、銀河系外のあらゆる天体の赤外域での放射を足し合わせた積算光である。これまでのCIBERや衛星などのCIBの観測からCIBは既知の銀河積算光より約２倍明るい超過成分を含んでいることが明らかとなった(Matsuura, 2017)。図1にCIBERやこれまでの衛星などのCIBの観測結果を示す。この超過成分の原因としては、初代星、原始ブラックホール、または銀河ハロー星のからの光の寄与が考えられる。CIBER-2ではこの超過成分を解き明かすことを目的としており、CIBERから感度を10倍向上し、観測波長範囲を可視光の0.5μmまで伸ばしてCIBを観測する。

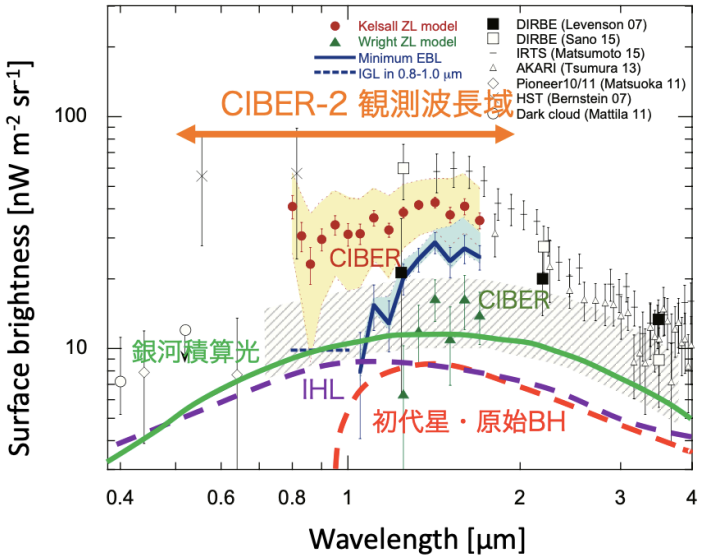


図1. CIBの明るさ

本研究では、CIBの強度を正確に測定するために観測装置へ入射する赤外線の放射強度と検出器の出力信号とを対応づける変換係数(Conversion Factor: CF)を求める感度較正を行った。感度較正はフライト前の地上較正試験とフライトデータに写っている星を用いた較正の２通りの方法で行った。それぞれの較正についての較正方法と２つの較正の測定結果を報告する。

2. CIBER-2 観測装置

CIBER-2は口径φ28.5cmの主鏡を使っており、後置光学系では多数のレンズを用いることにより収差の補正を行う。後置光学系では、光線をビームスプリッターで３つの波長バンドに分割する。各検出器に設置したWindowpane Filter (WPF)は、３分割した光線をさらに２つの波長バンドに分割することで計６バンドでの撮像観測を行う。また、各検出器のLinear Variable Filter (LVF)は比波長分解能R~20での分光観測を行う。検出器にはHgCdTeフォトダイオードアレイ(HAWAII-2RG)を用いる。この検出器からの信号電流は[electrons per sec: eps]の単位で表される。また、CFの単位は[$Wm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$/eps]となる。図２と図３にHgCdTeアレイ検出器と検出器上のフィルターの配置を示す。

This document is provided by JAXA.

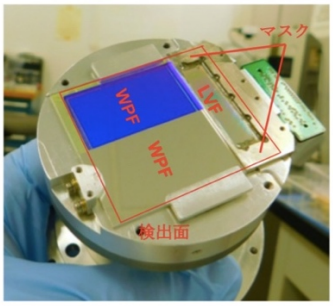


図2. HgCdTeアレイ検出器

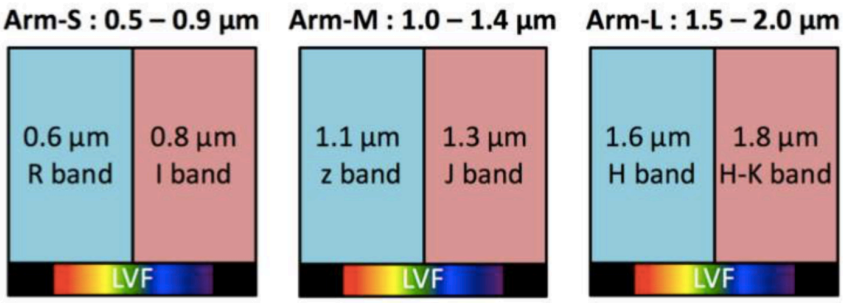


図3. 検出器面上のフィルターの配置

3. 地上較正試験

3.1 可視域感度較正

宇宙背景放射は一様な明るさを持つ面光源と見なすことができるので較正試験では面光源を使用する。可視域の感度較正ではハロゲン光源の光を積分球に入射させることによって面光源を構築する。これを予想される空の明るさ（～黄道光の明るさ $10^3 nWm^{-2}sr^{-1}$）まで減光させた上で観測装置に見せることで感度較正を行った。可視域での感度較正は以下の３段階の手順で行った。

(1). スペクトロメーターの較正

スペクトルが既知である標準光源をスペクトロメーターに見せることによってスペクトロメーターの感度較正を行った。

(2). 積分球光源の放射輝度測定

ハロゲン光源の光をNDフィルターに通して減光させ、積分球に入射させて面光源を作る。これを較正済みのスペクトロメーターに見せることで積分球光源の放射輝度を測定した。

(3). CIBER-2の較正

積分球光源の光をCIBER-2の望遠鏡に入射させ、CIBER-2の検出器の出力と積分球の放射輝度の関係からCFを求めた。図4にCIBER-2の感度較正の様子を示す。

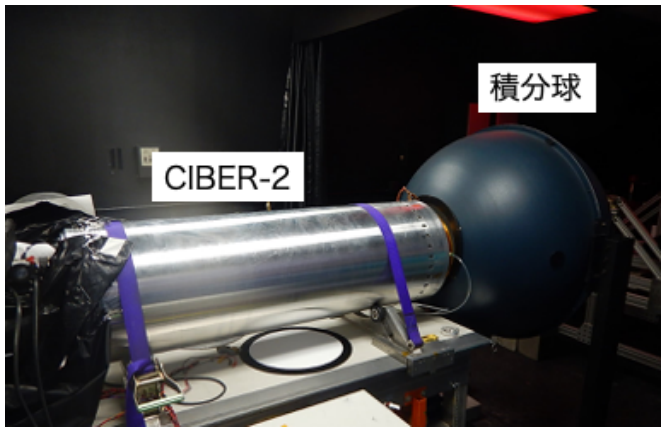


図4. CIBER-2の感度較正の様子

3.2 可視-近赤外域感度較正

可視-近赤外域での測定では黒体炉を光源として用い、可視域の測定と同様に黒体炉の光を積分球へと入射させて面光源を構築する。可視域から近赤外域までの広い波長域で測定を行うため、黒体炉の温度はCIBER-2の可視バンドでも検出可能な1200Kに設定し

This document is provided by JAXA.

た。1200Kの黒体放射のスペクトルから積分球の放射強度を計算し、CIBER-2の出力との関係からCFを導出した。

3.3 系統誤差の評価

地上での較正試験の際にはCIBER-2の前に真空冷却するための窓が取り付けられている。較正試験の際には、積分球から出てきた光がこの窓に反射して積分球へ戻ることで積分球光源の輝度が増加するローディングと呼ばれる効果を考慮する必要がある。CIBER-2の窓と積分球の距離が500mmのときをローディングがないものとし、0mmと500mmで測定することで0mm地点でのローディングによる放射輝度の増加を調べた。図5にLVF領域とWPF領域それぞれでのローディングを示す。

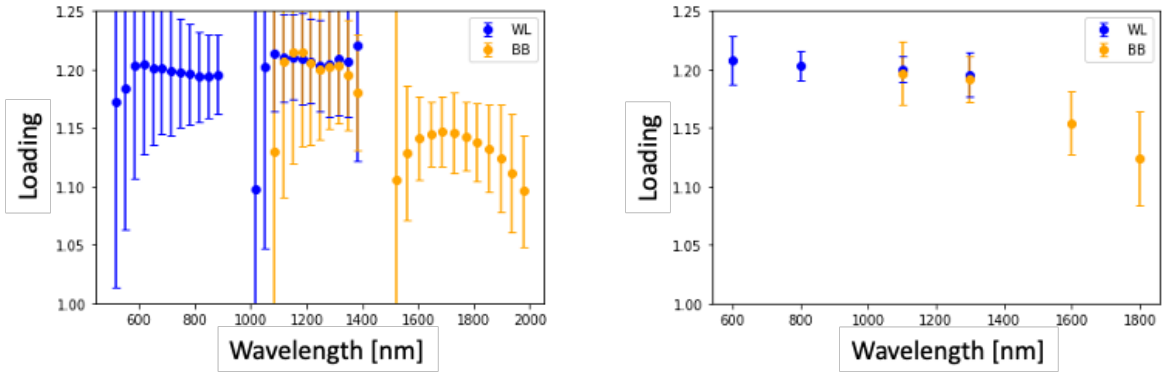


図5. LVF領域でのローディング(左)とWPF領域でのローディング(右)。 2つの色は光源の違いを示す(青:ハロゲン光源, 橙:黒体炉)。

ローディングの他にも、較正システムに用いる装置を評価した。較正に関わる誤差要因と誤差を表1にまとめた。

表1. 較正に関わる誤差要因と誤差

ハロゲン光源の時間安定性	0.06%/hour
ハロゲン光源の温度安定性	0.2±0.08%/℃
標準光源の較正精度	1.5%
スペクトロメーターの非線形補正	0.5%
黒体炉の時間安定性	0.06%/hour
黒体炉の温度安定性	0.04%/℃
黒体炉の放射スペクトル精度（較正精度）	0.3%
2種類の光源の測定でのスペクトロメーターの感度の相違	2%
NDフィルター透過率の測定誤差	0.5%/枚
面光源の強度不定性	最大0.5%
積分球開口の一様性	5%

4. フライトデータを用いた較正

フライトデータに写っている星を較正基準光源として、感度較正を行う。星の放射輝度は星カタログで調べ、カタログの値とCIBER-2検出器の出力との関係からCFを導出した。ここでは9-13等級の明るさの星を使用した。明るすぎる星では、CIBER-2の検出器が飽和してしまうため較正に適さない。フライトデータを用いた較正は以下の3段階の手順で行った。

This document is provided by JAXA.

(1). CIBER-2検出器での星からの信号

星を2次元のガウス関数でフィットし、半径を3σとした開口を設定して開口測光によって星からの信号を求めた。このとき、開口の外側にsky領域を設定し、この領域の平均を画像全体から差し引いた。また、sky領域の取り方を変えてskyの取り方による誤差も評価した。図6にフライトデータと星の開口測光の様子を示す。

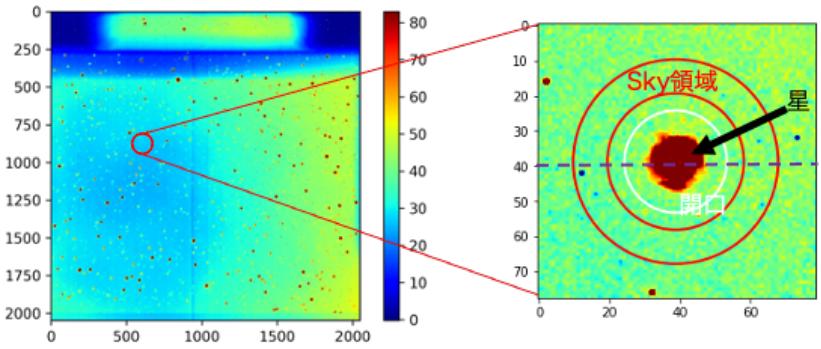


図6. フライトデータ(左)とフライトデータに写っている星の開口測光の様子(右)

(2). カタログから得られる星のフラックス

開口測光を行った星について2MASS(Cutri, 2003), Gaia DR3(Gaia Collaboration, 2020), Tycho-2(Hog, 2000)といった星カタログでそれぞれの波長バンドでの等級を調べた。CIBER-2で観測した波長バンドでの等級を求めるため、全バンドの等級に対し、波長の3次までの多項式でフィッティングした。図7にフィッティングの様子を示す。

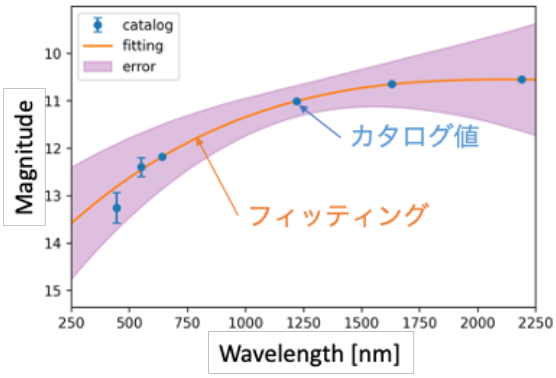


図7. カタログの値とフィッティング

LVF領域での較正に使う星のカタログ値としては、CIBER-2がそれぞれの星を観測した波長でのカタログ値のフィッティングの値を用いてフラックスを計算した。WPF領域での較正に使う星のカタログ値は、CIBER-2がそれぞれの星を観測したバンドの透過率とその星のカタログ値のフィッティングからフラックスを計算した。

(3). CFの計算

LVF領域とWPF領域の各バンドについてCFを計算した。LVF領域では、それぞれの星についてCIBER-2で検出した星からの信号とカタログから得られたフラックスの関係からその星を観測した波長でのCFを計算した。WPF領域では、バンドごとにCIBER-2で検出した

This document is provided by JAXA.

星からの信号を横軸に、カタログから得られたフラックスを縦軸にプロットし、線形フィットすることで直線の傾きからCFを得た。図8にWPF領域でのバンドごとにフィッティングしたときの例を示す。

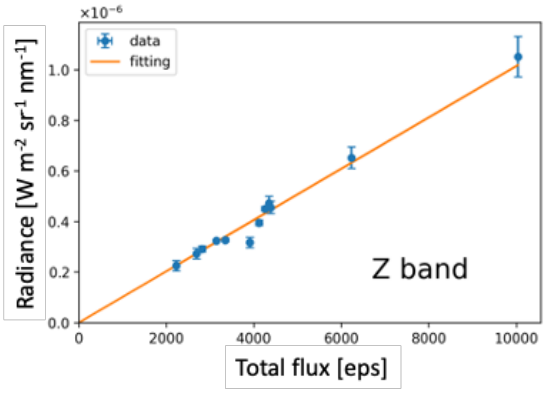


図8. WPF領域でのバンドごとのフィッティングの例

5. CF測定結果

地上較正試験とフライトデータを用いて較正のCFの測定結果を以下の図9に示す。これらの測定結果を装置の仕様から計算されたCFの推定値とも比較した(estimate:赤)。

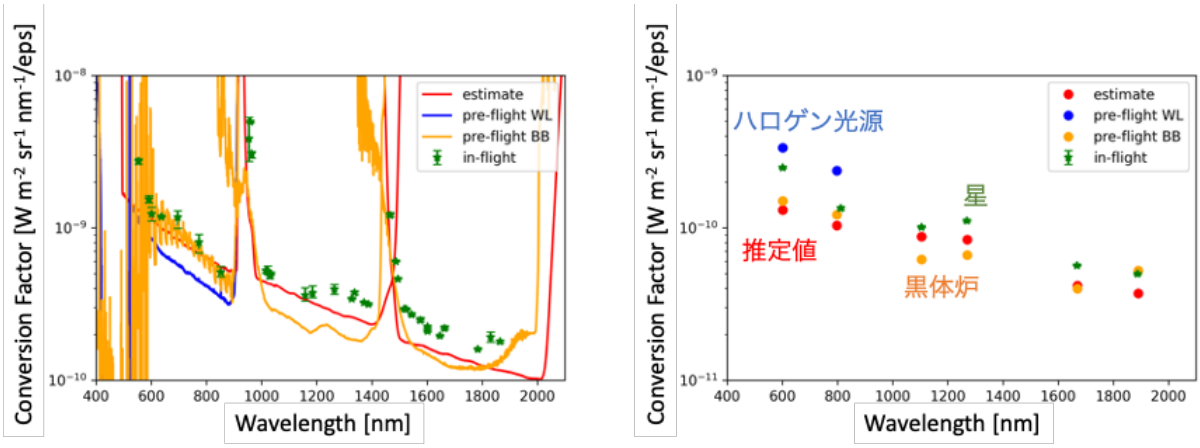


図9. LVF領域でのCF(左)とWPF領域(右)でのCFの測定結果

地上試験とフライトデータのCFの測定結果の間には、フィルターごとに異なるずれが見られ、このずれはLVF領域とWPF領域ともに最大のところで1.6倍程度であった。現在CFのずれやスペクトルの形状の違いの原因を調査中である。

[参考文献]

Cutri, R.M. (2003). VizieR Online Data Catalog: 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003). 2003yCat.2246, 0C.

Gaia Collaboration. (2020). VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020). 2020yCat.1350, 0G.

Hog, E. (2003). The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. A&A, 355, 27.

Matsuura, S. (2017). New Spectral Evidence of an Unaccounted Component of the Near-infrared Extragalactic Background Light from the CIBER. ApJ, 839, 7.

This document is provided by JAXA.