

## 宇宙赤外線背景放射を観測するロケット実験CIBER-2：進捗状況

橋本遼，松浦周二，瀧本幸司，鈴木紘子，古谷正希，木田有咲，河野有哉，虎尾祐介(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)，Daehee Lee (KASI)，Shiang-YuWang (ASIAA)

## Cosmic Infrared Background Experiment-2 progress Report

Ryo Hashimoto, Shuji Matsuiura, Koji Takimoto, Hiroko Suzuki, Masaki Furutani, Arisa Kida, Yuya Kawano, Yusuke Torao(Kwansei Gakuin University), Koji 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), Daehee Lee (KASI), Shiang-YuWang (ASIAA)

## 1. 背景と目的

宇宙背景放射とは銀河系外から到達する拡散光のことであり、宇宙最初から現在までに発生したあらゆる光源の積算光である。したがって宇宙背景放射を観測することは宇宙や銀河の進化過程を知るための重要な観測量である。CIBER-2の前身であるCIBERの観測(図1)では、宇宙赤外線背景放射(CIB)には既知の成分である銀河積算光(IGL:黒線)に加えて未知の超過成分があることがわかった(Matsuura, 2017)。この超過成分をより確定的に観測するためにCIBER-2では「CIBERより高い精度での観測」と、「可視域から近赤外の連続測定」を目標とする。

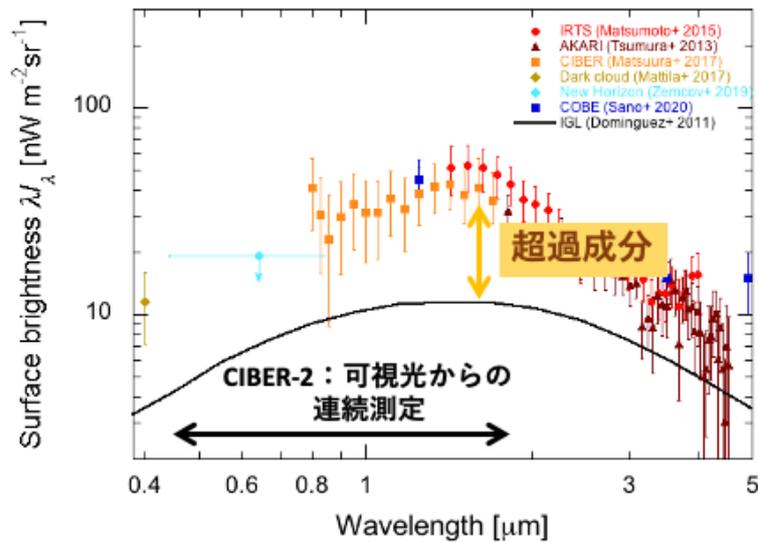


図 1. CIBの明るさ(オレンジの四角がCIBER)

CIBの観測には、CIBに加えて観測位置によって応じた前景光が含まれてしまい、前景光の差し引きによってCIBの測定精度が決定されてしまう。可視・近赤外域において大気光は非常に明るいためCIBER-2では大気圏外でのロケット観測によって前景光の影響を抑える。大気圏外での主な前景光は黄道光でありCIBの~10倍程度の明るさであることがわかっている。CIBの詳細な議論のために5%の精度での観測を目標としており、CIBER-2の観測装置の絶対感度較正試験がいかに精度よく行えるかが肝である。本報告では絶対感度較正用の面光源の放射輝度を測定し、その精度と誤差要因を洗い出した。

## 2. 観測装置CIBER-2の概要

### -CIBER-2について

CIBER-2はロチェスター工科大学との国際共同研究として進めている、CIBを観測するロケット実験である。日本チームは光学系を担当しており、観測装置の性能評価などを行っている。観測装置はNASAの観測ロケットに搭載予定であるため作業のほとんどはアメリカにて実施される。打ち上げ後の観測装置は回収・修理・改良を行って複数回の観測試験を行う予定である。

### -装置仕様

CIBER-2の光学系は口径φ28.5cmの主鏡を使った前段光学系(表1)と、レンズ光学系からなる後段光学系に分かれている(Shirahata, 2016)。後段光学系で光線をビームスプリッターで3分割し、それらをLVF(Linear variable filter)を用いた分光観測を行う(図2と図3)。LVFは空間的な分光素子であるが、これはCIBが面光源であるため視野角によらず等方的に観測されることを利用した手法である。また3分割した光線をWPF(Windowpane Filter)でさらに2分割することで計6バンドでの撮像観測も行い、背景

放射のゆらぎを評価する。搭載する検出器はHgCdTe フォトダイオード アレイ (HAWAII-2RG) で、CMOS回路による読み出しが行われている(表 2)。

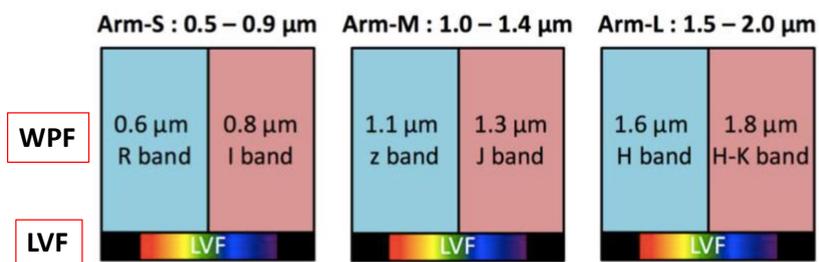


図 2 WPFとLVFの模式図

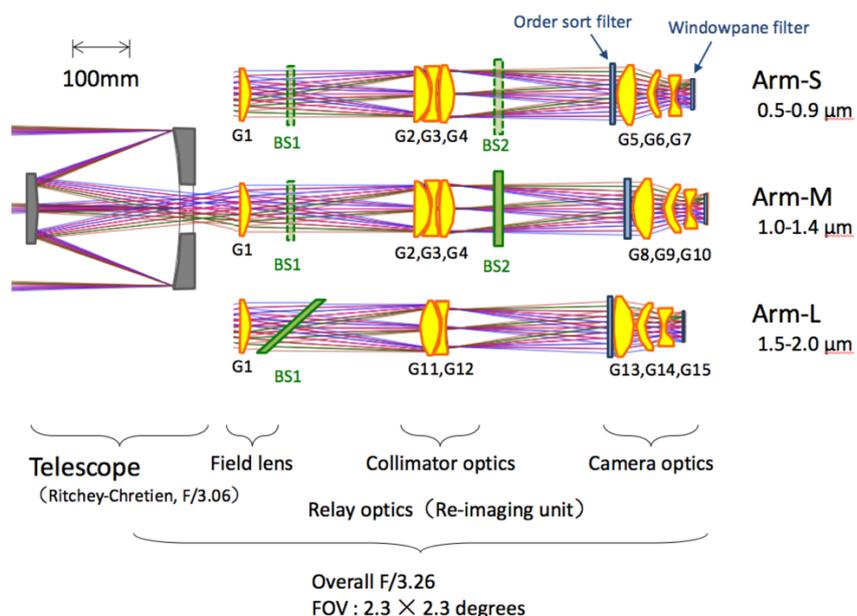


図 3 CIBER-2の光学系

|       |                             |
|-------|-----------------------------|
| 望遠鏡口径 | φ28.5 cm                    |
| レンズ系  | 非球面を含む<br>15枚               |
| 視野角   | 2.3° x 2.3°                 |
| 測光バンド | 0.5~2.0 μm (6バンド)           |
| 分光手法  | Linear Variable Filter(LVF) |
| 分解能   | R~20                        |

表 1 望遠鏡の光学仕様

|  |                    |
|--|--------------------|
| ピクセル数                                      | 2048×2048          |
| ピクセルサイズ                                    | 18μm               |
| 参照ピクセル数                                    | 4×4×2048           |
| 読み出しノイズ<br>correlated double sampling(CDS) | 18 e <sup>-</sup>  |
| ダークカレント                                    | 0.05 eps @77K      |
| ピクセル視野                                     | 4"×4"              |
| カットオフ波長                                    | 2.5μm @77K         |
| 波長帯  | 0.5~2.5μm (HgCdTe) |

表 2 CIBER-2の検出器仕様

### 3. CIBER-2の絶対感度校正試験のためのシステムの構築

#### -絶対感度校正とは

絶対感度校正とは、「観測されたCIBの絶対的な明るさ」と「装置が受け取る信号（電圧）」との関係をつきつけることである。観測する空の明るさは $\sim 10^3 \text{ nWm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ と非常に暗いため観測装置は非常に高い感度で設計されているが、一方で通常の絶対感度校正システムでは明るすぎるため減光を行わなければならない。また、天体の観測と異なりCIBは背景放射なので点光源ではなく面光源であるため、校正用光源には積分球を用いて面光源を作成した。「絶対感度校正システムの構築」と「校正精度を決定する誤差要因の洗い出しの総合的な結果」を報告する。

#### -絶対感度校正システムの構築

CIBER-2の絶対感度校正は絶対値で明るさが校正された面光源を予想される空の明るさ（ $\sim$ 黄道光の明るさ $10^3 \text{ nWm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ ）程度まで減光させた上で、観測装置に見せることで成立する（図 4）。絶対感度校正は以下の3段階の手順を踏んで行われる。

##### (1). 可視分光器の絶対感度校正

スペクトルが既知である光源を、可視分光器に見せることで可視分光器の絶対感度校正を行う。

##### (2). 校正用面光源の特性評価（現在日本で実施できるのはここまで）

安定化ハロゲン光源を積分球につなぎ、その光源の放射輝度を(1)の校正済みの可視分光器で測定し、絶対値が校正された面光源を作成する。

##### (3) CIBER-2の絶対感度校正

(2)の面光源に減光用NDフィルターで黄道光の明るさまで減光し、CIBER-2の観測装置に見せる。絶対校正試験ではCIBER-2の観測装置が必要なため実施は来年度5月に現地で行うが、日本チームが渡航できない場合は代理で行ってもらう。

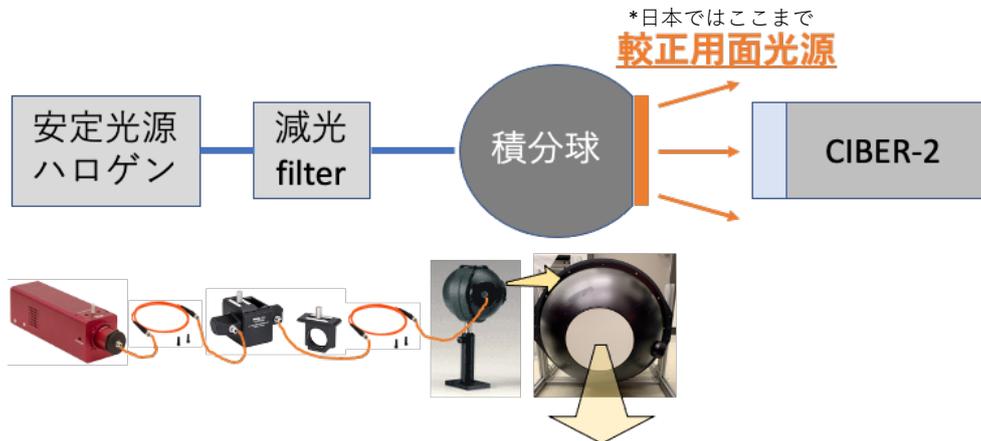


図 4. CIBER-2絶対感度校正のセットアップ

### 4. 絶対感度校正システムにおける誤差要因

#### -可視分光器の感度測定（主な誤差要因）

面光源の絶対放射輝度を測定する可視分光器は、黒体炉とアメリカ国立標準技術研究所(NIST)準拠の基準光源にて感度測定を行なった。感度測定はどの光源で行なっても合致するはずであるが、この2つの光源では相違が発生した(図 5)。左図はNIST準拠光源で感度校正後に黒体炉で黒体放射スペクトルを測定したものである。実線はプランクの放

射則である。右図は測定値と放射則との比を表し、これらはNIST準拠の光源スペクトルと黒体放射スペクトルの系統誤差を表す。この系統誤差は黒体炉が完全な黒体でないことが原因であると考えられ、JAXAにて別の黒体炉で測定予定である。

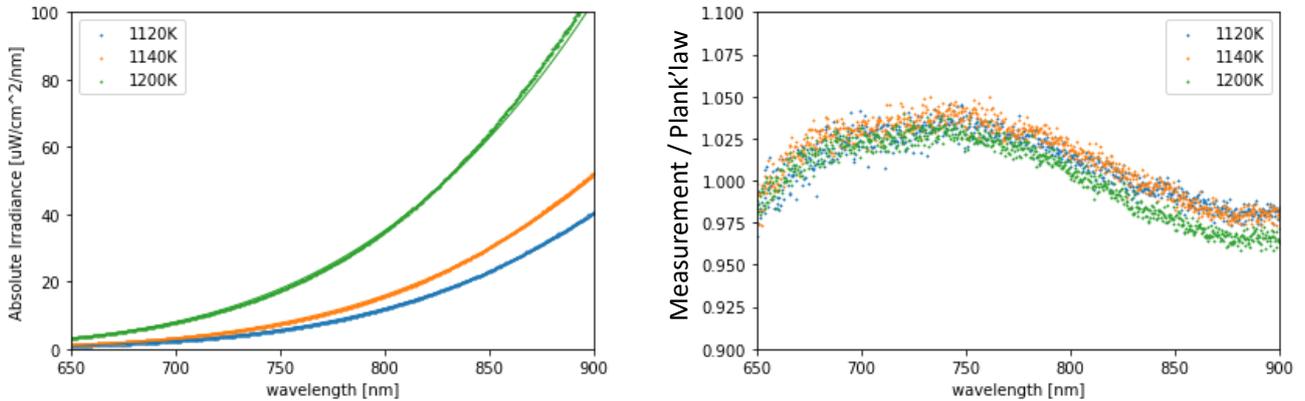


図 5. 黒体炉での測定とNIST準拠光源での感度比較

左：NIST準拠で感度較正後に、黒体放射スペクトルを測定（実線はプランクの放射則）  
 右：測定値とプランクの放射則との比（2種類の光源の系統誤差）

### -絶対値で明るさが較正された面光源

均一な面光源の作成に積分球がよく使われるが、その性能は確かなものではない。均一な面光源には「積分球内部のどこを見ても同じ明るさ」と「積分球のどこで測っても同じ明るさ」が求められている。しかし積分球内部で光線の散乱が不十分であれば、積分球の光源の位置に依存して明るさにばらつきが生じてしまい不均一な面光源になってしまう。実際に積分球の面内放射強度測定を分光器で行なったものが図 6. である。これを改善するため、光源付近をみないよう視野を制限したバツフル(図 7)をとりつけて測定した(右図)。結果、面内の勾配が10%→2%まで改善し十分に均一な面光源が用意できた。

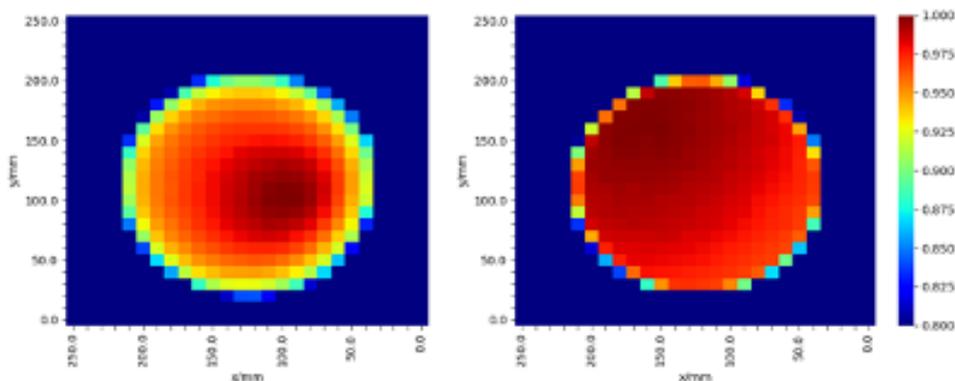


図 6. 積分球の面内放射強度均一性評価

左:右下に積分球の光源があり、そこからの光が到達している,右:視野制限バツフル有り

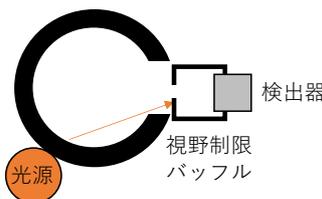


図 7. 視野制限バツフル

-校正精度を決定する誤差要因の洗い出しの総合的な結果  
 その他校正に関わる様々な誤差要因を洗い出した(表 3)。

表 3. 校正用面光源の放射輝度の誤差要因と誤差

|               |               |                             |           |
|---------------|---------------|-----------------------------|-----------|
| 分光器の補正関数精度    | 1%            | 黒体炉の放射スペクトル精度 (校正精度)        | 0.3%      |
| 安定光源の時間安定性    | 0.06% /hour   | <b>2種類の光源の測定での分光器の感度の相違</b> | <b>2%</b> |
| 安定光源の温度安定性    | 0.2±0.08% /°C | 減光フィルタ透過率の測定誤差              | 0.5% /枚   |
| NIST準拠光源の校正精度 | 1.5%          | 面光源の強度不定性                   | 最大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% /°C     |                             |           |

CIBER-2の観測装置の絶対感度校正用の面光源の放射輝度は精度2%程度で測定可能であり、主な誤差要因は可視分光器の感度測定の基準光源同士の系統誤差である。

## 5. CIBER-2のこれまでの状況とスケジュール

CIBER-2はCOVID-19の影響で打ち上げが延期し、現在WS打ち上げ場にて保管されている。日本での絶対感度校正のシステムの構築・評価が完了し、システム機材をWS打ち上げ基地に発送した。日本チームは渡航できないが、打ち上げ前に現地チームに絶対感度校正を行ってもらい、2021年6月に打ち上げ予定である。

(2021.年内 JAXAにて別の黒体炉で可視分光器の感度測定試験)

2021.5~ WS打ち上げ基地にて絶対感度校正試験

**2021.6.6 CIBER-2 ロケット打ち上げ**

2021.打ち上げ以降(未定) ロチェスター工科大学にて観測ロケットの修理・改善

[参考文献]

MatsuuraShuji. (2017). New Spectral Evidence of an Unaccounted Component of the Near-infrared Extragalactic Background Light from the CIBER. Apj, 839, 7.  
 ShirahataMai. (2016). The cosmic infrared background experiment-2 (CIBER-2) for studying the near-infrared extragalactic background light. SPIE Conference Proceeding.