

2012 年度 卒業論文 国際宇宙ステーション搭載 CALET ガンマ線バーストモニター開発にお ける振動試験、熱真空試験の結果報告

井上 亮太 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

Abstract

国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟の船外実験プラットフォーム、第二期利用計画として高エネルギーの電子線・ガンマ線などの宇宙船を観測対象とした観測装置「CALET(CALorimetric Electron Telescope)」が 2014 年に宇宙ステーション「こうのとり」5 号機 (HTV5) で ISS に運ばれ、5 年間もの長期にわたって継続的に宇宙線観測を行う。現在我々の研究室では CALET 搭載「CALET ガンマ線バーストモニター (CGBM)」の地上キャリブレーション段階には入っている。CGBM は 7 keV~1MeV のガンマ線を観測対象とする硬 X 線モニタ (HXM) を 2 基、100keV~20MeV のガンマ線を対象とする軟ガンマ線モニタ (SGM)1 基を搭載する。しかし、観測を行うまでにはいくつかの要求を満たしていなければならない。まず H-2B ロケットで大気を抜けるまでに大きな振動がかかるためその振動に耐えるものでなければならない。次に CGBM が設置されるのは船外、つまり真空中である。さらに地球周回に伴って、温度は-17 ~35 と大きく変動する。その状況下で正確にデータを取得し続けなければならないため、真空時の温度変化耐性も要求される。今回は SGM について、振動耐性を調べるために XYZ 方向それぞれに対し共振振動試験とランダム振動試験を、真空時温度変化耐性を調べるために、真空下で-30 ~45 の温度サイクルをかける熱真空試験を行った。結果として試験直後では SGM の性能 (光量) に変化は見られなかった。

1 Introduction

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst :GRB) は $\sim 10^{55}$ erg/sec ものエネルギーが放出される突発的な天体現象であり、その規模からビッグバンにつぐ宇宙最大規模の爆発現象と言われている。GRB は 50~300 keV 程度のガンマ線が 0.01~300 sec の継続時間に渡り観測され最大約 100photons/cm²/sec の光子が飛来するというものまでである。GRB は 1968 年にアメリカの核実験探知衛星「Vela」によって偶然発見された。コンプトン衛星の BATSE 検出器は、打ち上げ以来 2000 を超えるガンマ線バーストを記録し、その発生場所が全天に一様に分布することを明かにした。1997 年にはいとイタリアの X 線衛星「BeppoSAX」は GRB に付随する残光を X 線で発見し、その X 線残光の位置を分角の制度で決めることに成功した。位置の特定が高精度でできたため、「すばる」や「ハッブル」など可視光や赤外線望遠鏡の追観測できるようになりガンマ線バーストの発生源は 70~100 億光

年もの天体であることがわかった。さらに「ぎんが」や「BeppoSAX」「HETE-2」が、ガンマ線バーストと同じ継続時間と光度曲線の特徴を持つが、X 線領域で放射が卓越している X 線フラッシュ(X-Ray Flash) という現象も多数観測されている。HETE-2 の観測によりガンマ線バーストと X 線フラッシュは同じ起源を持つ天体現象であると考えられ、ガンマ線バーストを理解する重要な足がかりとしてさらなる観測が期待される。他にも近年打ち上がった Fermi 衛星等で観測されている GeV を越える高エネルギー領域の超過成分などもガンマ線バーストの放射機構を理解する上での鍵を握っている。しかし現在このような低エネルギー側から高エネルギー側まで系統的に観測できる観測装置が少ないことから、観測数が少ないというのが現状である。そのため、今回の CALET ガンマ線バーストモニターには XRF の観測される X 線領域から超過成分などが観測される高エネルギー領域に渡る広帯域の観測を目標の一つとしている。

2 CALET 計画

2.1 国際宇宙ステーション

国際宇宙ステーション (International Space Station : ISS) は地球や宇宙の観測、宇宙環境を利用した様々な研究や実験を行うための有人施設である。アメリカ合衆国、ロシア連邦、日本、カナダ、欧州宇宙期間が協力して建設を行った。ISS は地上から 400 km 上空の熱圏を 7.7 km/sec で飛行し、地球を約 90 分で 1 周する。

2.2 CALET 計画

CALET(「カロリメータ型宇宙電子線望遠鏡 (CALorimetric Electron Telescope)」の略である) は 2014 年に HTV 5 号機 (コウノトリ) によって打ち上げられ、ISS の日本実験モジュール「きぼう」の船外プラットフォームの第 2 期利用計画として開発中であり、高エネルギー電子やガンマ線などの宇宙線を観測するミッションである。CALET は大きく分けて 2 つの検出器で構成される。一つは早稲田大学が中心となって開発を進めているカロリメータ (CAL) である。この検出器は高エネルギー電子線成分観測を主目的とし、CHD,IMC,TASC の 3 つの検出器を使い数 GeV から 10 TeV の測定をするのがねらいである。もう一つは青山学院大学が中心となって開発を行っているガンマ線バーストモニター (CGBM) である。CGBM は 7 keV~20 MeV 領域の X 線・線の観測を行う。CAL の観測レンジは ~ 数 GeV なので CALET 全体としては 7 keV~ 数 GeV と幅広い観測が可能である。なお、CALET のミッション期間は 5 年以上を想定している。

2.3 CALET ガンマ線バーストモニター

CALET ガンマ線バーストモニタ (CGBM) は GRB を観測主対象としているシンチレーション検出器である。この検出器はガンマ線だけでなく X 線にわたる広帯域に感度を持ち、硬 X 線領域は宇宙用として

は初めて使用される高いエネルギー分解能を有する $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ を使って測定する。CGBM は 7 keV~1 MeV を観測対象とする硬 X 線モニター (HXM) 2 機と 100 keV~20 MeV 観測対象とする軟ガンマ線モニター (SGM) 1 機と計 2 種類の検出器で構成されている。HXM と SGM 3 機の性能を下に示す。

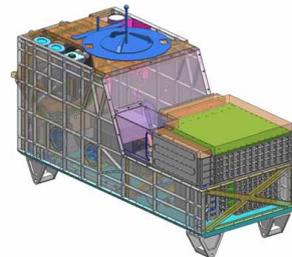


図 1: CALET の全体像、左側の水色の二つが HXM、画面一番上の円柱状のものが SGM

表 1: CGBM の性能表

CGBM	HXM	SGM
シンチレータ	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	BGO+acryllightguide
台数	2	1
観測帯域	7 keV~ 1 MeV	100 keV~20 MeV
有効面積	68cm ²	82cm ²
視野	天頂約 50 度	ほぼ全天

3 振動試験

CALET は HTV5(コウノトリ) によって打ち上げられる。H-IIB ロケットが大気を抜けきるまで激しい振動がかかることが想定される。仮にその振動に耐えきれず PMT (光電子増倍管) が破損がしたとすると、光エネルギーが電気エネルギーに正しく変換されなくなり著しく光量が下がる、データの取得ができなくなるといったことが起きる可能性がある。よって振動試験を行うことで SGM に打ち上げ時の振動耐性があることを示さなければならない。

3.1 振動試験概要

IMV 株式会社の試験場にて、X,Y,Z 軸にたいしてそれぞれ正弦波振動 (共振探査) 試験とランダム振動試験を行い、振動試験の前後にバックグラウンドスペクトルを取得し、K-40(1461 keV) のピークチャンネルの位置やエネルギー分解能を比べることで SGM に故障が無いかどうかを確認した。この検証方法は後述する熱真空試験においても同様である。

3.2 振動試験結果

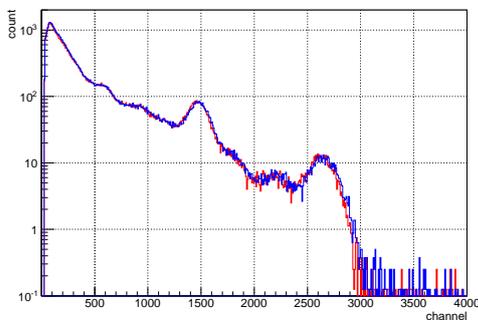


図 2: 振動試験前後のスペクトル
1500ch 付近の盛り上がりは 1461 keV である。図 2 のスペクトルのうち赤が振動試験前、青が振動試験後のスペクトルとなっている。

表 2: 振動試験前後の BG1461 keV の測定結果

測定時期	ピークチャンネル	エネルギー分解能
振動試験前 (1 月 8 日 赤)	1470.3 ± 1.4	0.127 ± 0.003
振動試験後 (1 月 10 日 青)	1482.22 ± 1.5	0.1265 ± 0.003

図 2 は青山学院大学の実験室で行った振動試験前後のスペクトル比較したものである。1461 keV のピークチャンネルは振動試験の前後で 0.8% 上がる結果となった。実験室の温度変化は 20~21 の 1 であり、BGO のゲイン、すなわちピークチャンネルと温度の関係は -1.5%/ のため今回の温度による誤差は 1.5% となる。従って今回は 0.8% の変化が見られたが

誤差の範囲内という結論になる。以上の結果から正弦波振動試験及びランダム振動試験をクリアしたといていいだろう。よって現在の SGM のデザインでは大気を抜けるまでの振動に耐性があるという結論にいたった。

4 熱真空試験

CALET は日本実験棟「きぼう」の船外プラットフォームに設置され、高エネルギー電子及びガンマ線の観測を行う。データを取得するためには CGBM (この試験では SGM) に高圧をかける。しかし設置される場所は船外、つまり真空環境下なのである。そういった環境で高圧をかけると PMT のプリーダー回路で放電がおこる可能性がある。また宇宙国際ステーションが地球を周回した際に想定される温度は -17~35 と大きな変動がある。BGO 結晶単体については熱サイクルが以前かけられているが、組みあがった状態の SGM としては今回が初めてである。温度変化により SGM のネジが緩み BGO と PMT の接着面が弱くなるといったことが起こり得る。また放電がおこった場合、最悪の場合測定機器が破壊されデータの取得ができなくなったり、そういった状態にならなくても取得したデータに異常が見られるかもしれない。上記の事から熱真空試験を行うことで真空時温度変化耐性を把握しておかなければならない。

4.1 熱真空試験概要

2013 年 1 月 12 日 ~15 日の 5 日間、相模原にある宇宙科学研究所で熱真空実験装置に SGM を入れ、真空下で温度変化を -30~45 と想定される温度よりも過酷な条件をかし、その環境下で SGM に高圧をかけ測定を行った。5 日間昼夜を問わず行うため、異常が起こったときに誰かが対処できる体制をとった。温度変化率は 0.2 /min とし、-30~45 という温度変化を 3 サイクルさせ、その中で HV (ORTEC 556) で高圧をかけてデータロガーを使い、高圧の変化の割合を測定することで放電の有無の確認をした。さらに、同時にバックグラウンドスペクトルを継続的に取得し、異常がないかを調べた。

5 熱真空試験結果

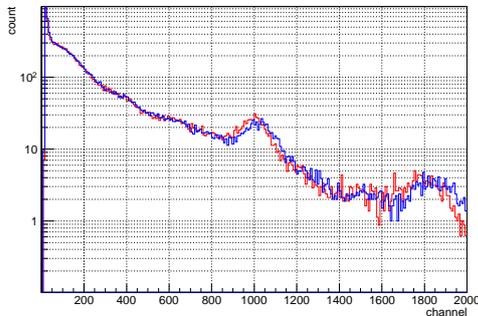


図 3: 熱真空試験後のスペクトル比較
1000 ch にある盛り上がりは 1461 keV である。スペクトルはそれぞれ試験前が赤、試験後が青となっている。

表 3: 熱真空試験後の BG1461 keV の測定結果

測定時期	ピークチャンネル	エネルギー分解能
熱真空試験前 (赤)	1002.43 ± 2.37	0.120 ± 0.010
熱真空試験後 (青)	1025.37 ± 2.81	0.134 ± 0.007

図 3 は真空層を真空に引き、熱サイクルを開始し、そのはじめと終わりにとったスペクトルの比較したものである。ピークチャンネルは熱真空試験前後で 2.2% 上がる結果となった。試験前のスペクトルは 25 という一定温度の中で十分にさらしたのちに測定を行って得たのに対して、試験後のスペクトルは、最終サイクルを終え -30 から試験前と同じ温度の 25 に戻して測定したつもりであったが、完全に戻りきっていなかったと考えるのが妥当である。なぜなら BGO におけるピークチャンネルと温度の関係は -1.5%/ $^{\circ}\text{C}$ なので、2.2% 上がったということは、BGO の温度が約 1.46 $^{\circ}\text{C}$ 低いという結果になるからである。BGO の温度は恒温槽の温度が設定値に達してから約 2 時間 30 分ほど遅れて安定するが、真空試験後に取得したスペクトルは 2 時間 40 分後であった。これによる BGO の温度は、温度変化率 0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ より 2 $^{\circ}\text{C}$ となる。よって光量には 3% のずれが見込まれる。よっ

て本測定の試験前後のスペクトルは誤差の範囲内で一致していると結論できる。以上の結果から熱真空試験はクリアしたといっていいただろう。よって SGM には真空環境下における温度変化に耐性があることが言えるので、SGM は ISS 設置後の観測に問題はないという結論に至った。

6 Conclusion

振動試験と熱真空試験の試験前後でスペクトルを比較することで性能の確認を行ったが、性能の悪化は見られなかった。全試験後、青山学院大学の実験室で動作確認を行ったところスペクトルに異常は見られなかった。よって現在の SGM は振動耐性及び真空下温度変化耐性は満たしているといえる。

7 参考文献

Reference

- [1] 早稲田大学 CALET Web サイト : http://www.crlab.wise.sci.waseda.ac.jp/?page_id=61
- [2] 振動光学の基礎知識 : <http://www.emic-net.co.jp/technical/technical/shindoukougaku.html>
- [3] Glen F.Knoll 「Radiation Detection and Measurement」 日刊工業新聞社
- [4] 応用光研工業株式会社 HP : http://www.oken.co.jp/web_oken/Toku1_jp.htm
- [5] 藤井信夫 「なっとくする電子回路」 講談社
- [6] ケーブル / コネクタ : <http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~koba/mem/cable.html>