

# CALET の運用及びデータ解析・管理システムの概要

赤池 陽水<sup>\*1</sup>, 浅岡 陽一<sup>\*2</sup>, 上野 史郎<sup>\*3</sup>, 田村 忠久<sup>\*4</sup>, 寺澤 敏夫<sup>\*1</sup>,  
富田 洋<sup>\*3</sup>, 鳥居 祥二<sup>\*2</sup>, 中川 友進<sup>\*3</sup>, 仁井田 多絵<sup>\*2</sup>

## Data Analysis and Handling for CALET

Yosui AKAIKE<sup>\*1</sup>, Yoichi ASAOKA<sup>\*2</sup>, Shiro UENO<sup>\*3</sup>, Tadahisa TAMURA<sup>\*4</sup>, Toshio TERASAWA<sup>\*1</sup>,  
Hiroshi TOMIDA<sup>\*3</sup>, Shoji TORII<sup>\*2</sup>, Yujin E. NAKAGAWA<sup>\*3</sup> and Tae NIITA<sup>\*2</sup>

### Abstract

CALorimetric Electron Telescope (CALET) is a new observatory to be placed on the International Space Station in 2014 to carry out the accurate measurements of electrons in 1 GeV – 20 TeV, gamma-rays in 10 GeV – 10 TeV and protons and nuclei in several 10 GeV – 1000 TeV. The scientific objectives of the mission are mainly to search for nearby cosmic ray sources and dark matter signatures. CALET, with its imaging and deep calorimeter, provides excellent energy resolution and high background rejection, which are confirmed by Monte Carlo simulations and accelerator beam experiments. In this paper, we present the data analysis methods based on simulations and experiments with the ground system for CALET operation and data handling.

Key words : cosmic ray, calorimeter, International Space Station, ground analysis system

### 概 要

CALorimetric Electron Telescope (CALET) は国際宇宙ステーションの「きぼう」に搭載予定の宇宙線観測装置で、2014年から5年間の観測を実施予定である。CALETの主検出器は、電子（1 GeV – 20 TeV）、ガンマ線（10 GeV – 10 TeV）の観測に最適化したカロリメータで、優れたエネルギー分解能と強力な粒子識別能を有し、宇宙線近傍加速源と暗黒物質候補の探索が主な目的である。観測性能については、これまでに気球実験や加速器実験で検証が行われており、シミュレーション計算や加速器実験結果から高い精度が確認されている。本論文では、これらの性能評価を基に CALET が取得するデータの解析手法について解説する。また運用中における CALET の地上システムや、データの取り扱いについてその概要を紹介する。

### 1. はじめに

CALorimetric Electron Telescope (CALET) 実験は、国際宇宙ステーション（Internal Space Station: ISS）の日本実験棟「きぼう」の船外プラットフォームに搭載予定の宇宙線観測装置で、2014年度から運用を開始し、5年間の観測を行う予定で開発が進められている。CALETはJAXA宇宙環境利用センターと早稲田大学を中心とした、イタリア（ASI）、アメリカ（NASA）との共同ミッションとして開発が実施されている。高エネルギー電子成分（1 GeV – 20 TeV）、ガンマ線（10 GeV – 10 TeV）、陽子・原子核成分（数 10 GeV – 1000 TeV）の観測により、近傍加速源や暗黒物質候補の探索という高エネルギー宇宙物理学の主要な課題に挑戦するとともに、陽子・原子核成分の高精度観測や太陽変動、ガンマ線バーストのモニタを実施し、体系的な高エネルギー宇宙の解明を目指している [1]。

CALETの主な観測対象である高エネルギー電子成分の観測を実現するためには、優れたエネルギー分解能と強力な粒子識別能を有する検出器による、長期間の観測が必要になる。我々はこれまでに、気球実験 [2] や加速器実験 [3, 4] を通じてその観測性能を実証しており、シミュレーション計算を駆使して解析手法を含む装置性能の最適化を図ってきた [5]。

---

\*1 東京大学 宇宙線研究所

\*2 早稲田大学 理工学研究所

\*3 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

\*4 神奈川大学 工学部

ここでは、CALET のエネルギー測定や粒子種選別などのデータ解析手法について、シミュレーション計算や加速器実験で得られた実績を基に詳述する。

CALET が ISS の軌道上で取得するデータは、これまでの船外プラットフォームにおける実験と同様に、ISS が持つ通信経路を利用して筑波宇宙センターで受信し保存される。CALET のデータは運用やモニタのために早稲田大学に設置される CALET オペレーションセンター (WCOC: 仮称) でほぼリアルタイムに受信し、軌道上データの地上モニタを実施するとともに、早稲田大学を中心とする国際共同チームによりサイエンスデータの解析を行う。このような地上系運用システムの概要についても紹介する。

## 2. CALET の概要

### 2.1. 観測目的

高エネルギーの電子は、宇宙空間を伝播中に、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱の影響を受けて、エネルギーの 2 乗に比例してエネルギーを失う。このため、エネルギーの高い電子ほど寿命が短いという特徴を有する。従って、高エネルギー領域では地球から比較的近傍の加速源の影響を強く受けたエネルギースペクトルが理論的に予想される。最近の観測によると、PAMELA[6] や AMS-02[7] が、図 1 に示すようなエネルギーと共に増大する陽電子比を報告した。これはそれまで標準的に考えられてきたような、陽子が星間物質との相互作用で陽電子を生成する伝播モデル [8] だけでは説明が不可能で、その起源が大きな注目を集めている。ATIC[9] や PPB-BETS[10] の気球実験、及び Fermi[11, 12] による衛星実験では、電子 + 陽電子のエネルギースペクトルを観測し、600 – 800 GeV のエネルギー領域において、程度の違いはあるものの、やはり過剰な成分を報告している。これらは、近傍パルサーなどの天体起源の可能性とともに、暗黒物質の対消滅・崩壊で生成される (陽) 電子の兆候とも考えられており、今後より詳細な観測が望まれている状況にある。

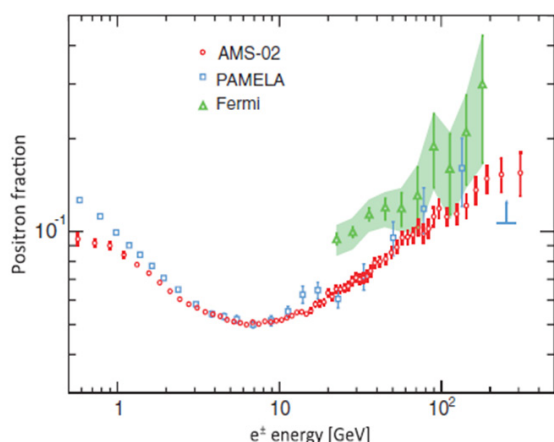


図 1 陽電子 / (電子 + 陽電子) のエネルギースペクトル [7]

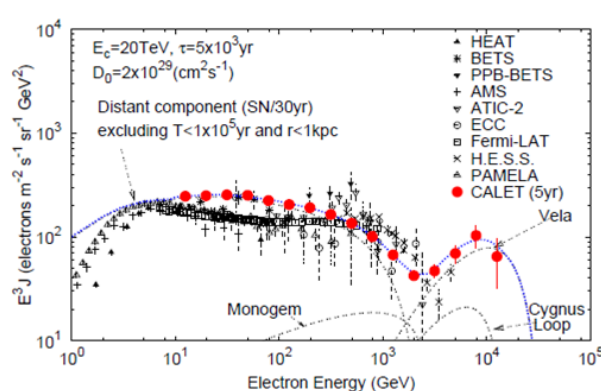


図 2 電子 + 陽電子 のエネルギースペクトルと CALET の観測予測

また 1 TeV 以上のエネルギー領域は、直接観測ではエマルジョン・チェンバーによる気球実験 [13] の観測例があるだけで、まだほとんど観測が行われていない。このエネルギー領域に飛来する電子の候補となる加速源は、地球近傍 1 kpc 以内、1 万年以下の加速源に限られるため、図 2 に示すように超新星残骸 Vela などの直接的な影響が明確にエネルギースペクトルに現れることが理論的に示唆されている [14]。CALET は、電子 + 陽電子のエネルギースペクトルを 1 GeV – 20 TeV の広範囲かつ約 2 % の高精度で観測することで、新たな発見に挑戦するとともに宇宙線の起源や加速・伝播機構の体系的な解明を目指している。

### 2.2. 観測機器

CALET の観測装置を図 3 に示す。CALET の観測器は主検出器であるカロリメータ (CAL) と、ガンマ線バーストモニタ (CGBM) から構成され、補助的な装置としてスターセンサ (ASC) や GPS 受信機 (GPSR)、ミッションデータ処理回路 (MDC) などから構成される。図 4 に、主検出器であるカロリメータの概要を示す。カロリメータは、入射粒子

の電荷を測定する Charge Detector (CHD)、粒子シャワーの初期発達の様子を検出し、入射粒子の到来方向や電荷の有無を計測する Imaging Calorimeter (IMC)、エネルギー測定や粒子バックグラウンド除去を担う Total Absorption Calorimeter (TASC) から構成される。

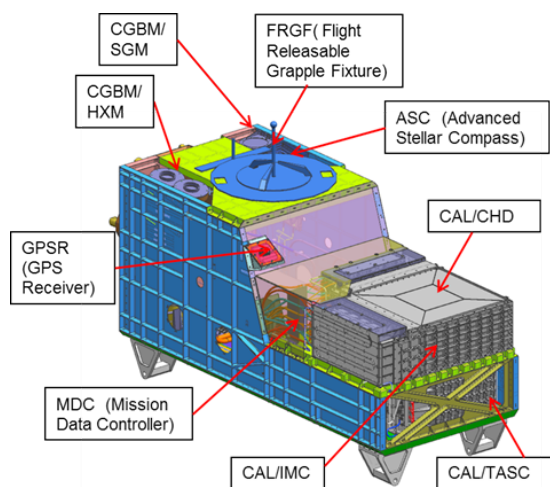


図3 CALET 観測装置の概要

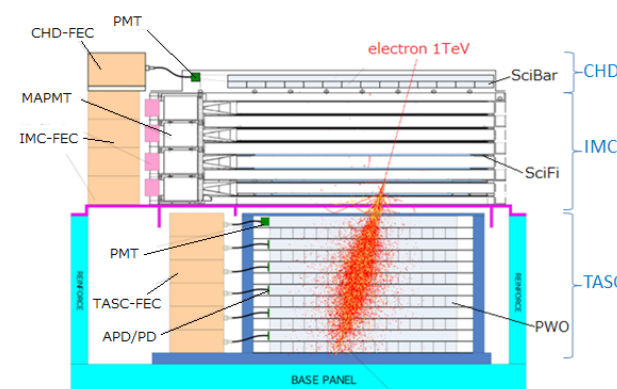


図4 カロリメータの概要と電子 1 TeV の観測例

### 2.2.1. Charge Detector

CHD は検出器最上部に位置する検出器で、電離損失量の値から入射粒子の電荷を測定する。検出器は、幅 32 mm、長さ 450 mm、厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータを 14 枚並べたものを X、Y 方向に 1 層ずつ重ねた構造をもつ。IMC から得られる入射位置の情報と組み合わせることで電荷を決定することができる。また、入射位置に CHD の信号の有無を検知することで、ガンマ線の識別に使用することもできる。

### 2.2.2. Imaging Calorimeter

IMC は、8 層のシンチレーティングファイバーベルトと、7 層のタングステン板を交互に積層したサンプリング型のカロリメータである。入射粒子のシャワーの初期発達形状を詳細に計測し、到来方向の推定や電荷の判別を行う。タングステン板は、0.2 放射長 ( $X_0$ ) の板が 5 枚、1  $X_0$  の板が 2 枚の計 3  $X_0$  であり、各シンチレーティングファイバーベルトは、断面 1 mm<sup>2</sup>、長さ 448 mm のシンチレーティングファイバー (SciFi) を 448 本平行に並べたものを 2 層直交して並べた構造となる。これらを組み合わせることで、3 次元的なシャワー発達の様子を仔細に捉えることが可能である。

### 2.2.3. Total Absorption Calorimeter

TASC は検出器下部に位置する検出器で、阻止能の高い無機シンチレータ (PWO) を用いた不感領域が非常に小さい全吸収型のカロリメータである。各 PWO の大きさは幅 19 mm、長さ 326 mm、厚さ 20 mm であり、1 層 16 本並べたものを X、Y 交互に計 12 層重ねた構造を持つ。TASC の厚みは 27  $X_0$  あり、TeV 領域の電子シャワーエネルギーを捉える必要十分な厚みを有する。この厚い検出器を採用することで、高精度なエネルギー測定性能を実現し、細分化された構造によりシャワー形状を捉えることで、強力な粒子識別性能を発揮する。

## 2.3. カロリメータの観測性能

検出器の観測性能については、シミュレーション計算 [5] や加速器実験 [3, 4] によって性能検証を行っている。検出器シミュレーションには、EPICS[15] を用いた。表 1 に、CALET の基礎的な観測性能を示す。検出器の幾何学的因子は 1200 cm<sup>2</sup>sr あり、これまでの観測結果 [11] から外挿すると、1 TeV 以上の電子を 5 年間の観測で約 1000 例収集することが可能である。また、TeV 領域の電子観測を実現するために必要な 10<sup>5</sup> の陽子除去性能や、精確なエネルギースペクトル測定に不可欠な 2~3 % のエネルギー分解能を有する点が、CALET の大きな特徴である。

表 1 カロリメータの観測性能

	幾何学的因子 $S \Omega$ [cm <sup>2</sup> sr]	エネルギー分解能 $\Delta E$ [%]	角度分解能 $\Delta \theta$ [degree]	陽子除去性能 e/p	電荷分解能 $\Delta Z$ [e]
電子	1200	2 (>100 GeV)	1.1 ~ 0.11 (1 GeV – 20 TeV)	10 <sup>5</sup>	–
ガンマ線	1000	2 (> 100 GeV)	0.54 ~ 0.22 (10 GeV – 10 TeV)	–	–
陽子・原子核	600	30 ~ 20 (p ~ Fe)	< 1	–	0.15 – 0.3 (p ~ Fe)

### 3. CALET のデータ解析

CALET は、検出器に入射する宇宙線が検出器中で引き起こすシャワー粒子を可視化することによって、粒子の到来方向やエネルギーを測定し、そのシャワー形状から粒子種を特定する。ここでは、加速器実験やシミュレーション計算を例に、粒子識別やエネルギー測定に関する CALET の主要な解析手法について述べる。

#### 3.1.1. エネルギー較正

各検出器からのシグナルは、最小電離損失粒子（Minimum Ionizing Particle: MIP）によるシグナルを基準として絶対値を較正する。最小電離損失とは、相対論的速度を持つ荷電粒子の電離損失によるエネルギー損失量である（厳密にはその最小値）。図 5 は、TASC を構成する PWO のミュオン粒子通過時における ADC 分布で、CERN-SPS 加速器実験の測定例である。この分布の最頻値を 1 MIP と定義する。エネルギー損失量はシンチレータごとに既知であるので、ADC 値を粒子数（=ADC 値/MIP）に換算することで、シミュレーション計算との比較からエネルギーの推定が可能になる。図 6 は、CERN-SPS の加速器実験で得られた電子 10 GeV のシャワー粒子を観測した際の TASC 中における全粒子数分布である。EPICS[15] を用いた検出器シミュレーションが、実験データをよく再現していることが確認できる。

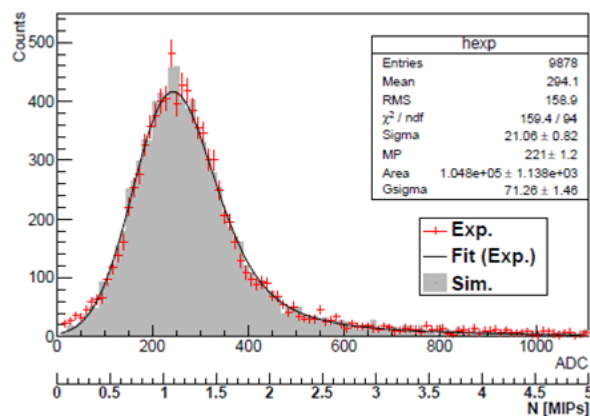


図 5 ミュオン粒子による最小電離粒子の TASC-PWO の ADC 分布（CERN-SPS 加速器実験 [3]）

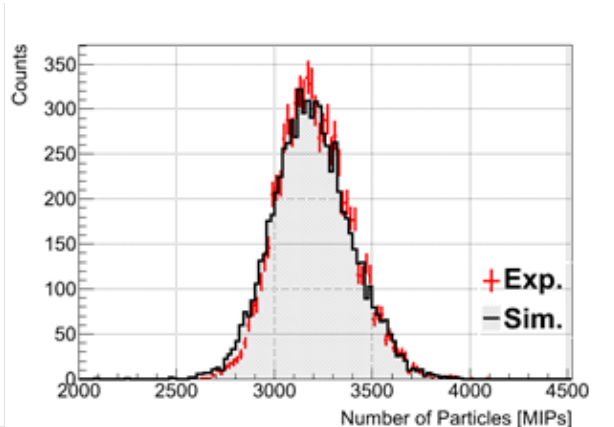


図 6 TASC における粒子数分布（電子 10 GeV: CERN-SPS 加速器実験 [3]）

#### 3.1.2. 到来方向測定

粒子の到来方向は、IMC 中のシャワー粒子によるシグナルをフィッティングすることにより推定する。シグナルは、後方散乱の影響でシャワー軸近辺以外からも検出されるため、シャワーが十分に発達した大きなシグナルとして出力される最下層の SciFi において、まずシャワー軸の位置をエネルギー重心から決める。そして、ここを基準の一つずつ上層に位置を推定して、各層のシャワーのエネルギー重心を求める。それらを直線でフィッティングしてシャワー軸を決定し、粒子の到来方向を求める。



### 3.1.3. 電荷測定

入射粒子の電荷測定には、検出器最上段に位置する CHD、及び IMC を用いる。荷電粒子の電離損失量は入射電荷の 2 乗に比例するため、シャワー軸で推定した入射位置のシンチレータのシグナルの大きさを調べることで粒子の電荷を決定することができる。厳密には、シンチレータの発光量は消光（クエンチング）効果のために、電荷の 2 乗の比例関係からは外れる特性を持つが、この消光効果の度合いを含め、加速器実験（HIMAC、GSI 加速器、CERN-SPS）で電荷測定性能を検証し、入射電荷  $Z = 40$  までの荷電粒子の測定が可能であることを確認している。電荷分解能は、 $0.15 \sim 0.3e$  である [4]。

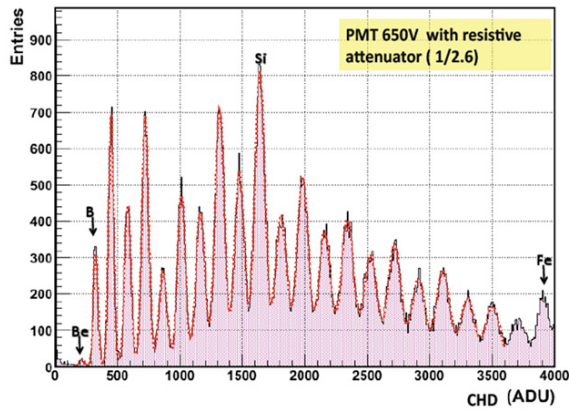


図 7 CHD で測定した電荷分布（GSI 加速器実験 [4]）

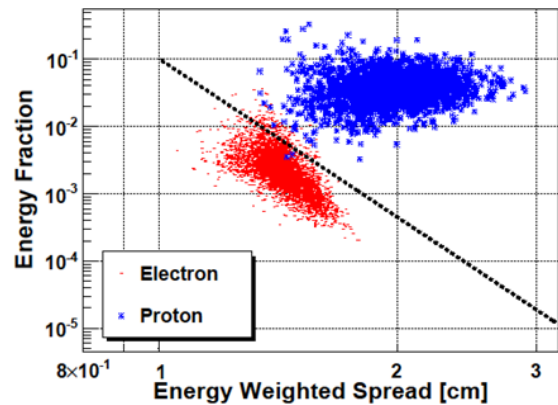


図 8 TASC におけるシャワー形状による電子陽子識別 [5]

### 3.1.4. 電子 / 陽子識別

電子の観測では、陽子が大きなバックグラウンドになる。その存在比はエネルギーが高くなるほど大きくなり、1 TeV 領域における陽子の存在比は、電子に対しておよそ 1000 倍になる。従って、TeV 領域において電子観測における陽子の影響を数 % 程度以下に抑えるためには、検出器には  $\sim 10^5$  の陽子除去性能が要求される。

CALET では、この電子と陽子の識別を、検出器中のシャワー発達の差異から判別する。電子は電磁相互作用により検出器中で電磁シャワーを引き起こすのに対して、陽子は核相互作用によるハドロン多重発生からシャワーが始まるため、その発達の形状が電子とは大きく異なる。検出器の垂直方向の吸収層の厚みは電子に対して  $30 X_0$  あるのに対して、陽子に対しては  $1.3 \text{ m.f.p.}$  (平均自由行程) である。従って、電子は TeV 領域でも検出器中でほぼすべてのエネルギーを失い、検出器下層部でシャワー粒子数が衰退するのに対して、陽子は 2 次ハドロンの逐次相互作用等により、検出器下部においてもシャワー粒子数は衰退しない。この深さ方向のシャワー発達特性の違いと、検出器中のシャワー粒子の横拡がりの大きさの差を用いて電子と陽子の識別を高精度に行うことが可能である。図 8 に、横軸にシャワー粒子の横拡がり（平均値）、縦軸は TASC 中の全エネルギー損失と最下層のエネルギー損失の比をとって、シミュレーション計算から期待される電子と陽子の分離の様子を示す。1 TeV の電子と、そのバックグラウンドとなる 1 TeV 以上の陽子を、観測結果に基づくエネルギースペクトルを仮定して生成したイベントをプロットしている。この散布図を利用して、1 TeV 領域で  $10^5$  の陽子除去性能を達成可能であることを確認している [5]。これは、CALET が TeV 領域の電子シャワーに対して十分な厚さを持つ検出器であることと、シャワー形状を高精度に可視化できる多チャンネル構造を持つことから実現される。

## 4. 観測データ処理システム

### 4.1. データ内容

CALET のデータは、カロリメータのサイエンスデータに加えて、CGBM の定時データ、House Keeping (HK) データ、GPSR や ASC の定時データなどから構成される。ここで定時データとは、一秒周期で取得されるデータの総称である。HK データも定時データとして周期的に取得されている。多チャンネルのサイエンスデータは、ペDESTAL 相当の信号を削除する「ゼロサプレス」処理を行い可変長のデータとすることで、全データ量を抑える。表 2 に、CALET の主なデータ内容を示す。

表 2 CALET のデータ内容

<b>■ CAL サイエンスデータ</b> CHD (全 28ch) : 最大 1094 byte ~ 1 kB IMC (全 7168ch) : 最大 28972 byte ~ 29 kB TASC (全 192ch) : 最大 2124 byte ~ 2 kB Total ~ 32 kB <b>■ CGBM の定時 (サイエンス) データ</b> パルスハイト : 6608 byte ~ 7 kB タイムヒストリ : 4976 byte ~ 5 kB	<b>■ House Keeping データ</b> 温度、電流、電圧、カウントレートなど : 1094 byte ~ 1 kB <b>■ GPSR の定時データ</b> <b>■ ASC の定時データ</b> <b>■ その他</b> ISS の軌道情報など
--	--

#### 4.2. 軌道上におけるイベントトリガーシステム

ISS 軌道上における運用中、CALET では観測対象に応じて以下のような 3 種類のトリガーモードを使用する。これらは、各トリガー用の検出器からのシグナルのロジックの組み合わせで実現する。

- **High Energy Shower Trigger** : 10 GeV 以上のシャワー粒子が観測対象である。CALET が通常使用するシャワートリガーとして運用する。このトリガーは CHD と IMC 上層の信号を要求しないので、荷電粒子に加えてガンマ線の取得も可能である。シミュレーションによる予測では、バックグラウンドを含め平均 12 イベント/sec でイベントが取得できる見込みである。
- **Low Energy Shower Trigger** : 1 GeV 以上の電子を観測対象とする。これは、太陽モジュレーションの研究のため、より低エネルギー領域の一次宇宙線を測定できるように、地磁気緯度の影響が小さい高緯度地域 (cutoff rigidity < 2 GV) で使用する。
- **Single Trigger** : 検出器校正用のトリガーである。宇宙線の最小電離粒子が取得できるように、各トリガー検出器の閾値を下げ、定期的に使用する。

この他にも、MDC は CGBM でのガンマ線バースト検出時に予め指定しておいたコマンド列をマクロコマンドとして自動実行する機能を有しており、ガンマ線バーストの候補天体が視野に入っている可能性のある 10 分程度の期間、低エネルギーのガンマ線取得に特化したトリガーモードを実現することができる。また、検出器保護のため、CHD において指定した閾値を超える高カウントレートが発生した場合にはマクロコマンドの実行による対応が可能になっている。高カウントレートが予測される South Atlantic Anomaly や高緯度地方では、保護処理用マップを適用することで、マクロコマンドの実行による処理が可能である。これらの機能は、軌道上の観測環境に応じて柔軟な運用が行えるように自由度の高い設計となっている。

#### 4.3. データのダウンリンク

CALET が取得するデータは、これまでの他の ISS 船外実験の運用形態に倣い、ISS から NASA と JAXA が有する 2 種類の経路を利用し、JAXA の筑波宇宙センター (TKSC) に設けられた User Operations Area (UOA) で受信する。データ通信には、それぞれ中速系 (~300 kbps) と低速系 (~35 kbps) を使用する。UOA では、データの保存やモニタ、コマンドの作成・送信を行う。CALET に関するすべてのデータはその後、早稲田大学に設置される Waseda CALET Operations Center (WCOC: 仮称) へ配信される。UOA から WCOC へ配信されるデータには二つの系統が存在する。一つは、ISS の可視時間に装置の状態やデータ取得状況をリアルタイムにモニタリングするための送信速度を最優先した生データ配信で、もう一つはデータ解析のための時間情報、イベント情報などを整理した Level0 データ配信である。WCOC では生データを常時監視するとともに、Level0 データを物理量に変換し、Level1 データとして CALET の国内外の各研究機関へデータ解析用に配信する。図 9 に、データダウンリンクの概念図を示す。CGBM のデータについては速報性が要求されるため、バースト検出の時間情報などの即時配信を行う予定である。10 秒未満の遅延で WCOC へ配信されるリアルタイムデータを用いた The Gamma-ray Coordination Network (GCN)[16] や The Astronomer's Telegram (ATel)[17] への即時配信、及び The Interplanetary Network (IPN)[18] への参加が CGBM チームによって具体的に検討されている。

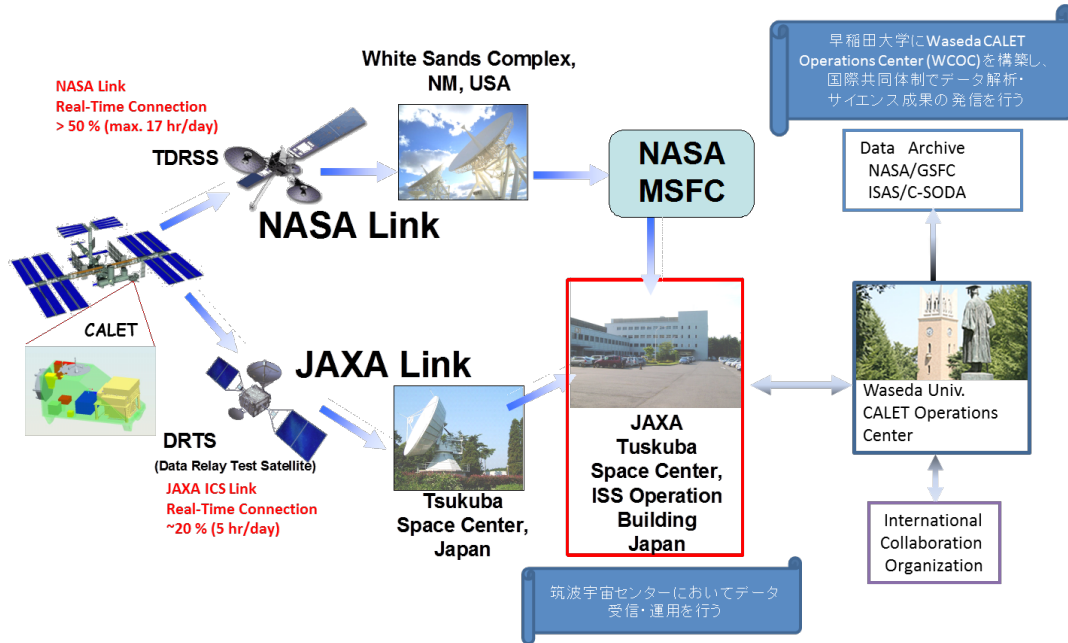


図 9 データリンクの概念図

#### 4.4. 軌道上運用計画

CALET の運用は、TKSC/UAO 及び WCOC にて行う。JAXA は装置健全性の確保に、早稲田大学はサイエンスデータの質の確保に責任を持ち、明確な役割分担の下、密接に協力しながら高効率運用を支える。そのため、WCOC では、UAO と同様に CALET メンバーの研究者が常時 HK データモニタやイベントモニタ等のクイックルック (QL) によりリアルタイムデータを監視し、必要に応じて UOA からコマンドの配信を行う。緊急な対処が必要な事態が発生した場合に、UAO と WCOC 間での情報伝達を迅速に行うため、両者では同一の QL が監視可能となるようなシステム設計がなされている。図 10 は、現在開発中の各チャンネルの温度等の HK データのモニタ表示の一例である。規定の範囲を逸脱した項目を検知した際は、アラートを出すなどのシステムを構築して常時監視できる設計になっている。図 11 は、サイエンス（観測されたシャワー粒子）データに対する QL システムのイベント・ディスプレイの例であり、30 GeV の陽子検出時の例である。各コンポーネントの ADC 値に応じて色分けしており、トリガーモードと各トリガー信号のヒットパターンを表示している。このモニタ画像などを用いてサイエンスデータの監視を行う。

リアルタイムデータ配信に対して、科学解析用のデータとなる Level0 データでは、時系列補正とデータ欠損の補完が行われている。Level0 データは中速系リンクを介して送出されたデータ packets を全て含み、データ形式は可変長のバイナリとなっている。ファイルサイズやファイル数を考慮して 1 時間に 1 ファイルが生成される。Level0 データは CALET データ解析における実質的な一次データとなるため、完備性が確実に確認できるように設計されている。

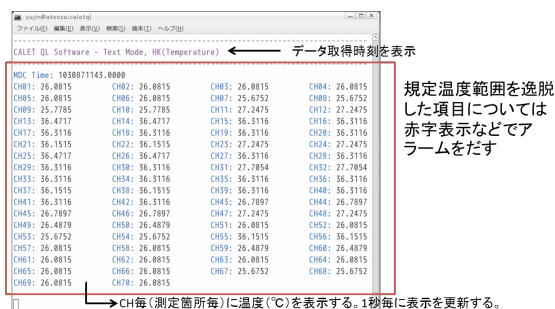


図 10 HK データモニタ例

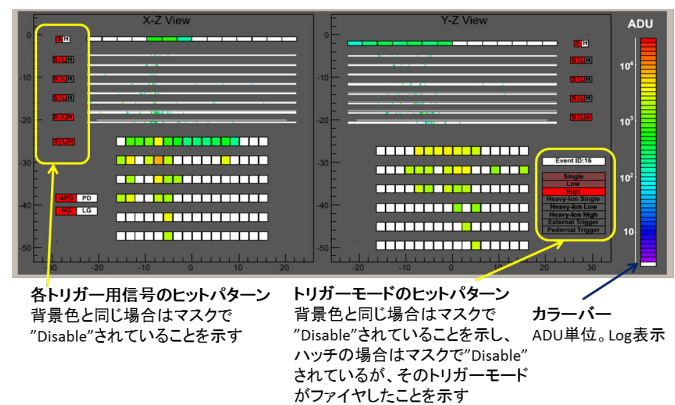


図 11 観測データのモニタ画像表示例

#### 4.5. データ解析・アーカイブ

CALET の科学解析用データの取り扱い、国際研究チーム間で合意されている DPAP (Data Processing and Analysis Plan) と呼ばれる文書に基づいて行われる。WCOC では、Level0 データに各 ADC 値を物理量に変換するなどの処理を加えた Level1 データを生成し、国内外の各研究機関へ配信する。その後、各機関は DPAP の規定に従って高次のレベルのデータを生成し、研究チーム内で合意を前提としてエネルギースペクトルや到来方向分布などの観測結果の導出を行う。CALET が取得するデータは、一部速報する CGBM のデータを除き、観測後 2 年間 CALET の共同研究者が優先権をもってデータ解析を行う。また科学解析結果を含む高次レベルのデータに関しては、日米伊の各データアーカイブサイトに恒久的な保存を行う計画である。アーカイブサイトの候補の絞り込みや、アーカイブ用データの形式やアーカイブ過程の詳細について現在計画中であり、日本では ISAS C-SODA の利用を予定している。

### 5. まとめ

CALET は、国際宇宙ステーションにおける本格的宇宙線観測プロジェクトであり、2014 年の打ち上げ後 5 年間の観測により、これまで実現できなかった高精度かつ高統計な宇宙線諸成分とガンマ線バーストの観測を目指している。CALET が取得するデータは、筑波宇宙センター (TKSC) を経由して、早稲田大学に設置する CALET オペレーションセンター (WCOC) へほぼリアルタイムで送信する。WCOC で各データを物理量に変換した後、サイエンスチームの各研究機関へ配信し、データ解析を実施する。現在、これまでの気球実験や加速器実験の経験を基に、観測運用やデータ解析に向けたハードウェアとソフトウェア両面について開発を行い、2014 年度予定の打ち上げを目指してデータ解析システムの構築を実施している。

### 参考文献

- [1] S. Torii et al., “Overview of the CALET Mission to the ISS”, Proc. of International Cosmic Ray Conference, Vol.6, 347-350, 2011
- [2] 仁井田多絵 他, “気球搭載型 CALET プロトタイプ (bCALET-2) による電子・ガンマ線観測”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 大気球研究報告, JAXA-RR-11-008, 17-46, 2012
- [3] Y. Akaïke et al., “CALET observational performance expected by CERN beam test”, Proc. of International Cosmic Ray Conference, CR-IN 0726, 2013
- [4] M. S. Marrocchesi et al., “Beam test performance of a scintillator-based detector for the charge identification of relativistic ions”, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 659, 477-483, 2011
- [5] Y. Akaïke, “Expected CALET Telescope Performance from Monte Carlo Simulation”, Proc. of International Cosmic Ray Conference, Vol.6, 367-370, 2011
- [6] O. Adriani, et al., “An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV”, Nature, 458, 607-609, 2009
- [7] M. Aguilar et al., “First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5 – 350 GeV”, Phys. Rev. Lett. 110, 141102, 2013
- [8] I. Moskalenko and A. Strong, “Production and Propagation of Cosmic-Ray Positron and Electrons”, Astrophys. J., 493, 694-707, 1998
- [9] J. Chang et al., “An excess of cosmic ray electrons at energies of 300-800 GeV”, Nature, 456, 362-365, 2008
- [10] K. Yoshida, et al., “Cosmic-ray electron spectrum above 100 GeV from PPB-BETS experiment in Antarctica”, Adv. Space Res., 42, 1670-1675, 2008
- [11] A. A. Adbo et al., “Measurement of the Cosmic Ray  $e^+ + e^-$  Spectrum from 20 GeV to 1 TeV with the Fermi Large Area Telescope”, Phys. Rev. Lett. 102, 181101, 2009
- [12] M. Ackermann et al., “Fermi LAT observations of cosmic-ray electrons from 7 GeV to 1 TeV”, Phys. Rev. D 82, 092004, 2010
- [13] T. Kobayashi et al., “Observations of High Energy Cosmic-Ray Electrons from 30 GeV to 3 TeV with Emulsion Chambers”, Astrophys. J., 760, 146-158, 2012



- [14] T. Kobayashi, et al., “The Most Likely Sources of High-Energy Cosmic-Ray Electrons in Supernova Remnants” , *Astrophys. J.*, 601, 340-351, 2004
- [15] EPICS HP: <http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/EPICSHome/index.html>
- [16] GCN HP: <http://gcn.gsfc.nasa.gov/>
- [17] ATel HP: <http://www.astronomerstelegam.org/>
- [18] IPN HP: <http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/index.html>