

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

仁井田 多絵*¹, 鳥居 祥二*¹, 小澤 俊介*¹, 笠原 克昌*¹, 村上 浩之*¹,
赤池 陽水*¹, 植山 良貴*¹, 伊藤 大二郎*¹, 荻部 樹彦*¹, 近藤 慧之輔*¹, 九反 万里恵*¹,
田村 忠久*², 吉田 健二*³, 片寄 祐作*⁴, 清水 雄輝*⁵, 福家 英之*⁶

Observation of electrons and gamma-rays with a balloon-borne CALET prototype (bCALET-2)

By

Tae NIITA*¹, Shoji TORII*¹, Shunsuke OZAWA*¹, Katsuaki KASAHARA*¹, Hiroyuki MURAKAMI*¹,
Yosui AKAIKE*¹, Yoshitaka UEYAMA*¹, Daijiro ITO*¹, Mikihiko KARUBE*¹, Keinosuke KONDO*¹,
Marie KYUTAN*¹, Tadahisa TAMURA*², Kenji YOSHIDA*³, Yusaku KATAYOSE*⁴,
Yuki SHIMIZU*⁵ and Hideyuki FUKUE*⁶

Abstract

We carried out the balloon experiments using CALET (CALorimetric Electron Telescope) proto-type detectors in May 2006 (bCALET-1) and August 2009 (bCALET-2) for verification of the detector performance and the capability of measuring cosmic rays at high altitude. The bCALET-2 instrument for observing the electrons and the gamma rays at energies in 1-100 GeV, is composed of an imaging calorimeter, consisting of 4096 scintillating fibers with a total of 3.6 radiation lengths of tungsten plates, and a total absorption calorimeter, consisting of crossed 60 BGO logs of 13.4 radiation lengths depth. The bCALET-2 was launched from the Taiki Aerospace Research Field, Japan Aerospace Exploration Agency, in Hokkaido, and flew successfully for 2.5 hours at a level altitude of 35 km. In this paper, we will present the spectra of electrons and gamma rays in the energy range of 1-100 GeV measured by bCALET-2, compared with our previous observations, bCALET-1 and BETS. The detector performance is studied by comparing with the simulations, and the cosmic ray fluxes, which are compatible with previous experiments, are successfully obtained.

Keywords: cosmic-ray electrons, atmospheric gamma-rays, balloon experiment, imaging calorimeter

概要

我々は、国際宇宙ステーション日本実験棟（きぼう）での高エネルギー宇宙線観測により、近傍加速源の発見や暗黒物質の探索を目指す CALorimetric Electron Telescope (CALET) の気球搭載型プロトタイプ観測装置 (bCALET) を開発し、bCALET-1 (2006年) と bCALET-2 (2009年) の2回にわたり観測実験を

*¹ Waseda University

*² Institute of Physics / Kanagawa University

*³ Department of Electronic Information Systems / Shibaura Institute of Technology

*⁴ Department of Physics / Yokohama National University

*⁵ Space Environment Utilization Center / Japan Aerospace Exploration Agency

*⁶ Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency

実施した。これらの観測は、CALETの先駆的観測として大気上層における電子・ガンマ線フラックスを求めることにより、観測装置の性能検証を行うことを目的としている。CALETの1/2スケールモデルであるbCALET-2は、入射粒子の飛跡を可視化するための解像型カロリメータ（IMaging Calorimeter : IMC）と、入射粒子のエネルギーを測定するための全吸収型カロリメータ（Total Absorption Calorimeter : TASC）から構成され、1 - 100 GeVの領域で、電子・ガンマ線の識別とエネルギー測定が可能である。気球観測は2009年8月27日、北海道のJAXA大樹航空宇宙実験場で行われ、高度35 kmにおける約2.5時間の観測の結果、約12,000例の宇宙線イベントを取得した。加速器実験やシミュレーション計算の結果を用いた、エネルギー較正、飛跡再構成、バックグラウンド除去などのデータ解析により、電子・ガンマ線それぞれについてエネルギースペクトルが求められている。この結果は、bCALET-1やBETS（1998年）などのこれまでの観測結果や計算に基づく予測値ともよく一致しており、今後のCALETの開発において大きな意義を持つ。

1. はじめに

宇宙線中の電子成分の起源は、超新星爆発の際に発生する衝撃波で加速され、シンクロトロン輻射と逆コンプトン散乱で（エネルギーの二乗に比例して）エネルギー損失を受け、拡散過程によって銀河内を伝播すると考えるモデルが有力である。このモデルによれば、TeV領域では、伝播時のエネルギー損失のため、電子の寿命が10万年以下になり、伝播距離が1 kpc以内に限られる。この条件を満たす近傍加速源の候補は超新星残骸ではVela, Monogem, Cygnus Loopなど数例にすぎない。理論計算からは、これらのソースを同定可能な、特徴を持つスペクトル構造がTeV領域に現れることが予測されている。このように、高エネルギー電子の観測は、他の宇宙線ハドロン成分の観測では困難な宇宙線加速の直接的検証が可能であるという特徴があり、これまでに多くの観測が実施されてきた[1]。

我々は、1993年以来シンチファイバーをアクティブなターゲットとした気球搭載型イメージング・カロリメータ（BETS : Balloon-borne Electron Telescope with Scintillating fibers）の開発を実施し、三陸大気球観測所におけるブーメラン気球[2]や南極周回気球（PPB : Polar Patrol Balloon）[3]による高エネルギー電子の観測を実施してきた。特に南極周回気球実験（PPB-BETS）では、国内の気球実験では実現できない2週間にわたる長時間の観測を実現し、観測領域としてTeVに迫ることができた。その結果、世界に先駆けてアクティブな装置による10 - 1,000 GeV領域の電子エネルギースペクトルの測定に成功している。BETSで開発したイメージング・カロリメータは、マグネットスペクトロメータでは困難なTeV領域でも電子観測が可能であり、近傍加速源を検出するための有力な観測手段であることが実証されたといえる。

これまでの観測結果において注目すべきこととして、上に述べた標準的モデルだけでは説明できない電子・陽電子の“過剰”が10 GeV以上の領域で観測され、超新星爆発以外の新たな電子・陽電子加速源の存在が示唆されていることが挙げられる。PPB-BETSの結果から、500 - 600 GeV領域で、幂型スペクトルに対する電子成分の“過剰”（ 3σ ）が観測されている[4]。これに相当する“過剰”は、エマルジョン・チェンバー（EC）実験[5]や米国のATIC（Advanced Thin Ionization Calorimeter）[6]による南極周回気球観測においても、エネルギー分解能と統計量に相応して観測されている。これらの結果と符合する、大変興味深い電子・陽電子成分の観測データが、PAMELA（Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics）[7]による衛星観測から得られている。PAMELAは、電子+陽電子に対する陽電子の割合（以下陽電子比）を1.5 - 100 GeVの領域で測定し、10 GeV以上の領域で陽電子比が、エネルギーとともに顕著に増大することを報告している。EC、ATICとPPB-BETSは、カロリメータを主体とした検出器であり、正負の電荷判別が出来ないが、陽電子の過剰が高エネルギー領域まで続けば電子+陽電子のスペクトルにも当然ながら“過剰”が現れると期待できるので、これらの結果はお互いに相補的な意味を持つと解釈されている。陽電子は、通常の超新星加速モデルでは二次的な成分と考えられるので、陽電子の過剰を説明するためには新たな加速源が必要となり、近傍パルサーにおけるガンマ線の電子・陽電子対生成や暗黒物質の対消滅・崩壊などのモデルが数多く提案され

ている。

PAMELA の後に打ち上げられたガンマ線衛星である Fermi/LAT の電子観測 [8] では、ATIC、PPB-BETS のような顕著な過剰は観測されていないものの、やはり標準的モデルでは説明できない“過剰”が検出されており、実験データの食い違いの説明とともに、これらの“過剰”を説明できる新たな加速源の確定が期待されている (図 1)。今後は、AMS-02 による陽電子・電子観測 [9] も始まりその成果が期待されるが、Fermi/LAT と AMS-02 はともに電子観測に最適化された装置ではなく、観測のエネルギー上限が 1 TeV 近辺に限られているため (前者はカロリメータの厚さ、後者はマグネットの磁場強度による制限)、TeV 領域の観測で期待される近傍加速源 (超新星残骸+パルサー) や暗黒物質の検出には十分な性能を備えているとは言い難い。

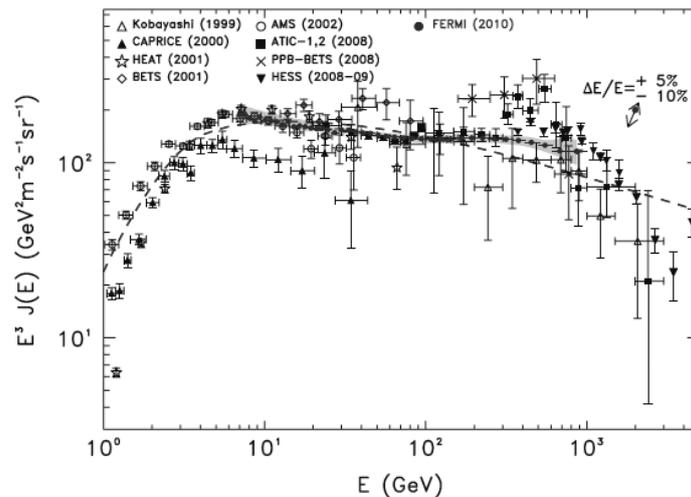


図 1：宇宙線電子 (+陽電子) エネルギースペクトルの観測結果と標準モデル (点線) の比較 [8]

TeV 領域での観測を高精度に実施して宇宙加速や暗黒物質の謎を解明するためには、高精度な電子選別とエネルギー測定が可能な装置の開発と、長期間にわたる宇宙空間での観測が不可欠となる。ソースの同定とスペクトル構造の分解のためには、2-3%のエネルギー分解能と、10%程度の異方性の検出が可能な角度分解能が必要とされる。このため、BETSの原理を用いてTeV領域での電子観測に利用できる高性能な観測装置としてCALET (Calorimetric Electron Telescope) を考案し、国際宇宙ステーション「きぼう」への搭載を目指して概念設計を実施した。この成果に基づく観測提案が、JAXA宇宙環境利用センターの「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォーム第2期利用の候補ミッションに採択され、2014年のHTV (H-II B Transfer Vehicle) 5号機による打ち上げを目標に搭載装置の開発がすすめられている [10]。この一環として、気球による先駆的観測と観測技術実証を目的として、気球搭載型CALETプロトタイプ (bCALET: balloon-borne CALET) の開発を段階的に進めて、bCALET-1 (2006) [11] と bCALET-2 (2009) [12] による観測を実施した。その結果、CALET開発のための不可欠な技術実証と、GeV領域での電子・ガンマ線の観測に成功している。本報告では、bCALET-2の装置概要と電子・ガンマ線の観測結果を中心に、bCALETの成果について報告する。

2. 検出器概要

bCALET-2は、CALETと同じコンポーネントで構成されているが、気球搭載時の重量軽減化のために面積を縮小した構造をしている。上部から、解像型カロリメータ (IMaging Calorimeter: IMC)、全吸収型カロリメータ (Total Absorption Calorimeter: TASC)、トリガーシステム、及びデータ収集回路システム (DAQ) となっている。トリガーシステムは気球実験のために最適化されており、粒子種別とエネルギー閾値に応じた機上でのデータ取得を目的としている。全体の重量は圧力容器を含めて303 kgである。装置全体の側面から見た構成図を図2に示す。装置の写真を図

3に示す。また、電子10 GeVが入射した場合のシャワーの検出例を図4に示す。

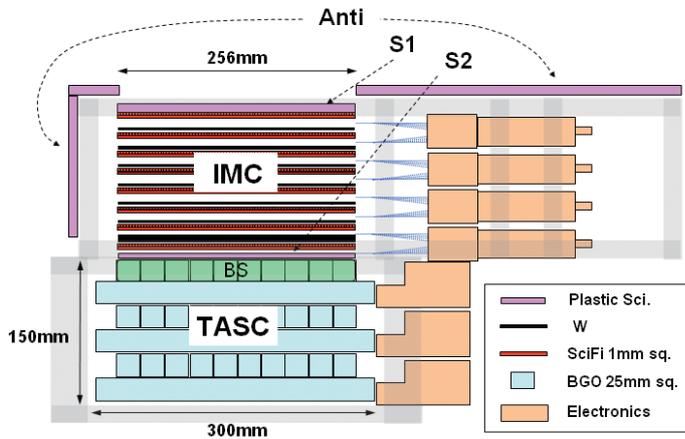


図2：bCALET-2装置側面概念図。IMCの上下にトリガー検出器であるS1及びS2が設置されている。TASCのBGOシンチレータはCFRPのケースに収められており、構造全体はアルミフレームを用いて形成している。



図3：bCALET-2装置写真。装置全体を円筒形の圧力容器（ベッセル）におさめるため、読み出し回路の下にDAQや高圧電源を設置し、電源装置はTASCの下に設置。



図4：シミュレーションによる電子イベント（10 GeV）のシャワーイメージ。左はX方向、右はY方向から見た側面図である。上段はIMC、下段はTASCで、色の濃さはシャワー粒子による損失エネルギーを表しており、暖色になるほど各センサーにおける損失エネルギーが大きい。

2.1. 解像型カロリメータ (IMC)

IMCは、入射粒子によるシャワーの初期発達段階を高い位置分解能で3次元的に可視化して、粒子の到来方向の決定とシャワー形状による粒子識別を行うことを目的としている。このため、検出層としてのシンチレーティングファイバー (SciFi) と吸収層であるタングステン板を交互に積層した構造をしたサンプリング型カロリメータである。検出層は、有感領域として長さ256 mm、1 mm角のSciFiを256本並べてベルト化したものをX-Y方向に直交させて1層とし、これを8層分積層して構成している。したがって、各層は256 mm×256 mmの範囲でX、Y方向それぞれに1 mmの位置分解能をもつ。吸収層として各ファイバー層の間に挿入されているタングステン板 (256 mm×256 mm)の厚みは、上から6層が0.43 放射長 (radiation length : r.l.)、最下層が1.0 r.l.で、合計は3.58 r.l.であり、電子・ガンマ線によるシャワー発達の初期段階を検出する機能を有している。

各SciFiのシグナルは、64chマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) を用いて、アノード毎に独立に読みだしている。各SciFiとアノードの接合において、検出器の外部に生じるライトガイド部分をできるだけ短くするため、各ベル

トは 32 本で構成し、2 層分を上層の 32 本と下層の 32 本にわけて、1 つの PMT で読み出している。MAPMT の信号は、ASIC、16bitADC、FPGA を搭載した前置回路 (FEC) によってデジタル化している。以上の構成により、SciFi の本数は全部で 4096 本、各ファイバーを読み出すための MAPMT は 64 個を用いている。

2.1.1. シンチレーティングファイバー (SciFi)

SciFi はプラスチックシンチレータを繊維状に加工したもので、シンチレーション光を発生するコア (core) 部分と、それを覆う薄いクラッド (cladding) からなる。コアで発生したシンチレーション光は、屈折率の異なるクラッドとの境界における内面全反射によって、ファイバーの長手方向に補集される。今回使用したクラレ社製 SCSF-78 の特性を表 1 に示す。コアにはポリスチレン (屈折率 1.59)、クラッドにはポリメタクリル酸メチル (屈折率 1.49) が使用されており、捕集効率は 4.2% である。ベルトは MAPMT との接合部 (クッキー) を含めて以下の手順で製作した。

- 1) 治具を用いて SciFi を 32 本単位でベルト化し、接着およびクロストーク防止のため白色シリコンアクリル樹脂塗料を塗装する。
- 2) SciFi の先端を MAPMT との接合用のアクリル製クッキーに挿入し、エポキシ系接着剤で固定する。
- 3) PMT 感面と密着させるため、SciFi を挿入したクッキー表面を鏡面研磨する。また、反対側の SciFi 端面も研磨し、反射材 (アルミナイズドマイラー) を接着する。
- 4) アクリルケースを用いてクッキーと光学グリス (応用光研製 6262A) を介して MAPMT を接合する。

表 1 : SciFi (クラレ社製 SCSF-78) の特性

	発光波長ピーク [nm]	減衰時間 [ns]	減衰長 [m]
SCSF-78	450	2.8	>4.0

2.1.2. 64ch マルチアノード光電子増倍管 (64chMAPMT)

SciFi のシンチレーション光の検出に用いた浜松ホトニクス社製の 64chMAPMT (H7546) は、ダイノード段数を 12 段から 8 段に減らして、読み出し用の ASIC (後述) とダイナミックレンジを最適化している。標準的なゲインは -800 V 印加時で 5×10^4 である。MAPMT は 64 個の内、シャワーの初期発達を確実に検出する必要がある上層部分は、光電効率の大きな (~40%) ウルトラバイアルカリ光電面 (49 個) を用い、残りは標準品のバイアルカリ光電面を用いている。クッキーと MAPMT は、クッキー固定用の枠のついたアクリルケースによって接合しているが、事前にこの枠を止めるネジを調整することにより、感面でのクロストークを極小化するように位置合わせを行なっている。

2.1.3. 前置回路 (FEC)

MAPMT からの信号の読み出しには、ノルウェーの GM-IDEAS 社と共同開発したバイキングチップ (VA32HDR14.1) を使用している。これは、MAPMT の読み出しに最適化した高ダイナミックレンジのアナログ ASIC で、32 チャンネルのシェーピングアンプ出力をサンプルホールドし、マルチプレクサ方式で出力する。AD 変換は、後段の 16-bit ADC で行なうが、変換速度はチャンネルあたり $10 \mu\text{s}$ であり、1 イベントあたり $320 \mu\text{s}$ である。1 つの MAPMT の信号 (64 チャンネル分) は、2 組のバイキングチップと ADC によって 32 チャンネルずつ独立に読み出された後、64 チャンネルまとめて 1 つの FPGA によって処理される。

前置回路 (FEC) は、上述のバイキングチップ及び ADC を搭載した 2 枚のアナログ基板と、FPGA を搭載したデジタル基板 2 枚からなる。1 組の FEC が 1 つの MAPMT に対応する。8 組の FEC は 1 台のアルミケースに収納されており、計 8 台の FEC ユニットによって 64 個の MAPMT の信号が処理されている。DAQ システム側に専用の I/O インターフェースモジュールを配置し、このモジュールとの通信は低電力・高速の LVDS 規格を用いて行なっている。FEC の概念図を図 5 に示す。

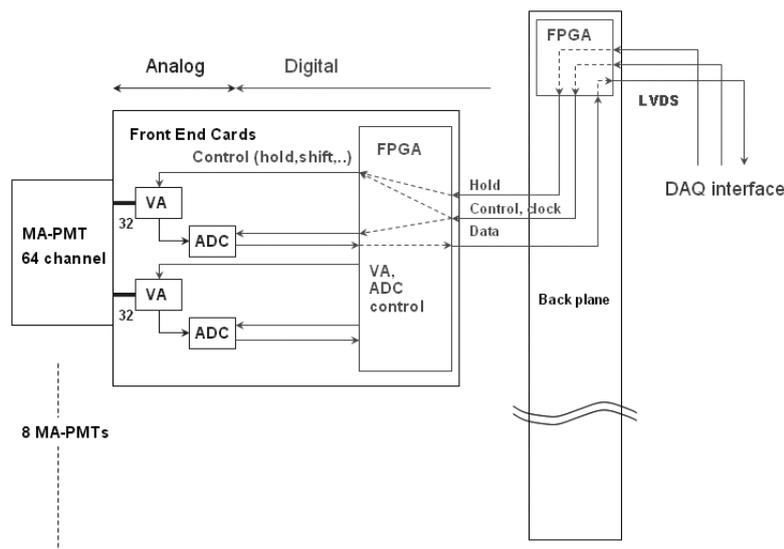


図5：IMC用FEC概念図。上記1組をMAPMTの読み出しの単位とし、8組で1つのバックプレーンに接続し、FEC1ユニットとしている。

2.2. 全吸収型カロリメータ (TASC)

TASCはX、Y方向に交互に積層したログ状のゲルマニウム酸ビスマス (BGO: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) シンチレータを用いて入射粒子のシャワー形状とエネルギーを測定する全吸収型カロリメータである。断面 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 、長さ 30 cm のBGO結晶を10本並べ、これを結晶の向きが直交するように2組重ねて1層としている。各層は $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ の範囲でX、Y方向それぞれに 2.5 cm の位置分解能をもつ。これが3層積層されており、全体で 13.4 r.l. の物質量を有している。BGOの本数は全部で60本である。各BGOのシンチレーション光は、結晶側面に接着したフォトダイオード (PD) によって読み出す。PDの信号は後述のTASC用FECによって処理される。

2.2.1. BGO シンチレータ

BGOは、Biの大きな原子番号 (83) と高い質量密度 (7.13 g/cm^3) を特徴とする無機結晶シンチレータである。今回使用したのは上海珪酸塩研究所 (SICCAS) と共同開発した特注品である。表2にその特性を示す。収集光量の増加と遮光のため、テフロンシートとアルミナイズドマイラによってラッピングし、カプトンテープで固定している。ラッピング後のBGOは、10本ずつ並べて結晶を挿入できる専用のCFRP製の構造体に組み込まれ、TASCを形成している。

表2：BGOの特性

	質量密度 [g/cm^3]	最高発光波長 [nm]	屈折率	減衰時間 [μs]	絶対光収率 [光子/MeV]
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	7.13	480	2.15	0.3	8200

2.2.2. フォトダイオード (PD)

BGOのシンチレーション光の検出には、浜松ホトニクス社製のPIN型フォトダイオード (PD) を使用している。PDをBGOの読み出し側端面に光学グリースを塗布して接合している。今回使用したS3204-08は、 $1.8\text{ cm} \times 1.8\text{ cm}$ の受光面をもち、 85% (@ 540 nm) という量子効率で、低暗電流などを特徴としている。

2.2.3. 前置回路 (FEC)

PDからの信号は、電荷有感型増幅器 (CSA)、波形整形増幅器 (Shaper)、Sample-Hold型ADCを一体化したFECによって読み出している。1つのPDに対するFECの回路概念図を図6に示す。Shaperの時点で信号を異なる2つのゲイ

ン (High-Gain と Low-Gain) の二系統に分け、それぞれを AD 変換することによって、 10^4 のダイナミックレンジが確保されている。すなわち、BGO 1 チャンネルあたりのエネルギー損失量にして 10 MeV から 100 GeV まで測定することができる (図 7 参照)。10 個の PD は 1 台の FEC ユニットに接続されており、計 6 台の FEC ユニットによって 60 個の PD の信号が処理されている。

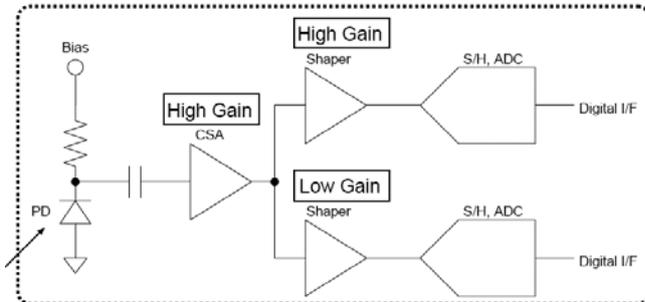


図 6: TASC 用 FEC の回路概念図。PD の出力を CSA と増幅率の異なる 2 つの Shaper を用いて AD 変換することでダイナミックレンジを確保している。

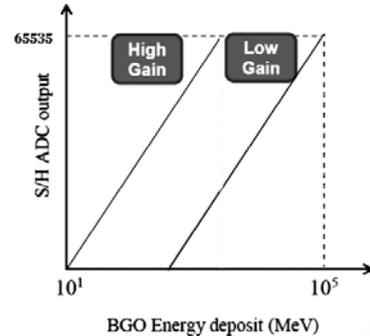


図 7: TASC 用 FEC のダイナミックレンジ。横軸は電荷入力値を BGO によるエネルギー損失量に換算したもの。High と Low の異なる Gain により $10 \sim 10^5$ MeV の 4 桁のエネルギー領域を測定可能。

2.3. トリガーシステム

bCALET-2 が観測の目的とする宇宙線は、高エネルギー電子およびガンマ線である。これらをエネルギー閾値に応じて選択的に検出・記録するため、以下の 4 系統の出力信号を用いてトリガーシステムを構成している。

- 1) IMC 上部のプラスチックシンチレータの出力値 (S1)
- 2) TASC 上部のプラスチックシンチレータの出力値 (S2)
- 3) TASC 最上層の 10 本の BGO の出力合計値 (BS)
- 4) IMC 上・側面を覆う 3 枚のプラスチックシンチレータの出力値 (Anti)

これら 4 系統の信号は、DAQ システムのトリガー発生器に入力され、各系統の信号が出力波高の閾値 (ディスクリレベル) を越えたか否かの判定が行なわれる。そして、それらの真偽の組み合わせが規定のトリガーパターンと一致した場合は、トリガー信号が発信されデータが取得される。ディスクリレベルは S1, S2, BHL, BLL, および Anti1, Anti2, Anti3 の、計 7 種類を独立に設定できる。BHL と BLL は BS の 2 種類のディスクリで、エネルギーの異なる電子観測用、およびガンマ観測のためにそれぞれ設けられたものである。Anti1, Anti2, Anti3 は、3 個の Anti シンチレータのそれぞれに対応する。なお、これらのディスクリレベルは宇宙線ミュオン測定や加速器実験の結果によって較正して設定されている。

トリガーモードは、電子候補用 (ELE)、ガンマ線候補用 (GAM)、動作検証用 (ALL) の 3 種類設定されており、複数のトリガーモードを組み合わせることも可能である (ELE&GAM など)。トリガーモードの組み合わせをトリガーパターンと呼ぶ。各トリガーモードはそれぞれ以下のような原理に基づく。

ELE: 電子は荷電粒子であるので、S1, S2 の双方で信号が検出される。そのため S1, S2, BS の信号の論理積をとり、トリガー条件としている。電子観測における主なバックグラウンドである陽子は、荷電粒子であるため電子トリガーに混入するが、電子の生成する電磁シャワーと陽子の生成するハドロンシャワーでは発達の仕方が異なることから、BHL のレベルを最適化することによってトリガーの段階での機上における陽子除去を実現している。詳細な陽子除去は、データ取得後のオフライン解析において行なう。地上におけるミュオン測定においては、BHL のレベルを下げ、シングルモード (SGL) として利用している。

GAM：ガンマ線は電荷を持たないため、S1 においては信号が検出されない。検出器内でシャワーが発生してからは、電子と同じような振舞いとなる。このためガンマ線のトリガーにおいては、S1 の否定と S2, BS の論理積をとる。このとき、側面から入射した荷電粒子が混入するのを防ぐため、Anti の否定もロジックに加えている。ガンマ線として入射した粒子が S1 上部のベッセルやフレームと反応を起こし、荷電粒子として検出される現象も起こり得るが、これに関してはシミュレーションで確率を計算し、データ解析の段階で補正を行なっている。

ALL：全ての検出器において信号が正常に出力されているかの動作検証を行なうため、S2 の出力信号のみを用いてトリガーをかけるモードである。

各ディスクリレベルとトリガーパターンの設定条件は、気球観測中にコマンド送信により変更可能である。表 3 に、各トリガーモードのロジックを示す。各モードにおけるディスクリレベルの設定値を、最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle : MIP) を単位として表 4 に示す。

表 3：トリガーモード

トリガーモード	トリガーロジック
SGL	$S1 \wedge S2 \wedge BHL$
ELE	$S1 \wedge S2 \wedge BHL$
GAM	$\neg S1 \wedge S2 \wedge BLL \wedge \neg \text{Anti}$
ALL	S2

(Anti=Anti1 \wedge Anti2 \wedge Anti3)

1 MIP のシグナルはミューオン測定の際の波高分布から求めたピーク ADC 値に対応する。1 MIP の値は、検出器のゲインやディスクリレベルの調整やシミュレーション結果との比較に必要な基礎的な量として用いている。

表 4：ディスクリレベル (MIP 数で表した標準設定値)

ディスクリ	ELE	GAM	ALL	SGL
S1	0.7	0.7	—	0.7
S2	0.7	0.7	0.7	0.7
Anti	—	0.7	—	—
BHL	7.0	—	—	0.7
BLL	—	4.0	—	—

2.3.1. トリガーシンチレータ (S1, S2)

S1 と S2 は、IMC 上部および TASC 上部に配置された 256 mm×256 mm のプラスチックシンチレータである。厚みは S1 が 10 mm, S2 が 5 mm である。これらには、減衰時間が 1.8 ns と非常に短く、高速計数に向いている Saint-Gobain 社製の BC-404 を使用した。シンチレータの発光は、シンチレータ表面に溝を掘って埋め込んだ波長変換ファイバー (WLS) を通して PMT まで集光している。WLS には Saint-Gobain 社製の BCF-92 を使用した。BCF-92 の吸収波長ピーク (~410 nm) は、BC-404 の発光波長ピークによく一致しており、両者を組み合わせることで効率的な集光が可能となる。WLS は 14 mm 間隔で X, Y 両方向それぞれ上下面に格子状に埋め込まれており、最終的に一つに束ねて PMT で読み出す。PMT には浜松ホトニクス社製の高電圧内蔵型 H6780 を用いている。図 8 に、地上での宇宙線ミューオン測定によって得られた S1, S2 それぞれのパルスハイト分布を示す。

2.3.2. トリガー用 BGO (BS)

TASC 最上層の 10 本の BGO には、それぞれに PD の接着面と反対側の面に PMT が光学的に接着されており、その出力を加算回路で合計した値を BS として使用している。10 本の PMT (H6780) からの信号は加算・増幅され、2 つの

信号に分割したあと、一方はトリガー発生器に送られ、他方はさらに増幅・波形整形された後、Peak-hold 型 ADC モジュールによる読み出しが行なわれる。

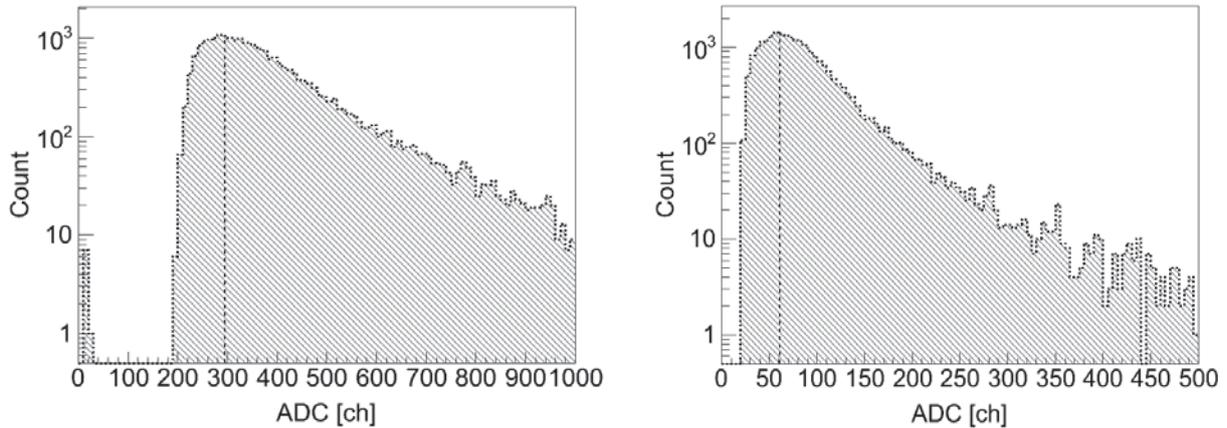


図8：トリガーシンチレータの宇宙線ミュオンによるパルスハイト分布。左図はS1の分布で、SGLモードでトリガーしたイベントを表している。右図はS2のSGLモードでの分布。点線が1 MIPのピーク位置を示す。

2.3.3. 荷電粒子除去用アンチシステム (Anti)

Anti は、側面入射の荷電粒子を除去するため、IMC を覆う形で配置された3枚のプラスチックシンチレータである。それぞれの形状を図9に示す。厚さは3枚とも10 mm である。Anti1 は、S1 を覆わないようにその上面に当たる部分はくり抜かれている。Anti2、Anti3 は、IMC の側面4面のうちFECが設置されていない側2面に設置されている。ガンマ線用トリガーモード (GAM) においては、これらのシンチレータのいずれかに信号があった場合そのトリガーをアンチとして使うことにより、側面入射の荷電粒子によるトリガーレートの増大と、それに伴うガンマ線の観測時間の減少を防いでいる。Anti には、S1・S2と同様のシンチレータ (BC-404)、WLS (BCF-92)、およびPMT (H6780) を使用した。

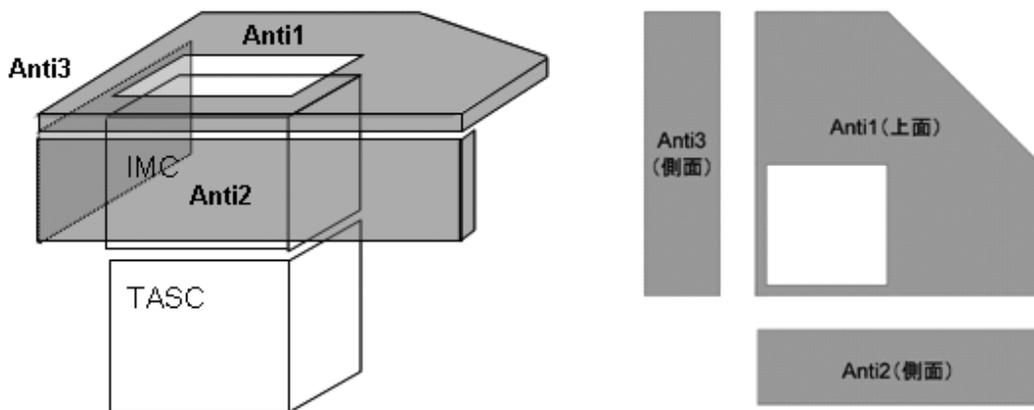


図9：Anti用シンチレータの配置と形状。側方から入射する荷電粒子を検出するため、IMCを取り囲んで配置している。図2の検出器全体図も参照。

2.4. データ取得 (DAQ) システム

トリガー発生システムの信号は各検出器のFECに送られると同時に、データ収集用のCPUモジュールに割り込み信号として取り込まれ、AD変換を終えたFECからデータを収集するためのタスクを起動する。制御用CPUはトリガーを受け取るまではタイマー割り込みにより0.5 Hzで検出器各部の温度、ベッセル内部の気圧、各検出器に印加されている電圧などをモニターし、HKデータとして記録している。

制御用 CPU に集められたデータは、一旦デュアルポートメモリに蓄えられ、データ記録用の CPU モジュールから読み出す。イベントデータは HK データとともに記録用のメディアに蓄積され、同時にデータの一部を PCM 送信機に転送し、地上の観測基地にてモニターを行った。

FEC 読み出しのための I/O インターフェースは 32 bit、デュアルポートメモリ、ADC モジュール等は 16 bit 幅のデータバスを持ち、デュアルポートメモリのもう片方のデータバスはデータ記録用 CPU モジュールと直接接続されている。このため、データ記録用のデータフローがトリガー時のデータ収集に影響を及ぼさないように設計されている。このように CPU を制御用とデータ記録用に分けて運用することで、データ収集のデッドタイムを減らしている。図 10 にデータ収集系の構成ブロックを示す。

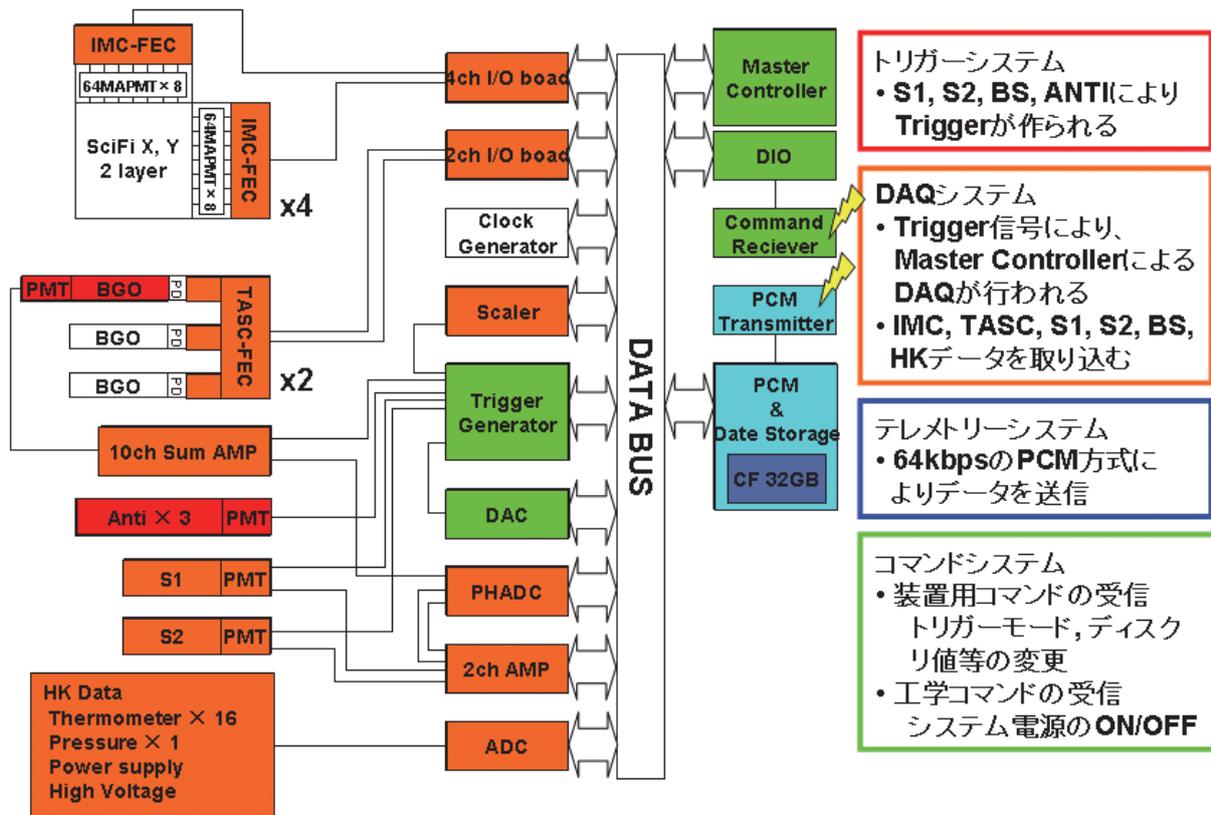


図 10：データ収集及びデータ伝送システムの構成ブロック図。IMC、TASC の FEC 等にはトリガー発生器 (Trigger Generator) からトリガー信号が発行されており、同時に制御用 CPU ボード (Master Controller) にも割り込み信号を発行する。データ記録用 CPU ボード (PCM & Data Storage) にはデュアルポートメモリが搭載されている。

3. 気球実験

3.1. 実験概要

bCALET-2 実験は、2009 年 8 月 27 日に北海道の JAXA 大樹航空宇宙実験場で行なわれた。大樹町は北緯 42.5°、東経 143.4°に位置し、この位置における Rigidity は 11.7 GV (@ 35 km a.s.l.) である。放球においては、突風によるダメージを避けるため、格納庫内でヘリウムガスの充填作業を行ない、スライダー放球装置を用いて屋外に引き出す方法が採用されている。放球後は偏西風により太平洋沖合いを上昇し、レベルフライトに達した後、東からの風により日本側へ戻して回収を行う。

bCALET-2 の放球は午前 6 時 20 分に行なわれ、約 2 時間で高度 34 km に達して 2.5 時間のレベルフライトを行なっ

た後、装置を気球から切り離してパラシュートで落下させ海上で回収した。実験中の気球の航跡図と高度変化を図 11 と図 12 に示す。

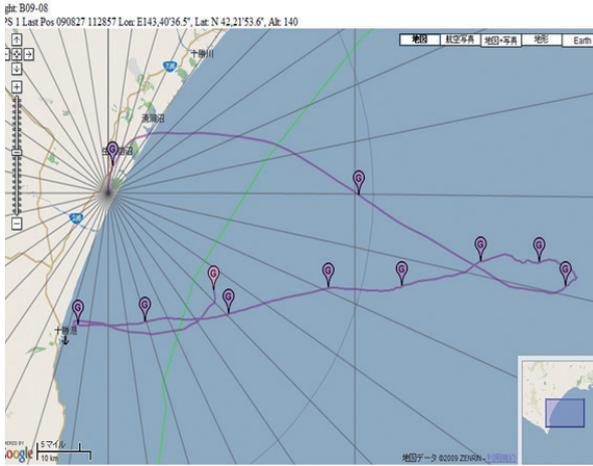


図 11：気球航跡図。沖合 100 km で、東からの風により陸側に戻している。

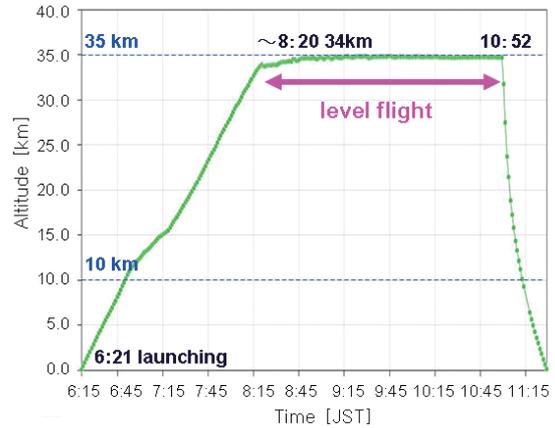


図 12：気球高度の時間変化。およそ 2 時間でレベルに達し、その後 2.5 時間レベルフライトによる観測を行なった。

3.2. 観測条件

bCALET-2 実験においては、フライトの途中で BHL, BLL のディスクリレベル、およびトリガーパターンを切り替え、低エネルギー電子とガンマ線、高エネルギー電子のそれぞれに対象を絞って観測を行なった。放球直後は、トリガーパターンを SGL & GAM に設定し、地上でのミュオン観測用のディスクリ値 (0.7 MIP) でデータを取得した。上昇中、高度約 10 km に達したところで、BHL の閾値を 0.7 MIP から 7 MIP (1 GeV 相当) に、BLL の閾値を 0.7 MIP から 4 MIP (200 MeV 相当) に変更し、1 GeV 以上の電子と 200 MeV 以上のガンマ線を対象に観測を行なった。レベルフライトに入ってから約 1 時間は同じ状態で観測を続けた。

その後、観測の主要目的である高エネルギー電子の観測を実施するため、トリガーパターンを ELE のみに変更し、また BHL の閾値を 7 MIP から 35 MIP (~5 GeV) に変更し、この状態で約 1.5 時間観測を行なった。表 5 に、フライト中用いたトリガーパターンとそのときのディスクリ値を示す。また図 13 に、各トリガーモードのカウンtrateの時間 (高度) 変化を示す。その間取得されたイベント数は、ガンマトリガーが 3,466 例、1 GeV 電子トリガーが 2,720 例、5 GeV 電子トリガーが 5,671 例であった。

表 5：フライト中のトリガーパターンとディスクリ値 (MIP 数で表示)

トリガーパターン	S1	S2	Anti	BHL	BLL
SGL&GAM	> 0.7	> 0.7	< 0.7	> 0.7	> 0.7
ELE&GAM	< 0.7	> 0.7	< 0.7	> 7	> 4
ELE	> 0.7	> 0.7	—	> 35	—

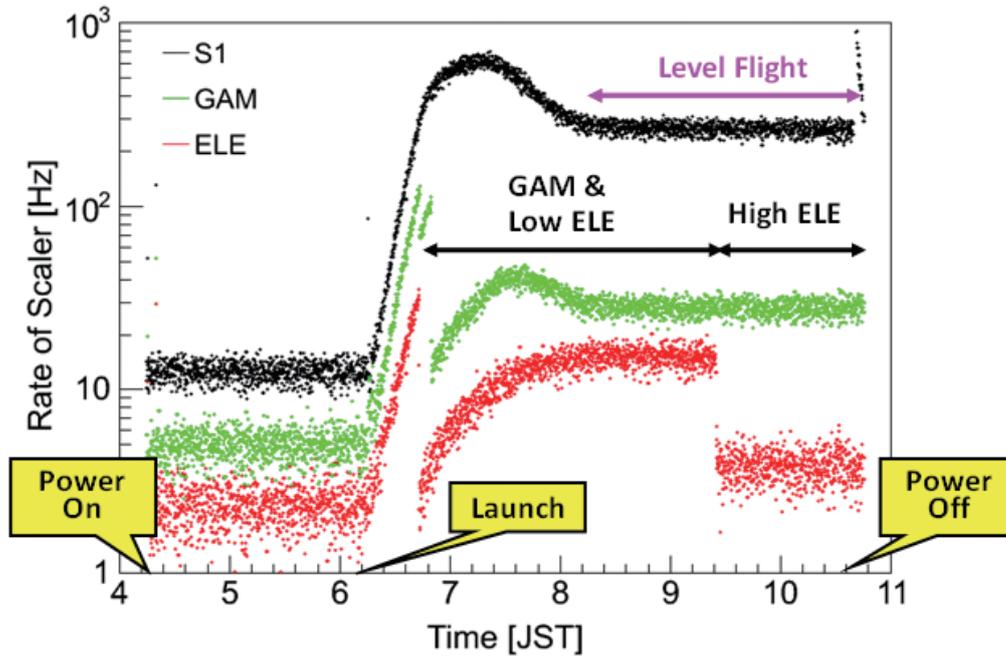


図 13：カウントレートの時間変化。上から順に、S1 で検出されたイベントのカウントレート、GAM トリガー、ELE トリガーのカウントレートを表す。GAM および ELE のカウントレートはディスクリレベルの調整により不連続的に変化している。

4. 観測データ解析

実験データの解析は、レベルフライトにおいて取得した各トリガーイベント毎に行なった。ELE でトリガーされた電子候補イベントと GAM によるガンマ線候補イベントのそれぞれについてエネルギー決定と飛跡再構成を行って、シャワー形状による粒子識別により陽子等のバックグラウンドを除去して電子とガンマ線を選別した。また加速器ビーム実験と Monte Carlo シミュレーション計算により、検出効率、エネルギー分解能、角度分解能、粒子識別性能等を求め、実験データとの比較により電子・ガンマ線のエネルギースペクトルを導出している。

シミュレーションコードとして、これまでの宇宙線観測で実績のある Cosmos[13] と EPICS[14] を利用した。Cosmos は地球地場や大気との衝突による二次粒子生成を扱うことが可能なシミュレーションコードで、これを用いて高度 35 km における宇宙線イベントを生成した。EPICS は高エネルギー粒子と検出器の相互作用のためのシミュレーションコードで、Cosmos で生成したイベントを用いて、EPICS で bCALET-2 検出器の応答を求めることにより、一次宇宙線を含む検出器シミュレーションがほぼ完全に可能である。なお、これらのコードにはいくつかの核相互作用モデルが用意されているが、加速器実験を現象論的に再現する DPMJET-3[15] を用いた。このモデルは、現在までの我々の加速器ビーム実験において、他のモデルに比較して優れた再現性をもつことが確認されている [16]。

4.1. 装置出力較正

bCALET-2 では、シャワー粒子がシンチレータで損失するエネルギーから、入射エネルギーの測定を行う。このためシンチレータの出力を、入射エネルギーに換算可能な形に規格化する必要がある。このため、フライト前に地上で測定した宇宙線ミューオンを用いて、各検出器の出力 (ADC 値) を § 2.3 に述べた MIP 数に換算する。そしてシミュレーション計算から得られる入射エネルギーと MIP 数の相関関係を用いて、観測されたシャワーのパルスハイト値 (MIP 数換算) から入射エネルギーを求めた。各検出器における 1 MIP 導出の手順は以下のとおりである。

4.1.1. IMC の検出器較正

IMC を構成する SciFi の 1 MIP 相当の出力値は、ミューオンが通過した際のシグナル値の分布をファイバーごとにヒストグラムで作成し、ランダウ分布でフィッティングすることによって導出した。図 14 にランダウ分布による測定データのフィッティング例を示す。

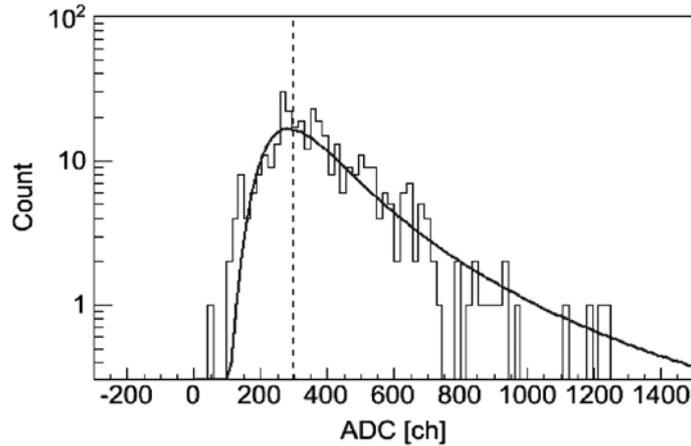


図 14：宇宙線ミューオンによるシンチファイバーの波高値分布の測定結果。曲線はランダウ分布によるフィットで、このピーク値（点線で表示）を 1 MIP とした。

4.1.2. TASC の検出器較正

TASC の PD からの信号は、§ 2.2.3 で述べたように High-Gain、Low-Gain の二系統で読み出されている。High-Gain の信号については、ミューオン測定用のデータを用いてゲイン補正を行なった。その際、回路素子、PD、BGO 等の温度特性を考慮して温度補正係数を求めている。Low-Gain の信号については、フライトのデータから High-Gain との相関を調べ、それを用いて較正した。

【High-Gain】

図 15 に、BGO High-Gain の出力値分布を示す。図の左側のピークが PD 及び TASC 用 FEC のペDESTAL、右側のピークがミューオンピークに相当する。ペDESTALのピーク位置は、回路素子の温度特性により温度変化するため、以下の手順でそれを補正した。

- 1) 地上でのミューオン測定用の全データを、イベント取得時の温度によって分ける。このとき、X の 2 層目の FEC、及び Y の 2 層目の FEC に取り付けられた 2 つの温度センサーによる値を用いた。全データの温度範囲は約 20.5～38.5℃なので、3℃きざみで 6 分割する。
- 2) 各温度範囲で独立にヒストグラムを作成し、ペDESTALピークをガウス分布でフィッティングする。
- 3) データの平均温度と、ピーク値を直線でフィッティングし、ペDESTALの温度補正係数を求める。

ペDESTALの温度補正直線のフィッティング例を図 16 に示す。図のように正の温度特性を示すチャンネルと、負の温度特性を示すチャンネルがあり、最大で約 15 ch/℃程度の温度変化が見られた。1 MIP 相当の出力値を導出するにあたっては、このようなペDESTALの温度変化の影響を差し引くため、各チャンネルの温度補正係数（直線の傾きと切片）を用いてイベント毎にペDESTALを算定し、それを引いた ADC 値を用いて 1MIP を求めた。

一方 1MIP 相当の出力値そのものも、PD の量子効率、BGO の発光量等の温度特性により変動する。よってペDESTALのときと同様、各温度範囲でヒストグラムを作成してミューオンピークをガウス関数でフィッティングし、温度との相関をとることでこれを補正した。ただしペDESTALに比べて BGO1 本あたりに入射するイベント数が少ないため

温度刻みを大きくとり、6℃毎に3分割とした。また1 MIP の温度変化は PD や BGO の温度依存性によるものと考えられるので、FEC の取り付けられていない TASC 側面の温度センサーの値を用いた。このようにして導出した温度による1MIPの変化率は、ピーク値に対して平均で-1.27%/℃となった。これは過去に測定されたBGO発光量の温度依存性ともよく一致している。

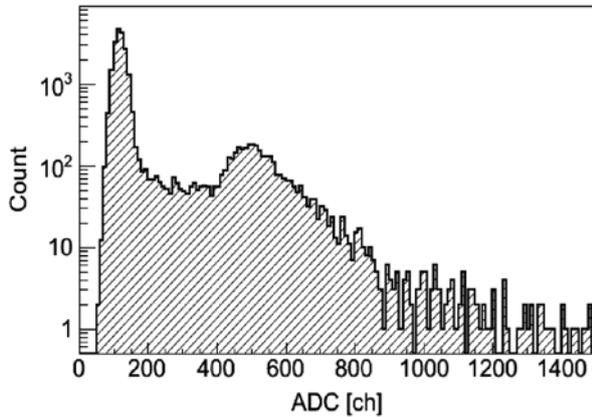


図 15：宇宙線ミュオンによる BGO の波高値分布の測定結果。左側のピークがペDESTAL、中央付近のピークが1 MIP のピーク。

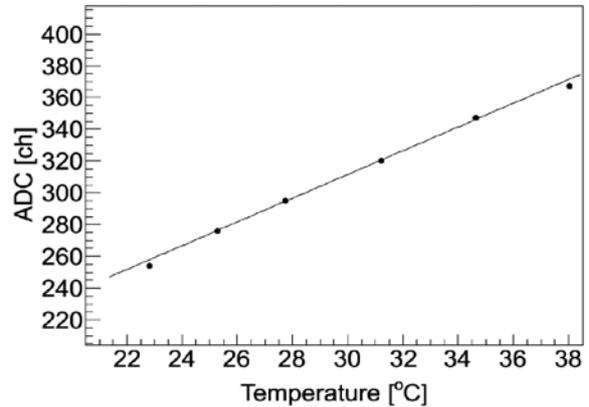


図 16：TASC 読み出し (PD+ FEC) におけるペDESTAL 平均値の温度依存性。ガウス分布のフィッティングからペDESTAL ピークの中心値を求め、温度との相関を求めた。

【Low-Gain】

Low-Gain は高エネルギーのシャワー粒子検出用にゲインが設定されているため、1 MIP を決めるミュオンのピーク値を正確に測定するのは困難である。したがって、気球観測データを用いて High-Gain の信号と Low-Gain の信号の相関をとり、High-Gain の信号が飽和しない領域において直線フィッティングし、High-Gain との出力比を求めた。図 17 は縦軸に High-Gain、横軸に Low-Gain の出力値をとったグラフである。両方とも、前節の手法で温度補正したペDESTAL を引いた値となっている。Low-Gain についてはこの関係式と、High-Gain のミュオンデータ解析結果を用いてゲインを補正することとした。フライトデータの解析にあたっては、High-Gain の信号が 65,000 ch 以下の場合 High-Gain のデータを、65,000 ch を越えた場合は Low-Gain のデータを採用した。

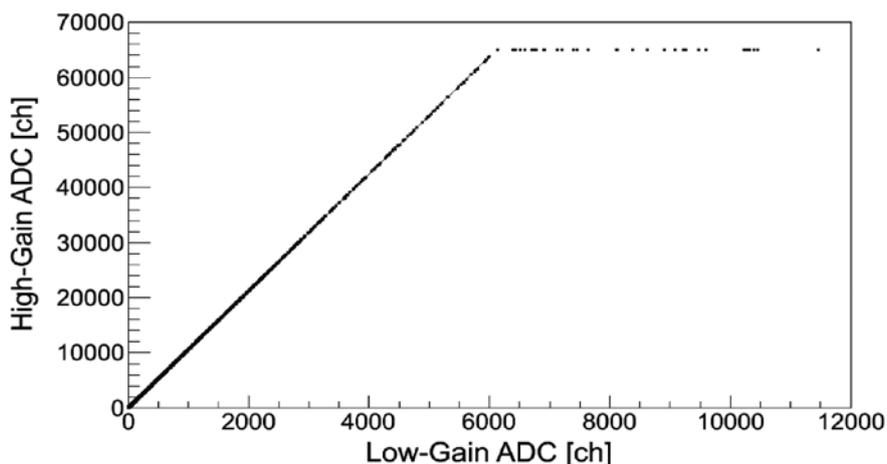


図 17：BGO の TASC 読み出しによる High-Gain と Low-Gain の相関。両者の出力が比例する領域で較正が可能。

4.2. エネルギー決定

bCALET-2 では、IMC でスタートして TASC で発達するシャワー粒子が SciFi と BGO で損失するエネルギーから、入射エネルギーの測定を行うことができる。各検出器におけるエネルギー損失量から入射粒子のエネルギーへの換算

は、エネルギー損失の大半を占める BGO を用いて行なう。このため、前節で述べた方法で観測データを MIP 数に換算し、加速器ビーム実験で較正されたシミュレーション計算を用いて得られる MIP 数とエネルギー損失量の関係、およびエネルギー損失量と入射エネルギーの相関関係を用いてエネルギー決定を行った。

1 MIP に相当するエネルギー損失量は、Cosmos と EPICS を用いて地上における観測装置のミュオン測定を再現し、シミュレーションで得られた各 BGO 内のエネルギー損失量の分布を、実験データと同様にガウス関数でフィッティングして導出する。この 1 MIP 相当のエネルギー損失量を用いて、観測データを MIP 数からエネルギー損失量に換算し、シミュレーションによって得られたエネルギー損失量と入射エネルギーの較正曲線を用いて入射エネルギーを決定する。

シミュレーション計算から、TASC 内の位置によるエネルギー損失量の違いは無視できる程度であることが分かっているので、1 MIP のエネルギー損失はすべての BGO について 60 本の平均値 (23.87 GeV) を用いた。またフライトのシミュレーションにおいては、実験データの回路システムにおけるペダスタルのゆらぎを再現するため、各 BGO の 1 MIP の大きさに対するペダスタルのゆらぎの大きさをミュオン測定データから導出し、その幅のガウス分布で再現してシミュレーションのエネルギー損失量に足し込んでいる。

図 18 に電子とガンマ線それぞれのエネルギー較正曲線を示す。シミュレーションで単一エネルギーの粒子を入射させ、TASC 内のエネルギー損失の分布をとって、そのピーク値を 3 次スプライン補間でつないで較正曲線としている。TASC を斜めに抜けるイベントはエネルギー分解能が悪くなるため、入射角が S1 および TASC3 層目下面の端から 2.5 cm 内側を通過するという幾何条件 (図 19) を満たすイベントだけ使用している。実際の実験データの解析でも、再構成した飛跡が幾何条件を満たすものだけ選別する。電子のエネルギー分解能は 10 GeV で 7.33 %、ガンマ線の場合は 10 GeV で 6.63 % となった。図 20 に示すように、エネルギー分解能は式 (1) の形でエネルギーに依存する。

$$\Delta E = \frac{a}{\sqrt{E_0}} + b \tag{1}$$

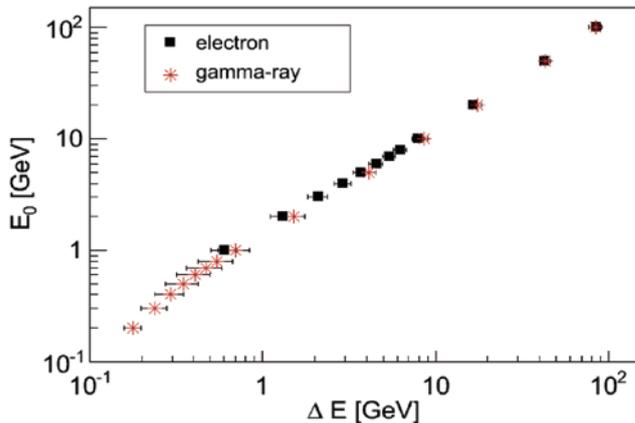


図 18 : TASC-BGO 中のエネルギー損失量 (ΔE) と入射粒子エネルギー (E_0) の相関 (シミュレーション)。横軸の誤差は、 ΔE の分布の平均二乗偏差。

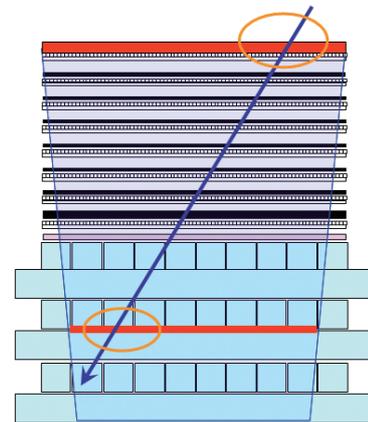


図 19 : データ解析時における入射粒子到来方向の幾何条件。図中の網掛け部分を通してシャワーのみを選択。

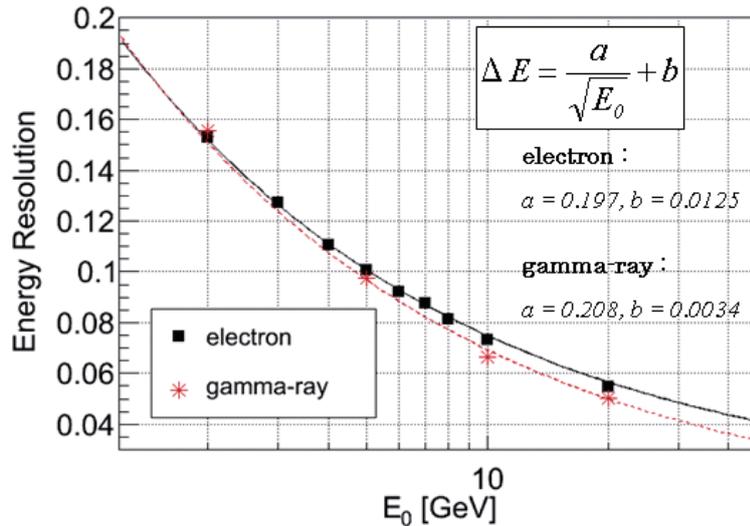


図 20：シミュレーションにより求めた電子，ガンマ線それぞれのエネルギー分解能のエネルギー依存性。曲線は式 (1) によるフィッティング。

4.3. シャワー軸再構成

入射粒子のシャワー軸再構成は，IMC の SciFi で得られるデータを用いて行った。電子とガンマ線では，入射粒子の電荷の有無の違いを考慮して，それぞれに最適化したシャワー軸再構成の方法を開発している。それぞれの方法と得られた角度分解能は以下の通りである。

【電子シャワー軸決定】

電子のシャワー軸再構成は以下のような手順で行なった。

- 1) 各層につき，発光量の多い順に最大 3 本のファイバーを選び，それぞれ左右のファイバーの発光量との重みつき重心をとってシャワー中心候補点とする。
- 2) それぞれの層から 1 点ずつ候補点を選択し，それらの点を最小二乗法で直線フィットする。（フィッティングに使用しない層があってもよいが，最低 4 層分は選択するとする）。これをすべての候補点の組み合わせについて行なう。
- 3) すべてのフィッティング結果のうち，残差が最小となったものを，最も適切なシャワー軸として採用する。ただし，フィッティングで得られたシャワー軸を TASC 1 層目まで外挿したとき，発光した BGO を通るシャワー軸と通らないシャワー軸があった場合は，発光した BGO を通る方を優先する。

ただし電子のシャワーはミューオンと比べて発光点が多く，膨大な数の組み合わせができるため，直線から大きく外れる組み合わせ等はあらかじめ省いている（付録 B 参照）。

以上の方法を用いて，シミュレーションで生成した高度 35 km における電子イベントを解析したところ，1 GeV 電子トリガーにかかり入射角が図 19 の幾何条件を満たすイベントのうち，99.7% がシャワー軸再構成に成功している。再構成できたイベントについて，得られたシャワー軸と実際の入射角との角度誤差の分布（図 21）において 68% のイベントが含まれるという条件で角度分解能を定義すると，分解能は 1.4° となった。三次元的な角度誤差 $\Delta\theta$ は式 (2) で計算した。

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \cos^{-1}(S_{dir} \cdot E_{dir}) \\ &= (x_s \cdot x_e) + (y_s \cdot y_e) + (z_s \cdot z_e) \end{aligned} \quad (2)$$

ここでシミュレーションの入射角ベクトルを $S_{dir} = (x_s, y_s, z_s)$, 再構成したシャワー軸の角度ベクトルを $E_{dir} = (x_e, y_e, z_e)$ とする.

角度分解能のエネルギー依存性は, 図 22 のように得られている. 低エネルギーでは, シャワーの粒子数が減少し重心位置の決定精度が悪くなることなどから分解能が低下するが, 5 GeV 以上においては 1° 以下となっている. 図 23 にシミュレーションの電子イベント (15 GeV) の再構成例を示す. 打ち上げ時の衝撃等により観測データの一部に SciFi データの部分的欠損が発生しているが (後述), この方法によれば十分な精度で再構成ができています.

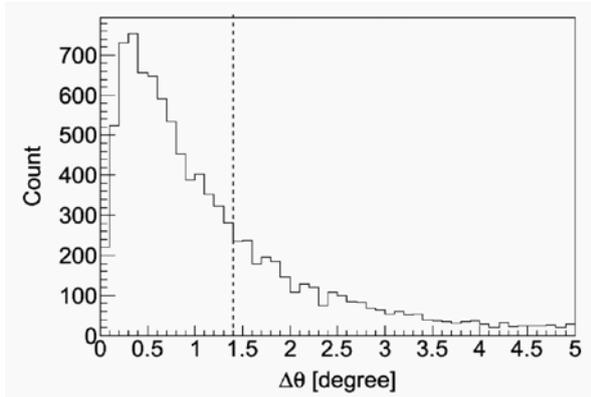


図 21: シミュレーションによって算出した電子シャワー軸再構成の際の角度誤差の分布. 高度 35 km でトリガーされる電子イベントについてシャワー軸の再構成を行ない, 角度誤差を導出した. 68% 含有で $\Delta\theta \sim 1.4^\circ$ となった (点線).

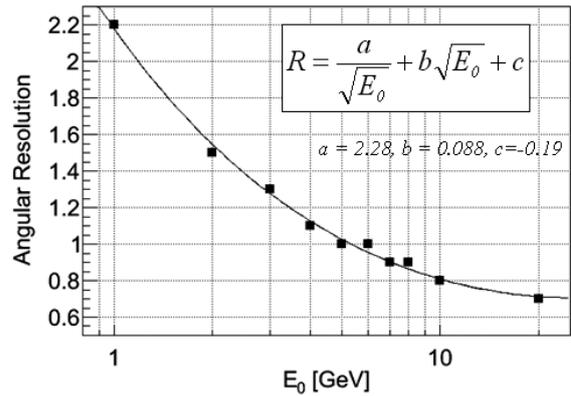


図 22: シミュレーションによって推定した電子の角度分解能のエネルギー依存性. 曲線は, 図中の式でフィッティングした結果.

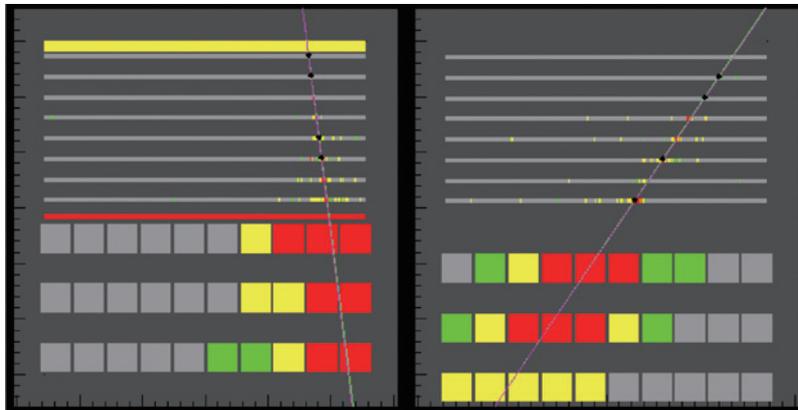


図 23: 電子シャワー軸再構成例 (シミュレーション). 直線は再構成されたシャワー軸を表す. この例では S1 および S2 で検出し, IMC の最上層からシャワーが始まっている.

【ガンマ線シャワー軸決定】

ガンマ線はシャワーが発生するまで IMC で検出されないため, IMC のみからシャワー軸再構成するのは困難である. このため, 以下の方法で TASC 内の BGO シグナルも用いたシャワー軸の再構成を行なった.

- 1) 電子と同じ方法で, IMC 中でシャワー中心候補点をきめる.
- 2) BGO の 1 層目と 2 層目から最も発光量の多い BGO を 1 本ずつ選択する. 左右の BGO を用いて発光量の重みつき重心をとり, シャワー軸候補点とする.
- 3) IMC の発光のある層, TASC の上層 2 層のそれぞれからシャワー軸候補点を選び, 最小二乗法で直線フィットす

る。これをすべての候補点の組み合わせについて行ない、複数のシャワー軸候補を得る。ただし、選択したIMC候補点の上下二点間の傾きが大きくばらつく組み合わせは除く。

- 4) 3) で得られたすべてのシャワー軸候補のうち、IMCとTASCの位置決定精度を考慮したフィッティングの残差が最小となるものを、最も適切なシャワー軸として採用する。残差は以下の式で定義している。

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_i \frac{(Sx_i - x_i)^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

ここで、 N は使用した候補点の総数、 Sx_i は3)で求めた i 層目におけるシャワー軸通過位置、 x_i は i 層目の実際のシャワー軸候補点の位置、 σ はSciFiまたはBGOの幅とする。ただし、得られたシャワー軸がTASC最上層の候補点から ± 1.75 cm以上離れた点を通過する場合は、不適切として採用しない。

高度35 kmにおけるシミュレーションのガンマ線イベントを上記の方法でシャワー軸再構成したところ、トリガーにかかり入射角が図19の幾何条件を満たすイベントのうち、90.9%がシャワー軸再構成に成功した。残りの9.1%はIMCの発光した層が少なかったか、手順3)または4)で排除されたイベントである。再構成できたイベントについて、角度分解能は 1.6° となった。角度分解能の定義は電子のときと同様である。角度分解能のエネルギー依存性を図24に示す。図25は、シミュレーションのガンマ線イベント(13 GeV)の再構成例である。

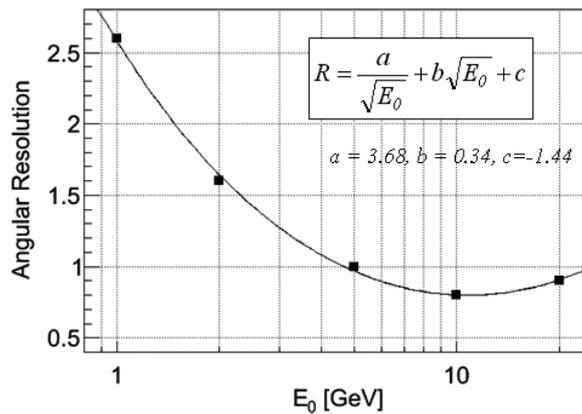


図24：シミュレーションによって推定したガンマ線の角度分解能のエネルギー依存性。曲線は、図中の式でフィッティングした結果。

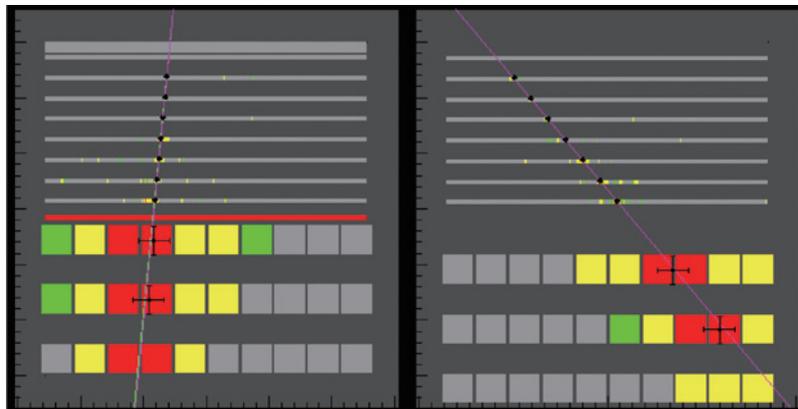


図25：ガンマ線シャワー軸再構成例(シミュレーション)。S1およびIMCの上層で検出されず、途中からシャワーが始まっている様子がわかる。

4.4. 粒子識別

電子観測の主なバックグラウンドである陽子や原子核は、トリガー条件によってすでに 1/10 程度まで除去されているが、トリガーされたイベントの中には電子以外の粒子が約 96 % 程度含まれている。これらの中から電子を識別するため、bCALET-2 では、これまでの BETS や加速器実験の経験を活用して、IMC と TASC を用いたシャワーの 3 次元的可視化技術を用いている。すなわち、電子・ガンマ線が生成する電磁シャワーは、電子対生成と制動放射の繰り返しによって発達するため、エネルギー損失がシャワー軸中心に集中し、シャワー発達における揺動も少ない。これに対し陽子や原子核の生成するハドロンシャワーは、核相互作用によって発生した二次粒子とその連鎖反応によって発達する。すなわち中性パイ中間子の崩壊によって生成される 2γ は電磁シャワーを発生させ、荷電パイ中間子や生き残りの陽子は、逐次相互作用をおこす。その結果、シャワー発達に大きな揺動が見られる他、横方向の拡がりも大きな分布を持つ。

特に、陽子のタングステンに対する平均自由行程 (m.f.p) は約 28 r.l. であり、IMC 中に積層されているタングステンでは約 0.13 m.f.p であるため、約 10 % の陽子のみが IMC 中で相互作用する。それに対して、電子・ガンマ線は殆どが IMC 中で相互作用によりシャワー粒子を生成し、TASC 中で電磁シャワーが発達する。このため、高エネルギー (~ 6.7 GeV 以上) の電子については、主に TASC におけるシャワーの横拡がりや遷移曲線を用いて粒子識別を行なった。低いエネルギーのイベントについては、シャワー発達が主に IMC で起こるため、IMC 中でのシャワー形状を用いた粒子識別を行なった。

4.4.1. S1 を用いた重粒子除去

陽子に対して電荷 (Z) ≥ 2 の原子核成分は、S1 のシグナル値を用いて、以下の方法で容易に識別が可能である。S1 を荷電粒子が (相対論的速度で) 通過したとき、電離損失によるエネルギー損失量は Z の二乗に比例する。図 26 に、実際の観測条件に基づいて行った S1 におけるエネルギー損失量のシミュレーション計算の結果を示す。図において 4 MIP 付近に見られるヘリウムのピークに対して、3.0 MIP を上限閾値としてデータを選別すると、電子の残存率が 95.5 % で、90.9 % の原子核成分を除去できることが判明している。

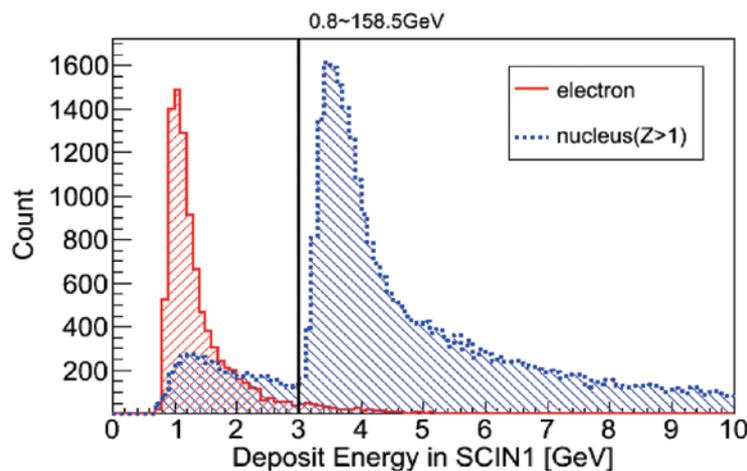


図 26 : 電子およびハドロンによる S1 におけるエネルギー損失量の分布 (シミュレーション)。図の実線 (3 MIP) を閾値として、重粒子を除去した。3 MIP 以下の重粒子は、実際は S1 を通過せず、電荷に比例したエネルギーを S1 に落とさなかったイベントが、シャワー軸再構成の誤差により S1 を通過したと誤認されたものである。このようなイベントは TASC におけるシャワー形状の違いから識別・除去している。

4.4.2. TASC 内シャワー形状による電子・陽子識別

カロリメータを用いた電子・陽子選別では、シャワー発達に伴うエネルギー分布を、極めて正確に測定する必要があるため、IMCのようなサンプリングカロリメータだけでは不十分で、TASCによる正確なシャワー中のエネルギー分布を測定することが不可欠である。その理由は、陽子によるシャワー発達の揺動の効果が、電子選別に大きく影響するためである。このため、気球実験ではTASCを用いたATICでは正確なe/p選別が実現されているのに対し、サンプリングカロリメータを用いた方式では、高エネルギー領域での正確なe/p選別が難しい。さらに、TASC方式では読み出しチャンネルが大幅に軽減できるというメリットもある。

このため、bCALET-2では、TASCにおけるシャワー形状による電子・陽子選別をシャワーが主にTASCで発達する6.7 GeV以上のイベントについて試みた。最初に、電磁シャワーとハドロンシャワーの横拡がりの平均値の違いに着目し、これを選別に用いる。ここで再構成した飛跡を軸にしたときの各層のシャワーの横拡がりを、式(4)で表す。

$$R_i = \sqrt{\frac{\sum_j (\Delta E_{BGO(j)} \times (x_j - x_c)^2)}{\sum_j \Delta E_{BGO(j)}}} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta E_{BGO(j)}$ は各層のj番目のBGOにおけるエネルギー損失、 x_j はj番目のBGOの座標、 x_c はシャワー中心を表す。TASC全体としての横拡がりは、各層の拡がりについて、式(5)に示したエネルギー重みつき二乗平均を採用した。

$$R_E = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta E_{layer(i)} \times R_i^2)}{\sum_i \Delta E_{layer(i)}}} \quad (5)$$

ここで $\Delta E_{layer(i)}$ はTASC i層目におけるエネルギー損失を表す。この値をパラメーターとして電子と陽子の横拡がりを比べると、シミュレーションではそれぞれ図27のような分布となる。

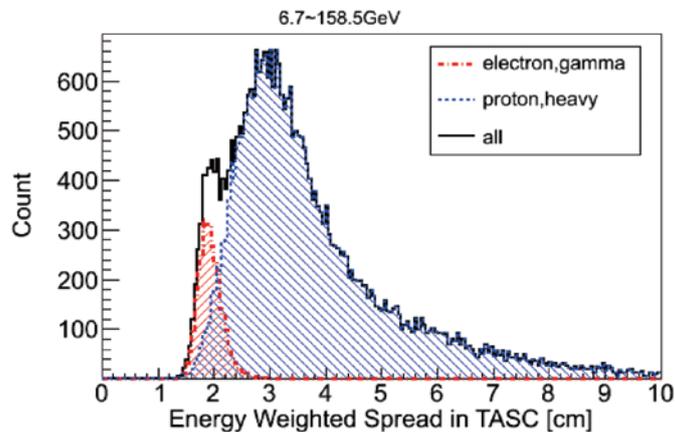


図27：S1による重粒子除去を行なった後の、TASCにおけるエネルギーの重みつきシャワー横拡がりの分布（シミュレーション）。実線は全イベントを表す。電子の分布は約2.4 cm以下の領域に集中している。

次にシャワー発達の違いに注目する。電磁シャワー粒子の電離損失による1 r.l.当りのエネルギー損失の物質層の厚さに対する変化（遷移曲線）の平均値は、以下の式で近似される[17]。

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)} \quad (6)$$

ここで、 t は輻射長単位 (X_0) で表したシャワーの深さ ($= x/X_0$)、 E_0 は入射粒子のエネルギーを表す。 a 、 b は検出器

に依存するパラメーターである。シャワーの最大発達点は、 a, b を用いて以下のように表される。

$$T_{max} = \frac{a-l}{b} \tag{7}$$

各イベントについて TASC の 6 層のエネルギー損失を、横軸にシャワーが通過した物質の深さ (r.l.) をとってグラフにし、この式でフィッティングすることにより、シャワーの最大発達点を求めることができる。 a と b と E_0 をフリーパラメーターに設定した。電子と陽子でこのようにして求めた最大発達点の分布をとると、シミュレーションでは図 28 のようになる。

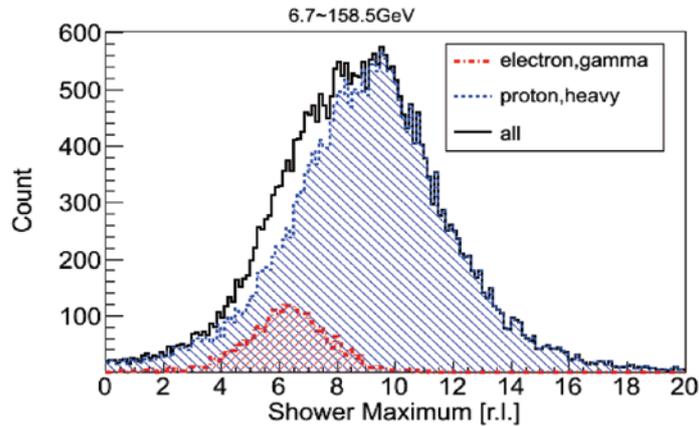


図 28：S1 による重粒子除去を行なった後の、TASC におけるシャワー最大発達点の分布 (シミュレーション)。実線は全イベントを表す。最大発達点は、エネルギー損失の遷移を式 (6) でフィッティングして求めている。

図 27, 図 28 で示したように、電子と陽子の識別は、横拡がりだけ、最大発達点だけでは難しいが、両者の相関をとることで精度よく行なうことができる。図 29 (左) の一次宇宙線スペクトルを仮定したシミュレーション結果に示されているように、電子 (+ガンマ線) と陽子 (+原子核) はそれぞれ、両者の相関分布ではよく分離されている。図中に示した線で分離したところ、電子領域での電子残存率は 82.2%，陽子混入率は 6.10% となった。図 29 (右) に観測結果を示す。統計量が少ないためシミュレーションほど分離は鮮明ではないが、シミュレーションで得られた図中の領域に対応する形で、電子 (+ガンマ線) イベントを分離する。

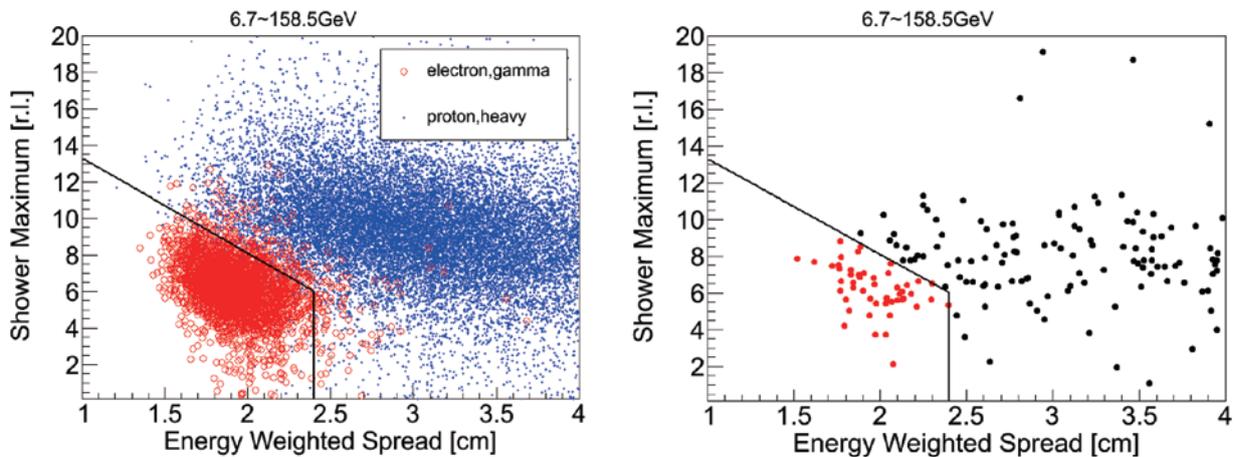


図 29：シャワー横拡がり最大発達点の相関分布。左図はシミュレーションデータの分布を示す。電子・ガンマ線を赤点、陽子・重粒子を青点で示すが、直線 $T_{max} = -5.2R_E + 18.5$ 、および $R_E = 2.4$ で囲まれる領域により、電子を選別可能であることが分かる。同じ条件を実験データ (右図) に適用し、電子と選別されたイベントを赤点で示している。

4.4.3. TASC 内シャワー形状によるガンマ線識別

GAM モードによるトリガーでは、IMC を覆う 3 枚の Anti シンチレータによって側面入射の荷電粒子が除去されているが、シミュレーションによれば Anti の隙間などから入射した陽子等の他粒子が図 30 のような割合で含まれている可能性がある。よってガンマ線の場合、まずエネルギー重心を用いて TASC におけるシャワーの横拡がりを導出し、陽子の除去を行なった。

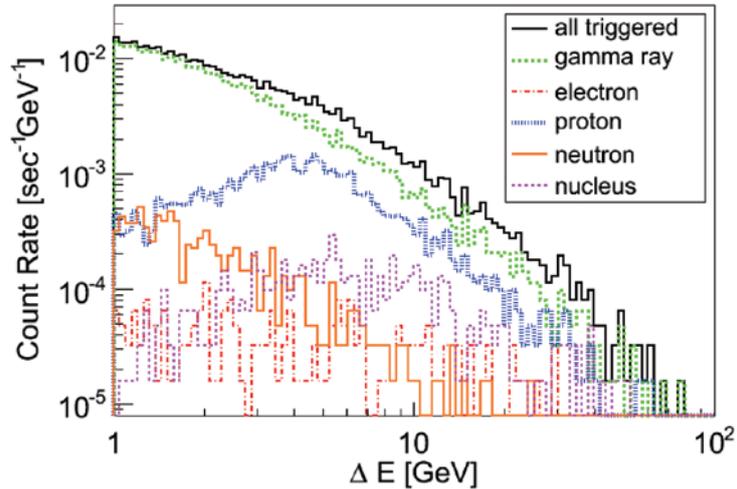


図 30：シミュレーションから得られた高度 35 km においてガンマ線トリガーに混入する荷電粒子，中性子の割合。総イベントに対し，荷電粒子（陽子，原子核）が 11.0 %，中性子が 2.4 % 混入している。

各層のエネルギー重心としたその層のシャワーの横拡がりとして定義する。各層の横拡がりのエネルギー重みつき二乗平均を TASC 全体の横拡がりとして定義し，これを各エネルギー領域毎にプロットして，粒子識別を行う。例として 1.0 GeV から 1.6 GeV でのガンマ線と陽子によるシャワーの横拡がりの分布を図 31 に示す。図のように，ガンマ線によるシャワーはより横拡がりの小さい領域に集中するので，これを極力残し大きな横拡がりを与える陽子シャワーを除去するような閾値を設ける。横拡がりの分布はエネルギーによって異なるので，エネルギーを対数で等間隔に分け，各エネルギー範囲で閾値を変更した。それぞれのエネルギーにおける閾値とガンマ線残存率，陽子混入率を表 6 に示す。

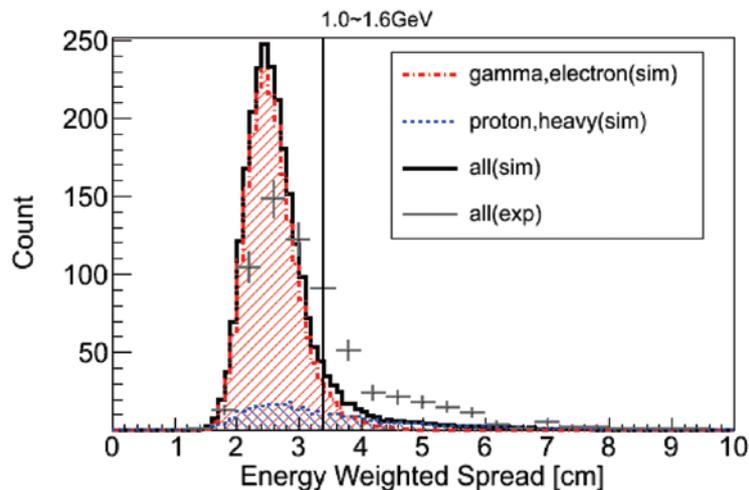


図 31：TASC におけるガンマ線および陽子によるシャワーの横拡がり分布。入射エネルギーが 1.0~1.6 GeV のエネルギー領域について示す。横拡がりの値が 3.4 cm を閾値としてガンマ線と陽子の弁別を行っている。

表 6：各エネルギーにおけるシャワーの横拡がりを用いたガンマ線・陽子識別性能

Energy [GeV]	横拡がりの閾値 [cm]	ガンマ線残存率 [%]	陽子混入率 [%]
1.00~1.58	3.4	95.5	9.7
1.58~2.51	3.0	94.9	11.1
2.51~3.98	2.7	94.2	12.8
3.98~6.30	2.4	92.2	12.2
6.30~10.0	2.3	89.8	13.5
10.0~15.8	2.2	86.9	8.72
15.8~25.1	2.1	87.2	6.47

4.4.4. 低エネルギーにおける IMC を用いた識別

シミュレーションによると、入射粒子のエネルギーが約 6.7 GeV 以下になると IMC 内で発達するシャワーの寄与が相対的に増加する。このため、1 GeV トリガーで取得したイベントのうち、6.7 GeV 以上のイベントについては § 4.4.2 の手法で粒子識別を行ったが、1~6.7 GeV のイベントについては、TASC のデータに加え IMC 中でのシャワーのエネルギー集中度等を用いて、以下の条件でまず陽子除去を行った。

1) TASC の 6 層のエネルギー損失から求めたシャワーの最大発達点 $T_{max} < 8$

かつフィッティングのカイ二乗値 $\chi^2_{max} < 1.3$

2) TASC におけるシャワー発達のパラメーター $F_E < 0.06$

ここで F_E は、TASC 中の全エネルギー損失に占める最下層のエネルギー損失の比として、以下のように定義している

$$F_E = \frac{\Delta E_{layer(bottom)}}{\sum_i \Delta E_{layer(i)}} \tag{8}$$

3) IMC の横拡がり $0.2 \text{ cm} < R_E < 3.2 \text{ cm}$

上記の判定を行なった上で、IMC におけるシャワーのエネルギー集中度と、TASC におけるシャワーの横拡がりとの相関を用いて電子を識別した。IMC におけるシャワーの集中度は、IMC 中の全エネルギー損失と、シャワー軸周辺 5 mm 以内に落としたエネルギーの比として定義している。図 32 に見られるように、電子の生成するシャワーの方がシャワー軸中心に集中しているため、陽子にたいして集中度は大きくなる。

$$C_E = \frac{\sum_{j(axis \pm 5)} \Delta E_{scifi(j)}}{\sum_i \Delta E_{layer(i)}} \tag{9}$$

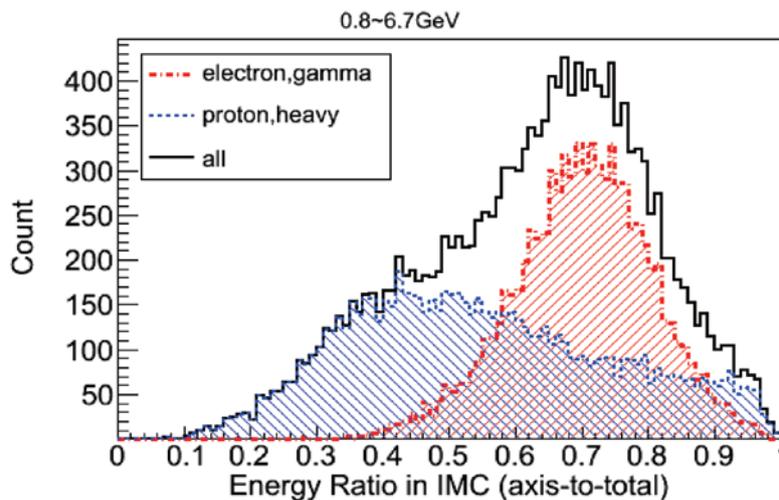


図 32：IMC におけるシャワーのエネルギー集中度（シミュレーション）。本文 1) 2) 3) の条件で陽子を除去した後の分布（エネルギーは 0.8~6.7 GeV）。

図32のIMCにおけるシャワーの集中度と、TASCにおけるシャワーの横拡がりの二乗の相関をとり、電子が分布する領域を取り出した。この分布の形状はエネルギーに依存するので、エネルギー範囲を分けて（対数で等間隔に4分

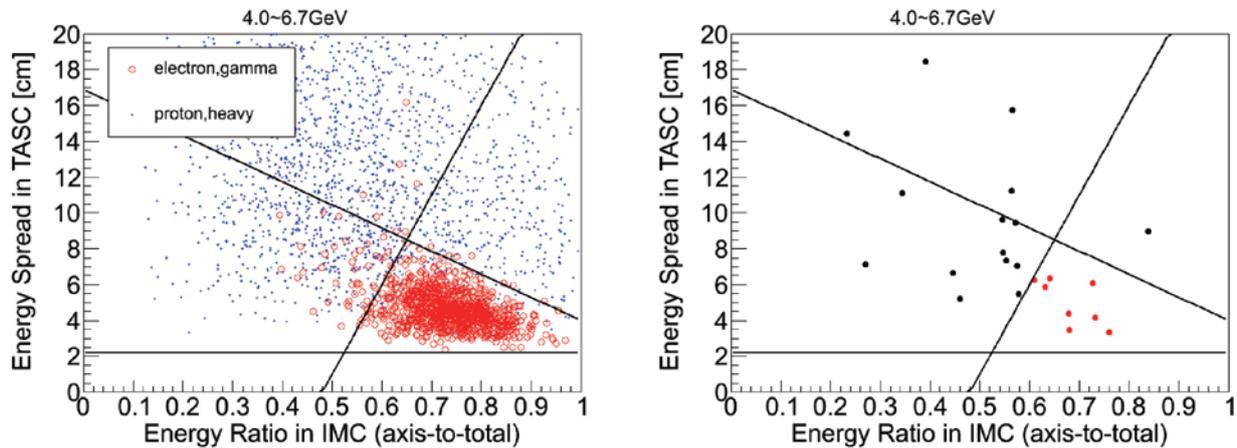


図33：IMCにおけるシャワーのエネルギー集中度とTASCにおけるシャワーの横拡がりの相関分布（エネルギーは4.0～6.7 GeV）。左図はシミュレーションデータの分布を示す。3つの直線で囲まれる領域により、電子を選別可能であることが分かる。同じ条件を実験データ（右図）に適用し、電子と選別されたイベントを赤点で示している。

割)、各エネルギー範囲で電子選別の領域を最適化した。それぞれのエネルギー範囲における電子残存率、陽子混入率を表7に示す。

表7：各エネルギーにおける電子・陽子識別性能

Energy [GeV]	電子残存率 [%]	陽子混入率 [%]
0.82 ~ 1.38	83.4	7.80
1.38 ~ 2.35	84.7	11.1
2.35 ~ 3.98	83.4	16.6
3.98 ~ 6.73	77.0	9.89

4.5. 実験データ補正

実験データの解析において問題となる、装置の一部不具合やトリガー効率の位置依存性などについて、それらの影響をシミュレーション計算により再現して、顕著となる問題点がある場合にはその影響を補正した。主に問題となった事象とその補正方法を以下に示す。

【トリガー効率の位置依存性】 TASC最上層の10本のBGO信号和をトリガーとして用いているが、各BGOの信号にゲイン差が存在するため、シャワー粒子がどのBGOを通過したかでトリガー効率に若干の違いが生じている。この影響は観測データの各BGOにおけるパルスハイト分布を用いて、BSのゲイン差を求めることにより補正した。シミュレーションにおいては、実験的に求めたこの比率をかけて信号の和をとり、トリガー効率の位置依存性を再現している。

【IMCでの飛跡検出における不感チャンネルの影響】 観測時においては、一部のSciFiの読み出しに不具合が発生し、シグナルが得られないチャンネルが存在した。飛跡再構成へのこの影響を検討するため、シミュレーション計算でその状況を再現して、データ解析を実施した。

【IMCにおける電気ノイズの影響】 IMCでは、ADCのペDESTAL値が大きく変動するチャンネルが存在した。そのため、5 MIP以上のシグナルの出ているチャンネルが規則的に並んでいるMAPMTが1層に2個以上ある場合に、そ

のイベントはノイズの影響を受けていると判断して、そのチャンネルのシグナルを強制的にゼロとしてデータ解析を行った。そのようなイベントは全体の約 0.5 % であった。

5. 電子フラックスの導出

粒子識別によって電子候補として残ったイベントを用いてフラックスを導出した。シミュレーションで、各エネルギーにおけるトリガー効率、エネルギー決定精度、飛跡再構成精度、粒子識別性能等を計算して、以下の式に代入している。

$$f[\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{GeV}^{-1}] = \frac{N}{\Delta E \cdot t \cdot S\Omega} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \delta \quad (10)$$

ここで、 f はフラックス、 N はイベント数、 ΔE はエネルギー幅、 t は観測中に計測されたライブタイムを観測時間として表す。 $S\Omega$ は検出器の幾何学的因子を表し、 $S\Omega = 314 \text{ cm}^2\text{sr}$ という値である。 ε 、 δ は残存率、混入率を表す係数で、それぞれ以下のように定義している。

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{trig}} \cdot \varepsilon_{\text{ene}} \cdot \varepsilon_{\text{track}} \cdot \varepsilon_{\text{ep}} \quad (11)$$

$$\delta = (1 - \delta_{\text{ene}}) \cdot (1 - \delta_{\text{track}}) \cdot (1 - \delta_p - \delta_\gamma)$$

ここで ε_{ene} 、 $\varepsilon_{\text{trig}}$ 、 $\varepsilon_{\text{track}}$ 、 ε_{ep} はそれぞれエネルギー換算、トリガー、シャワー軸再構成、粒子識別の際の電子残存率を表す。また δ_{ene} はエネルギー換算の際に別のエネルギーの電子が混入する率、 δ_{track} はシャワー軸再構成の際に本来は幾何条件を満たしていない電子が混入する率、 δ_p は粒子識別の際の陽子混入率、 δ_γ は粒子識別の際のガンマ線混入率を表す。ガンマ線混入率には、後方散乱によって S1 に信号をおとしたガンマイイベントの他、検出器上方で反応して二次電子を生成したガンマ線も含んでいる。各エネルギーにおける ε 、 δ の値を表 8 に示す。1 GeV トリガーと 5 GeV トリガーでは、観測時間、検出効率等が異なるため、それぞれ独立にフラックスを計算し、足し合わせている。エネルギー的に重なり合う領域で、2つのトリガーのスペクトルは統計誤差の範囲内で一致している。

以上の解析により求められた電子フラックスを図 34 に示す。大樹町上空 35 km における Rigidity は 11.7 GV であり、その前後の一次電子と二次電子がシミュレーション（図の実線）に矛盾しない精度で観測されている。bCALET-1 および BETS は、三陸で行なわれた実験であるため、三陸高度 37 km（bCALET-1 の平均飛翔高度）におけるシミュレーションと比較する必要がある（図の点線）。BETS のフラックスは、大気トップにおける値に換算してあるので、ここで用いたシミュレーションよりやや高めとなっているが、大気トップの値は両者でよく一致している。bCALET-1 では、 $S\Omega$ が bCALET-2 の約 15 分の 1 であり、観測時間を考慮しても観測量は約 10 分の 1 である。このため、最大エネルギーは 10 GeV 付近に限られ、統計量も劣るが、一方 IMC の物質層が薄いので、1 GeV 以下の電子も観測できている。

表 8：各エネルギーにおける電子残存率および混入率補正係数

Energy [GeV]	ε (1 GeV トリガー)	δ (1 GeV トリガー)	ε (5 GeV トリガー)	δ (5 GeV トリガー)
0.82 ~ 1.38	0.36	0.49	0.00	0.00
1.38 ~ 2.35	0.57	0.44	0.00	0.37
2.35 ~ 3.98	0.66	0.40	0.067	0.39
3.98 ~ 6.73	0.64	0.55	0.41	0.55
6.73 ~ 11.4	0.74	0.77	0.69	0.77
11.4 ~ 19.3	0.76	0.73	0.75	0.73
19.3 ~ 32.6	0.75	0.78	0.75	0.78

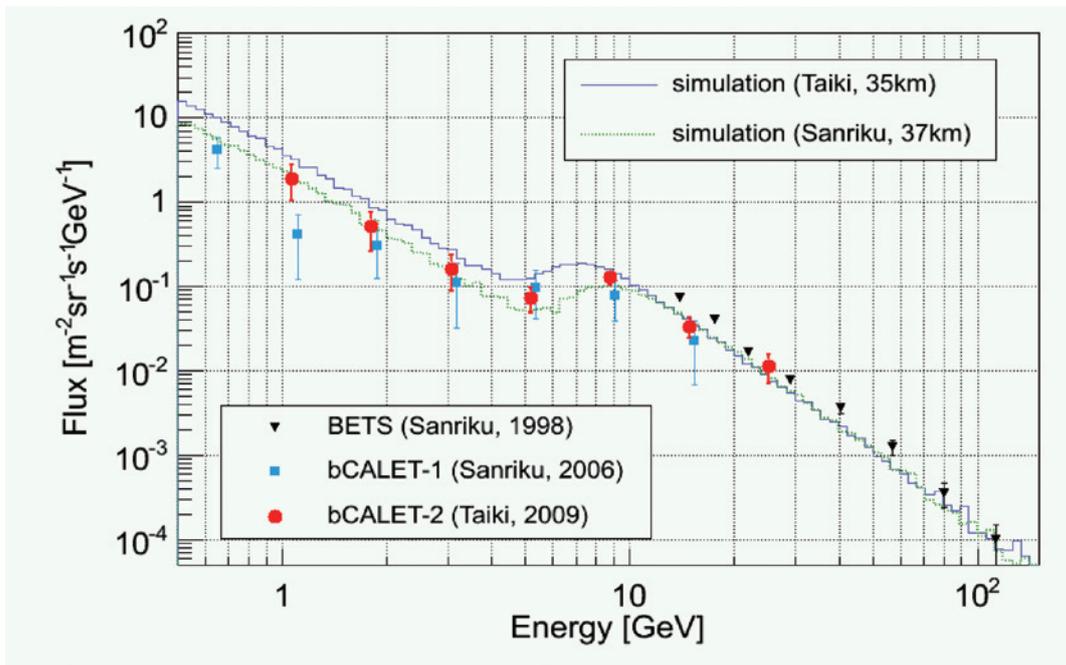


図 34：bCALET-2 で得られた電子エネルギースペクトル（●）と、シミュレーションおよび bCALET-1（■），BETS（▼）データとの比較。シミュレーションでは、大樹町上空 35 km における地磁気の影響を考慮している。10 GeV 付近には、Rigidity による一次電子のカットオフが見られる。bCALET-1 および BETS は、三陸における実験。

6. ガンマ線フラックスの導出

ガンマ線フラックスは電子フラックスと同様に導出した。シミュレーションで、各エネルギーにおけるトリガー効率、エネルギー決定精度、飛跡再構成精度、粒子識別性能等を計算し、式 (10) に代入している。ただし δ_γ の代わりに電子の混入率 δ_e を考慮する。各エネルギーにおける ϵ , δ の値を表 9 に示す。得られたフラックス (図 35) は、大樹町高度 35 km におけるシミュレーション計算とほぼ一致している。

表 9：各エネルギーにおけるガンマ線残存率および混入率補正係数

Energy [GeV]	ϵ	δ
1.00~1.58	0.43	0.58
1.58~2.51	0.48	0.63
2.51~3.98	0.49	0.66
3.98~6.30	0.48	0.67
6.30~10.0	0.48	0.73
10.0~15.8	0.47	0.77
15.8~25.1	0.40	0.84

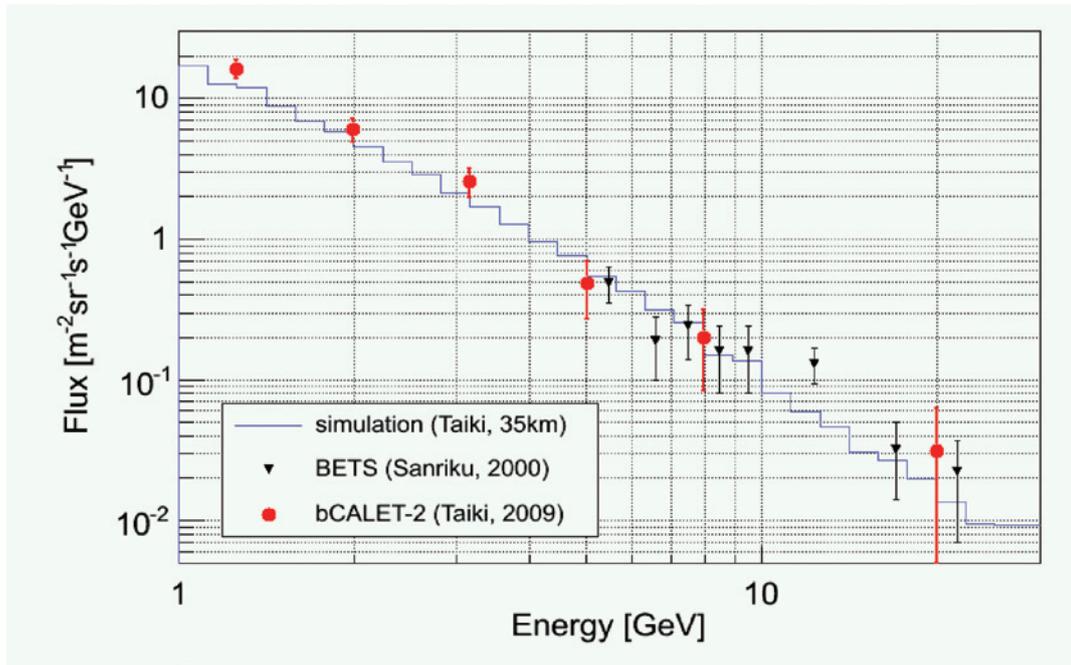


図 35 : bCALET-2 で得られたガンマ線フラックス (●) と、シミュレーションおよび BETS データ (▼) との比較。BETS は三陸における高度 32 km の結果である [16]。

7. まとめ

bCALET-2 実験では、高度 35 km における約 2.5 時間のレベルフライトによって、電子トリガー 8,391 例、ガンマトリガー 3,466 例のイベントを取得した。これらのデータについて、飛跡再構成を行ない、S1 の電離損失量、TASC・IMC におけるシャワー形状を用いた粒子識別によって電子・ガンマ線候補を弁別した。これらの解析により、最終的に 1 GeV 以上の電子 72 イベント、ガンマ線 117 イベントが選別された。これらの電子・ガンマ線候補について、加速器実験とシミュレーション計算により得られた、観測装置の検出効率、エネルギー分解能、角度分解能、粒子識別性能等を用いて、観測高度でのエネルギースペクトルを求めた。TASC におけるシャワーエネルギーの測定から得られたエネルギー分解能は、10 GeV の電子について 7.46 %、ガンマ線については 6.64 % であった。また角度分解能は、シミュレーションイベントを実験データと同様の手法で飛跡再構成を行なったところ、電子について 1.4°、ガンマ線について 1.6° の精度が得られた。粒子識別については、低エネルギー (6.7 GeV 以下) の電子について平均して 11.2 %、高エネルギー (6.7 GeV 以上) の電子について 6.10 % の混入率で、電子と陽子・原子核成分を識別できている。

これらのデータ解析から得られた、約 1 GeV から 30 GeV のエネルギー範囲における電子フラックスは、これまでの一次電子と陽子・原子核のエネルギースペクトルの観測結果を仮定して得られた大気成分の計算結果と統計誤差内でよく一致している。ガンマ線については、宇宙起源の拡散成分はこのエネルギー領域では数%以下であり、電子と同じ一次宇宙線の仮定に基づく大気ガンマ成分の値とほぼ一致している。この結果、bCALET-2 が目的とした、Rigidity Cut 以下から数 10 GeV 領域の電子・ガンマ線エネルギースペクトルの観測を実施し、CALET による電子を用いた太陽変調の観測に対する技術実証とガンマ線観測性能の検証に成功している。

bCALET では、戦略的に装置規模の拡充を図ることにより最終的に TeV 領域にせまる観測性能の実証化を試みたが、CALET の打ち上げ時期が 2014 年と決まったことにより、予定していた 2012 年以降の bCALET-3 号機による海外での長時間飛行実験の必要性がなくなり、観測計画を断念した。bCALET-1, 2 号機による国内実験では、装置規模と飛行時間の制約により、高エネルギー側は 30 GeV 領域までの観測にとどまっているが、bCALET の成果は、地上におけ

る装置開発だけでは得られない経験であり、飛翔体観測においても CALET の性能実証ができたという意味において、今後の CALET の開発に不可欠な貢献となった。

8. 謝辞

大樹町における bCALET 気球実験の実施においては、宇宙科学研究所大気球実験室のスタッフの皆様の多大なる協力を受けて実施することができました。この場をかりて大いなる感謝の意を表します。なお、この研究は科研費基盤研究 S（課題番号：21224006、研究代表者：鳥居祥二）の助成を受けています。

9. 参考文献

- [1] J. Nishimura, et al., “Emulsion chamber observations of primary cosmic-ray electrons in the energy range 30-1000 GeV”, *ApJ*, 238, 394-409, 1980
- [2] S. Torii, et al., “The Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electrons from 10 to 100 GeV Observed with a Highly Granulated Imaging Calorimeter”, *ApJ*, 559, 973-984, 2001
- [3] 鳥居祥二, 他, “南極周回気球による高エネルギー電子の観測”, 大気球研究報告, JAXA-RR-05-012, 2006
- [4] K. Yoshida, et al., “Cosmic-ray electron spectrum above 100 GeV from PPB-BETS experiment in Antarctica”, *Adv. Space Res.*, 42, 1670-1675, 2008
- [5] T. Kobayashi, et al., “The Most Likely Sources of High-Energy Cosmic-Ray Electrons in Supernova Remnants”, *ApJ*, 601, 340-351, 2004
- [6] J. Chang et al., “An excess of cosmic ray electrons at energies of 300-800 GeV”, *Nature*, 456, 362-365, 2008
- [7] O. Adriani, et al., “An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV”, *Nature*, 458, 607-609, 2009
- [8] M. Ackermann, et al., “Fermi LAT observations of cosmic-ray electrons from 7 GeV to 1 TeV”, *Phys. Rev. D*, 82, 092004, 2010
- [9] J. Casaus, et al., “The AMS-02 experiment on the ISS”, *Journal Physics: Conference Series*, 171, 012045, 2009
- [10] S. Torii, et al., “Overview of the CALET Mission to the ISS”, *Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference (Beijing)*, 6, 347-350, 2011
- [11] Y. Shimizu, et al., “Balloon borne experiment with CALET prototype”, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A*, 78, 165-168, 2009
- [12] T. Niita, et al., “Measurements of Cosmic-ray Electrons and Gamma-ray Flux with Balloon-Borne CALET Prototype”, *Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference (Beijing)*, 6, 18-21, 2011
- [13] <http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/cosmosHome/index.html>
- [14] <http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/EPICSHome/index.html>
- [15] S. Roesler, et al., “The Monte Carlo Event Generator DPMJET-III”, *Proc. Monte Carlo 2000 (Lisbon)*, 71, 23, 2000
- [16] K. Kasahara, et al., “Atmospheric gamma-ray observation with the BETS detector for calibrating atmospheric neutrino flux calculations”, *Phys. Rev. D*, 66, 052004, 2002
- [17] H. Bichsel, et al., “Passage of particles through matter”, *Review of Particle Physics*, 2010

付録 A：フラックス導出の際の残存率・混入率の計算

フラックス導出の式 (10) における ε , δ は以下のように定義している.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{trig}} \cdot \varepsilon_{\text{ene}} \cdot \varepsilon_{\text{track}} \cdot \varepsilon_{\text{ep}}$$

$$\delta = (1 - \delta_{\text{ene}}) \cdot (1 - \delta_{\text{track}}) \cdot (1 - \delta_p - \delta_\gamma)$$

ここで ε_{ene} , $\varepsilon_{\text{trig}}$, $\varepsilon_{\text{track}}$, ε_{ep} はそれぞれエネルギー換算, トリガー, シャワー軸再構成, 粒子識別の際の電子残存率を表す. また δ_{ene} はエネルギー換算の際に別のエネルギーの電子が混入する率, δ_{track} はシャワー軸再構成の際に本来は幾何条件を満たしていない電子が混入する率, δ_p は粒子識別の際の陽子混入率, δ_γ は粒子識別の際のガンマ線混入率を表す. 以下にシミュレーションから求めたそれぞれの係数のエネルギー依存性を示す.

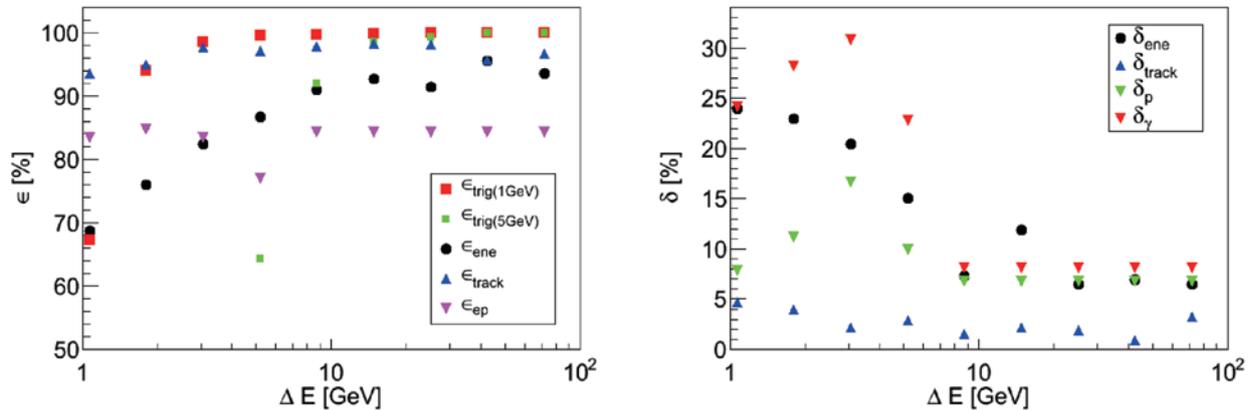


図 A-1：電子解析における残存率, 混入率の TASC における損失エネルギー依存性. 左が各段階における電子の残存率を表す. 電子/陽子識別の手法を 6.7 GeV を境に変更しているため, ε_{ep} の値はその付近で不連続になっている. 右は各混入率 (本文参照) を表す.

付録 B：電子シャワー軸再構成の詳細

電子のシャワー軸再構成は, §4.3 に述べた手法で行なったが, フィッティングする組み合わせの数を減らし, 解析の時間を短縮するために, 以下の方法でフィッティングに適した組み合わせを選択している.

- 1) ある候補点の組み合わせについて, 各候補点同士の二点間の傾きを計算し, その平均と平均二乗偏差を計算する. これを, それらの点を直線でフィッティングしたときに得られる傾きと, 直線への当てはまりのよさを予想する簡易的な値とみなす. この計算をすべての組み合わせについて行なう.
- 2) 1) で求めた平均二乗偏差が 0.1 以上となる組み合わせは, 直線への当てはまりが悪いと判断して捨てる.
- 3) 1つのイベントに対して, 1) で求めた傾きが 1° 以内の誤差で一致する組み合わせが複数ある場合は, それらの中で平均二乗偏差が最小となるものを選び, それ以外の組み合わせは捨てる.

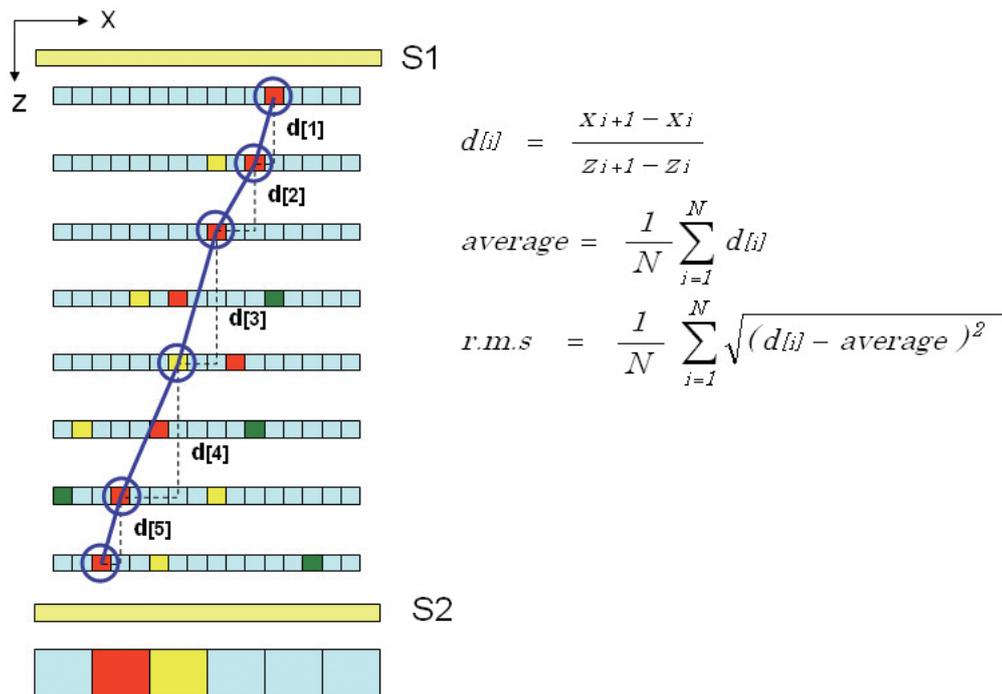


図 B-1 : 電子シャワー軸再構成概念図.