

# 南極周回気球による高エネルギー電子の観測

鳥居祥二<sup>1</sup>, 山上隆正<sup>2</sup>, 田村忠久<sup>3</sup>, 吉田健二<sup>3</sup>, 北村尚<sup>4</sup>,  
安楽和明<sup>3\*</sup>, 山下太郎<sup>3\*</sup>, 西村純<sup>2</sup>, 斎藤芳隆<sup>2</sup>, 並木道義<sup>2</sup>,  
松坂幸彦<sup>2</sup>, 太田茂雄<sup>2</sup>, 門倉昭<sup>5</sup>, 山岸久雄<sup>5</sup>, 江尻全機<sup>5</sup>,  
村上浩之<sup>6</sup>, 柴田槇雄<sup>7</sup>, 片寄祐作<sup>7</sup>, 笠原克昌<sup>8</sup>, 小林正<sup>9</sup>,  
古森良志子<sup>10</sup>, 水谷興平<sup>11</sup>, 湯田利典<sup>12</sup>, 常進<sup>13</sup>

## Observation of High Energy Electrons by Polar Patrol Balloon

By

Shoji TORII<sup>1</sup>, Takamasa YAMAGAMI<sup>2</sup>, Tadahisa TAMURA<sup>3</sup>, Kenji YOSHIDA<sup>3</sup>,  
Hisashi KITAMURA<sup>4</sup>, Kazuaki ANRAKU<sup>3\*</sup>, Taro YAMASHITA<sup>3\*</sup>, Jun NISHIMURA<sup>2</sup>,  
Yoshitaka SAITO<sup>2</sup>, Michiyoshi NAMIKI<sup>2</sup>, Yukihiko MATSUZAKA<sup>2</sup>, Shigeo OHTA<sup>2</sup>,  
Akira KADOKURA<sup>5</sup>, Hisao YAMAGISHI<sup>5</sup>, Masaki EJIRI<sup>5</sup>, Hiroyuki MURAKAMI<sup>6</sup>,  
Maiko SHIBATA<sup>7</sup>, Yusaku KATAYOSE<sup>7</sup>, Katsuaki KASAHARA<sup>8</sup>, Tadashi KOBAYASHI<sup>9</sup>,  
Yoshiko KOMORI<sup>10</sup>, Kohei MIZUTANI<sup>11</sup>, Toshinori YUDA<sup>12</sup> and Jin CHANG<sup>13</sup>

**Abstract** : We have carried out an observation of cosmic-ray electrons from 10 to 1000 GeV by the Polar Patrol Balloon at the Syowa Station in Antarctica. The balloon was flown for 13 days at a level altitude of 35 km in January, 2004 and about 5,700 events were observed over 100 GeV. The detector, PPB-BETS, is an imaging calorimeter composed of a layer of scintillating fiber belts and plastic scintillators inserted alternatively between lead plates. The geometrical factor is about 600 cm<sup>2</sup>sr and the total thickness of lead absorber is 9 radiation lengths. The performance of detector has been confirmed by the CERN-SPS beam test and has also been studied by Monte-Carlo simulations. For the long duration ballooning, we introduced some new technologies as followings; a telemetry system using a commercial satellite of the Iridium, an intelligent power supply by solar batteries, an automatic level control system. A preliminary result of the electron energy spectrum by sampling about 100 electron candidates is pre-

<sup>1</sup> 早稲田大学理工学総合研究センター

<sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

<sup>3</sup> 神奈川大学工学部 (\* 日本宇宙フォーラム)

<sup>4</sup> 放射線医学研究所

<sup>5</sup> 国立極地研究所

<sup>6</sup> 立教大学理学部

<sup>7</sup> 横浜国立大学工学部

<sup>8</sup> 芝浦工業大学システム工学部

<sup>9</sup> 青山学院大学理工学部

<sup>10</sup> 神奈川県立保険福祉大学

<sup>11</sup> 埼玉大学理学部

<sup>12</sup> 東京大学宇宙線研究所

<sup>13</sup> 中国科学院紫金山天文台

sented with a description of the detector, the observation and the method of data analysis.

## 概 要

我々は、高エネルギー電子加速源の探索と加速機構の解明を目的として、南極周回気球による長期間観測を2004年1月に実施した。観測は、平均高度35kmにおいて13日間にわたって行われ、10GeVから1,000GeVのエネルギー領域で、これまでの三陸での観測総量を1桁以上超えるデータの取得に成功した。この観測のために開発されたPPB-BETSと呼ばれる装置は、シンチ・ファイバベルトとプラスチック・シンチレータを吸収層（鉛板）の間に交互に挿入した構造を持つシャワー可視化型カロリメータである。全部で約9輻射長の厚さの鉛と、約10,000本のシンチ・ファイバーを用いて、宇宙線シャワーの3次元的発達を測定することにより、約4,000倍の陽子除去能力を実現している。その観測時の有効面積は約600cm<sup>2</sup>srであり、エネルギー分解能は100GeVで約12%である。これらの装置の基本性能は、CERN-SPSにおける電子、陽子ビームの照射実験で確認するとともに、シミュレーション計算を駆使して観測性能を詳細に調べた。長期間気球実験のために、イリジウム衛星を用いたテレメトリー、太陽電池による発電（充電）システム、CPUを用いたオートレベルコントロール等の、幾つかの新たな技術が導入された。100GeV以上のエネルギーを持つ約5,700イベントの観測データから約100例の電子候補を選別した。本稿では、観測目的、観測装置、シミュレーション計算、ビームテスト、気球実験、データ解析と、一次電子エネルギー・スペクトルの初期的な結果を報告する。

**重要語：**高エネルギー電子、南極周回気球、シンチファイバー検出器

### 1. はじめに

宇宙線中の高エネルギー電子成分は、超新星残骸内で加速され、銀河内を伝播するうちにシンクロトロン輻射や逆コンプトン過程によってエネルギーを失って地球に到達すると考えられている。そして、超新星残骸内や銀河内の滞在時間（捕捉寿命）のエネルギー依存性によって、エネルギー・スペクトルに変化が現れることが期待される。伝播過程におけるエネルギー損失の割合はエネルギーの2乗に比例して増大するため、TeV領域では電子の寿命が10万年以下になり、この間に拡散過程により伝播できる距離も1kpc以内に限られる。このような条件をみたす超新星残骸（近傍ソース）の候補は、Vela, Monogem, Cygnus Loopなど数例に限られる。この結果、統計的なソースの重ね合わせで得られるエネルギー・スペクトルにカットオフが現れる数100GeV以上の領域で、個々の近傍ソースからの電子が分離可能な、図1に示すような、特徴のあるスペクトル構造が出現するという極めて興味深い理論的予測が示されている [1]。このようなスペクトルが観測できれば、宇宙線加速源の直接的検出という、これまでどのような観測も実現できなかった画期的な成果をえることができる。さらに、このエネルギー領域では暗黒物質の有力候補であるWIMP (Weakly Interacting Massive Particle) の崩壊や対消滅による電子（+陽電子）の観測（図2）も期待されている [2]。しかしながら、これまでは観測の難しさのため精度の高いエネルギー・スペクトルが得られず、その変化を十分に観測出来ているとは云い難い状況ある。このため、単一測定器により10GeVから1,000GeVの領域で、高精度のエネルギー・スペクトルを測定することが強く望まれている。

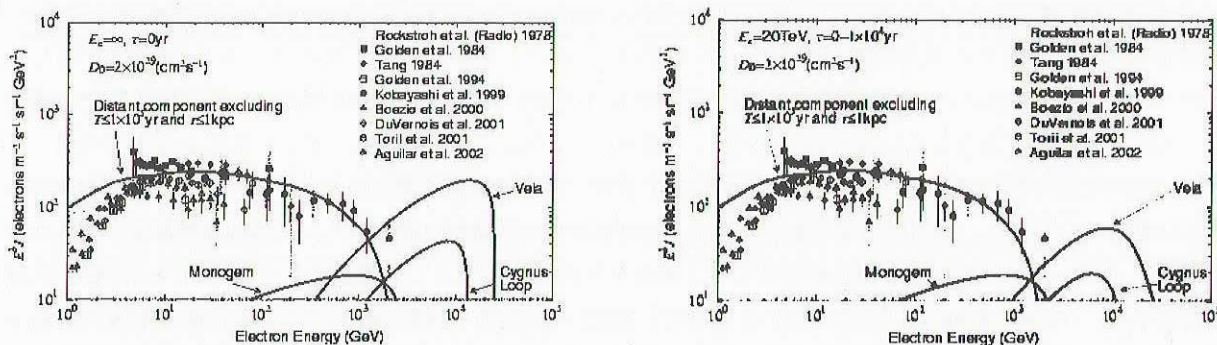


図1 超新星爆発の標準シナリオに基づく電子エネルギースペクトルの計算結果と実験データの比較 (本文参照)。左図は、加速時のエネルギーは  $E^{-2.3}$  の微分スペクトルを持ち無限エネルギー ( $E_c = \infty$ ) までに加速し、加速期間は瞬間的 ( $\Delta T = 0$ ) と仮定した場合。右図は、 $E_c = 20\text{TeV}$  で、 $\Delta T = 10^4 \text{yr}$  とした場合。いずれも、銀河内の拡散係数はエネルギー依存性 ( $E^{0.5}$ ) をもち、 $1\text{TeV}$  で  $D_0 = 2 \times 10^{29} \text{cm}^2/\text{s}$  である。

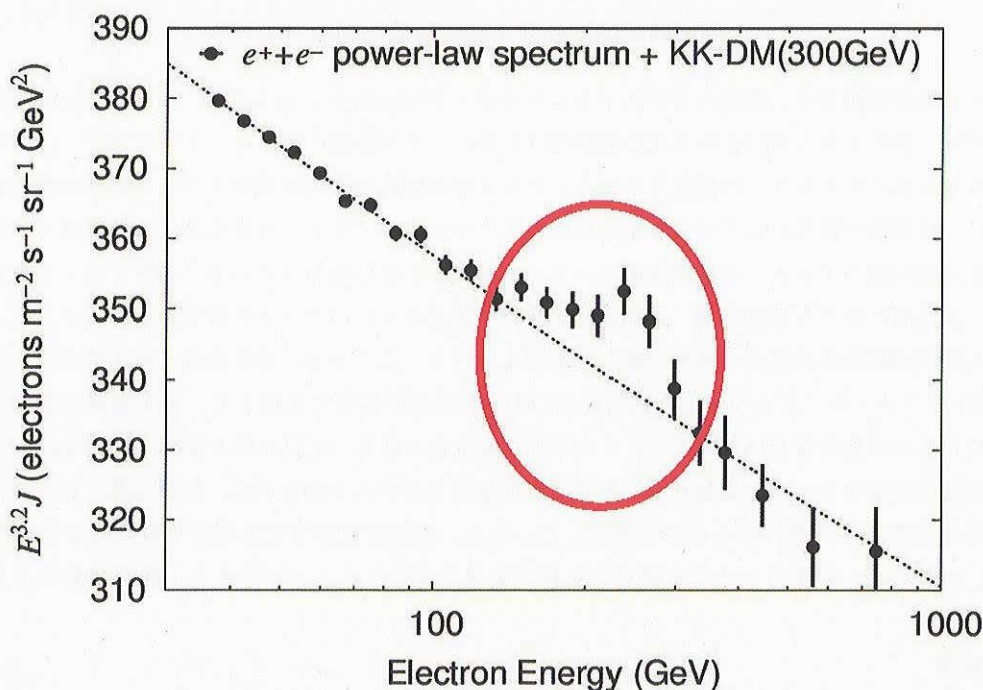


図2 300GeV の Kaluza-Klein Dark Matter (Cheng et al. PRL 2002) から期待される電子 (+陽電子) によるエネルギースペクトルにおける変化 (丸印の部分)。CALET (§ 7 参照) での観測量を仮定。

このような観測を実現させるためには、高い電子検出効率と大面積という互いに反する性能を合わせ持つ測定器の開発が不可欠である。従来用いられてきたチェレンコフ光測定器 [3] や遷移放射検出器 [4] は、100GeV 以下では高い電子検出効率を持つが、100GeV 以上で電子選別が困難になる。さらに、幾つかの機能を持つ装置要素を組み合わせるの必要があり、全体が大型化し重量の割に有効立体角が小さくなるため、観測を増やすことが難しい。原子核乾板を用いたエマルジョン・チェンバーは大面積化が容易で、1,000GeV 以上の領域まで観測が可能な現時点での唯一の装置である [5]。一方、100GeV 以下ではシャワーの検出が困難で、時間分解能がないため到来方向の測定が出来ないことに加えて、回収を絶対に必要とするという条件があるため、長期間観測実験では利用が極めて制限されざるを得ない。

我々はこのような既存の測定器の欠点を克服し、高エネルギー電子の精密測定を行なうために、シンチ・ファ

イバー (SciFi) を活用した新しい方式の観測装置 (BETS: Balloon borne Electron Telescope with Scintillating fibers) を開発し [6], 国内での気球実験で10GeV から100GeV におけるエネルギー・スペクトルの観測に成功した [7]. さらに, 大気ニュートリノ振動の定量的解明を行うために, GeV 領域の大気ガンマ線の高度変化の観測を, 装置改良により実施している [8]. BETS は, 原理的に100GeV 以上の電子, ガンマ線にも利用が可能であるが, 国内における気球観測では数日以上は観測ができず, 電子加速源の同定などを行うに十分な観測量が得ることは難しい. しかし, 南極周回気球を用いれば, 20日間程度の観測が可能であり, 飛躍的な観測量の増大が期待できる [9]. このため, 国立極地研究所の第5次5ヶ年計画の一環として実施された第2期の南極周回気球 (PPB: Polar Patrol Balloon) 実験 [10] によって, BETS の改良型 (PPB-BETS) による長期間観測に挑戦した. 2004年1月に実施されたこの観測では, 35km の高度で13日間にわたって観測が実施され, 国内実験総量の10倍を上回るデータが得られている. 本稿では, 装置, 観測の概要とデータ解析の手法, および初期的なエネルギー・スペクトルの結果について報告する.

## 2. 南極周回気球搭載電子観測装置 (PPB-BETS)

PPB による長期間観測では, 観測の対象とするエネルギーが1000GeV に及ぶため, 10~100GeV の領域での観測のために設計, 製作された BETS を単純に面積だけ大型化しても観測に用いることはできない. このため, 検出器部分の改良に加えてシャワーの撮像システム, データ取得回路の大幅な増強を行った観測装置を新たに開発した. さらに, 長期間の観測には不可欠な衛星経由のデータ伝送システム, 太陽電池による発電 (充電) システム, 気球高度自動制御システム, 長期間装置モニターシステムが付け加わっている. 装置システム全体の概略を図3に示す. 長期間にわたる観測の間, 気球高度を維持する必要からバラストの重量が大きくなり, ペイロード全体にしめる観測装置本体の重量は極めて厳しい制限を受ける. このため, 装置全体を圧力容器に入れることができず, CFRP とアルミハニカムを用いた遮光性能のある非密封の容器に収納して, 高圧電源を使用する箇所では放電防止のための真空対策をほどこした. このような軽量化の結果, 装置本体の重量は約200kg となり, 250kg のバラスト搭載が可能となった. 観測状態における長期安定性のテストのために, 装置全体を真空チェンバーに入れて, 2週間の間正常に動作することを確認した. なお, 全消費電力は太陽電池で供給可能な約70W に抑えられており, PPB の厳しい条件に十分な適合性を持つ装置を完成することができた. 観測装置の主な諸元を表1に示す.

### 2.1 観測装置

#### 2.1.1 検出器

検出器は, 原理的には BETS と同じ構造のシャワー可視化型のカロリメータであるが, 次のような新規開発が行われている. TeV 領域までの観測を行うために鉛の吸収層を厚くするとともに, 機上における陽子除去率とエネルギー測定精度の向上のため, プラスチック・シンチレータ (シンチレータ) の数を, 3層から9層に大幅に増強している. 図4に, 検出器を側面から見た概略図を示す. 全体で9輻射長 (radiation length: r.l.) の厚さの鉛板の間に, 9枚のシンチレータと18枚のシンチ・ファイバー (Scintillating Fiber: SciFi) ベルトが入っている. 検出器の面積は28cm×28cm で厚さは約24cm である. 検出器上方から入射した高エネルギー宇宙線は, 鉛でカスケードシャワーを発生し, シンチレータからのシグナルの同期によりトリガー信号を発生する. そして, ゲート機能のついたイメージ・インテンシファイヤー (I.I) によって, SciFi で検出されたシャワーイメージが X, Y 各々の方向に取り込まれ, CCD カメラで撮像される. このシャワー発達の3次元的な形状を用いて, 入射粒子の到来方向の決定や粒子種類の弁別が可能である. エネルギーは, 各シンチレータのシグナルで遷移カーブを測定して決定する.

シンチレータは, 鉛の厚さで0~7r.l.の深さに1r.l.おきに8枚, 9r.l.の深さに1枚の計9枚 (Si,  $i=0\sim 8$ ) を設

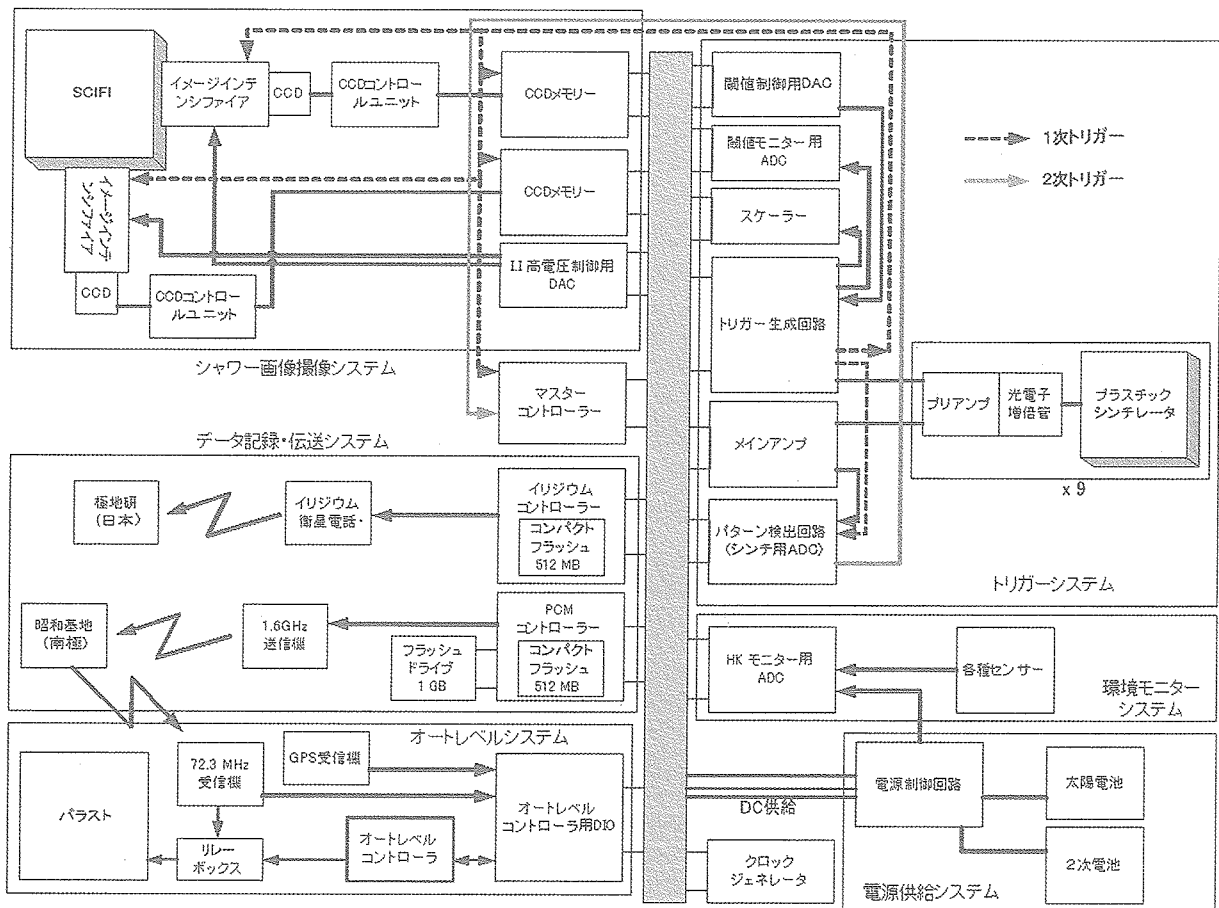


図3 PPB-BETS のシステム全体図。

表1: PPB-BETS の装置諸元

装置本体重量	200kg	非密閉容器を含む (480kg バラストを含めた全重量)
消費電力	70W	太陽電池及び二次電池による供給
観測高度	~35km	オートレベルシステムによる自動制御
データ転送速度	~2.4kbps	イリジウム衛星回線
	~64kbps	地上局との直接通信

置した。それらの厚さは、シャワー粒子数を考慮して上方の  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  では10mm,  $S_3 \sim S_6$  の6枚は5mmとなっている。各シンチレータはBICRON社製のBC404を用い、波長変換用ファイバー (BICRON BCF-92) を14mm間隔で、表面と裏面にそれぞれX, Y方向に平行な溝に埋め込んである。読み出し側は、ファイバーの端面をシンチレータ毎に束ねて、光電子増倍管 (HAMAMATSU R7400) に接続する。光電子増倍管の出力信号は、プレアンプで増幅し2系統の信号の出力に分岐する。一方は、トリガーシグナルの生成に用い、他方はエネルギー測定のために、メインアンプで整形したあとピークホールド型の12 bit ADCによってデジタル変換して記録した。

SciFi (Kuraray SCSF38) は、断面が1mm角で発光のピーク波長が423nm, 減衰長は約220cmである。280本のSciFiを横一列に並べて一枚のベルトを構成し、図4に示されているように、鉛板の間に挿入する。入射粒子と

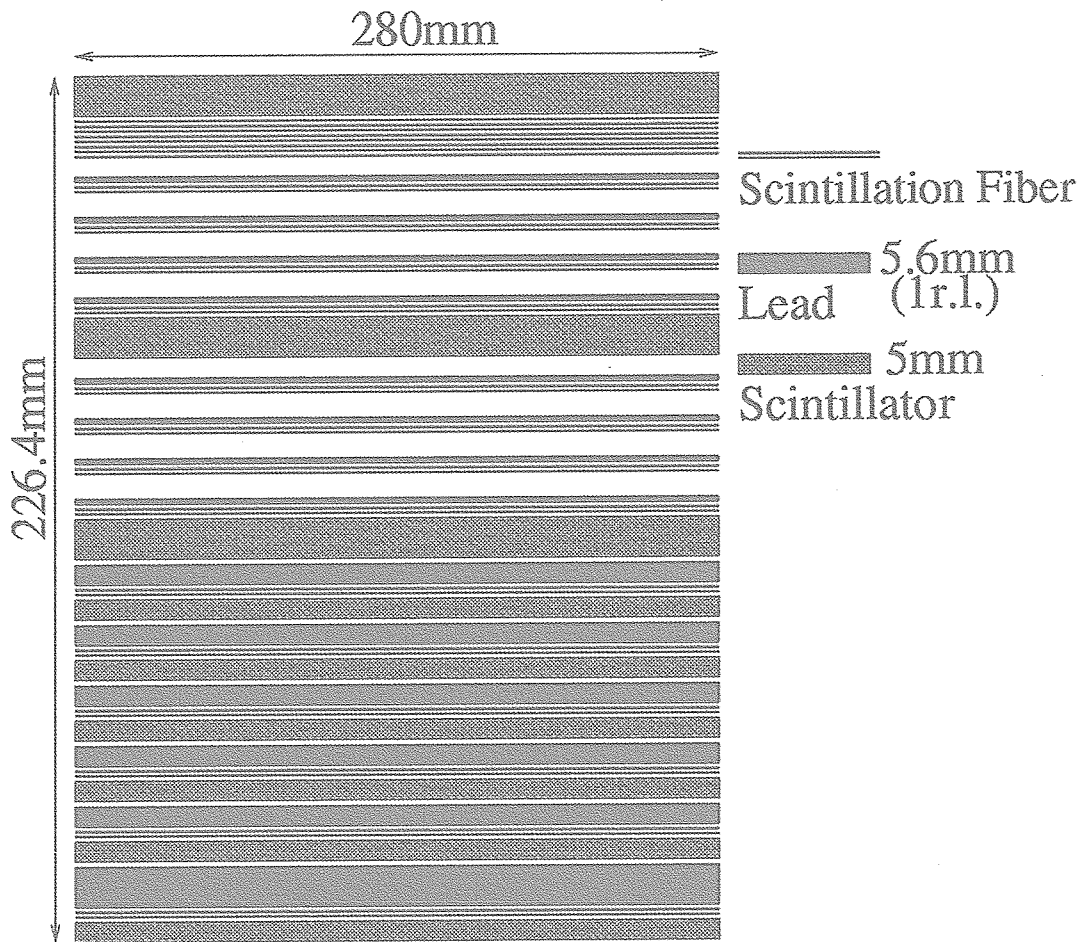


図4 検出器の側面からみた概念図 (本文参照).

初期段階のシャワー (pre-shower) を正確に測定するために、0r.l.に4層、その後0.25r.l.毎に2r.l.まで8層が挿入され、続いて3~7r.l.では1r.l.毎と9r.l.に各1層 (全部で6層) の計18層が用いられる。各層ではX、Yの互いに直交する方向に2枚のベルトが設置されており、合計36層 (SciFiの総本数は10,080本) のベルトで、シャワーの3次元的な発達を測定する。検出器外でのノイズを防ぐために、各SciFiは一本ごとにライトガイド用のクリアファイバー (Kuraray Clear-PS) と特製の光カップラーで接合し、X、Y方向毎に読み出し側を束ねてLIの入力窓に接続する。LIの光電面は直径100mmの円であるので、有効面積内に収まるように、1層280本のベルトを70本毎に4つに分けて、それらを4層に積層する。そして、この各層にファイバー位置校正用のLEDを光源とするクリアファイバーを2本ずつ入れたうえで、一方向18層のベルトを束ねて、10cm直径の円に内接する72本×72層の正方形の断面にして接続した。

#### 2.1.2 トリガーシステム

イベントのトリガーは、シャワー粒子によってシンチレータ内で発生したシグナルの同期により生成する。トリガー条件としては、観測する電子のエネルギーに合わせた2種類と、パルスハイト校正用の宇宙線ミュオン粒子によるシングル・トリガー、およびSciFiの位置校正のためのクロック同期によるLEDトリガーの計4モードがある。観測用の2種類は、10GeV以上のシャワーをトリガーするための低エネルギー (LE) モードと、100GeV以上のための高エネルギー (HE) モードである。観測期間中にエネルギーしきい値を変更して、トリガーレートを変更する必要が生じることも想定されるため、トリガー生成回路における各ディスクリ値の設定は、コマン

ドで変更できるようにした。また、特定のチャンネルが発振したような場合も想定して、そのシンチレータのシグナルを有効または無効にする（マスク）コマンドも用意した。

HEモードでは  $S_0 \sim S_8$  の下限値と、 $S_0$  の上限値を満たす、合計10個のコインシデンスを用いる。

LEモードは、 $S_0$  の下限値と上限値、 $S_2$  の下限値、 $S_7$  の下限値を満たす、4個のコインシデンスである。シングルモードでは、 $S_0$  の下限値と  $S_2$  の下限値を満たす2つのコインシデンスでトリガーをかける。これら3種類のモードで、 $S_0$  の下限値は各モードで共通であるが、その他はそれぞれに適切な値が設定されている。HEモードの10系統の単独のカウント数、HE、LEおよびシングルの各モードでの、トリガーとデータ取得（DAQ）の数は、スケーラで記録しトリガー状態のモニターを行った。

HEモードでは、各しきい値を電磁シャワーの発達に合わせて、主なバックグラウンドである陽子の効率的な除去が行えるようになってきている。図5は、シミュレーション計算で求めた各シンチレータにおけるシャワー粒子数の分布である。図からわかるとおり、電子起源のシャワーに比べて陽子起源のシャワーは極めて揺動が大きく、各しきい値を電子シャワーの下限値にあわせることにより、選択的に電子観測が可能になる。HEモードのトリガーでは、イリジウム衛星の通信回線（2.4kbps）により全データの伝送を行う必要があるため、出来る限り機上で陽子を除去してデータ量を減らす必要がある。このため、データ取得後にシャワー発達をより詳細に考慮した2次（ソフト）トリガーを用いて、機上において陽子雑音をさらに半分程度に減らしている。2次トリガーでは、異なる層にあるシンチレータ間の粒子数の比を求めて、電磁シャワーの形状に適合する条件を満たすイベントのみを選択する。この方法により、しきい値だけでは出来ないシャワー形状の判定が可能になり、陽子除去性能を向上させた。HEおよび2次トリガーを用いた場合に期待される、各粒子のトリガー効率と各粒子のフラックスを考慮した観測時の全トリガーレートのシミュレーション計算による予測値を表2に示す。実際の観測条件における全トリガーレートは、1時間で54イベント（ $\sim 1$  イベント/分）であることがわかる。

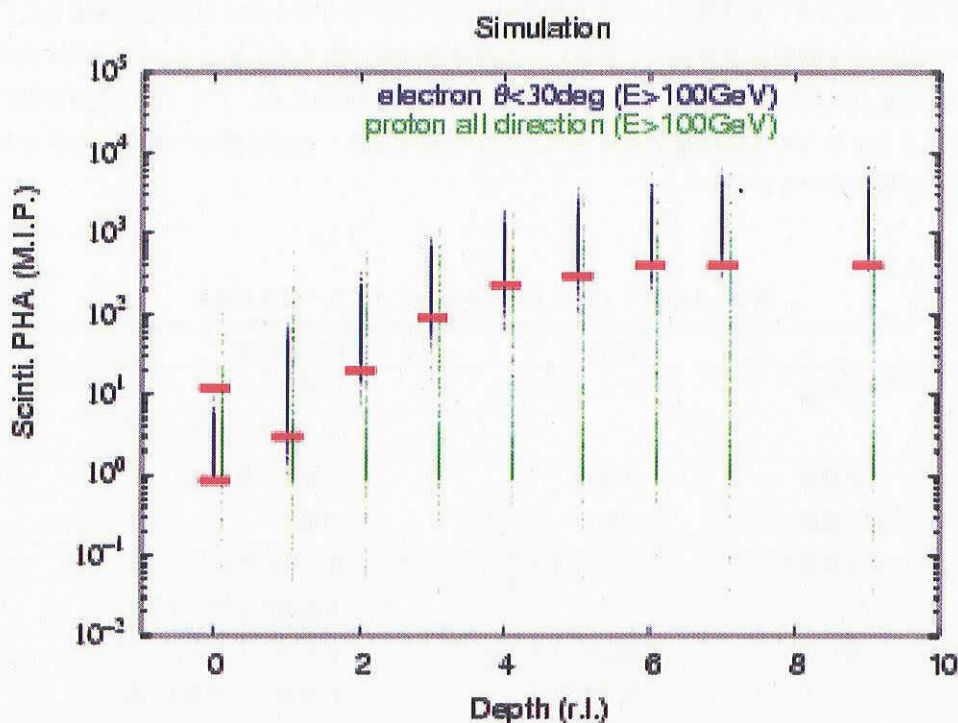


図5 シミュレーションによる電子と陽子のシャワー発達の違い。0から9r.l.におけるMIP数を、シミュレーションイベント毎にプロットした。図中の横線は各シンチレータにおける閾値の代表値を示している。

表2 HE 及び2次トリガーの場合の検出効率とトリガーレートの期待値

	HE トリガー	2次トリガー
電子 (100GeV)	91.0%	86.3%
陽子 (>150GeV)	0.96%	0.67%
ヘリウム	0.98%	0.53%
トリガー頻度 (events/hour)	97	54

シャワー粒子数への換算は、宇宙線ミュー粒子のパルスハイトを用いてキャリブレーションした、最小電離損失粒子 (MIP) の値を単位として行った。この測定では、天頂角分布を考慮したシミュレーション計算との比較により、まず1 MIPに相当する各チャンネルのADC値を決める。このとき光電子増倍管の電圧は800Vと共通の値を用いる。しかし、この状態では、1 TeVの電子シャワーでの(シミュレーション予測による)上限値まで測定することはできないので、光電子増倍管の電圧を下げて測定可能範囲が予測の範囲内に収まるように調整を行った。このために、プレアンプのテスト入力にリサーチパルサー (ORTEC448) からパルスを入力し、入力電荷とADC値の相関を求め、ADC値が飽和する値を測定する。次に、ミュー粒子の測定で求めた1 MIPに対するADC値を用いて、何MIPまで測定できるかが求めて、その範囲内に収まるように光電子増倍管の電圧を下げる。このときに必要な電圧とゲインの関係は、NaI (TI) 結晶にAmをドープしたライトパルサーを用いて決めている。ゲインは、450Vから800Vの間で、電圧のべき乗(7.1~7.9)に比例しており、この関係式から各光電子増倍管にかかる電圧を求めた。

### 2.1.3 シャワー画像撮像システム

撮像用のIIシステムは新たに開発されたもので、入力側口径が100mmで出力側口径が25mmの大口径IIと、ゲート機能をもつMCP (Multi-Channel Plate) 内蔵の近接型II (HAMAMATSU V4436U)、およびCCDを光学的に結合して構成されている。初段のIIを小型化し、二段目IIをインバーター型から近接型に変更し、大面積CCDを利用することにより、従来使用してきた既製品に比べてかなりの小型、軽量化を達成した。さらに、1 TeVの電磁シャワーでも飽和現象をふせぐために、入射光量に対するダイナミックレンジの拡大を図った。IIシステムの主な改良点を表3にまとめた。システム全体は、放電防止のためにアルミ製の気密容器に封入している。磁場の影響をさけるために、II部分をミューメタルで覆うほか、観測期間中の温度と気圧をモニターするためにセンサーが取り付けられている。

表3 大口径イメージ・インテンシファイヤーの改良項目

	BETS	PPB-BETS
真空容器	ガラスバルブ	金属バルブ (一部出力部ガラス)
内部電極	6電極	3電極 (簡素化)
高圧電源	外付け	内蔵
電極維持方法	下部のみセラミック止め	B1電極両面止め 溶接箇所を増やす
イオンポンプ	部分ポッティング	全体ポッティング
アンチモン源	管内固定	外部導入, 蒸着後外部へ
ゲッター	管内固定	なし
イメージチェーン	スプリング	シリコンゴム, ゴムバネ



初段の大口径 I.I では、100mm $\phi$  の光電面で変換された電子を、静電レンズによって25mm $\phi$  に収縮する。MCP (25mm $\phi$ ) を内蔵する二段目 I.I では、外部トリガーシグナル ( $\sim$ 約 1  $\mu$ s の遅れ) でゲートを10 $\mu$ s 開き、蛍光材で保持された光を増幅する。十分な増幅率 ( $\sim$ 106) を確保するために、もう一台の MCP 内蔵 I.I をつないで、CCD に接続する。撮像用の CCD は Thomson 社の TH7887 で、S/N 比が70dB、有効面積が14.336 $\times$ 14.336mm<sup>2</sup>で1024 $\times$ 1024の画素を持つ。トリガーシグナルと同期してリセット機能がはたらき、それまでの画像をクリアしてからシャワー画像を取り込む。フレーム転送モードを用いた、40MHz のサンプリングによる高速読み出しが、12bit 階調で可能である。BETS で使用した CCD に比べると S/N 比が6.3倍、SciFi 一本に対応する画素数が15倍になることから、SciFi の発光量に対してダイナミックレンジが2桁近く向上しており、TeV 領域のシャワーまで撮像が可能になっている。

CCD の画像データは、1 画像のデータが1.5Mbyte であるので、加速器ビーム実験で有効性を確認した上で、次に述べるような画像圧縮法を採用した。まず、4 $\times$ 4 画素を合算して16bit 階調の256 $\times$ 256画素の画像に変換する。そして、輝度の最大値が8 bit で収まるような log スケールへの変換を行う。ここまでは不可逆圧縮であるが、ダイナミックレンジと位置分解能は十分に確保されている。このときの1 画像のデータ量は64kbyte、1 イベント当たり X、Y の2 画面があるので128kbyte となる。さらに可逆圧縮として、Run-Length 符号化 [11] と Huffman 符号化 [12] によって、データ量を圧縮した。

#### 2.1.4 データ取得システム

トリガーが発生すると、CCD 画像データを取り込むとともに、シンチレータのシグナルを A/D 変換して、マスターコントローラによってスケアラの値や各種の HK データとまとめて、1 イベント分のデータ単位を作る。データは、トリガーモードの違いや HE モードでの2次トリガーの有無によって、機上記録またはデータ伝送の取り扱いが異なるため、それぞれに応じたデータフォーマットで構成されている。これらの一連の動作を行うシステムは、すべてモジュール化されている。データ収集を統括するマスタモジュールと CCD メモリモジュールは32ビットの専用バスで結ばれており、その他は8 bit の共通バス上に構成され、それぞれのモジュールにパラレル処理用の CPU が搭載されている (図1 参照)。すなわち、データ取得システムは、複数の CPU による並列・分散処理と DMA (ダイレクトメモリアクセス) によるモジュール間のデータ転送の高速化が図られており、システムの高速化を実現している。HE モードによるトリガーでデータ取得を行うために必要な全時間の平均値は、約0.8秒である。

## 2.2 気球観測システム

### 2.2.1 データ送信システム

気球が昭和基地から電波可視域にある間は直接交信が可能であるが、大部分の期間の通信はイリジウム衛星電話の公衆回線 (イリジウム回線) を使用する必要がある。直接交信では、1.6GHz の電波での PCM テレメータによって、64kbps でデータ送信が可能である。一方、イリジウム回線ではデータの送信レートは2.4kbps (実効は2.3kbps) に限られているので、トリガーモードに応じてデータ送信の最適な方法を選択して、出来る限り効率的にデータ送信を行う工夫がなされている。イリジウム回線では、HE モードと2次トリガーによって得られたデータのみをダウンロードする。一方、放球後の電波可視域にある時間帯では、イベントレートが高い LE モードでもトリガーをかけて PCM テレメトリーにより、昭和基地でデータを受信する。装置への電源投入時から10 時間が経過すると、LE モードは自動的に HE モードに切り替わり、HE モード (二次トリガーはなし) のみの PCM テレメトリーダウンリンクとなる。この HE トリガーのみのデータのダウンリンクは、当初イギリスのロテラ基地、中国の中山基地、周回後の昭和基地でのデータ受信を想定して設定したものであるが、今回の実験では実施されなかった。

2次トリガーで得たデータはメモリに書きこまれた後、イリジウム回線によって米国の受信基地にダウンロー

ドされ、常時接続の国際電話回線で極地研にあるデータ受信用のコンピュータにリアルタイムで送信される。データの書き込み速度が送信能力を上回ると、リアルタイム性が確保できなくなる。したがって、モニターデータとサイエンスデータを常に同じタイミングでおくことは、リアルタイムの装置モニターを行う上で、致命的な問題となる。このため、5イベント分のデータ単位が送られると、その時点でのHKデータと全スケーラのデータを(イベントのデータ単位に含まれたデータとは別に)、優先的に送信する方法を採用した。イベントデータについては、送信に時間的な遅れが大きく生じた場合には、コマンドによりトリガーレートを下げる(しきい値をあげる)ことによって、トリガーレートを減らすためのコマンド操作を行った。

### 2.2.2 コマンドシステム

気球へのコマンド送信の方法は、データの場合と同様に昭和基地からの72.3MHz帯の6chのダブルトーンコマンドによるものとイリジウム回線の2系統用いた。ダブルトーンコマンドは、主に放球前および直後に必要な内容のコマンドである。イリジウム回線によるコマンド送信は、操作ミスの防止とタイミングを正確にするために、コマンド内容を書いたファイル(ページと呼ぶ)をあらかじめ用意しておき、送信設定にしておくとして、以下のいずれかのタイミングで自動的に送信される専用ソフトを開発した。

- (1) 機上のメモリにあるイリジウム回線データを地上に全て送りきった時。
- (2) 直前の5イベント分のデータを地上に送信した時。

コマンドが実行されると、直後にHKデータが地上に送られ、コマンドによる設定値の変更が最優先で確認できるようにになっている。

工学コマンドの中で重要なものは、イリジウム回線でもコマンドが打てるように二重化されているが、イリジウムコマンドの主な機能は観測条件に応じてトリガー条件を適宜に変更することである。そのために、TRGP、DISC、SECONDの3種類のコマンドを用意した。TRGPコマンドは、4種類のトリガー(HE、LE、SINGLE、LED)を選択するほか、14チャンネルのディスクリミネータのうちから、トリガーに利用するチャンネルを指定することもできる。各しきい値の変更はDISCコマンドで行う。各々の設定値は、あらかじめ8通り(ページ)登録しており、そのページを送信して1回のコマンドで同時に変更する。各ページの値は、テストフライトとシミュレーション計算を用いたトリガーレートの予測に基づいている。SECONDコマンドは、2次トリガーを有効または無効にする変更を行うときに用いる。

### 2.2.3 電源システム

今回の実験では、3週間以上の観測が想定されていたので、太陽電池による発電システムが不可欠である。このため、太陽電池(シャープ NT3436)とニッケル金属水素の二次電池(サンヨー HR-D)を併用した電力供給システムを開発した。太陽電池は一枚70cm×40cmの面積で、これをアルミハニカム板に5枚並べて一枚の太陽電池パネルを構成した。このパネルで140Wの供給が可能であるので、温度上昇や太陽高度による発電量の減少があっても、装置の駆動に必要な電力(~70W)の供給は十分に可能である。この太陽電池パネルをゴンドラの周囲の4面に各1枚を取り付けることで、太陽の方向によらず電力を供給することができる。二次電池は、10本を直列に繋いだものを1セットとして4セット搭載し、放球前にあらかじめ満充電状態にしておく。観測期間中は、太陽電池の起電力が規格値(14V)を越えている間は、太陽電池からの直接電力供給で装置は稼動し、二次電池はトリクル充電(120mA)モードで満充電状態が維持される。日陰などの理由により、起電力が14Vより下がると、二次電池からの電力供給が開始される。そして、二次電池からの電圧が11Vより下がると、システムは自動的にシャットダウンする。このとき、二次電池だけで駆動できる最大時間は約4時間である。太陽電池の起電力が13.5V以上に回復するとシステムは自動的に再起動し、同時に二次電池への充電が始まり、満充電状態になるとトリクル充電に切り替わる。

### 2.2.4 オートレベルシステム

気球高度を自動的に維持するために、バラスト投下の制御には独立に作動する2系統の装置(ALC1、ALC2)

が搭載された。ALC1はプログラムによって制御されており、それまでに到達した最高高度との高度差が設定値以上になった場合にパラストの投下を行う。ALC2はハードウェアで構成されており、設定高度以下になるとパラストを投下する。基本的にはALC1が優先的に作動するように設定されており、ALC2はバックアップとしての機能を持つ。高度の測定は気圧計で行い、高高度での精密な測定のためのMKSバラトロン製のMKS 622A (100 torr) と、ダイナミックレンジの広いセトラ社製の10 PSI, Setra 270を利用した。

### 2.2.5 モニターシステム

HKデータとして、観測装置の全体のモニター(HK1)とトリガー発生回路のモニター(HK2)がある。HK1では、0.5秒おき(PCMのテレメータの64フレーム)にデータが更新される。データの内容は、各装置の温度と電圧、電源システムの電圧、電流、及び気圧、太陽センサー、磁場センサーの計測値、パラスト残量、GPSデータなどである。12bitのデータが2バイト整数として1ブロックを構成し、HK1データの1単位は65ブロック(130バイト)である。HK2では、0.25秒(PCMのテレメータの32フレーム)おきにデータが更新される。この項目は、ディスクリの設定値と計測値、およびトリガーモードとトリガーマスクの設定値である。HK2のデータも2バイト整数として記録され、1単位は32ブロック(64バイト)である。

### 2.2.6 データ受信地上システム

イリジウム回線のデータは、極地研で専用PC(OS: Windows XP)により受信されると、QL(Quick Look)用のPC(OS: Linux 2.4)にWindowsのファイル共有およびUnixのSambaプログラムを用いて即座にコピーされ、インターネットで外部のコンピュータからアクセスが可能となる。一方、昭和基地で受信するPCMデータは、ビデオテープレコーダーにアナログ信号として記録されるものと、PCカードタイプのADCによりハードディスクに記録されるものの、2系統で記録された。

モニターのためのQL用ソフトとしては、(1)PCM用、(2)イリジウムデータ用、(3)WWWで用いるイリジウム用、の3種類のソフトの開発を行った。それぞれの機能は以下の通りである。

- (1) 開発言語にはJavaを採用し、昭和基地で装置の動作をチェックするために、HKデータをダンプするとともにCCD画像を表示する機能を持つ。
- (2) HKデータのダンプ、CCD画像のリアルタイム表示のほか、各チャンネルのトリガーレート、シャワー遷移カーブを表示できる。特に、HKデータ、トリガーレートの時間変化、航跡図のモニターに用いる。
- (3) インターネットで配信するWWW用のシステムで、外部からのアクセスがあれば、Javaアプレットと最新のデータがダウンロードされ、QL画面が表示される。長時間にわたる昼夜を問わない装置のモニタリングが、各研究機関や研究者の自宅から分散して可能になった。

## 3. シミュレーション計算による装置性能評価

検出器の開発と性能の評価は、シミュレーション計算によって行った。Monte Carloコードとして、EPICSとFLUKA2002を用いて両者の一致性をチェックしている。CERN-SPSを用いた加速器ビームテストの結果は、次節で示すように、出来る限りシミュレーション計算と比較して、お互いの一致性を確認することによって装置性能の評価を行った。シミュレーション計算では、特に装置の観測性能を求めるために可能な限り現実に近い条件を採用して計算を行った。即ち、エネルギーが100GeV以上の電子に対して、唯一観測データのあるエマルジョン・チェンバーの微分エネルギー・スペクトル( $E^{-3.3}$ )を仮定し、等方的に検出器上面に電子を入射させて計算した。さらに、主なバックグラウンドとなる陽子、ヘリウム成分は、BESS等で得られた観測データに基づくエネルギー・スペクトルを用いて、側面を含む全方向から等方的に入射させて、検出器の応答について調べた。

図6はHEトリガーでの検出器の幾何学的因子( $S\Omega$ )のエネルギー依存性を示しており、エネルギーが100GeV

以上の電子に対して、約 $600\text{cm}^2\text{sr}$ となる。また、各トリガーモードで用いるしきい値や2次トリガーの条件は、シミュレーション計算によってレートやバックグラウンドの除去性能を求めて、決めている。エネルギーが $100\text{GeV}$ 以上の電子に対して90%以上の検出効率を持つという条件できめた或るしきい値に対しては、各粒子の検出効率は、それぞれ電子91.0%、陽子0.96%、ヘリウム0.98%、炭素1.34%と求まる。さらに電磁シャワーの形状を考慮した選別するための2次（ソフト）トリガーを課すと、検出効率は電子86.0%、陽子0.63%、ヘリウム0.53%、炭素0.51%となり、電子の検出効率は余り変化しないが、バックグラウンドはかなり減少する。

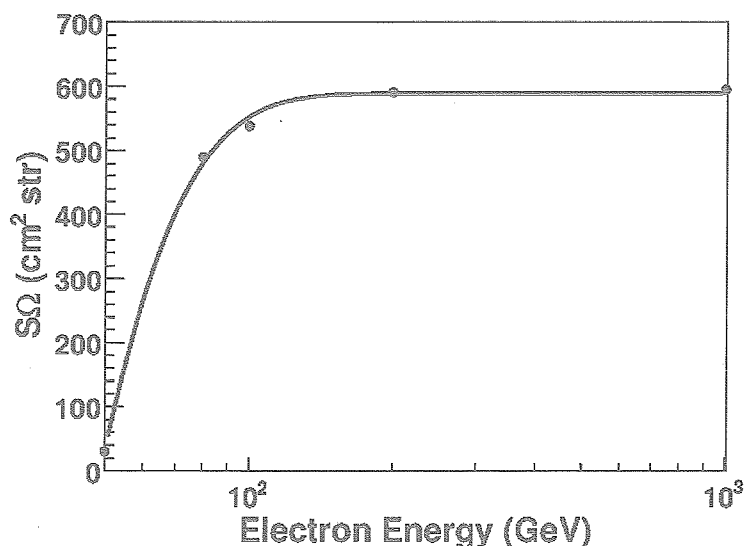


図6 シミュレーション計算より求めた、観測時における幾何学的因子 ( $S\Omega$ ) のエネルギー依存性。

この条件で、実際に期待される電子、陽子、ヘリウム、炭素のフラックスを代入すると、HEモードでのトリガーレートは、1次トリガーでは1時間に96.9イベントになる。これに、2次トリガーの条件を課すと、電子を86.0%まで残しながら、バックグラウンドとなる陽子、ヘリウム、炭素は1%以下に減らす条件で、トリガーレートは1時間に53.6イベントと予測できる。電子の期待値は1時間に数イベントであるので、機上ではまだ数10倍のバックグラウンドが残ることになる。送信データ量の大部分を占める画像データは、§4.3.1で述べるように $100\text{GeV}$ の電子では1イベントで平均 $15\text{kbyte}$ 程度である。同じエネルギーの陽子ではこれより少なくなるので、上で求めたレートではデータ量は約 $1.8\text{kbps}$ と予測され、イリジウム回線で全てのデータが送信可能であるという見込みになる。実際の観測では、トリガーレートや画像のデータサイズが変動する可能性があるので、このトリガー条件の標準設定の場合にたいして、トリガーレートが0.2から2倍の間で、8種類のディスクリ値の組み合わせをシミュレーション計算で求めて、ページコマンド ( $P_i, i=1\sim 8$ ) として用意した。

#### 4. CERN-SPS によるビームテスト

##### 4.1 ビームテストの概要

検出器の性能評価を行うために、欧州共同素粒子・原子核研究所 (CERN) において $450\text{GeV}$ の Super Proton Synchrotron (SPS) を用いた電子、陽子ビーム照射実験を行った。CERN North-Area の T2-H4ビームラインにおいて、2001年10月12日から23日にかけて、 $10\text{GeV}$  から $200\text{GeV}$ の電子と、 $150\text{GeV}$  から $350\text{GeV}$ の陽子ビームを照射した。検出器へのビームの入射角度や入射位置を変えて、全部で電子は約 $10,000$ イベント、陽子は約 $13,000$ イベントのデータを取得している。表4にビームテストの概要をまとめる。

ビームの出口にトリガー用のシンチレータ2枚 ( $50 \times 50 \text{mm}^2$ と $10 \times 10 \text{mm}^2$ )を重ねて設置し、これらのコインシデンスで外部トリガーを発生し、検出器のトリガーとの積でデータ取得を行った。この実験では、内部トリガーのしきい値は十分に下げて(すべての)イベントを取得したあと、オフライン解析で実際に設定するしきい値をソフト的に設定して、それに対応してトリガー率がどのように変化するかを求めた。ビームテスト時における検出効率、電子では100%、陽子では相互作用せずに検出器を突き抜けるイベントはトリガーせず、すこしでもシャワーを起こしたイベントが約30%であった。

#### 4.2 エネルギー分解能

ビームテストによってエネルギー分解能を求めるために、各シンチレータのパルスハイトを用いてシャワー遷移曲線を測定し、次の方法で個々のエネルギーを求めた。電磁シャワーでは、よく知られているように、シャワー遷移曲線はガンマ関数で近似することができ、深さ $t$ では、定数 $a$ 、 $b$ を用いて次のように記述される。

$$dE/dt = (E_0 b / \Gamma(a)) (bt)^{a-1} \exp(-bt) \quad (1)$$

シャワーが最大発達する深さ $t_{\max}$ は $(a-1)/b$ となる。画像解析で得られるシャワーの天頂角を $\theta$ とすると $C(\infty b / \Gamma(a))$ を用いて、シンチレータが置かれている深さ $T$ とシンチレータでの粒子数の関係は、

$$S = C (bt / \cos\theta)^{(a-1)} \exp(-bT / \cos\theta) \quad (2)$$

と表わされる。3r.l.から9r.l.にある6層のシンチレータのパルスハイトをこの式でフィッティングして、最大発達点での粒子数 $C(a-1)^{(a-1)} \exp(1-a)$ を決定する。図7に、この方法で求めた電子ビームのエネルギーと最大発達点での粒子数の相関を示す。エネルギー分解能( $\sigma$ )は、図8に示すように100GeVで13%であり、10~200GeVでは10~20%の値となり、シミュレーションともほぼ一致した値になっている。

#### 4.3 画像システムの性能

加速器ビームを照射して得られたシャワーのCCD画像データの例を図9に示す。シャワー中心では粒子数が多いため、SciFiの発光量が多くなりCCDの輝度が飽和する恐れがある。実際BETSでは100GeVまでの観測が

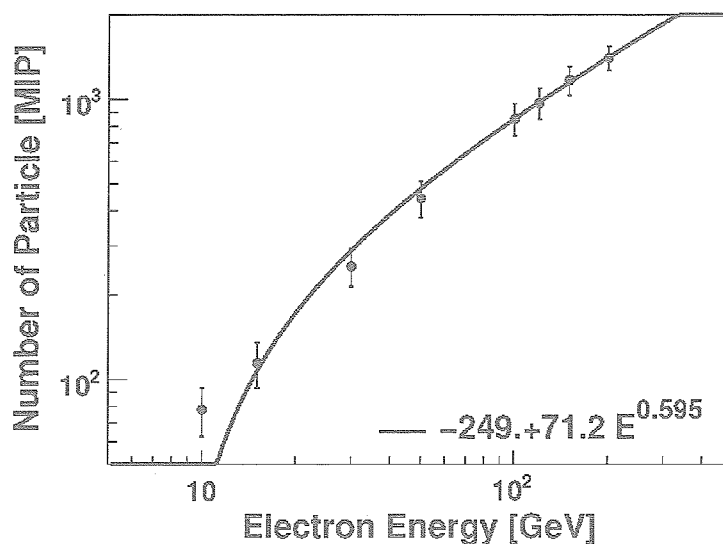


図7 電子ビームの実験で得られた、エネルギーと最大発達点での粒子数との相関。

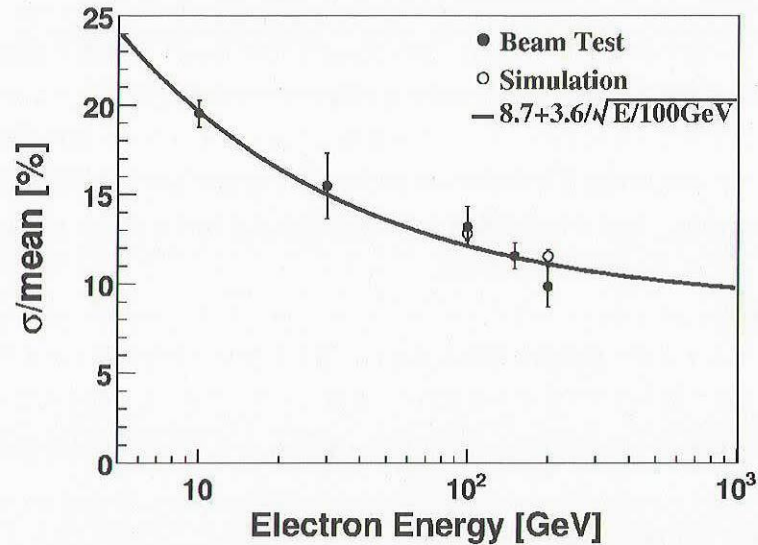


図8 電子ビーム実験によるエネルギー分解能 ( $\sigma/E$ ) のエネルギー依存性とシミュレーション計算の比較。

目的であったので、100GeV 近辺では飽和現象が見られていた。このため、PPB-BETS では §2.1.3 で述べたような、ダイナミックレンジが2桁大きなシステムの開発により、シャワー中心部分でも飽和することなく撮像が可能になっている。このことを示すために、図10に電子ビームの各エネルギーについて、CCDの最大輝度値を示している。エネルギーに比例して最大輝度値が増大するが、飽和が始まるのは350GeVであることが外挿によりわかる。しかし、これはおよそ10,000画素中の1画素が飽和し始めるということであり、画像解析による入射角度や入射位置の決定精度、及び入射粒子の識別性能への影響は、1 TeV までほとんどないことがシミュレーションから判明している。

イリジウム回線によるデータ送信という条件下で、出来るだけ効率的な観測を行うために、ビームテストによって1イベント当りの画像データ (XとY画像の合計) のサイズと電子、陽子エネルギーの関係を測定した結果を図11に示す。当然ながら、エネルギーとともに画像データサイズも大きくなるが、100GeVの電子では平

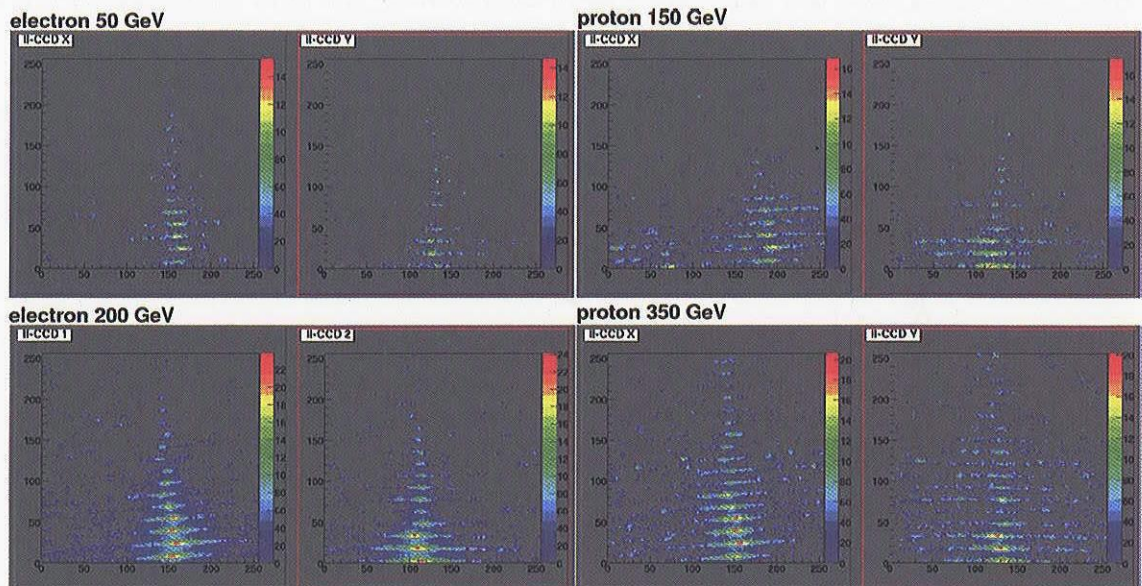


図9 ビーム実験で得られたシャワー画像の CCD イメージ。左側は、上が電子50GeV、下が電子200GeVで、右側は上が陽子150 GeV、下が350GeV。いずれも、X、Yの2方向について示す。

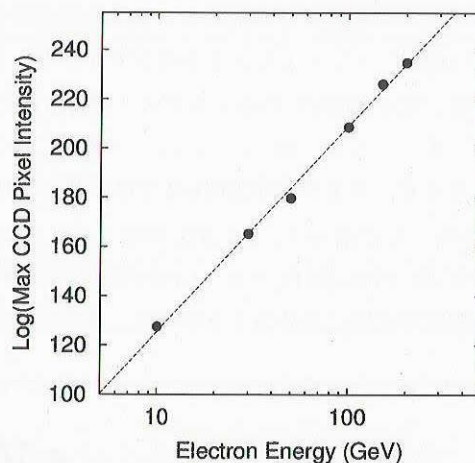


図10 電子ビームのエネルギーとシャワーイメージの CCD 画素中での最大輝度との相関.

均的に約15kbyteであり、陽子の場合はその約80%になる.

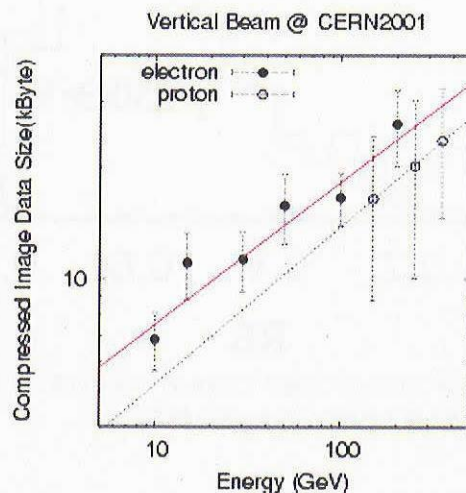


図11 ビーム実験で求めたシャワー画像のデータサイズ(圧縮後)とエネルギーの相関.  
黒丸が電子, 白丸は陽子である.

#### 4.4 角度決定精度

シャワーの CCD 画像から、検出器内の SciFi の配置への再構成を行うことにより、検出器座標での 3 次元のシャワー画像を再現する。この方法の詳細内容は文献 [7] に示されているが、この方法で再構成したシャワー軸により、粒子の入射角度、入射位置を決定する。垂直入射の電子ビームに対して得られた 10 GeV から 200 GeV のシャワーの角度決定精度は、ガウス分布でフィットすることで得られた標準偏差 ( $\sigma$ ) から、0.35~0.6 度となった。この誤差の主な原因は、検出器内における SciFi の位置精度によるもので、SciFi の位置補正を正確に行うことにより、0.1 度になることがシミュレーション計算から求められている。

#### 4.5 陽子, 電子識別

シャワー画像解析により陽子と電子を識別する方法は、BETS と同様の方法を採用している。図12は、垂直に入射した電子または陽子のシャワー画像を再構成して得られた、シャワー軸から 5 mm 以内へのシャワーエネルギーの集中度 ( $RE$ ) の分布を示している。(実際は、輝度の分布であるが、飽和現象が見られなければ、エネルギー分布と同じ意味をもつ。) この分布は、陽子では核相互作用で生じる中性  $\pi$  中間子からのガンマ線による

シャワーであるため、電磁シャワーに比べて横拡がりが大きく、複雑な構造を持つ。この結果、陽子起源のシャワーは  $RE$  の分布が広く、平均的には電磁シャワーより大きな拡がりを示し、図に示すように  $RE$  が0.75で分けると統計的に両者の分離が可能となる。電子100GeVのビームテストで得られた分布(実線)は、シミュレーション計算の結果(点線)と非常によく一致しており、 $RE$  が0.75以上の領域に集中し、0.85に鋭いピークを持つ分布をしている。同程度のシャワーエネルギーをもつ陽子250GeVでは、電子に比べてかなり広い分布を持ち、 $RE$  が0.75以上の領域にあるものは少ない。したがって、 $RE$  が0.75以上のイベントを選別することにより、陽子バックグラウンドを効率的に除去できる。PPB-BETSでは、CCDの飽和現象が避けられているので、1,000GeVの領域まで  $RE$  分布が電子、陽子の双方で正確に求めることができ、両者の有効な識別が可能になっている。

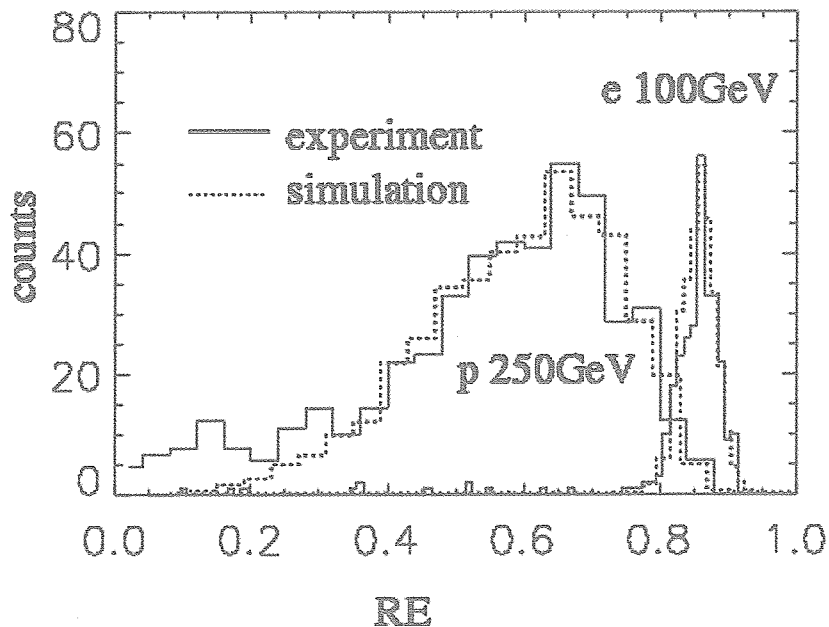


図12 エネルギー集中度 ( $RE$ ) における電子 (100GeV) と陽子 (250GeV) の分布の違い。実線がビームテスト、点線がシミュレーション計算である。この分布の違いから電子が選別できる (本文参照)。

## 5. 南極気球実験

### 5.1 実験概要

「しらせ」によって約2ヶ月をかけて南極昭和基地に運ばれた観測装置は、2003年12月24日から現地で動作テストを行い、そのモニターを極地研で行うという体制で放球前のテストを開始した。まず、イリジウム電話による通信システムが正常であることをチェックし、地上での宇宙線シャワーの測定により、トリガーシステム、画像システムなどのデータ収集系が正常に動作していることを確認した。次に、イリジウムでのコマンド送信のテストを行い、トリガー条件を設定するページコマンドが正常に送信され、すべてのしきい値が正常に設定されることをチェックした。12月27日に、最終テストを行うため太陽電池パネルを取り付けた状態で装置を屋外に移動し、太陽電池による動作確認を実施した。このテストでは、チェック項目として、イリジウム回線による Cutter 用コマンド、太陽センサー、磁場センサー、ダブルトーンコマンドなどの動作確認があったが、すべてのテストが正常に終了した。そして、データ記録用ディスクをクリアーして、いつでも放球が可能な状態で待機することになった。

しかしながら、その後は地上風が強くなり放球のチャンスがなかなか訪れず、年が明けて2004年1月4日に



やっと地上風がおさまる傾向が見られ、フィールドにおける放球準備を開始することが決断された。現地では、16時30分（22時30分 JST）から放球体制に入り、極地研ではデータ及びコマンドの送受信をチェックして放球に備えた。そしてついに、18時57分（5日0時57分 JST）に地上風が平均4 m/s、瞬間風速6 m/sという悪条件について放球が行われた。放球後約2時間で、平均高度34.6kmのレベルフライトに入り、本格的な観測を開始した。図13は放球直前の気球の様子である。

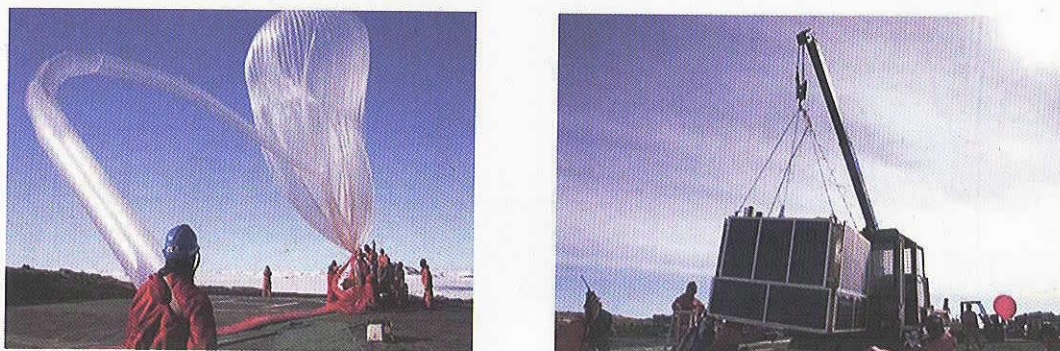


図13 PPB-BETSの放球直前の様子。左は気球で、右は太陽電池パネルをつけた測定器。

気球は、南極大陸の周縁部を周回風に乗ってほぼ13日間にわたって反時計周りに航行し、2/3周した時点で、バラストを使い果たしたことによる急激な高度変化により気球が破裂し、1月17日10時46分（JST）に交信が途絶えた。観測装置はおおむね正常に動作し続け、電力供給システムやイリジウム回線による双方向通信も安定に動作した。一時的に日陰状態で装置の自動停止があったものの、計画通り正常に再起動している。気球の航跡図と高度変化を、図14と図15に示す。

### 5.2 低エネルギー（LE）モード観測

気球が昭和基地から電波可視域にある間は、10GeV以上のシャワーをトリガーするLEモードによって高頻度の電子観測を行った。このモードによる観測は、装置電源の投入から10時間後（放球後約3時間）で設定どおり自動的にHEモードに切り替わり、約22,000イベントのデータが記録された。気球の上昇時には高度とともにトリガーレートは上昇し、レベルフライトに達した時点では約3.1Hzであった。それに対してDAQレートは、1.3Hzとなり、データ取得の効率はおおよそ40%であった。

### 5.3 高エネルギー（HE）モード観測

HEモードでのトリガー頻度は、レベルフライトに達した時点において約0.06Hzであり、予測値をかなり上回っていた。このため、イリジウム回線によるデータ転送が追いつかなくなる事態が発生し、ページコマンドを用いてトリガーレートが半分の約0.03Hzになるようにディスクリ値を変更した。今回の実験では、放球時期が遅れたこともあって、南緯60度から70度の比較的低緯度地帯を飛行したため、太陽の高度変化が激しく装置の温度は大きく変化し、昼夜において約40℃程度の温度差が生じた。このため、高温時にはCCDに熱雑音が発生して画像の圧縮率が低下して、1イベントのデータサイズが数倍に増えるような現象がみられた。このままでは低いレートでも、イリジウム回線でデータを全て送ることはできないので、その対応策として温度が高い時間帯にはデータ送信のみを行うような運用を行った。このように、イリジウム回線のデータ送信量による制限のため、観測期間中に100%のデータ収集は行えなかったものの、これまでのBETSの総データ量を一桁以上も上回るデータ量を得ることができた。機上でディスクに記録された100%のデータは回収できなかったが、2次トリガーによって選択されたイベントのうち、約5,700イベントのデータが得られた。通信時のエラーにより、データの再現ができずにロスした割合が、5%程度あったが、これはほとんど問題ではない量である。

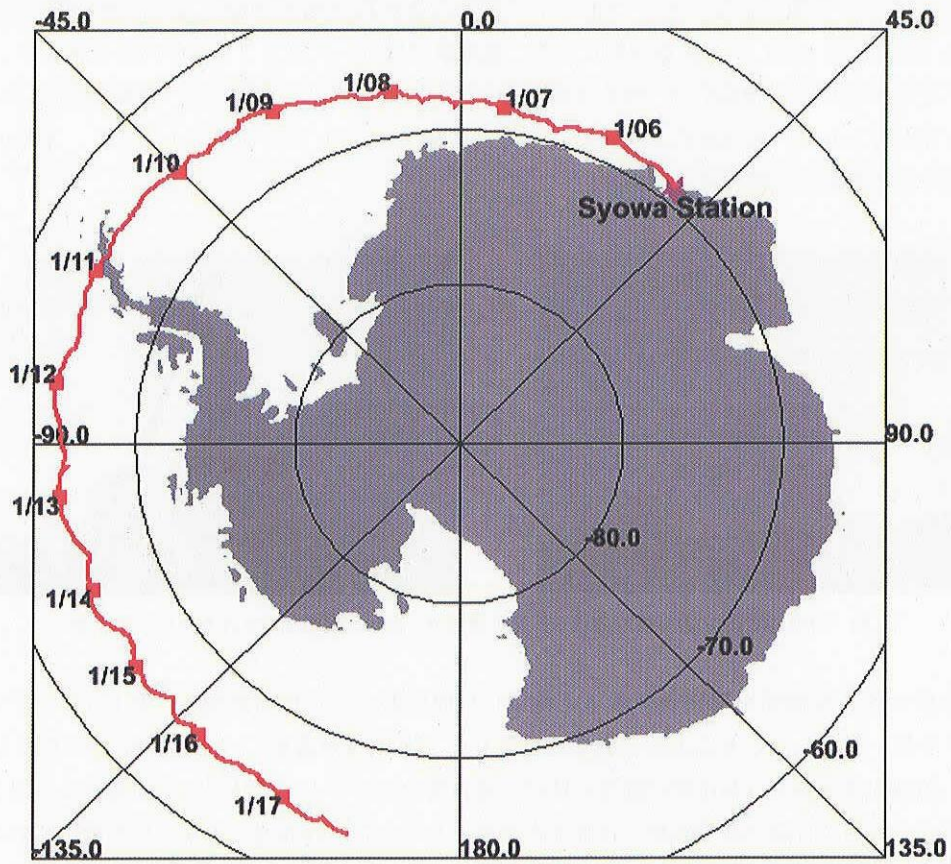


図 14 気球の航跡図.

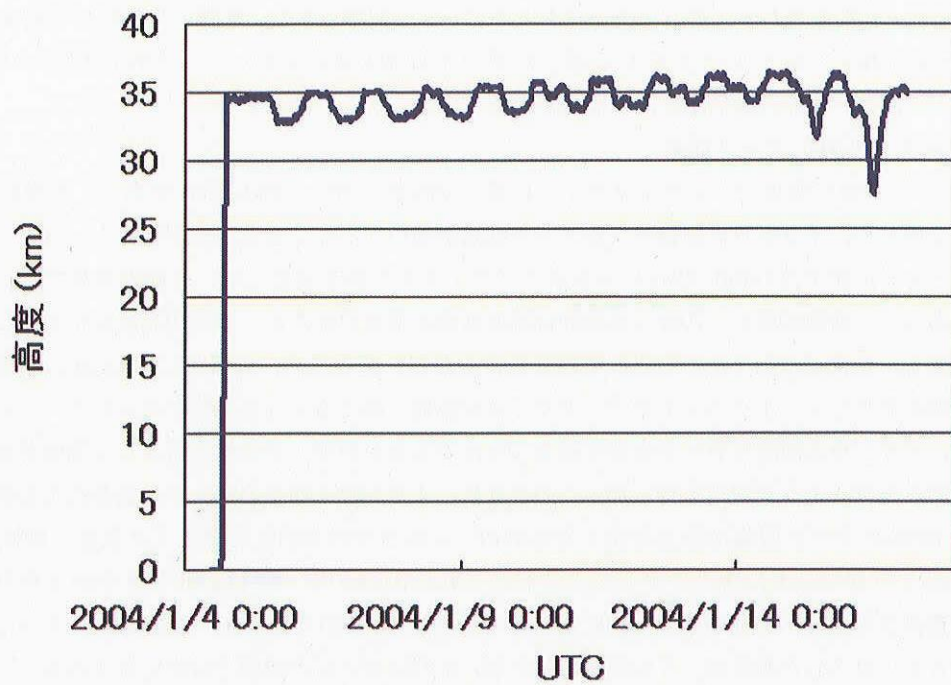


図 15 気球高度の時間変化.

## 6. データ解析

### 6.1 トリガーシステムの評価

今回の観測の主要目的は、100GeV以上でのエネルギー・スペクトルの測定であるので、本稿ではイリジウム回線によって送信されたデータの解析について報告する。トリガーが正常に働いていたかどうかのチェックのために、エネルギーとの相関がよいシンチレータ  $S_7$  でのパルス高さ分布を図16に示す。標準のトリガー条件 (>100GeV: Page3) と、それより閾値が高いトリガー条件 (>150GeV: Page 7) の場合について、いずれも予想された値でディスクリがかかっており、トリガー条件の変更によるエネルギー閾値の変化が期待通りであることが確認できる。このうち、一次電子は数%であるので、エネルギー・スペクトルに相当するこの分布の冪は、主なバックグラウンドである陽子のスペクトルの冪 (-2.7) と一致している。このことから、シンチレータのシステムは、トリガーとエネルギー測定のために、正常に動作していたことが確認できる。

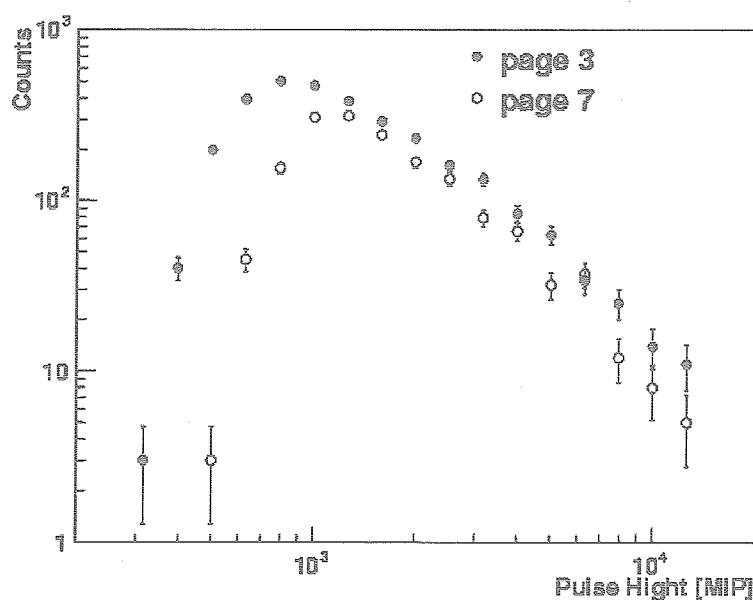


図 16 HE モードでのトリガーで観測されたシンチレータ ( $S_7$ ) でのパルス高さ (MIPS 数に換算) のスペクトル。標準トリガー条件 (Page3: >100 GeV) と、高エネルギーのトリガー (Page 7: >150 GeV) での分布を示す (本文参照)。

### 6.2 画像解析による粒子識別

シャワーの画像解析によって電子を選別する手法は、すでに BETS 実験において確立しているので、このデータ解析でも BETS の手法を踏襲している。今回の解析では、南極大陸上空での長期間観測であったため、BETS による三陸での実験では余り問題にならなかった、観測期間中における磁場や温度の変化による CCD 画像の“ズレ”がかなり見られ、これを補正する手法の開発が必要であった。

#### 6.2.1 LED を用いた位置補正

CCD 画像から、検出器内の SciFi の位置にシャワー画像を再構成するためには、まず両者の位置関係を定める必要がある。このため、CCD 画像の各画素が、どの SciFi に対応するかを、宇宙線ミュー粒子の飛跡画像データを数100万イベント重ねがきした画像を用いて求める。図17に、この方法で求められた CCD 画面上の約5000本の SciFi の位置を示す。もし、この位置関係が固定していれば、各 SciFi に対応する検出器での座標を用いて、シャワー画像の実空間での再構成ができる。しかし、今回の観測では、磁場の変化による LI 内の電子軌道のズレ、温度変化に起因する熱膨張、収縮による SciFi 位置のズレ、などにより、観測期間中に位置関係が大きく変化していることが判明した。このようなズレの補正は、SciFi の間に埋めこまれた LED を光源とするファイバー

を用いて可能である。磁場による I.I の画像のズレは、磁場センサーによる水平方向の2成分 (X, Y) の値と、国際標準地球磁場 (IGRF) の2000年モデル [13] を用いた鉛直成分の値を用いて補正できる。このようにして、磁場と温度の両方をパラメータ化した補正関数を LED イベントの相対的な位置変化から求めた。その方法や補正関数は Appendix に記述した。この補正により、全期間にわたる位置のズレを、 $\pm 1$  画素までに抑えることができています。SciFi のサイズ (1 mm) は、約3画素に相当するので、1画素分のズレは SciFi による画像再構成ではほとんど問題にならず、正確なシャワー画像の再構成ができています。

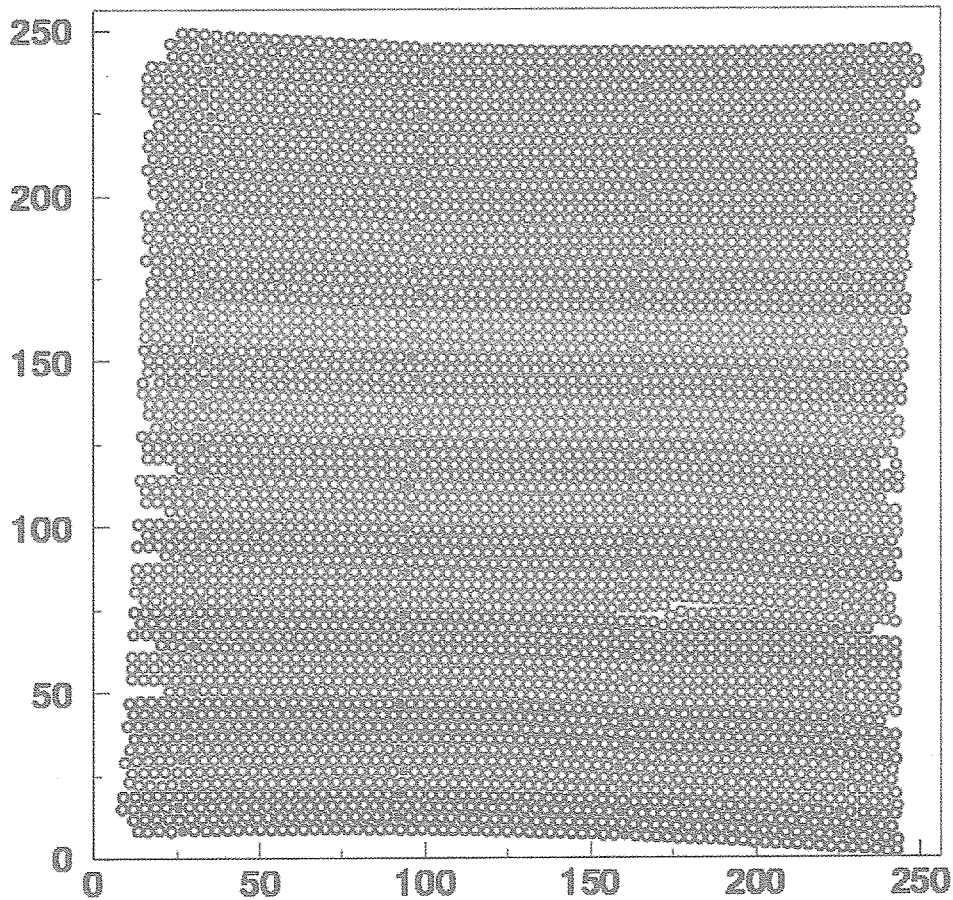


図 17 CCD 画面上での約5000本の SciFi と LED ファイバーの位置関係。SciFi (白丸) の間に、位置較正用の LED ファイバー (黒丸) がはさまれている。縦軸、横軸の数字は画素の数。

### 6.2.2 シャワー画像の再構成

実際に観測したシャワーの画像について、CCD 画像から検出器の SciFi に位置に再構成した例を図18に示す。X, Y の方向に投影された画像であるので、それぞれでシャワー軸を決めることにより、3次元的なシャワー軸が求まり、粒子の入射位置と到来方向を決めることができる。シャワー軸の決定は、シャワーの発達段階に応じて最適な方法で各層での軸位置を求める必要がある。このため、(A)十分にシャワーが発達している3~7r.l.の深さにある SciFi 層と、(B)まだシャワーが発達する前の段階である0~2r.l.の SciFi 層では、それぞれ以下に述べる方法を適用して、シャワー軸を決定した。

- (A) 各層において、まず21本の SciFi の移動平均で輝度を平滑化し、もっとも高い輝度の SciFi を決める。そして、この周囲20本分を用いて輝度の重みをつけた中心位置を決める。求った各層でのシャワー中心位置を用いて、最小二乗法により仮のシャワー軸を決める。

- (B) 上で求めたシャワー軸を外挿して求まる一層上の SciFi 位置で，その周囲±5本を使って輝度重みをつけた中心位置を求める．そして，この位置を含めて最小二乗法によるフィティングを再度行う．このプロセスを最上層まで繰り返す．ただし，最上層のみ中心を決める SciFi は±2本とする．

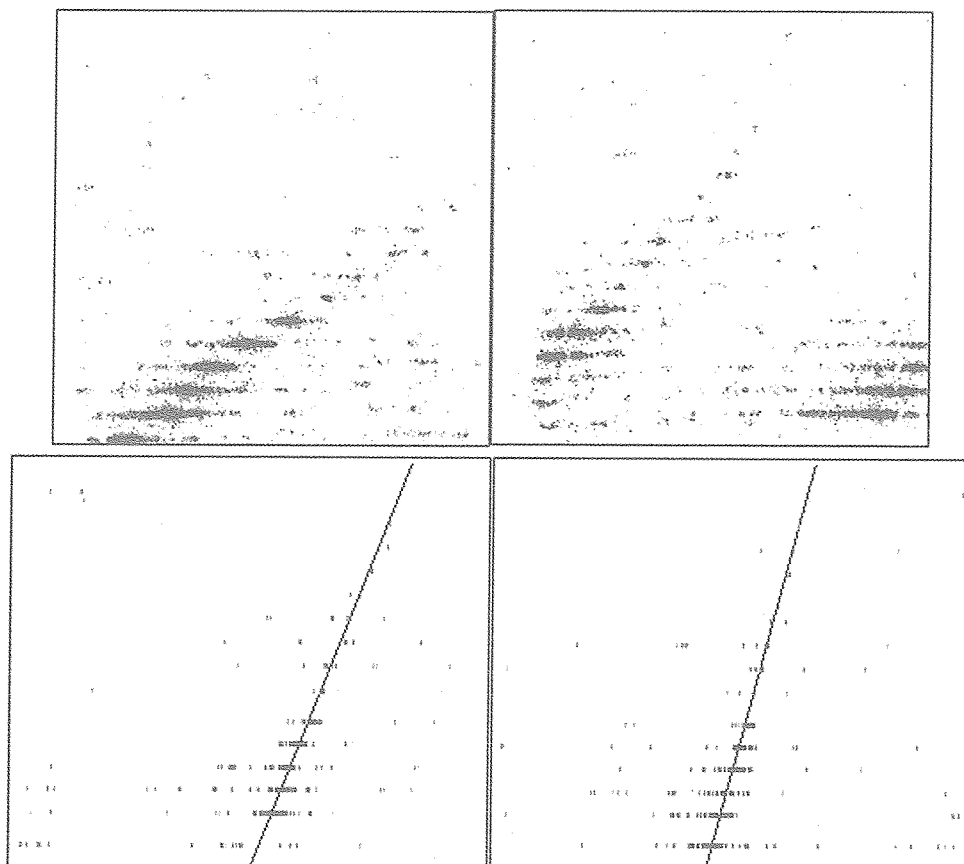


図18 CCD 画像（上）と，検出器中での SciFi 位置に再構成した画像（下）．左右はそれぞれ X, Y 方向の画像．輝度は反転してあるので，黒い点ほど輝度がたかい．再構成画像の直線はフィティングで得られたシャワー軸（本文参照）．

### 6.2.3 電子選別

画像解析では，全取得イベント5669例の内，シャワー画像の再構成がうまくいかなかったイベントを除いて，5393例について電子選別のための解析を行った．検出器の側面から入射したり，側面へはみ出すようなイベントは正確なデータとはならないので除去する必要がある．さらに，大角度で入射する粒子は，大気起源の二次的な成分が多く，一次電子に対するバックグラウンドが非常に増える．このため，電子選別のデータ解析は，BETS にならって以下の手順で行った．

1. シャワー軸が検出器の上面と下面の周囲 2 cm より外側を通るイベントは除く．
2. 到来方向の天頂角が30度以内のイベントのみを選ぶ．
3. シャワー軸へのエネルギー集中度 ( $RE$ ) が，0.75以上のイベントを選ぶ（図12参照）．

1と2の条件で残った約30%のイベントによる  $RE$  分布と，ビーム実験で得られた陽子，電子の分布を重ねたものを図19に示す．観測データとビーム実験の数は全体で規格化されている．この図からわかるとおり，観測データの内， $RE > 0.75$ にあるイベントは大部分が電子である．

### 6.2.4 ガンマ線の除去

電子選別で残ったイベントの中には，大気中で陽子等の核相互作用によって生成される二次的なガンマ線が含

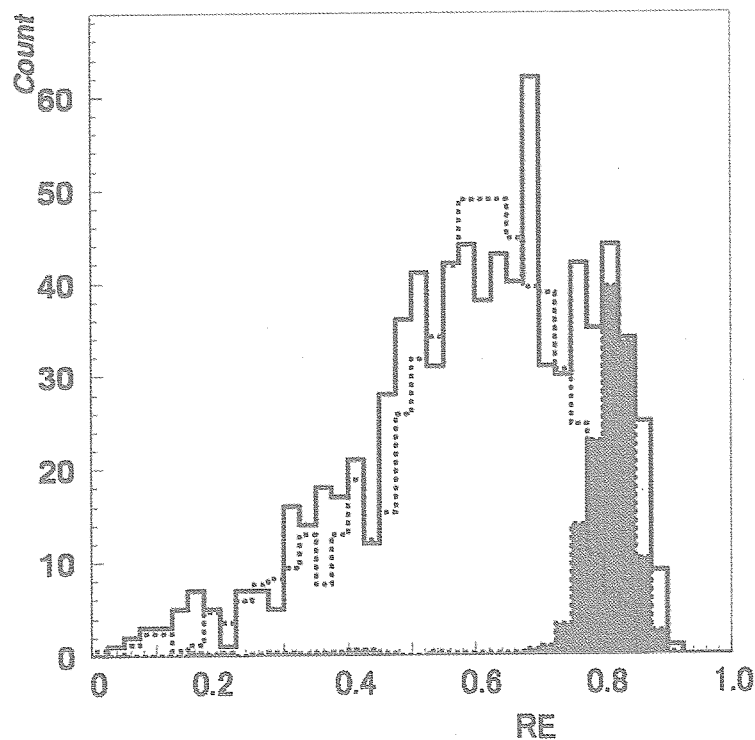


図 19 エネルギー集中度 (RE) の観測結果 (実線) と陽子ビーム実験 (点線) の結果. 黒いハッチの部分が観測で得られた電子候補イベントである.

まれている. 今回の実験におけるレベルフライトの高度は約35kmの高度であるので, 残留大気が約 $7.3\text{g}/\text{cm}^2$ になる. 二次ガンマ線の一次電子に対する割合は, その起源となる陽子のスペクトルが電子よりハードであるため, エネルギーの増大とともに無視できなくなる. 陽子スペクトルを取り入れた計算では, この観測高度での100 GeV 以上における両者の比は約1.7:1となる. このため, ここまでの解析で得られた電子候補からさらにガンマ線を除去する必要がある.

検出器に入射するガンマ線は, 低エネルギー領域では最上部のシンチレータがアンチカウンターの役目を果たして効率的に機上で除去されている. しかし, 100GeVを越すような高エネルギーでは, 必ずといってよいほどシャワーの後方散乱粒子が存在し, 電子と同様にほぼトリガーされる. これを除くためには, 粒子の入射位置における電荷の有無を判定すればよいが, これも後方散乱粒子の増加によりそれほど容易ではない. 図20に最上部のSciFi層におけるシャワー軸の位置 (入射位置) から, もっとも近くで光っているSciFi位置 (一番近い荷電粒子の位置に相当する) までの距離の分布を, シミュレーション計算により求めた結果を示す. 当然ながら, 電子は入射位置にピークを持ちシャワー軸の決定精度に応じた分布を持つが, ガンマ線は後方散乱粒子によるため, ほぼ一様な分布を示す. そこで, この距離を5 mm以内に限定すると, ガンマ線がこの中に含まれる割合は全体の18%に減少する.

### 6.3 一次電子エネルギー・スペクトル

RE カットで得られた電子候補イベントについて, ビーム実験と同様な方法 (§4.2) を用いて, シャワーの遷移カーブを用いてエネルギーを決定した. そして, 次の式により大気トップにおける一次電子のエネルギー・スペクトルを求めた.

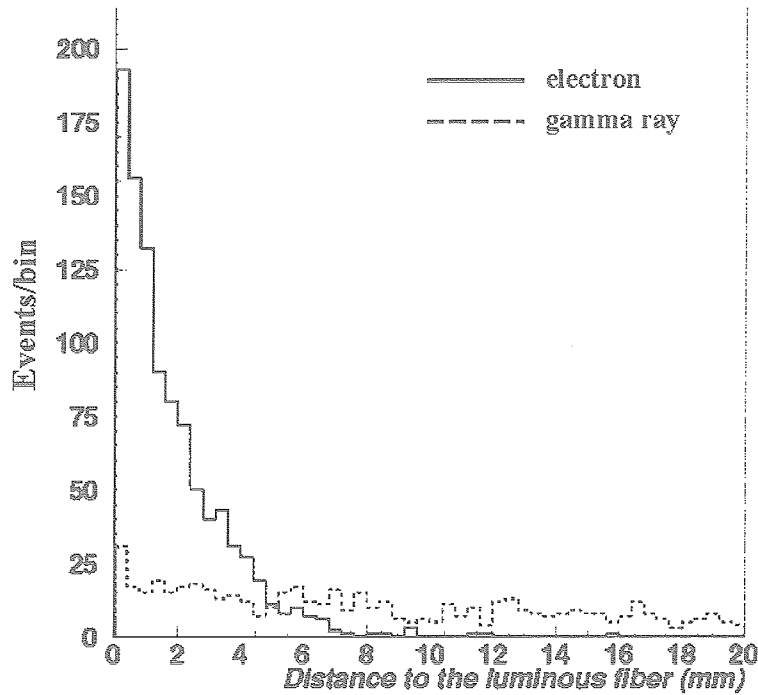


図 20 検出器最上部の SciFi 層において、シャワー軸から最も近くでシグナルのある SciFi までの距離の頻度分布のシミュレーション結果。電子（実線）はシャワー軸（距離ゼロ）付近に集中するが、ガンマ線（点線）はほぼ一様に分布していることがわかる。

$$F(E) = \left( \frac{N_e C_{re} C_{e\gamma}}{S\Omega T \Delta E} C_E - C_{2e} \right) C_{am} \quad (3)$$

ここで、 $S\Omega$  は先にのべた観測時の幾何学的因子ではなく、実際に解析に用いた条件を加えた  $S\Omega$  である。その値はシミュレーション計算から図21のように求まっている。  $N_e$  は §6.2.3の解析で得られた電子候補イベント数で、  $C_{re}$  は  $RE > 0.75$  の領域での陽子コンタミの補正（エネルギー依存性あり）、  $C_{e\gamma}$  はガンマ線候補除去後のガンマ線コンタミの補正、  $C_E$  はエネルギー分解能によるフラックスの増加に対する補正、  $C_{2e}$  は2次電子フラックスの補正（ $\sim 1.36 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s sr GeV @ 100 GeV}$ ）であり、  $C_{am}$  は一次電子が大気中でのエネルギー損失することによる補正因子（1.13）である。この結果えられた、初期的な電子エネルギー・スペクトルを図22に示す。電子候補イベントの数は84例であり、100GeVにおけるフラックスの値は、BETSで得られているスペクトル、  $0.2 \times (E/10\text{GeV})^{-3.0} \text{ m}^2 \text{ s sr GeV}$ 、の外挿とよく一致している。100～1,000GeVのエネルギー領域では、エマルジョン・チャンバーのこれまでの観測結果と統計誤差内で一致した結果となっている。

### 6.3 今後の解析方針

現在までの解析では、BETSの方法を踏襲した方法で電子選別を行っているが、 $RE$  分布による陽子除去はエネルギーの増大とともに陽子起源のシャワーの拡がり狭くなり、電子への漏れこみが増大する。一方、陽子雑音の割合はエネルギーの増大とともに増えるので、電子選別の精度を良くするためには、陽子除去のための新たな解析方法を見つける必要がある。その一つが、陽子が核相互作用した際に放出する二次ハドロンの検出である。実際、シミュレーションでは、この方法により陽子雑音をさらに半分程度に減らせることが予想されている。このためには、初期シャワー段階でのハドロンの飛跡の検出が可能で、より詳細な画像解析を行う必要があり、今後の課題となっている。これらの手法の採用などにより、データ解析の精度をさらにあげて、最終的な一次電子エネルギー・スペクトルを導出するとともに、同時に観測されている大気ガンマ線のフラックスを求める

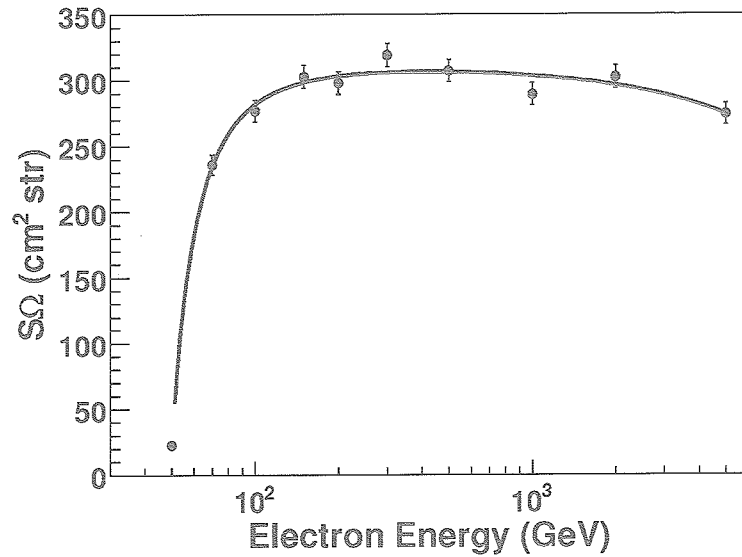


図 21 実際の解析条件を考慮した場合における、幾何学的因子 ( $S\Omega$ ) のエネルギー依存性についてのシミュレーション計算の結果。

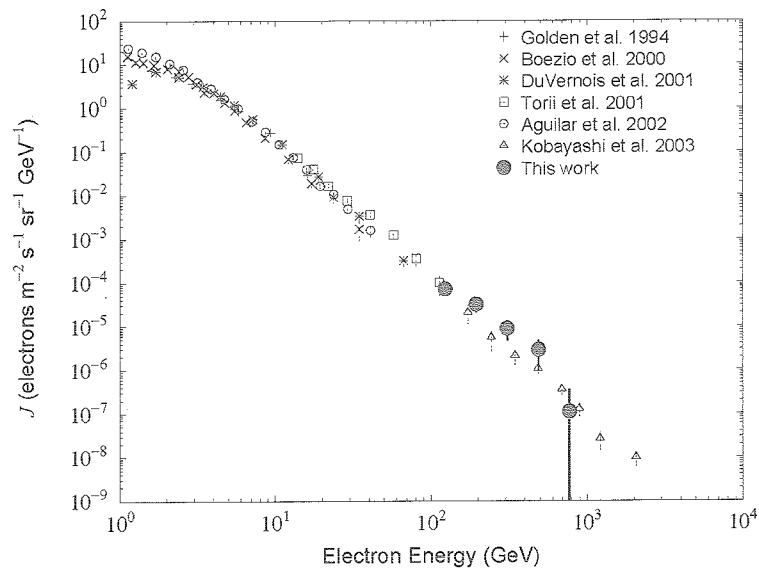


図 22 PPB-BETS 観測で得られた一次電子エネルギー・スペクトルの初期的な結果と、これまでの観測データとの比較。

予定である。また、LEモードのトリガーで得られている10~100GeVの低エネルギーのデータの解析もすすめて、同一測定器による10GeVから1TeVに至る一次電子エネルギー・スペクトルを確立する予定である。

## 7. まとめと今後の計画

今回の観測は、電子観測としては世界でも初めての南極周回気球による試みであり、観測上の制約や経験不足のため、完全な実験が行えたとはまだ言えない状況であり、統計量も決して充分ではない。初期的な結果ではあるが、エネルギー・スペクトルに顕著な変化は見られず、残念ながらまだ個々の近傍ソースの影響や暗黒物質の兆候を捕らえるには至っていない。しかし、これまで数10年にわたるエマルジョン・チェンバーに観測データのみしかなかった100GeV以上の電子観測が、エレクトロニクスを用いた装置によって実現できたことの意義は、



今後の展開にとっても非常に重要であると考えている。

今後に向けて装置のさらなる性能向上を図るとともに、スーパー・プレッシャー気球などの新しい気球観測技術を用いて、100日間の長期間観測の実現を目指している。このために必要な装置技術開発は、今回の南極周回気球実験ですべて達成されている。そして、この中で培われる経験と技術をもとに、国際宇宙ステーションにおける観測実験を実現することも将来の目標としている [14]。これらの観測実現により、近傍ソースの同定や暗黒物質の検出といった、宇宙物理学における最重要課題について、興味のある成果を得ることを目標にして今後の計画をすすめる予定である。

本稿を閉じるにあたり、準備期間を含めて約4年間にわたって南極周回気球実験に寄与した院生や学生の皆さんに謝辞を述べるとともに、困難な条件で気球観測を実現して頂いたJAXA/宇宙科学研究本部、国立極地研究所のスタッフ、および第45次南極地域観測隊の方々に心からお礼を申し上げます。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] T. Kobayashi, J. Nishimura, Y. Komori and K. Yoshida, ApJ 601 (2004) 340.
- [ 2 ] K. Yoshida, S. Torii, T. Tamura, et al., Proc. of the 5th International Workshop on the Identification of Dark Matter, (2005) 557.
- [ 3 ] M. Boezio et al., ApJ 532 (2000) 653.
- [ 4 ] S. W. Barwick et al., ApJ 498 (1998) 779.
- [ 5 ] J. Nishimura et al., ApJ 238 (1980) 394.
- [ 6 ] S. Torii et al., NIM A 452 (2000) 81.
- [ 7 ] S. Torii et al., ApJ 559 (2001) 973.
- [ 8 ] K. Kasahara, E. Mochizuki, S. Torii et al., Phys. Rev. D 66 (2002) 052004.
- [ 9 ] S. Torii, T. Yamagami, T. Yuda and K. Kasahara, Advances in Polar Upper Atmosphere Physics, 13 (1999) 176.
- [10] A. Kadokura et al., Advances in Polar Upper Atmosphere Physics, 16 (2002) 157
- [11] T. S. Huang, IEEE Trans. Commun., COM-25,11(1977) 1406.
- [12] D. A. Hoffman, Proc. IRE, 40, 10 (1952) 1098.
- [13] M. Manda et al., Earth, Planets and Space, 52, 12 (2000) 41.
- [14] S. Torii, et al., Nuclear Physics B, 134 (2004) 23.

### A 気球フライト中の CCD 画像中での SciFi 位置の補正

気球観測中における CCD 画像上での SciFi の位置は、放球前に測定した位置からはずれが生じる。主な原因として、地磁気の強度と、検出器の地磁気に対する角度、さらに、装置の温度が考えられる。このずれを定式化するために、以下のような一般化を行った。ずれには、平行成分と回転成分があるとし、平行成分は温度と磁場の変化、回転成分は磁場変化に依存すると仮定する。さらに簡単のためにこれらはずれに対して一次の項が主になるとした。そうすると、II-CCD の温度  $t$ 、磁場  $m$ 、の時、 $C$ 、 $T$ 、 $M$  を定数としてずれの平行成分  $\Delta_{\parallel}$  を以下のように表すことができる。

$$\Delta_{\parallel} = C + Tt + Mm \quad (1)$$

II は円柱軸が水平になるように設置され、光電面と CCD 面は垂直に立っている。磁場による像のずれは主に初段の image reducer 部分で起こると考えられるから、地磁場の垂直方向成分  $m_z$  は、画像上での左右 ( $x$ ) 方向、水平方向成分  $m_h$  は画像上で上下 ( $y$ ) 方向のずれに寄与するとする。さらに、装置が載っているゴンドラは水平方向に回転するので、 $y$  方向のずれには磁場と II のなす角度  $\phi$  が関係することになる。 $\phi$  は装置に搭載してある磁場センサーによって磁場の水平方向 2 成分 ( $x$ ,  $y$ ) を測定している所以他们の値から決めることができ、地磁場の強度 ( $m_h$ ,  $m_z$ ) は国際標準地球磁場 (IGRF) の 2000 年モデル [13] による計算を行った。直交して 2 台おいてある II-CCD に対して  $j=1, 2$  とインデックスをつけると平行移動でのずれの式 1 は

$$\begin{cases} \Delta_{j,\parallel,x} = C_{j,x} + T_{j,x}t_1 + M_{j,x}m_z \\ \Delta_{j,\parallel,y} = C_{j,y} + T_{j,y}t_1 + M_{j,y}m_h\Phi_j(\phi) \end{cases} \quad (2)$$

$$(\Phi_1(\phi)) = \cos\phi, \Phi_2(\phi) = \sin\phi$$

と書くことができる。さらに、回転のずれが存在するのでその補正が必要である。式 3 から、地上での  $j$  番目 ( $j=1, 2$ ) の II-CCD 画像上での位置 ( $x_j$ ,  $y_j$ ) から平行成分のずれを補正した位置 ( $x'_j$ ,  $y'_j$ )

$$\begin{cases} x'_j = x_j - \Delta_{j,\parallel,x} \\ y'_j = y_j - \Delta_{j,\parallel,y} \end{cases} \quad (3)$$

と、これが、飛行中の II-CCD 画像上での位置 ( $x''_j$ ,  $y''_j$ ) から ( $\Delta_{j,\perp,x}$ ,  $\Delta_{j,\perp,y}$ ) を回転中心とし、角度  $\theta_j$  の回転させたものだとすると、以下の式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} x''_j \\ y''_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j \\ \sin\theta_j & \cos\theta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_j \\ y'_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_{j,\perp,x} \\ \Delta_{j,\perp,y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、式 3 の  $\Phi_j(\phi)$  の記述を用いると、

$$\begin{cases} \Delta_{j,\perp,x} = D_{j,\perp,x,0} + D_{j,\perp,x,1}\Phi_j(\phi) \\ \Delta_{j,\perp,y} = D_{j,\perp,y,0} + D_{j,\perp,y,1}\Phi_j(\phi) \\ \theta_j = \Theta_{j,\perp,0} + \Theta_{j,\perp,1}\Phi_j(\phi) \end{cases} \quad (5)$$

と近似することができる。

これらの補正値を決定すると、式 3 と 4 から地上での II-CCD 上の位置 ( $x_j$ ,  $y_j$ ) から、それに対応する飛行中の位置 ( $x''_j$ ,  $y''_j$ ) に変換することができる。

地上での LED の位置と飛行中での LED ファイバの位置の関係を、LED イベントがとられた時刻での地磁場強度、装置の温度、装置の回転角から求めたものが表 A 1 である。

表 A1 CCD から SCIFI への変換のための補正係数

	II-CCD 1 (j=1)	II-CCD 2 (j=2)
$C_{j,x}$	-2.401295	-0.871400
$T_{j,x}$	0.047613	-0.030978
$M_{j,x}$	-0.143352	-0.263112
$C_{j,y}$	-4.785108	2.395199
$T_{j,y}$	0.108631	0.008349
$M_{j,y}$	-0.200577	0.224127
$D_{j,\pm,x,0}$	-2.2265	2.4925
$D_{j,\pm,x,1}$	-2.4041	2.4863
$D_{j,\pm,y,0}$	2.4443	-2.6932
$D_{j,\pm,y,1}$	2.2733	-2.6682
$\Theta_{j,\pm,0}$	-0.017316	-0.020265
$\Theta_{j,\pm,1}$	-0.018494	-0.020670

\* 温度の単位は℃, 磁場の単位  $\mu\text{T}$ , 角度は rad