

BESS–Polar：南極周回飛翔・超伝導スペクトロメータによる 宇宙起源反粒子の精密探査

山本 明¹, 安部 航², 泉 康介³, 板崎 輝², 大宮 英紀¹, 折戸 玲子², 熊沢 輝之¹,
坂井 賢一³, 志風 義明², 篠田 遼子³, 鈴木 純一¹, 高杉 佳幸², 竹内 一真²,
谷崎 圭裕², 田中 賢一¹, 谷口 敬¹, 西村 純³, 野崎 光昭¹, 灰野 禎一¹,
長谷川 雅也¹, 福家 英之⁴, 堀越 篤¹, 榎田 康博¹, 松川 陽介², 松田 晋弥¹,
松本 賢治¹, 山上 隆正⁴, 大和 一洋², 吉田 哲也⁴, 吉村 浩司¹,
John W. Mitchell⁵, Thomas Hams⁵, Ki–Chun Kim⁶, Moohyung Lee⁶, Alexander A. Moiseev⁵,
Zachary D. Myers⁶, Jonathan F. Ormes⁷, Makoto Sasaki⁵, Eun–Suk Seo⁶,
Robert E. Streitmatter⁵, Neeharika Thakur⁷

BESS–Polar：Sensitive Search for Primordial Antiparticle using A Superconducting Spectrometer with Long Duration Balloon Flights in Antarctica

By

Akira Yamamoto¹, Koh Abe², Kosuke Izumi³, Akira Itasaki², Hidenori Ohmiya¹, Reiko Orito²,
Teruyuki Kumazawa¹, Ken–ichi Sakai³, Yoshiaki Shikaze², Ryoko Shinoda³, Jun–ichi Suzuki¹,
Yoshiyuki Takasugi², Kazuma Takeuchi², Keisuke Tanizaki², Ken–ichi Tanaka¹, Takashi Taniguchi¹,
Jun Nishimura³, Mitsuaki Nozaki¹, Sadakazu Haino¹, Masaya Hasegawa¹, Hideyuki Fuke⁴,
Atsushi Horikoshi¹, Yasuhiro Makida¹, Yosuke Matsukawa², Shinya Matsuda¹, Kenji Matsumoto¹,
Takamasa Yamagami⁴, Kazuhiro Yamato², Tetsuya Yoshida⁴, Koji Yoshimura¹, John W. Mitchell⁵,
Thomas Hams⁵, Ki–Chun Kim⁶, Moohyung Lee⁶, Alexander A. Moiseev⁵, Zachary D. Myers⁶,
Jonathan F. Ormes⁷, Makoto Sasaki⁶, Eun–Suk Seo⁷, Robert E. Streitmatter⁶, Neeharika Thakur⁷

Abstract: The balloon–borne experiment with a superconducting spectrometer with long duration flights in Antarctica (BESS–Polar) has been progressed. It aims at searches for primordial antiparticles in low–energy cosmic rays with unprecedented sensitivity in the solar minimum period. This report describes the status and future plan of the BESS–Polar experiment.

¹ 高エネルギー加速器研究機構, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

² 神戸大学, Kobe University

³ 東京大学, The University of Tokyo

⁴ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, JAXA, Institute of Space and Astronautical Science

⁵ NASA Goddard Space Flight Center

⁶ University of Maryland

⁷ University of Denver

Key words: BESS, Cosmic rays, Antiparticle, Antiproton, Antihelium, Antarctica, Balloon.

要 旨

本研究は、南極周回超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測（BESS-Polar 実験）を通して、『宇宙起源反粒子，反物質の精密探査』を目的としている。地球磁極領域に降り注ぐ低エネルギー宇宙線に注目し，反陽子スペクトルを精密に測定して，衝突（二次）起源反陽子流束の理解を深めるとともに、『原始ブラックホール（PBH）の蒸発』、『超対称性粒子・ニュートラリーノの対消滅』等，初期宇宙における素粒子現象の痕跡となる『宇宙（一次）起源反粒子』を精密探査する。反ヘリウムの直接探査を通して，宇宙における物質・反物質の存在の非対称性を検証する。同時に陽子，ヘリウム流束を精密に観測し，これまでのカナダでの観測（BESS 実験，1993-2002）の結果と合わせて，太陽活動変調とその電荷依存性について系統的に観測し，宇宙線の伝播，相互作用に関する基礎データを提供する。

本研究では，これまでの BESS 実験で培われた超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測の経験をもとに，低エネルギー領域での観測感度を高め，南極周回長時間飛翔を可能とする超伝導スペクトロメータを新たに開発した。2004年12月13日，南極（米国，マクマード基地）での観測気球打ち上げ，高度37km での9日間に及ぶ南極周回飛翔に成功し，9億イベントの宇宙線観測データを収集した。運動エネルギー0.1~1.3GeV の範囲に於いて，これまでの約4倍の統計量でエネルギースペクトルを決定した。結果は，衝突（二次）起源モデルとよく整合し，一次起源反陽子の兆候は観測されていない。太陽活動が極小期にむけた過渡期にあたる2004年の観測として予想に沿った結果を得た。反ヘリウム探索は，これまでのヘリウム観測の総統計量を2倍以上に高め，反ヘリウム/ヘリウム比の上限値を 2.7×10^{-7} にまで押し下げた。本報告では，BESS-Polar（2004年）の成果を纏め，次期太陽活動極小期（2007年）における第二回南極周回気球実験計画を述べる。

重要語： BESS，宇宙線，反粒子，反陽子，反ヘリウム，南極，気球実験

1. 研究目的

BESS-Polar 実験は宇宙線粒子/反粒子の精密観測を通して，初期宇宙の素粒子像の理解を深めることを目的とする（図1）。特に低エネルギー領域に着目し，これまでの BESS 気球実験で培われた技術蓄積を基に，低エネルギー領域での感度を高めた超薄肉超伝導スペクトロメータを開発し，南極周回気球による長時間観測を行う。低エネルギー領域での反陽子スペクトルの精密観測を通し，原始ブラックホール（PBH）の蒸発等，初期宇宙素粒子現象を起源（一次起源）とする反粒子の精密探査を推進する。これまでに観測例のない反物質（反ヘリウム）の直接探索を通して，宇宙における物質/反物質の非対称性を検証する。BESS 実験から積み重ねられてきた陽子，ヘリウム等の宇宙線流束の精密観測を継続し，太陽活動の変化に伴う宇宙線流束の変調，その電荷依存性を系統的に観測し，宇宙線の伝播，相互作用に関する基礎データを提供する [1-8]。

2. 研究の経過

平成13年度より実験準備が進められ，超伝導スペクトロメータの全体設計，各要素開発が進められた。中央飛

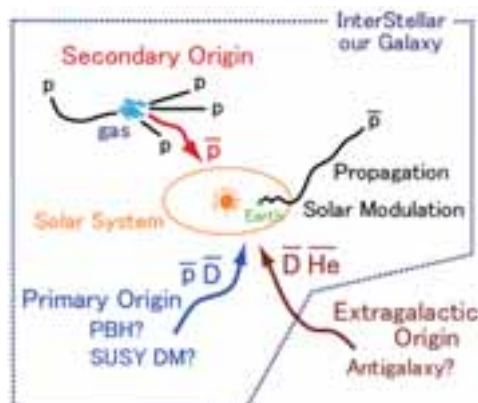


図1 宇宙線反粒子，反物質の起源

跡検出器（JET）の気球実験による性能がBESS–TeV 実験（@Ft. Sumner）によって実証された。平成14年度には、加速器ビームによる粒子検出器要素の個別性能試験や太陽光発電システムプロトタイプの実験（@宇宙研）が実施された。平成15年度には、総合テクニカルフライト（@NASA/NSBF, Ft. Sumner）が実施されるとともに、観測器インテグレーション（@NASA/GSFC）が開始された。平成16年度8月には、観測器インテグレーション完了（@NASA/GSFC）し、噛み合わせ試験（@NASA/NSBF, Palestine）を経て観測器の準備が整った。12月には科学観測フライト（@NSF/NASA, Antarctica McMurdo Station）が実現した。平成17年度には、実験機器を持ち帰るとともに、加速器ビームを用いて測定器の性能検証をおこなうとともに、データ解析をすすめる、観測結果を得た。

3. BESS–Polar 超伝導スペクトロメータの開発

BESS–Polar 実験では、低エネルギー宇宙線反陽子への感度を高め、南極での長期間飛翔条件を満たすため、新たに超伝導スペクトロメータが開発された。シンプルな円筒構造の基本設計概念は継承しつつ、測定可能な反陽子のエネルギーの下限を100MeV にまで下げるために、測定器内の物質量の徹底的な削減と、新たなトリガー機能が付け加えられた。また、南極での気球打ち上げに対応するために総重量の軽減が大きな課題となった。表1に BESS–Polar スペクトロメータの主要パラメータを、それまでの BESS との比較とともに示す。図2に BESS–Polar 測定器の断面図を示す。BESS–Polar 測定器は薄肉超伝導ソレノイドマグネット（MAG）、2種類のドリフトチェンバーからなる中央飛跡検出器（JET/IDC）、粒子の飛行時間を測定するシンチレーションカウンターホドスコープ（TOF）、粒子識別のためのシリカエアロジェルチェレンコフカウンター（ACC）、超伝導ソレノイドのボア内下部に組み込まれた Middle–TOF（MTOF）カウンターから構成される。

MTOF カウンターを下側の TOF カウンターと同様にトリガーシステムに組み込むことにより超伝導ソレノイドコイル下部の物質量を通過できないような極低エネルギー領域の粒子に対してもトリガー感度を保つことができる。また長期間の実験に対応するため液体ヘリウムの貯液量を増やし、電力の供給源は測定器全周を囲む太陽電池による電源システムとした。また、長時間飛翔中の JET/IDC のガス特性を保つため、ガスフローシステムを開発し、容易に取り扱うことのできる CO₂ ガスを採用した。物質量を軽減し、総重量を軽減するため、外側圧力容器をとりやめ TOF, ACC 等を真空中での動作とした。これらの改良によって、BESS–Polar 測定器は観測のトリガーを発生するのに必要な粒子の通過物質が < 5 g/cm² へと飛躍的に減少し、0.1GeV までの低エネルギー領域での観測、連続10日間の飛翔実験が可能となった。

1) 超伝導マグネット：超伝導コイル本体は、日本宇宙フォーラムの支援を受けて開発され、クライオスタット（断熱真空容器）を含むシステムが本研究で開発された。直径0.9m、長さ1.4m、コイル厚さ3.4mmの薄肉超伝導コイルであり、粒子透過性からみた物質質量（密度）は 1g/cm^2 にまで、低減している（図3）。規格化された磁石透明度の指標となるE/M比（磁気蓄積エネルギー／コイル質量の比）において、実機中心磁場1.05Tまでの励磁で、 $E/M \sim 10\text{kJ/kg}$ を達成した。またコイルを収納する断熱真空容器（クライオスタット）と組み合わせた総合組み立て後の物量として 2.3g/cm^2 を達成した。長時間フライトの鍵となる液体ヘリウムの寿命は、11.5日を達成した [9-13]。

2) 中央飛跡検出器（JET/IDC）：BESS-Polar用粒子飛跡検出器の開発は、TeV領域の宇宙線スペクトラム測定実験「BESS-TeV」と連携して進められた。新JETチェンバー（図4）は信号の読みだしチャンネルが粒子のトラックあたり24から48ポイントへと倍増されて、運動量測定分解能の向上が計られた。その上下には、トリガー機能および、z方向バーニア機能を有するセル型ドリフトチェンバ（IDC）が各々2層ずつ配置されている。長時間フライトにおけるガス純度を保つため、素材の材質を厳選するとともに、ガス（ CO_2 ）フローシステムが新

表1 BESS-Polar スペクトロメータの主要パラメータおよび BESS との比較

| | BESS-2000 | BESS-Polar(設計値) |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Geometrical Acceptance | $0.3\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ | $0.3\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ |
| Material for trigger | 18g/cm^2 | $< 5\text{g/cm}^2$ |
| Magnetic field | 1 T | 0.8T |
| Weight | 2.3tons | 1.95tons |
| Power source | Batteries | Solar Cell w/batteries backup |
| Power consumption | 900W | 600W |
| Cryogen life | 5.5days | 11days |
| MDR | 200GV | 240GV |
| P-bar energy range | $0.18 \sim 4.2\text{GeV}$ | $0.1 \sim 4\text{GeV}$ |

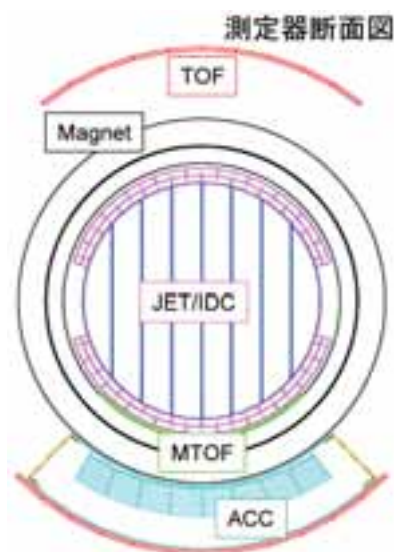


図2 BESS-Polar スペクトロメータ断面図



図3 超伝導コイル本体



図4 JET/IDC 組み立て

たに開発された。平成14年度のカナダでの気球実験において新 JET チェンバーが期待通りに動作し空間分解能として $150\mu\text{m}$ を達成した。その後、プリアンプ部等の電磁シールドが強化され、10日間にわたりガステ性を維持するためのガスフローシステムが付加された。

3) 飛行時間カウンター (TOF, MTOF) : 粒子検出器上下に配置される飛行時間カウンター (TOF) は、物質量の低減を計るため、プラスチックシンチレータの厚さを従来の $1/2$ となる 10mm とし、 10cm 幅を並列し、ホドスコープとした。性能検証を KEK の加速器ビームを用いて実施し、時間分解能 120ps への見通しを得た。これを基に実機カウンターホドスコープ (図5) の開発が進められた。信号読み出しには強磁場対応・メッシュ型光電子増倍管を使用し、真空環境での使用のため、電圧分配部は樹脂ポッティング型とした。スペクトロメータ中間部に配置される中間 TOF カウンタ (MTOF) は、厚さ 5mm のストリップ状シンチレータをホドスコープとして、JET の直下に配置している。信号を片端からクリアファイバで受け、マルチアノード光電子増倍管 (MA-PMT) でまとめて受け取る方式を採用した。時間分解能は 500ps が期待される。MTOF は宇宙線測定のエネルギー範囲の下限を 0.1GeV まで広げるための鍵となっている。

4) エアロジェルチェレンコフカウンター : 4.2GeV までの電子/ミュー粒子と陽子の粒子識別を明確に行うために屈折率 1.02 のシリカエアロジェルチェレンコフ発光体を採用した。これまでの開発で確立したラッピング方式でサブモジュールを組み立てた後、ローマンアーチ構造を組み立てる方式を採用している (図7)。KEK-PS 加速器におけるビームテストによって基本性能が確認された。信号読み出し用光電子増倍管は TOF と同様、真空環境対応として、気密容器タイプが採用された。

5) エレクトロニクスおよびデータ処理システム : BESS-Polar 実験では、飛翔体としての重量の軽減とともに、電力の節約が非常に厳しく求められる。このため、エレクトロニクスすべての設計が見直され、信頼性の追求と徹底した省電力化が図られた。全体のフローダイアグラムを図8に示す。総合電力として従来の $1/2$ 以下となる 420W を達成した。カウンターのフロントエンドエレクトロニクス、データ収集用制御回路は真空環境での使用となるため、伝熱による放熱を前提とした熱設計が行われ、真空環境で個別に $-20\sim+40^{\circ}\text{C}$ の環境温度の範囲で性能確認試験がされた。データ保存には、12台の 300GB ハードディスクが採用され、磁気遮蔽ケース内に配置された [14-17]。

6) 太陽光発電システム : 南極での周回フライトには、測定器を作動させるため長時間にわたる安定した発電機



図5 上部 TOF の組み込み



図6 MA-PMT で MTOF 信号の読出し



図7 アーチ構造 ACC の組み立て

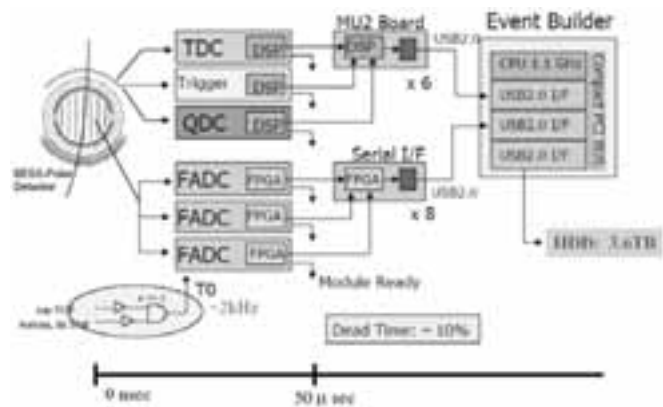


図8 エレクトロニクス、データ収集ダイアグラム

構が不可欠である。必要電力供給量600W に対して、900W までの発電容量を確保するため、全方位型8面体構造を採用した。構造は大型になるが、基本的にシステムがパッシブで信頼性が高い方式とした。また非常用として、リチウム電池を並列に配置し、自動的に給電される設計とした。打ち上げ前、または、半日以内の太陽光発電停止にも対応できるように、設計した。プロトタイプを開発し、アセンブリ試験、真空環境試験などを行った。また電力の受渡しを行なうための、DC-DC コンバータについて、特に磁場中での動作を念頭においた開発をおこなった。フルスケールプロトタイプを宇宙科学研、三陸大気球観測所において技術飛翔実験し、期待通りの性能を確認した(図9)。この経験をもとに、テクニカルフライトモデルを経て実機が開発された[18-21]。

7) テクニカルフライト：スペクトロメータの基幹構造部分となる超伝導マグネット、ソーラパネル、およびデータ収集、通信系の総合テクニカルフライトが NASA/NSBF (@Ft. Sumner, New Mexico) において、平成15年10月に実施された(図10)。科学観測気球飛翔としては最大級となる観測器基幹部の打ち上げに成功するとともに、超伝導磁石、ソーラパネルの発電性能、磁場環境下での地上との通信系の正常な動作が確認された。また飛翔後のパラシュートによる着地時の、ソーラパネルのクラッシュ緩衝効果も確認することができた[22]。

8) 観測器インテグレーション：テクニカルフライトの成功を受け、宇宙線観測装置としてのインテグレーションが、NASA ゴダード宇宙飛行センター(メリーランド州)において日米両チームの協力によって進められた。平成15年10月より10ヶ月を要し、8月上旬、インテグレーションが完了し、全システムが磁場のなかで総合的に試験された(図11)。その後、スペクトロメータは NASA 国立科学気球観測施設(NSBF:テキサス州パステイン)に移され、準備最終プロセスとして、気球打ち上げ装置、管制装置との『噛み合わせ試験』に合格し、準備が完了した[23]。

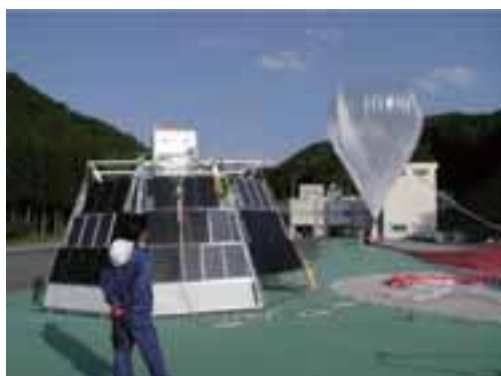


図9 宇宙科学研（三陸）でのテクニカルフライト前のソーラパネル



図10 NSBF（Fort Sumner）でのテクニカルフライト



図11 インテグレーション後の総合試験

4. 南極周回気球による宇宙線観測

南極周回気球実験では、実験チームが10月末に現地入りし、約一月余の準備期間を経て、12月3日に打ち上げリハーサルを経て、打ち上げ準備が整った。天候待ち10日後にチャンスが訪れ、平成16年12月13日（ニュージーランド夏時間、18:56）に南極マクマード基地近くのウイリアムズフィールドより、大型観測気球による気球搭載型超伝導スペクトロメータの南極周回軌道への打ち上げに成功し（図12, 13）、約3時間後には、高度37kmに達し、以後8日17時間に亘って安定した周回飛行を続けた。オンラインによるイベントセレクション（フィルター）をかけることなく、約9億の宇宙線イベントの観測に成功した [24, 25]。図14, 15に気球飛翔航跡および飛翔高度を示す。気象条件により、軌道が期待したコースよりも南極側（高緯度側）に入り込んだため、観測機器の安全な回収を最優先とし、リモートキャンプと回収作業支援が確保されるロス棚氷東端に着地、回収することとなった。この結果、観測時間は期待した10日間に比べ若干短くなった。無線コマンドにより気球から切り離された測定器はパラシュートにより緩降下し、マクマード基地より約870km南東のロス棚氷上に安全に着地した。8日間を超える観測の間、超伝導マグネットおよび各測定器はほぼ順調に動作したが、TOFカウンターの光電子増倍管に生じた突発的な過剰電流により44本中18本の光電子増倍管の使用を停止した。信号はカウンターの両側から読み出しを行っていたため、残った片側で信号を読み出した。低エネルギー反陽子観測感度を最



図 12 BESS-Polar 気球打ち上げ



図 13 BESS-Polar 打ち上げ成功

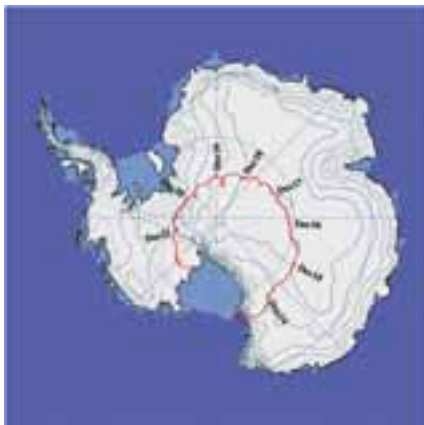


図 14 BESS-Polar 飛翔軌跡

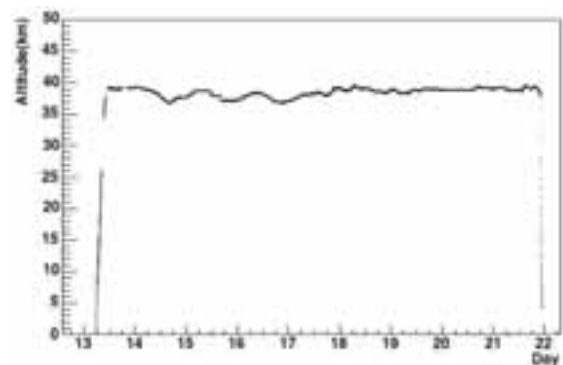


図 15 BESS-Polar 飛翔高度

大限保つようトリガーモードの変更を迅速に行ない，設計に対して約66%の立体角を確保した。

マクマード基地より約870km 南東ロス棚氷上に着地した観測機器は，一週間をかけ，氷上で各要素に分解され，すべて回収された。約2トンにおよぶ観測機器を一切の重機を用いず，軽飛行機に搭載，回収する作業はとてもしばしいものであったが，NASA/NSBFおよびNSFリモートキャンプスタッフの協力により，無事回収することができた。回収作業の様子を図16，17に示す。また第一回南極周回気球飛翔実験のまとめを表2に示す。

5. 観測結果

2004年に実施された BESS-Polar I 実験では，これまでの解析で，以下に述べる観測結果を得た。

宇宙線反陽子流束の精密観測：BESS-Polar 実験では，1 GeV 以下の宇宙線反陽子スペクトルの精密観測が最も重要な目的であった。これまでの BESS 実験の結果から明らかになった二次粒子を主成分とする 2 GeV にピークを持つエネルギースペクトルにおいて，1 GeV 以下の低エネルギー領域で，前回の太陽活動極小期の時に観測



図 16 着地。回収作業に取りかかる



図 17 全ての観測器要素分解し回収

表 2 BESS-Polar I 南極周回飛翔宇宙線観測実験のまとめ

| | |
|-----------|----------------------------|
| 打ち上げ | 2004年12月13日18:56 (現地時間) |
| 着地 | 2004年12月22日11:56 (現地時間) |
| 飛翔高度/残留大気 | 37km / 4 g/cm ² |
| 飛翔時間 | 257時間 (8日17時間) |
| 宇宙線観測数 | 9億イベント |
| データ量 | 2.1テラバイト |
| 観測器電力消費量 | 420W |
| 観測器総重量 | 1.95ton |

されたフラットなスペクトルが、高い統計精度で再現されるか、または二次粒子スペクトルとしてより精密に理解されるかが焦点であった。

収集された宇宙線イベントの解析には、1年以上を要した。TOF 光電子増倍管の問題によって立体角が2/3に減少し、観測時間が短かった(8.5日)ものの、9億の観測イベント(2.14tera-bytes)のなかから、まず約2000の反陽子候補を抽出した上で、大気頂上での運動エネルギー0.1~1.28GeVの範囲で432イベントの反陽子流束を質量測定によって同定することに成功した[26, 27]。観測イベントの一例を、図18に示す。従来のBESS実験1フライトデータの約4倍の統計となり、統計精度が飛躍的に向上し、MTOFを用いた解析によって、エネルギースペクトル範囲を0.1GeVまで広げることに成功した。図18に観測された反陽子イベントを、図19にBESS-Polar実験によって得られた反陽子スペクトルを示す[28]。また、前回の太陽活動極小期(BESS95+97)の観測値、理論計算との比較を図20に示す。BESS-Polarにおける観測値は、この太陽活動変調を考慮した二次起源モデルとよく整合し、原始ブラックホール等の一次起源反陽子の兆候は観測されていない。BESS-Polar Iは太陽活動の極大から極小期への過渡期であり、一次起源反陽子が存在しても、二次起源反陽子スペクトルに隠れるレベルである。一次起源による成分は二次起源のものよりも大きく太陽風の影響を受け、結果として二次起源成分のスペクトラムに埋もれてしまうことが考えられるからである。より明確な結論は、今回の観測と、次回太陽活動極小期における宇宙線反陽子測定と比較することによって得られる。

陽子流束の観測：BESS実験では、反陽子の観測とともに、陽子流束の観測を継続し、宇宙線物理学の基盤となる陽子、ヘリウム流束の精密観測データを提供してきた。BESS-Polar I実験において得られた低エネルギー陽子スペクトルをそれまでの観測との比較として図21に示す[29, 30]。太陽活動変調を半周期以上にわたり、系統的に観測し、理論モデルとの検証を行っている。太陽磁場極性が反転する2000年までは、Force Field Modelによ

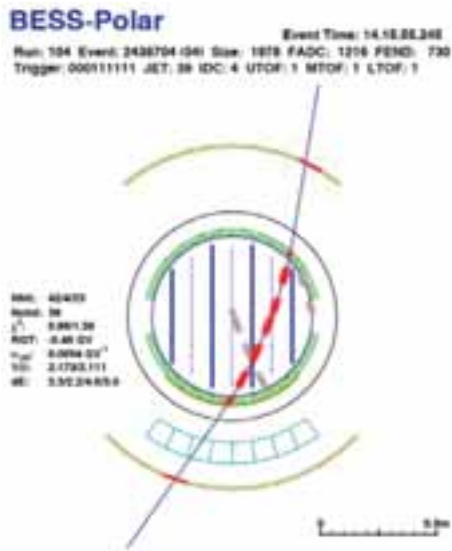


図 18 BESS-Polar 観測イベント(例)

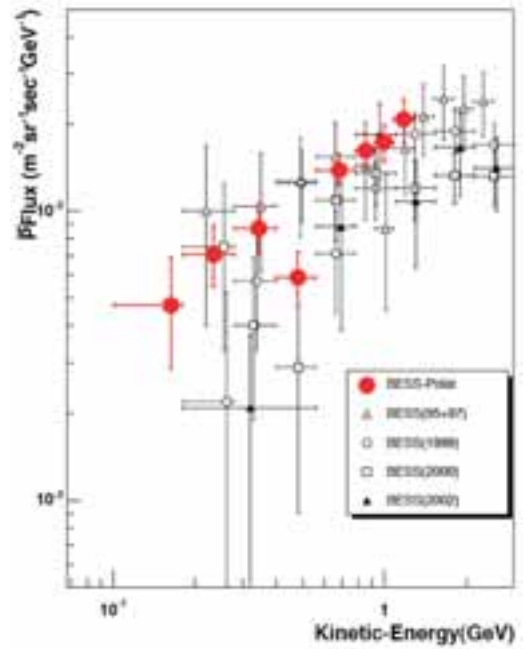


図 19 BESS-Polar での反陽子スペクトルとこれまでの実験の比較。スペクトル下限を0.1GeVまで広げ、統計精度を大きく改善。

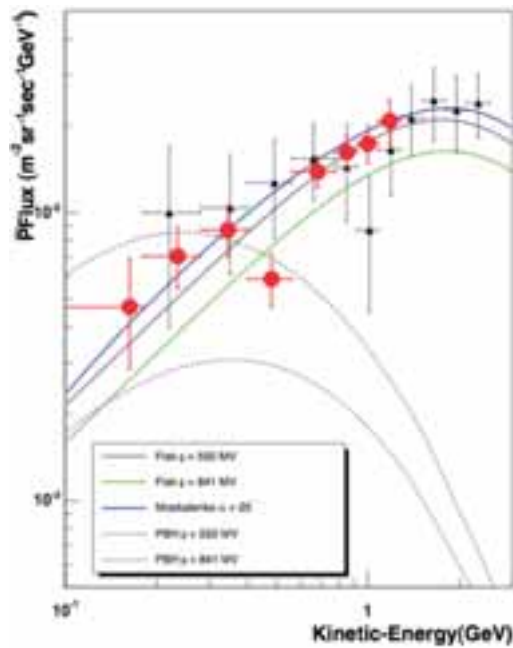


図 20 BESS-Polar 反陽子流束の測定。BESS-Polar の観測では、衝突起源反陽子モデルに整合する結果が得られた。太陽活動が中間期であり、モデルとの整合性は良い。

り実験データがよく再現されている。極性反転後、2002、2004の観測が Force Field Model から系統的なずれを示していることは、実験、モデルの両面からさらに研究が求められる。

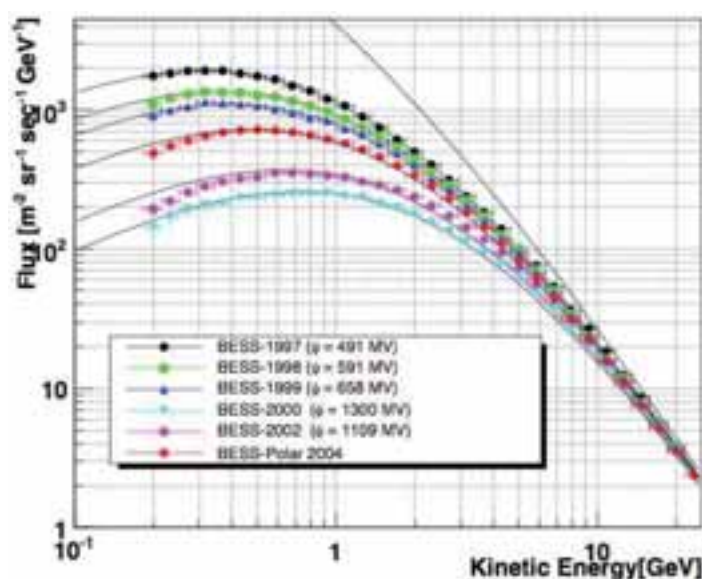


図 21 BESS-97-BESS-Polar 2004 における陽子スペクトルと太陽変調効果.

反陽子／陽子比および太陽活動の電荷効果：これらの反陽子，陽子の太陽活動の変化に伴う観測から，太陽活動変調における電荷依存性を，理想的なプローブ（反陽子／陽子比）によって観測的研究を継続している．図23（上）に，BESS-95 から BESS-Polar I まで，太陽活動の半周期以上にわたる，反陽子／陽子比の観測結果に示す．また，太陽変調のドリフトモデルから予測される理論計算との比較を示す．ドリフトモデルにおいて，太陽変調の影響を特徴付ける主な変数 HCS（heliospheric current sheet）の天頂角（ α ）であり図中実線はそれぞれ $\alpha = 15^\circ \sim 45^\circ$ での理論曲線である．本実験により得られた結果からは $\alpha \sim 20^\circ$ が良い再現性を見せており，この値はそれぞれ陽子，反陽子，また独立な他実験 Wilcox Solar Observatory による観測とも矛盾しておらず，ドリフトモデルの妥当性が検証された [28]．図22（下）はエネルギー0.7GeV における反陽子／陽子比の太陽活動変調を二つのドリフトモデル計算との比較として示している．太陽活動極大期における太陽磁場極性反転に伴う，反陽子／陽子比の急激な変化を，BESS 実験が捉え，その後，2002，2004年には，緩やかに変化していく様子を観測し続けている．BESS 実験は，この観測値を継続できるユニークな実験である．

反物質探索：BESS-Polar 実験は，反陽子，反中性子の合成体として最も単純な反物質核である反ヘリウムの探索を推進した．フライト時間の長さを活用し，ヘリウム流束の高統計観測を行った．この結果，これまでの BESS 実験における統計量を併せ， $\sim 14\text{GV}$ の領域で，反ヘリウム／ヘリウム上限値 2.7×10^{-7} を得た (図23)．これは，BESS 実験以前のデータに対して，約100分の1まで，上限値を押し下げる成果を達成した [31, 32]．

6. 今後の計画

本研究は次期計画として，太陽活動極小期（2007年）に南極を2周回する長時間気球飛翔によって20日間以上の観測を目指す [8, 33, 34]．BESS-Polar 2004 実験の結果を踏まえ，観測装置のアップグレードを進めている．主な改良点は以下の通りである（表3，図24参照）．

- ・ マグネット液体ヘリウム量を増強及び断熱性能向上を図り観測日数の増加を図る．
- ・ TOF 光電子増倍管電圧分配器部分を金属気密容器（シリンダー）に収納し，気密信頼性の向上を計る．このことによって本来の観測器のアクセプタンスを確保する．

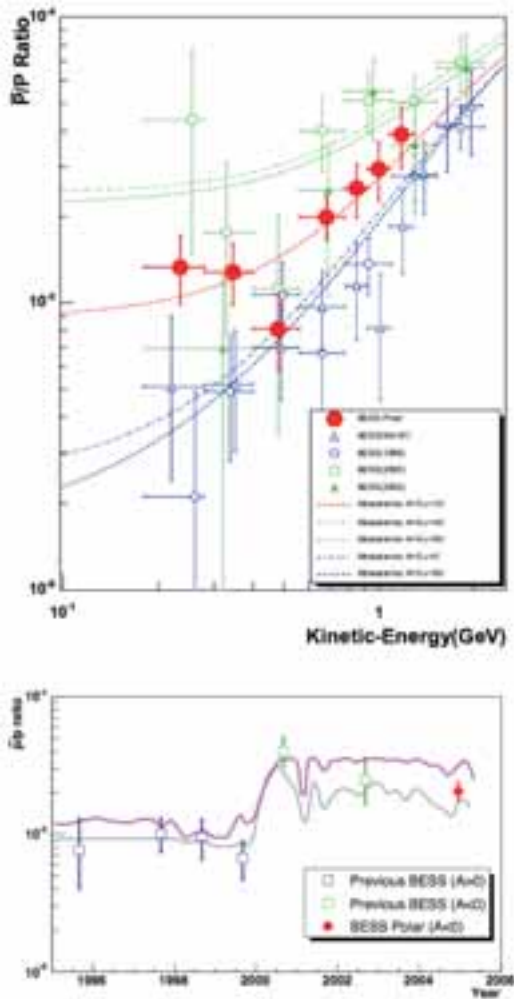


図 22 反陽子/陽子比の変化. BESS-95 から BESS-Polar I 間の太陽活動変調の電荷効果. 太陽磁場極性の反転によって, 反陽子/陽子比が急激に変化する様子を BESS は捉えた.

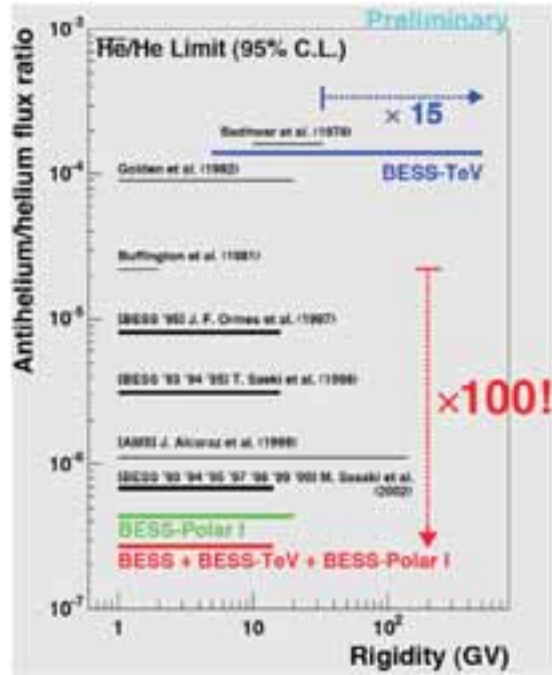


図 23 反ヘリウム探索: BESS-Polar での観測結果及びこれまでの実験からの進展. BESS および BESS-Polar 実験によって, 反ヘリウム/ヘリウム上限値を, それまでの実験に比べ, 1/100の上限値までの探査を達成した.

表 3 BESS-Polar II にもつたアップグレード計画および BESS-Polar I との比較

| 項目 | BESS-Polar I (実績) | BESS-Polar II (計画) |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 超伝導磁石 LHe 量/磁場保持時間 | 400L/ ~11days | 520L/ >22days |
| JET (飛跡検出器) ガス特性保持時間 | ~10days | >22days |
| TOF-PMT 気密方法 | Resin-potting | Pressurized Cylinder |
| ACC 粒子識別性能 (rejection factor) | ~630 | >>1000 |
| 太陽光発電容量/電力負荷 | >900W/420W | >675W/450W |
| 実効アクセプタンス | 2 / 3 × 0.3m ² · sr | 0.3m ² · sr |
| 観測日数 | 8.5days | >20days |
| 宇宙線観測統計量 | 4 × BESS-97 | 20 × BESS-97 |
| データ蓄積容量/記録量 | 3.6TB/ 2 TB | 12~16TB/ TBD |

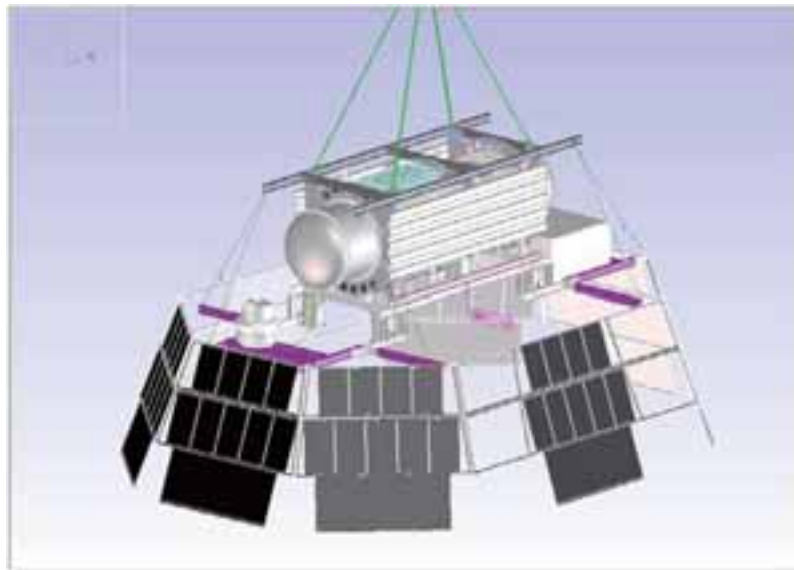


図 24 BESS-Polar II スペクトロメータ

- ・ MTOF 信号を現在の片側読み出しから両側読み出しとし、低エネルギー領域でのトリガー性能、TOF 時間分解能の向上を図る。
- ・ ACC 発光体の屈折率を1.02から1.03とし、低エネルギー領域でのチェレンコフ発光量を増強するとともに、発光体ユニットを大型化し、光電子が光電子増倍管に効率よく到達することによって粒子識別性能の向上を図る。
- ・ データ蓄積用ハードディスク容量を増強する。
- ・ 太陽光発電容量を負荷に見合い調整し、上記改良に伴う観測器重量の増加を吸収する。

次期太陽活動極小期は、2006～2007年に到来すると予測されている（図25）。これまでの中性子線の観測デー

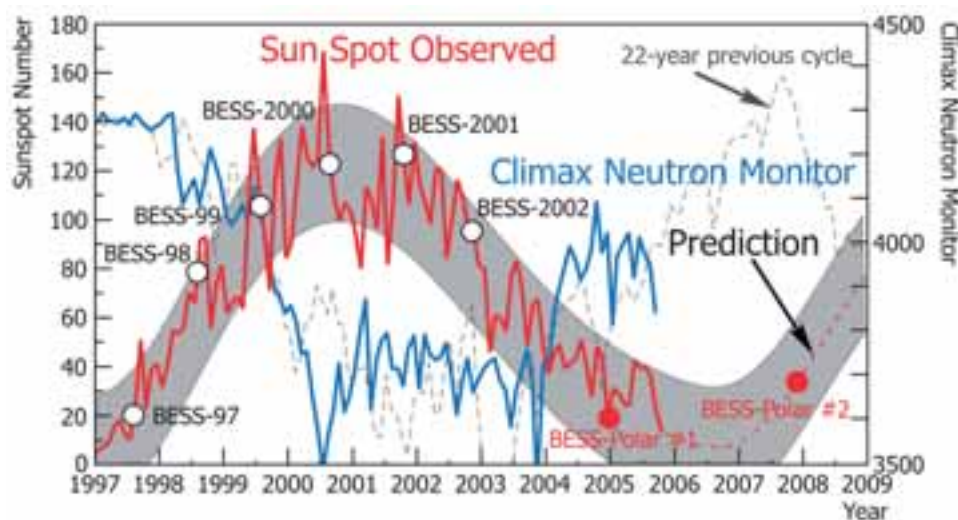


図 25 太陽活動変動と BESS/BESS-Polar 実験による宇宙線観測。2004年は極小期に向かう過渡期期にあたる。2007年は“極小期”の終了期にあたり、中性子流束の推移から、宇宙線流束がピークを迎えると予想される。

タから宇宙線流束は2007年に最大ピークを迎えると予想されるため、BESS-Polar II 実験を2007年に計画することにより、BESS スペクトロメータの大立体角、極地における低リジディティークットオフ、南極周回長時間観測の三つの特色をあわせ、究極的な感度（統計）での宇宙起源反粒子探索を実現する。

7. まとめ

BESS-Polar 実験は、“宇宙線反粒子の精密探査”を目的とし、超伝導スペクトロメータによる南極周回気球飛翔実験（BESS-Polar）による宇宙線観測を推進した。これまでの BESS 実験における実験技術・宇宙線観測の経験をもとに、低エネルギー領域での観測感度（効率）を高めた薄肉超伝導スペクトロメータを開発し、太陽活動が極小期に向かいつつある中間期である2004年12月に、南極周回長時間気球実験に成功した。8.5日にわたる連続観測によって、約9億イベントの宇宙線データの取得に成功した。このなかから、これまでの4倍の統計量で0.1~1.3GeVの領域で低エネルギー反陽子スペクトルを決定し、太陽活動が極小期に向かう過渡期のスペクトルが衝突（二次）起源反陽子スペクトルによく整合することを検証した。反ヘリウム探索では、反ヘリウム/ヘリウム上限値として、 2.7×10^{-7} を得た。また陽子流束の精密測定、反陽子/陽子比から太陽活動変調の電荷依存性に関する半周期以上に亘る系統的な観測結果を蓄積した。

本研究は次期計画として、太陽活動極小期（2007年）に南極を2周回する長時間気球飛翔によって20日間以上の観測を目指し、現在、観測装置のアップグレードを進めている。宇宙線中性子観測データから、宇宙線流束は2007年にピークを迎えると予想され、BESS-Polar II 実験によって、気球実験として究極的な感度での宇宙起源反粒子探索を推進する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ISAS/JAXA, KEK のご支援に心から感謝致します。本研究は、平成13~17年の間、文部科学省科学研究費補助金・特別推進研究（13001004）の支援により推進されました。また平成18年度より、基盤研究 S（18104006）の支援を受け推進されています。ここに、深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] A.Yamamoto et al., “BESS and Its Future Prospect for Polar Long Duration Flights”, Adv. Space Res. 30 (2002) (5) 1253–(5)1262.
- [2] A.Yamamoto et al., “BESS-Polar: Long Duration Flights at Antarctica to Search for Primordial Antiparticles”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 113 (2002) 208–212.
- [3] 福家英之 他, “BESS-Polar: 南極周回気球実験による宇宙線反陽子の精密測定”, 宇宙科学研究所報告 特集44 (2002) 87–97.
- [4] 山本 明, 野崎光昭, 吉田哲也, “BESS-Polar: 南極周回気球実験による宇宙線反粒子の精密探査”, 日本物理学会誌 58 (2003) 86–93.
- [5] T.Yoshida, et al., “BESS-Polar Experiment”, Adv. Space Res. 33 (2004) (10)1755–(10)1762.
- [6] M.Nozaki for the BESS Collaboration, “BESS-Polar”, Nucl. Instr. and Methods B 214 (2004) 110–115.
- [7] J.W.Mitchell et al., “The BESS Program”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 134 (2004) 31–38.
- [8] K. Yoshimura et al., “BESS-Polar Experiment”, Proc. of COSPAR-06, Beijing (2006), and to be published in Adv. Space Res.,

- [9] A.Yamamoto et al., “A Thin Superconducting Solenoid Magnet for Particle Astrophysics”, IEEE Trans. Applied Superconductivity 12 (2002) 438–441.
- [10] Y. Makida et al., “A Thin Superconducting Solenoid Magnet for Balloon Borne Experiment”, Proc. 23rd Intl. Symposium Space Technology and Science (Matsue) (2002) 2077–2082.
- [11] Y. Makida et al., “Performance of an Ultra–Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics”, IEEE Trans. Applied Superconductivity 15 (2005) 1248–1251.
- [12] 大宮英紀 他, “BESS–Polar 用極薄肉超伝導ソレノイドの基礎開発”, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2002) 45–48.
- [13] 大宮英紀 他, “BESS–Polar 用極薄肉マグネットの開発–実機コイル性能試験結果–”, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2003) 100–103.
- [14] K.Yamato et al., “A New Data Acquisition System for the BESS–Polar Experiment”, Proc. 23rd Intl. Symposium Space Technology and Science (Matsue) (2002) 2066–2070.
- [15] 谷崎圭祐 他, “BESS–polar における DAQ システム”, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2002) 37–40.
- [16] 高杉佳幸 他, “BESS–Polar 実験のためのデータ収集システム”, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2003) 104–107.
- [17] 竹内一真 他, “BESS–Polar 実験のための Flash ADC の開発”, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2004) 117–120.
- [18] 福家英之 他, “気球実験用太陽電池パネルの開発”, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 103–106.
- [19] 泉 康介 他, “BESS–Polar 実験用太陽電池電源システムの開発”, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2002) 41–44.
- [20] 松本賢治 他, “BESS–Polar 用太陽電池システムの三陸検証実験”, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2003) 108–111.
- [21] 福家英之 他, “BESS–Polar 用太陽電池システムの三陸検証実験”, 宇宙科学研究所報告 特集45 (2003) 37–58.
- [22] 熊澤輝之 他, “BESS–Polar 2003 Technical Flight 報告”, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2004) 113–116.
- [23] 横田康博 他, “BESS–Polar 実験–南極周回気球観測に向けて–”, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2005) 170–173.
- [24] 吉田哲也, “他 BESS–Polar 第 1 回実験経過”, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2006) 162–165.
- [25] 吉田哲也, 山本 明, “反陽子観測のための南極周回気球飛翔の成功”, 日本物理学会誌60 (2005) 653–654.
- [26] 松田晋弥 他, “BESS–Polar 実験による宇宙線反陽子流束の精密測定”, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2006) 166–169.
- [27] 松田晋弥 他, “南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の精密探査”, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部宇宙科学シンポジウム (2006).
- [28] S. Matsuda, “Measurement of cosmic–ray low–energy antiproton flux in a long –duration flight over Antarctica”, 博士論文 (東京大学、2006年 9 月)
- [29] Y. Shikaze et al., “Solar modulation effect on the cosmic–ray proton spectra measured by BESS, Proc. of ICRC–28,

Tsukuba, (2003) 4027.

- [30] 折戸玲子他., 日本物理学会 (奈良, 2006年9月), 出版準備中.
- [31] M.Sasaki et al., "Progress in Search for Antihelium with BESS", Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 113 (2002) 202–207.
- [32] M. Sasaki et al., Proc. of Cospar–06, Beijing, (2006), to be published in Adv. Space Res.
- [33] 山本 明 他, "BESS–Polar 実験の今後の展開", 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2006) 170–173.
- [34] A. Yamamoto et al., "Search for Primordial Antiparticle with BESS" Proc. of COSPAR–06, Beijing, (2006), and to be published in Adv. Space Res.,