

南極における BESS-Polar 宇宙線観測実験の実施経過

高エネルギー加速器研究機構

吉田 哲也 山本 明

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

福家 英之

on behalf of BESS 実験グループ

2005 年 2 月 28 日

1. はじめに

宇宙初期における素粒子現象の探索を目的として進められている日米共同宇宙線観測実験 (BESS-Polar) は、昨年 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、大型観測気球を用いた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た。ペイロードの上昇とともに観測を開始し、約 3 時間後には予定飛行高度 37 km に達した。以後 37~39 km の高度を保ちつつ南緯 80~85 度の南極周回軌道に沿って 8 日 17 時間の宇宙線観測を行い、観測された宇宙線は約 9 億イベントに達した。本稿では今回実施された BESS-Polar 実験の経過を紹介する。

2. 実験の背景

超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測実験 (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer: BESS) は、低エネルギー宇宙線反陽子の精密測定と宇宙起源反物質の探索を科学観測テーマとして、1993 年以来、カナダ北部、リンレークでの気球観測実験を続けてきた。宇宙から地球に飛来する宇宙線には微量の反陽子が含まれているが、BESS 実験では、超伝導スペクトロメータによる「質量の同定」という確実な方法で宇宙線を識別し、これまでに 2,000 例以上の低エネルギー反陽子の検出を行ってきた。その結果から、宇宙線反陽子のほとんどは高エネルギー宇宙線と星間物質の衝突を起源とするものであることを明らかにした。しかし一方、図 1 に示すように運動学的に衝突起源反陽子の生成が著しく抑制される低エネルギー領域でのスペクトルが平坦であることから、宇宙初期に生成された原始ブラックホールの蒸発など興味深い起源が存在する可能性も否定できない。

また、宇宙における物質、反物質の非対称性は、素粒子、宇宙論の根幹に関わる謎である。宇宙初期の素粒子反応に

おける CP 対称性の破れによって生じた可能性が指摘されているが、その詳細は不明である。理論によっては、われわれの銀河から遠く離れた反物質領域の存在を予言する説もあり、その直接的検証には宇宙から飛来する宇宙線中に含まれるかもしれない反物質を探索する他はない。しかしこれまでの BESS 実験においては、宇宙線ヘリウム原子核成分の観測約 700 万事象に対して、反ヘリウム原子核事象は一事象も観測されていない。

これらの微量の反陽子、反物質を観測するには、大気の影響を受けない高空もしくは宇宙空間で大型の測定器を用いて長時間観測する必要がある。また低エネルギー宇宙線の観測は、地磁気によるカットオフが小さな高緯度、極点近傍でなければならない。南極周回気球での観測は、夏季に日没がないために高度調整用のパラストを必要とせず、南極点を周回する風に乗った飛翔によって約 10 日の連続

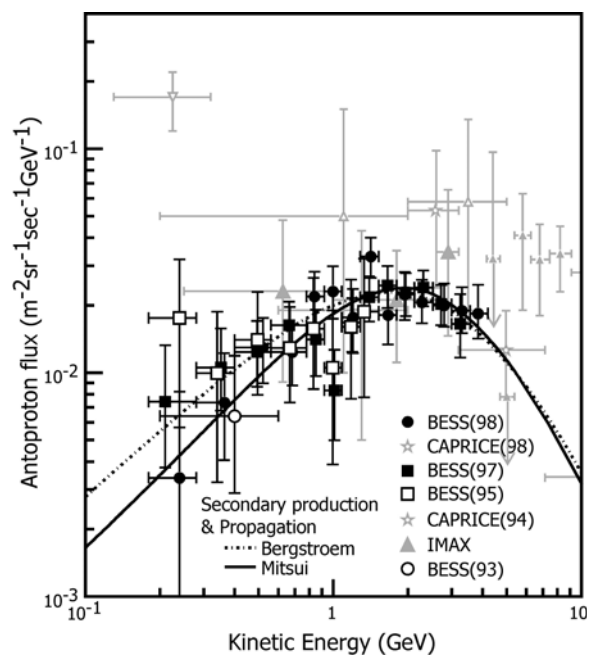


図1 BESS 実験で得られた低エネルギー宇宙線反陽子スペクトル

観測が実現できることから、低エネルギー反粒子反物質探索実験には理想的な環境である。人工衛星や宇宙ステーションを用いた実験に比べて、高緯度地域に留まることができる気球による南極周回実験は、少ない費用で機動性に富む極めてユニークな科学観測となる。BESS 南極周回気球実験は、これまでのカナダでの BESS 実験の成果を踏まえ、一桁高い統計量で低エネルギー反陽子宇宙線観測を行うとともに、極微量に至る宇宙線反物質探索を目的としたもので、極域での長時間観測を目指したことから BESS-Polar 実験と命名された。

3. BESS-Polar 測定器の特徴

BESS-Polar 実験の実施にあたっては BESS 測定器のコンセプトとこれまでの気球実験で得られた経験を基に、より低エネルギー宇宙線反陽子観測が可能で南極周回長時間気球実験に対応した新しい超伝導スペクトロメータ BESS-Polar 測定器の開発が進められた。超伝導ソレノイド内部に設置されるドリフトチェンバは、2001～2002年に実施された BESS-TeV 実験用に開発されたものを用いたが、これ以外の測定器要素は、すべて BESS-Polar 実験用に新しく開発・製作された。BESS 測定器と BESS-Polar 測定器の比較を表 1 に示す。

開発にあたっては可能な限り低エネルギーまで反陽子を観測できるように、測定器の物質量を少なくすることに細心の注意が払われた。まずこれまで BESS 測定器全体を包んでいた圧力容器を廃し、容器壁の物質量削減と約 300 kg の重量軽減を実現した。さらに最近開発された微小金属添加による高強度アルミ安定化超伝導線を採用することにより、スペクトロメータの中核をなす超伝導ソレノイドの物質量を半減させることに成功した。加えて低エネルギー領域での粒子識別に専念することにより、飛行時間 (TOF) 測定用シンチレーションカウンタの厚さも 1 cm に半減するなどの努力を行った。また反陽子の粒子識別を補完する閾値型シリカエアロジェルチェレンコフカウンタは測定器の上部物質量を削減するために超伝導ソレノイド下部に据え付け、測定器上部から測定器中央までに入射粒子が通過する物質量をこれまでの BESS 測定器の 9 g/cm^2 から 4.5 g/cm^2 に削減した。さらに BESS 測定器では入射粒子が測定器を上から下まで突き抜けることによって初めてトリガ信号を生成したが、BESS-Polar 測定器では超伝導ソレノイドのボア下部に薄いシンチレーションカウンタを設置することによってトリガに必要な最低物質量を BESS 実験に比べて $1/4$ として、測定器下部でエネルギー損失により止まってしまうような低エネルギー粒子まで観測可能としている (図 2)。

表 1 BESS 測定器と BESS-Polar 測定器の比較

	BESS 測定器 (2000 年)	BESS-Polar 測定器
アクセプタンス	$0.3 \text{ m}^2\text{str}$	$0.3 \text{ m}^2\text{str}$
超伝導ソレノイド中心磁場	1.0 Tesla	0.8 Tesla
超伝導コイル冷媒寿命	5.5 日	> 10 日
測定器重量	2,400 kg	1,900 kg
消費電力	900 W	420 W
電力供給	リチウム一次電池	太陽電池
トリガに必要な最低通過物質量	18 g/cm^2	4.5 g/cm^2
反陽子測定可能運動エネルギー範囲	0.18～4.2 GeV	0.10～4.2 GeV
測定可能最大硬度 (Maximum Detectable Rigidity)	200 GV	240 GV

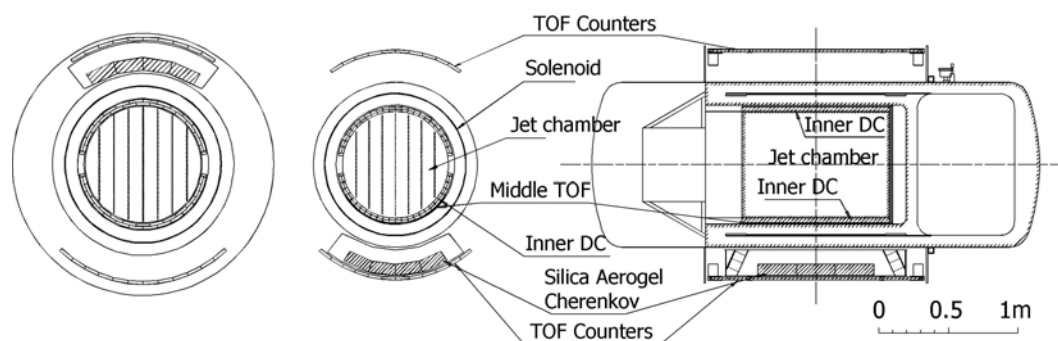


図 2 従来の BESS 測定器 (左) と BESS-Polar 測定器の比較

また長時間気球実験を実現するには、10～20日間安定して測定器に電力を供給し続ける電源システムの開発が不可欠であった。BESS 実験で用いられているリチウム電池 20 日分は重量の観点から到底気球に搭載できない。南極の白夜を利用し充放電システムを用いないシンプルで信頼性のある太陽電池電源システムの開発を進め、最長差渡し 8 m 以上、高さ 2.8 m の変形 8 角錐台形をした大型全方位型太陽電池パネル構造体を BESS-Polar 測定器の下部に吊り下げることとした。

4. 実験準備の経緯

BESS-Polar 実験の準備は 2001 年から進められた。超伝導ソレノイドや粒子検出器の開発・製作と並行して、これまでの BESS 実験での経験のまったくない太陽電池電源システムの技術試験を 2002 年 5 月に実施した。この技術試験において、大面積の太陽電池を保持する構造体を実際に宇宙科学研究所（現 宇宙航空開発研究機構宇宙科学研究所）三陸大気球観測所より気球で打ち上げ、打上げ時や開傘時の衝撃に対する機械的強度を確認し、また部分的に搭載した太陽電池の表面温度、照度、発電量を浮遊高度で測定することにより BESS-Polar 実験での太陽電池システムの基本設計に問題のないことをチェックした。

2003 年の秋には超伝導電磁石、太陽電池パネル等の技術飛行試験が米国ニューメキシコ州フォートサムナーにおいて行われた。この技術試験では気球を運用する米国の国立科学観測気球施設 (NSBF) が供給する通信システムとの整合性や、過去に例を見ない大型ペイロードの磁場環境下での打上げ手順の確認など、測定器側と気球側のインターフェースを中心にチェックが行われた。パラシュートによる測定器回収では、太陽電池構造体が衝撃緩衝材としての役割を果たして、超伝導ソレノイドなどのスペクトロメータ本体に損傷が及ばないことを実証できた。

粒子検出器や電子回路を超伝導ソレノイドの周辺に組み込み、超伝導スペクトロメータとして完成させる作業は、共同研究のメンバーである米国メリーランド州の NASA ゴダード宇宙飛行センターで行われた。測定器を日米間輸送する時間的ロスと、数名の実験メンバーを米国に長期派遣する経費と測定器を日米間往復させる輸送費との差を考慮した結果の決断であったが、NASA という様々なプロセスが「宇宙仕様」で進む世界での作業に戸惑うことも多かった。当初予定に比べ 2 ヶ月ほどの準備の遅れが生じたものの、2004 年 8 月に測定器の組み立てを完了した。さらに米国テキサス州の NSBF 本部にすべての機材を移動させ、超伝導ソレノイドを含むすべての測定器を動作させた状態での噛合せ試験や最終レビューを経て、南極での実験の準備を整えた。

5. 南極での科学観測実施

2004 年 10 月 27 日に、実験メンバーが米国のマクマード基地入りし、マクマード基地近くのウィリアムズフィールドにて準備を開始した。ロス棚氷上に設置された大型テント内での準備中には、夜間空調が故障し零下 16 度まで冷え込む事故や、地吹雪の厳しい自然環境などこれまでの気球実験でも経験したことのない様々な試練もあった。テント内の暖房は零下の外気をボイラで加温して行われているためテント内は常に非常に乾燥した状態で、静電気によるコンピュータや測定器の電子回路の破壊を防ぐことにも常に留意しなければならなかった。約一ヶ月の測定器調整チェックの後の総合試験、気球打上げ装置との最終噛合せ試験を経て 12 月 3 日には観測準備を整えることができた。

一方、NASA の TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) により中継されたペイロードからのデータを受信する NSBF 本部の主制御センター (Primary Operation Control Center : POCC) での準備も 11 月 25 日より始められ、実際に TDRSS を用いたデータやコマンドの送受信のテストや、インターネットを経由したマクマード基地と POCC 間での通信テストなどが実施された。

10 日間の天候待ちの後、現地時間の 12 月 13 日午後 6 時 58 分、快晴、地上風速約 5 ノット (2.6 m/s) の条件で気球の打上げに成功した (写真 1)。打上げ直後より宇宙線の観測を開始したところ、TOF シンチレーションカウンタの光電子増倍管の一部にトラブルが発生した。このトラブルに対してはスペクトロメータのトリガ条件の変更により、低エネルギー反陽子の観測感度を最大限に保つよう調整することによって観測を継続した。その他の測定器要素はほぼ正常に動作し観測は順調に進んだが、南極周回飛行の経過とともに気球の軌道が当初予測よりも高緯度側にずれて南緯 85 度近辺にまで達してしまった (図 3)。



写真 1 BESS-Polar 測定器の打上げ

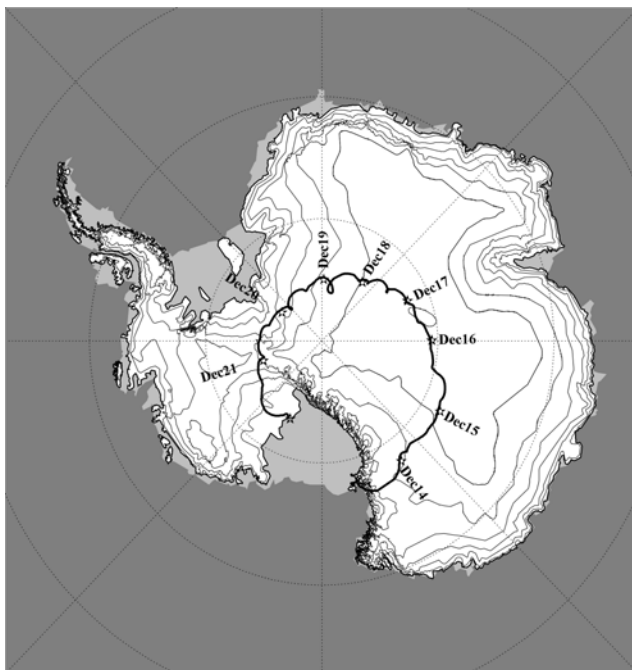


図3 BESS-Polar 航跡図

そのため赤道上空の静止衛星である TDRSS の視野から気球が外れてしまい、地上との通信が不安定になり、時には半日にわたってペイロードの状態をほとんどモニタができなくなるなど、想定を超えた苦労があった。8 日間をすぎた段階で、気球の軌道が南緯 82~83 度まで下がり、回収に適切なロス棚氷への着地が可能となったため、安全かつ確実な回収を優先して科学観測を終了した。通常の気球運用ではペイロード切離し前に着地点付近に航空機を派遣し、航空機からの無線コマンドで気球を切離し、さらに地上風をパラシュートが受けることによってペイロードが氷上を滑走することを防ぐために着地直後にパラシュートをペイロードより分離させる。しかし今回の切り離しでは航空機の手配がつかず、現地時間 22 日午前 11 時 14 分にペイロードは POCC から発せられた衛星経由の無線コマンドにより気球から切り離され、パラシュートにより緩降下し、11 時 56 分に着地した。着地点は、ロス氷棚東端（南緯 83 度 6 分、西経 155 度 35 分）で、マクマード基地から約 870 km 南東であった。幸い今年より実用化された自動パラシュート切り離し装置が正常に作動してパラシュートが切り離され、着地後もペイロードからイリジウム人工衛星経由で送られてきた GPS の座標よりペイロードの静止を確認することができた（写真 2）。

着地点が遠方となったため、回収作業は極めて大掛かりなものとなった。まず、大型輸送機（LC130）でマクマード基地から約 900 km 離れた Siple Dome という米国のリモートキャンプまで移り、そこをベースキャンプとして、小型の Twin Otter 機で約 200 km 離れたペイロード着地点までを往復して回収を図ることになり、BESS 実験グループ

からの 3 名を含む 5 名が雪上での作業を行った。第 1 回のアクセスでは、写真による現状記録、測定器の安全確認後、すぐに最も重要なデータ記録装置の回収を行った。その後、ペイロードを Twin Otter 機に積み込むために、超伝導ソレノイドを 3 分割する（写真 3）などの作業が 5 日間にわたって続けられた。



写真2 着地点でのペイロード



写真3 超伝導ソレノイドの分解

着地点とベースキャンプの間を Twin Otter 機で 7 往復し、すべての測定器要素およびパラシュートを回収することができた。12 月 29 日にはベースキャンプに集結したペイロード部品を輸送機パレットに再梱包し（写真 4）、まとめて LC130 輸送機でマクマード基地まで輸送し回収作業を完了した。この合計 7 日間を要する回収作業の後、マクマード基地での実験機器の返送作業や作業場所の片付けをすませ、1 月 4 日に 2004 年 BESS-Polar 南極周回宇宙線観測実験を終了した。測定器は現在南極より米国に向けて海上輸送中であり、4 月中旬に NASA ゴダード宇宙飛行センターに戻される予定である。



写真4 回収された BESS-Polar 測定器

を含む南極マクマード基地での活動は、米国科学財団 (NSF) によって運営された。

BESS-Polar 実験の推進にあたり、KEK、ISASをはじめとする関係諸機関、そして多くの関係者の皆様に大きなご支援を頂きましたことを、この場をお借りしてお礼申し上げます。

6. 南極での実験を終えて

この実験作業完了後、マクマード基地周辺の天候が悪化し、実験メンバーが南極を離れる飛行機が数日にわたり遅延した。最後の派遣メンバーが帰国するまで10日間を要した。真夏とはいえ改めて南極の自然の厳しさを実感し、同時に BESS-Polar 測定器の気球打ち上げや遠隔地での回収作業の間、天候に恵まれ順調に作業を進められたことを幸運に感じる。

今回の気球実験で収集されたデータサイズは、約2テラバイトとなった。データを記録したハードディスクはマクマード基地での読み出し確認後に複数のバックアップが作成され、日本と米国にそれぞれ空輸された。日本に送られたデータは既に KEK に到着し、データ解析作業が始まっている。

現在、データの一部を詳しく解析し、予想される測定器性能が達成されていることを確認しつつある。これによって解析手法を確立したうえで、全データの解析を進め、年内には、低エネルギー反陽子スペクトルを決定したいと考えている。

BESS-Polar 実験は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA)、東京大学、神戸大学、米国航空宇宙局 (NASA) ゴダード宇宙飛行センター、メリーランド大学の日米共同実験として進められている。本研究は、日本では文部科学省科学研究費補助金 (特別推進研究)、米国では NASA の研究費を得ている。また科学観測気球の打ち上げは米国テキサス州に本部をもつ米国立科学気球研究施設が実施し、気球飛翔