

平成23年3月1日現在

機関番号：82118  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19340070  
 研究課題名(和文) 長時間飛翔観測による一次宇宙線スペクトルの短期過渡変動の研究  
 研究課題名(英文) Study on short term variation of primary cosmic-ray spectrum with long duration balloon flight  
 研究代表者  
 吉村 浩司(YOSHIMURA KOJI)  
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
 研究者番号：50272464

研究成果の概要(和文)：BESS-PolarII 測定器の中で飛跡検出器のガス制御システム、圧力センサーについて改良を施し、2007年12月～2008年1月にかけて、南極周回飛翔実験を実施した。24.5日間の気球飛翔観測により、約47億事象の宇宙線を観測することに成功した。測定器全般の較正を行って宇宙線事象の選別を行い、較正された温度、圧力センサ等のデータを用いて補正を行った後、一次宇宙線(陽子)のスペクトルを求め、短期的な日々のスペクトルの強度変化と太陽風との相関を精度よく求めることができた。

研究成果の概要(英文)：BESS-Polar II experiment was successfully carried out with the improved instruments which enabled precise measurement of daily variation of the primary cosmic-ray spectrum. During 24.5 day scientific observation, about 47 billion cosmic-ray events were observed. After detailed calibration using precise temperature and pressure data, we have obtained the precision proton spectra for the entire flight duration. We have successfully studied daily variation of proton spectrum and investigated its correlation with solar wind.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：BESS-Polar, 南極周回飛翔, 一次宇宙線, 気球実験, 太陽活動, 太陽風, 太陽変調, 短期過渡変動

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙線は太陽圏内で観測されるまでに、太陽風や惑星間磁場により強度およびスペク

トルの変調—太陽変調(Solar Modulation)—を受ける。この太陽変調現象の解明は、太陽圏内での宇宙線伝播の理解に必要なだけでなく、その源である銀河宇宙線の生成、伝播

過程を研究する上でも非常に重要である。これまで、様々な宇宙線観測によ 11 年あるいは 22 年周期を持つ太陽変調が確認されている。

一方で、太陽の自転周期や突発的な太陽の活動（たとえば太陽フレア等）に起因する短期間の変動も観測されているが、これまでの地上および上空での観測では、観測時間、エネルギー範囲、統計量が制限されており、精度のよい観測データは存在しなかった。短時間で高精度な測定を行うことができる BESS-Polar 測定器を改良し、長期間精度のよい観測を行うことができれば、このような短期過渡的な変調現象を精度よく捉えられるというのが、本研究の背景である。

## 2. 研究の目的

本研究では、BESS-Polar II 測定器に改良を施し長時間飛行観測を行うことにより、一次宇宙線（陽子、ヘリウム）の日々単位の時間変動を精度よく測定することを目的とする。これにより、太陽活動の短期過渡的な事象（27 日自転周期、太陽フレア、コロナ質量放出等）による一次宇宙線の変調を精度よくとらえ、宇宙線の太陽変調の理解に対して貴重なデータを提供する。

## 3. 研究の方法

### (1) BESS-PolarII 測定器の改良

- ① 飛跡検出器のガス制御システムの開発  
従来は機械式の安全弁でコントロールを行っていたが、新たにガス制御システムを構築し、ガス流量と圧力をそれぞれコマンドにより独立に制御できるようにした。
- ② 外気圧の精密モニターシステムの開発  
高精度圧力センサーと温度センサーを組み合わせて複数台設置し、実験環境に即した較正をおこなうことにより、残留大気圧を精密に測定できるようにする。

### (2) 南極周回飛行気球実験の実施

上記の改良を行った上で、BESS-Polar 測定器を気球により南極上空を周回飛行させ、約 20 日間のデータを取得する

### (3) 測定器の回収・較正とデータ解析

測定器を回収し、観測実験後の状態を調べ、オンラインで得られたデータと合わせて解析し、測定器の較正を行う。記録された宇宙線観測データを解析し、一次宇宙線スペクトルを精度よく求めて、その時間変動を調べる。同時期に得られた様々な観測データとの比較を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 南極において長時間観測に成功

BESS-PolarII 測定器に、新たに開発した、ガス制御システム、外気圧モニターを搭載した後、2007 年 12 月から 2008 年の 1 月にかけて、南極周回飛行実験 BESS-Polar II を実施した。図 1 に示すように南極の周りを約 1 周半するフライトにおいて 24.5 日間の宇宙線観測を行った。測定器は順調に動作し、約 47 億の宇宙線事象を記録した。前回の極小期の観測（1995, 1997）に比べると、約 20 倍の統計量のデータに相当する。

フライト中の飛行高度と精密気圧計で測定した外気圧を図 2 に示す。一日周期で気球の高度が変動し（34 km ~ 38 km）、それに伴って気圧の変動（4.5 g/cm<sup>2</sup> ~ 8 g/cm<sup>2</sup>）が観測された。

図 3 に太陽活動による黒点数と中性子モニタの推移を示す。BESS-Polar II はほぼ太陽活動の極小期に観測を行ったことがわかる。

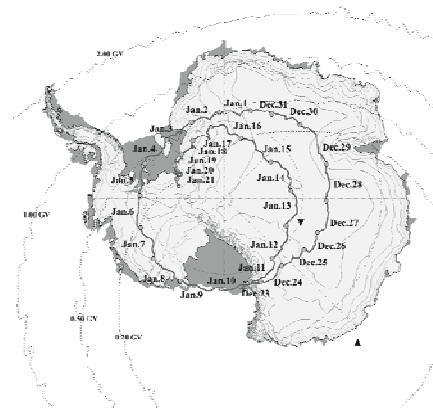


図 1 : BESS-PolarII のフライト経路

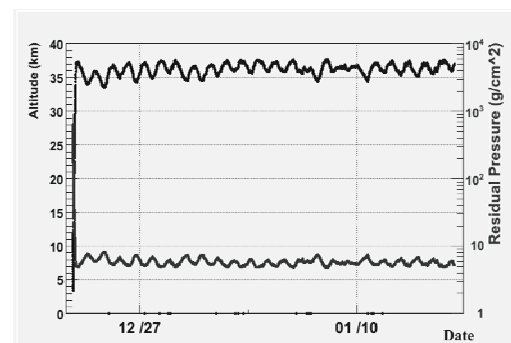


図 2 : BESS-PolarII の飛行高度と気圧

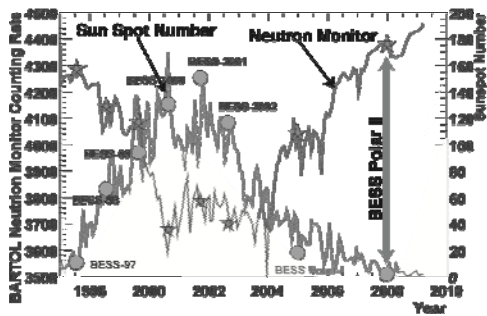


図 3：太陽活動による黒点数と中性子モニタ値の推移。BESS 実験および BESS-Polar 実験でほぼ 1 周期をカバーしている。

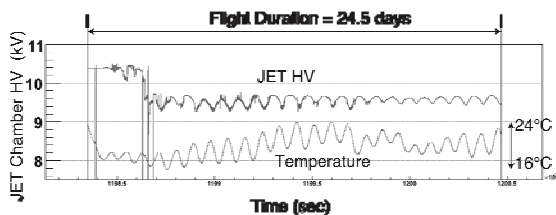


図 4: JET チェンバー高電圧不良問題. 突如として高電圧電源のモニタが不安定になる。温度とともに、高電圧の値が変動を始めた。

## (2) 測定器性能

フライト中は宇宙線データおよびモニタデータを無線で約 10 秒に一回地上に送信し、測定器の状態を常にモニタし、必要に応じてコマンドを送信することにより、測定器の状態を最良に保ち続けた。特に、打ち上げから 2 日後に突如として、中央の飛跡検出器の高電圧が不安定になるという問題が起こったが(図 4)、高電圧下げて運転し、それに伴い、圧力を下げることで対処できたため、データをとり続けることができた。

ハードディスクに記録されたデータは飛翔実験直後に回収され、各測定器の実験中の校正データおよび温度、圧力のモニタデータから測定器の校正を行い、上記の問題にも関わらず、すべての測定器において、期待された性能を発揮していることが確かめられた。

## (3) 測定器の回収とチェック

データハードディスク以外の測定器本体に関しては、着氷地点が基地から離れていたこともあり、すぐに回収することができなかった。その後、2 年の歳月を経て 2009 年 12 月から 2010 年 1 月にかけて、無事すべての測定器を回収することに成功した。回収後、測定器をチェックしたが、上空で起こった飛跡検出器の高電圧異常は再現されず、飛跡検出器本体の異常は認められなかった。現在、引き続き高電圧電源のテストを行っているところである。

その他の測定器もほぼ損傷はなく、輸送の

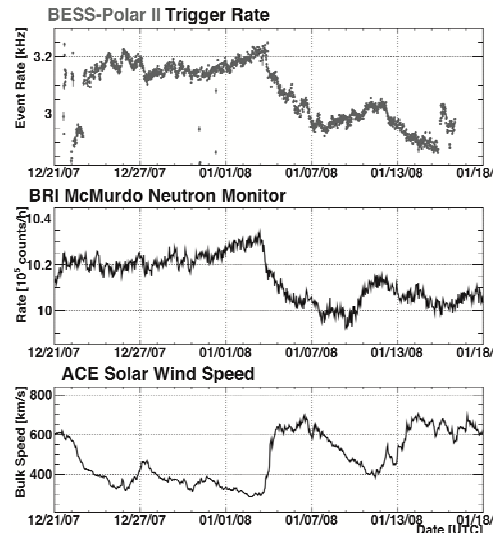


図 5: BESS-Polar II のトリガーレート(上), マクマード基地の中性子モニタ(中), ACE で測定された太陽風速度. 非常によい相関が認められる。

ため分解を余儀なくされた超伝導磁石についても、すでに再組み立てを完了し、定格磁場を発生することを確かめられている。

## (4) 宇宙線トリガーレートと太陽風

飛翔観測実験中、トリガーレート(データ収集レート)が 10% 近く変動していることが、確認された(図 5)。地磁気カットオフ、太陽フレア等の可能性が示唆されたが、南極マクマード基地の地上に設置された中性子モニタと比較したところ、ほぼ同じ構造を持つことが分かった。さらに、ACE 衛星で測定された太陽風の速度との強い負の相関を持つことが分かり、太陽風の速度が宇宙線の流束に強く寄与していることが確認できた。

## (5) 一次宇宙線スペクトルの算出

宇宙線観測データを用いて校正を行った後、記録された宇宙線事象から測定器内で反応を起こしていない事象を選び出した。そのサンプルに対して、横軸に Rigidity (運動量/電荷)、縦軸に  $1/\beta$  (飛行速度の逆数) をプロットしたものを図 6 に示す。各バンドは宇宙線粒子の質量に対応しており、はっきりと識別されているのがわかる。ここで選別した陽子をもとに、観測時間、面積立体角、検出効率、原子核反応確率等を用いて補正し、さらに大気中で生成する陽子事象の寄与を取り除くことにより、大気上空での一次宇宙線スペクトルを得た(図 7)。前回の太陽活動極小期のデータ(BESS97)のデータとほぼ等しく、極大と極小の中間期に観測された BESS-Polar I(2004)の流束より、低エネルギーの流束が高いことが確かめられた。

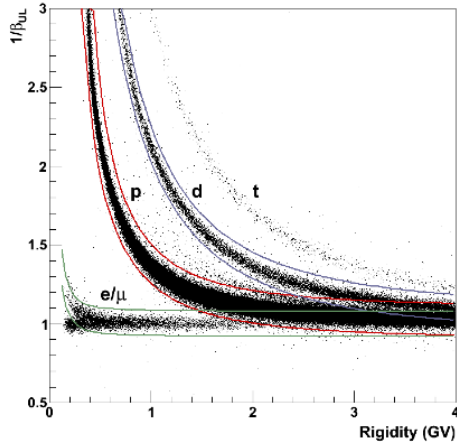


図 6: 観測で得られた粒子の質量による識別

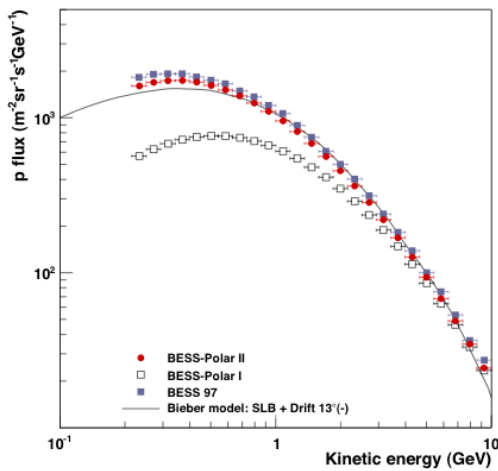


図 7: BESS-Polar II で求めた陽子スペクトル(赤)、BESS97(青)、BESS-Polar (白)

(6) 一次宇宙線スペクトルの日々変化

BESS-PolarII 測定器は、従来の飛翔体測定器と比較して 2 桁以上の面積立体角を持つため、1 日のデータでも十分精密なスペクトルを求めることができる。そこで、全体のデータセットを一日毎に分割し、それぞれに対して求めたスペクトルを全データを使ったスペクトルで割ったものを図 8 に示す。いずれの流束も十分な統計精度を持っていることがわかる。全体にフライトの前半部では徐々に増加し、途中急激に減少し、また増加していく傾向が見られる。増減の振幅は低エネルギーに行くほど大きく、0.5 GeV 付近では ± 7 % に達しているのに対し、10 GeV 以上では ± 2 % 程度である。0.52 GeV, 1.08 GeV, 9.25 GeV の 3 点の流束について、日々変化を表したものを図 9 に示す。3 点ともほぼ同様の形で推移するが、高エネルギーの点ほど、振幅が小さいのがよくわかる。図 5 と比較すると、太陽風の速度が増大する時期と、流束の減少する時期がよく一致している。今後さらに、定量的に変化とその原因を探る予定である。

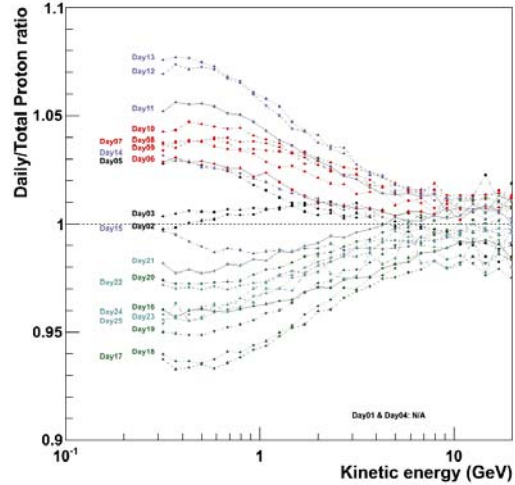


図 8: 陽子スペクトルの日々変化

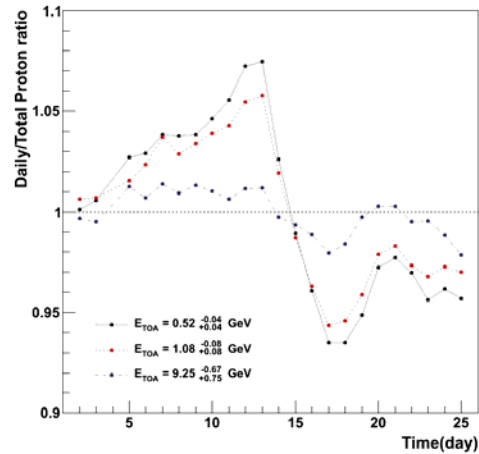


図 9: 特徴的なエネルギーにおける、陽子流束の日々変化

(7) 成果のまとめと今後の展望

本研究では、南極飛翔観測実験 BESS-PolarII を実施して、前回の太陽活動極小期の約 20 倍に及ぶ統計量の宇宙線観測データを得た。本研究で開発した装置を搭載することにより、安定したデータ収集および測定器の精密な較正を行うことに成功した。24.5 日という長期間にわたって、高精度な一次宇宙線のスペクトルを測定したのは、今回が初めてであり、太陽風の速度変化による、陽子スペクトル変化を精度よく捉えることができ、宇宙線流束の太陽変調の理解に対して貴重なデータを得ることができた。今後は、ヘリウムの流束も求めることにより、陽子の受ける変調との違いから、さらに詳しく太陽風の影響を調べて行く予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① 吉村浩司、長谷川雅也、槇田康博、山本明、(30 名、1 番目)、「第 2 回南極周回飛翔宇宙線観測実験: BESS-Polar II 報告」、宇宙航空研究開発機構研究開発報告:大気球研究報告、査読有、JAXA-RR-09-007、2010、31-51
- ② Y. Makida, A. Yamamoto, K. Yoshimura, M. Hasegawa, et al., (19 名、3 番目), “The BESS-Polar Ultra-Thin Superconducting Solenoid Magnet and Its Operational Characteristics During Long-Duration Scientific Ballooning Over Antarctica”, 査読有、IEEE Trans. Applied Superconductivity 19 (2009) 1315-1319.
- ③ K. Yoshimura, M. Hasegawa, Y. Makida, A. Yamamoto, et al., (30 名、1 番目) “BESS-Polar Experiment -Progress and Future Prospect”, 査読有、Proc. Int. Workshop Advances in Cosmic Ray Sci., J. Phys. Soc. Japan 78 (2009) Suppl. A, 29-34.
- ④ K. Yoshimura, M. Hasegawa, Y. Makida, A. Yamamoto et al., (33 名、1 番目) “BESS-Polar experiment: Progress and future prospects”, 査読有、Advances in Space Research 42, (2008), 1664-1669

[学会発表] (計 32 件)

- ① 吉村 浩司: BESS-Polar II 測定器回収ミッション報告 大気球シンポジウム (2010年10月)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
- ② K.Yoshimura: Search for novel origins of cosmic-ray antiprotons and antimatter with BESS-Polar flight over Antarctica.”, 35th ICHEP (July 2010) Paris
- ③ K.Yoshimura: Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS” 38th COSPAR Scientific Assembly (July 2010) Bremen
- ④ 吉村 浩司: BESS 実験による宇宙線反粒子観測とダークマター 日本物理学会 (2009年9月) 甲南大学

[その他]

ホームページ等

<http://bess.kek.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉村 浩司 (YOSHIMURA KOJI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 50272464

### (2) 研究分担者

長谷川 雅也 (HASEGAWA MASAYA)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号: 60435617

山本 明 (YAMAMOTO AKIRA)

高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授

研究者番号: 30113418

槇田 康博 (MAKIDA YASUHIRO)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 30199658