

ポーラー・パトロール気球 (PPB) II. 観測計画

小 玉 正 弘*・福 西 浩**

Polar Patrol Balloon: II. Observation Plan

Masahiro KODAMA* and Hiroshi FUKUNISHI**

Abstract: As described in Part I, from a feasibility study of the Polar Patrol Balloon (PPB) which circles along a selected geographic latitude over Antarctica, it has been concluded that the PPB will be developed in the near future. The application of the PPB system is discussed in this paper. By the PPB experiment many subjects of upper atmosphere physics, meteorology, glaciology, cosmic ray physics and logistics will be solved, the subjects which have not been solved by technique of spacecraft and sounding rocket.

要旨: 南極大陸上の成層圏高度 (−30 km) を任意の緯度線に沿って一周するポーラー・パトロール気球 (PPB: Polar Patrol Balloon) を利用して, どんな観測が可能か, あるいは望ましいかを検討する. 超高層物理, 気象, 雪氷など広い分野にわたって, 人工衛星, ロケットなど他の飛翔体では不可能もしくは非効率のだが, PPB では効率的に実現可能な観測計画について述べる.

1. はじめに

昭和基地における大気球観測は, 1968 年に第 9 次観測隊によって開始されてから第 23 次, 第 24 次観測隊による MAP (中層大気国際観測計画) 観測に至るまでに, B₁ 3 機, B₂ 10 機, B₃ 26 機合計 39 機の打ち上げを実施した. この間, 開始から 10 年目にはいったん将来計画の検討が行われ, 多地点観測, 多目的観測の重要性が指摘された (小玉, 1979). 特に, 1969 年に初めて提唱された南極大陸上の成層圏高度を回遊するポーラー・パトロール気球 (PPB: Polar Patrol Balloon) (小玉, 1969) の計画は, 上記の重要性を満たすばかりでなく, 南半球特有の気象条件を利用した極めて効率良い超高層観測手段であることが認識されてきた. これまで 150–200 mb の上部対流圏での PPB の例は多いが, (たとえば GHOST, 1969; TWERLE TEAM, 1977), 10 mb 以上の成層圏での観測例は皆無である.

成層圏 PPB 計画の実現性を気球工学システムの上から検討した結果, その可能性はかなり高いことが明らかとなった (西村ら, 1984). そこで, このような PPB システムが利用できるとして, 考えられる観測項目, 観測内容を超高層物理以外の分野にも広げて検討してみる. 当然のことながら, 他の観測手段, たとえば人工衛星やロケットによって容易に観測できるような項目はあまり意味がない. PPB でなければ実現不可能か, または極めて非効率

* 山梨医科大学. Yamanashi Medical College, Tamaho, Nakakoma, Yamanashi 409-38.

** 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

な観測を優先的に考えるべきであろう。これらの点について **PPB** 観測ワーキンググループで検討した結果を要約する。

2. PPB 観測の特長

夏季に昭和基地から高度 30 km 以上を浮遊できる **PPB** を打ち上げた場合、期待される飛翔コースはほぼ南緯 70 度線に沿い、約 20 日間で 1 周すると予想される。もしこのような観測条件を有効に生かすことができれば、従来の気球観測におけるような限られた領域での観測から、極域全体をカバーする広域観測へと飛躍させることが可能である。それは図 1 に示すように、互いに異なる緯度地点、たとえば昭和基地、McMurdo, St. Georgia の 3 点からそれぞれ別の **PPB** を飛揚させたとき、それらの飛翔コースは互いに交差することなく南極大陸上の異なる領域をカバーすることになるからである。つまり、**PPB** によって、点から線、線から面への観測が期待できる。もちろん、人工衛星は面探査に威力を発揮するが、大陸上空横断の所要時間がせいぜい 10 数分と短いため、現象の時間変動と空間分布との分離がむずかしい。気球の浮遊速度は早くても毎時 100 km までで、早い時間変動現象に対しては固定点観測と見なせる。したがって一つの周回コース上に複数個の、または、異なるコース上に同時に複数の **PPB** を飛ばせば広領域多地点同時観測が容易に実施できることになる。しかも **PPB** システムの最大の利点は、探査ルートが人工衛星のような一方通行の直線コースでなく、南極点を中心とする円軌道である点である。このことは、低緯度側と高緯度

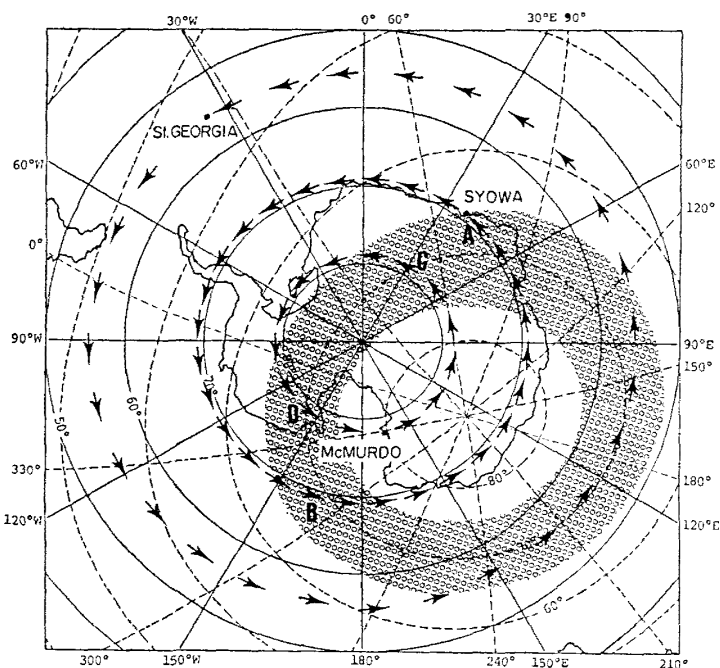


図 1 PPB の予想航跡 (矢印) とオーロラ帯 (ハッチ部)

Fig. 1. Predicted flight trajectories of polar patrol balloons launched from St. Georgia, Syowa and McMurdo Stations in the austral summer. The hatched area shows the auroral zone. Geographic and geomagnetic coordinates are illustrated by solid and dashed lines, respectively.

側、夜側と昼側との同時比較観測を可能にする。以上の特長は南極地域とそこで起こっている自然現象の観測に広く利用できると考えられるので、以下各研究部門別に観測目的と観測内容について述べる。

3. PPB 観測の目的と内容

PPB 観測の目的は大きく次の 5 部門に分けて考えることができる。

3.1. 気象部門

極域成層圏の大気は、中低緯度帯との大気大循環や夏季、冬季の太陽日射量変化によって、

- a) 風系,
- b) 大気組成,

が激しく変化している。たとえば成層圏の突然昇温などは a) の代表的な現象である。これら大気の風系（輸送過程）の解明は、PPB のような全地球的規模の観測網によって初めて可能となる。具体的には、たとえ気象用測器を一切搭載しなくても、PPB の飛揚航跡そのものが、上空の風向、風速を反映し大気大循環を調べる上で貴重なデータとなる。南極大陸上の 150 mb 等圧面高度、風向、風速のマップは TWERLE グループによって作られているので (TWERLE TEAM, 1977; LEVANON and JULIAN, 1980), 10 mb 高度での同種マップは大気輸送の三次元解析に役立つ。

さらにトレーサーとしてのオゾン (O_3) の観測も有効である。また、極地方ではオーロラ粒子によるイオン化のため、 NO_x , HO_x などの生成が大きいので、これら大気組成や粒子線電離度などの多地点同時観測の意義は大きい。もう一つの問題は、

- c) 大気エネルギー収支

で、その実態を調べるためには上向き、下向きの日射量や赤外放射量の観測が必要である。特に南極では雪面からのアルベドの果たす役割が重要と思われる。

3.2. 超高層物理部門

極域における様々な超高層物理現象は、全地球的な規模で起こるオーロラエネルギーの流入によって引き起こされる。その際、太陽風、地球磁気圏、地球電離圏の 3 者間の相互作用が複雑にからみあい、たとえば夜側と昼側、午前側と午後側とでは異なった発達過程を示す。また、時間的にも一般に激しい変動を示す。したがって局所的な観測よりも、極域全体をグローバルに高時間分解能で捕える観測がより重要になってくる。

オーロラエネルギーは次の 2 つの形態で電離圏に流入する。

- a) 高度 100–130 km 付近の電離圏を流れるオーロラジェット電流によるジュール熱,
- b) オーロラ粒子（電子や陽子）の降下.

前者の機構解明のためには電場や磁場、後者のためには制動 X 線、VLF 帯自然電波などの観測が直接の物理情報として役立つ。極域電離大気の運動を引き起こす電離圏電場は、主に磁気圏電場を反映しているが、電離圏の電気伝導度の非一様性によって生じる偏極電場も加わっており、この電場が逆に磁気圏プラズマの運動にも影響を与えている。この磁気圏と電離圏の結合機構、およびオーロラジェット電流が極域電離大気に与える影響の解明はグローバルな観測によって初めて可能となる。オーロラ粒子の観測は、オーロラ粒子生成機構の解明に重要であるばかりでなく、波動粒子相互作用を通しての自然電波の発生、伝搬機構解明にも重要である。今後の研究では、電場やオーロラ降下粒子のグローバルなパターンが時々刻々変化していく様子を知ることにより新しい意味があり、PPB 観測の主目的もそこに置かれるべきであろう。一例として図 2 に気球による長時間電場観測をもとにして、磁気圏内の対流の様子を示す。このような対流パターンの時々刻々の変化を追跡することは、オーロラ粒子の降り込み領域とも関連し、オーロラ粒子生成機構の研究に重要な情報を提供してくれるであろう。実際には、図 1 に示した一つの予想軌道上に二つの PPB を、昭和基地および McMurdo 基地からそれぞれ打ち上げれば、ある瞬間には図の A, B, C, D 4 点に同時観測

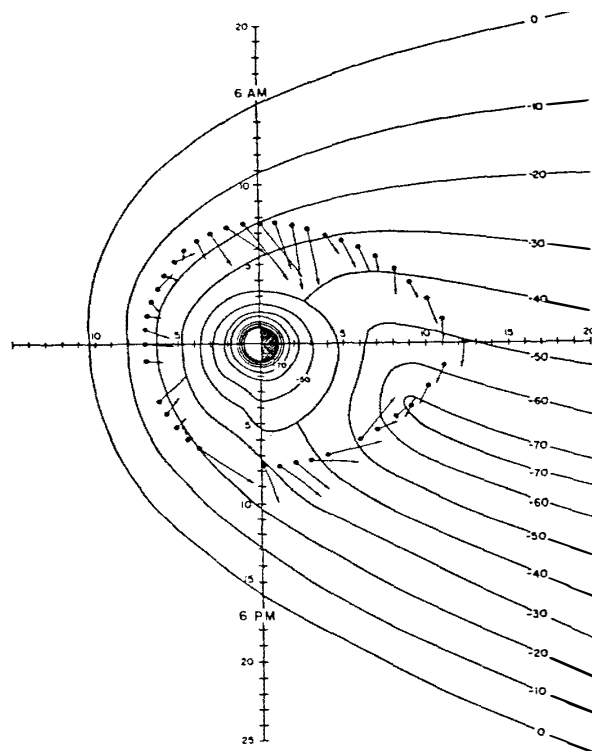


図 2 電場観測から求めた赤道面上に投影した等電位線分布図。単位は kV。地球の電位は約 -110 kV (MOZER and SERLIN, 1969)

Fig. 2. Contour map of the electric potential projected on the equatorial plane in the magnetosphere. The electric potential is estimated from electric field measurement on board the balloon. The unit of the electric potential is kV. The electric potential on the earth's surface is about -110 kV (MOZER and SERLIN, 1969).

網を張ることができる。これらはオーロラ現象の地方時依存や経度方向ドリフトに関するデータを提供する。そして PPB が移動した次の時点では緯度方向の情報を与えることになる。

3.3. 雪氷部門

PPB による上空からの地上探査という手法を利用した場合、雪氷学上興味ある問題としては、

- a) 大陸氷床表面高度地形図の作成と表面高度の変動,
- b) 氷厚、表面起伏の測定,

があげられる。a) についてはすでに 150 mb 高度浮遊の PPB に搭載された電波高度計による探査が行われ、南極大陸全体にわたる氷床表面等高線図が発表されている (図 3, LEVANON, 1982)。その地形図の精度は ± 60 m である。Glaciology の観点からすれば、氷床の表面地形は氷床の質量収支、動力学および氷床の気候との応答などの問題を論ずる際に必要な基本情報であり、できるかぎり高度と位置に関して精度の良い測定が望まれる。もし PPB によって $\pm 1-10$ m の精度で作図が可能となれば、画期的な測定技術となるだろう。b) も氷床動力学の研究にとって欠かせない基本情報で、現在では航空機による試験的な測定が試みられている。a), b) とともに人工衛星による探査法が開発中であるが、PPB 法ではより精度が高く、より安価にできる利点がある。また、PPB 法ではある限られた地域を重点的に調べることも容易で、たとえば昭和基地とセールロンダーネ山地間にまたがる約 1000 km の氷床表面の状

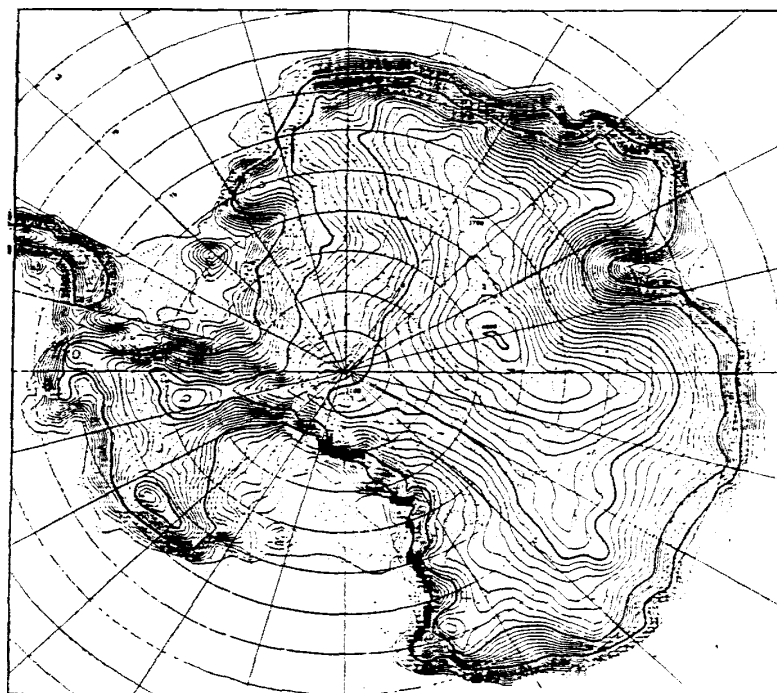


図 3 南極大陸上氷床表面の等高線分布図 (LEVANON, 1982)
Fig. 3. Contour lines of the ice surface of the Antarctic Continent (LEVANON, 1982).

態をテレビカメラ方式で観測すれば、危険を伴いやすい地上調査旅行や航空機調査の負担を大きく軽減することができよう。今後は“気球測量”が航空測量や衛星測量とともにもっと真剣に考えられてよいと思われる。

3.4. 宇宙物理部門

PPB では起長時間観測*が期待できることから、発生頻度が稀な現象、

a) 宇宙ガンマ線バースト

の観測がねらえる。ガンマ線バーストは、1光子あたりのエネルギーが極めて高い過渡的な現象で、その発生源、スペクトルなどまだほとんどわかっていない状況である。発生頻度は 10^{-4} erg/cm² 程度の強さのもので、月に数回と非常に低いので、少しでも観測例を増やしてその方向性、エネルギースペクトルに関する情報を蓄積していく必要がある。1回のバースト継続時間も数10秒と短いので、この目的だけの測定器をPPBに搭載することはあまり得策ではない。しかし幸いなことに、測定器はオーロラX線検出器と共用できるので、オーロラが出現しない時期にはこのガンマ線バーストが観測対象となる。

次に、もともと高緯度帯にしか入射できない低エネルギー宇宙線粒子については、

b) 宇宙線同位体分離

の実験を効果的に行うことができる。Be, Al, Feなどの同位体の存在比は、宇宙線粒子の組成からその起源まで、さらには宇宙空間物質の組成、分布についての情報を与えてくれる。外国での実験によれば、1 cm² str の装置で数年の観測を必要としたが、PPB に搭載可能な数10 cm² str 程度の検出器ならば、ほぼ1カ月で一応のデータを得ることができると予想される。

3.5. その他

通信手段の一つとしての利用方法が考えられる。PPBに無線中継機を搭載すれば、地上の無人観測所からのデータ電送や旅行隊との通信連絡に利用できるであろう。

4. PPB 観測と国際協力

PPBはその性質上南極大陸全体にかかわる情報提供を主目的としているので、南極に観測基地をもつ各国にとっても極めて大きい関心事であるに相違ない。3.2. で述べたように、超高層物理の分野では、昭和基地だけからのPPBでは物足りなく、同時に外国基地からのPPB観測が切望される。それには外国隊との協力体制が必要で、これは学問的見地からは勿論だが、テレメトリーの上からも利するところは大きい。なぜなら、一つの予想軌道上に周回するPPBの数が多ければ多いほど、より充実した観測網になるので、気球追跡、データ電送の各国分担がいずれは必要となってくると考えられるからである。より充実したPPBプロ

* TWERLE 実験では1年以上の飛翔例が報告されている

ジェクト遂行のためには国際協力体制の確立が必要と考えられる。

5. おわりに

以上、現段階で考えられている **PPB** 観測計画の概要を紹介した。さらに詳しい具体的検討はこれから必要であろうし、また、これ以外にも **PPB** の特長をうまく生かした観測があるかもしれない。いずれにしても、当初は簡単な方法や測定器でテスト飛行を重ね、順次本格化していくべきであろう。その過程において、まったく予期していなかったような新しい効用が発見されることも期待される。

謝 辞

ポーラー・パトロール気球計画は、昭和 59 年度より国立極地研究所の開発計画として認められ、現在国立極地研究所宙空専門委員会気球分科会の中に、気球システムと観測に関する2つの作業部会が設置され、検討を進めている。本論文は観測作業部会での検討結果に基づいた報告である。ここで、作業部会のメンバーである宇宙科学研究所の鶴田浩一郎氏、名古屋大学空電研究所の鎌田哲夫氏、東京大学の国分 征氏、気象庁気象研究所の嘉納宗靖氏、村松久史氏、国立極地研究所の川口貞男氏、山岸久雄氏、宮岡 宏氏、神沢 博氏、西尾文彦氏に心から謝意を表する。

文 献

- GHOST (1969): A technical summary. Natl Cent. Atoms. Res., Boulder, U.S.A.
小玉正弘 (1969): 昭和基地におけるバルーンプロジェクト. 極地, **9**, 26-30.
小玉正弘 (1979): バルーンの将来計画. 南極資料, **65**, 113-118.
LEVANON, N. (1982): Antarctic ice elevation maps from balloon altimetry. Ann. Glaciol., **3**, 184-188.
LEVANON, N. and JULIAN, P. R. (1980): Antarctic 150 mb pressure maps from TWERLE and radiosondes (November 1975-March 1976). Month. Weather Rev., **108**, 520-526.
MOZER, F.S. and SERLIN, R. (1969): Magnetospheric electric field measurements with balloons. J. Geophys. Res., **74**, 4739-4754.
西村 純・小玉正弘・鶴田浩一郎・福西 浩 (1984): ポーラー・パトロール気球 (PPB). I. 気球システム. 南極資料, **82**, 71-78.
TWERLE TEAM (1977): The TWERLE experiment. Bull. Am. Meteorol. Soc., **58**, 936-948.

(1984年5月10日受理)