

プロトン磁力計を用いた南極周回気球 (PPB) による磁場測定実験

遠山 文雄^{*1}・藤井 良一^{*2}・江尻 全機^{*3}
国分 征^{*4}・秋山 弘光^{*5}・矢島 信之^{*5}

Measurement of the magnetic field by using a proton precession magnetometer in Polar Patrol Ballon (PPB) Experiment

By

Fumio TOHYAMA, Ryoichi FUJII, Masaki EJIRI,
Susumu KOKUBUN, Hiromitsu AKIYAMA and Nobuyuki YAJIMA

Abstract: Balloon experiment having a circumpolar trajectory in the Antarctica that is called the Polar Patrol Balloon (PPB) have been projected by National Institute of Polar Research (NIPR), Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) and collaborative scientists. Two scientific PPBs were launched at Syowa Station, Antarctica by the 32nd and 31st Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-32 and JARE-31) in December 1990 and in January 1991.

Proton precession magnetometers (proton magnetometers) to measure geomagnetic field were carried with the purpose of research for the underground magnetic structure by magnetic anomalies and geomagnetic variation like a pulsation. New proton magnetometer system was developed that had a wide dynamical range and an automatic tuning system for PPB observation. Total intensity of the geomagnetic field were obtained by the ARGOS data transmission system every 30 seconds with an accuracy of 1 nT during the flight of 22 days. The first balloon (PPB-1) had a perfect circumpolar trajectory and passed through the center of the Magnetic South

^{*1} 東海大学工学部

^{*2} 名古屋大学太陽地球環境研究所

^{*3} 国立極地研究所

^{*4} 東京大学理学部

^{*5} 宇宙科学研究所

Pole. We describe the new proton magnetometer system, preliminary results and future plan of magnetometry for PPB in this paper.

概 要

安定した風の期間に打ち上げた気球が2～3週間で南極大陸を一周出来ることを利用した観測気球は南極周回気球（PPB）と名づけられ、打ち上げ実験が極地研究所（NIPR）、宇宙科学研究所（ISAS）および共同研究者によって計画されてきた¹⁾²⁾。1987年に第28次南極観測隊は2機のPPBを試験的に打ち上げ、技術的および気象学的データを得ることが出来た³⁾。1990年には第30次南極観測隊による長期間の気球実験を行い、ほぼ一周の飛行を行った⁴⁾。第32・31次南極観測隊では1990年12月から1991年にかけて3機のPPBによる科学観測実験が行われた⁵⁾。そのうちの2機のPPBにプロトン磁力計を搭載し、磁場の全磁力を高精度測定して磁気異常から地下の電磁氣的構造の推定や磁気脈動などの磁場変動を検出する観測が実施された⁶⁾。第1号機（PPB-1）は昭和基地から1990年12月25日に打ち上げられ、南磁極の中央を通過して南極大陸を完全に周回した。PPB-1、2号機とも30秒毎の磁場の全磁力を1 nTの感度でそれぞれ22日間の観測を行った。搭載されたプロトン磁力計は40,000～70,000 nTの広い測定磁場範囲を持ち、自動的にチューニングする新しいタイプのものが開発された。磁場データは気球位置や高度の情報とともに衛星を介したアルゴス・システムで取得され、磁気異常や磁気脈動などの変動現象を検出した。本論文では磁力計システム、結果速報および磁場測定の将来計画について述べる。

重要語 プロトン磁力計、磁場測定、気球測定、磁気異常、南極磁場

1. 磁場測定器概要

プロトン磁力計は磁場の大きさ（全磁力）を測定するもので、これまで大気球に搭載されて地下の磁気異常の観測を行ってきた⁷⁾⁸⁾、測定原理が外部磁場に比例した周波数の計測であるため、全磁力の絶対値測定が可能で測定精度は0.1 nT以下の高感度を持ち、しかも飛行中の揺れや回転、振動に左右されずに測定できるという、フラックスゲート磁力計にない利点を持っている。しかし、周波数の高精度計測のためにフィルターの帯域幅の制限により、磁場に換算して約2,000 nT程度の測定範囲が限界であった。従来のプロトン磁力計による気球実験は1～2日間の観測時間で、気球の移動距離も500 km程度であったので全磁力変動は2,000 nT以内なので通常のプロトン磁力計で観測ができた。しかし、南極周回気球実験では20日間で20,000 km近くの距離を移動し、磁場の変動量は32,000 nTにも及ぶと予想される。このため、PPB搭載用の広範囲な測定範囲を持つプロトン磁力計の開発を行った⁹⁾。

プロトン磁力計の測定原理から連続的計測は出来ず、センサーへの電流励磁による周期的な計測であり、測定周期は一般に10秒以上が必要である。測定計測部はマルチ・チャンネルの測定帯域フィルターを持ち、高速で自動チューニングする計測システムを開発し、広範囲な磁場検出を可能にした。気球は昭和基地からほぼ南極大陸沿岸に沿って飛行すると仮定した磁場範囲40,000~70,000 nT を20ステップのレンジに分け、計測周波数がどのレンジになるかの判断は信号強度のS/N比で自動判別し、チューニングする。一度磁場信号があるレンジ内に入れば、気球の移動距離による磁場変動は小さいから、気球の打ち上げ直後や急上昇、急下降の時を除けばチューニング・サーチはほとんど不要である。

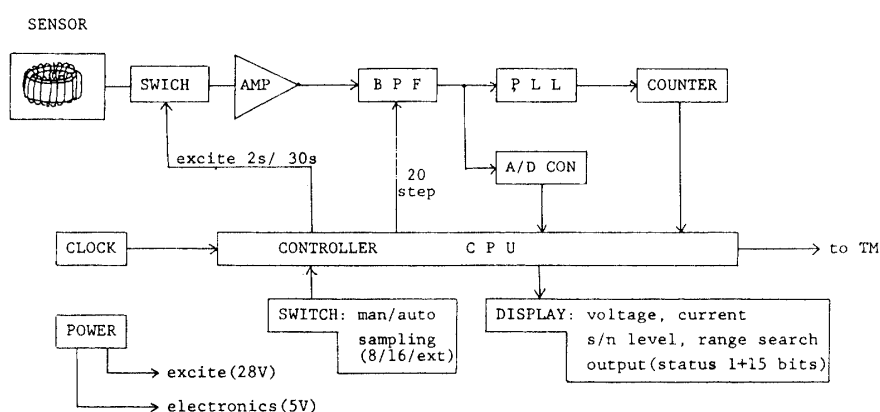


図1 PPB搭載プロトン磁力計電気部構成。

図1はプロトン磁力計の構成図を示す。センサーはコアに約1,000ターンのコイルを巻いたものをケロシンの溶液に浸してあり、コイルの発熱に伴う内部可圧による破裂を避けるために減圧弁を取りつけた。コイルはリングコアであるので磁場検出の方向性はなく、どのようなセンサー姿勢やゴンドラの揺れがあっても検出可能である。電源は28 V、90 AHの容量を持つリチウム電池を使用し、コイルへの電流は2.8 Aで2秒間通電して励磁する。励磁は32秒毎であるが、地上試験のために励磁の自動/手動の切り換えおよび測定周期を8秒/16秒/外部同期の選択が可能にしてある。外部磁界に比例した周波数は増幅され、20チャンネルのバンドパス・フィルターから成るマルチ・レンジのどこに相当するかを高速にサーチする。レンジのサーチには何回かの励磁を必要とするので、サーチ時には励磁周期を自動的に短縮するシステムを取り入れた。フィルターからの出力はA/D変換されてCPUに送られ、信号レベルとしてそのレンジに入っているか否かの判定をする。信号であれば周波数は256倍に通倍されてカウンタで計測され、信号レベルが設定値の10%以下であれば直ちにレンジアップして再励磁される。測定された信号は周波数を磁場量に換算して16ビットのバイナリコードでテレメータへ出力されると同時に地上試験用として液晶表示部に全磁力値、サーチ中か測定中かの判別、電源電圧値、励磁電流値、S/Nレベルが表示される。出力は16ビットのうち、1ビットはサーチか否かの表示に使い、15ビットを磁場量として出力する。観測期間を21日間としたので大きな電源重量が占めている。表1にPPBに搭載したプロトン磁力計の主な仕様を示す。

表1 PPB-1, 2号機搭載用プロトン磁力計の主な仕様

MEASURING RANGE	40,000—70,000 nT
RESOLUTION	1 nT
SAMPLING PERIOD	32 sec
EXCITING POWER	28V × 2.8A × 2 sec
POWER SUPPLY	28V × 90AH (22 days)
OUTPUT FORMAT	digital 16 bits
SIZE	
ELECTRONICS	180 × 300 × 150 mm ³
SENSOR	140φ × 150 mm ³
BATTERY	170 × 310 × 150 mm ³
WEIGHT	
ELECTRONICS	6.0 kg
SENSOR	4.5 kg
BATTERY	7.5 kg

プロトン磁力計の地上試験は気象庁柿岡地磁気観測所のヘルムホルツ・コイル施設を借用して出力値較正、感度較正、ロング・ランニング試験などを行い、周囲磁界変動によるレンジ自動切り換え、雑音特性、感度特性などが正常であることを確認した。さらに、宇宙科学研究所において、気球予定高度の30 km に相当する5～7 mmHgの気圧に減圧されたチェンバー内での真空試験を10時間行い、動作確認およびセンサーの励磁に伴う発熱でセンサー温度がどの程度上昇するかを測定した。その結果、センサーの2ヶ所の温度は大きな差異は

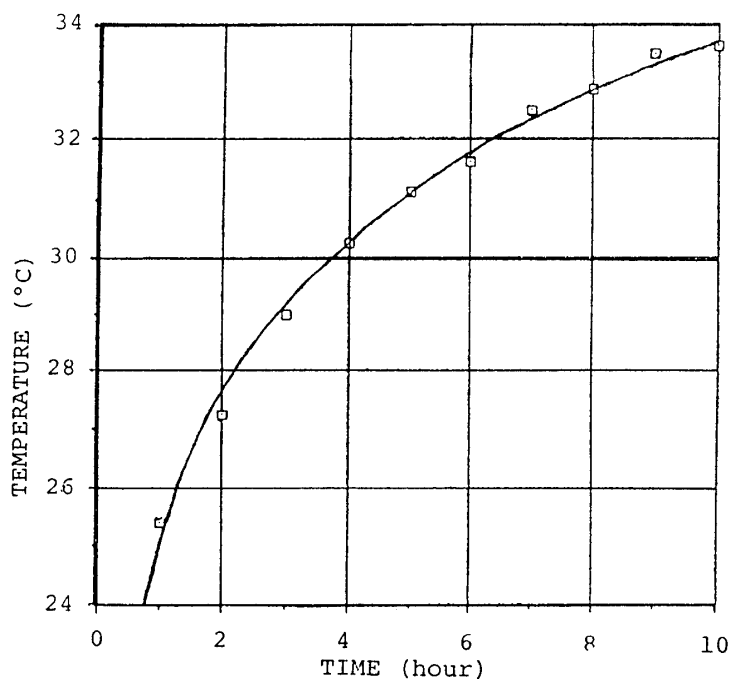


図2 プロトン磁力計センサーの真空試験での温度上昇性、近似値曲線によると500時間で約 $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ に飽和すると予想される。

表 2 PPB-1, 2 号機の気球に関する特性

	PPB-1	PPB-2
Balloon		
Capacity (m ²)	25,000	32,000
Length (m)	57	62
Diameter (m)	39	43
Floating Power (kg)	414.6	518.0
Weight (kg)		
Total	373.5	471.0
Balloon	107.5	127.5
Ballast	152.0	152.0
Instruments	114.0	191.5
Scientific	Magnetic Field	Magnetic Field
Measurment		Electric Field
		Aororal X-Ray
Lanching		
Date	25, Dec., 1990	5, Jan., 1991
Time	08 : 25 UT	18 : 55 UT
Flight		
Altitude (km)	32-25	28-10
Period (day)	33	35

なく、20日間のPPB観測を行った場合の予想されるセンサー温度は25℃の温室から48～51℃まで上昇し、飽和することが推定された。この上昇温度はセンサーの破裂に至らないと判断できた。図2に常温での真空試験によるセンサー温度の上昇を示す。また、低温試験は-20℃の温度で約16時間をかけて連続動作試験を行い、磁力計の出力信号の動作を監視し、正常であることを確認した。この結果からセンサー部の温度対策を検討し、センサー保温カバーを取りつけた。

2. 気球構成と打ち上げ

気球仕様、観測機器、バラスト重量などを表2に示す¹⁰⁾。図3にPPB-1号機の気球構成およびデータ伝送図を示す。観測器はプロトン磁力計だけが搭載され、磁力計センサーはゴンドラからの磁気的影響を除去する目的で15 m 下方に吊るされている。基本計器として、温度計、バラスト、気圧高度計、コマンド、テレメータ、データレコーダ、CPU、アルゴス送信機などが搭載された。データはアルゴス衛星 (NOAA) に伝送されて気球位置情報とともにフランスのアルゴス・センターに降ろされ、集積されて極地研究所へ磁気テープで郵送された。また、昭和基地でテレックスを介してデータの内容をチェックすることも出来る。テレメータ・データの取得やコマンドは昭和基地の可視範囲で可能である。図4にPPB-2号機の気球構成を示す。2号機には観測機器としてプロトン磁力計のほかに電場測定器とオーロラX線測定器が搭載された。気球の真下には巻き下げ器、カッター、スピン・モーターが取り付けられている。

図5にPPB-1, 2号機の飛行航跡および地球磁場による全磁力の理論値の等強度線を示す。PPB-1号機は1990年12月25日08時25分 (UT) に昭和基地 (地理緯度96.0°S, 地理経度

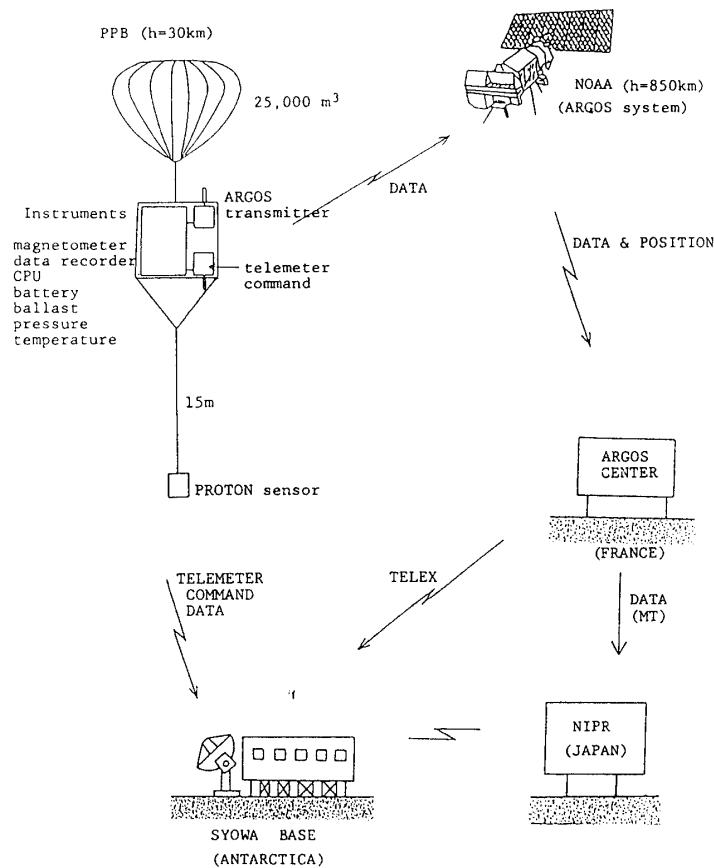


図3 PPB-1号機の気球構成とデータ伝送系。

39.6°E, 磁気緯度70.0°S, 磁気経度79.4°E) から放球され, 内陸部を横切って外洋に出て1月1日頃からはほぼ南緯64度に沿って周回し, 1月8日に昭和基地に最接近して完全周回を果たした。この間, 気球は1月3日~4日にかけて磁気南極の中央を横断し, 貴重なデータを得ることができた。一方, PPB-2号機は1991年1月5日18時55分 (UT) に放球され, 西経100度付近で高度が低下し気球の移動がほとんど停止した。しかし高度15~25 km での22日間の磁場データが得られた。

3. データ解析

PPB を利用して極域の磁場観測を行う主な目的は, 以下のような項目である。

- (1) 広範囲な極域の全磁力の測定データを蓄積すること。
- (2) 磁気ポテンシャルによる理論磁場モデルによる値と測定値との比較。
- (3) 磁気異常の検出と地下構造モデルの推算。
- (4) 磁気脈動などの磁場変動や磁南極周辺の局地的磁気変動現象の検出。
- (5) 新しい磁力計の評価, 改良および磁場データ解析法の開発。

図6にデータ解析の手順を示す。磁場データ, 気圧データは30秒毎に時刻カウンターと共に得られるが, 時系列変換と重複データの編集を行う。2機のデータはそれぞれ22日分, 約

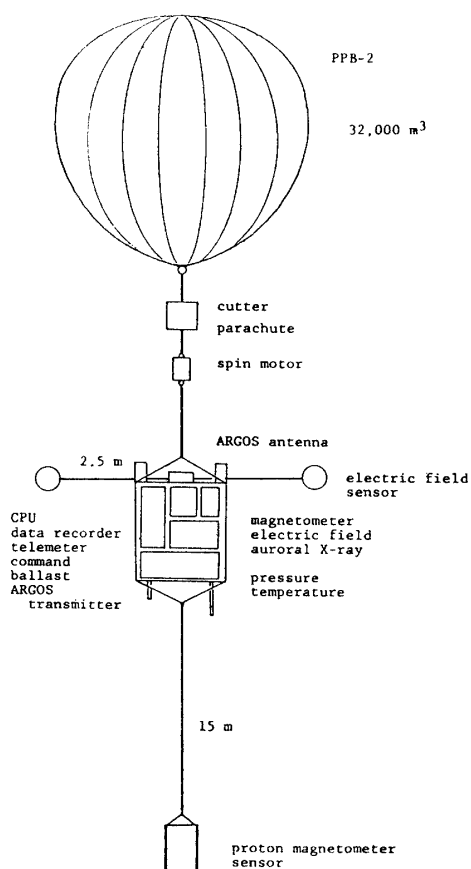


図1 PPB-2号機の気球構成.

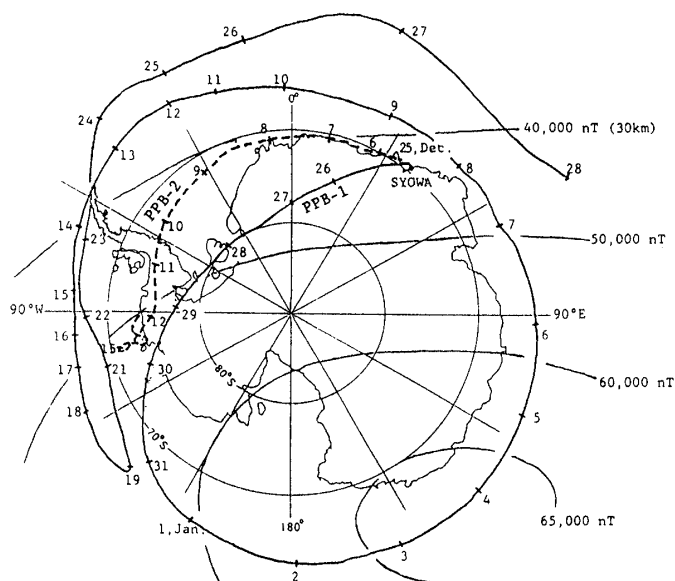


図5 PPB-1 (実線), 2号機 (点線) の飛行航跡と磁場の全磁力値 (計算値). 1号機は磁南極の中央を横切って完全周回した.

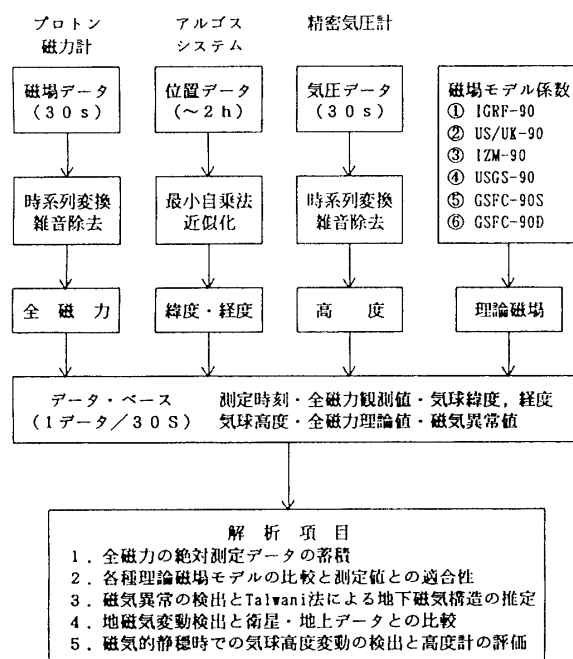


図6 磁場データ解析法の手順.

12万点の位置での磁場，気球位置，時刻の大量の情報である．しかも衛星へのデータ・リンクのために同じデータ・ブロックの繰り返し送信を行い，またテレメータ・チャンネル数が20にも及んだため，フレームカウンタを基準にして時系列に並び変え，重複データの編集，雑音除去，気球位置の近似による内挿によるデータ・ベースの作成を行った．図7にデータ・ベースの一例を示す．データのすべての値の他に1日毎に気球高度，気球位置（緯度，経度）を示す図と全磁力の観測値，IGRFによる理論値，磁気異常値を示す図の2枚が詳細な解析のモニターとして利用される．

アルゴスシステムによる気球の緯度，経度の位置決定は30分～4時間に1回の頻度でしか得られないので，30秒毎の磁力計データに対応させるため最小二乗法による近似を行った．経度は最大約0.05度（距離にして2 km），緯度は約0.02度（距離にして2.5 km）以内で近似が良く合う，これらの水平距離の位置誤差による磁場の絶対値としてのずれは約10 nT以下である．

位置情報は球関数展開による磁気ポテンシャルからの理論磁場計算に使用される．理論磁場モデルは，1990年元期の提案されたモデル係数を5種類と国際標準磁場（IGRF）モデルを使用する¹¹⁾．提案モデルによる係数は，US/UK（英国地質調査所・米国海軍海洋センター），IZM（ソビエト科学アカデミー），USGS（米国地質調査所），GSFC（ゴダード・スペース・フライトセンター）による2つのモデルの計5種類である^{12) 13) 14) 15)}．観測値と理論値との差は磁気異常と呼ばれ，6種類のモデルによる磁気異常を算出して位置や高度の違いによる比較検討を行う．また，気球の高度は精密気圧計から高度変換しているが，100 mの高度差は全磁力の値として約3 nTの変動を示すから，全磁力の変化が気球の高度変動によるものか，雑音なのかの判定が可能である．磁気異常から地下の磁氣的構造すなわち地

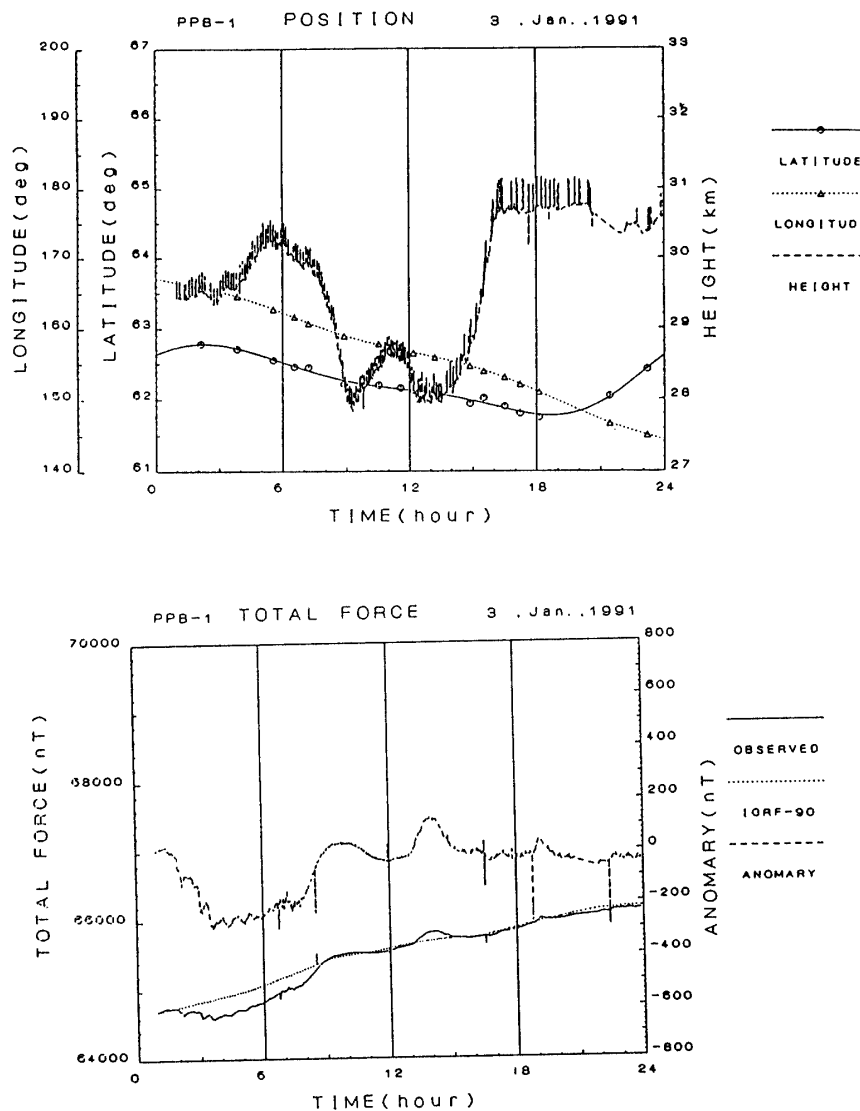


図7 データ・ベースによる1日毎の作図例. 気球位置(上)および磁気異常値(下)をもとにして詳細なデータ解析を行うクイック・ルックとして利用する.

殻の透磁率, 帯磁体の寸法, 地表からの深さを推定することが出来る. 気球航跡が一断面であるので, 地殻構造を無限長とした二次元的帯磁体を推定する Talwani 法を用いる¹⁶⁾.

4. 解析結果

図8はPPB-1号機が打ち上げから南極大陸を一周した14日間に得られた磁場の全磁力測定値と気球高度を示す. また, 1月3日~4日にかけて磁南極中央を横切ったが, その期間の全磁力を図9に示す. 気球高度は31~28 kmの間を上下しており, 28 kmにセットされたオートバラスト装置が作動していることがわかる. 高度データにはひげのような約200 mの上下変化が頻繁にのっており, もし気球の高度変動であれば約6 nTの磁場変動が対応しているはずであるが, その変化が見られないので気圧計データの雑音であると判断できる. 全

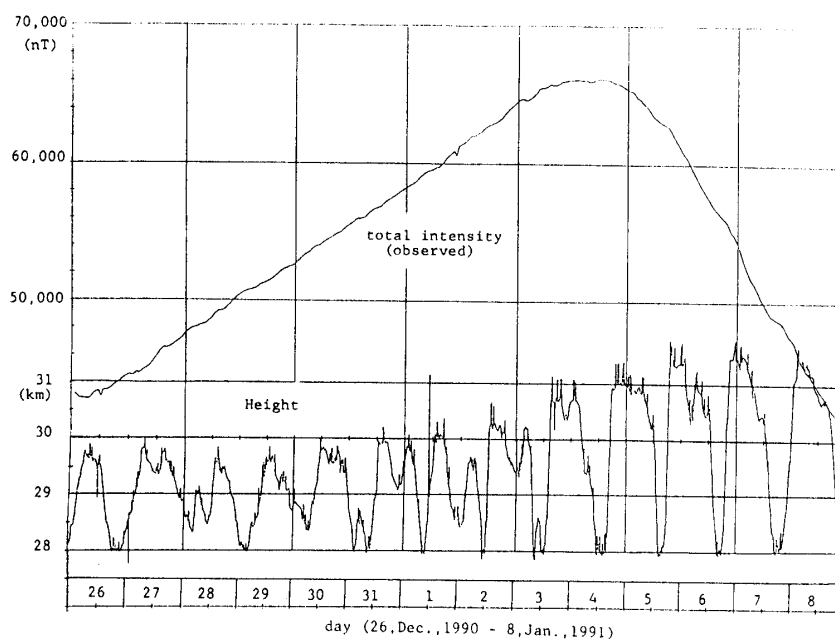


図8 PPB-1号機の打ち上げから一周までの全磁力値（上）と気球高度（下）の変化。気球高度が28kmでオートバラスト・システムによる上昇を示している。

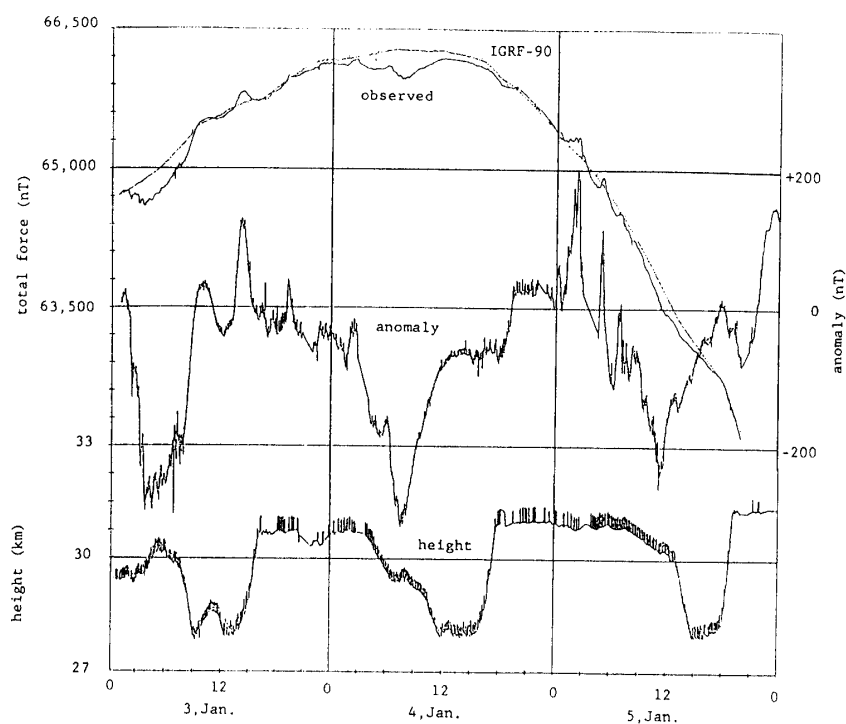


図9 磁南極付近での全磁力測定値，理論値，磁気異常値，気球高度，長時間の変動は地下構造による異常で，短時間の変動は脈動などの磁氣的現象である。

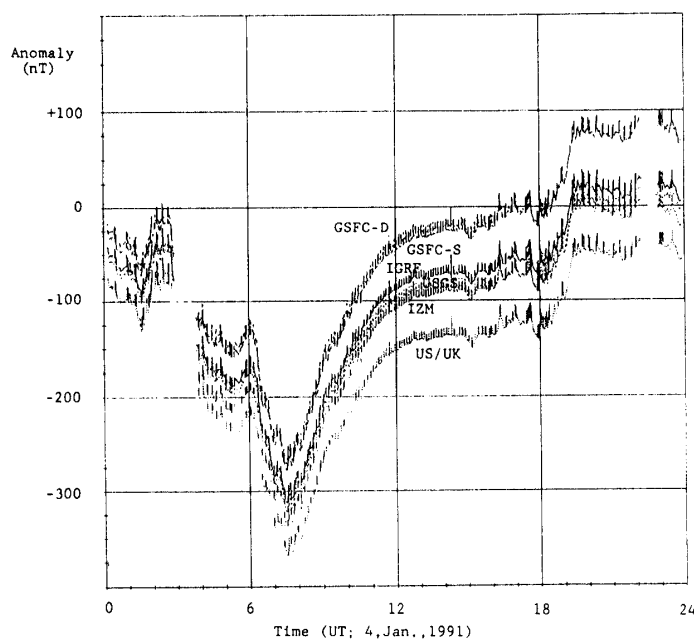


図10 6種類の地球磁場モデル係数(1990年元期の提案モデル係数)による全磁力理論値を用いた磁気異常値の比較.

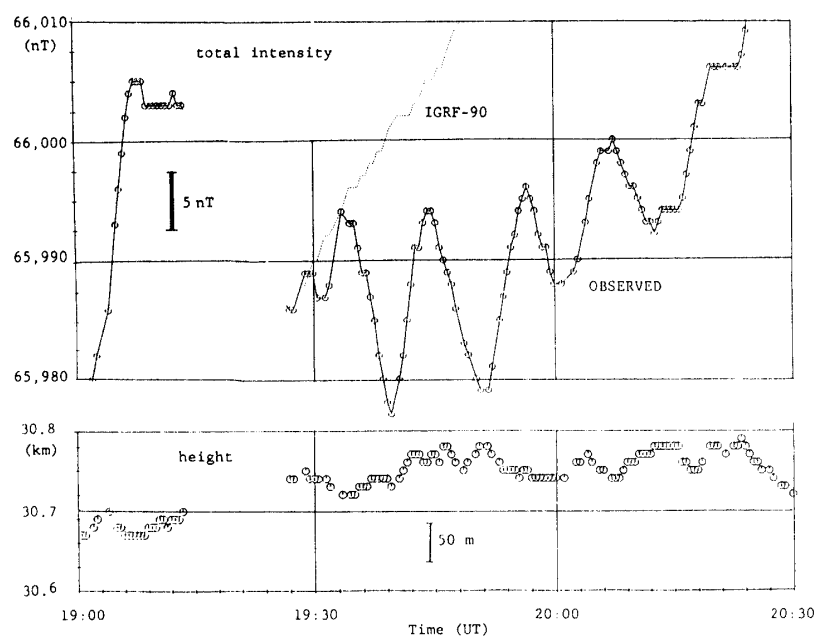


図11 磁気脈動の検出例. 周期10分, 振幅 15nT_{PP} の変動は気球高度(下)の変動には相応せず磁気擾乱現象と思われる.

磁力の最大値は $66,200\text{ nT}$ に達するが, 地下の構造体による磁気異常と思われるもののほかに短い周期を持つ磁場変動も多く見られた.

図9から, -200 nT 以上の大きな磁気異常が3日の2~9時, 20時から4日の18時, 5

日の3～18時に見られる。昭和基地での地磁気データによれば、磁場の全磁力の変動はこの期間50 nT以下であった。また、地磁気擾乱を示すKp指数は1-から3₀でAp指数は8であり、磁気的には静穏な期間であった。試算によれば、地下の帯磁した物体からの磁気的変動のプロファイルは帯磁物の大きさにもよるが、その先端から40 km離れたところで-9 dBの減少が生じる。この40 kmという距離はほぼ気球の速度から1時間に相当するので、数時間の周期的磁場変動は上層の電磁气的現象に起因するものの可能性があるが、6～10時間以上の長時間変動は地下構造物による磁気異常とみなせる場合が多い。

図10に6種類のモデル係数を用いた磁気異常値の一例を示す。理論磁場計算で気球高度を用いるので高度データ雑音によるひげのようなプロファイルとなっている。最近決定されたIGRFモデル係数を基準とすると、他の係数による値は+50～-70 nTの中があり、比較的IGRFの結果に近いものはUSGS係数を用いた値である。これらの係数モデルの比較は全飛行での場所、高度による比較検討を行う必要がある。

図11には磁気脈動と思われる10分周期で約15 nTの変動が検出された例を示す。この時の気球高度の変動は最大40 mでこれに相当する磁場変動は1 nT程度であって、周期も同期していないことから磁気脈動と考えられる。このような磁気脈動と思われる変動例は数多く検出されており、地上局や衛星データを参考にした詳しい検討が必要である。

5. 今後のPPB実験計画

これまでの気球を利用した磁場観測において、フラックスゲート磁力計によるベクトル測定はゴンドラの揺れに伴うセンサーの姿勢決定の困難さから高精度測定は不可能であった。しかし、磁気圏・電離圏における電磁气的現象の解明や磁気異常による地下構造体の推算にはどうしても三成分測定が必要な情報となる。1992年12月～1993年1月に計画されている第34次南極観測隊によるPPB実験では、2機のPPBを磁場、電場、オーロラX線の観測の目的で打ち上げる計画である。

磁場観測計画では従来のプロトン磁力計の他にフラックスゲート磁力計を用いた三成分測定を行う計画である。プロトン磁力計は測定レンジをこれまでの範囲をさらに広げて20,000 nT以上とし、PPB-1号機で生じた予想航跡外の飛行によるレンジアウトを避ける。測定精度はこれまでと同じ1 nTで、センサーは15 m下方に吊るす。一方、フラックスゲート磁力計センサーは80 cmのマスト先端に太陽センサー2台と傾斜計2成分とともに、ゴンドラ上面に取り付ける。太陽センサーは太陽がセンサー子面内にきた時に太陽光パルスを出力し、その瞬間の磁場三成分を測定する。その時のセンサー軸と水平面とのなす角度は傾斜計を用いて測定する。気球やゴンドラはゆっくりした周期(1～数分)で小さな角度(～1度以下)の振動と予想されるので、傾斜計での測定が有効である。ゴンドラは約1分周期のスピンを与えられるので、180度の位相で2台の太陽センサーを搭載すれば太陽方位検出が約30秒周期で得られる。気球位置からその時刻での太陽方向が計算できるので、センサー方向の姿勢マトリックスが決定できる。スピンモーターの故障や太陽の日没時は自動的にフラックスゲート磁力計の測定トリガがかかるようになっている。太陽位置計算によると、気球位置が南緯70度以南なら太陽の日没は1月中はない。PPB-1号機の航跡では最大南緯62度付近まで北に偏ったが、これと同じような気球の航跡である場合は22～2時にかけて4時間程度の

第 3 表 PPB-4, 5 号機 (第34次隊: 1992~1993) による
磁場測定計画の仕様

Proton Magnetometer	
Measuring Range	20,000—85,335 nT
Resolution	1 nT/LSD
Output Format	digital 16 bits
Power Supply	28 V × 120 AH
Size/Weight	
Electronics	180 × 300 × 150 mm ³ / 5kg
Sensor	140φ × 150 mm ³ / 4.5kg
Battery	170 × 310 × 170 mm ³ / 7.5kg
Fluxgate Magnetometer	
Measuring Range	±80,000 nT/axial
Resolution	1.1 nT/LSD/axial
Output Format	digital 16 bits/axial analogue 0—5 V/axial
Attitude Sensor System	
Sun Sensor	Sun Crossing Sensor (2)
Clinometer	Accelerometer 2-axes 0.01°-resolution, 28 bits
Power Supply	10.5 V × 270 AH
Size/Weight	
Electronics	230 × 330 × 160 mm ³ / 5kg
Sensor	700φ × 800 mm ³ / 7kg
Battery	180 × 210 × 150 mm ³ / 6.6kg

日没が予想される。観測期間は27日間で、搭載電池の容量、重量はPPB-1, 2号機に比べて3割程度増加している。表3にこれらの磁場観測用プロトン磁力計とフラックスゲート磁力計の仕様を示す。

6. 謝辞

この南極周回気球実験は国立極地研究所が宇宙科学研究所との共同実験として実施された。長年この計画から実施までに尽力された国立極地研究所、宇宙科学研究所の関係各位に深謝の意を表し、併せて準備、製作、地上試験に携わったPPBワーキング・グループの方々および昭和基地においての放球実験を担当された第32次・第31次南極観測隊の方々に感謝いたします。理論磁場計算に使用したモデル係数および資料は東京大学地震研究所、行武 毅教授から提供いただき、有意義なコメントを頂きましたことをここに感謝いたします。また、プロトン磁力計の特性試験において気象庁柿岡地磁気観測所の磁気試験室、ヘルムホルツコイルの設備を借用いたしましたことを感謝いたします。データ処理は東海大学計算センターの大型計算機を利用し、解析においては情報処理研究教育施設の高橋隆男助教授、工学部大学院生、松橋直人君およびプロトン磁力計の設計・製作ではテラ・テクニカ(株)の大西信人氏の多大な協力を頂きましたことを感謝いたします。さらに、第34次南極観測隊でのPPB実験計画に対しては、磁場観測担当の東海大学、利根川豊助教授、南極観測隊長の国立極地研究所佐藤夏雄教授の御助力を頂きましたことを深謝いたします。

参考文献

- [1] Nagata, T., Fukunishi, H., Nishimura, J., Kodama, M. and Co-Members of PPB Working Group (1985): Polar Patrol Balloon Project in Antarctica, Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, 38, 156-163.
- [2] 藤井良一, 宮岡 宏, 門倉 昭, 小野高幸, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 江尻全機, 平澤威男, 西村 純, 矢島信之, 山上隆正, 太田茂雄, 秋山弘光, 鶴田浩一郎, 小玉正弘, 福西 浩, 山中大学, 国分 征: 南極周回気球 (PPB) 将来計画1991-1993, 南極資料, 第33巻, 第2号, 320-328, (1989)
- [3] 宮岡 宏, 向井裕之, 斎藤浩明: ポーラー・パトロール気球実験, 日本南極地域観測隊第28次隊報告 (1986-1988), 165-174.
- [4] Kadokura, A., Ejiri, M., Ohta, S. and Akiyama, H. (1991): Polar Patrol Balloon (PPB) Experiment of the 30th Japanese Antarctic Research Expedition (1989-1990). Antarctic Rec., 35, 143-154.
- [5] 平澤威男, 江尻全機, 藤井良一, 西村 純, 矢島信之, 秋山弘光, 太田茂雄, 山上隆正, PPB W. G.: 平成2年度PPBプロジェクトの概要と経過, 大気球シンポジウム (平成3年度), 宇宙科学研究所, 109-113, (1991)
- [6] 遠山文雄, 藤井良一, 江尻全機, 国分 征, 秋山弘光, 矢島信之, 大西信人, PPB W. G.: 南極周回気球 (PPB) による磁場観測, 大気球シンポジウム (平成3年度), 宇宙科学研究所, 129-135, (1991)
- [7] 加藤愛雄, 瀬戸正弘, 遠山文雄: 大気球による三陸沖および日本海溝周域の地下構造磁気探査, 物理探査, 物理探査学会, 第38巻, 第3号, 105-115, (1985)
- [8] 遠山文雄, 瀬戸正弘, 加藤愛雄: 日本海中部地震域における全磁力磁気異常の大気球往復観測実験結果, 宇宙科学研究所報告, 特集第20号, 61-72, (1987)
- [9] 遠山文雄, 青山 巖: 大気球搭載用プロトン磁力計の開発, 搭載機器基礎開発成果報告書, 宇宙科学研究所, 第5巻, 48-53, (1992)
- [10] 秋山弘光, 藤井良一, 小野高幸, 江尻全機, 太田茂雄, 山上隆正, 矢島信之, 西村 純: 南極周回気球実験 (PPB), 大気球シンポジウム (平成3年度), 宇宙科学研究所, 114-123, (1991)
- [11] International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) Division V, Working Group 8: Analysis of the Main Field and Secular Variation, (R. A. Langel, Chairman) (1991): International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision, J. Geomag. Geoelectr., 43, 1007-1012.
- [12] Barraclough, D.R., Williams, L.D. and Quinn, J.M. (1992): US/UK Candidates for the definitive Geomagnetic Reference field Model DGRF-85 and the Predictive International Geomagnetic Reference Field Model IGRF-90. J. Geomag. Geoelectr., 44, 719-734.
- [13] Bondar, T.N. and Golovkov, V.P. (1992): IZMIRAN Candidate Models for DGRF 1985, IGRF 1990 and a secular Variation Forecast Model for the 1990-1995 Period. J. Geomag. Geoelectr., 44, 709-717.
- [14] Peddie, N.W. (1992): Analysis of Geomagnetic Secular Variation During 1980-1985 and 1985-1990, and Geomagnetic Models Proposal for the 1991 Revision of the International Geomagnetic Reference Field. J. Geomag. Geoelectr., 44, 735-743.
- [15] Langel, R.A., Sabaka, T.J. and Baldwin, R.T. (1992): The Geomagnetic Field: 1970-1990 and the NASA Candidate Models for DGRF 1985 and IGRF 1990. J. Geomag. Geoelectr., 44, 745-767.
- [16] Talwani, M. (1965): Computation With the Help of a Digital Computer of Magnetic Anomalies Caused by Bodies of Arbitrary Shape, Geophys., 30, 797-817.