

南極周回気球(PPB)に搭載した 磁力計システムによる磁場観測実験

西尾 泰穂¹・遠山 文雄¹・山岸 久雄²
門倉 昭²・佐藤 夏雄²・山上 隆正³
斎藤 芳隆³・並木道義³・松坂 幸彦³

Measurement of Geomagnetic Filed by Fluxgate Magnetometer System Onboard Polar Patrol Balloons (PPB)

By

Yasuho NISHIO¹, Fumio TOHYAMA¹, Hisao YAMAGISHI², Akira KADOKURA²,
Natsuo SATO², Takamasa YAMAGAMI³, Yoshitaka SAITO³,
Michiyoshi NAMIKI³ and Yukihiko MATSUZAKA³

Abstract : The Polar Patrol Balloon (PPB: Polar Patrol Balloon) Project that was planned for the polar geophysical observations was carried out by the 44-th Japanese Antarctic Research Expedition at Syowa Base, Antarctica in January 2003. Fluxgate magnetometer system was loaded on 3 balloons and the geomagnetic field was measured. It is very difficult to detect vector perturbations of the geomagnetic field by balloon because the motion of the sensors during the flight is irregular and complex. We have developed a high resolution fluxgate magnetometer system that is composed with 8-directional sun pulse sensor, 2-axial clinometer and a pulse clock counter.

Two PPBs were launched on 13th January 2003. Their flights were apart 150 km from each other and at an altitude of 31.5 km. We were able to get 2 magnetometers data for 11 days and 25 days respectively. As a result, the attitude change of the gondola were detected but small perturbation of magnetic field vector was undetected because of balloons were not rotated due to spin motor trouble.

We describe here the new magnetometer system and results of magnetometer data analysis.

概要

2003年1月に第44次南極観測隊によって、3機の南極周回気球（PPB: Polar Patrol Balloon）が昭和基地から打ち上げられ、地球物理観測を行った。気球には地磁気観測の目的でフラックスゲート磁力計システムが搭載された。気球による地磁気の精密な成分測定は、飛翔中のセンサ

¹東海大学工学部

²国立極地研究所

³JAXA宇宙科学研究所

の運動が不規則かつ複雑なことから非常に困難である。我々は8方位太陽センサと2軸傾斜計とパルスロックカウンターから成る高精度フラックスゲート磁力計システムを開発した。

2機の気球は2003年1月13日に打ち上げられ、150km離れて高度31.5kmで飛行した。2機に搭載した磁力計からはそれぞれ11日間と25日間の磁場データが得られた。その結果、ゴンドラの姿勢変化は検出されたが、気球のスピノーターの異常でゴンドラが回転せず、地磁気ベクトルの微小変動は検出できなかった。

ここでは、新たな磁場計測システムと得られた結果について報告する。

重要語： フラックスゲート磁力計、地球磁場、気球観測、南極周回気球、PPB

1. はじめに

昭和基地の夏期の成層圏風は南極大陸を1周して約2週間後に再び昭和基地上空に戻る安定した東風が存在することが知られている。この周回風を利用して昭和基地から観測気球を打ち上げるPPB実験が実施されてきた[1]。PPBは地理緯度では南緯60~70度のほぼ等緯度線に沿って周回するが、不变磁気緯度では50~80度といった広い緯度範囲を飛翔することによりプラズマ圏、プラズマポーズ、トラフ領域、オーロラ帯、プラズマシート境界(PSBL)、低緯度境界(LLBL)、マントル域、カスプ域、極冠域といった様々な超高層物理現象を生じる領域を観測することができる[2]。同一の観測器を搭載した3機のPPBを近接させて飛翔させることにより、これらの領域の内外で起こる現象の空間分布と時間変化を同時観測するバルーンクラスター実験が計画され、2003年1月に第44次南極観測隊によって3機の南極周回気球(PPB-8, -9, -10号機)が昭和基地から打ち上げられた。搭載計測器は3機とも同一で、電磁波動観測器、電場ベクトル観測器、磁場観測器、オーロラX線撮像器、電離層全電子数観測器により構成された[3]。

磁場観測(MGF: Measurement of Geomagnetic Field)は、磁気脈動の伝播特性やオーロラ・磁気嵐に伴う電離層電流系の発達に伴う磁場変動、磁気異常のベクトル測定から地下構造の電磁気的解明など、直接的な目的のほかに電場や粒子観測の磁場情報として重要な観測項目がある[4][5]。南極でのPPBによる磁場観測は、初回の1990年、PPB-1, -2号機にプロトン磁力計が搭載され、全磁力の測定が行われた[6][7][8]。1992年PPB-3, -4号機にはプロトン磁力計とフラックスゲート磁力計が搭載され、初めて磁場のベクトル計測が試みられ、地下磁気異常の観測を行った[9]。気球による磁場測定はゴンドラからの磁気オフセット補正や不規則運動の補正の困難さから、国内においてもプロトン磁力計による全磁力の測定が主流であった[10]が、地球磁気圏、電離圏の電磁現象に伴う磁場変動において、磁気脈動の伝播機構の解明には磁場の三成分ベクトル計測が必要であることから、フラックスゲート磁力計による計測方法が検討されてきた[11]。

フラックスゲート磁力計がロケットや人工衛星に搭載された例は数多くあり、これらの飛翔体は、安定したスピンを伴う運動を行うので、センサの姿勢決定が比較的容易であるのに対し、気球から長いロープで吊り下げられたゴンドラは、円振動とロープの捩れによる不規則周期の回転とが複雑に混合した運動を行うので、センサの姿勢決定が困難である。フラックスゲート磁力計で、仮に1nT精度の磁場変動計測を行うには、センサの姿勢を0.01°以下で決定する必要があるので、気球による磁場観測はプロトン磁力計のみが使用されてきた[12][13]。1987年に行われた三陸大気球センターでの気球実験にプロトン磁力計とフラックスゲート磁力計が同時に搭載されたが、気球の動揺による影響のため、フラックスゲート磁力計による微少磁場変動の検出は困難であった[14]。また、1992年のPPB-3, -4号機にはプロトン磁力計、フラックスゲート磁力計とさらに太陽センサと傾斜計から成る姿勢センサが搭載されたが、データサンプリング周期が30秒であったため、ゴンドラの短時間の微細な運動を決定することは困難であった。今回のバルーンクラスター実験では、1秒サンプリングの時間分解能と高分解能

(0.25nT) のフラックスゲート磁力計の搭載が実現した [2] [15].

ここでは、気球観測用のフラックスゲート磁力計システムと、観測データの解析結果について報告する.

2. 磁力計システム

2.1 磁力計システム

気球はB50 ($50,000\text{m}^3$) のゼロプレッシャー気球を使用し、ゴンドラ ($1.3\text{m} \times 1.3\text{m} \times 1.2\text{m}$, 600kg) は気球の電場観測器への影響を避けるため、上昇中に巻き下げる機により100m降ろされる。ゴンドラは気球の下に取り付けられたスピンドモーターにより2rpmのスピンドルがかけられる。フラックスゲート磁力計センサは図1に示すように、ゴンドラの天板に搭載されており、磁力計センサ、太陽パルスセンサ (SPS: Sun Pulse Sensor)、傾斜計が一体となった高さ80cmのマスト型をしている。太陽パルスセンサは、マストの周りに8個のスリットが45度間隔で取り付けられ、その下部に2成分の傾斜計センサが直交して取り付けられている。磁力計センサのX軸方向はゴンドラの座標系に対し 47° 反時計回りに取り付けられた。また、電子回路部は発泡スチロールで保温されたゴンドラ内部に設置されている。

表1 磁力計システムの仕様

Fluxgate Magnetometer (3-axial)	
Dynamical Range	$\pm 100,000 \text{nT}/\text{axis}$
Resolution	0.25 nT/digit
Sun Pulse Sensor (8-directional)	
Dynamical Range	0~+50 deg/dir.
Resolution	0.2 angular minutes/dir.
Clinometer (2-axial)	
Dynamical Range	$\pm 20.48 \text{ degrees}/\text{axis}$
Resolution	0.3 angular minutes/axis

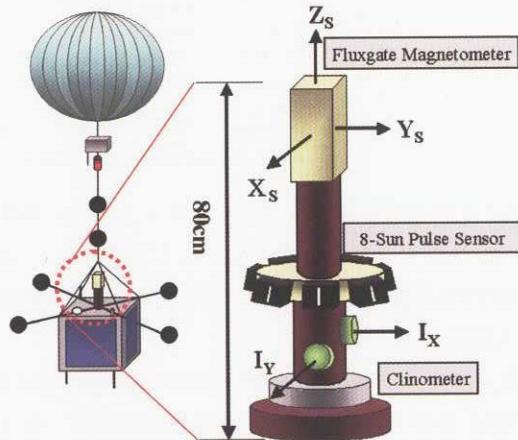


図1 MGFセンサマスト

磁力計システムの仕様を表1に示す。フラックスゲート磁力計の計測範囲は $\pm 100,000\text{nT}$ で、分解能は0.25nTであり、SPSと傾斜計によるセンサ軸の姿勢決定精度 ($< 0.01^\circ$) により約1nTの解析精度を目指している。傾斜計は、水平面からのセンサマストの傾斜を計測範囲 $\pm 20.48^\circ$ 分解能 $0.3'$ で検出するようになっている。SPSは、図2に示すように1つの太陽センサの中に3本のフォトダイオードが入っており、0.8mm巾のスリットを通して3本同時に光が入射したときにパルスが出力される。SPSの視野角は迎角方向では、0~50度あり、太陽光が入射した瞬間の時刻を4096 pulse/secの分解能を持つクロックカウンタによって計測する。ゴンドラが30秒周期で回転した場合、約3~4秒毎に方位角のデータを取得することが可能で、その角度分解能は $0.2'$ である。

磁力計及び姿勢計のサンプリングタイミングを図3に示す。SPSに入射光がある場合は入射パルスをトリガとして磁力計データを取得し、入射光が無い場合はMGF内のタイマで、1秒毎に取得する。このタイマは20秒ごとにGPS衛星からの時刻情報を補正する。ゴンドラの位置情報はGPS衛星からのデータを使用し、緯度、経度、高度情報を20秒毎に得る [16]。観測データはイリジウム衛星通信によって伝送され、国立極地研究所に設置された専用電話回線によって受信された。また、昭和基地とイギリスのロデラ基地においてテレメータによるデータ受信も行われた [17]。

過去のPPBに搭載された磁力計システムと今回の磁力計システムの比較を表2に示す。過去のPPB実験で使用し

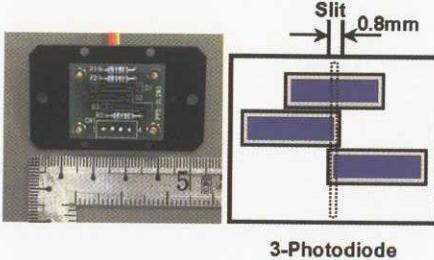


図2 太陽パルスセンサ (SPS)

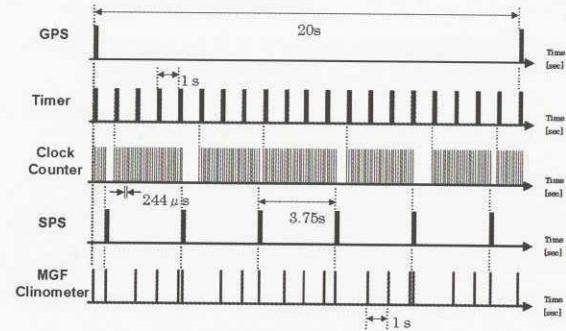


図3 データ取得タイミング

表2 PPB 搭載磁力計システムの比較 [6] [11] [18]

PPB No (Year)	Sensor	Sensitivity	Data Sampling (sec)	Observation (Days)
#1, 2 (1990)	Proton	1 nT	30	19-23
#3, 4 (1993)	Fluxgate (3-axial) Proton Sun Pulse (2-dir) Clinometer (2-axial)	1 nT 1 nT 0.3 deg 0.3 min	30	9-14
#8, 9, 10 (2003)	Fluxgate (3-axial) Sun Pulse (3-dir) Clinometer (2-axial)	0.25 nT 0.2 min 0.3 min	1	17-24

たマルチIDアルゴスは伝送容量が低く、サンプリング周期は30秒であったが、今実験ではイリジウム衛星通信を使用したので、1秒サンプリングで行うことができた。太陽センサはPPB-4, -5号機では180°間隔で2個搭載されたが、今回のPPB実験では8個搭載されたので、方位角情報がより多く取得できる。

2.2 地上試験

2002年7月、ブラックスゲート磁力計の較正試験は地磁気の外乱の少ない八ヶ岳高原で行った。磁力計センサ軸の直交度の測定と直交性の調整、磁力計感度の調整、電気的オフセット値を計測した。また、SPSは約45°間隔で取り付けられているが、各センサスリット間の位相角度を光学的に計測した。その結果20秒角の精度で相対角度を計測することができた。

ゴンドラ搭載観測機器は宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所本部（JAXA/ISAS）において組み立てられ、総合環境試験を行った。ゴンドラ全体を真空恒温層に入れ熱真空試験を実施し、電波干渉試験を行った。真空試験は気圧を700mmHg, 200mmHg, 100mmHg, 3mmHg、槽内の温度を室温, 0°C, 30°Cと変化させてそれぞれ2日間に渡って動作チェックを行い、その後ヒートラン試験をそれぞれ4~8日間行って、磁場観測器は正常に動作することを確認した。さらに直径6mの磁気シールドルームにゴンドラを搬入して、磁力計のための磁気オフセット試験を行った。ゴンドラを90度ごとに回転させ、ゴンドラからの磁気的影響を計測した。計測の結果、ゴンドラの中央に設置されたバラストタンクとバラストによるものと思われる影響が見られ、磁力計Z軸成分に約100nT存在することが分かった。また、太陽電池パネルからの磁気的影響を計測したが、ほとんど影響はなく1nT以下であることを確認した。

3. 解析方法

データ解析の流れを図4に示す。取得した磁場データには、磁気オフセットが含まれており、ゴンドラのスピニや理論磁場を用いて補正を行う必要がある。太陽センサおよび傾斜計からのデータを用いてゴンドラの姿勢決定を行い、磁力計の三軸センサの方向を決定し、磁場ベクトルを座標変換で求める。GPSからの気球位置と時刻情

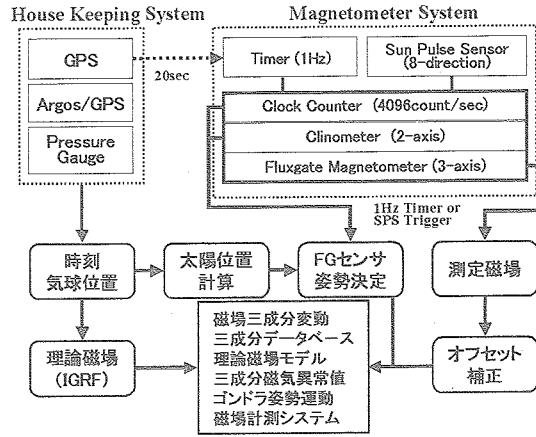


図4 データ解析の流れ

報は、太陽位置計算と理論磁場計算に使用する。理論磁場モデルはIGRF(国際標準磁場)係数を使用し、観測値と理論値との差を最小二乗法を用いて最適オフセット量を決定する。

3.1 磁気オフセットの補正

飛翔中の磁力計の測定データには、単体試験で得られた値とは異なるいわゆる磁気オフセットが存在する。磁力計の感度、ゴンドラや同乗機器からの磁気的バイアス、太陽電池による電流磁界、センサ三軸間の非直交性および搭載センサのアライメントに起因するオフセット量がある。そこで生データを用いて主な磁気オフセット値を求め、観測データを補正する。仮想の直交三成分磁場(G_x, G_y, G_z)と、センサ軸成分の出力値(V_x, V_y, V_z)との関係は(1)式となる。 A_{ij} は感度補正值および直交度補正值、 B_i は磁気バイアス値である。 $A_{ij}B_i$ は(2)式で表すように、観測磁場 F_{OBS} と理論磁場 F_{IGRF} との差の2乗和 J が最小になるように決定する [19]。

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & 0 \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} \\ 0 & 0 & A_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$J = \sum (F_{OBS} - F_{IGRF})^2 \quad (2)$$

3.2 姿勢決定方法

図5に磁力計センサ座標系(XM, YM, ZM)と水平面座標系(南, 東, 天頂)における太陽位置の関係を示す。GPSの時刻とクロックカウンタから、太陽光の入射時刻を求め、気球位置における太陽位置(A, h)計算を行う。太陽光が入射した太陽センサの方向から、磁力計センサの方位角を求める。また、二成分の傾斜計で水平面からの傾斜角 θ_X, θ_Y を用いて、磁力計センサの姿勢決定を行い、磁場の南、東、垂直成分量(S, E, Z)を(3)(4)式の座標変換で求めることができる。ここで、 ϕ は磁力計センサZ軸からみた太陽方位と天頂から見た方位角のずれ角で、ゴンドラを吊るロープと鉛直線とのずれに起因する微小量であり、 α は磁力計センサZ軸から見た磁力計センサY軸の水平面からの傾斜角、 θ_s は太陽パルスが入ったXセンサ軸からの位相角である。

$$\begin{pmatrix} S \\ E \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_x & 0 & \sin\theta_x \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_x & 0 & \cos\theta_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \theta &= A - (\theta_S + \phi) \\ \alpha &= \sin^{-1}\left(\frac{\sin\theta_y}{\cos\theta_x}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

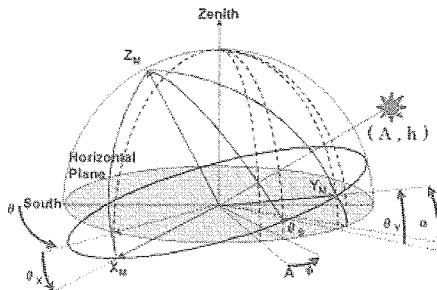


図5 磁力計センサ座標系と太陽位置関係

4. 観測実験および解析結果

4.1. 実験概要

PPB-9号機は1月6日07:34UTに打ち上げられたが、2時間後コマンドシステムのトラブルにより高度15kmからゴンドラが切り離れ、昭和基地から60kmの地点にパラシュートを開いて着氷し回収された。データは上昇中と落下後の6時間半のデータが得られた。PPB-8, -10号機は、1月13日にそれぞれ06:49UT, 12:16UTに打ち上げられ、両機とも打ち上げ後2時間後に高度31.5kmに達した。PPB-8, -10号機の気球航跡図を図6に示す。2機のPPBは安定した東風に乗って約150kmの間隔を保ちながら時速20kmで飛行し、南極大陸を半周した。観測データはイリジウム衛星携帯電話およびロデラ基地でのテレメータによる受信を行った[20]。1月25日、成層圏の風向が変化し、周回飛行はしなくなり、PPB-10号機は低緯度方向に流され、1月31日にパタゴニア諸島沖300kmの地点に着水した。また、PPB-8号機は、2月7日にパタゴニア諸島沖500kmの地点に着水した[21]。PPB-8, -10号機の磁場データはそれぞれ25日間、11日間得られた。

4.2. 磁力計の磁気オフセット補正

磁力計XY軸データから求めたゴンドラ水平方向の方位変化の一例（1月13日5:32～1月14日14:52[UT]）を図7に示す。方位角は真南を基準として東回りに0°～360°としている。1日半の間の図を見ると、規則的なゴンドラの回転は見られず、時計回りや逆方向の回転やロープの捩れ振動が見受けられる。図7において最も定期的な回転は9:03[UT]（高度29.9km）から9:10程度の間の回転で、スピン周期は約33秒であった。その後、9:13[UT]に逆回転を始めている。その後11:30[UT]までは、2～3回転毎にスピンが反転しているので、ロープのねじれによる撲り戻しのスピンをしていたと思われる。全観測期間において定常的な回転は見られなかった。

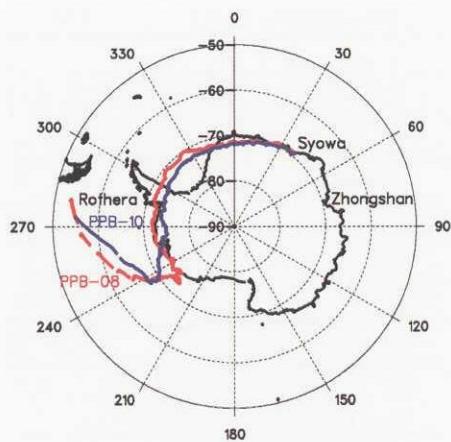
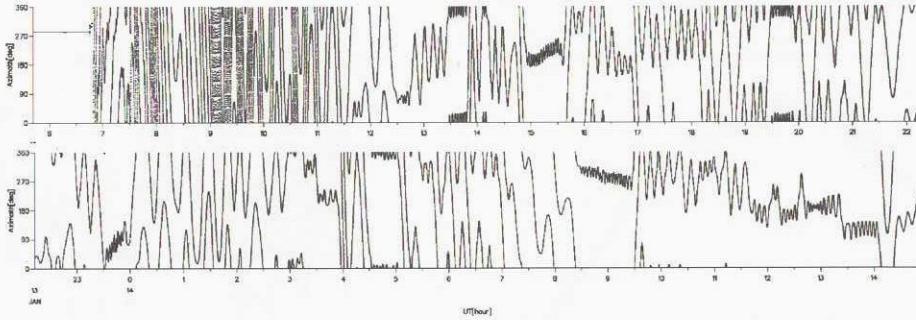


図6 PPB-8, -10号機の航跡図

表3 磁力計の単体較正パラメータ(PPB-8)

Offset Items	Nominal	In Flight
Scale Factor X	0.25	0.248682 [nT/bit]
Scale Factor Y	0.25	0.248627 [nT/bit]
Scale Factor Z	0.25	0.244114 [nT/bit]
Bias X	-31	-424 [nT]
Bias Y	4	19 [nT]
Bias Z	-162	-862 [nT]
X-Z Angle	90	90.81 [deg]
Angle of Axes X-Y	90	89.90 [deg]
Y-Z Angle	90	89.96 [deg]

図7 磁力計XY軸データから計算したゴンドラ水平方向の方位変化。
真南を基準として東回りに0°～360°としている。

磁力計の磁気オフセット補正をするためには定常的なスピンをしている必要があるので、図8に示すように、比較的一様なスピンをしていた9:02～9:12[UT]の10分間データを用いた。縦軸の方位角度は磁力計による方位と太陽センサによる値を示したが、両データは良い一致を示している。この図で、右肩下がりになっている傾斜は気球が上方から見て時計回りに回転していることを示す。式(1)(2)を用いてオフセットパラメータを決定した。その結果を表3に示す。また、観測磁場の全磁力の値における補正前と補正後の値およびIGRF係数による標準磁場理論値の比較を図9に示す。磁力計のオフセット補正前(Raw data)では、観測値の全磁力には約130nTの周期的変動が見られるが、これはオフセットが存在することによるスピン周期に同期した変動で、表3によるパラメータを用いた補正後(CAL-Total)では、約5nTの変動に抑えることができた。IGRF係数による理論磁場計算値(IGRF-Total)は160nT程度の観測値とのオフセットを示している。

4.3. センサ軸の運動シミュレーション

図10に、その10分間の範囲におけるゴンドラの角速度を示した。この間でも回転周期が33秒から90秒までの約2倍の周期変動が見られた。図11には傾斜計データから、座標変換した磁場の水平成分の補正前と補正後の変動の一例を示す。補正後でも振幅が約80nTで20秒周期の変動が見られ、100mのゴンドラ吊り下げロープ長による单振動の理論的周期と符合することから、ゴンドラが振動していることが推測される。次にゴンドラの不規則な運動を推定する為、気球自体は静止し、ゴンドラは長いロープによる单振動とロープの周りに回転している運動と仮定してシミュレーションを行った。図12は磁気オフセット補正後の水平成分の磁場データに合うような運動を仮定した値を示す。非常に複雑なデータに完全一致させる規則的運動を決定するのは殆ど不可能であった。図12に示したシミュレーションによる運動を模擬的に示すと図13のようになる。すなわち、磁力計センサZ軸が鉛直のロープから0.35°のオフセットを持ち、ゴンドラが振幅0.46°、周期20秒の单振動を行いながら、ロープ周りに周期

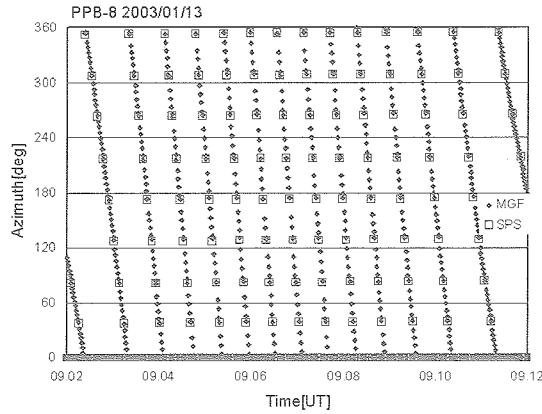


図8 PPB-8号機の磁力計データ補正に用いた範囲の方位角の変化。MGFは磁力計からの方位角、SPSは太陽センサからの方位角

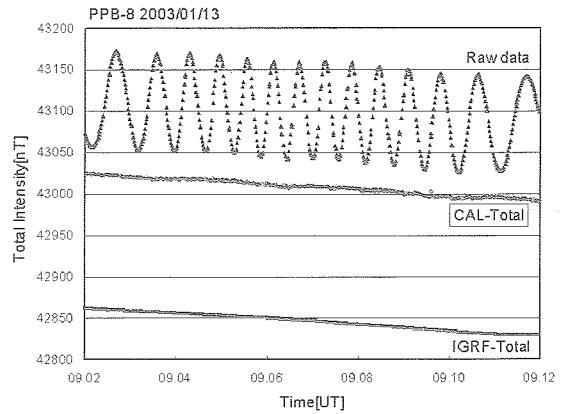


図9 磁場の全磁力値の補正前（Raw data）と補正後(Cal-Total), 理論磁場 (IGRF-Total) の比較

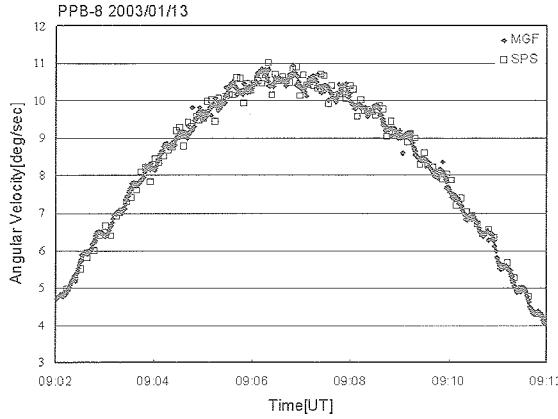


図10 ゴンドラの回転角速度の変化。MGFは磁力計からの角速度, SPSは太陽センサからの角速度

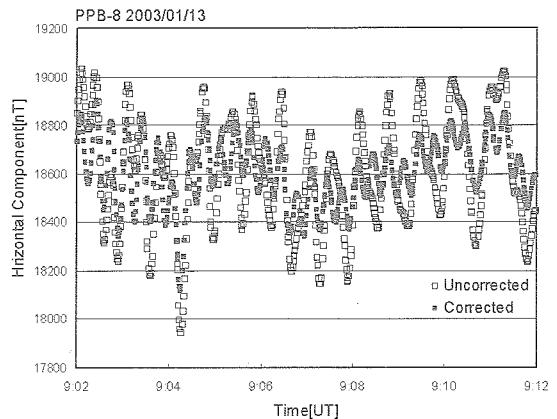


図11 傾斜計の姿勢データから座標変換し、磁力計センサの傾斜角を補正する前と補正した後の磁場水平成分の比較

33-90秒のスピンをしていると仮定した場合が考えられる。このようなシミュレーションはここに示したスピンが比較的規則的に生じている範囲であれば可能だが、図7に示したように、観測データの殆どすべてがスピンをしていないので高精度解析は非常に困難である。スピンモーターのトラブルの原因は今後の調査を待たなければならぬが、100mのロープに吊り下げられたセンサの不規則運動下における磁場の精密ベクトル計測方法の再検討が必要である。

4.4. 今後の課題

ゴンドラのスピンモーターが故障し、ゴンドラの規則的回転が得られなかった為、太陽センサからの姿勢情報が少なく、精密な姿勢決定と磁場のベクトル解析が不可能となった。図12に示した水平成分変動と同様に磁力計三成分磁場データが変動しており、この大きな変動はゴンドラの運動変化を反映している。磁気活動度を加味した理論的磁場との差し引きによる磁気脈動や電流系磁場などの微小な電磁現象を検出できる精度での解析は得られていない。なお今後も回転をしているデータ範囲を用いて、磁場の三成分を求める解析を試みていく。磁場の全磁力を絶対測定できるプロトン磁力計のフラックスゲート磁力計との同時搭載は、フラックスゲート磁力計のオフセット補正や成分測定解析の精度向上に非常に有効であることが印象付けられた。

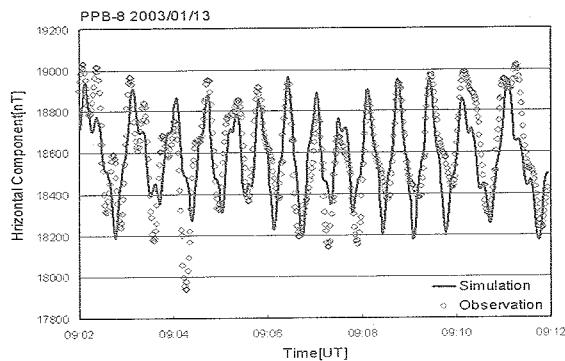


図12 観測磁場データとシミュレーション値との比較

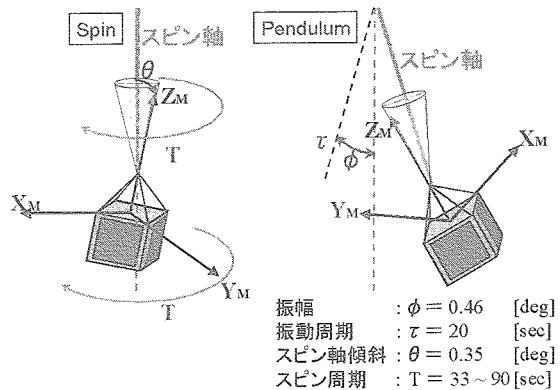


図13 ゴンドラの振動とスピンを仮定した運動例

謝 詞

南極周回気球実験の計画企画から実施までに尽力された、国立極地研究所およびJAXA宇宙科学研究所の関係者の関係各位に深く感謝し、併せて南極昭和基地で打上げ実施、データ取得に尽力された、第44次南極観測隊の方々に感謝申し上げます。また、ブラックスゲート磁力計システムの製作、単体試験に際しては、有限会社テラ・テクニカにご協力いただきました。

参 考 文 献

- [1] 西村 純, 他, : ポーラー・パトロール気球 (PPB) I. 気球システム, 南極資料, 71-78, 1984.
- [2] 門倉 昭, 他, : 2002-2003年南極周回気球 (PPB) 実験における地球物理観測計画 (概要), 平成13年度大気球シンポジウム, 145-148, 2001.
- [3] A. Kadokura, et al.: Polar Patrol Balloon Experiment in Antarctica during 2002-2003 Advances in Polar Upper Atmosphere Research (APUAR), No.16, 157-172, 2002.
- [4] 遠山文雄, 他, : 大気球搭載用プロトン磁力計の開発, 宇宙科学研究所搭載機器開発成果報告書, 第5巻, 48-53, 1992.
- [5] 遠山文雄: 地磁気観測用磁力計, 日本AEM学会誌, Vol.9, No.4, 421-428, 2001.
- [6] 遠山文雄, 他, : 南極周回気球 (PPB) による磁場観測, 平成3年度大気球シンポジウム, 129-135, 1991.
- [7] F. Tohyama, et al.: Observation of the geomagnetic field by polar patrol balloon(PPB), Journal of Solar Terrestrial Environmental Research in Japan, No.16, 60, 450-457, 1992.
- [8] F. Tohyama, et al.: Observations of the Geomagnetic Field by Polar Patrol Balloon (PPB) Experiment in Antarctica, Proc. NIPR Symposium on Upper Atmospheric Physics, vol.6, 15-24, 1993.
- [9] M. Ejiri, et al.: Experimental Results of Polar Patrol Balloon Project in Antarctica, Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., No.8, 60-64, 1995.
- [10] 遠山文雄, 他, : 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, 大気球研究報告特集, 第20号, 61-72, 1987.
- [11] 遠山文雄, 他, : 南極周回気球 (PPB) による磁場のベクトル計測計画, 平成4年度大気球シンポジウム, 215-221, 1992.

- [12] Jose Achache, et al.: The French program of circumterrestrial magnetic surveys using stratospheric balloons, EOS Transactions, American Geophysical Union, vol.72, No.9, 97-101, 1991.
- [13] Yu. P. Tsvetkov, et al.: Investigation of the earth's anomalous magnetic field at the stratospheric altitudes using drifting balloons, Russian academy of Sciences, Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation 1994.
- [14] 加藤愛雄, 他, : 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, 物理探鉱, 第38巻, 第3号, 106-115, 1987.
- [15] 西尾泰穂, 他, : 南極周回気球(PPB)による高精度磁場観測, 平成15年度大気球シンポジウム論文集, 83-86, 2003.
- [16] 西尾泰穂, 他, : 気球に搭載したフラックスゲート磁力計による磁場精密測定法, 第46回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp.103-105, 2002.
- [17] 山岸久雄, 他, : 南極周回気球(PPB)観測機の国内総合試験概要とデータ通信, 平成14年度大気球シンポジウム, 25-28, 2002.
- [18] 遠山文雄, 他, : 南極における磁場の気球観測, 平成5年度大気球シンポジウム, pp.37-40, 1993.
- [19] 遠山文雄, 他, : 科学衛星「あけぼの」による磁場観測の高精度データ解析法, 東海大学紀要工学, Vol.32, No.1, 325-332, 1992.
- [20] 富田裕基, 他, : 南極周回気球のロゼラ基地におけるデータ受信, 平成15年度大気球シンポジウム, 63-66, 2003.
- [21] 山岸久雄, 他, : 44次隊におけるPPB実験概要, 極域における電離圏磁気圏総合観測シンポジウム予稿集, 34, 2003.