

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

ジオスペース探査(ERG)衛星に搭載される 磁場観測器(MGF)センサの地上較正試験結果

Ground calibration experiments of Magnetic field experiment on the ERG satellite

寺本万里子, 松岡彩子, 野村麗子

Mariko Teramoto, Ayako Matsuoka and Reiko Nomura

2017年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

ジオスペース探査(ERG)衛星に搭載される 磁場観測器(MGF)センサの地上較正試験結果

寺本万里子^{*1*2}, 松岡彩子^{*1}, 野村麗子^{*1}

Ground calibration experiments of Magnetic field experiment on the ERG satellite

Mariko Teramoto^{*1*2}, Ayako Matsuoka^{*1} and Reiko Nomura^{*1}

ABSTRACT

Ground calibration experiments of Magnetic field experiment (MGF) on the ERG satellite have been performed in order to determine the sensitivity and alignment of the MGF sensor. From response of MGF to known applied magnetic field, we determined the sensitivity of each axis and found that the error of the sensitivity is less than 0.06%. The axis of the sensor is orthogonal to each other within 0.95 degrees. The estimated error of alignment is within 0.07 degrees. We also have examined the temperature dependence of the sensitivity and offset. The sensitivities relative to the room temperature have linearity with the standard error less than 0.0016, while the offset of the sensors have no clear linearity but reproducibility against temperature. From these ground examinations, the determination accuracies of the amplitude and direction of the magnetic field observed by the ERG/MGF will satisfy the science requirements for the ERG observations.

Keywords: ERG satellite, Magnetic field experiments, Ground calibration, RM

概要

ジオスペース探査 (ERG) 衛星に搭載される磁場観測器(MGF)のセンサ部(MGF-S)の地上較正試験を行い、感度とアライメントを決定した。MGF-S に磁場を印加し出力値を測定することにより、誤差 0.06%以内の高い精度で MGF-S の感度を決定することができた。また、MGF-S の軸間角度は直交から 0.95° 以内のずれを持ちその推定誤差は 0.07° 以内であった。MGF-S のオフセットと感度の温度依存性を調べたところ、室温に対する相対感度は-20°C から 30°Cの間で、温度の差に対してほぼ直線的に変化することがわかった。一方、オフセットは温度に対し直線的な変化は見られなかったものの、再現性があることがわかった。以上の地上較正試験によって得られた感度とアライメント及びオフセットの決定精度は ERG の観測期間の大部分で観測要求を十分に満たすことがわかった。

* 平成 28 年 11 月 24 日受付 (Received 24, November, 2016)

^{*1} 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系
(Department of Solar System Science / Institute of Space and Astronautical Science)

^{*2} 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
(Institute for Space-Earth Environmental Research / Nagoya University)

1. はじめに

地球磁気圏は、地球起源の磁場が支配的な領域である一方で、太陽活動に応じて活発に変動する。地磁気の変動によって、地球近傍の宇宙空間に存在するプラズマの運動も変化する。地球近傍の内部磁気圏(地球半径 $10R_E$ 以内)には、放射線帯と呼ばれる数百keVから数MeVの高エネルギープラズマが集まる領域が存在する。放射線帯は内帯($2R_E$ 程度)と外帯($3-7R_E$)領域に分けられ、外帯は地磁気の変動に応じて生成・消滅を繰り返している。この放射線帯の生成・消滅機構を解明するために、ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) 衛星が2016年12月20日に打ち上げられた。

ERG衛星は、遠地点 $5.2R_E$ 、近地点高度300km、傾斜角31度の軌道に投入され、ノミナル7.5rpm (8秒) でスピンをしながら地球磁気圏のプラズマや電磁場を計測する。ERG衛星には4つの電子計測器(LEP-e, MEP-e, HEP-e, XEP-e)と2つのイオン計測器(LEP-i, MEP-i)が搭載されている。電子とイオンはそれぞれ12eVから20MeV、 $10eVq^{-1}$ から $180ke Vq^{-1}$ までの幅広いエネルギー範囲での計測が可能となっている。また、電場とプラズマ波動を観測するPlasma wave experiments (PWE)と磁場を計測するMagnetic field experiments(MGF)も搭載されている。さらに、新規に開発されたソフトウェア型波動粒子相互作用解析装置(S-WPIA)も搭載される。内部磁気圏で、幅広いエネルギー範囲のプラズマと磁場・電場を計測し、波動現象を観測することにより、放射線帯のダイナミクスを明らかにすることができる^[1]。

内部磁気圏の磁場の変動はプラズマの運動に影響を及ぼすため、背景磁場強度を精密に計測する必要がある。ERG衛星の科学観測目標達成のために、地心距離 $2R_E$ 以遠の領域において磁場の方向は1度以内、強度は5nT以内の高精度で背景磁場を計測することが求められている。ERG衛星に搭載されるMGFは、衛星内部に組み込まれる電気回路部(MGF-E)と3成分の磁場を計測することのできるセンサ部 (MGF-S) で構成される。ERG/MGFの基本仕様をTable1にまとめる。衛星由来の人工的な磁場ノイズを避けるため、MGF-Sは伸展マストの先端に取り付けられ、ERG衛星から約5m離れた場所で背景磁場を計測する。MGFが計測する磁場のおおよその感度は、MGF-Sを構成するピックアップコイルの巻き数とMGF-E内にあるフィードバック抵抗によって決定することができるが、ERG衛星の観測要求を満たすためには、より正確にMGFの絶対感度を求める必要がある。また、MGF-Sは、3つの単軸センサをセンサ台座に取り付けることによって磁場の空間3成分を計測することができるが、センサ台座取り付け時に、直交座標系から微小なずれ (ミスアライメント) が生まれる。つまり、MGFが磁場計測時に出力する磁場の生データは非直交系となる。これら絶対感度と、ミスアライメントは、MGF-S周りに向きと大きさが正確にわかっている外部磁場を与え、それに対するMGFの出力値を調べる地上較正試験によって導出することができる^{[2],[3]}。

地上較正試験で求めるもう一つのパラメータとしては、オフセットが挙げられる。観測時のMGFの出力は、外部磁場とMGF固有のオフセットの重ね合わせとなっている。オフセットは磁場がゼロ近くの安定した環境のもとで評価することができる。地上較正試験では、感度・アライメント・オフセットの評価に加え、感度とオフセットの温度変化についても調べる。ERG衛星に搭載されるMGF-Sは、マスト伸展後に温度環境の厳しい宇宙空間に直接さらされる。日照・日陰による温度変化によって、MGF-Sを構成する部品が伸縮し、感度やオフセットが繰り返し変化する。そのため、地上試験では複数サイクルの温度変化によって温度特性を把握する必要がある。

ERG衛星に搭載されるMGFセンサのフライトモデルの「感度・アライメント」試験は、2016年3月2日から5日の日程で宇宙航空研究開発機構・筑波宇宙センターの磁気試験棟において実施された。また「オフセットと感度の温度特性試験」は2016年2月8日から12日の日程で宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

・磁気遮蔽室にて実施された。本レポートでは、これらの地上較正試験の試験結果についてまとめる。

Table1: ERG 搭載 MGF の基本仕様

項目	仕様
センサー	リングコア型・3軸フラックスゲート
ドライブ周波数	11kHz
ダイナミックレンジ	レンジ-0: $\pm 8000\text{nT}$ レンジ-1: $\pm 60000\text{nT}$
分解能 (20ビット精度)	レンジ-0: 114pT レンジ-1: 15pT
ノイズ密度	$< 10.5\text{pT/Hz}^{-0.5}@1\text{Hz}$
サンプリング周波数	256 Hz

2. ERG MGF の概要

2.1. MGF センサについて

ERG搭載MGFは、フラックスゲート方式の磁力計が採用されている。フラックスゲート方式の磁場計は、磁気飽和特性を持つ強磁性体のある周波数 f_0 で励起した時、磁束密度の時間微分の $2f_0$ 成分が外部磁場に比例した振幅を持つことを利用している。^{[2],[3],[4]}

ERG搭載MGFセンサには、円環型の強磁性体を用いたリングコアセンサが採用されている。リングコアには円環に添ってドライブ(励起)コイルが巻かれている。円環の一つの動径方向を軸にドライブコイルの外側に巻かれたピックアップコイルに、磁束密度の時間変化による電圧が生じる。電圧の振幅がピックアップコイルの軸に沿った外部磁場に相当する。このリングコア1軸フラックスゲートセンサ3つを互いの測定軸が直交するようにセンサ台座にとりつけることによって、3次元の磁場を計測することができる。

2.2. MGF 回路部について

フラックスゲート方式による磁場の計測方法は、 $2f_0$ 成分である2次高調波の振幅を直接計測して磁場を求めることも可能であるが、ダイナミックレンジが大きく取れないこと、線形性に劣ることから一般的には、2次高調波の振幅が0となるように3次コイルに電流を流して消去磁界をつくり、電流量を測る事により磁場を求める方法(ゼロ磁場法)を取る^[2]。ERG/MGFも、後者のゼロ磁場法を採用している。

Fig.1は、ERG/MGFのブロックダイアグラムを示している。センサのピックアップコイルから出力される小さな電気信号をアンプによって増大させ、外部磁場に由来する2次高調波信号をBandpass filterによって選別する。さらに位相検波器によって整流し、電圧を積分する事によって、外部磁場に由来の電圧を取得する。この出力電圧を電圧電流変換器によって電流に変換して、MGF-Sのピックアップコイルに流す事によってMGF-Sの外部磁場を打ち消す。ERG/MGFの電子回路部は、水星探査衛星(MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter)に搭載されているものと同様の設計を採用している^{[5],[6]}。

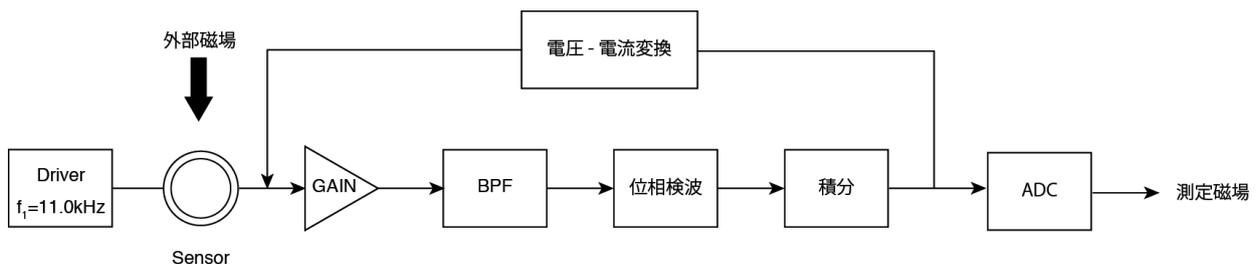


Fig.1 フラックスゲート磁力計信号の流れ (MGF 回路部の概略図)。

3. 地上較正試験

3.1. 感度・アライメントの決定

3.1.1. 原理及び方法

本地上較正試験の磁力計センサのアライメント及び感度決定方法の原理は、Acuna^[7]により考案された。この試験では、ほぼ安定して磁場がゼロに保たれた環境下で、MGF-S周りに既知の磁場を印加させてMGF-Sの出力値を測定することによって感度とアライメントを決定する。磁場印加には、3軸のヘルムホルツコイルを用いる。ヘルムホルツコイルとMGF-Sの各3軸は未知のミスアライメントを持つため非直交系となる。そこで、直交座標系をもつ2つのアライメントミラー（角度精度0.1°以下）を介して、ヘルムホルツコイルとMGF-Sの大体の方向を合わせる。ここで簡単のため、ヘルムホルツコイルに取り付けられたアライメントミラーをコイルミラー、MGF-S側に取り付けられたアライメントミラーをセンサミラーと呼ぶ。

3軸ヘルムホルツコイルの座標系からコイルミラーへの変換行列を $\vec{\delta}$ 、センサミラーからMGF-S座標系への変換行列を $\vec{\varepsilon}$ 、コイルミラーからセンサミラー座標系の変換行列を $[\mathbf{K}]$ 、MGF-Sが持つ固有のオフセットを $[B_{o,i}]$ ($i=x,y,z$)(nT)とすると、感度 $[A_i]$ (nT/digit)、印加磁場 $[B_i]$ (nT)、MGF-Sの出力値 $[M_i]$ (digit)には以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \vec{\varepsilon} \cdot \mathbf{K} \cdot \vec{\delta} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{o,x} \\ B_{o,y} \\ B_{o,z} \end{pmatrix} \quad (1)$$

センサミラーと、コイルミラーは水準器とレーザー光源を使って調整することによって、ミラー同士を数分以内の精度で一致させることができる。また印加磁場の強度は0.1%以内で正確にコントロールできる。 \mathbf{K} はコイルミラーの座標系に対するセンサミラー座標系の設定によって決まる。式(1)によれば、出力値 M_i は印加磁場 B_i に対して線形となっている。ある設定 \mathbf{K} において B_i の大きさを変化させて、出力値 M_i の変化量を計測することによって、 $B_{o,i}$ の項を考慮する必要がなくなる。従って式(1)の未知数は、 $\vec{\varepsilon}$ 、 $\vec{\delta}$ 、および A_i の合計21個となる。アライメントコイルの1軸にのみ磁場を印加すると式(1)から3つの独立の方程式が得られる。ある設定 \mathbf{K} においてアライメントコイルの3軸それぞれに磁場を印加することによって、9つの独立した方程式を得ることになる。

次にコイルミラー軸-印加コイル軸、センサミラー軸-センサ軸のずれの角度をそれぞれFig. 2のように、 θ_i 、 ϕ_i 、 ψ_i 、 λ_i とする。

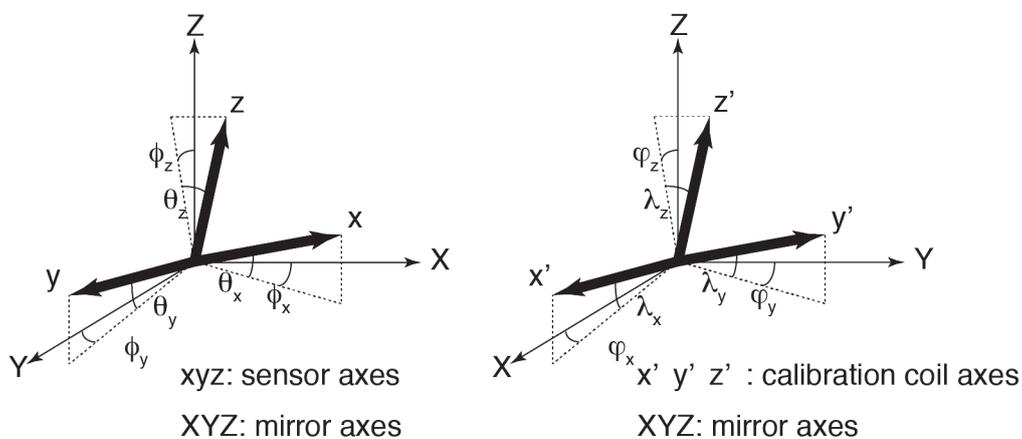


Fig.2 直交座標軸と非直交座標軸がなす角。左図：MGF-S (xyz:非直交系)とセンサミラー座標系 (XYZ:直交系)の関係。右図：ヘルムホルツコイル(x'y'z':非直交系)とコイルミラー座標系 (XYZ:直交系)の関係。

これらの角度と、 $\vec{\varepsilon}$ 、 $\vec{\delta}$ の関係は、

$$\vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & 1 + \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & 1 + \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_x \cos \phi_x & \cos \theta_x \sin \phi_x & \sin \theta_x \\ \cos \theta_y \sin \phi_y & \cos \theta_y \cos \phi_y & \sin \theta_y \\ \cos \theta_z \sin \phi_z & \sin \theta_z & \cos \theta_z \cos \phi_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{\delta} = \begin{pmatrix} 1 + \delta_{xx} & \delta_{xy} & \delta_{xz} \\ \delta_{yx} & 1 + \delta_{yy} & \delta_{yz} \\ \delta_{zx} & \delta_{zy} & 1 + \delta_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \lambda_x \cos \varphi_x & \cos \lambda_y \sin \varphi_y & \cos \lambda_z \sin \varphi_z \\ \cos \lambda_x \sin \varphi_x & \cos \lambda_y \cos \varphi_y & \sin \lambda_z \\ \sin \lambda_x & \sin \lambda_y & \cos \lambda_z \cos \varphi_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表すことができる。アライメント行列 $\vec{\varepsilon}$ の行、 $\vec{\delta}$ の列は単位ベクトルであることを考慮すれば、 $\vec{\varepsilon}$ と $\vec{\delta}$ からそれぞれ3組、計6組の方程式を得る。以上より合計15個の方程式が得られる。

次に任意の軸を中心にMGF-Sを90°回転して \mathbf{K} を変え同様の操作を行うと、新たに9つの方程式を得るが、回転軸方向に関連する3組の方程式は互いに線形従属になるため、前回の設定とアライメント行列の関係と合わせて24個の方程式が得られる。未知数よりも多い数の方程式を得ることができるが、この場合には解くべき式が複雑になるので、さらに回転させて \mathbf{K} を3つ目の設定にして関係式を増やすことによって、容易に解を求めることができる。以上の磁場センサの感度・アライメント評価方法は、GEOTAIL衛星搭載用磁場計測器^[8]の他、「のぞみ」搭載磁場計測器MGF^[9]、かぐや搭載用磁力計(LMAG)^[10]、BepiColombo MMO搭載磁場計測器MGFセンサの校正試験でも実施されている。

各要素に関する解の導出法の詳細については付録を参照のこと。また、本試験において、印加した磁場の大きさをTable 2に、3つの \mathbf{K} の設定をFig. 3に示している。

Table 2. 本試験における印加磁場の値

Range	印加磁場 (nT)
レンジ-0: ±8000nT	0, ±7000, ±5200, ±2600
レンジ-1: ±60000nT	0, ±50000 ±3000

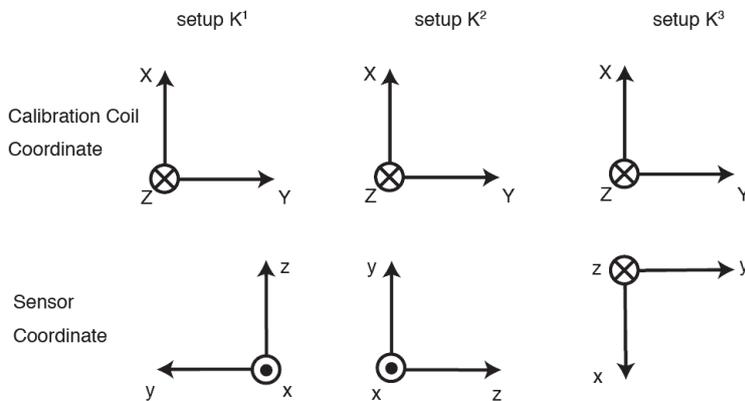


Fig. 3 各設定におけるコイルとセンサーの関係

3.1.2. 試験実施状況

試験は宇宙航空研究開発機構・筑波宇宙センターの大型磁気試験設備で行われた。試験設定状況の概観を Fig. 4 に示している。この設備近傍にある磁力計によって計測された背景磁場に応じ、直径約 15m の 6 つのブラウンバック型の主コイルに電流が流れ、主コイルの中心部分で地球磁場を消去することができる。主コイルの中心では $0 \pm 0.5 \text{ nT}$ の安定したゼロ磁場環境が提供される。この地磁気消磁用のコイルの中心には、X 軸:直径 2m、Y 軸:直径 2.2m、Z 軸:直径 2.4m の較正用のヘルムホルツコイル(弱磁界副標準装置コイル部:写真 1) が設置されている。このヘルムホルツコイルによって、コイル中心部分で任意の方向と大きさに印加することができる。ヘルムホルツコイルは、精度 0.1% 以内で正確に磁場強度をコントロールできる。計測を実施する前にヘルムホルツコイルに、コイルミラーとなるアライメントミラーを取り付けた(写真 3)。コイルミラー取り付け時には、水準器を用いてコイルミラーの水平調整を行っている。

このヘルムホルツコイルの中心に、MGF-S が取り付けられた回転台を固定して設置する(写真 2)。回転台にはセンサミラーとなるアライメントミラーが取り付けられている。センサミラーの高さが 3 つの設定で変わらないように、センサミラー取り付け部分は、センサ取り付け部分より 45mm 程度高さを持った台となっている。この回転台は、MGF-S 台座の底面とねじ穴位置で規定される直交座標系がミラーと一致することを目的として、MGF-S 台座取り付け面をミラーの一面と 0.05 度以内で一致させる条件と、MGF-S 台座のねじ穴が作る直線をミラー面と 0.05 度以内の精度で平行にする条件を満たすように設計されている。MGF-S は回転台を回転させ、レーザー光と水準器によって調整することで正確に 90° 回転することができる。MGF-E は測定の際にノイズ源にならないように、ヘルムホルツコイルから 4m 程度離れた場所に設置されている。回転台に取り付けられたセンサミラーの面と磁場印加コイルに取り付けられたコイルミラーの面を 16m 離れたレーザー光源(写真 4)によって合わせ、高精度の水準器を用いて、アライメントミラーの座標軸の方向を数分以内の精度で一致させる。アライメントミラー同士を合わせたのちに、ヘルムホルツコイルの各軸に磁場を印加し、MGF の出力値を記録する。計測が終了したら、回転台を回転し、MGF-S の座標軸の方向を変更して、ミラーの再調整を行い、印加磁場に対する MGF の出力を再度計測する。 $\pm 8000 \text{ nT}$ レンジの試験は 3 回行い、 $\pm 60000 \text{ nT}$ レンジでの試験は 2 回実施した。試験時の室温は 21.4°C であった。



写真 1: 較正用印加ヘルムホルツコイルとその中心に設置された回転台。回転台には MGF-S が取り付けられている。



写真 2: MGF-S を取り付けた回転台。この写真では設定 K^3 に設定されている。アライメントミラー (センサミラー) は写真左上の回転台に取り付けられている。



写真 3: 印加コイルに取り付けられたアライメントミラー (コイルミラー)

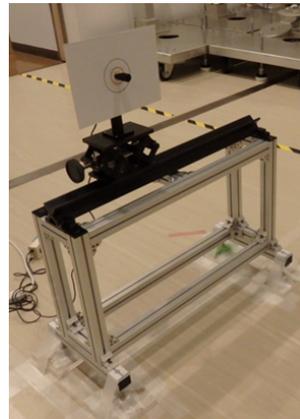


写真 4: レーザー光源。レーザー光源はレーザー台の上に乗っている。光源をレーザー台上で動かして 16 m 離れた 2 つのアライメントミラーを調整する。

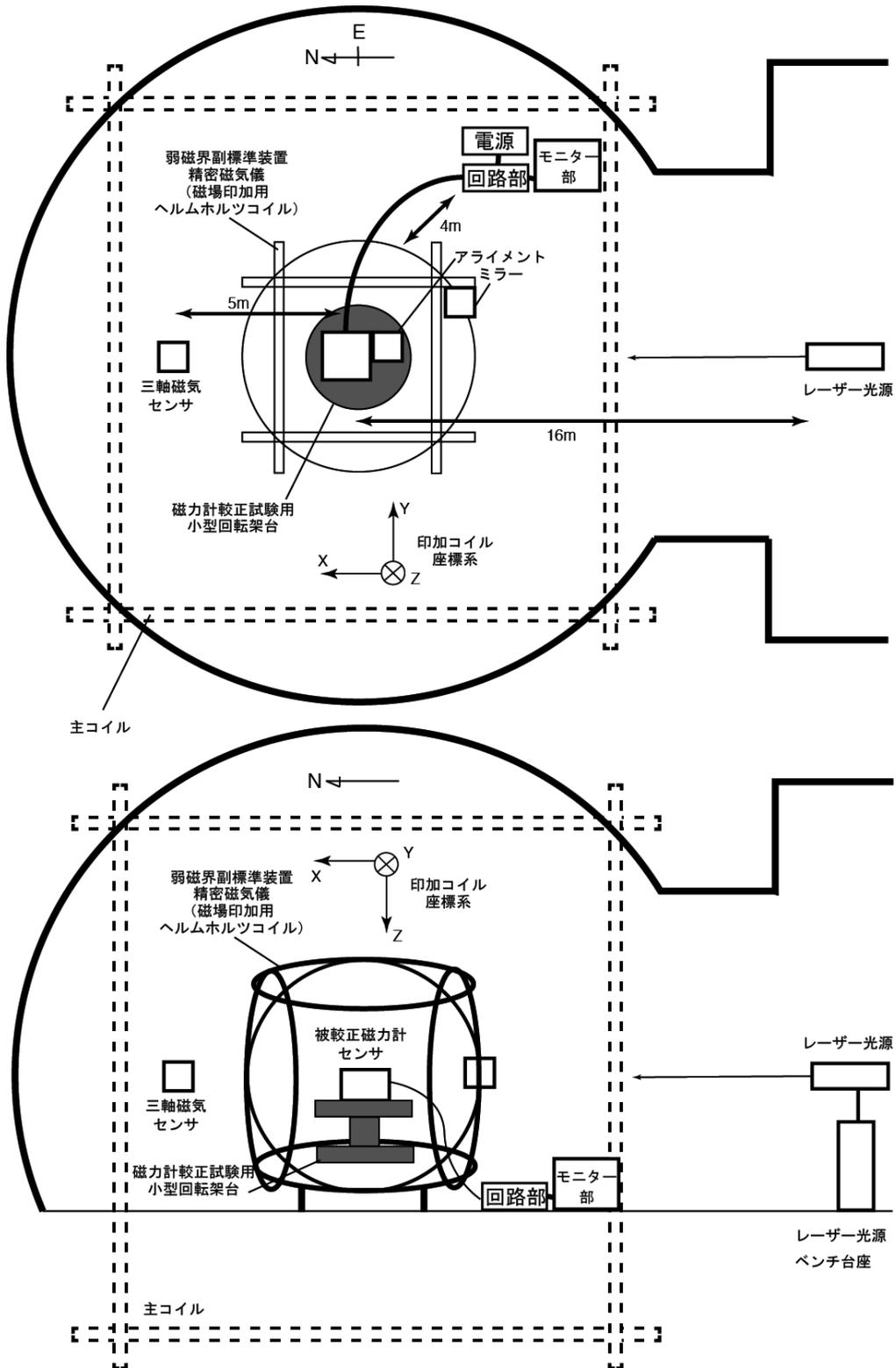


Fig.4: 感度・アライメント較正試験の設備概要

3.1.3. 試験結果

±60000nTレンジと±8000nTレンジの1回目の計測によって得られた印加磁場 B_i に対する出力 M_i の関係をFig 5とFig 6にそれぞれ示す。各印加磁場に対する出力値 M_i は10秒平均値を用いている。式(1)で期待されるように、 M_i は B_i に対し直線の関係であることがわかる。±60000nTの2回目と、±8000nTの2・3回目の結果も同様に直線の関係が得られている。これら M_i と B_i の関係から推定される回帰直線の傾きから、出力値の行列が決定される。回帰直線モデルと測定値の標準誤差は0.05%以下であった。

以上の測定データをもとに式(1)、(2)、(3)で得られた±60000nTレンジでの感度と相対誤差をTable 3に示す。X軸およびZ軸の感度は、2回の測定で得られた値に大きな差はなく、精度よく感度を決定できている。誤差は0.04%以下である。一方、Y軸の誤差は、X軸・Z軸よりも大きく1回目で0.14%、2回目で0.07%であった。また2回の測定には0.0002(nT/digit)の感度の差があった。Y軸成分の±60000nTの感度としては、各軸の相対誤差が0.07%以下となる2回目の値を採用するのが妥当である。

Table 3:地上校正試験によって得られた感度(±60000nTレンジ)。21.4°Cで計測を行っている。

	X軸		Y軸		Z軸	
	感度 (nT/digit)	誤差 (%)	感度 (nT/digit)	誤差 (%)	感度 (nT/digit)	誤差 (%)
1回目	0.1072	0.03	0.1055	0.14	0.1137	0.04
2回目	0.1072	0.03	0.1057	0.07	0.1137	0.04

±8000nTレンジの感度をTable 4に示す。3回の測定で得られた結果にばらつきはなく、精度よく感度を推定する事ができている。また、±8000nTレンジの誤差は、各軸ともに0.06%以下となっている。これは測定軸に沿って、±8000nT程度の磁場がかかったときに、感度決定誤差によって生じる磁場の誤差が±4.8nT程度となることを意味し、絶対値の要求精度である5nTと同程度となる。感度決定誤差によって生じる磁場の誤差は磁場強度に比例し、±8000nTより磁場が弱い場合には誤差は小さくなる。ERG衛星が科学的成果を出す観測領域は地心距離 $2R_E$ 以遠であり、磁場強度は8000nTより小さいため、ERG衛星の観測期間の大部分で観測要求（磁場強度5nT以下）を満たす観測が出来る。

Table 4:地上校正試験によって得られた感度(±8000nTレンジ)。21.4°Cで計測を行っている。

	X軸		Y軸		Z軸	
	感度 (nT/digit)	誤差 (%)	感度 (nT/digit)	誤差 (%)	感度 (nT/digit)	誤差 (%)
1回目	0.01464	0.05	0.01447	0.06	0.01555	0.05
2回目	0.01464	0.06	0.01447	0.06	0.01555	0.05
3回目	0.01464	0.06	0.01447	0.06	0.01555	0.05

それぞれのレンジにおけるMGF-SのアライメントをTable 5にまとめている。推定したアライメントのばらつきは、±60000nTレンジの2回の計測、±8000nTレンジの3回の計測でそれぞれ0.03°以内となり精度よく推定できている。またZ軸はレンジ間でアライメントに差が見られなかったが、X軸・Y軸は θ_x と θ_y にそれぞれ0.56°と0.11°の差がレンジ間で生じた。Table 6にセンサ軸間角度を示している。∠XYはレンジによらず、ほぼ一定の値をとるが、∠YZ、∠ZXでは±8000nTレンジの方がそれぞれ0.1°と0.54°軸間角度が大きくなっている。各レンジでは軸間角度∠YZ、∠ZXに大きなばらつきは見られなかった。以上より取得した磁場データ較正の際にはレンジ毎に適応するアライメントを変える必要があることがわかった。Table 5に示すように解析によるアライメントの推定誤差は、すべてのレンジや軸で0.03°以下となっている。

上記で求めた解析誤差の他に、実験装置によって生じる誤差についても評価を行う。MGF-S取り付け面とミラーの取り付け面が精密に平行になるように回転台の搭載面は平行かつ平面に製造されているが、厳密には回転台は平面にならない。この回転台の平面からのずれ（平面度）が、ミラーを調整する際に、アライメントの誤差を生む。150mm四方の大きさを持つ回転台全面での平面度は0.012mmである。またセンサミラーを載せる面は16mm四方において0.004mmの平面度を持ち、50mm四方のセンサ接触部は、0.006mmの平面度を持つ。以上を合計すると、回転台の平面からのずれによって生じるアライメント誤差は、0.03°以下となる。また、

アライメントミラー調整の際には光路誤差より誤差を生む。アライメント調整時には、アライメントミラーに反射された光を、1cm以内で光源と一致するように回転調整が行われている。レーザー光源からアライメントミラーまでの光路長は約16mであるため、アライメント調整による誤差は 0.04° 以下となる。

解析による誤差と実験装置によって生じるアライメント誤差を合計すると、誤差は 0.07° 以下となる。以上より、ERG衛星の磁場観測要求精度である 1° を十分満たしてアライメント推定する事ができた。

Table 5: MGF-Sのアライメント測定結果 (単位: $^\circ$)

		X軸		Y軸		Z軸	
		θ_x	ϕ_x	θ_y	ϕ_y	θ_z	ϕ_z
±60000 レンジ	1回目	-0.16 ± 0.03	0.22 ± 0.005	0.28 ± 0.002	-0.41 ± 0.01	-0.13 ± 0.02	-0.25 ± 0.01
	2回目	-0.15 ± 0.03	0.23 ± 0.003	0.26 ± 0.004	-0.43 ± 0.01	-0.12 ± 0.02	-0.26 ± 0.01
±8000 レンジ	1回目	-0.72 ± 0.01	0.22 ± 0.03	0.17 ± 0.002	-0.40 ± 0.005	-0.13 ± 0.007	-0.23 ± 0.03
	2回目	-0.72 ± 0.01	0.23 ± 0.03	0.15 ± 0.003	-0.42 ± 0.005	-0.12 ± 0.007	-0.23 ± 0.03
	3回目	-0.72 ± 0.02	0.25 ± 0.03	0.18 ± 0.004	-0.44 ± 0.006	-0.15 ± 0.006	-0.23 ± 0.03

Table 6: MGF-Sの軸間角度(単位: $^\circ$)

	$\angle XY$	$\angle YZ$	$\angle ZX$
±60000 レンジ	90.19	89.85	90.41
	90.20	89.86	90.41
±8000 レンジ	90.19	89.95	90.95
	90.19	89.97	90.95
	90.19	89.97	90.95

印加コイルのアライメント誤差をTable 7にまとめている。推定された印加コイルのX軸のアライメントは±8000nT・±60000nTレンジともに、 0.03° 以内のばらつきとなっている。一方、Y軸、Z軸に関しては1回目の計測と2回目の計測でアライメントが大きく異なっている。これは、1回目と2回目の計測の間に、ヘルムホルツコイルの東西方向の水平の再調整を行ったことが原因である。南北方向を軸として水平調整を行ったことで、ヘルムホルツコイルはX軸周りに回転したことになり、Y軸Z軸それぞれのアライメントに差が出たと推定される。この印加コイルのアライメントを、軸間角度に換算した (Table 8)。Table 8に示すように、軸間角度では、1回目と2回目の計測で明確な差は見られなかった。軸間角度のばらつきはレンジ・計測によらず 0.01° 以下となり、軸間角度は精度よく推定できていると言える。Table 8の下段には、のぞみ/MGF-PM^[8]、のぞみ/MGF-FM^[9]、かぐや/LMAG^[10]、それぞれの地上較正試験結果から導出された印加コイルの軸間角度を示している。各衛星の磁場観測器の較正試験は、本試験と同様の施設と手法が用いられている。かぐや/LMAGの較正試験で導出された軸間角度と本試験の結果は、独立の試験であるにも関わらず、すべての成分が 0.02° 以内で一致している。一方、のぞみ/MGF-FMの結果と比較すると、 $\angle YZ$ と $\angle ZX$ はほぼ一致し、 $\angle XY$ とは 0.06° の差がある。また、のぞみ/MGF-PMの結果と比較すると、 $\angle YZ$ は一致しているが、 $\angle XY$ 、 $\angle ZX$ は 0.10° 以上の差があることがわかった。以上に述べた角度差は、印加コイルの経年変化が原因であると推測される。

Table 7: 磁場印加ヘルムホルツコイルのアライメント誤差測定結果 (単位: $^\circ$)

		X軸		Y軸		Z軸	
		ψ_x	λ_x	ψ_y	λ_y	ψ_z	λ_z
±60000 レンジ	1回目	-0.07 ± 0.02	0.44 ± 0.001	0.05 ± 0.02	-0.29 ± 0.02	0.05 ± 0.001	0.10 ± 0.10
	2回目	-0.04 ± 0.02	0.44 ± 0.001	0.42 ± 0.02	-0.29 ± 0.06	-0.42 ± 0.001	0.06 ± 0.05
±8000 レンジ	1回目	-0.07 ± 0.006	0.43 ± 0.002	0.05 ± 0.006	-0.29 ± 0.005	0.05 ± 0.002	0.09 ± 0.09
	2回目	-0.05 ± 0.006	0.43 ± 0.002	0.42 ± 0.006	-0.29 ± 0.02	-0.41 ± 0.002	0.06 ± 0.05
	3回目	-0.04 ± 0.007	0.42 ± 0.002	0.42 ± 0.006	-0.28 ± 0.02	-0.41 ± 0.002	0.05 ± 0.04

Table 8:磁場印加ヘルムホルツコイルと軸間角度 (単位:°)

		$\angle XY$	$\angle YZ$	$\angle ZX$
±60000 レンジ	1回目	89.86	89.99	89.97
	2回目	89.86	89.99	89.98
±8000 レンジ	1回目	89.86	90.00	89.98
	2回目	89.86	89.99	89.99
	3回目	89.86	89.99	89.99
のぞみ/MGF-PM (±256nTレンジ)		89.95	89.98	90.13
のぞみ/MGF-FM (±256 nTレンジ)		89.92	89.98	89.99
かぐや/LMAG (±65536 nT、±1024 nT、± 256 nTレンジの平均値)		89.84	89.98	89.97

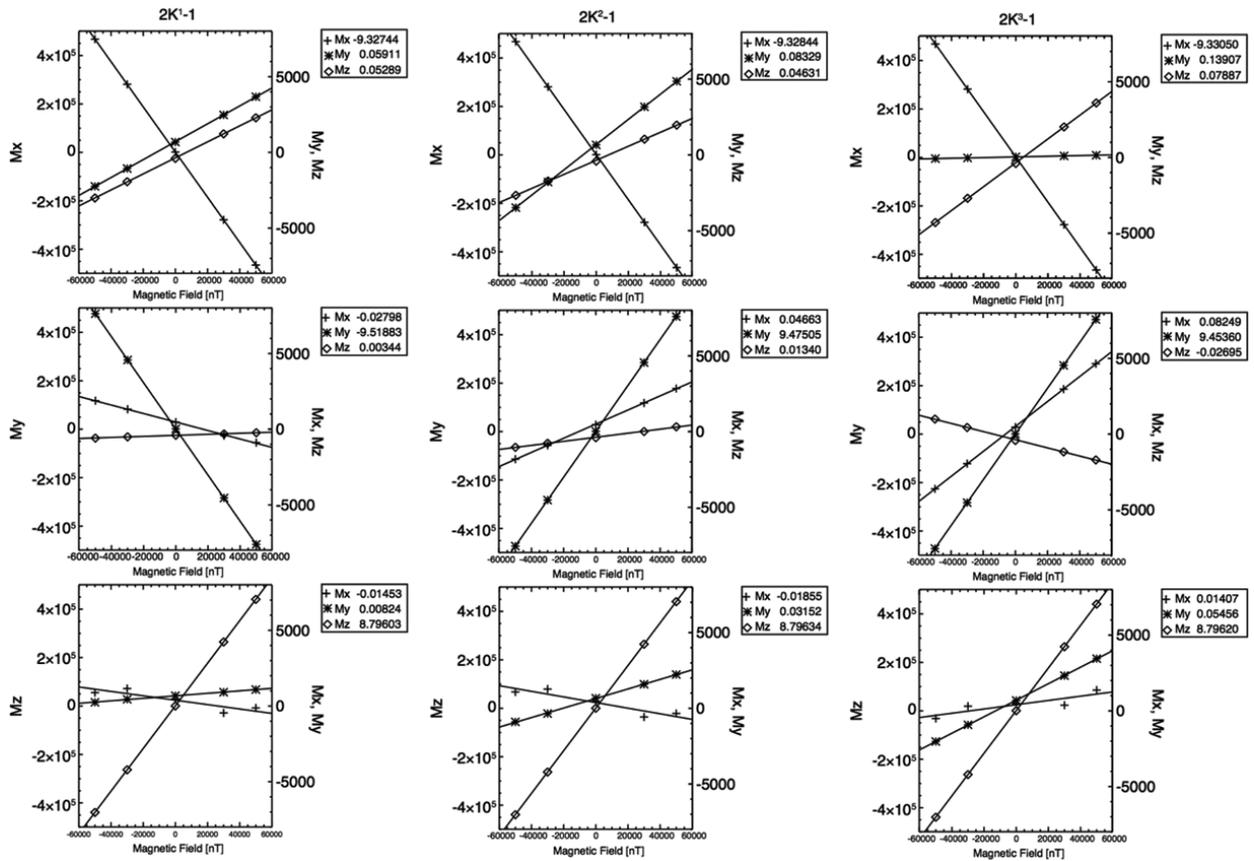


Fig.5 ±60000nT レンジでの印加磁場と出力の関係。左列が設定 K1、中列が設定 K2、右列が設定 K3 での計測示す。上段が MGF-S の X 軸方向、中段が Y 軸方向、下段が Z 軸方向に磁場が印加されている。各図、右上の数値は推定される回帰直線の傾きを示している。

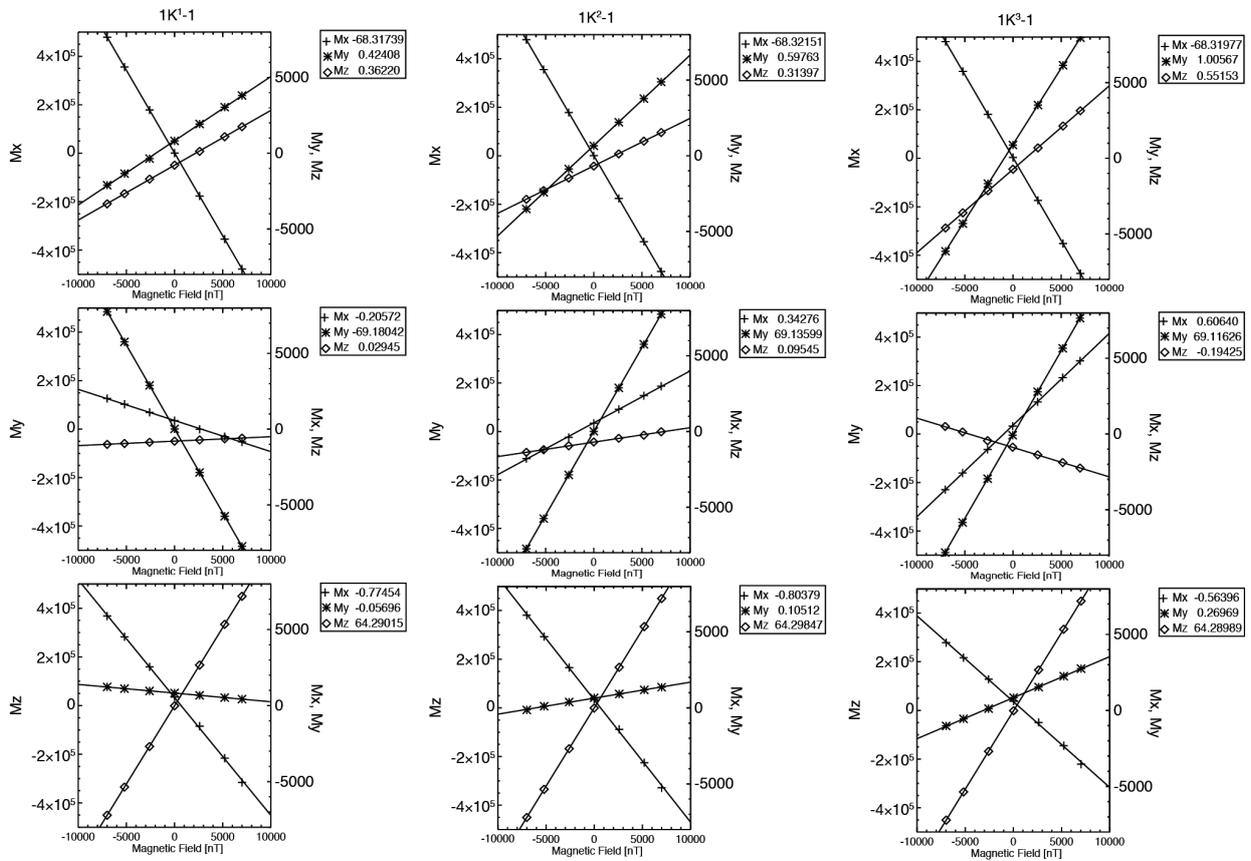


Fig.6 ±8000nT レンジでの印加磁場と出力の関係。図のフォーマットは Fig 5 と同様。

3.2. オフセット・感度温度試験

3.2.1. 原理・方法

3.1 章で述べた筑波試験センターでの較正方法では、アライメントミラーを用いてセンサアライメントと絶対感度を求めることが可能であった。しかし、センサ感度の温度変化を調べる試験ではアライメントミラーを用いることが出来ないため、3.1 章で述べた方法で絶対感度の温度依存性を調べることは出来ない。したがって、室温の感度に対する相対感度の温度依存性を求める試験を行うことによって、絶対感度の温度変化を評価した。また、同時にオフセットの温度依存性についても評価した。以下、相対感度とオフセットの温度試験の原理と方法を述べる。

安定して磁場をゼロに保った空間中で、ヘルムホルツコイルを用いて、時間的に安定した磁場 \mathbf{B}_{app} を印加する。印加する前後の磁場の出力値（デジタル値： \mathbf{M}_{app} ）の差分を計測することで、室温との相対感度を導出することができる。室温での出力とそれに含まれるオフセットを $\mathbf{M}_{app,o}$ 、 $\mathbf{M}_{0,o}$ とし、ある温度 t での出力とそれに含まれるオフセットを $\mathbf{M}_{app,t}$ 、 $\mathbf{M}_{0,t}$ 、室温とある温度における感度をそれぞれ、 \mathbf{a}_o 、 \mathbf{a}_t とする。背景磁場は温度によらず \mathbf{B}_{env} であるとすれば、 $\mathbf{M}_{app,o} = \mathbf{a}_o (\mathbf{B}_{app} + \mathbf{B}_{env}) + \mathbf{M}_{0,o}$ 、 $\mathbf{M}_{app,t} = \mathbf{a}_t (\mathbf{B}_{app} + \mathbf{B}_{env}) + \mathbf{M}_{0,t}$ なので、室温に対する温度 t における相対感度は以下のように表される。

$$\frac{\mathbf{a}_t}{\mathbf{a}_o} = \frac{\mathbf{M}_{app,t} - \mathbf{M}_{0,t}}{\mathbf{M}_{app,o} - \mathbf{M}_{0,o}} \quad (4)$$

磁力計のオフセットは、電気的なオフセット（電子回路部の直流出力として現れるオフセット）とセンサ部のオフセット（センサの帯磁、リングコアの B-H カーブの非対称性に起因するオフセット）がある。センサ部のオフセットは、背景磁場がゼロ近くに保たれた安定した空間中で、センサ測定軸を 180 度反転させ計測した測定値を平均することによってオフセットを評価できる。

安定して磁場が小さく(背景磁場: \mathbf{B}_{env})温度が t の環境下で、オフセット $\mathbf{M}_{0,t}$ をもつセンサを 180 度反転した場合、反転前後の MGF の出力をそれぞれ $\mathbf{M}_{n,t}$ と $\mathbf{M}_{r,t}$ とすると

$$\mathbf{M}_{n,t} = \mathbf{a}_t \mathbf{B}_{env} + \mathbf{M}_{0,t} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{r,t} = -\mathbf{a}_t \mathbf{B}_{env} + \mathbf{M}_{0,t} \quad (6)$$

という関係式が成り立つ。よって、オフセットは

$$\mathbf{M}_{0,t} = \frac{\mathbf{M}_{n,t} + \mathbf{M}_{r,t}}{2} \quad (7)$$

によって評価することができる。センサ周辺の温度を変化させ、 $\mathbf{M}_{n,t}$ 、 $\mathbf{M}_{r,t}$ 、 $\mathbf{M}_{app,t}$ を計測することにより、センサの相対感度とオフセットの温度依存性を求めることができる。

試験は、宇宙科学研究所・磁場遮蔽室で行った。試験設備の概要をFig. 7に示す。感度・オフセットの温度試験はMMO/MGFの温度試験と同様の装置を用いている^[6]。MGF-Sは台座から外された状態で3つのセンサの測定軸が平行になるようにセラミック製の円盤に取り付けられている(写真5)。温度モニター用の熱電対はホットベール円盤にコイルを挟む形で2箇所に取り付けられており、センサ周辺の温度を測定する。この円盤を保温瓶の中に入れセラミック製の蓋をした状態で保温瓶内の温度を上昇下降させながら試験を行う。保温瓶は印加コイルの間に設置され、各温度計測ポイントで、この印加コイルに20mAの電流を流すことによってセンサの測定軸にはほぼ平行な磁場を印加する。保温瓶および印加コイルは磁気チャンバー内に置かれ、地磁気などの外部磁場から遮蔽された状態となっている。磁気シールドチャンバーは、透磁率の高いパーマロイ製の球の3重構造になっており、磁気チャンバー内では数万nTの地磁場を遮蔽することができる。磁気シールドルーム内の背景磁場は30nT以下であり、磁場がゼロに近い安定した環境が実現されている^[11]。保温瓶および印加コイルは回転台の上に置かれており、この回転台をセンサの測定軸を含む面内で180° 回転し、磁場を計測することによってオフセット計測を行う。

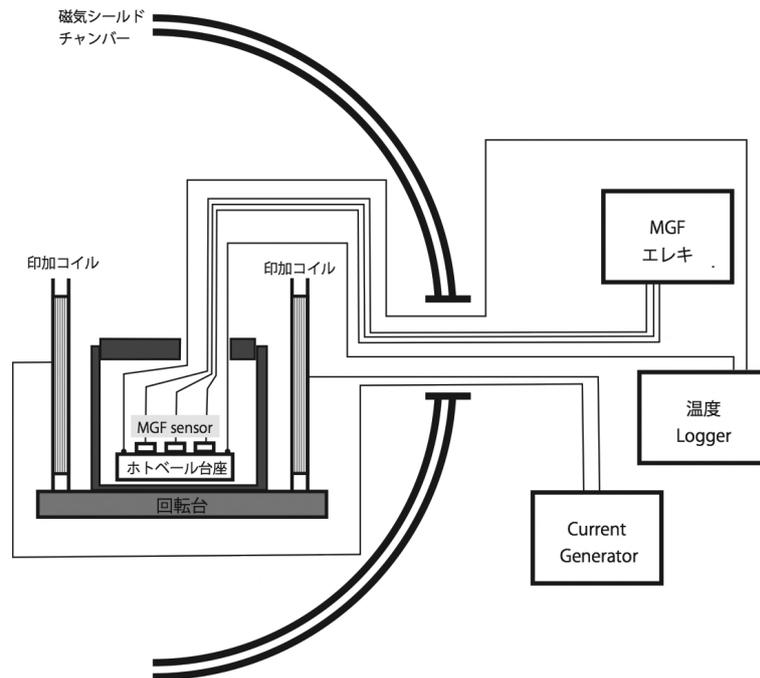


Fig. 7: 相対感度・センサオフセット温度試験の設置概略図

試験方法を Fig. 8 を用いて詳細に説明する。試験は、 5°C ずつ温度変化するごとに計測ポイントを設け「(a) 印加磁場なし」、「(b) 印加磁場あり」、「(c) 回転台座を 180° 回転させ、印加磁場なし」の 3 つの状態での磁場の出力と温度を記録する。それぞれの状態での MGF センサの計測軸、背景磁場、印加磁場の関係を Fig. 8 に示している。磁気シールドチャンバー内での背景磁場の方向は任意であるが安定しており、(a)~(c) それぞれの状態は速やかに設定されるため、背景磁場は方向と大きさは変化しないと考えてよい。Fig. 8(a) に示す状態(a)では、センサは紙面下方向に計測軸を持つため、背景磁場の紙面上下成分を計測する。この状態での各軸の出力が式(7)における $M_{n,t}$ となる。次に、Fig. 8(b) に示す状態(b)では、印加コイルに電流を流して紙面下方向に磁場が印加される。センサは状態(a)と同様に紙面下方向に計測軸を持つため、背景磁場と印加磁場を重ね合わせた紙面上下成分の磁場を計測することになる。この各軸の出力が式(6)における $M_{app,t}$ となる。Fig. 8(c) に示される状態(c)では、回転台座によって、センサと印加コイルを 180° 水平に回転させている。そのため MGF センサ各軸の計測軸は、状態(a)・(b)とは反対方向になり、紙面上向きが正となる。この状態での出力が式(7)における M_{rt} となる。

次に高温測定および低温測定の具体的な方法を述べる。高温側の測定は、保温瓶にパイプをとりつけ（写真 6）、ヒートガンで温風を瓶内に送ることによって、断熱容器内の温度を 45°C まで温度を上昇させる。 45°C の状態で 30 分保ち、保温瓶の中を十分に温めた後にヒートガンを取り外し、パイプ穴にセラミックファイバーを詰め密封し緩やかに保温瓶内の温度を下降させる。下降する温度をモニターでチェックしながら計測を行う。

低温側の測定は、ドライアイスによって、保温瓶内の温度を下降させることによって行う。保温瓶の底とホットプレート製の円盤の間に細かく砕いたドライアイス（およそ 90g ）を一様に敷き詰る。保温瓶を密封し（写真 7）、センサの結露を防ぐため、ポリ袋で保温瓶を密閉する。保温瓶内の温度が十分に下がり、上昇に切り替わるタイミングで計測を始める。

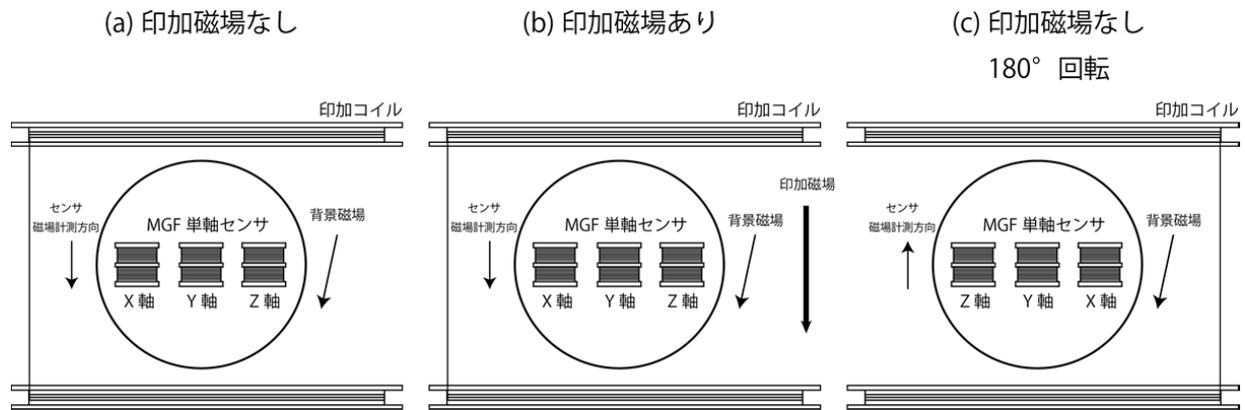


Fig. 8: 温度試験時の印加コイルと単軸センサ計測方向の関係

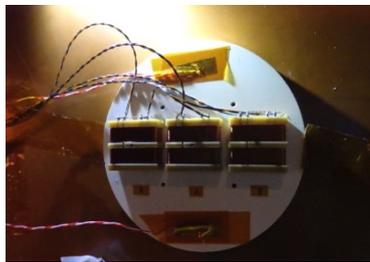


写真 5: 円盤のホットベールにセンサーが取り付けられている。左から X 軸、Y 軸、Z 軸。センサーの上下に熱電対が取り付けられている。



写真 6: 高温セッティング。保温瓶にパイプが取り付けられている。



写真 7: 低温側セッティング。保温瓶はドライアイスの気化により発生する CO₂ を抜くための小さな穴を除き、密閉されている。

3.2.2. 試験結果

上記の温度試験によって得られた相対感度・オフセットの温度の関係を Fig.9 と Fig.10 に示す。軌上で想定される MGF-S の温度範囲 -20°C から 30°C における試験結果を示している。温度試験は 3 サイクル (Cycle 1, Cycle 2, Cycle 3) 行い、解析には 8 秒平均値を用いた。

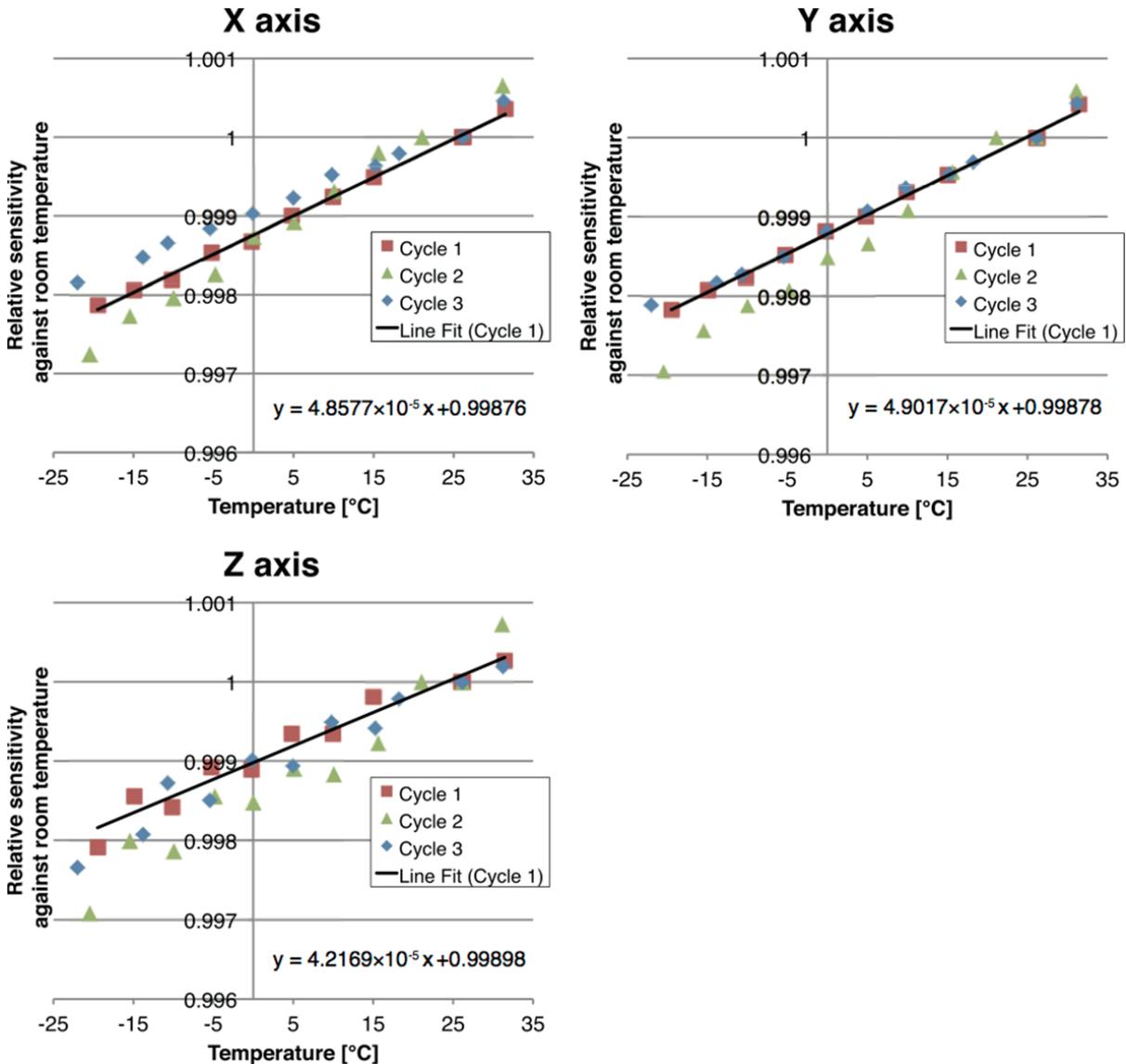


Fig.9: MGF-S の相対感度の温度依存性。図の直線は、Cycle1 の結果を用いて推定されている。

Fig. 9 によれば、温度上昇とともに相対感度も上昇することがわかる。これは、センサのピックアップ/フェイードバックコイル部に使われているポリミド線が熱膨張し、コイルのループ面積が大きくなることが主な原因であると考えられる。3 回の測定結果のうち、最も直線的な変化をした Cycle 1 に直線フィッティングを行うと、

$$\begin{aligned}
 r_x &= 4.8577 \times 10^{-5} t + 0.99876 \\
 r_x &= 4.9017 \times 10^{-5} t + 0.99878 \\
 r_z &= 4.2169 \times 10^{-5} t + 0.99998
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

が得られる。

この回帰直線モデルと測定値の差から導出される標準誤差をTable 9にまとめる。またこのセンサによって、8000nTの背景磁場を計測した際に温度較正誤差によって生じる磁場の誤差を、Table 10にまとめた。-20°Cから30°Cの間での誤差の最大値はZ軸で 1.6558×10^{-4} となる。X軸、Y軸の誤差は、Z軸の誤差の0.48倍、0.35倍程度となる。8000nTの背景磁場を計測した時、感度の温度補正によって、最大で1.3nT程度の誤差を生むことになる。

ERG衛星の軌道上でMGF-Sが-10°C以下となるのは、長期日陰が発生する限られた場合であり、観測の大部分で温度は-10°Cより高くなる。そこで、標準誤差を-20°Cから-10°Cの低温側、-10°Cから30°Cの高温側に分けて再評価し、結果をTable 10の下段にまとめた。特に誤差が大きかったZ軸は、高温側での誤差が 1.2742×10^{-4} となり、-20°Cから30°Cの場合に比べ、誤差は小さくなった。また、Fig.9 見られるように、Z軸の低温側の観測値は、回帰直線モデルと乖離が大きくなっている。そのため、低温側の標準誤差は、-20°Cから30°Cの場合に比べて2.3倍となっており、誤差が大きく見積もられている。8000nTの背景磁場を計測した場合、温度補正による誤差は、低温側で最大3.1nT程度、高温側で最大1nT程度となる。

Table 9: 回帰直線-測定値の標準誤差

	X軸	Y軸	Z軸
-20°Cから30°Cの標準誤差	$\pm 7.9943 \times 10^{-5}$	$\pm 5.8729 \times 10^{-5}$	$\pm 1.6558 \times 10^{-4}$
-20°Cから-10°Cの標準誤差	$\pm 1.7606 \times 10^{-4}$	$\pm 6.1742 \times 10^{-5}$	$\pm 3.8642 \times 10^{-4}$
-10°Cから30°Cの標準誤差	$\pm 6.6483 \times 10^{-5}$	$\pm 6.7367 \times 10^{-5}$	$\pm 1.2742 \times 10^{-4}$

Table 10: 背景磁場8000nTの場合の温度較正による誤差(単位:nT)

	X軸	Y軸	Z軸
-20°Cから30°C	±0.64	±0.47	±1.3
-20°Cから-10°C	±1.4	±0.49	±3.1
-10°Cから30°C	±0.53	±0.54	±1.0

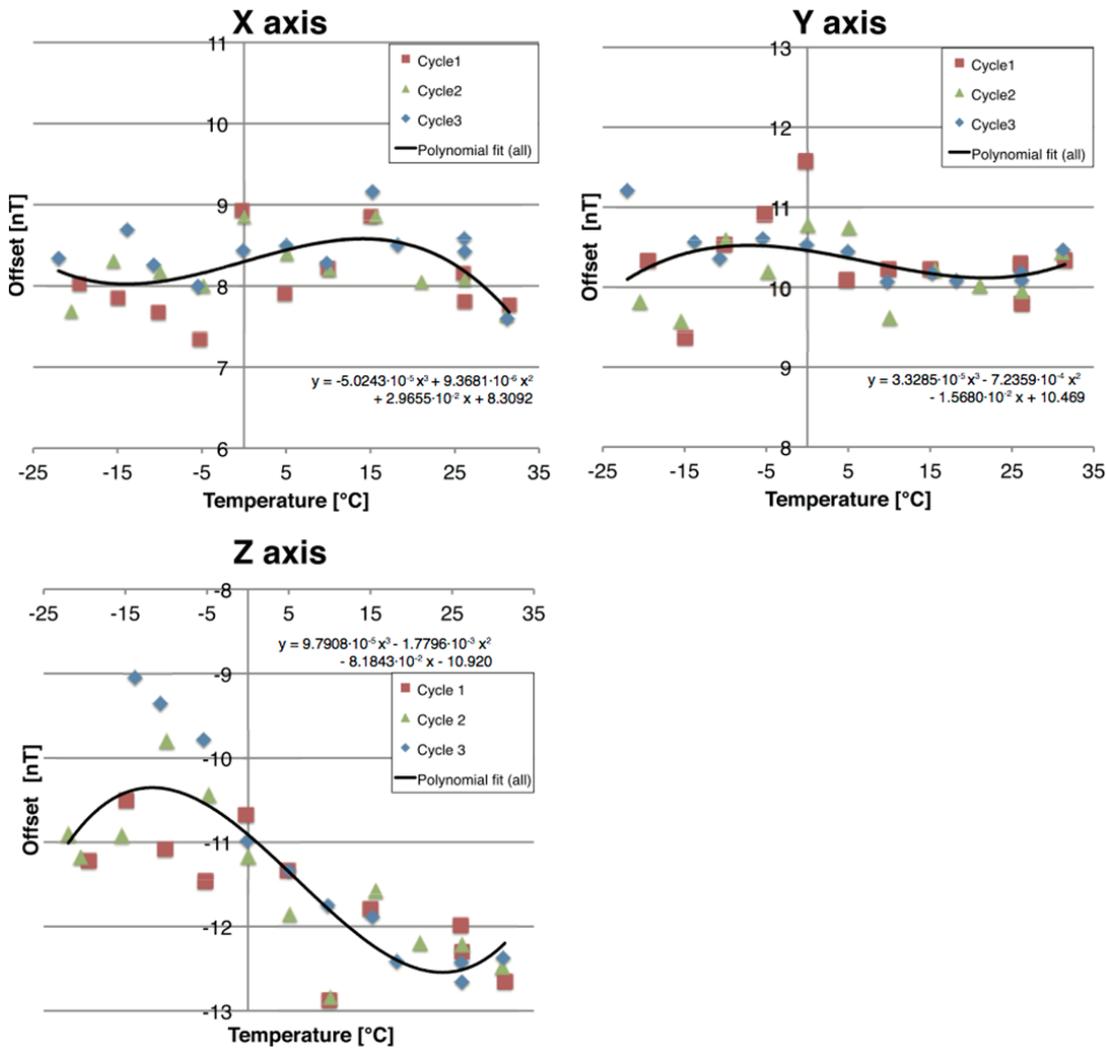


Fig. 10: オフセットの温度変化

Fig. 10に示すオフセットは、3.1章で求めた21.4°Cでの絶対感度と(8)に示す相対感度の温度変化関数を適応し、物理量に換算したものを示している。オフセットに関しては、相対感度で見られるような直線的な温度依存性は見られなかった。しかし、3回の測定において、ある温度で一定のオフセットに収束することから、オフセットは温度に対する再現性があることがわかった。

測定値全てを含めて多項式フィッティングを行った結果、以下に示す3次の関数でオフセットをモデル化することができた。

$$\begin{aligned}
 B_{x,o} &= -5.0243 \times 10^{-5} t^3 + 9.3681 \times 10^{-6} t^2 + 2.9655 \times 10^{-2} t + 8.3092 \\
 B_{y,o} &= 3.3285 \times 10^{-5} t^3 - 7.2359 \times 10^{-4} t^2 - 1.5680 \times 10^{-2} t + 10.469 \\
 B_{z,o} &= 9.7908 \times 10^{-5} t^3 - 1.7796 \times 10^{-3} t^2 - 8.1843 \times 10^{-2} t - 10.920
 \end{aligned} \tag{9}$$

多項式フィッティングで求められる曲線と測定値の誤差は、X軸、Y軸、Z軸でそれぞれ0.36nT、0.43nT、0.56nTであり、感度に関する観測要求精度を十分に満たす。

4. まとめと結論

ERG衛星に搭載されるMGFセンサの感度とアライメントを決定するために地上較正試験を行った。また決

定の際に感度とアライメントの誤差が ERG 衛星の観測要求を満たしているか検討を行った。既知の印加磁場に対する応答を調べることにより 3 軸すべての絶対感度を決定することができた。解析的に得られる絶対感度の誤差は、±8000nT レンジで 0.06% であり、8000nT の強度を持つ磁場を計測する際には、誤差が±4.8 nT 程度となる。ERG 衛星の主たる観測対象である地心距離 $2R_E$ 以遠の領域では磁場強度は 8000nT よりも小さいため、大部分の期間で要求精度 5nT 以下の観測が実現される。アライメントは各軸間で直交系から 0.95° 以内のミスアライメントを持つことがわかった。アライメント決定誤差は、解析誤差に加え、実験装置の誤差を考慮に入れると 0.07° 以下となるため、ERG 観測要求精度 1° を十分に満たす。

また、室温に対する相対感度とオフセットの温度依存性についても調べた。 -20°C から 30°C の間で、相対感度は温度上昇に応じて高くなり、直線にフィッティングすることができた。このモデル直線と観測データの標準誤差は 0.0016 以下となる。つまり、8000nT の磁場を計測する際に、温度変化による感度補正によって、1.3nT の誤差が生じる。以上より、感度決定誤差に加え温度変化補正誤差によって、8000nT の背景磁場を計測する時には、5nT の感度要求精度を満たさないことになる。一方で、MGF センサの温度が -10°C 以下になるのは ERG の軌道上に 60 分以上の日陰が発生する場合に限られており、それは打ち上げ後 400 日の間に 30 日間程度しか起こらない。さらに、長期間の日陰は ERG 軌道の遠地点付近で発生するため、磁場強度は 8000nT よりも十分に小さく、感度の誤差によって生じる磁場の計測誤差は 5nT より小さくなる。オフセットの温度変化に関しては、相対感度に見られるような明確な直線的な変化は見られなかったが、それぞれの温度に対して再現性があることがわかった。得られた測定結果から多項式フィッティングを行い、3 次の温度項を持つオフセットモデルを得ることができた。このモデルによる推定誤差は、0.56nT 以下になる。

以上の地上校正試験で得られた結果に加え、衛星のスピンの利用して機上校正を行うことで、ERG ミッションで要求される精度を満足する磁場観測が可能であるとの結論に至った。

謝辞

フラックスゲート方式磁場観測器(MGF)のセンサの設計・製作にあたっては、(有)テラ・テクニカ、電子回路部の設計・製作・試験には住友重機械工業株式会社のご協力を得ました。また、絶対感度及びアライメント試験には筑波宇宙試験センターにご尽力いただきました。本レポートの執筆にあたりましては、京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターの能勢正仁先生にご助言をいただきました。また、本研究は JSPS 科研費・基盤研究(B)JP16H04057 の助成を受けたものです。関係機関、関係各位に対しここに感謝いたします。

参考文献

- 1) Miyoshi, Y., T. Ono, T. Takashima, K. Asamura, M. Hirahara, Y. Kasaba, A. Matsuoka, H. Kojima, K. Shiokawa, K. Seki, M. Fujimoto, T. Nagatsuma, C. Z. Cheng, Y. Kazama, S. Kasahara, T. Mitani, H. Matsumoto, N. Higashio, A. Kumamoto, S. Yagitani, Y. Kasahara, K. Ishisaka, L. Blomberg, A. Fujimoto, Y. Katoh, Y. Ebihara, Y. Omura, M. Nose, T. Hori, Y. Miyashita, Y. Tanaka, T. Segawa and ERG Working Group, The Energization and Radiation in Geospace (ERG) project, Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere, Geophysical Monograph Series, 199, edited by D. Summers, I. R. Mann, D. N. Baker, and M. Schulz, AGU, Washington, D. C, 2012, 103-116.
- 2) 友田好文、鈴木弘道、土屋淳(編)、地球観測ハンドブック、東京大学出版社、1985、785-793.
- 3) Ripka P. (Ed) – Magnetic sensors and magnetometers, Artech House, 2001.
- 4) 松岡彩子、2-2 磁場計測、S4 群 5 編宇宙エレクトロニクス、電子情報通信学会『知識の森』、2011、3-15.
- 5) Matsuoka, A., M. Shinohara, Y. Tanaka, A. Fujimoto, and K. Iguchi, Development of fluxgate magnetometers and applications to the space science missions, *Science Instruments for Sounding Rocket and Satellite*, edited by K.-I. Oyama and C. Z. Cheng, Terra Sci., Tokyo, Japan, 2013, 217-225.
- 6) 西尾泰徳、碓井瑞、遠山文雄、松岡彩子、水星探査衛星搭載用フラックスゲート磁力計の広範囲温度試験、東海大学紀要工学部、46(2)、2006、123-128.
- 7) Acuna, M.H., MAGSAT – Vector Magnetometer Absolute Sensor Alignment Determination, NASA Goddard Space Flight Center X-754-83-9, Sept. 1978.
- 8) 山本達人、國分征、GEOTAIL/PLANET-B MGF チーム、衛星搭載弱磁場計測磁力計の地上校正、宇宙科学研究所報告、第 88 号、1996 年 8 月。

- 9) SELENE LMAG/PLANET-B MGF チーム、SELENE 搭載用磁力計(LMAG)予備試験としての衛星搭載用高感度磁力計校正試験結果報告、宇宙開発事業団内部報告書、Sept. 1999.
- 10) Shimizu, H., F. Takahashi, N. Horii, A. Matsuoka, M. Matsushima, H. Shibuya, and H. Tsunakawa, Ground calibration of the high-sensitivity SELENE lunar magnetometer LMAG, *Earth Planets Space*, **60**, 2008, 353.
- 11) Hirao, K., K. Tsuruda, I. Aoyama, and T. Saito, Large Spherical Magnetic Shield Room, *J. Geomag. Geoelectr.* **37**, 1985, 581-588.

付録

非直交系-直交系のずれはごく僅かであるため、変換行列 $\vec{\varepsilon}$ 及び $\vec{\delta}$ は単位行列に非常に近い形となり、 $|\varepsilon_{ij}| \ll 1$ 、 $|\delta_{ij}| \ll 1 (i, j = x, y, z)$ として、

$$\vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & 1 + \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & 1 + \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{A1})$$

$$\vec{\delta} = \begin{pmatrix} 1 + \delta_{xx} & \delta_{xy} & \delta_{xz} \\ \delta_{yx} & 1 + \delta_{yy} & \delta_{yz} \\ \delta_{zx} & \delta_{zy} & 1 + \delta_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{A2})$$

で表すことができる。また、行列 $\vec{\varepsilon}$ の行ベクトルが単位ベクトルとなり、 $\vec{\delta}$ の列ベクトルが単位ベクトルとなることから、

$$\varepsilon_{ii} = -1 + \sqrt{1 - \sum_{j \neq i} \varepsilon_{ji}^2} \quad (\text{A3})$$

$$\delta_{ii} = -1 + \sqrt{1 - \sum_{j \neq i} \delta_{ji}^2} \quad (\text{A4})$$

となる。一方、感度較正值 A_i の 1 からのずれが小さいとして、 $|a_i| \ll 1$ として感度較正行列 \mathbf{A} の逆行列を \mathbf{A}^{-1} の各成分は以下のように書ける。

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 1/A_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+a_x & 0 & 0 \\ 0 & 1+a_y & 0 \\ 0 & 0 & 1+a_z \end{pmatrix} \quad (\text{A5})$$

各設定 1、2、3 における $\mathbf{K}(\mathbf{K}^1, \mathbf{K}^2, \mathbf{K}^3)$ は、それぞれ、

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3つの設定において、 $\mathbf{A}^{-1}\bar{\mathbf{E}}\mathbf{K}\bar{\boldsymbol{\delta}}$ の各成分の微小成分を無視すると、以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xz} - \delta_{zx} & -(\varepsilon_{xy} + \delta_{zy}) & -1 - (\varepsilon_{xx} + \delta_{zz} + a_x) \\ \varepsilon_{yz} - \delta_{yx} & -1 - (\varepsilon_{yy} + \delta_{yy} + a_y) & -(\varepsilon_{yz} + \delta_{yz}) \\ 1 + (\varepsilon_{zz} + \delta_{xx} + a_z) & -(\varepsilon_{zy} - \delta_{xy}) & -(\varepsilon_{zx} - \delta_{zx}) \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \alpha_{xx} & -\alpha_{xy} & -1 - \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & -1 - \alpha_{yy} & -\alpha_{yz} \\ 1 + \alpha_{zx} & -\alpha_{zy} & -\alpha_{zz} \end{pmatrix} \equiv \bar{\boldsymbol{\alpha}} \quad (\text{A6})$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xy} - \delta_{zx} & \varepsilon_{yz} - \delta_{zy} & -1 - (\varepsilon_{xx} + \delta_{zz} + a_x) \\ 1 + (\varepsilon_{yy} + \delta_{xx} + a_y) & \varepsilon_{yy} + \delta_{xy} & -(\varepsilon_{yz} - \delta_{xz}) \\ \varepsilon_{zy} + \delta_{yx} & 1 + (\varepsilon_{zz} + \delta_{yy} + a_z) & -(\varepsilon_{zx} - \delta_{yz}) \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \beta_{xx} & \beta_{xy} & -1 - \beta_{xz} \\ 1 + \beta_{yx} & \beta_{yy} & -\beta_{yz} \\ \beta_{zx} & 1 + \beta_{zy} & -\beta_{zz} \end{pmatrix} \equiv \bar{\boldsymbol{\beta}} \quad (\text{A7})$$

$$\begin{pmatrix} -1 - (\varepsilon_{xx} + \delta_{xx} + a_x) & \varepsilon_{xy} - \delta_{xy} & \varepsilon_{xz} - \delta_{xz} \\ -(\varepsilon_{yx} - \delta_{yx}) & 1 + (\varepsilon_{yy} + \delta_{yy} + a_y) & \varepsilon_{yz} + \delta_{xz} \\ -(\varepsilon_{zx} - \delta_{zx}) & \varepsilon_{zy} + \delta_{zy} & 1 + (\varepsilon_{zz} + \delta_{zz} + a_z) \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} -1 - \gamma_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ -\gamma_{yx} & 1 + \gamma_{yy} & \gamma_{yz} \\ -\gamma_{zx} & \gamma_{zy} & 1 + \gamma_{zz} \end{pmatrix} \equiv \bar{\boldsymbol{\gamma}} \quad (\text{A8})$$

ある設定jで印加コイルのX,Y,Z方向に磁場を印加した時、すなわち、 $\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ の時の出力を、

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \text{をそれぞれ、} \begin{pmatrix} M_{xx}^j \\ M_{yx}^j \\ M_{zx}^j \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} M_{xy}^j \\ M_{yy}^j \\ M_{zy}^j \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} M_{xz}^j \\ M_{yz}^j \\ M_{zz}^j \end{pmatrix} \text{と記述するとすれば、}$$

$$\begin{pmatrix} M_{xx}^1 & M_{xy}^1 & M_{xz}^1 \\ M_{yx}^1 & M_{yy}^1 & M_{yz}^1 \\ M_{zx}^1 & M_{zy}^1 & M_{zz}^1 \end{pmatrix} = \vec{\alpha}, \begin{pmatrix} M_{xx}^2 & M_{xy}^2 & M_{xz}^2 \\ M_{yx}^2 & M_{yy}^2 & M_{yz}^2 \\ M_{zx}^2 & M_{zy}^2 & M_{zz}^2 \end{pmatrix} = \vec{\beta}, \begin{pmatrix} M_{xx}^3 & M_{xy}^3 & M_{xz}^3 \\ M_{yx}^3 & M_{yy}^3 & M_{yz}^3 \\ M_{zx}^3 & M_{zy}^3 & M_{zz}^3 \end{pmatrix} = \vec{\gamma}$$

となる。測定値を用いて、 ε_{ij} 、 δ_{ij} の非対角成分は、以下の式で計算することができる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xy} &= (-M_{xx}^1 + M_{xx}^2 - M_{xy}^1 + M_{xy}^2) / 2 \\ \varepsilon_{xz} &= (M_{xx}^1 - M_{xx}^2 - M_{xy}^1 + M_{xy}^2) / 2 \\ \varepsilon_{yx} &= (-M_{yz}^1 - M_{yz}^2 + M_{zz}^1 - M_{zz}^2) / 2 \\ \varepsilon_{yz} &= (M_{yz}^1 - M_{yz}^2 + M_{zz}^1 - M_{zz}^2) / 2 + M_{yz}^3 \\ \varepsilon_{zx} &= (-M_{yz}^1 + M_{yz}^2 - M_{zz}^1 - M_{zz}^2) / 2 \\ \varepsilon_{zy} &= (M_{xy}^1 + M_{xy}^2 - M_{xx}^1 + M_{xx}^2) / 2 + M_{zy}^3 \end{aligned} \quad (\text{A9})$$

$$\begin{aligned} \delta_{xy} &= (-M_{xx}^1 + M_{xx}^2 - M_{xy}^1 + M_{xy}^2) / 2 + M_{xy}^3 \\ \delta_{xz} &= (-M_{yz}^1 + M_{yz}^2 + M_{zz}^1 - M_{zz}^2) / 2 \\ \delta_{yx} &= (-M_{yz}^1 - M_{yz}^2 + M_{zz}^1 - M_{zz}^2) / 2 + M_{yx}^3 \\ \delta_{yz} &= (-M_{yz}^1 + M_{yz}^2 - M_{zz}^1 + M_{zz}^2) / 2 \\ \delta_{zx} &= (-M_{xx}^1 - M_{xx}^2 - M_{xy}^1 + M_{xy}^2) / 2 \\ \delta_{zy} &= (-M_{xy}^1 - M_{xy}^2 + M_{xx}^1 - M_{xx}^2) / 2 + M_{zy}^3 \end{aligned} \quad (\text{A10})$$

また、それぞれの対角成分は(A3)(A4)で計算することができる。感度は、

$$\begin{aligned} a_x &= -1 - \varepsilon_{xx} + \delta_{zz} - M_{xz}^1 = -1 - \varepsilon_{xx} + \delta_{zz} - M_{xz}^2 = 1 - \varepsilon_{xx} + \delta_{xx} - M_{xx}^3 \\ a_y &= -1 - \varepsilon_{yy} - \delta_{yy} - M_{yy}^1 = -1 - \varepsilon_{yy} + \delta_{xx} + M_{yx}^2 = 1 - \varepsilon_{yy} + \delta_{yy} + M_{yy}^3 \\ a_z &= -1 - \varepsilon_{zz} - \delta_{xx} + M_{zx}^1 = -1 - \varepsilon_{zz} - \delta_{yy} + M_{zy}^2 = 1 - \varepsilon_{zz} - \delta_{zz} + M_{zz}^3 \end{aligned} \quad (\text{A11})$$

の式を用いて導出することができる。実際の計算ではM¹の規格化を行っている。

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-16-003
JAXA Research and Development Memorandum

ジオスペース探査(ERG)衛星に搭載される
磁場観測器(MGF)センサの地上較正試験結果

Ground calibration experiments of Magnetic field experiment on the ERG satellite

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成29年2月24日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

©2017 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

