

GEOTAIL搭載磁力計(MGF)の飛行中データによる評価

山本 達人*¹・國分 征*²

(1996年6月24日受理)

Evaluation Method for Magnetic Field Data from the GEOTAIL Spacecraft

By

Tatsundo YAMAMOTO and Susumu KOKUBUN

Abstract: Magnetic field data from spacecraft are, generally, affected by drifts of sensor zero, magnetic field noises from the spacecraft, and changes of the sensor alignment. We have to evaluate these effects from inflight data, to obtain high-quality magnetic field data. In this report we describe the evaluation method for magnetic field data from the GEOTAIL spacecraft. Since GEOTAIL is the spin-stabilized spacecraft, we have developed the method for the sensor alignment determination by using spin-modulation of observed magnetic field data. After the determination of the sensor alignment, we estimate the sensor offsets which are summation of the sensor zeros and magnetic interference from the spacecraft. The results are well reasonable for the data till March 1995 when the spacecraft was always in the sun-lit condition. After March 1995, the spacecraft experienced shadow conditions, and the short-term changes of the sensor alignments and offsets are found to be significant. Further consideration to short-term changes as well as an offset of a spin-axis component remains for future analyses.

*1 宇宙科学研究所

*2 名古屋大学太陽地球環境研究所

概 要

GEOTAIL衛星搭載の高精度磁力計の飛行中データを用いた評価方法、並びに、その結果について述べる。衛星飛行中に測定される磁場には、センサーアライメントの変動、磁力計システムとしてのゼロ点の変動、衛星からの干渉磁場の変動、等がノイズとして含まれる。自然現象の解析に用いられる高精度の磁場データを生成する時には、これらノイズを適切に評価しその影響を除去する必要がある。GEOTAIL衛星の磁場データ処理としては、スピン型衛星の特長を生かした手法を考案し、磁力計観測開始から約3年分のデータに対しこの手法を応用した。その結果として得られたアライメントの長期変動は伸展型マストの構造特性として理解できるものである。ゼロ点の変動については、日陰の無い衛星運用として安定した時期には概ね良好な結果が得られ、手法の妥当性を指示するものと判断される。ミッション後半からは日陰が頻発するようになり、アライメント・ゼロ点について短期的な変動が目立つ結果となっている。これらの結果から、日陰の無い期間について処理したデータの精度としては、アライメントとしては 0.1° 以内、ゼロ点としては 0.5 nT 以下が達成されていると結論される。今後の課題としては、短期的な変動、Z軸（スピン軸方向）のゼロ点を適切に評価する方法の検討が残っている。これらは、将来の短周期周回衛星・三軸姿勢制御型衛星での高精度磁場計測に必要なデータ評価技術でもある。

重 要 語 : GEOTAIL、磁力計、データ評価

1. GEOTAIL衛星での磁場観測

GEOTAIL衛星は1992年7月24日に打ち上げられた磁気圏尾部探査衛星である。GEOTAILはスピン安定型の衛星（スピン周期は約3秒）で、スピン軸は黄道面にはほぼ垂直である。搭載磁力計(MGF)としてはフラックスゲート型磁力計が採用されている。センサーは長さ6mの伸展型マストの4m部(I/B: Inboard)と先端(O/B: Outboard)の2ヶ所に装備されている。2機のセンサーを装備した事は冗長性と衛星からの磁場干渉を定量的に評価する事を目的としている。I/B磁力計はNASAゴダード研究所により製作され、O/B磁力計は宇宙科学研究所により製作された。2機の磁力計は基本的には同仕様のもので、観測レンジは $\pm 65536\text{ nT}$ から $\pm 16\text{ nT}$ までの7段階が用意され、観測磁場の強度により機上CPUが自動的に観測レンジを選択をする。サンプリングレートは、O/B: 16 Hz 、I/B: 4 Hz が標準であるが、コマンドにより入れ替えが可能である。MGFの詳細については、GEOTAIL実験計画書[1]、Kokubun他[2]を参照されたい。

地球磁気圏尾部のプラズマ・電磁場計測による科学では、高精度の磁場データが不可欠である。現在の磁気圏物理学の観点から磁場観測に求められる精度は、相対精度:約0.5%、ゼロ点(オフセット)精度:約0.5nT、角度(アライメント)精度:約 0.5° 、程度である。地上校正試験ではそれぞれについて、0.1%、0.1nT、1分角の精度で校正データを取得している。また、衛星からの磁場干渉を軽減するために本格的な電磁干渉試験(EMC試験)が衛星地上総合試験時に実施された。取得されたデータを実際に使用する際には、打ち上げ時の振動環境による機械軸の変化/ゼロ点の変動、飛行中の温度環境の変化による変動、長期間飛行による経年変化が予想され、飛行中デー

タを用いた再評価を行い、地上校正値との比較検討のもとに物理データとして採用する手続きが必要となる。衛星からの干渉磁場の強度についても、地上試験ではマストを全伸展状態にしての試験は設備の関係で行う事ができず、飛翔中データによる再評価がやはり必要である。この報告では、GEOTAIL搭載磁力計のデータ処理として現在採用している、オフセット・アライメントについて飛翔中データを用いた評価方法を述べる。約3年分のデータにこの評価方法を応用した結果得られた、オフセット・アライメントの長期変化について議論する。

2. マスト伸展時のデータ評価

マストはコイル状に収納された状態より、伸展軸回りに回転しながら伸展される。マスト中央部と先端部に搭載されている磁力計のX軸は伸展方向を向いており、Y・Z軸は伸展軸に直交で全伸展状態でZ軸がスピンの軸に平行になるように設定されている。従って、Y・Z軸については伸展中は伸展軸の回りを回転する事になる。伸展開始時点からは、O/BとI/Bがまとまった形状でI/Bマスト部分より伸展される。I/B部分の全伸展が終了後、O/Bマスト部分がI/B部分伸展時とは伸展軸回りに逆回転で伸展され、O/Bの全伸展時で終了となる。磁力計用マストの伸展運用は92年9月4日に実施された。伸展運用は、衛星構体からの距離による磁場データの変化(衛星からの磁場干渉の評価)を取得する目的で、磁力計を稼動状態にして実施した。

伸展中に磁力計で測定される磁場は、時間的に変動する自然磁場($B_{natural}$)、マスト伸展長により変化する衛星干渉磁場(B_{bias})と、観測レンジ毎に固定値である磁力計オフセット(B_{offset})の和となる。磁力計センサーの各電気軸は、X軸はマストの伸展軸にはほぼ平行、Y軸・Z軸はほぼ垂直に取り付けられている。マスト伸展長をL、スピン位相を ϕ (太陽方向を基準とする)、センサー部のマスト軸回り回転角を α とする(図1参照)と、観測される磁場データ(B_{obs})は以下のように表せる。

$$BX_{obs}(t) = BX_{offset} + BX_{bias}(L) + \cos(\phi + \phi_{natural}(t)) \cdot Bxy_{natural}(t) \quad (1-1 a)$$

$$BY_{obs}(t) = BY_{offset} + \left[\cos(\alpha) \cdot By_{bias}(L) + \sin(\alpha) \cdot Bz_{bias}(L) \right] + \left[\cos(\alpha) \cdot \sin(\phi + \phi_{natural}(t)) \cdot Bxy_{natural}(t) + \sin(\alpha) \cdot Bz_{natural}(t) \right] \quad (1-1 b)$$

$$BZ_{obs}(t) = BZ_{offset} + \left[\cos(\alpha) \cdot Bz_{bias}(L) + \sin(\alpha) \cdot By_{bias}(L) \right] - \left[\sin(\alpha) \cdot \sin(\phi + \phi_{natural}(t)) \cdot Bxy_{natural}(t) - \cos(\alpha) \cdot Bz_{natural}(t) \right] \quad (1-1 c)$$

式(1-1)で、 $Bxy_{natural}$ はスピン平面上に投影した自然磁場成分であり、太陽方向からの位相角を $\phi_{natural}$ で表している。ここで、自然磁場の時間変動がスピン周期より充分遅いとする。マスト軸回りの回転速度は平均してスピン回転速度より充分小さいので、式(1-1)により取得された磁場データのスピンの変動成分の振幅は、自然磁場の強度($Bxy_{natural}$)を表す事となる。また、Y軸・Z軸データのスピンの変動成分位相がX軸データのスピンの変動成分の位相データより進んでいるか遅れているかで、Y・Z軸がX軸回りのどちら側(+y方向、或いは、-y方向)にあるかを知る事ができる。X軸のDC成分はセンサーオフセットと衛星からの干渉磁場の和、すなわちゼロ点である。Y・Z軸のDC成分は、干渉磁場の成分がマストの回転に伴って入れ替わる部分と自然磁場のZ成分がマストの回転角に従って現れる部分の和となる。

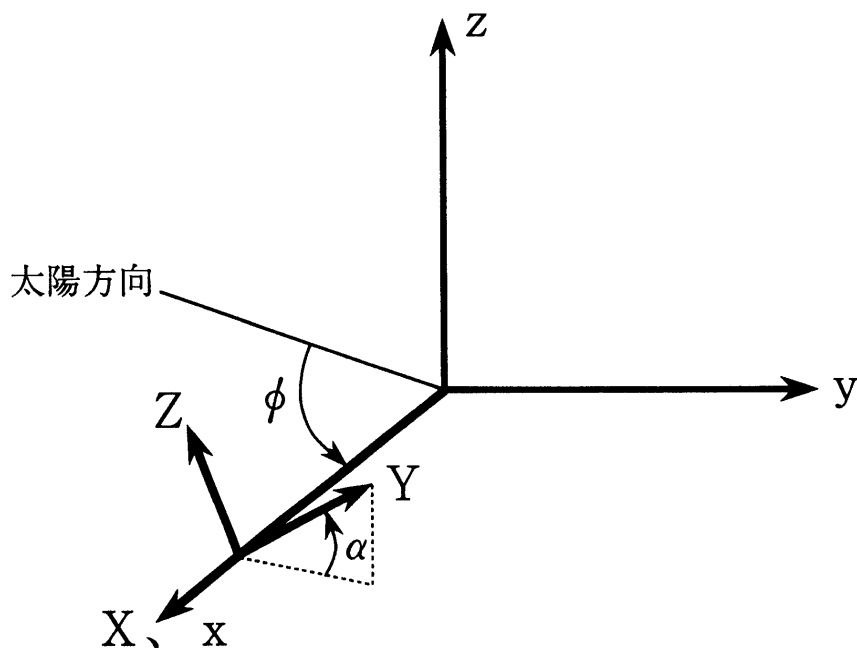


図1. マスト伸展時用モデルの座標系。

マスト伸展方向を x 、スピン軸方向を z 、右手系に y を定義する。進展中のマストは z 軸の回りに約3秒の周期でスピンを行っている。スピン位相 (ϕ) は、マストが太陽方向を向いた時を基準として定義する。磁力計センサーの X 軸は x 軸とほぼ一致し、 Y 軸・ Z 軸は X 軸と直交している。伸展中のマストは、伸展軸回りに回転しながら伸びていくので、回転角 (α) を Y 軸の x y 面からの回転角として定義する。

図2に伸展運用中に取得された磁場データを示す。図には、横軸に伸展長を、縦軸に上より時刻、 O/B の $X \cdot Y \cdot Z$ 軸観測データのスピン変動成分とDC成分、 O/B レンジ及びスピン変動・DC成分の対する残差、続いて I/B についての同様の表現を示している。伸展運用は、対向する誘導磁力計用マストのトラブルにより、時間をおいて何回かに分けて実施された(上パネル参照)。 I/B マストは約4.2 mで全伸展となり、その後の I/B センサーの測定値は伸展長とは関係の無い変動のみとなる。

X 軸のDC成分は伸展長25 cm程の所で負の最大値を取り、その後なめらかに0に収束している。このプロファイルは X 軸方向の衛星からの干渉(バイアス)の距離に対する変化を示している。 $Y \cdot Z$ 軸のDC成分には振幅が減衰する周期的変動が現れており、マスト伸展軸回りの回転による周期的変動と、衛星からの干渉磁場の強度が伸展距離に対応して減少している事によるものである。

X 軸のスピン変動成分は伸展長50 cm程までは非常に大きな値をとり、その後2.4 m程まで比較的安定な値となっている。マスト収納状態では磁力計の近傍に衛星電源制御装置(PCD)が存在し、測定データに大きな影響を与えている。GEOTAILの太陽電池は側面サブストレートに貼られているが、観測器等のため一様に貼られている訳ではなく発生電力にスピン変動成分がある。衛星近傍での磁場データのスピン変動成分が大きい事は主としてPCDの発生する干渉磁場のスピン変動である。

マスト伸展は磁場の安定した磁気圏尾部のロープ領域で開始された。伸展長2.4 m (12 : 10 UT) までの X 軸データのスピン変動成分は非常に安定しているのは、強度・方向が安定しているロープ磁場によるもの

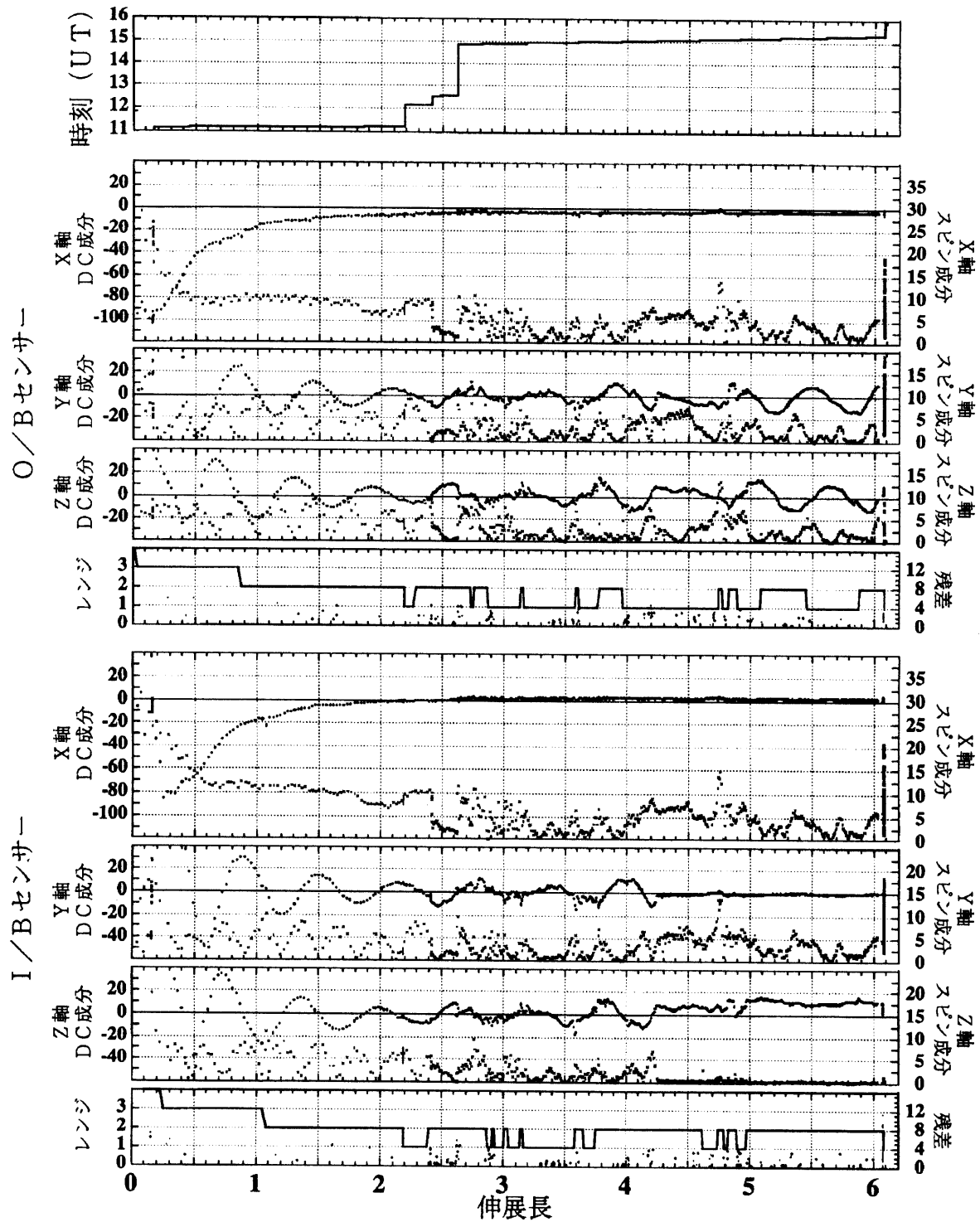


図2.9 2年9月4日実施された磁力計用マスト伸展中に測定された磁場データ。

横軸を伸展長 (m) として、上パネルに時刻を示す。磁力計マストの伸展は段階的実施された。下側に、O/Bセンサー・I/Bセンサー各軸のD.C成分とスピン変動成分、並びに、観測レンジ・残差を示す。

である。Y・Z軸のスピンの変動成分はマストの回転に従って、センサーがスピン軸と垂直になる時をピークとし、スピン軸と平行になる時を0とする変化を示している。ピーク時のスピン変動成分の強度は、X軸のスピンの変動成分強度とほぼ一致している。残念な事に、対向する誘導磁力計マストの伸展トラブルにより、その後の伸展は時間間隔をおいて実施され、後半の伸展運用時には衛星は磁場の大きく乱れたマグネットシースに滞在する事となった。マグネットシース内の自然磁場は、衛星のスピン周期（約3秒）程度からそれ以下の変動成分も大きく、衛星のスピンによる干渉磁場の評価には適さない領域である。その事より、2.4 m以降のX軸スピン成分、Y・Z軸スピン成分・DC成分は前半のデータと比べるとかなり乱れたものとなってしまった。

図3の上パネルにO/BセンサーX軸測定値のDC成分のプロファイルとモデルフィットしたカーブを示す。伸展中、磁力計は機上CPUによる自動レンジ切り替えを行っているが、図に示したデータではセンサーオフセットのレンジ毎の値は地上検定値で補正済みなので、DC成分については主として衛星からの干渉磁場と考えて良い。モデルとしては、距離の3乗で減衰する部分（双極子項）と4乗で減衰する部分（四重極子項）の和として表現した。図で解るように、衛星干渉磁場のプロファイルはモデルで極めて良く再現されている。モデルのパラメータより、X軸センサーオフセットの補正值としては0.01 nT、全伸展時（6.08 m）でのx軸方向の衛星干渉磁場強度は-0.21 nTと推定される。オフセット補正值は極めて小さく、また衛星干渉磁場レベルとしては地上干渉試験からの予想値とほぼ一致している。また、モデルとして衛星干渉磁場ソースは収納時より約45 cm衛星内部に存在する事となり、先に述べたPCD（電源制御装置）の位置と極めて良く一致する。

Y・Z軸が衛星スピン軸に直交する方向（y方向）以外を向いている時の測定値のDC成分には、時間的に変動する自然磁場のz成分が含まれ、衛星干渉磁場のy・z成分と精度良く区別する事は難しい。ここでは、Z軸センサーがマスト伸展時の伸展軸回りの回転により、y方向・-y方向を向いた時のDC成分より、y方向の衛星干渉磁場とZ軸センサーのオフセットの評価を試みた。y方向の衛星干渉磁場のソースの位置としてはx方向で求められた値を採用する。図3の下パネルにDC成分データとモデルカーブを示した。モデルでは四重極子項は極めて小さく、双極子項だけを取り扱っている。Z軸センサーが-y方向を向いた時のデータは符号を反転して図示し、モデルカーブの上ではオフセットの符号を変えて示した。データの点数が少ない事と、2.4 m以降のデータが自然磁場の変動が激しいシース領域での観測による事により、モデルとの一致は必ずしも充分とは言えない。衛星干渉磁場のy成分はO/Bセンサー全伸展時の位置で0.03 nTと磁力計システムのノイズレベル程度である。この値はx軸方向の干渉磁場強度より約一桁小さく、地上干渉試験で衛星干渉磁場モーメントがx軸方向を向いていた事と合う。Z軸センサーのオフセット補正值は-0.13 nTであり、マスト先端のセンサー用プレートの影響と考えられる。今後のZ軸方向のデータ評価にはこのオフセット補正值を使う事とする。衛星からの干渉磁場のz成分は地上干渉試験の結果よりy成分と同程度と推定され、磁力計のノイズレベル程度なので無視する事とする。

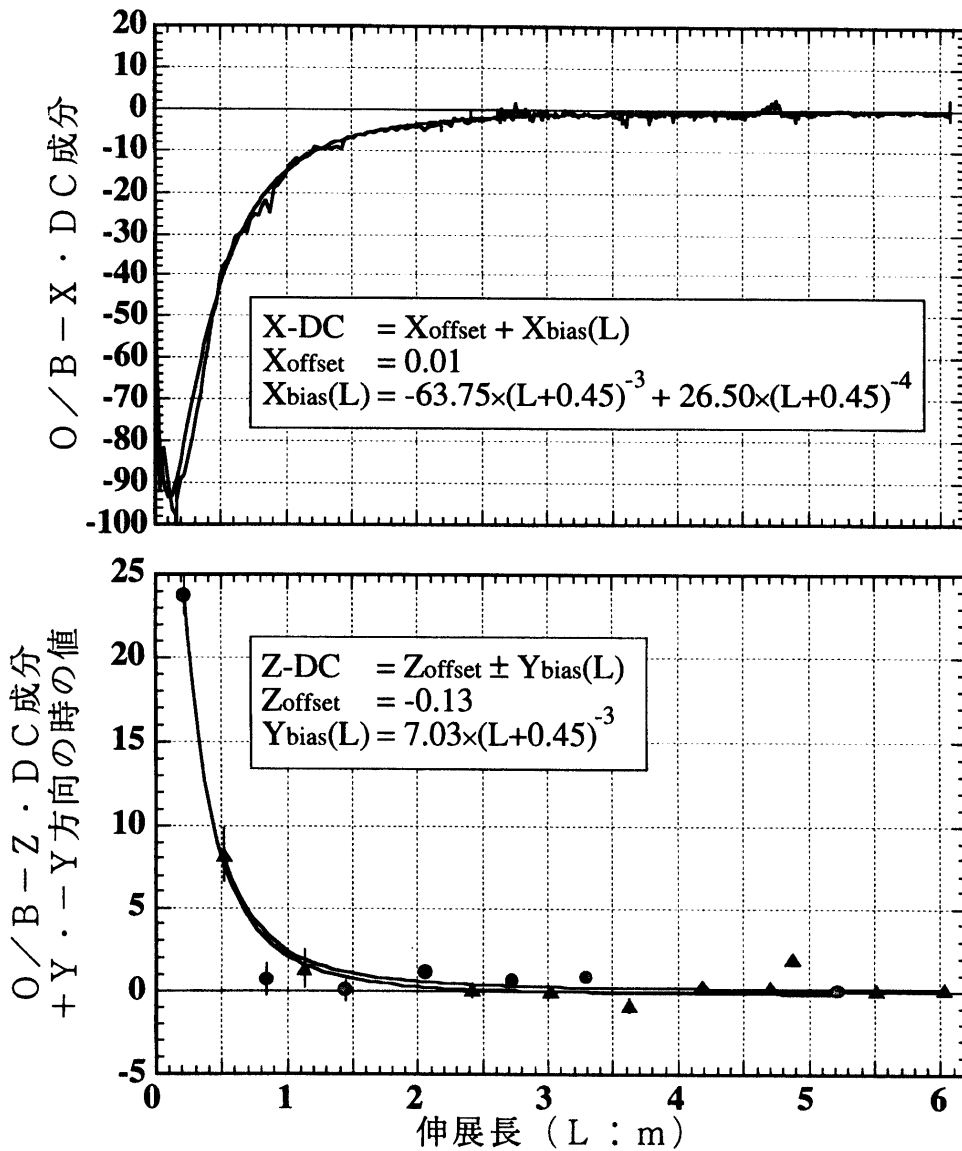


図3. 伸展中計測磁場と衛星干渉磁場モデル。

上パネルにX軸計測磁場のDC成分を伸展長に対して図示した。モデル磁場としては、双極子項と四重極子項の和で非常に良く測定を再現している。下パネルには、Y軸計測磁場のDC成分について、+y・-y方向(図1参照)を向いた時の値を示した。データにばらつきはあるものの、伸展長に対し双極子項で比較的良く近似されている。

3. 飛翔中データ評価方法

飛翔中データから磁力計としての評価すべき項目は、センサー各軸のアライメントとゼロ点である。ここで言うゼロ点は、センサーのオフセット・電気回路部のオフセット・衛星からの磁場干渉を総合したものである。他に、センサーの感度・直線性も評価対象ではあるが、G E O T A I L搭載の磁力計では飛翔中に再評価を行う程の高精度の校正回路を持っていない事より（開発・試験段階で観測要求から求められる精度は保証できる事が確認された）、感度・直線性については地上検定値を採用している。

マスト伸展後は、センサーのZ軸はほぼ衛星スピン軸に平行、X・Y軸はほぼスピン軸に垂直となる。X軸はマストの伸展軸方向にほぼ一致している。センサーの三軸はほぼ直交関係を保っている。地上試験から推定される飛翔中のスピン軸に対するZ軸の角度精度は 1° 以内であり、三軸の直交度は 0.3° 程度である。初期的な解析ではこれら地上検定値を用いたデータ処理を行っている。しかし、打ち上げ時の振動環境による変化・マストのねじれの長期的な解放特性があり、観測的に要求されるセンサー各軸のアライメント決定精度は約 0.1° なので、飛翔中データを使った評価が必要となる。一方、磁力計センサーの持つ固有オフセットは地上検定では $2\sim 3\text{ nT}$ 以下である。この値はセンサー単体での検定値である。センサーをマストの取り付け状態では $0.1\sim 1\text{ nT}$ 程度のオフセットの変化がある事が推定されているが、マストに取り付けた状態での正確なオフセット測定は設備の関係上実施されていない。衛星からの磁場干渉は地上電磁干渉試験からの推定値では 0.1 nT 程度のものがO/Bセンサー部で想定されている。衛星干渉磁場のモーメントはマスト伸展軸にほぼ平行であり、主にX軸センサーに影響が出る事が予想されている。研究に使用される磁場データの要求精度は 0.5 nT 以下なので、やはり飛翔中データを用いた評価が必要となる。

スピン軸方向をZ、太陽方向・スピン軸を含む面内で太陽方向をX、右手系にYと定義した慣性空間を考える。マスト機軸座標を λ （直交系）で、センサー座標を κ （非直交系）で表わした時（図4）に取得されるデ

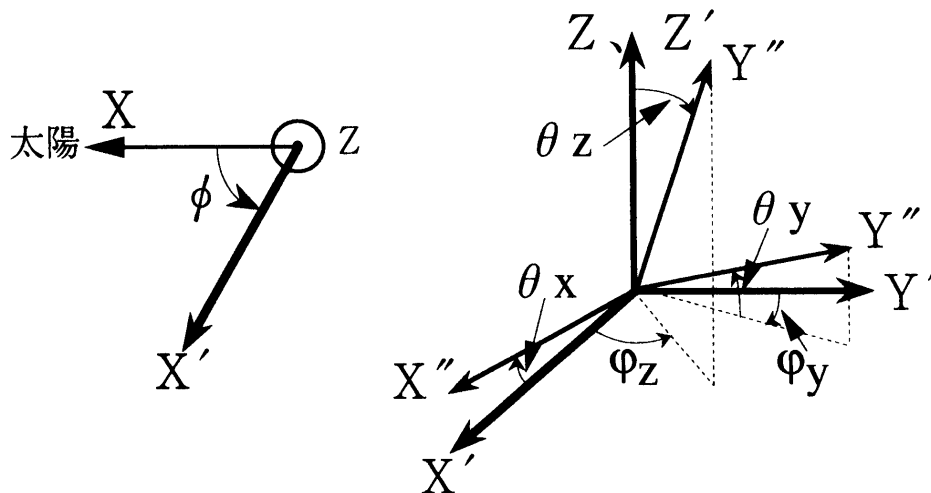


図4. 飛翔中測定磁場データによりアライメント推定を行う時に採用した座標系。

(X、Y、Z)は、Zをスピン軸方向、Xをスピン軸と太陽方向を含む面内で太陽方向、Yを右手系とする。(X'、Y'、Z')は、X'をマスト伸展方向、Z'をスピン軸方向、Y'右手系とする。スピンの位相角は ϕ である。センサー電気軸は(X'', Y'', Z'')で表す。センサー電気軸の座標は一般に非直交系である。各電気軸の(X', Y', Z')に対する方位角・仰角を図のように定義する。

ータを考える。マスト機軸は衛星スピンの軸に垂直であり、マスト機軸が太陽方向を向いた時を原点としたスピン位相 (X' の X からの位相角) を ϕ で表わす。センサー座標のマスト機軸座標に対するアライメントとしての方位角 (φ) ・仰角 (θ) を図4のように定義する。取得されるデータには、観測の対象である自然磁場、磁力計オフセットと衛星からの干渉 (バイアス) が含まれる。マスト機軸座標での磁場の値 (B') は、自然磁場 ($B_{natural}$) と衛星干渉 (B'_{bias}) の和であるので、以下のように表せる。

$$Bx' = Bx'_{bias} + \left(\cos \phi \cdot Bx_{natural} + \sin \phi \cdot By_{natural} \right) = Bx'_{bias} + Bxy_{natural} \cdot \sin \left(\phi + \tan^{-1} \frac{Bx_{natural}}{By_{natural}} \right) \quad (2-1 a)$$

$$By' = By'_{bias} + \left(\cos \phi \cdot By_{natural} + \sin \phi \cdot Bx_{natural} \right) = By'_{bias} + Bxy_{natural} \cdot \cos \left(\phi + \tan^{-1} \frac{Bx_{natural}}{By_{natural}} \right) \quad (2-1 b)$$

$$Bz' = Bz'_{bias} + Bz_{natural} \quad (2-1 c)$$

$$\phi_{natural} = \tan^{-1} \frac{Bx_{natural}}{By_{natural}} \quad (2-1 d)$$

センサー座標での測定値 (B'') は B' をセンサー座標に変換した後、センサーオフセット (B''_{offset}) を加えたものである。

$$\begin{pmatrix} Bx'' \\ By'' \\ Bz'' \end{pmatrix}_{obs} = \begin{pmatrix} \cos \theta_x & 0 & \sin \theta_x \\ \cos \theta_y \cdot \sin \varphi_y & \cos \theta_y \cdot \cos \varphi_y & \sin \theta_y \\ \sin \theta_z \cdot \cos \varphi_z & \sin \theta_z \cdot \sin \varphi_z & \cos \theta_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Bx' \\ By' \\ Bz' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Bx'' \\ By'' \\ Bz'' \end{pmatrix}_{offset} \quad (2-2)$$

式 (2-1, 2-2) より、磁力計により取得される測定磁場データ (B''_{obs}) は以下のように表せる事となる。

$$Bx''_{obs} = Bx''_{offset} + \cos \theta_x \cdot \left\{ Bx'_{bias} + Bxy_{natural} \cdot \sin(\phi + \phi_{natural}) \right\} + \sin \theta_x \cdot \left\{ Bz'_{bias} + Bz_{natural} \right\} \quad (2-3 a)$$

$$\begin{aligned} By''_{obs} = & By''_{offset} + \cos \theta_y \cdot \sin \varphi_y \cdot \left\{ Bx'_{bias} + Bxy_{natural} \cdot \sin(\phi + \phi_{natural}) \right\} \\ & + \cos \theta_y \cdot \cos \varphi_y \cdot \left\{ By'_{bias} + \cos(\phi + \phi_{natural}) \right\} + \sin \theta_y \cdot \left\{ Bz'_{bias} + Bz_{natural} \right\} \end{aligned} \quad (2-3 b)$$

$$\begin{aligned} Bz''_{obs} = & Bz''_{offset} + \sin \theta_z \cdot \cos \varphi_z \cdot \left\{ Bx'_{bias} + Bxy_{natural} \cdot \sin(\phi + \phi_{natural}) \right\} \\ & + \sin \theta_z \cdot \sin \varphi_z \cdot \left\{ By'_{bias} + Bxy_{natural} \cdot \cos(\phi + \phi_{natural}) \right\} + \cos \theta_z \cdot \left\{ Bz'_{bias} + Bz_{natural} \right\} \end{aligned} \quad (2-3 c)$$

式 (2-3) から明らかのように、測定磁場データはスピン位相と無関係な部分と、スピン位相により変化する部分に分けられる。ここで観測対象である自然磁場の変化がスピン周期 (3秒) に比べて十分に遅い時を選ぶと、測定データ中のスピンに同期して変動する成分と無変動な成分より以下の情報が取得できる。

各軸のデータに現れるスピンに同期した変動成分の位相 (Arg) は

$$Arg(Bx''_{obs}) = \phi_{natural}, \quad Arg(By''_{obs}) = \phi_{natural} - \varphi_y + \frac{\pi}{2}, \quad Arg(Bz''_{obs}) = \phi_{natural} + \varphi_z \quad (2-4 a)$$

であり、これらよりセンサー軸のアライメント方位角について以下のように推定できる。

$$\varphi_y = Arg(Bx''_{obs}) - Arg(By''_{obs}) + \frac{\pi}{2}, \quad \varphi_z = Arg(Bz''_{obs}) - Arg(Bz''_{obs}) \quad (2-4 b)$$

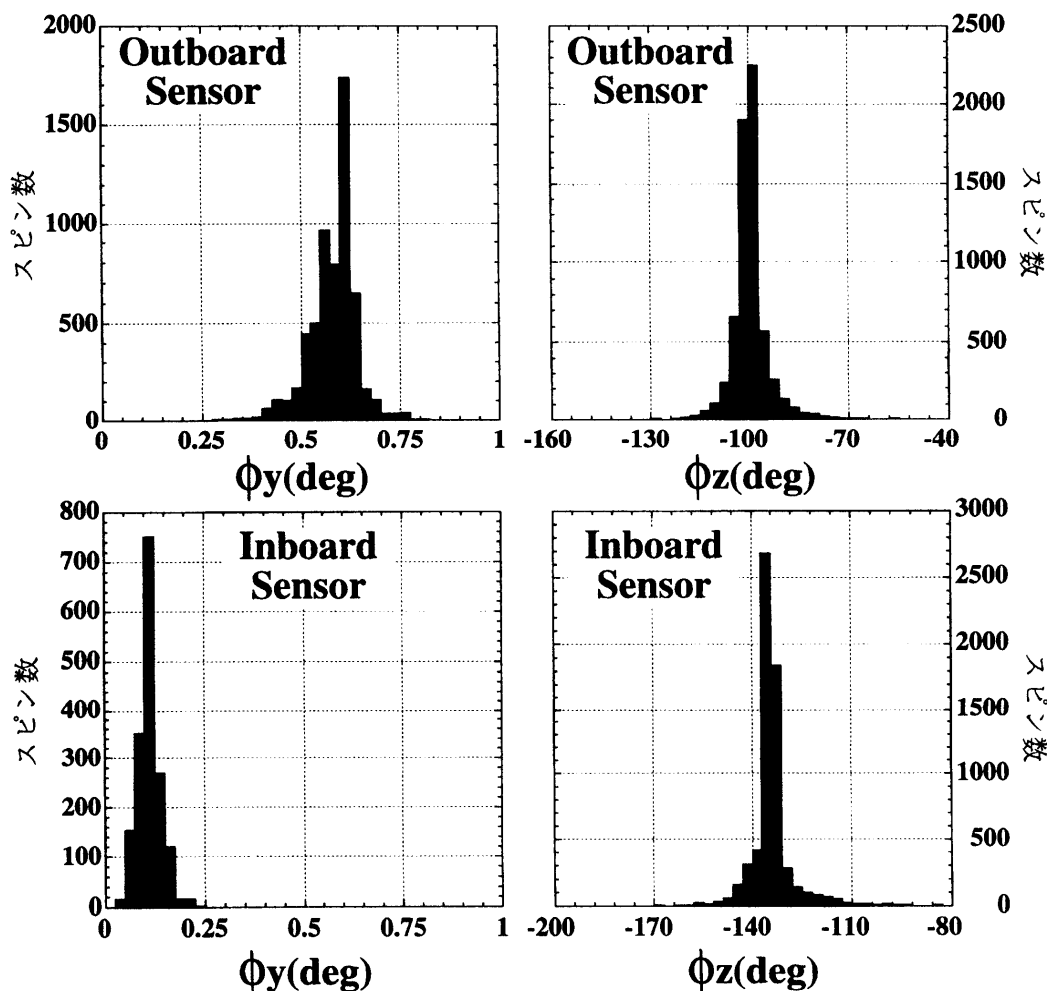


図5.9 3年2月2日のデータによるY軸・Z軸の方位角の分布。

Y軸方位角は誤差の少ない分布を示している。Z軸方位角分布の広がり大きい、Z軸のアライメントはスピン軸となす角度が支配的であり、方位角の決定精度としては充分である。

図5に93年2月2日に白田で取得された磁場データにもとづき、式(2-4)によって得られたY軸、Z軸の方位角の分布を示す。方位角はスピン毎(3秒毎)に決定することができる。尚、実際のアライメント評価は、地上試験でのノミナルな検定値による修正を施した後で行っている。地上試験のアライメント測定は衛星構体の座標系(Z軸はスピン軸方向、X軸はマスト伸展軸方向と135°位相がずれている)に対し実施されているため、観測データをノミナルな検定値により衛星座標に変換した上で、評価を行っている。図5の左パネルより、Y軸の方位角についてはO/B・I/Bとも0.1°以内の精度で決定できている事が分かる。Z軸はほぼスピン軸に平行である事からスピン変動の振幅が小さく、Y軸に比べて位相の決定誤差が大きくなる。この事は右図において分布の広がりとして現れるいるが、Z軸の方位角そのものの決定精度としてはスピン軸に対する角度が支配的であり、方位角としては充分な精度が得られていると言える。

スピン変動成分の振幅(\tilde{B})については

$$\tilde{B}x''_{obs} = \cos\theta_x \cdot Bxy_{natural}, \quad \tilde{B}y''_{obs} = \cos\theta_y \cdot Bxy_{natural}, \quad \tilde{B}z''_{obs} = \cos\theta_z \cdot Bxy_{natural} \quad (2-5 a)$$

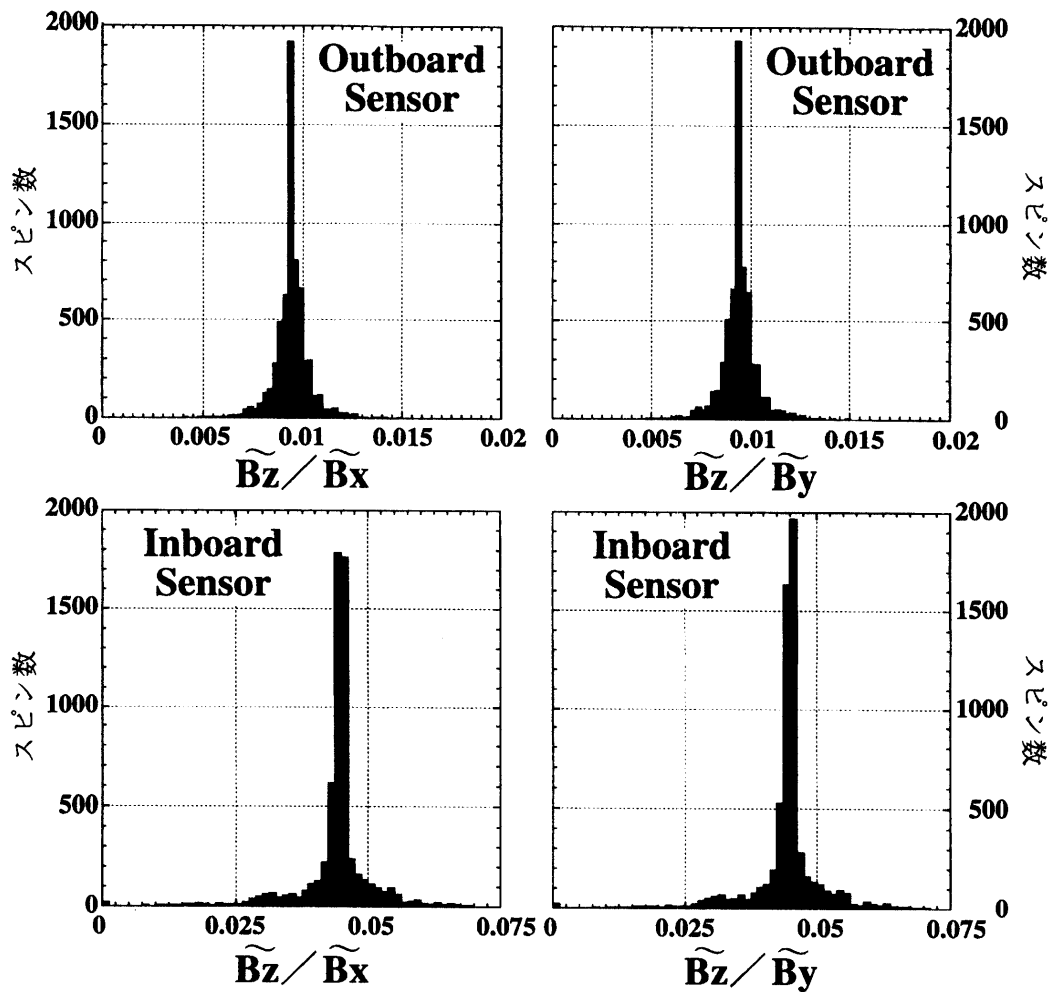


図 6.9 3 年 2 月 2 日のデータによる $\tilde{B}z''_{obs}/\tilde{B}x''_{obs}$ と $\tilde{B}z''_{obs}/\tilde{B}y''_{obs}$ の分布。
O/B、I/B 両者とも広がり小さく、精度よく決定できる事が解る。

であり、これらよりセンサー軸のアライメント仰角についての推定式が以下のように導ける。

$$\sin \theta_z / \cos \theta_x = \tilde{B}z''_{obs} / \tilde{B}x''_{obs}, \quad \sin \theta_z / \cos \theta_y = \tilde{B}z''_{obs} / \tilde{B}y''_{obs} \quad (2-5 b)$$

図 6 に $\tilde{B}z''_{obs}/\tilde{B}x''_{obs}$ 、 $\tilde{B}z''_{obs}/\tilde{B}y''_{obs}$ の分布を示す (93 年 2 月 2 日の白田取得データ)。O/B、I/B 両者とも分散の小さく、非常に精度よく推定されている事が分かる。O/B については約 0.01 の値をとり、I/B については約 0.04 の値をとっている。O/B の方が値が小さい事理由は、O/B マストのねじれ特性は I/B マストのねじれ特性を相殺するように設計された事によるものである。これらの値と $\theta_x \approx \theta_y \approx 0$ より Z 軸センサーのスピンの軸からアライメント角は、O/B については約 0.5° 、I/B については約 2.5° と推定される事になる。

最後にスピン平均 (\bar{B}) は

$$\begin{aligned}\bar{B}x''_{obs} &= Bx''_{offset} + \cos\theta_x \cdot Bx'_{bias} + \sin\theta_x \cdot (Bz'_{bias} + Bz_{natural}) \\ &\equiv Cx + \sin\theta_x \cdot Bz_{natural}\end{aligned}\quad (2-6 a)$$

$$\begin{aligned}\bar{B}y''_{obs} &= By''_{offset} + \cos\theta_y \cdot (\sin\varphi_y \cdot Bx'_{bias} + \cos\varphi_y \cdot By'_{bias}) + \sin\theta_y \cdot (Bz'_{bias} + Bz_{natural}) \\ &\equiv Cy + \sin\theta_y \cdot Bz_{natural}\end{aligned}\quad (2-6 b)$$

$$\begin{aligned}\bar{B}z''_{obs} &= Bz''_{offset} + \sin\theta_z \cdot (\cos\varphi_z \cdot Bx'_{bias} + \sin\varphi_z \cdot By'_{bias}) + \cos\theta_z \cdot (Bz'_{bias} + Bz_{natural}) \\ &\equiv Cz + \cos\theta_z \cdot Bz_{natural}\end{aligned}\quad (2-6 c)$$

であり、これらよりセンサー軸のアライメント仰角について、観測磁場のスピン平均値を使って以下の線形関係が導かれる。

$$\bar{B}x''_{obs} = \frac{\sin\theta_x}{\cos\theta_z} \cdot \bar{B}z''_{obs} + \left(Cx - \frac{\sin\theta_x}{\cos\theta_z} \cdot Cz\right), \quad \bar{B}y''_{obs} = \frac{\sin\theta_y}{\cos\theta_z} \cdot \bar{B}z''_{obs} + \left(Cy - \frac{\sin\theta_y}{\cos\theta_z} \cdot Cz\right) \quad (2-7)$$

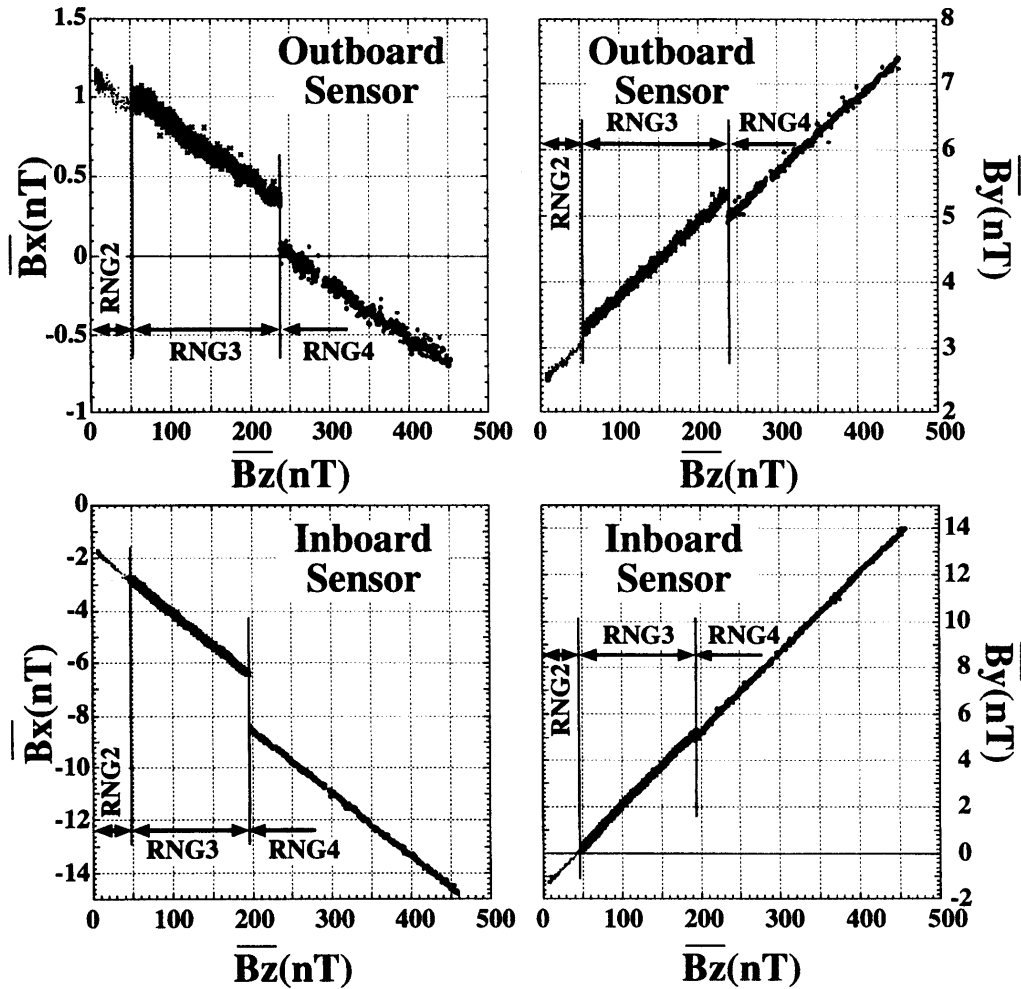


図7.9 3年2月2日のデータによる $\bar{B}z''_{obs}$ と $\bar{B}x''_{obs}$ ・ $\bar{B}z''_{obs}$ と $\bar{B}y''_{obs}$ の関係。
観測レンジに関わらず、傾きの一定の直線で良く近似される事が解る。

図7に $\bar{B}_z''_{obs}$ と $\bar{B}_x''_{obs}$ 、 $\bar{B}_z''_{obs}$ と $\bar{B}_y''_{obs}$ との関係について表示した(93年2月2日の臼田取得データ)。観測期間中に観測レンジが2から4の間を変化しているが、レンジに関わらず傾きが一定の直線で近似できる分布を示している。レンジの変化により全体の分布が上下しているのは、観測レンジにより磁力計のオフセットが変化する事による。この分布の傾きより $\sin\theta_x/\cos\theta_z$ 、 $\sin\theta_y/\cos\theta_z$ の推定値を得ることができる。 $\sin\theta_x/\cos\theta_z$ の推定値を A_x 、 $\sin\theta_y/\cos\theta_z$ の推定値を A_y とすると式(2-7)より以下の関係が導かれる。

$$\cos^2\theta_x = \frac{1-A_x^2}{1-A_x^2 \cdot \bar{B}_z''_{obs} / \bar{B}_x''_{obs}}, \quad \cos^2\theta_y = \frac{1-A_y^2}{1-A_y^2 \cdot \bar{B}_z''_{obs} / \bar{B}_y''_{obs}} \quad (2-8)$$

式(2-5b)と式(2-8)より θ_x 、 θ_y 、 θ_z が推定される。尚 θ_x 、 θ_y の符号は A_x 、 A_y の符号をとる事となる。

以上の方法により θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、 ϕ_y 、 ϕ_z の推定を行う事ができる。この推定では、自然磁場の変動がスピン周期に比べて遅い事を前提としている。実際の評価処理では、測定データをスピンに同期した変動成分、DC成分、残差の形で評価し、残差が十分に小さい(現在の評価処理では0.5 nT以下)時のデータを使って統計的に決定する事としている。但し、スピン変動成分の振幅が残差と同程度、或いは、磁力計ノイズレベル(0.04~0.06 nT)程度になると、誤差が非常に大きくなるので評価データとしては使えなくなる。結局、自然磁場として強度が大きく且つ安定している時期のデータが評価データとしては適している訳である。 ϕ_y 、 ϕ_z はスピン毎に決定する事も可能であるが、誤差を小さくするためにはアライメント条件が変わらないと考えられる範囲内で可能な限り多くのデータに基づいて決定する事が好ましい。 θ_x 、 θ_y 、 θ_z の推定は手法的にも多くのデータ点を必要とし、式(2-7)で分かるようにZ軸観測データの範囲が広い事が精度に本質的に関わる。これらの要請と、GEOTAIL衛星のミッション前半は衛星状態として極めて安定している事より、アライメントの評価は1日に取得された総てのデータにより決定する事とした。さらに、長期的なトレンドを踏まえ、自然磁場が安定し且つ強度の大きい日の評価データに重みをかけてアライメントの長期的変動として捉える事としている。

以上の手続きによりアライメントの1日平均値を決定し、それをもとに取得データを衛星座標(直交系)に変換する。こうして得られたX・Y軸成分のスピン周期内でのDC成分を各々のゼロ点として採用する事となる。その際も、残差成分がノイズとして現れるので、残差が十分に小さい(0.5 nT以下)データについての1日平均値を各々のゼロ点の評価値とした。これらの評価値から式(2-6、2-7)を用いてX軸・Y軸についてセンサーオフセットと衛星バイアスを分離する事は表式上は可能であるが、実際には精度が出ない。尚、Z軸成分のゼロ点は式(2-6、2-7)から導き出す事は不可能である。現在までのデータ処理では、マスケット伸展時のデータ評価(2章)によるセンサーオフセットの再評価値のみを用いている。

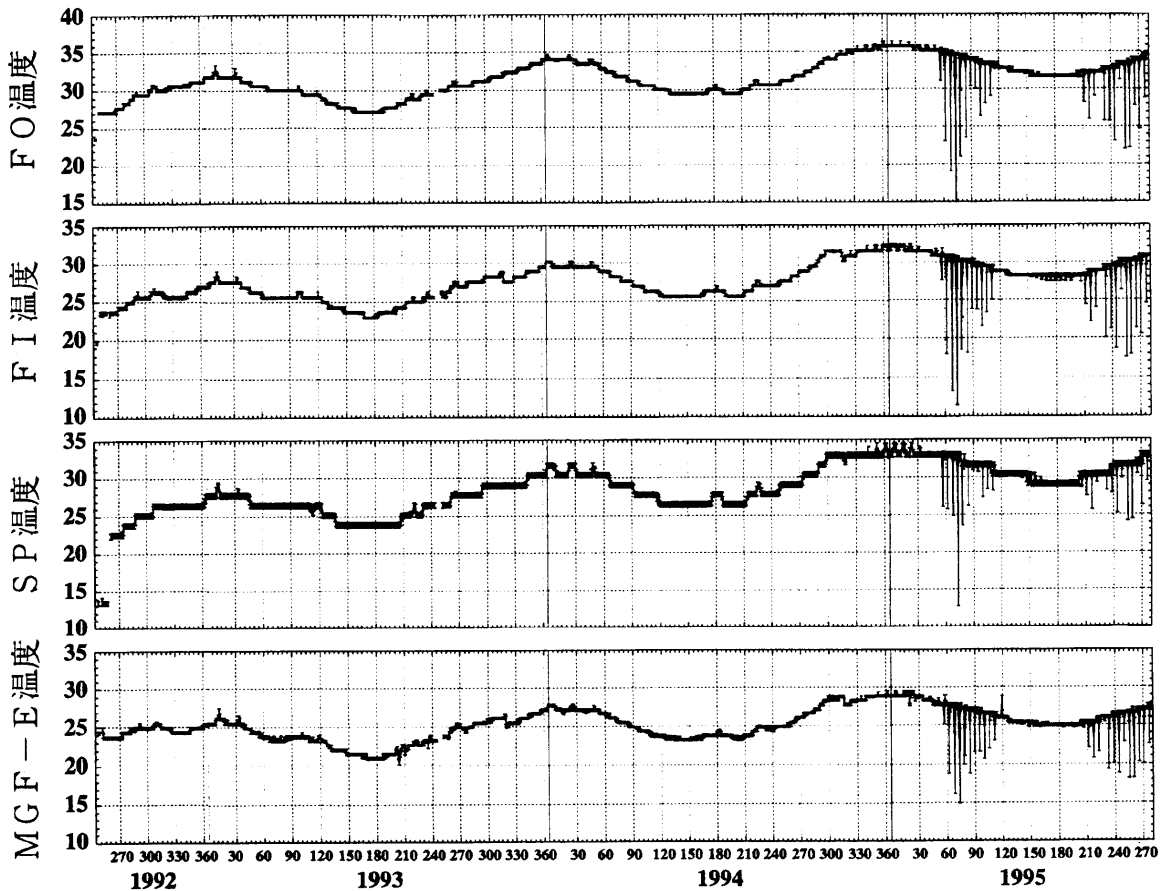


図 8.9 2年9月から95年9月までの磁力計の温度変化。

上より、O/Bセンサー温度、I/Bセンサー温度、SP（誘導磁力計プリアンプ）温度と磁力計電子回路部の温度を示す。1年周期の変化と、全体として上昇する経年変化が認められる。95年3月からは日陰がある。

4.アライメント・ゼロ点の長期変動

温度変化の長期トレンドを図8に示す。図にはO/B・I/Bのセンサー温度、サーチコイルプリアンプの温度（SP、対向する誘導磁力計用マスト中央部に搭載）と磁力計電気回路部（衛星内部）の温度を92年9月より95年9月までの約3年分について示した。各点のデータは、1日に得られた温度データ分布の中央値と温度分布の上四分値・下四分値をエラーバーとして表示している。振幅が約 5°C の1年周期のゆっくりとした変動が各温度測定点で見られている。最大温度を示す時期は1月頃なので、この変化は地球-太陽間の距離の変化によるものと結論される。それに重畳した小さな変動は、衛星の軌道周回運動による太陽との距離の変動によるものと思われる。さらに全体として温度上昇傾向を示す経年変化が各測定点に共通に見られ、92年9月を基準に見ると3年の間に $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が明らかに存在する。この原因としては衛星表面部材の熱特性の変化・燃料の消費による衛星熱容量の変化等が考えられるが、詳細は今後の衛星全体として熱解析の評価が必要である。95年3月～4月、7月～9月にかけて下四分値が大きく下がる箇所があるが、これは日陰の影響である。日陰中のセンサー温度は -20°C 程度まで下がる事があった。

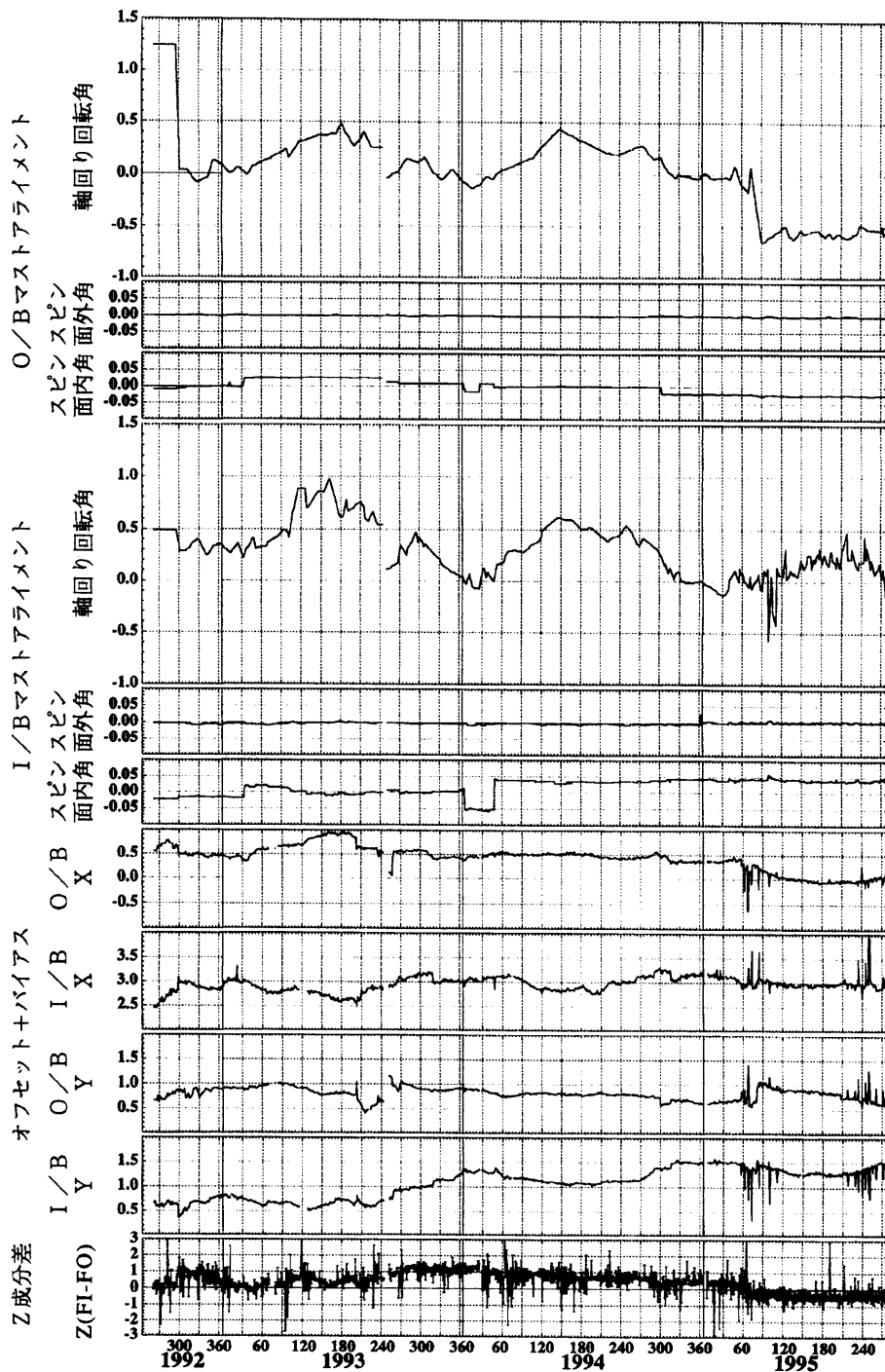


図9.9 2年9月から95年9月までのアライメント・ゼロ点・Z軸観測磁場の差。

軸回り回転角は1年周期の変化と92年10月、95年3月に大きな変動が認められる。O/Bセンサーのゼロ点は概ね安定している。これに対し、I/Bセンサーのゼロ点には1年周期の変化と経年変化があり衛星からの干渉の影響と思われる。Z軸観測磁場の差は概ね1 n T以内であり、O/Bセンサー位置での衛星干渉磁場のZ成分は小さいと推定される。

前章の方法で得られた飛翔中データによるアライメントの評価値をマスト構造の衛星に対する変化とした時に得られる、マストの伸展軸回りの回転角、伸展軸のスピン面内角・面外角の3年分の長期トレンドを図9に示す。軸回り回転角は、地上試験で得られたノミナルの回転位置（ミッション期間中央で予想される回転位置）からの相対角で表示している。また、アライメントデータにより補正された後の、観測レンジ=1（±16 nT）でのX軸・Y軸のゼロ点（オフセット+バイアス）の長期トレンド、並びに、Z軸（スピン軸）観測データのI/BセンサーとO/Bセンサーの差の長期トレンドを同じように図に示した。アライメント角・ゼロ点は1日の平均値を示し、Z軸観測値の差は1日に得られた差の分布の中央値と四分値を表示した。

求められたマスト伸展軸の面外角・面内角の絶対値・変動は非常に小さく（ 0.05° 以下）、誤差の範囲内と考えられ無視できるものと結論される。全伸展時のマストの剛性は非常に大きく、また衛星スピンによる遠心力（張力）による安定状態にあるため、これは当然の事といえよう。従って、地上試験からの予想通りにアライメントの変動は主としてマストの伸展軸回りの回転である。軸回り回転角は、92年10月に大きな変動（O/Bマストで約 1.2° ）を示している。これは、92年9月に実施されたマスト伸展運用時に、対向する誘導磁力計用マストのトラブルのため磁力計マストの伸展が当初予定されていたものと比べて極めて遅い伸展速度、且つ、段階的に実施された事による影響と推定される。つまり、9月の運用による全伸展終了直後ではマストのねじれ特性が部分的に残っており、10月の段階で解放されたと解釈される。その後の変動は、センサーの温度変化（図8参照）に対応するものと考えられる振幅が約 0.5° の年変動を93年、94年の間は示している。93年9月に特異的な変化があるが、これはLEP特殊運用に伴う日陰の影響である。

95年3月から始まった日陰の影響はO/Bマストの軸回り回転角に大きく出ている。日陰によりマストの温度が下がる時、熱膨張率の違いからマストのストラップが張る。95年3月からの日陰運用に対応してストラップをゆるめる作業を実施する筈であったが、マストの伸展制御部（電気回路部）の不具合によりこの運用ができなくなった。従って、日陰のたびにストラップが張る事となりマストに圧縮力が加わる事となった。95年3月に見られる回転角の変動はこの影響が強いと想定される。この事と92年10月の変動を除けば、マストのアライメントの長期変動は概ね地上試験で予想された振る舞いを示していると言える。

X軸・Y軸のゼロ点（センサーオフセット+衛星からのバイアス）については、日陰期間中のデータを除いては概ね安定していると言える。O/Bセンサーのゼロ点は、日陰が始まる95年3月以前のデータについてはやや不規則な変動を示しはするものの、センサー温度の変化に対応するような変動は示していない。不規則な変動は、92年10月、92年8-9月に認められ、マストの軸回りの回転運動の影響によるものと推定される。これに対し、I/Bセンサーのゼロ点には明らかに年変動（7月頃に最小値、1月頃最大値を示す変動）が認められる。センサー・電子回路部の特性としてO/BとI/Bの差は特に無いため、この変動は衛星の発生電力の年変動の影響を衛星に近いI/Bセンサーが強く受けているためと推定される。I/BセンサーY軸に見られる経年変動（3年間で約1 nTの上昇）については、その原因は不明である。他の軸には見られない変動である事よりセンサー固有のものとも思われるが明確ではない。95年3月以降の特にO/BセンサーX軸に見られる長期変動は日陰による温度変化からくるセンサーコア材へのストレスの影響の可能性がある。但し、これについても他の軸には明白な変動はまだ見られなく、推測の域を越えない。

図9の最下段に示した、Z軸（スピン軸方向）成分のO/BセンサーとI/Bセンサーの観測磁場の差（差の1日の分布の中央値、及び、上四分値と下四分値）のトレンドから、両者の差は概ね1 nT以下に納まっていると言える。前述したようにここで扱っている手法ではスピン軸成分のオフセット・バイアスの評価は原理的に不可能である。従ってZ軸のオフセット・バイアスについては、マスト伸展時のデータによるセンサーオフセットの再評価のみを用いて、衛星からの干渉磁場はO/Bセンサー部では極めて小さいとして評価している。センサー固有のオフセットの温度変動・長期変動が無視できるとすると、この図で見られる変動は主としてI/Bセンサー部での衛星からの干渉磁場（バイアス）の長期変動として捉える事が可能である。変動振

幅はI/BセンサーのX・Y軸に見られる変動と同程度なので、解釈としての妥当性はあるが結論的とは決して言えない。仮にこの解釈が正しいとすると、O/BセンサーでのZ軸のバイアスの変動は0.3 n T程度と推定される。

結果として得られたアライメント・ゼロ点の長期変動の様相から見て、今回採用している評価手法は基本的には妥当であると結論できる。これらの評価データに基づいて生成された磁場データは、アライメントについては約 0.1° 、ゼロ点については、X・Y軸については約0.1 n T、Z軸については約0.5 n Tの精度があると結論される。

5.今後の課題

GEOTAIL衛星は、ミッション前半の約2年間はLunar-Swingbyを使った長楕円軌道を取り、周回周期は1ヶ月～3ヶ月であった。この間の日陰はLEPの特殊運用を除いては全く無く、衛星の熱状態・発生電力・機器の運用状態は非常に安定したものであった。この事よりミッション前半の磁力計のオフセット・アライメントは、図9に示したように年変動と経年変化の組合わさったゆっくりとした変化として捉える事ができた。データ処理上も平均的なオフセット・アライメントを1日分の大量のデータ(約28000スピンドータ)による精度の高い評価に基づいて決定する事が可能となり、解析上大きな問題の無いデータを生成する事ができた。

遠地点を下げたミッション後半からは日陰が発生し始めた事により、1日分の平均的な評価値を用いる事は必ずしも適切ではない状況となっている。日陰中は、温度の急激な変化により短時間でアライメントが変動(数度程度)している事が初期的な解析により確認されている。また、太陽電池発生電力の変動・センサー温度の変化によると思われるX・Y軸のゼロ点の短期変動も日陰に関連して認められている。日陰終了後では、大きなアライメント変動は比較的早く(数10分程度)回復するようであるが、ゼロ点変動は数時間に渡り残っているようである。数時間続くゼロ点の変動は、バッテリーへの充電・日陰明けでのヒータ制御などの電流による影響と推察されるが、詳しくは今後の検討が待たれる。これらの変動を正確に評価し磁場データとして精度の高いものを生成するには、10分～数時間のアライメント・ゼロ点の時間変動を評価する手法が必要となる。この手法は、全日照中の安定した衛星運用状態での磁場データの高精度化にもつながるものである。何故なら、1日の平均評価値に基づいて生成した高時間分解能(16 Hz)データには小さいながらもスピン変動が残る事があり、これは衛星からの干渉磁場の短時間での微小変動に対応していると考えられるからである。この点を除けば、現状での評価方法による日照中データについては実解析上大きな問題は無いと考えられるが、日陰を含んだ日のデータについては、アライメント精度について数度、ゼロ点については1 n T程度の誤差がある可能性があり、さらに詳細な評価を必要とする。

Z軸のゼロ点評価については、今後の大きな課題である。現状の手法では、マスト伸展時のデータよりセンサーオフセットを再評価し、衛星からの干渉磁場の影響は無視できる程小さいとしてデータを生成している。この事を正当化する根拠として、地上総合EMC試験によると衛星干渉磁場の双極子モーメントはマスト伸展軸方向を向いていてZ軸方向の干渉強度はX軸方向に対するものより十分に小さいと考えられる事があるが、飛翔中データにより再評価を行う事はまだ実施していない。O/BとI/BのZ軸データの差の長期トレンドより(図9参照)、2つのセンサー固有のオフセット変化が無視できるものであれば、I/Bセンサー位置での衛星干渉磁場の最大値は1 n T程度と推定される事となる。これよりO/BセンサーのZ軸成分への干渉磁場強度は最大0.3 n T程度と推定される。現状の推定は上記の通りであるが、今後、別の手法によるZ軸のゼロ点の評価が必要である事は言うまでもない。

6.まとめ

スピン型衛星の特長を生かした磁場データの評価方法について述べた。アライメント・ゼロ点の長期的変動の評価については、妥当性のある結果が得られたと言えよう。今後は、短期的変動・Z軸のゼロ点評価について検討を行う必要がある。この短期的変動の評価については、1998年打ち上げのPLANET-B衛星のように、弱磁場環境で周回毎（周回周期は約38時間）に日陰が発生するミッションでは重要な要素であり、GEOTAIL衛星のデータを使った評価方法の確立が求められる。また、Z軸のゼロ点の評価方法は、将来の三軸制御衛星での磁場計測に応用できるもので、GEOTAIL衛星として精度の高いデータを得るという目的に合わせて、将来の三軸制御型科学衛星での磁場計測を念頭に評価方法を確立していく必要がある。

謝辞

GEOTAILの設計・製作・試験に係わった関係各位に感謝いたします。高精度磁力計の設計・製作・単体試験に従事した明星電気（株）の関係者、高精度伸展マストの設計・製作・単体試験に従事した日本飛行機（株）の関係者に感謝するとともに、GEOTAIL計画の目的に従って衛星干渉磁場の軽減に大きな協力を得ました関係各位に深謝いたします。

参考文献

- [1] GEOTAIL Prelaunch Report, ISAS SES Data Center, April 1992.
- [2] S. Kokubun, T. Yamamoto, M. H. Acuna, K. Hayashi, K. Shiokawa, and H. Kawano, The GEOTAIL Magnetic Field Experiment, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 7-21, 1994.