

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560789

研究課題名（和文） 衛星搭載機器および衛星本体が持つ残留磁気量の高速計測システムの研究開発

研究課題名（英文） Development of High-Speed Measurement System for Residual Magnetic Moment of Satellite and Magnetized Instruments.

研究代表者

高橋 隆男（TAKAHASHI TAKAO）

東海大学・情報教育センター・教授

研究者番号：20130073

研究成果の概要：

衛星本体や衛星の搭載部品が持つ磁気の帯磁は、地球磁場との相互作用によって衛星の姿勢を変化させる他、搭載機器への磁気的影響により機器の動作を阻害する場合もある。従って、搭載部品の帯磁量を打ち上げ前に計測し、飛翔体として適合するかどうかの試験を実施し、大きい場合は消磁などの対策をとる。本研究は、部品の帯磁量を高精度で計測できるポータブル式磁気モーメント計測装置の開発と精密測定を行なって、実際の衛星部品の磁化低減に寄与した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：磁気モーメント EMC 磁気試験 帯磁 磁場計測 フラックスゲート磁力計

1. 研究開始当初の背景

人工衛星搭載機器や衛星本体が持つ残留磁気や機器に電流が流れることによって発生する電流磁場や地球磁場による誘導磁場は、搭載機器やセンサに電磁的影響を及ぼし、機器の動作を阻害する。殆どの人工衛星が高度300km～2000km程度の低高度軌道を周回するが、この領域の地球磁場は地表面上の2/3程度にしか減少しないため、衛星の残留磁気モーメントと地球磁場との相互作用によって生じる磁気トルクが、衛星の姿勢の変化を引き起こす。特に近年多く打ち上げられる小型衛星は、磁気トルクによる姿勢変動が生じ、

姿勢制御システムが効かなくなるトラブルが多発している。更に小型衛星は高密度で機器が搭載されているため、残留磁気によって機器の動作を阻害し、磁気雑音によって観測ができなくなる場合が生じる。このため衛星打ち上げ前には電磁環境適合性（EMC）試験として、機器や衛星本体の持つ磁気モーメントが精密計測し、大きな帯磁量のある場合は消磁対策や、消磁できない部品にはキャンセル磁石を配置したりする対策を取らなければならない。打ち上げる衛星は最小限の磁化状態で打ち上げることが義務付けられてきたが、これまでの日本におけるEMC磁気試験

は、その測定方法や計測技術が確立されておらず、測定精度も十分ではなく、多くの人数と時間が必要であった。以上の理由で効率的に計測する方法の確立が望まれていることが本研究の背景である。

欧米においても機器の持つ残留磁気計測の重要性は大きく、衛星工学での高精度計測も重要視されている。しかし、NASA および ESA の磁気遮蔽室などの設備や解析方法に関する公表文献はあるが、宇宙機器の磁気モーメント計測方法やデータに関した論文の公表は皆無で、NASA においては機密的要素もあり、非公開事項となっている。日本国内での衛星機器の磁気試験では、JAXA の磁気遮蔽室を利用して手動で計測し、中心双極子磁気モーメント量を手計算しているのが現状であったが、当研究は少人数、短時間かつ高精度に行うシステムの構築で、独創的な特徴である。

2. 研究の目的

当研究では、機器の持つ磁気モーメントを非磁性の回転台に載せ、水平軸と垂直軸による2軸の回転を与えることと距離の異なる2台のフラックスゲート磁力計によって、全球面的な方向での磁場の強さを計測してリアルタイムで機器の持つ磁気モーメントの強さ、方向および位置を高速かつ高精度で算出するシステムを完成させる。これまでにある程度アルゴリズムや装置の開発が進んでおり、衛星本体や機器の残留磁気量の計測を行なっているが、小型衛星用の小さなセンサや部品、材料のような小型の試料の計測には装置が大きすぎて適していない。そのため平成19年度には小型ポータブルな磁気モーメント計測装置を新たに製作し、簡単に高速計測できるシステムとして完成させることを目的とする。

目標とする計測精度は、大型の高精度測定システムでは、磁気遮蔽室内で 0.001Am^2 を目指す。また、磁気遮蔽室のない環境でポータブルな計測装置では 0.01Am^2 を実現することを目指す。また、衛星に搭載予定の実機器を用いた残留磁気量の測定実験や衛星本体の帯磁量計測を行って、このシステムの計測精度の評価を行う。

3. 研究の方法

水平まわりの(垂直軸)回転大台の上に載せたもう1軸の(水平軸)回転小台に回転を与えると、回転小台に載せた機器は、全球面的な方向を向いて回転する。これらの仰角と方位角の角度はエンコーダーで自動的に読み取ってコンピュータに入力する一方、この回転台中心から遠近の2箇所の距離に配置した3軸フラックスゲート磁力計が機器からの磁場変動を計測し、コンピュータに同時入力する。これにより機器の周囲の球面的な方向でかつ2種の距離で測定される磁場の強さが計測され、コンピュータによりリアルタイムで機器の持つ磁気モーメントの強さ、方向および中心位置を計算する。アルゴリズムは、位置が異なる複数の双極子が存在する機器を高次のガウス係数を用いた、磁気ポテンシャル計算で解析する。

機器の持つ磁気は、向きや強さがまちまちの複数の双極子磁石が存在していると近似できるが、正確には双極子では表現できない。また、衛星機器の磁場発生源は、永久磁石、金属の帯磁、誘導磁界、電流ループなどによ

る発生磁界で、これまでの中心双極子近似では不十分であるため、高次の球調和関数で近似するアルゴリズムを開発する。また計測装置は非磁性材料を用いた特殊な2軸の回転台で、全球面的な方向を変え、変動する角度は自動的に読み取ってコンピュータ入力する。これは衛星機器の帯磁量を計測するだけでなく、一般機器や電化製品、材料、部品の帯磁量の精密計測や磁気環境管理などに大きな有効性がある。わが国のこれまでの衛星搭載機器の磁気試験ではおよそ1点の機器の計測に平均4名が30分を要しており(120分)、磁気モーメント計測精度も 0.1Am^2 程度と、高精度観測ミッションへの要求精度である 0.01Am^2 には1桁の不十分さがあった。また、衛星ごとに試行錯誤的に異なった方法で計測が行われており、計測システムが確立されていなかった。当該研究の計測システムは、試験的実験では2名が2分(4分)で1点の機器の残留磁気モーメントをリアルタイムに計測できる見込みであり、30倍の人的時間的効率化が実現できる。しかも高次の球調和関数で近似するアルゴリズムで解析して、精度を2桁向上させることが出来る。

4. 研究成果

(1) 大型観測衛星・搭載機器の帯磁量計測結果

①天文衛星 ASTRO-F の Xバンド変調器(XMOD)と Sバンドテレメータ(TMS)の磁気モーメント計測を、電源 On、Off およびアース線の有無について行い、電源 Off 時にはどちらの機器も $0.05[\text{Am}^2]$ 以下の磁気モーメントで設計要求を満たしており、電源 On の場合にも TMS は磁気モーメントが変化しなかった。一方で、XMOD は電源 On によって磁気モーメントが約2倍となり、アース線の有無によっても約1.5倍の変化があった。XMOD は磁力計センサ部から100mm以内の最も近い場所に搭載される機器でもあり、噛み合わせ試験における磁力計のノイズは XMOD が原因であることが判明した。また、アース線の有無による磁気モーメントの変化は、XMOD 筐体へ電流が流れていることを示しており、電源供給ラインのリターン電流が入力電流に対して小さいことから裏付けられた。アース線の無い状態でも発生磁場が大きいことから、計測結果を用いて磁場分布図を作成し、磁場発生源の特定や、設置位置の検討を行った。この計測で、電源 On 時の計測が可能であり、 $0.01[\text{Am}^2]$ の計測精度があることから、電源 On、Off の磁気モーメントの違いを検出することが出来た。

地球磁気圏観測衛星や火星探査衛星などでの EMC 試験において、地上での計測結果と飛行中のデータ解析結果が一致しないという問題が指摘されていたが、今回の結果から、その原因の一つの要因を見つけ出すことが出来た。

②姿勢制御機器 (Reaction Wheel)

駆動にはリニアモータが用いられており、大きな磁場ノイズを発生することが懸念されていたが、ホイール回転中に外部からトルクを掛けるとホイール軸受けにダメージを与えることから、計測することができなかった。今回のシステムで、初めてホイール回転中の磁気モーメントを計測した。MUSES-C に実際に搭載されたもので、計測結果は、回転中は

ケースの磁気モーメントのみが計測されており、ローターとケースの磁気モーメントを識別することができた。加減速時の磁場を固定点に設置した磁力計で連続的に計測した結果、回転速度の増加に伴い磁場の値が減少するのは磁力計の周波数応答が追従できないためである。一方で、加減速開始時に懸念されたりニアモータからの漏洩磁場は検出されていないことが、計測により確認された。今回初めて回転中リアクションホイールの磁気モーメント計測に成功し、ホイールの停止位置によって発生磁場の大きさと方向が変化することがわかった。実際の衛星搭載機器の観測によって、このシステムが磁気モーメント計測に非常に有効であることが示された。磁場発生源の特定が可能となった。また、今まで難しかった機器動作時の磁気モーメント計測が可能となったことで、実際の運用状態に近い状態での磁場が計測でき、飛行中の影響推定に大いに役立つことが期待される。このシステムの主要な結果をまとめると、以下のようになる。

- ・ 1 回の測定に対して2分以内で計測が可能である。
- ・ 0.01[Am²]以下の計測精度があり、磁場発生源の影響推定が可能である。
- ・ 機器動作中の磁気モーメントが計測でき、停止時と同様の信頼性の高い結果が得られる。

(2) ポータブル磁気モーメント測定装置の開発結果

衛星搭載機器の開発途中段階で、開発現場に持ち込んで残留磁気を計測することを目的としてポータブル磁気モーメント測定装置を製作した。この装置は、水平に回転する回転台と2軸のフラックスゲート磁力計からなる計測部と、磁力計データの回路部と回転台制御装置を持つ測定部の2つの機器で構成される。回転台は回転速度を1~8sec/revの間で変化させることができ、3.6度毎に回転角を検出する。磁力計は、一般実験室環境下での計測を可能とするため、測定範囲±70,000nT、分解能0.01nTのストレートコア2成分フラックスゲート型を採用した。

磁気シールド施設のない、通常の実験室や作業場に測定装置を持ち込んで残留磁気を計測することを想定して、解析方法を開発した。通常±100nT程度ある実験室内磁気変動をあらかじめ計測し、その変動周波数に含まれない回転速度に設定した後、複数回転を行って計測した結果を統計的に処理することで、磁気変動の影響を受けずに、0.005[Am²]の精度で磁気モーメントを解析可能とした。

本システムは、大学内だけでなく、他の研究機関や衛星開発現場に持ち込んで、さまざまな磁場環境において使用したが、計測精度を同様に確保できるシステムであることを確認した。

(3) 小型衛星搭載機器・部品の磁気モーメント計測結果

ソラン株式会社、東海大学、株式会社ウェルリサーチによる三者共同開発の小型人工衛星「かがやき」において、設計段階から残留磁気管理を導入し、各開発段階の必要に応じて搭載機器、搭載部品の磁気モーメント計測を行った。計測は、ポータブル磁気モー

メント測定装置を用い、開発現場に測定装置を持ち込んで計測を行った。

①組立工具、治具の帯磁量計測・管理

人工衛星搭載機器の組み立てでは、部品の着磁を防ぐため、組み立てに用いる工具、治具に非磁性のものを使用することが望ましい。しかし、低コスト小型衛星の場合には、非磁性材料を使った高価な人工衛星製作専用工具や専用治具を調達することは、資金的に困難な場合が多い。「かがやき」の開発では、ある程度磁性の少ない工具を調達し、ポータブル磁気モーメント測定装置で残留磁気を計測した上で、必要があれば消磁対策を行って組立作業に使用するといった、工具、治具管理を行った。

機器組み立て時には、残留磁気を測定し帯磁がないことを確認した工具のみを使用することにより、搭載機器の着磁を低減させた。

②磁気モーメント管理基準の策定

「かがやき」は2.5mの伸展ブームを利用した重力傾斜安定化方式による姿勢制御を行う。そのためには、衛星残留磁気と地球磁場による相互作用トルクを一定値以下に抑え込むことが必須となる。「かがやき」の設計仕様からコンピュータ上で姿勢制御シミュレーションを行い、衛星全体の残留磁気量が0.3[Am²]を上回った場合、姿勢が不安定になることがわかった。この結果から、衛星残留磁気低減目標値を0.1[Am²]、部品・機器単位の目標値を0.01[Am²]と定めた。

搭載機器の磁気管理を円滑に実施するため、磁石や軟磁性体使用の有無や残留磁気の大きさにより3つに分類した。磁石を使用しているか、残留磁気目標値以上である場合をA類、軟磁性体を使用しているB類、磁石も軟磁性体も使用しておらず残留磁気も目標値以下のC類の3種類である。A類、B類に分類された機器は、設計の再検討、消磁対策の実施を義務付けた。このように残留磁気量を定量的に指定した磁気管理基準は、これまでの低コスト小型衛星では行われていない。ポータブル磁気モーメント測定装置により、開発段階または試作品段階で、開発現場において短時間で残留磁気計測可能となったことで、このような定量的な磁気管理基準の策定が可能となった。

③搭載機器の磁気モーメント計測

「かがやき」に搭載される25個の機器全ての残留磁気をポータブル磁気モーメント測定装置で計測した。A類に分類された磁気トルカは、開発段階で芯材のパーマロイのアニール処理(熱処理)の有無などによる残留磁気の変化や交流消磁の効果などを測定し、開発にフィードバックした。また、開発中の計測では設計目標発生磁気モーメント1.0[Am²]に対して、0.8[Am²]の発生磁気モーメントとなっていることが計測により明らかになったため、直ちに供給電源系の見直し、供給電流量の調整を行った。その結果、非動作時には0.01[Am²]以下の残留磁気となり、動作時には1.00[Am²]の磁気モーメントとなるような磁気トルカの開発に成功した。

N₂ガスボンベやバッテリーはB類に分類されたため、試作品や予備品の磁気モーメント計測を実施した。N₂ガスボンベは、鋼板を加工しニッケルメッキを施した物で、残留磁気面からは好ましくないが、安全面や性能面を考慮して、残留磁気対策を実施して搭載することとした。強磁性環境下に長時間さら

されると、個体により多少の差はあるが、 $0.02[\text{Am}^2]$ 程度の残留磁気を持つことがわかった。消磁装置を作成し、消磁をおこなうことで、 $1/4$ の $0.005[\text{Am}^2]$ 程度に低減された。また、一度消磁を行ったポンペを通常磁場環境中に一定時間置いた後に、再度残留磁気を計測したが、残留磁気量の変化がないことを確認した。バッテリー装置はNiMH電池を使用したモジュールとなっており、残留磁気が大きくなる懸念があったため、試作品を複数製作し、残留磁気測定を実施して、効果的な電池配置を検討した。フライトモデル完成時に再度残留磁気測定を行ったところ、7個のバッテリーモジュールのうち、6個は基準を満たしていることが確認された。サブバッテリーモジュールの一つが基準値の2.5倍に当たる $0.025[\text{Am}^2]$ の帯磁が計測されたため、消磁装置による消磁を行い、基準値以下の $0.005[\text{Am}^2]$ に低減させることができた。さらに充放電前後での残留磁気変化を計測し、変化がないことを確認した。

④人工衛星全体の残留磁気計測

「かがやき」完成後、磁気シールドルーム内で高精度残留磁気計測システムを利用して、衛星全体の残留磁気計測を行い、目標値の $1/3$ 以下となる $0.03[\text{Am}^2]$ の残留磁気量を達成した。この値は、姿勢制御要求の $1/10$ 以下の値であり、一辺30cmサイズの衛星としては非常に小さい値が達成できた。

⑤まとめ

低コスト小型衛星において、衛星開発段階から設計要求に残留磁気低減対策を含めるという試みは、姿勢制御、機器の正常動作にとって非常に有効であることを示すことができた。このような、開発の全段階において残留磁気を管理する対策を取るためには、磁気シールドルームが不要で、小型で、持ち運びが可能なポータブル型の磁気モーメント磁気計測システムが非常に有効である。逆に、このようなシステムが存在しない状況で残留磁気低減対策を行うことは、非常に困難である。そういった意味で、本研究で開発したポータブル型磁気モーメント計測システムは、今後の小型衛星開発にとって重要なシステムであることが示されたといえる。

また、衛星専用設計部品、専用組み立て工具を使用しない、民生品を多用した低コスト小型衛星開発では、消磁装置を使用し、適宜消磁を行いながらの作業が有効であることも示された。バッテリーモジュール開発では、事前に十分な検証、磁石などの強磁性材料を近づけないなどの配慮をしていたにもかかわらず、7つのバッテリーモジュールの中の1個が着磁したと思われる残留磁気量を示した。消磁装置で問題なく消磁ができ、かつその後の帯磁が起こらなかったことから、何らかの理由で製作過程の中で着磁したものと予想される。この事実からも、事前の対策だけでは不十分で、試作品の計測結果を設計にフィードバックし、機器完成後も再度残留磁気を確認計測することが必要である。それには、開発現場のすぐ横で、いつでも計測可能なポータブル型磁気モーメント計測システムが非常に効果的である。

小型衛星搭載機器開発におけるポータブル型磁気モーメント計測システムの有効性をまとめると以下ようになる。

- ・持ち運びが容易で、机1個分のスペースがあれば計測ができる。

- ・一般環境下で $0.005[\text{Am}^2]$ の精度で磁気モーメントが計測できる。
- ・1回の測定が2分以内で可能である。
- ・工具・治具などの着磁確認に有効である。
- ・設計段階での試作品を短時間で計測できるため、設計にフィードバックできる。
- ・単体での残留磁気管理容易に行えるようになり、衛星全体の磁気モーメント低減に非常に効果的である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite. Y. Nishio, F. Tohyama and N. Ohnishi Measurement Science and Technology, Vol.18, 2721-2730 Institute of Physics (UK) 2007.

② Geomagnetic Field Observation Using Fluxgate Magnetometer System Onboard Balloons in Antarctica. F. Tohyama, Y. Nishio, H. Yamagishi and T. Yamagami Proc. of the School of Engineering, Tokai University, Ser.E 32, 19-25, 2007.

③ 水星探査機搭載用フラックスゲート磁力計の広範囲温度試験、西尾泰穂、碓井瑞生、遠山文雄、松岡彩子、東海大学紀要工学部 vol. 46, No. 2, 2006, pp. 123-128 Mar. 2007

[学会発表] (計 8 件)

① 水星探査機 (Bepi-MMO) 搭載用フラックスゲート磁力計センサの広範囲温度試験結果 西尾泰穂、遠山文雄、松岡彩子 日本地球惑星科学惑星科学連合 2007 年大会講演会 M134-P003 5月21日 2007.

② 小型衛星「かがやき」における東海大学ミッション、桑原 望、中篠恭一、遠山文雄、田中 真、白澤秀剛、高橋隆男、井口恭介、平田真也、東海大衛星プロジェクトチーム第 51 回宇宙科学技術連合講演会 1B04 札幌 10月31日 2007.

③ 深宇宙探査機搭載用フラックスゲート磁力計センサの温度特性、西尾泰穂、遠山文雄、松岡彩子、第 51 回宇宙科学技術連合講演会 1F13 札幌 10月30日 2007.

④ 小型衛星「かがやき」(SORUNSAT-1)の開発 三枝博、山本勝令、村田祐介、遠山文雄、渡辺和樹、第 51 回宇宙科学技術連合講演会 3B14 札幌 10月31日 2007.

⑤ ポータブル型磁気モーメント計測装置の開発、白澤秀剛、平田真也、遠山文雄、第 8 回宇宙科学シンポジウム、P5-33 宇宙科学研究本部 1月8日. 2008.

⑥ 小型衛星「かがやき」(SORUNSAT-1)における民生品を利用した搭載機器の磁気管理 平田 真也、白澤 秀剛、高橋 隆男、遠山

文雄（東海大）小型衛星「かがやき」プロジェクトチーム、第 52 回宇宙科学技術連合講演会 2C-03、淡路夢舞台国際会議場 11 月 6 日、2008.

⑦小型人工衛星「かがやき」搭載用フラックスゲート磁力計の開発、井口恭介、高橋隆男、遠山文雄、第 52 回宇宙科学技術連合講演会 2F09 淡路夢舞台国際会議場 11 月 5 日、2008

⑧アラスカ大学との共同学生ロケット打上げ実験、平田真也、井口恭介、山田尚史、明石 健二、今村 真、遠山 文雄、中篠恭一、J.Hawkins、日本地球惑星科学惑星科学連合 2009 年大会講演会、幕張メッセ 5 月 18 日、2009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 隆男 (TAKAHASHI TAKAO)
東海大学・総合情報センター・教授
2 0 1 3 0 0 7 3

(2) 研究分担者

田中 真 (TANAKA MAKOTO)
東海大学・総合情報センター・准教授
5 0 3 0 1 3 5 4

(3) 連携研究者

なし

研究協力者

遠山 文雄 (TOYAMA FUMIO)
東海大学・工学部・非常勤講師
4 0 0 5 6 1 5 6
(2007 年度：研究代表者)

白澤 秀剛 (SHIRASAWA HIDETAKA)
東海大学・工学部・非常勤講師