

氏 名 井口 恭介

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1663 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 将来の惑星磁気圏探査に向けたデジタル方式フラックスゲート  
磁力計の開発

論文審査委員 主 査 准教授 阿部 琢美  
准教授 松岡 彩子  
教 授 池田 博一  
教 授 早川 基  
准教授 高島 健  
准教授 小嶋 浩嗣 京都大学

論文内容の要旨

論文題目 将来の惑星磁気圏探査に向けたデジタル方式フラックスゲート磁力計の開発

惑星磁気圏内外のプラズマ物理現象は電磁流体スケール（十万 km オーダー）からイオンスケール（1000 km オーダー）、電子スケール（10 km オーダー）まで様々な時空間スケールを持つ。1980 年代までは衛星単機での電磁場・プラズマ観測手法がとられ、平均的な描像としての磁気圏構造が解明された。1990 年代以降、欧州の Cluster 衛星などの同時多点観測手法によって、スケール毎のプラズマ物理現象の時間発展と空間構造が解明されている。例えば Cluster 衛星によって磁気圏前面の衝撃波遷移層でリップルと呼ばれるイオンスケールの空間構造が同定された。将来計画（SCOPE 計画：cross-Scale COupling in the Plasma universE）では複数衛星を様々な距離で配置することにより、スケールの異なる現象の相互作用の解明を目指す。本研究の目的は SCOPE 計画の科学目標を達成し、衛星に搭載可能な磁力計を開発することである。

リップル構造を持つ垂直衝撃波のシミュレーション研究から局所的な電子の空間スケールで準平行衝撃波が存在することが予測され、イオンスケールのリップル構造は電子スケールのプラズマ不安定現象によって生じると考えられている。SCOPE 計画では電子の時空間スケールで磁場方向を決定し、プラズマの分布関数と電磁場から電子スケールの現象を検出することが要求される。観測的研究によればリップル中の磁場方向は  $30^\circ$  程度異なることが示されており、準平行衝撃波が形成されることが考えられる。この差異  $30^\circ$  を十分に検出するためには、磁場方向を  $30^\circ$  よりも十分に高い精度（10 分の 1 程度、精度 14 ビット相当）で決定することが必要である。

将来計画における磁力計の課題は観測要求（目標特性：精度 14 ビット、分解能 17 ビット、周波数帯域 DC-128 Hz）を達成することであるが、それだけではない。ロケットには積載制限があるので、複数衛星を同時に打ち上げる場合には搭載機器の重量や寸法が特に厳しく制限される。将来計画では磁力計の小型、軽量化が強く求められている。さらに将来の外惑星探査計画を見据えた場合では衛星の電力が限られるため、搭載機器の省電力化も求められる。1980 年代までに開発された磁力計はアナログ磁力計と呼ばれ、回路が多数のアナログ電子部品で構成されている。1990 年代以降の先行研究では回路の大部分を 1 チップのプロセッサに置き換えたデジタル磁力計が開発され、それ以前の磁力計に比べて大幅な小型、軽量、省電力化に成功した。

デジタル磁力計の原理上、磁場測定精度と分解能は磁力計回路中のデジタル・アナログ変換器（DAC：Digital-to-Analog Converter）の精度と分解能により制限される。現在、放射線耐性が保証されかつ高精度・高分解能な宇宙用 DAC は存在しない。そのため先行研究では、将来計画の観測要求を達成し、小型、軽量、省電力なデジタル磁力計を実現できていない。デジタル磁力計の高精度・高分解能化には放射線耐性を有する高精度・高分解能な宇宙用 DAC が必要不可欠である。また、先行研究のデジタル磁力計ではプリアンプやバンドパス・フィルタ回路がデジタル化されずにアナログ回路として残されている。デジタル磁力計のさらなる小型化のためには、残されたアナログ回路を小型化すべきである。

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

本研究ではデジタル磁力計の「高精度・高分解能化」と「さらなる小型，軽量，省電力化」のために，「高精度 DAC 開発」と「磁力計専用小型 ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 開発」による新たなデジタル磁力計を提案した。

磁力計の高精度化のために高精度 DAC としてデルタシグマ型 DAC を採用した。開発したデルタシグマ DAC は，高性能な特性を持たない汎用 FPGA と汎用オペアンプで構成できる。市販汎用部品と同等の特性を持つ耐放射線性 FPGA とオペアンプは入手しやすい。本研究で開発したデルタシグマ DAC の長所は，汎用 FPGA とオペアンプを耐放射線性部品に置き換えることにより，高精度デルタシグマ DAC の特性を維持しつつ放射線耐性の課題を克服できる点である。

デルタシグマ DAC の分解能や精度は，DAC を構成するデルタシグマ変調器とアナログ・ローパス・フィルタ回路の特性，オーバーサンプリング比と呼ばれる設計パラメータ等によって決まる。私は，磁力計の要求特性を満足し，かつ磁力計回路に組み込む上で最適化した高精度なデルタシグマ DAC を設計した。設計結果に基づいて製作したデルタシグマ DAC の特性を実験により評価した結果，分解能と精度はそれぞれ設計どおりの 17 ビット，14 ビットであることが示された。

開発したデルタシグマ DAC をデジタル磁力計に応用するためには，デルタシグマ DAC を組み込んだデジタル磁力計（以下，DFG: Digital FluxGate magnetometer と呼ぶ）が安定に動作し，目標特性を満足することを検証しなければならない。私は DFG の周波数特性シミュレーションによって，DFG が安定に動作するように設計し，設計通りの周波数特性が実験によって得られたことを示した。さらに，開発した磁力計の分解能は，デルタシグマ DAC の設計値 17 ビットと矛盾しない結果が得られたことから，DFG の設計手法の妥当性が示された。

本研究では DFG を科学観測ロケット S-310-40 号機に搭載する機会を得ることができたので，宇宙での実証試験を行った。観測ロケット実験における DFG の役割は，ロケットのスピン周波数を求めること及び地磁気姿勢角（ロケットのスピン軸と磁場のなす角）を求めることである。DFG は，ロケットの打上げからテレメータがロックオフするまでの全期間にわたりデータを取得でき，ロケットのスピン周波数を正確に導出することに成功した。一方，地上較正試験で得られた感度とフライトデータを用いて較正した感度から地磁気姿勢角を  $5^\circ$  以内の精度で求めることができたが，ロケット実験で要求される  $2^\circ$  の精度を下回る結果となった。要求精度を下回った原因として，DFG を構成する電子部品の温度特性により DFG の感度に変化し，地上較正試験とは異なる感度に変化したことが考えられる。

デジタル磁力計のさらなる小型化のために，ディスクリート部品のオペアンプで構成されたアナログ・プリアンプ回路とバンドパス・フィルタ (BPF: Band-Pass Filter) 回路を 1 チップの ASIC に収める技術を採用した。私が設計した回路は，従来のプリアンプと BPF 回路を 1/6 程度に縮小できる回路であり，デジタル磁力計のさらなる小型化を可能にする。実験により評価した ASIC の特性は設計に矛盾しない特性であり，デジタル磁力計に ASIC を応用できる。

本論文で提案したデジタル磁力計によって，SCOPE 計画の科学目標を達成し，衛星に搭載できる可能性を十分に示せた。

論文題目 将来の惑星磁気圏探査に向けたデジタル方式フラックスゲート磁力計の開発

本論文は将来の磁気圏探査計画を見据えたデジタル方式フラックスゲート磁力計の開発について論じたものである。

複数衛星を様々な距離感覚で配置することにより、磁気圏中の空間スケールの異なる様々な現象間の相互作用解明を目指す SCOPE ミッションが検討されているが、その科学目標を達成可能にするために衛星に搭載されるべき磁力計の開発を本研究の目標と定めている。具体的には、SCOPE 計画の最重要課題のひとつである磁気圏前面の衝撃波領域において電子の時空間スケールで磁場ベクトルを決定するという科学的要求等を考慮し、磁場測定における目標性能を精度 14 ビット、分解能 17 ビット、周波数帯域 DC~128 Hz とし、多方面から詳細な実験的理論的検討を加え、その実現性を確認している。また、将来計画では磁力計の小型化、軽量化、省電力化が強く求められることを意識し、高精度 DAC

(Digital-to-Analog Converter) と磁力計専用小型 ASIC (Application Specific Integrated Circuit) の開発を基にした新たなデジタル磁力計を提案している。特に、宇宙空間で使用可能なデルタシグマ型 DAC を独自に開発することで、測定精度において既存のものよりも優れた磁力計の実現を可能にしたことは本研究の中で重要な位置を占めている。ここで開発したデルタシグマ DAC は、汎用 FPGA とオペアンプを耐放射線性部品に置き換えることで、高精度デルタシグマ DAC の特性を維持しつつ放射線耐性の課題を克服できるという特筆すべき長所をもっている。

論文において、第 1 章では飛翔体による磁場観測の歴史を振り返り、将来の磁気圏探査ミッションにおいて要求される磁場測定の精度について論じている。また、これまで開発されたフラックスゲート磁力計の仕様や性能についてのレビューを行い、同磁力計の将来像について述べ、これを受ける形で本研究の目的について詳しく説明を行っている。

第 2 章では第 1 章で導いたデルタシグマ DAC の目標性能を達成するためのパラメータを性能計算により求め、観測ロケット搭載用として実際に製作した磁力計が、分解能と精度、周波数帯域に関する目標を達成したことを特性評価実験の結果として示している。また、本設計に基づき製作された磁力計を伝達関数モデルで表した後に周波数特性の最適化設計を行ったところ、測定結果が設計計算結果と一致したことは、磁力計の動作安定性を設計によって保証することの妥当性を示している。

第 3 章では前章で述べた設計に基づいて製作された磁力計を観測ロケットに搭載して取得されたデータについて論じている。磁力計はロケットのフライトを通じ磁場データを良好に取得し、ロケットのスピン周波数と姿勢の決定がなされた。測定においてはロケットのスピン軸方向の人工的な磁場オフセットがフライト中に 1800nT 変化していることを示唆する予想外のデータが得られたが、その原因について幾つかの観点から深く考察を行い、可能性の高い事象について詳しく議論をしている。

第 4 章ではプリアンプと BPF (Band Pass Filter) 回路の設計に 5 mm 角の ASIC チップを用いたことにより、そのサイズを従来の 1/6 程度まで小型化したことを示した。開発

(Separate Form 3)

した ASIC チップのノイズレベルは設計計算により得られた特性 ( $2 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) 通りであり、フラックスゲート磁力計センサのノイズ ( $2\text{-}3\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) 以下であることを示した。

第 5 章では本論文の結論を述べるとともに、本研究の結果を踏まえ、デジタル磁力計の更なる高性能化のために発見された課題を 3 つ掲げ、それに対する具体的な対策方法を提示している。

以上の通り、本論文は近未来の磁気圏探査ミッションの衛星に搭載される磁力計に求められる高性能化、小型化、省電力化を達成するための新たな開発について述べたものであり、SCOPE 計画のみならずあらゆる衛星計画のための磁力計開発に対する貢献が大である。論文の第 2 章、第 3 章の一部については査読付学術雑誌に投稿中であり、発表を通じた学術的な貢献もなされている。これらの結果を踏まえ審査委員会は本論文が博士 (理学) を与えるに相応しい学術レベルにあると判断した。