

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02970

研究課題名(和文) 波動粒子相互作用によるプラズマ加熱過程解明を目指した磁場波形取得観測器の開発

研究課題名(英文) Development of the instrument to measure the magnetic field wave-form and the study of the plasma heating process by the wave-particle interaction

研究代表者

松岡 彩子 (Matsuoka, Ayako)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：80270437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系内で普遍的に起きている波動粒子相互作用によるプラズマ加熱機構の解明を目指し、太陽風中の磁場擾乱の高時間分解波形取得を計画・検討した。太陽風中の電磁乱流や衝撃波の電子スケール磁場擾乱を計測する磁場観測器の機能・性能検討と開発を行った。リソースが限られる小規模の探査機に搭載可能な小型・省電力を実現する磁場観測器の開発、試験機の製作と機能・性能試験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁的な擾乱によるプラズマの加熱は、太陽風のみならず地球惑星電磁圏、太陽等の恒星で普遍的に起きている物理過程である。これまでに例のない、高時間分解磁場波形計測で得られる新たな知見により、波動粒子相互作用による一般的なプラズマの加熱機構に関して理解を進めることが出来る。本研究で開発する磁場観測器は、宇宙空間プラズマ物理研究だけでなく地球周辺・太陽系の宇宙プラズマ観測、惑星探査に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：We investigated the magnetometer to obtain electron-scale electromagnetic turbulence and shock waves in the solar wind, to study the mechanism of plasma heating due to wave-particle interactions that occur universally in the solar system. We examined the techniques to measure high-time resolution and highly precise waveforms of magnetic field disturbances in the space, and in parallel to drastically reduce the weight and power consumption of the hardware. We applied newly developed techniques to the magnetometer test model, which would be useful also for future small spacecraft missions where the weight and power resources would be strictly limited.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：磁場観測 観測機器開発 太陽風 惑星間空間 惑星探査機

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球軌道以遠の太陽風中の電磁乱流や衝撃波は、NASA と ESA の共同ミッションとして打ち上げられた Ulysses 探査機等の太陽風観測により解析されてきた。その結果に基づいた理論的な研究で、電磁乱流とのサイクロトロン共鳴や衝撃波中の Buneman 不安定によりプラズマが加熱される可能性が指摘された。しかし、磁場の観測はいずれも低周波の波形と高周波のスペクトル分解されたデータであるために、電磁乱流や衝撃波の高時間分解波形は不明なままであり、理論と現実の太陽風観測との整合の決着を見ていない。電子スケールまでの高周波磁場波形を取得することにより、プロトンおよび電子加熱への効果を定量的に評価することが可能となる。このためには、電子のジャイロ周波数および電子ジャイロ半径が分解できる時間精度で磁場波形観測を行うことが必要であった。

2. 研究の目的

(1) 太陽風中の電磁乱流および衝撃波の高時間分解磁場波形観測に必要な機能・性能の具現化を行い、搭載する磁場観測器で実現する方法を検討する。特に、高時間分解データを取得する上で重要な周波数特性・タイミングに対する要求、および電子スケールの微弱な磁場擾乱を検出するためのノイズに対する要求に重点を置いて検討する。

(2) 将来の小型探査ミッションでは重量・電力リソースが厳しく制限されることが予想される。従来よりも抜本的に削減した重量・電力リソースによって宇宙機用の磁場観測器を実現するために、これまで開発してきたフラックスゲート方式磁場観測器のデジタル化、および、ASIC 集積化回路部の機能を改良・拡張し、小型・省電力化したアナログ信号検出回路を改良する。プリントボードモデルを製作し、要求された機能・性能を満たすことを確認する。

3. 研究の方法

(1) 将来の小型探査ミッション搭載を念頭に置き、電子スケール磁場擾乱観測を行う磁場観測器に必要な以下の機能・性能の実現性検討を行う。(a) 地球軌道における太陽風観測データ実績例を基に生成した模擬データから導出される、プラズマに対し静止した系における波形取得に必要な周波数特性 (b) 高精度時間分解能を実現するために、フラックスゲート方式のデータ同期に必要なタイミング精度 (c) 微弱な磁場擾乱観測に必要なノイズ性能と、それを実現するデジタル化回路、ASIC 回路設計の最適化

(2) これまで応募者が人工衛星・観測ロケットに搭載した磁場観測器の開発実績を元に、フラックスゲートセンサアナログ信号検出のデジタル化回路および ASIC 集積回路を改良、将来の太陽風観測ミッション探査機に搭載可能な磁場観測器の試作モデルを製作、試験する。

4. 研究成果

(1) ミッションの拡張

本研究は申請当初、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所で検討されていたソーラーパワーセーラー(OKEANOS)への搭載を想定し、惑星間空間における電磁乱流・衝撃波の磁場を計測する小型軽量の機器の開発を目指していた。しかしその後計画の実現検討の過程において見直しが行われ、OKEANOS のプロジェクト化が見送られることとなった。一方で、平成 29 年度検討により、本研究で開発する磁場観測器は同じく宇宙科学研究所で実施を計画している火星衛星探査計画(MMX)のイオン質量分析器(MSA)の磁気方位判別機能のセンサ回路、および、原始彗星探査ミッション Comet Interceptor 搭載の磁場観測器としても有効であることがわかった。MMX 搭載 MSA は、火星の衛星フォボスから飛翔したイオンを観測を目的とする。イオンは磁場の影響を受けて飛跡が曲がるため、MSA が観測したイオンがフォボス起源かどうか判別するために、小型軽量の磁力計が必要となった。また、Comet Interceptor 計画には、彗星と太陽風の相互作用を調べるために MMX と同じくイオン質量分析器(MSA)と磁場観測器が搭載される。彗星の周囲に出来る衝撃波や、磁気シース内のプラズマ波動、magnetic cavity 等の主要なターゲットを観測するためには、小型軽量の特性を持つだけでなく、高時間分解、高精度を実現する磁場観測機器が必要となった。このように、OKEANOS に代わって MMX と Comet Interceptor が、本開発の具体的なミッションとなった。

(2) ターゲットとなる磁場模擬データを基にした必要性能の検討

地球軌道で太陽風をモニタする WIND 衛星が実際に取得した磁場データを元に、MMX や Comet Interceptor が観測する太陽風磁場の疑似データおよび疑似ノイズを作成し、観測と機上校正のシミュレーションを行い、その結果を元に必要な仕様・性能の検討を行った。大半の期間で磁場を目標とする高精度で観測するためには、ノイズレベルを 0.3nT 以下に抑える必要があるこ

とが分かった。

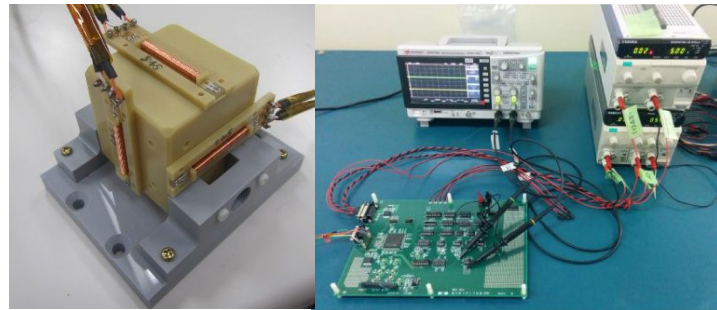
(3) 基本波型直交フラックスゲート磁力計センサの開発

アモルファスワイヤをコア材として用いた新規開発の基本波型直交フラックスゲートセンサ(FM-0FG)およびそれを使用した磁場観測器回路の開発を行った。従来宇宙機搭載用磁場観測器として主に採用されてきた2次高調波型平行フラックスゲート磁力計に用いられたパーマロイリングコアに比べ、FM-0FG センサは抜本的に軽量であり、またドライブ電流が小さくて済み消費電力の抑制が期待される。

2018(平成30)年度に、FM-0FG センサの試験回路基板の製作と評価を行った。まず初めに

磁場観測器として必要なセンサドライブ回路および信号検出回路を一式製作し、動作確認、性能評価を行った。当初はドライブ信号にも検出信号にも大きなノイズが見られ、多くの問題が発生したが、原因を特定し解決した。その結果に基づき、ドライブ回路のみを設計し直し、試験回路基板の製造と更に高精度の性能評価を行った。磁場観測器のノイズやオフセット等の基本的かつ重要な特性は、ドライブ電圧波形の安定性で決定される。当初はドライブ電圧波形の安定性に問題があったが、原因を特定し最終的には良好なドライブ電圧波形が得られた。

2019(令和元)年度には、MMX への搭載を想定して宇宙用部品と同等の部品を用いたFM-0FG回路の試験基板を製作し、動作確認を行った。信号検出回路の検波・バイアススイッチングには3つの異なる方式を試作し、そのうちの1つの方式では一部の帯域を除く周波数で目標とする低ノイズの信号検出が達成されることを確認した。



MMX 搭載磁場観測器試作機試験風景
(左：FM-0FG センサ、右：回路部)

(4) デジタル方式回路部の開発

デジタル方式磁力計回路部は、

従来アナログ回路で構成していた信号処理部をデジタル演算に置き換えることにより、将来の宇宙探査用途に小型軽量化、省電力化を目指した新方式の磁場観測器である。研究代表者らは、日本で初めて宇宙機搭載用のデジタル方式磁力計を開発し、観測ロケットに搭載した実績を持つ。この回路を更に高精度化するための開発を行った。2021(令和3)年度に試験基板の製造を行い、性能試験を行い、良好な結果を得た。

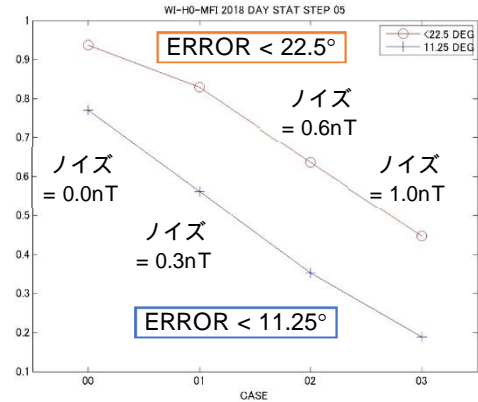
(5) ASIC(特定用途集積回路)の開発

観測器の小型・省電力化のために、フラックスゲートセンサ信号検出を行う回路部分を集積化したASIC(Application Specific Integrated Circuit、特定用途集積回路)の開発、試作と試験を行った。

2018(平成30)年度に、従来から開発していた、2次高調波型平行フラックスゲート磁力計のピックアップ回路のASICチップのパッケージングの電源周りボンディングの最適化検討およびセラミックパッケージへの変更等、より宇宙機への搭載仕様に近い設計を行った。過去に製造したパッケージング設計に更に電源周りのバイパスコンデンサを追加することにより、電源出力の急激な変動に対しても安定して動作する設計に変更した。また、チップの厚みに対応するために従来のプラスチックパッケージからセラミックパッケージに変更した。

2019(令和元)年度には、専門の技術を有する業者の支援によりアナログ回路ASICチップのパッケージングを行った。前年度に製造した試験基板にこのASICチップパッケージを搭載して動作試験を行い、正常に動作することを確認した。

2020(令和2)年度に、詳細な性能試験(ノイズ、ループレスポンス、非直線性など)を行い、目標とする性能を達成することを確認した。



3か月間の実測の惑星間空間磁場データを
仮想較正した結果



ASIC 回路の試験風景

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Murata Naofumi, Nomura Reiko, Matsuoka Ayako	4. 巻 484
2. 論文標題 Current annealing of amorphous wire core for performance improvement of fundamental mode orthogonal fluxgate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 497 ~ 503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2019.04.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsuoka Ayako, Teramoto Mariko, Nomura Reiko, Nose Masahito, Fujimoto Akiko, Tanaka Yoshimasa, Shinohara Manabu, Nagatsuma Tsutomu, Shiokawa Kazuo, Obana Yuki, Miyoshi Yoshizumi, Mita Makoto, Takashima Takeshi, Shinohara Iku	4. 巻 70
2. 論文標題 The ARASE (ERG) magnetic field investigation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-018-0800-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Baumjohann W., Matsuoka A., et al.	4. 巻 216
2. 論文標題 The BepiColombo?Mio Magnetometer en Route to Mercury	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-020-00754-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Murata Naofumi, Matsuoka Ayako	4. 巻 21
2. 論文標題 Practical Method for Drastic Improvement of Output Offset Stability in Bias-Switched Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 18641 ~ 18649
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2021.3089693	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yokota Shoichiro, Terada Naoki, Matsuoka Ayako, Murata Naofumi, Saito Yoshifumi, Delcourt Dominique, Futaana Yoshifumi, Seki Kanako, Schaible Micah J., Asamura Kazushi, Kasahara Satoshi, Nakagawa Hiromu, Nishino Masaki N., Nomura Reiko, Keika Kunihiro, Harada Yuki, Imajo Shun	4. 巻 73
2. 論文標題 In situ observations of ions and magnetic field around Phobos: the mass spectrum analyzer (MSA) for the Martian Moons eXploration (MMX) mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01452-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 松岡彩子
2. 発表標題 磁気圏内外を駆ける電磁流体波 / 人工衛星の磁場測定
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150 回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura; Yoshizumi Miyoshi, Masahito Nose, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Yuki Obana, Satoshi Kurita, Shun Imajo, Masahiro Kitahara, Iku Shinohara
2. 発表標題 The magnetic field investigation on the ARASE (ERG) mission: Data characteristics and scientific results
3. 学会等名 IAGA-IASPEI 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ayako Matsuoka, Naofumi Murata
2. 発表標題 Examination of the Magnetic Field Experiment for the OKEANOS Mission
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Ayako Matsuoka, Naofumi Murata, Reiko Nomura
2 . 発表標題 Examination of the Magnetic Field Experiment for the OKEANOS Mission
3 . 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Masahito Nose, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Yoshizumi Miyoshi, Kazuo Shiokawa, Tsutomu Nagatsuma
2 . 発表標題 Initial results of the magnetic field experiment by the magnetometer (MGF) for the ARASE (ERG) mission
3 . 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Masahito Nose, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Yoshizumi Miyoshi, Kazuo Shiokawa, Tsutomu Nagatsuma, Takeshi Takashima, Iku Shinohara
2 . 発表標題 The magnetic field investigation on the ARASE (ERG) mission
3 . 学会等名 The 3rd ERG Mission Science Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Yoshizumi Miyoshi, Masahito Nose, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Tsutomu Nagatsuma, Kazuo Shiokawa, Yuki Obana, Takeshi Takashima, Iku Shinohara
2 . 発表標題 The magnetic field investigation on the ARASE (ERG) mission: Data characteristics and initial scientific results
3 . 学会等名 Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Masahito Nose, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Tsutomu Nagatsuma, Kazuo Shiokawa, Yuki Obana, Yoshizumi Miyoshi, Takeshi Takashima and Iku Shinohara
2. 発表標題 The magnetic field investigation on the ARASE (ERG) mission: Data characteristics and initial scientific results
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野村 麗子 (Nomura Reiko) (30637690)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・HQ部門 環境試験技術ユニット・宇宙航空プロジェクト研究員 (82645)	削除：2018年9月4日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関