

令和元年6月21日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17815

研究課題名(和文) 太陽風粒子の熱構造発展の解明に向けた超小型磁場観測器の開発研究

研究課題名(英文) Development of the ultra-slim magnetometer for investigations of the thermal structure of the solar wind

研究代表者

野村 麗子 (Nomura, Reiko)

国立天文台・RISE月惑星探査検討室・特任研究員

研究者番号：30637690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、センサ部と信号処理部一体型の超小型・軽量、省電力かつ低ノイズの磁場観測器を実現させるため、フラックスゲート磁力計機器の信号処理回路のアナログ部について、一部を除いて5mm角のアナログASICチップに収めた。それによって信号処理部のサイズは従来と比べ2/3の大きさとなった。アナログASIC回路の回路シミュレーションと評価基板を用いた性能評価を経て、SS-520-3号機とRockSat-XNの観測ロケット実験にてロケットに搭載した。RockSat-XNは2019年1月13日にノルウェーのアンドーヤから打上げられ、本研究の磁場観測器は宇宙空間にて正常に動作し良好なデータが得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アナログASIC回路搭載の磁場観測器は、これまで日本で飛翔体に搭載されたことはなく、今回初めて宇宙空間にて正常に動作させることに成功した。宇宙探査機搭載用の超小型磁場観測器の実現に向けて、アナログASIC回路を飛翔体搭載用磁場観測器に適用できることが、観測ロケット実験によるフライト実証により確かめられた。本研究成果は、専用の伸展物を必要としない磁場観測器の研究開発に発展することができ、将来の惑星探査において複数磁場観測器を用いた高空間分解能の観測を実現するために重要である。

研究成果の概要(英文)：In order to develop the ultra-slim, light, power saving, and low-noise magnetometer which is integrated sensor and electronics, we put most parts of analog circuits of the fluxgate magnetometer into the analog ASIC chip. Then the size of our electronics became two thirds of the one of the conventional fluxgate magnetometer. Through the performance evaluation with evaluation boards, we installed our ASIC-based magnetometers into two sounding rocket experiments, SS-520-3 and RockSat-XN. The RockSat-XN was launched on January 13, 2019 from Andoya, Norway, however the SS-520-3 was postponed, our magnetometer successfully observed the geomagnetic field during a flight. This is the first magnetometer applied with analog ASIC chips in Japan which successfully operated in the space environment.

研究分野：超高層大気，飛翔体搭載機器開発，惑星科学

キーワード：磁場観測器 ASIC 観測ロケット実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

太陽風の温度  $T$  は太陽圏動径方向に沿って断熱的に冷えると考えられていたが、惑星探査機 Voyager 2 号の観測によると、断熱変化で得られる予想温度 ( $T=T_0 \cdot R^{-4/3}$ ) よりも太陽風は温かい ( $T \sim T_0 \cdot R^{-1/2}$ ) ことがわかった [Richardson and Paularena, 1995]. これは、宇宙空間中における太陽風粒子の加熱を示唆しているが、その加熱物理機構は未だ明らかにされていない。この加熱機構のひとつとしては太陽風中のプラズマ乱流の散逸が有力視されている。

惑星間空間中の太陽風乱流スペクトルは Helios1 衛星 [Roberts+1987] や Ulysses 衛星 [Goldstein+1995] によって、地球近傍は Cluster 衛星 [Sahraoui+2007;2010] によって調べられ、乱流のエネルギー  $E$  と波数  $k$  の関係 ( $\log_{10}(E) \sim kA + E_0$ ) には、イオンや電子の慣性長に対応する  $k$  でのキンクが (ベキ値  $A \sim 5/3 \rightarrow$  急勾配化が 2 段) 存在することが観測されている。これらのキンクは、波動粒子相互作用によって乱流から粒子へエネルギーが受け渡された可能性を示しているが、粒子にエネルギーを渡す役割を持つはずの波動の正体がわからない等、物理機構は未解明のままである。

波動の正体が掴めないのは、これまでの惑星間空間での観測的研究が単機によるものであったという致命的な欠点に起因する。単機観測では時間・空間変化を分離することはできないので、3次元物理量である波数ベクトルを導出できず、波動モード決定に必要な分散関係 (周波数  $\omega$  と波数  $k$  の関係) が導出できない。これまでの単機での観測的研究では、乱流を構成する波動の位相速度が太陽風速度より十分小さいという仮定 (Taylor's hypothesis) を用いて、観測周波数から波数の絶対値を推測してきた。しかし位相速度  $v$  を無視することによって、波動の分散関係を知ることができず ( $v=k/\omega=0$ )、波動モードは謎のままとなる。

一方、JAXA では木星トロヤ群小惑星探査のために大規模な (一辺  $\sim 50\text{m}$ ) 薄膜太陽電池パネルを用いたソーラーセイルミッションが計画されている。この大規模な太陽電池パネルの 4 隅に磁力計を搭載すれば、乱流スペクトルだけでなく、鍵となる波数計測ができるのではないかと考えた。例えば、地球近傍の太陽風は電子慣性長が  $100\text{m}$  のオーダーなので、 $50\text{m}$  で磁場変動の空間分解が出来れば、電子と相互作用する波動の波数ベクトルを導出し、分散関係を求めることによって詳細な物理機構を議論できるようになる。

### 2. 研究の目的

宇宙探査機搭載用の磁場観測器の大幅な小型・軽量化を図る事により、従来では困難であった観測ができるようになり、新たな科学成果を創出することが本研究の目的である。当面の科学的な目的は、太陽風中の乱流スペクトルと波数計測を行い、太陽風粒子の太陽圏動径方向における熱構造発展の解明に寄与する。具体的には、集積回路に用いられる ASIC 技術を用いて、これまで A5 サイズであった信号処理部を 1/3 以下にし、センサ部と信号処理部一体型の超小型・軽量、省電力かつ低ノイズの磁場観測器を実現する。これによって専用の伸展物を用いずに、惑星探査機の大型太陽電池パネルの端点に観測器を搭載し、良質の磁場データを取得することを目指す。

### 3. 研究の方法

太陽風粒子の太陽圏動径方向における熱構造発展の解明を目指して、ソーラーセイルミッションに搭載され得る超小型・軽量、省電力かつ低ノイズの磁場観測器を技術的に確立することを目的とし、ASIC 技術を用いてセンサ部と信号処理部が一体型の磁場観測器を開発する。具体的には、フラックスゲート磁力計機器の信号処理回路のアナログ部について、その全体を ASIC チップに収めることを最終目標とし、まずは積分器等の回路機能別 (A) と回路全体 (B) の 2 種の ASIC チップを製作する。そのために、設計と回路シミュレーションを繰り返し、惑星探査で要求される性能・仕様を満たす回路を設計する。その後、試験によって性能を評価後、観測ロケット実験によりフライト実証を行う。次に、製作した (A) を活用しながら、(B) の改良対策を施し、アナログ回路全体を収めた ASIC チップを完成させる。

### 4. 研究成果

本研究では、センサ部と信号処理部一体型の超小型・軽量、省電力かつ低ノイズの磁場観測器を実現させるため、フラックスゲート磁力計機器の信号処理回路のアナログ部について、アナログ ASIC 回路が持つ精度より高い精度が必要な部分以外を ASIC チップに収めた。信号処理部のサイズは従来と比べ  $2/3$  の大きさとなった。アナログ ASIC 回路の回路設計シミュレーションと評価基板の製作、さらに 2 回の観測ロケット搭載用の磁場観測器の製作を経て、観測ロケット実験によるフライト実証まで実施することができた。観測ロケット実験は、JAXA 宇宙科学研究所による SS-520-3 と米国 RockSat-XN プログラムに参加し、前者は打ち上げが延期されたが、後者は 2019 年 1 月 13 日にノルウェーのアンドーヤより打ち上げられた。ASIC 回路を含む磁場観測器は正常に動作し良好なデータが得られた。アナログ ASIC 回路搭載の磁場観測器は、これまで日本で飛翔体に搭載されたことはなく、今回初めて宇宙空間にて正常に動作させることに成功した。

#### (1) 評価基板

これまで宇宙科学研究所で実施された観測ロケット実験において、アナログ ASIC を含む回路を採用した磁場観測器はなかった。そのため、アナログ ASIC を新たに導入した場合、まず正常



図 1 : アナログ ASIC 回路搭載の DFG 評価基板

に動作するかどうか、さらにはノイズレベルと入出力線型性などの性能を、回路シミュレーションと評価基板 (図 1) を用いて調べた。その結果、従来通りの性能が得られることがわかったので、SS-520-3 号機観測ロケット実験にて飛翔体搭載のフライト実証をすることを決定した。

(2) SS-520-3 号機観測ロケット搭載用デジタル方式フラックスゲート磁力計 (Digital-type fluxgate magnetometer; DFG)

回路シミュレーションと評価基板によるアナログ ASIC 回路の評価を経て、1 軸のみ ASIC 回路を搭載した磁場観測器デジタル方式フラックスゲート磁力計 (digital-type fluxgate magnetometer; DFG) を、SS-520-3 号機観測ロケットに搭載するために製作した。

Parameter	Value
サンプリング周期 [ms]	5
感度 X [nT/digit]	0.141630620
感度 Y [nT/digit]	0.136714551
感度 Z [nT/digit]	0.128783640
オフセット X [nT]	15.77
オフセット Y [nT]	-114.61
オフセット Z [nT]	-81.80
計測レンジ [nT]	±70000
許容温度	-0.5 to 50 °C
観測器重量	約 2 kg



図 2 (a) : DFG センサ部

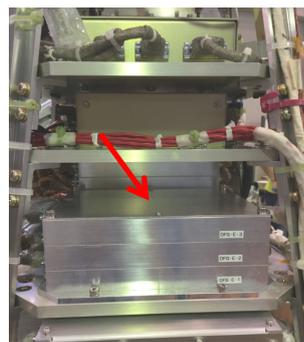


図 2 (b) : DFG エレキ部

表 1 に、DFG の性能諸元を示す。感度とオフセットなどを求める較正試験は計 2 回柿岡地磁気観測所で行われた。表に示す値は 1 回目の試験で得た値で、2 回目とは約 10% 異なる結果となっているため、SS-520-3 号機の観測ロケット実験の打ち上げがおこなわれる場合には再試験が必要である。単体環境試験として、温度試験 (-0.5 から 50°C)、真空試験 (1mmHg で 20 分間保持)、衝撃試験及び振動試験 (正弦波とランダム) を実施し、DFG が正常に動作することを確認した。また、SS-520-3 号機観測ロケット実験の計器合わせの際に、ロケットに組み付けられた DFG センサ部とエレキ部を図 2 に示す。

図 3 に、DFG の周波数特性を示す。アナログ ASIC を含む回路はこれまでの飛翔体フライトの実績がないことから万が一動作しなかった場合を考えて、ロケット基軸方向を避け、ロケットスピン面内の X 成分に採用した。そのため、X 成分は 3dB 落ちが 300Hz と、200Hz である他の 2 成分と異なる周波数特性を示す。

(3) 観測ロケット実験 RockSat-XN 搭載用 ASIC-based fluxgate magnetometer (AFG)

SS-520-3 号機観測ロケット実験打ち上げ延期を経て、3 軸ともアナログ ASIC 回路を搭載した磁場観測器 ASIC-based fluxgate magnetometer (AFG) を、フライト実証と地磁気観測のために米国観測ロケット RockSat-XN に搭載した。

表 2 に、AFG の性能諸元を示す。感度とオフセットなどを求める較正試験は、宇宙航空研究開発機構の筑波宇宙センターにある磁気試験設備にて計 3 回行われた。表に示す値は 3 回の平均値である。RockSat-XN では、詳細な電磁両立性の試験 (EMC) が行われなかったため、計測レンジを ±100000nT とし、他機器からの影響による外部磁場オフセットなどが発生した場合に対する十分な余裕を持たせた。前回の SS-520-3 号機のとおり単体環境試験として、温度試験 (-0.5 から 50°C)、真空試験 (1mmHg で 20 分間保持)、衝撃試験及び振動試験 (正弦波とランダム) を実施し、AFG が正常に動作することを確認した。

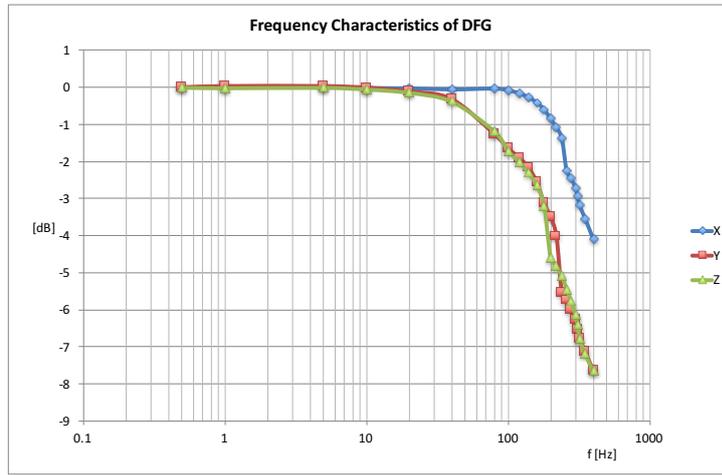


図 3 : DFG の周波数特性. 青, 赤, と緑がそれぞれ X, Y, と Z 成分.

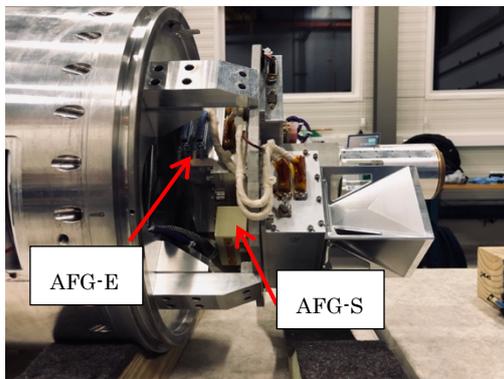


図 4 : AFG のセンサ部 (AFG-S) とエレキ部 (AFG-E)

表 2 : AFG の性能諸元

Parameter	Value
サンプリング周期 [ms]	5
感度 X [nT/digit]	$0.182737 \pm 0.000015$
感度 Y [nT/digit]	$0.197597 \pm 0.000038$
感度 Z [nT/digit]	$0.185757 \pm 0.000007$
オフセット X [nT]	$4.78 \pm 1.58$
オフセット Y [nT]	$-8.09 \pm 1.04$
オフセット Z [nT]	$-60.76 \pm 1.51$
計測レンジ [nT]	$\pm 100000$
許容温度	-0.5 to 50 °C
AFG-S 大きさ	63 mm×63mm×63mm
AFG-E 大きさ	150 mm×162 mm×45 mm
観測器重量	2 kg
消費電力	1.96 W

図 4 は, ノルウェーのアンダーヤにて, ロケット打ち上げ前の動作確認の際に, ロケット頭胴部に取り付けられた AFG のセンサ部とエレキ部である. 図 5 に, AFG の周波数特性を示す. 3dB 落ちは 3 成分とも 300Hz である.

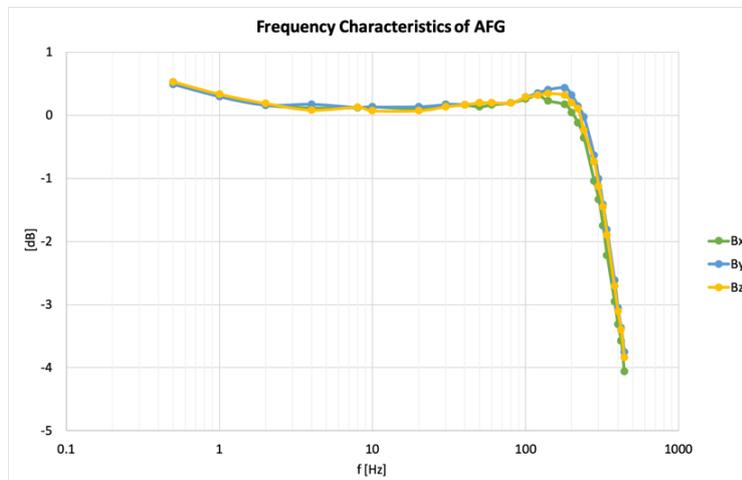


図 5 : AFG の周波数特性. 青, 橙, と灰色がそれぞれ X, Y, と Z

RockSat-XN は 2019 年 1 月 13 日 09:13UT にノルウェーのアンダーヤから打ち上げられ、図 6 が示すように、AFG は正常に動作し良好なデータが得られた。アナログ ASIC 回路搭載の磁場観測器は、これまで日本で飛翔体に搭載されたことはなく、今回初めて宇宙空間にて正常に動作させることに成功した。09:13:30UT から及び 09:19:00UT から約 30 秒間観測データが乱れているのは、テレメータデータの異常によるものである。現在はフライトデータからロケットスピンによる影響を取り除いて、観測された磁場データの性能評価と、自然現象と地磁気観測を用いたロケットの姿勢決定のための解析を行っている。

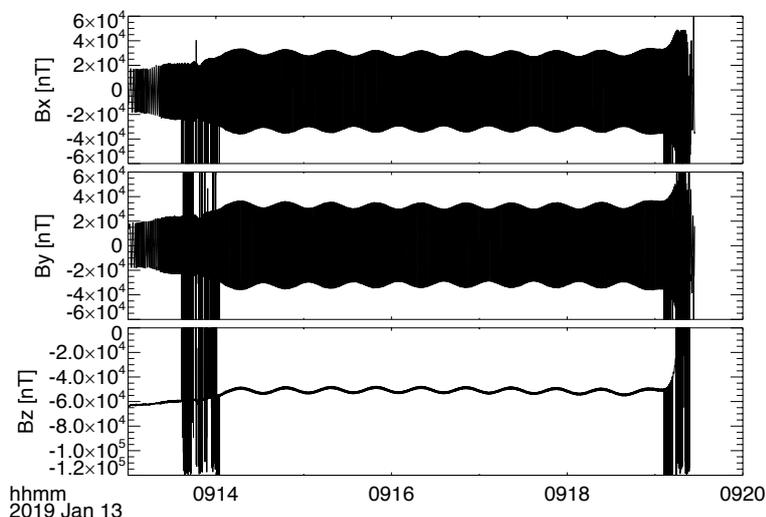


図 6 : RockSat-XN 観測ロケット実験時の AFG フライトデータ。上から X, Y, と Z 成分を示す。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① Reiko Nomura\*, Ayako Matsuoka, Kazuhiro Ikeda, and Hirotugu Kojima, Development of the magnetometer with on-board ASIC circuit for SS-520-3 sounding rocket, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.
- ② 野村麗子\*, 松岡彩子, SS-520-3 号観測ロケット搭載 Digital-type Fluxgate Magnetometer (DFG) 概要, 平成 29 年度極研研究集会 EISCAT レーダー・地上光学観測・観測ロケットによるカスプ近傍電離大気流出現象のメカニズム解明に向けた総合観測, 2017 年.
- ③ Reiko Nomura\*, Ayako Matsuoka, Hirokazu Ikeda, and Hirotugu Kojima, Development of ultraslim magnetometers for future interplanetary explore missions, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2016.
- ④ Reiko Nomura\*, Ayako Matsuoka, Hirokazu Ikeda, Hirotugu Kojima, Yoshiya Kasahara, and Mitsunori Ozaki, Development of ultraslim magnetometers to discover the mechanism of the solar wind heating, JUPITER TROJAN 2016: New Insights in Early Solar System Evolution, 2016.
- ⑤ Reiko Nomura\*, Ayako Matsuoka, Hirokazu Ikeda, and Hirotugu Kojima, Development of ultraslim magnetometers to discover the mechanism of the solar wind heating, Japan Geoscience Union 2016, 2016.

## 6. 研究組織

研究協力者

- ① 研究協力者氏名：松岡 彩子 (准教授・宇宙科学研究所)  
ローマ字氏名：Ayako Matsuoka
- ② 研究協力者氏名：池田 博一 (教授・宇宙科学研究所)  
ローマ字氏名：Hirokazu Ikeda
- ③ 研究協力者氏名：小嶋 浩嗣 (准教授・京都大学)  
ローマ字氏名：Hiroshi Kojima
- ④ 研究協力者氏名：浅村 和史 (准教授・宇宙科学研究所)  
ローマ字氏名：Kazushi Asamura

⑤ 研究協力者氏名：寺本万里子（助教・九州工業大学）  
ローマ字氏名：Mariko Teramoto

※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、研究者個人に帰属されます。