

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244097

研究課題名(和文)宇宙プラズマにおける高空間分解能の科学を拓く超小型プラズマ波動観測器

研究課題名(英文)Tiny plasma wave instruments opening science with high spatial resolutions in space

研究代表者

小嶋 浩嗣(Kojima, Hirotsugu)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：10215254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙空間でプラズマ波動を高い空間分解能で観測するために、プラズマ波動観測器そのものに対し小型化をはかる。具体的には、アナログASICとしてプラズマ波動観測器専用のチップを設計・開発することによって小型化をはかった。通常は個別の部品で製作するプラズマ波動観測器を、一つのチップで実現することで、A4版サイズ程度の基板となるプラズマ波動観測器がマッチ箱サイズにまで小型化することが可能であることを示した。これは世界最小のプラズマ波動観測器である。一方、電磁界センサーやその周辺回路も小型軽量化をはかることにより、プラズマ波動を観測してデータを無線伝送する能力をもつ小型センサープローブの開発にも成功した。

研究成果の概要(英文)：We miniaturized a plasma wave receiver system onboard a spacecraft. The objective of the miniaturization is to realize plasma wave observations with high spatial resolutions. By miniaturizing the plasma wave receiver system, we can distribute a lot of plasma wave receivers in a target area. The miniaturization of the plasma wave receiver is realized by designing and developing an analog ASIC chip. The conventional plasma wave receiver consists of commercial discrete devices. However, the ASIC is the special device, which is dedicated only to plasma wave receivers. By using the ASIC of the plasma wave receiver, we developed the smallest plasma wave receiver in the world. Furthermore, we also succeeded in developing a small sensor probe using the ASIC of the plasma wave receiver. The sensor probe carries a electric field sensor made of the CFRP, a small communication wireless device as well as the ASIC. The sensor probe has the capability to realize multiple point observations in space.

研究分野：宇宙科学

 キーワード：プラズマ波動 無衝突プラズマ ASIC 小型プラズマ波動観測器 チップ化 センサープローブ 波動  
 粒子相互作用 電磁界センサー

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間プラズマは無衝突状態にあり、その運動論的エネルギーは、プラズマ波動を介して授受される。従ってエネルギーの輸送媒体としてのプラズマ波動は重要である。特に、近年、衛星観測による強非線形現象である静電孤立波の発見や、放射線帯における電子の加速にプラズマ波動の寄与が重要であるモデルの提唱などにより、プラズマ波動の観測的な研究は重要度を増している。

一方、科学衛星によるプラズマ波動観測では、その時間分解能の向上は観測装置の高度化により年々進歩しているのに対し、空間分解能については、より多くの観測点の配置でしか向上しないにもかかわらず多くの観測点にプラズマ波動観測器を配置した多点同時観測は実現できていない。より多くの衛星を観測点として配置するには、ロケットの打

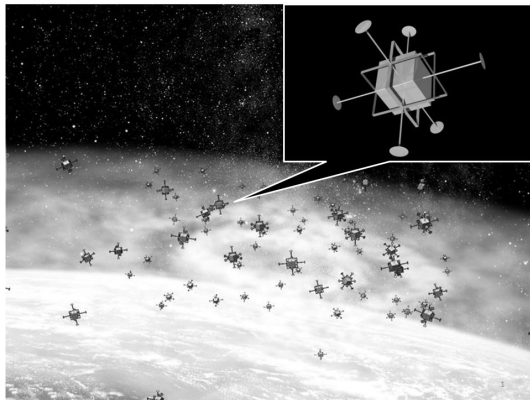


図 1: 宇宙空間を多点で観測する MSEE センサーノード(想像図)。

ち上げ能力に限界がある以上、衛星そのもの、そして、その搭載観測装置であるプラズマ波動観測器の小型・軽量化が必須なのである。本研究代表者が平成 19 年度から行った基盤研究 A「宇宙圏電磁環境モニター装置に関する研究」(以下、「旧基盤 A」と呼ぶ)では、宇宙電磁環境を多点でモニターするためにターゲット空間に多数飛散させる「小型センサーノードシステム(MSEE: Monitor for Space Electromagnetic Environment)」を提唱しその基礎研究を展開した(図 1)。本研究は、この旧基盤 A の研究成果をもとに更に発展させることにより高度な観測システムを実現する技術を構築する。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は旧基盤 A の研究成果をより高度に発展させることにあり、具体的には、下記のようにまとめられる。

#### (1) [超小型プラズマ波動観測器を実現するアナログチップの開発]

旧基盤 A で開発をスタートさせた「波形捕捉型プラズマ波動観測器チップ」について、観測周波数のダイ

ナミック切り替え機能などを組み込むことにより高機能化を図る。波形捕捉型よりも更に高度な技術開発となる「スペクトル型」プラズマ波動観測器を 5mm 角チップ内に実現する。

- (2) 伸展前には非常に小型になる「炭素繊維を用いた形状記憶型フレキシブル電磁界センサー」を開発する。
- (3) 上記(1), (2)を組み込む小型センサーノードシステムを開発する。
- (4) 実空間で 3 次元構造モデルを組み込み強空間異方性のある宇宙プラズマ空間を実現・解析できる宇宙電磁環境シミュレータを開発する。

### 3. 研究の方法

本研究課題の研究方法は下記の通りである。

- (1) アナログ回路をチップ内に設計・試作し、プラズマ波動観測器専用のチップをつくりあげる。
- (2) 軽量・自己伸展型センサーのための炭素繊維複合材(CFRP)を用いた試作開発を行う。
- (3) 小型センサープローブの設計・試作
- (4) 現実に近いモデルを導入できるシミュレーションコードの実現と利用

### 4. 研究成果

- (1) 超小型プラズマ波動観測器を実現するアナログチップの開発  
プラズマ波動観測器のアナログ回路を ASIC 技術によってチップ化し超小型化を図った。具体的には、下記ようになる。

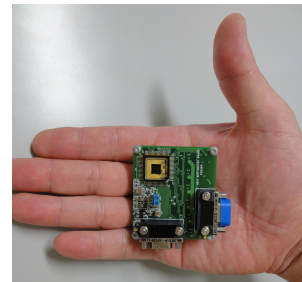


図 2: 開発したチップを搭載したマッチ箱サイズのプラズマ波動観測器(京都新聞掲載)。

旧基盤 A で開発した「波形捕捉型」プラズマ波動観測器チップの高度化を図った。特に多くの現象に対して利用できるように外部からの制御信号により受信器ゲインを変化させる仕組み、高いゲインをもった際にダイナミックレンジを損なわないようにするためのオフセット調整回路、rail-to-rail オペアンプの導入によるダイナミックレンジ改善、などを行い、実際の科学衛星に搭載されるプラズマ波動観測器の性能に引けをとらない性能が実現されるに至った。

の「波形捕捉型」チップと電源、A/Dコンバーターなどの必要周辺回路とを組み合わせ世界最小となるマッチ箱サイズのプラズマ波動観測器を実現した(図2)。

「波形捕捉型」では特に重要となる「位相」を含めたオンボード較正機能をチップ内に実現した。併せて電界センサー用プリアンプのチップ化も行った。サーチコイル磁界センサー用プリアンプをチップ化し、3軸分のプリアンプを5mm角チップ内に実現することに成功した(図3)。

上述の波形捕捉型チップ、および、サーチコイルプリアンプチップに対する放射線試験を行い、Total doseで数10krad以上まで耐えることができることを確認した。これは宇宙での利用に対する重要な放射線耐性が確認できたこととなる。

周波数変換型「スペクトル」受信器で必要となるミキサ回路などのチップ化を行った。

周波数変換を用いない新しい方式によるスペクトル受信器の考案と、そのチップ化への要素技術開発を行った。これは波形捕捉型チップを応用し、また、デジ

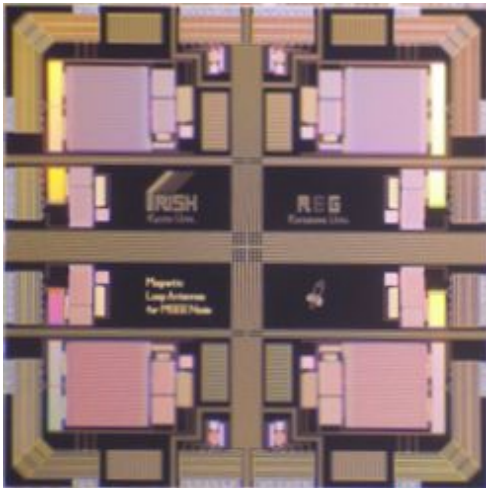


図3: 5mm角内に収められたサーチコイルプリアンプ(チップの顕微鏡写真)。

タル化技術をも組み合わせることによって、従来、周波数分解能と時間分解能の高さが両立しづらかったスペクトル型受信機の欠点を克服できる新型のスペクトル受信器である。ここでは、周波数切り替えをフィルタバンクで行い、それと同時にアンチエイリアシングフィルタやA/Dコンバーターのサンプリング周波数の切り替えも行うことによって、効率のよいスペクトル受信器となるようにしている(図4)。

- (2) 炭素繊維材料を用いた軽量電界センサーの実現

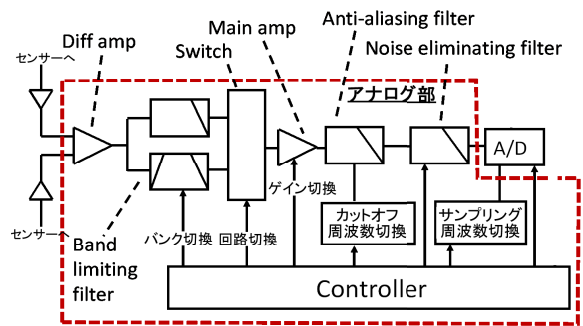


図4: 新型スペクトル受信器のブロック図。フィルタ周波数をサンプリング周波数と同期させながら変化させることができ、狭帯域でSNのよいデータを得ることができる。



コマンドで伸展



図5: 開発した自己伸展電界センサー。

炭素繊維複合材料(CFRP)を3次元で織ることのできる我が国の技術を活かし、MSEE センサープローブに巻き付けた形で収納し、コマンドにより解放されると自己伸展力によってアンテナが伸びる新しい方式の電界センサーの開発に成功した。CFRP でできた本電界センサーは非常に軽量であるため、MSEE センサープローブにかぎらず、他の方面への利用も期待される(図5)。

- (3) 小型センサープローブの実現

上述した研究成果である、波形捕捉型プラズマ波動観測器チップ、CFRPによる自己伸展アンテナ、磁場センサープリアンプのチップ化を取り込み、小型センサープローブを設計しプロトタイプモデルを実現した。プロトタイプモデルでは、これらのプラズマ波動観測器コンポーネントに加え、電源、メインCPU、伝送用小型無線器を内蔵させ、実際に計測したデータを無線器によって遠方へ伝送するところまでを実証することができた。図6は京都大学における一般市民への研究成果公開の中で、実際にセンサープローブのセンサー、ASICを用いてとら

えた電波を小型無線器によって伝送している様子を示している。

- (4) プラズマをすべて粒子として取り扱うシミュレーションコードを開発し、電界アンテナから放出される光電子による衛星周辺の電流系の構造などの解析が可能となった。これによりセンサープローブにおける電界センサーの感度評価についても可能となった。

以上の研究成果をもとに、MSEE 小型センサープローブのロケット実験実証モデルを製作し、それによるロケット実験実証も計画しているが、JAXA の打ち上げスケジュールとの都合により現在計画待ち状態となっている。

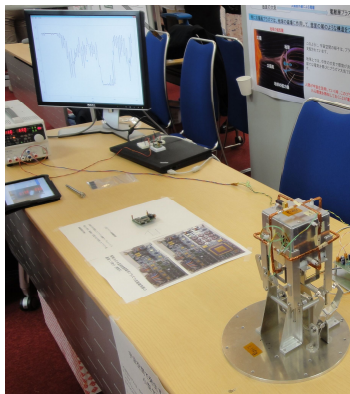


図 6: センサープローブ実証モデル(手前)で計測され無線伝送された磁場波形が奥のディスプレイに表示されている。

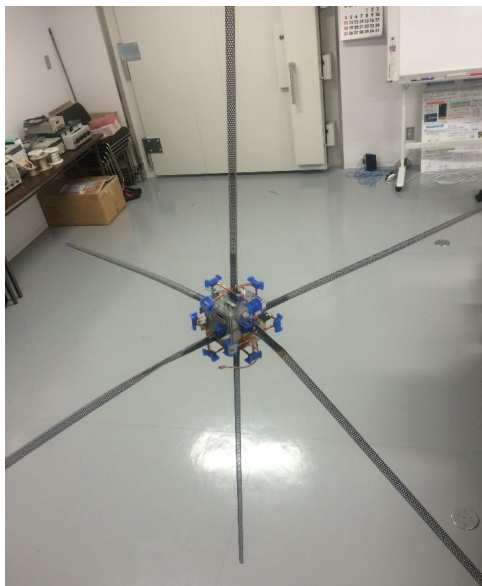


図 7: 自己伸展電界アンテナを展開した状態のセンサープローブ

## 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 11 件)

1. Ashida, Y., H. Yamakawa, I. Funaki, H. Usui, Y. Kajimura, and H. Kojima, Thrust evaluation of small-scale magnetic sail spacecraft by three-dimensional particle-in-cell simulation, *J. Propulsion and Power*, vol. 30, pp1186-1196, doi: 10.2514/1.B35026, 2014[査読有].
2. Hikishima, M., Y. Katoh, and H. Kojima, Evaluation of waveform data processing in wave-particle interaction analyzer, *Earth, Planets and Space*, vol. 66, pp1-10, doi: 10.1186/1880-5981-66-63, 2014[査読有].
3. Fung, S., K. Hashimoto, H. Kojima, S. A. Boardsen, L. N. Garcia, H. Matsumoto, J. L. Green, and B. Reinisch, Terrestrial myriametric radio burst observed by IMAGE and Geotail satellites, *J. Geophys. Res.*, vol. 118, pp1101-1111, doi: 10.1002/jgra.50149, 2013[査読有].
4. Morioka, A., Y. Miyoshi, S. Kurita, Y. Kasaba, V. Angelopoulos, H. Misawa, H. Kojima, and J. P. McFadden, Universal time control of AKR: Earth is a spin-modulated variable radio source, *J. Geophys. Res.*, vol. 118, pp1123-1131, doi: 10.1002/jgra.50180, 2013[査読有].
5. Katoh, Y., M. Kitahara, H. Kojima, Y. Omura, S. Kasahara, N. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Seki, K. Asamura, T. Takashima, and T. Ono, Significance of wave-particle interaction analyzer for direct measurements of nonlinear wave-particle interactions, *Ann. Geophys.*, vol. 31, pp503-512, doi: 10.5194/angeo-31-503-2013, 2013[査読有].
6. Ozaki, M., S. Yagitani, H. Kojima, K. Takahashi, and A. Kitagawa, Current-sensitive CMOS preamplifier for investigating space plasma waves by magnetic search coils, *IEEE sensors journal*, vol. 14, pp421-429, doi: 10.1109/JSEN.2013.2284011, 2013[査読有].
7. Kojima, H., Plasma wave receivers onboard scientific satellites, *An introduction to space instruments*, ed. K. Oyama and F. Cheng, vol. 1, pp227-240, doi:10.5047/aisi.022, 2013.
8. Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and H. Nakashima, Plasma particle simulations on stray photoelectron current flows around a spacecraft, *J. Geophys. Res.*, vol.117, doi: 10.1029/2012JA017673, 2012[査読有].
9. Fukuhara, H., H. Kojima, K. Ishii, S. Okada, and H. Yamakawa, Tiny waveform receiver with a dedicated system chip for observing plasma waves in space, *Measurement science and technology*, doi: 10.1088/0957-0233/23/10/105903, 2012[査読有].
10. Miyake, Y., H. Usui, and H. Kojima, Effects of the guard electrode on the photoelectron distribution around an

electric field sensor, J. Geophys. Res., vol. 116, doi: 10.1029/2010JA015600, 2011[査読有].

11. Yagitani, S., M. Ozaki, and H. Kojima, A compact loop antenna system for monitoring local electromagnetic environments, IEICE Trans. Commun., vol. E94-B, pp1744-1747, 2011[査読有] <http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/bitstream/2297/28335/1/TE-PR-YAGITANI-S-1744.pdf>.

[学会発表](計 33 件)

1. Saito, Y. et al., 10-year Plan for Japan-Norway Sounding Rocket Experiment Program, AOGS2014, Sapporo, Japan, July 30, 2014.
2. Zushi, T. et al., Development of the small sensor probe for multiple-point observation of plasma waves in space, AOGS2014, Sapporo, Japan, July 31, 2014.
3. 糀宏樹, 他, 耐放射線特性に優れたプラズマ波動観測用 ASIC プリアンプ, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 信州大学, 2014 年 11 月 2 日.
4. 頭師孝拓, 他, 新型ワンチッププラズマ波動スペクトラム観測装置の設計開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 信州大学, 2014 年 10 月 31 日.
5. 大西啓介, 他, ロケット実験用プラズマ波動計測小型プローブシステムの開発, 日本地球惑星科学連合大会, 横浜パシフィコ, 2014 年 4 月 28 日.
6. 頭師孝拓, 他, ASIC を用いた小型プラズマ波動受信器の開発, 日本地球惑星科学連合大会, 横浜パシフィコ, 2014 年 4 月 28 日.
7. 小嶋浩嗣, 科学衛星でみる宇宙プラズマ波動, プラズマ科学のフロンティア 2013, 核融合科学研究所, 2013 年 8 月 22 日.
8. Kojima, H., et al., Plasma wave receiver system implemented on a chip for the future space missions, AOGS2013, Brisbane, Australia, June 25, 2013.
9. 萩行憲輔, 他, 新型ワンチップ周波数掃引スペクトル受信器の開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 高知大学, 2013 年 11 月 5 日.
10. 尾崎光紀, 他, サーチコイル磁力計プリアンプの定電流雑音アナログ ASIC の開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 高知大学, 2013 年 11 月 5 日.
11. 頭師孝拓, 他, 小型センサーノード放出口ケット実験用波形捕捉チップの開発, 高知大学, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 高知大学, 2013 年 11 月 5 日.
12. Ozaki, M., et al., Development of a wideband magnetic search coil and a

low noise ASIC preamplifier for natural electromagnetic waves, AP-RASC2013, Taipei, Taiwan, September 4, 2013.

13. Hangyo, K., et al., Miniaturization of plasma wave receiver using analog ASIC, AP-RASC2013, Taipei, Taiwan, September 4, 2013.
14. Ishii, H., et al., Development of very small plasma wave receiver for space missions, AOGS2012, Resorts world convention center, Singapore, August 15, 2012.
15. 石井宏宗, 他, 較正機能を有するプリアンプ体型小型つばらま波動波形補足受信機の開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌コンベンションセンター, 2012 年 10 月 22 日.
16. 福原始, 他, 波動伝搬特性を用いた小型衛星コンステレーションによるプラズマ圏微少構造観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 神戸大学, 2011 年 11 月 5 日.
17. 小嶋浩嗣, 他, 超小型プラズマ波動観測器を実現する京都大学におけるアナログ ASIC 開発, 宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2012 年 1 月 5 日.

[その他]

ホームページ等

研究代表者ホームページ

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/people/kojima/>

京大アカデミックデイ 2014 における研究成果公開

<http://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/2014/37/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小嶋 浩嗣 (KOJIMA, Hirotugu)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号: 10215254

(2) 研究分担者

臼井 英之 (USUI, Hideyuki)

神戸大学・システム情報科学研究科・教授

研究者番号: 10243081

八木谷 聡 (YAGITANI, Satoshi)

金沢大学。電子情報学系・教授

研究者番号: 30251937