

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19204048

研究課題名(和文) 宇宙圏電磁環境モニター装置に関する研究

研究課題名(英文) Study on the monitor system for space electromagnetic environment

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

研究成果の概要(和文)：専用の IC チップを設計し宇宙圏電磁環境モニターの中心となるセンサーノード内に収めることのできる小型プラズマ波動観測器チップの開発に成功した。また、そのチップを使って従来よりも飛躍的に小型となった波形捕捉型プラズマ波動受信器の開発に成功した他、小型の電磁界センサーを開発し十分な感度をもつことを示した。また、空間的な異方性が強い宇宙空間を扱うことのできる計算機シミュレーションプログラムを開発し電界センサーの特性などの解析に成功した。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in developing the very small plasma wave receiver chip using the analogue ASIC. The very small plasma wave receiver chip is the essential component in a sensor node which the Monitor system for space electromagnetic environment (MSEE) consists of. Using this chip, we developed the business card size waveform capture receiver. We also succeeded in developing the small electromagnetic sensors with high sensitivities, which are installed to the MSEE sensor node. Furthermore, we developed the computer simulation code, which can calculate microscopic plasma processes under the spatial anisotropy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2008年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2009年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
総計	36,000,000	10,800,000	46,800,000

研究分野：宇宙電波科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：プラズマ波動, 宇宙電磁環境, アナログ ASIC, 波動・粒子相互作用, センサーネットワーク, センサーノード, 小型センサー, 位置捕捉

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、従来より科学衛星によるプラズマ波動観測、および、そのデータ解析により、宇宙空間プラズマ中で発生している波動・粒子相互作用の研究に取り組んできた。宇宙空間プラズマは、本質的に「無衝突」状態にあり、プラズマ粒子がもつ運動論的エネルギーは、プラズマ波動を介して粒子同士で交

換される。そのため、宇宙空間においてプラズマ波動を観測することは、そこで発生している物理現象を捉える上で非常に重要である。

一方、このように宇宙空間プラズマ中では、プラズマ波動を介したエネルギー輸送が行われるため、宇宙空間中における環境の「乱れ」もプラズマ波動を観測することによって

捉えることができる。この「乱れ」とは、自然現象だけにとどまらず、人間が宇宙空間で生存活動を行うことによる人工的な擾乱もそこに含まれる。実際に、スペースシャトル周辺では、スペースシャトルが飛行することによって発生するプラズマの乱れが、プラズマ波動として観測されている。

特にこのような人工的なプラズマの乱れをプラズマ波動観測を通してモニターすることは、人類の宇宙空間における活動に対する環境アセスメントという意味で欠かせない計測である。スペースシャトルで代表されるような構造物によるその周辺の宇宙プラズマの乱れは非常に空間的な異方性を示す。そのため、一点の観測ではターゲット空間全体をモニターしたとはいえず、複数の観測点での同時計測が必要となる。宇宙空間での観測はこれまで科学衛星による一点あるいは、数点観測が限界である。これは、衛星、あるいは、そこに搭載されている機器が大きいため宇宙空間にもっていける数に限りがあるからである。そのため、搭載観測装置の極端な小型化が重要であり、また、衛星の概念にとらわれず、多点において計測するシステムの構築が必須である(宇宙空間におけるセンサーネットワーク)。本研究を開始する際の背景としてはこのようなものがあつた。

## 2. 研究の目的

本研究は、宇宙空間での人間活動により発生する「人工的な電磁擾乱」、即ち、「宇宙空間プラズマ-人間活動相互作用」を明らかにすることができる「宇宙圏電磁環境モニターシステム」において、それを構成する重要なコンポーネントであるセンサーノード「宇宙圏電磁環境モニター装置」を開発・研究することを目的とする。「宇宙圏電磁環境モニターシステム」とは、宇宙構造物などの周辺に多数のセンサー装置を配置し、それぞれで電磁環境の測定を行い、時々刻々変化するその情報を、宇宙ステーションなどの中央基地に集約するシステムのことである。そして、そのセンサー装置である「宇宙圏電磁環境モニター装置」は、プラズマ環境を測定する非常に小型化された装置のことである。

## 3. 研究の方法

本研究の遂行にあたっては、主に、下記のような方法によっている。

- (1) 小型プラズマ波動観測器を実現するアナログ ASIC 回路の開発
- (2) 従来のものから発想を転換した小型の電界・磁界センサーの製作
- (3) 小型のセンサーノードのブレッドボードモデルの開発
- (4) 宇宙空間における強異方性現象をシミュレートできるシミュレータの開発

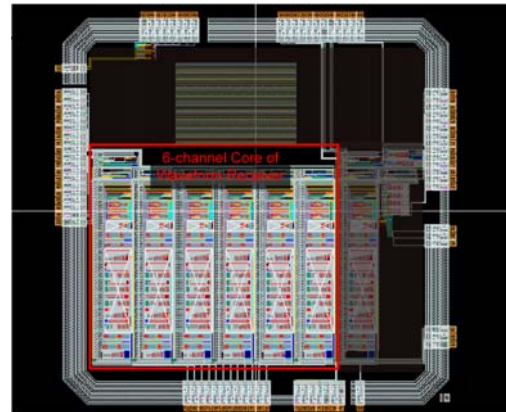


図1 5mm角チップ内に実現された波形捕捉型受信器のレイアウト。

## 4. 研究成果

本研究においては上述のようにいくつかのアプローチによって宇宙空間を多点で同時にモニターするシステムの基礎検討を行った。その中で世界初の小型プラズマ波動波形捕捉受信器の開発に成功するなど多大な成果をあげることができた。下記にその成果を項目別にまとめる。

### (1) アナログ ASIC によるプラズマ波動観測器の小型化

宇宙圏電磁環境モニターのセンサーノードのコアとなるプラズマ波動観測器を超小型にするためには、プラズマ波動観測器が逃れることができない大規模なアナログ回路を非常に小型にする必要がある。本研究では、このアナログ回路を ASIC という特定用途向け LSI チップとして自ら設計・開発を行った。具体的には、下記の項目について設計・試作を行い開発に成功した。

- ① 温度補償機能付 gm-C Low pass filter  
アナログ ASIC では、フィルタ用の大きな容量や抵抗、インダクタンスを用いることができないため、MOS トランジスタの相互コンダクタンスを用いたフィルタがしばしば用いられる。次数が高いフィルタは実現しにくい低次であれば、比較的 low noise のものができる。しかし、その一方で特性の温度ドリフトが大きいという欠点をもつ。そこで温度補償回路を新たにチップ内に考案・実現し、温度に特性が大きく依存しないフィルタの開発に成功した。
- ② 高次スイッチトキャパシタフィルタ  
プラズマ波動観測器の形態である波形捕捉受信器では、波形をそのままサンプリングするため、アンチエイリアシングフィルタが必要である。しかも衛星ではリソースの関係からオーバーサンプリングが難しいため、高次の急峻な減衰特性をも



図 2 開発に成功したビジネスカードサイズ型波形捕捉受信器 (基板右上に開発したチップが搭載されている)。

つ Low pass filter が必要である。本研究ではチェビシェフ型のスイッチトキャパシタフィルタをチップ内に実現することに成功した。

③ 波形捕捉システムチップとそれによるビジネスカードサイズ波形捕捉受信器の開発

上述の①、②のコンポーネントおよびゲイン切り替え機能をもつアンプを組み込んだ波形捕捉システムチップの開発に成功した。電磁界 6 成分をわずか数 mm 角のチップ内におさめたもので (図 1)、これは世界初のチップである。そしてそのチップを用いた波形捕捉受信器を開発した。大きさは従来のものであれば、A4 版 1 枚の基板サイズ程度になるものが、名刺サ

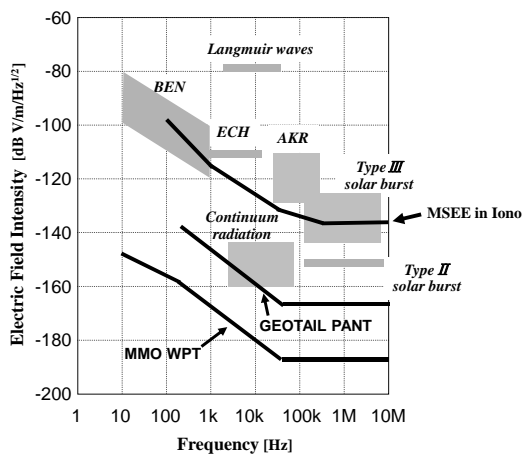


図 3 実測から求めた MSEE 電界センサーの感度と GEOTAIL, MMO 科学衛星電界センサー感度、および自然波動の典型的な強度。

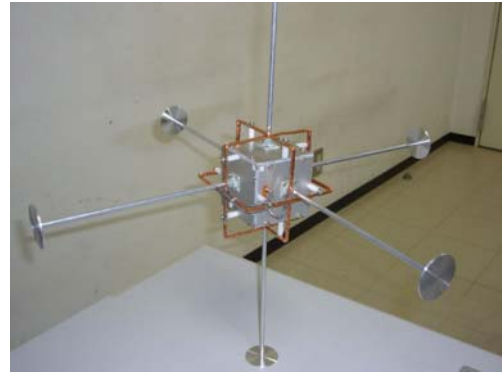


図 4 センサーノードプロトタイプ。小型の電界センサー、および磁界センサーと内部にはプリアンプ、電源がインストールされている。

イズになるところまで小型化することができた (図 2)。

(2) 小型の電磁界センサーの開発

小型のセンサーノードでは、電磁界センサーも衛星搭載のものほど大きく製作することができない。そこでセンサー自体は小型でもそこに接続するプリアンプのノイズレベルを下げ、必要な感度が補償されたセンサーシステムの設計・試作を行った。電界センサーは、40cm tip-to-tip、磁界センサーは 10cm 四方のループアンテナである。これらは新たに考案した低ノイズプリアンプとともに設計・試作され、その結果、人工擾乱によるレベルの高い波動だけでなく、レベルが弱い自然波動に対しても感度があることを示すことができた (図 3)。つまり、このセンサーは科学ミッションにも使用できる小型センサーとなり、磁界センサーについては次期ロケットミッションとして採用された。

(3) センサーノードのプロトタイプと内蔵回路のブレッドボードの開発

手のひらにのる程度の小型のセンサーノードを、上述の小型電界センサー、小型磁界センサーとプリアンプ、および、電源装置を含んだ形で開発を行い、その実現性について評価した。その結果、現状の大きさのもので十分な機能を組み込むことができるかと判断するにいたった (図 4)。

また、図 5 はセンサーノード内システム設計を行うために試作したブレッドボードである。ここでは、開発したアナログ ASIC に加え、姿勢捕捉のための小型磁場センサー、位置捕捉のために使用する GPS 受信器である。これに必要な周辺回路を含めた設計となっており、制御、およびオンボードデータ処理は、PIC コンピュータによって実現している。実際に

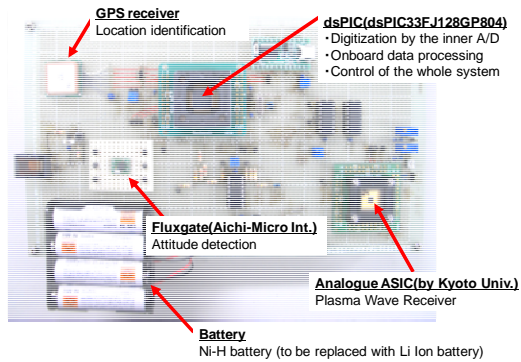


図5 センサーノード内システム設計におけるブレッドボード開発。

プログラミングも行いオンボードで各コンポーネントを制御、データを取得するシステムを完成させることができた。

(4) 強異方性空間に対する計算機シミュレーション

シミュレーション空間内に人工的な構造物をいれ、また、そのポテンシャルやそこからの光電子を扱うことのできるシミュレーションコードを開発した。また、それを用い、宇宙空間では複雑な振る舞いをする電界センサーのモデル化に成功し、MSEE センサーノードでも利用するダイポール型の電界センサー感度を計算することに成功した。

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7件、すべて査読あり)

1. 福原 始, 小嶋 浩嗣, 池田 博一, 山川 宏, 科学衛星搭載小型プラズマ波動観測器に用いる温度補償 Gm-C フィルタ, 電子情報通信学会論文誌, J94-C, in press, 2011.
2. Fukuhara, H., H. Kojima, S. Okada, H. Ikeda, and H. Yamakawa, Waveform receiver on-a chip dedicated to plasma wave instrument onboard scientific spacecraft, IEEEAC paper #1139, 2011 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2011.
3. Miyake, Y., H. Usui, and H. Kojima, Effects of the guard electrode on the photoelectron distribution around an electric field sensor, J. Geophys. Res., in press, 2011.
4. Yagitani, S., M. Ozaki, and H. Kojima, A compact loop antenna system for

monitoring local electromagnetic environments in geospace, IEICE Trans. Commun., inpress, 2011.

5. Kojima, H., H. Fukuhara, Y. Mizuochi, S. Yagitani, H. Ikeda, Y. Miyake, H. Usui, H. Iwai, Y. Takizawa, Y. Ueda and H. Yamakawa, Miniaturization of plasma wave receivers onboard scientific satellites and its application to the sensor network system for monitoring the electromagnetic environments in space, Advances in Geosciences, 21, 461-481, 2010.
6. Fukuhara, H., H. Kojima, Y. Ueda, Y. Omura, Y. Katoh, and H. Yamakawa, A new instrument for the study of wave-particle interactions in space: One-chip wave-particle interaction analyzer, Earth Planets Space., 61, 756-778, 2009.
7. Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, Y. Omura, and H. Matsumoto, Electromagnetic Particle-In-Cell simulation on the impedance of a dipole antenna surrounded by an ion sheath, Radio Science, 43, doi:10.1029/2007RS003707, 2008.

[学会発表] (計41件)

1. 小嶋浩嗣, 宇宙空間におけるプラズマ波動観測技術, SGEPS 波動分科会「宇宙プラズマと航空宇宙工学との接点」, 京都大学生存圏研究所木質ホール, 2011年3月10日(招待講演).
2. Fukuhara, H., H. Kojima, H. Ikeda, and H. Yamakawa, Towards a waveform receiver on a chip dedicated to plasma wave instrument onboard scientific spacecraft, IEEE aerospace conference, Montana, USA, 2011年3月7日.
3. 小嶋浩嗣, プラズマ波動受信器のブレイクスルー --あけぼの/GEOTAIL から超小型プラズマ波動受信器へ--, あけぼの22周年記念シンポジウム, 東京工業大学キャンパスイノベーションセンター, 2010年11月20日(招待講演).
4. Kojima, H., Miniaturization of Plasma Wave Receivers Onboard Scientific Satellites and its Application to the Sensor Network System for Monitoring the Electromagnetic Environment in Space, International symposium on

- radio systems and space plasma, Sofia, Bulgaria, 2010年8月26日(招待講演).
5. Miyake, Y., H. Usui, and H. Kojima, Particle-In-Cell Modeling and Analysis of an Electric Antenna for the BepiColombo/MMO spacecraft, European Geosciences Union, Wien, 2010年5月6日.
  6. Kojima, H., Y. Mizuochi, H. Fukuhara, H. Ikeda, S. Yagitani, Y. Miyake, H. Usui and Y. Ueda, Miniaturization of plasma wave receivers onboard scientific satellites for space future missions, AOGS2009, Singapore, 2009年8月12日(招待講演).
  7. Kojima, H., Y. Mizuochi, H. Fukuhara, S. Yagitani, H. Ikeda, H. Iwai, Y. Takizawa, H. Yamakawa, Y. Ueda, and H. Usui, Miniaturization of plasma wave receivers onboard scientific satellites and its application to the sensor network system for monitoring the electromagnetic environment in space, European Geophysical Union, Wien, 2009年4月22日.
  8. Kojima, H., S. Yagitani, H. Iwai, Y. Takizawa, Y. Mizuochi, H. Fukuhara, H. Ikeda, H. Yamakawa, H. Usui, and Y. Ueda, Monitor System for Space Electromagnetic Environments: Sensor Network in Space, AGU Spring Meeting, San Francisco, 2008年12月16日.

[その他]

ホームページ等

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~kojima>

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

山川 宏 (YAMAKAWA HIROSHI)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：50260013

岩井 誠人 (IWAI HISATO)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：70411064

臼井 英之 (USUI HIDEYUKI)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授

教授

研究者番号：10243081

八木谷 聡 (YAGITANI SATOSHI)

金沢大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：30251937

上田 義勝 (UEDA YOSHIKATSU)

京都大学・生存圏研究所・助教

研究者番号：90362417