

宇宙プラズマの三次元空間分布を捉える超小型密度計測器に関する萌芽的研究

Study on the very small plasma density measurement instrument for observing the spatial distribution of space plasmas

(地球電磁気・地球惑星圏学会推薦)

代表研究者 京都大学 小嶋浩嗣 Kyoto University Hirotsugu Kojima

The miniaturization of the analogue circuits for measuring plasma densities is realized using the analogue ASIC technology. The plasma densities can be observed by examining electric field antenna impedance in plasmas. We succeeded in developing the analogue chip for the WFC-type density measurement. The several types of low pass filters and amplifiers are implemented inside the chip with the size of 5mm x 5mm. We examined the performance of the chip and confirmed it can be used for space missions such as sounding rockets and scientific satellites. By using this analogue chip, we developed the very small WFC board. The size of the board is almost equivalent to the business card size. It is very significant in the viewpoint of miniaturizing space instruments, because the size of the conventional WFC board with the same specification is about A4-size. This leads to the breakthrough of observing space plasmas. We also made an attempt to develop the analogue chip which is dedicated to another type of the density measurement instrument with the frequency down conversion.

## [研究目的]

宇宙空間プラズマは、その異方性が強く、例えば、地球の様な磁化惑星の周辺では、惑星固有の磁場と太陽からの太陽風との相互作用により、多様な遷移領域やキャビティなどが形成され、更にそれに伴う様々な電流系が存在する。また、もっとマイクロな視点では、地球の北極・南極上空のオーロラ帯や地球の夜側の宇宙空間では、電子ビームと静電的なプラズマ波動が相互作用して、数kmオーダーの電子密度が局所的に減少する「電子の泡」が存在することが我々によって指摘されており[1]、また、このようなマイクロな密度構造が、宇宙空間プラズマの様々な領域(太陽風中、あるいは、月の周辺から土星まで)に存在していることがわかっている。この空間異方性が強い宇宙プラズマにあって、その密度を計測する手法として、特にロケット観測で用いられるのが大家ら[2]によって開発されたアンテナとプラズマの共鳴を利用するインピーダンスプローブである。この他に、科学衛星で用いられているものに、電界アンテナのインピーダンスの周波数分布を計測する手法がある。これまでのプラズマ密度計測器は、ロケットや衛星の軌道に沿った一点での電子密度計測しかできなかった。しかし、空間異方性が強い宇宙プラズマは3次元的な密度分布の情報が重要である。例えば、上述の「電子の泡」の空間構造は、その数kmオーダーの空間に多数の密度センサーを分布させ観測することにより明確なデータとして現れてくるであろう。従って、プラズマ密度計測器をロケットや衛星から宇宙空間に多数放出し、「3次元的に複数ポイントで同時に計測できるシステム」を構築することは、従来、観測的におさえられていないプラズマ密度の3次元構造を捉えることを可能とし、宇宙空間プラズマ物理学の進歩に多大な貢献をもたらすことになる。しかし、このシステムでは、多数の小型密度計測器を衛星やロケットに搭載する必要があるため、これまでの装置をそのまま利用するわけにはいかない。また、3次元的に飛散させるため、おのおのが独自で通信・位置捕捉システムをもつ必要がある。これらをすべて実現させるのには多くのステップを必要とするが、本研究では、「密度計測電子回路の超小型化」という点に焦点を絞り研究を行う。そして、エレクトロニクス部分の試作を行い、飛散型密度計測システムによる3次元空間宇宙プラズマ密度計測の実現に目処をつけることを目的とする。

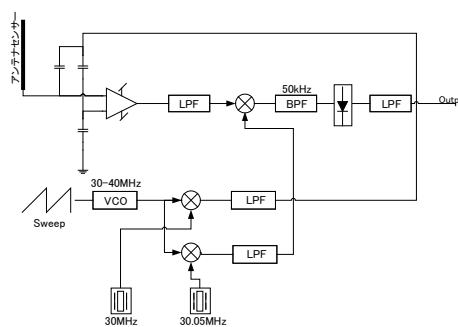


Fig.1 Block diagram of the typical impedance probe.

## [研究経過]

プラズマ中におかれた電界センサーは、プラズマそのものが分散性の媒質であることから、そのインピーダンスは周波数の関数となり、真空中のインピーダンスよりも複雑な挙動を示し、プラズマの密度、温度に大きく依存する。特に密度に依存する電子のプラズマ周波数(あるいは高域混成共鳴周波数(Upper Hybrid Resonance frequency))周辺には大きくインピーダンスが変化することが知られ、このインピーダンスの変

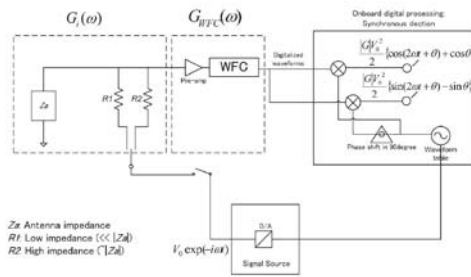


Fig.2 Block diagram of measuring the antenna impedance using a waveform capture[3].

波形をアナログ信号に変換してアンテナに印加し、その出力を WFC で観測する。WFC の出力はデジタル化され、オンボードで同期検波され、それによって複素インピーダンスを求めることができる。オンボードメモリの波形の周波数をステップ状に変化させながら同期検波を繰り返すことで、アンテナインピーダンスの周波数依存性をとらえることができ、そこからプラズマの密度を計算することができる。

本研究では、まず、Fig.2 の WFC を用いた手法を実現する計測装置の小型化をはかった。これは、WFC 自身はプラズマ波動受信機としての機能をもつため、プラズマ密度の計測だけにとどまらず、アンテナの信号を印加しない場合は、そのままプラズマ波動受信機として自然波の波形を捉えることができ、小型化回路の利用範囲が広いからである。

Fig.2 のブロックで小型化を図るためには、WFC という波形捕捉型のプラズマ波動受信機を小型化することが必須である。デジタル部については、近年の技術進歩により FPGA や CPU など小型で高性能な機能を実現できるようになってきたに比べ、アナログ部の塊である WFC を小型化するには、専用のアナログチップをみずから開発する必要がある。

Fig.3 は、今回アナログ ASIC として小型化をはかる WFC のブロック図である。今回は上限周波数を 100kHz としている。このブロック図をみてわかるように、各種 LPF(Low Pass Filter) とゲイン切り替え機能付きのアンプからなる。アナログ ASIC では内部に大きな値のキャパシタやインダクタンスを実現できないため、初段の帯域制限用の LPF(Fig.3 内の(a))、および、スイッチトキャパシタフィルタ用の Anti-aliasing フィルタ

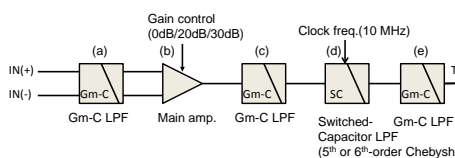


Fig.3 Block diagram of the Wave-Form Capture.

(c)、スイッチトキャパシタフィルタの出力ノイズ除去用 LPF(e)では、Gm-C タイプのフィルタを用いている。また、A/D 変換することによる Aliasing の効果を除去するための Anti-aliasing フィルタには、6 次のスイッチトキャパシタフィルタ(d)を用いる。

Fig.4 は、今回我々が設計開発した WFC 用のアナロ

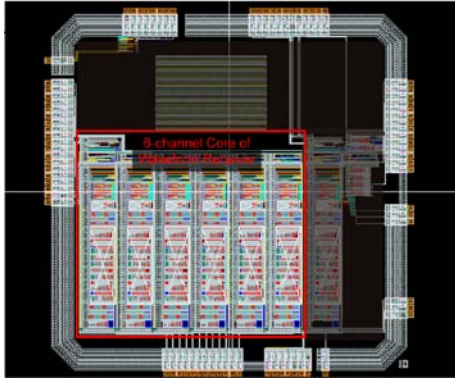


Fig.4 Layout inside the WFC analogue ASIC.

グ ASIC 内レイアウトである。5mm 角のチップ内に、電磁界 6 成分を同時計測できる WFC が 6 チャンネルおさめられている。上限周波数は 100kHz でゲインは、0～30dB までステップで外部制御信号により切り替えることができる。これだけの機能をもったアナログ回路が 5mm 角のチップ内に実現できたことは、衛星搭載用の観測器としては画期的なことである。

[結果]

プラズマの密度計測を多点で行うために必要となる WFC アナログチップの開発に成功した。そして、そのチップを利用し、必要となる電源など周辺回路とともに一つの基板に仕上げたものが、Fig.5 に示すビジネスカードサイズの WFC である。従来のアナログ部品を利用した場合であると、これだけの規模を実現するには、A4 基板 1 枚から 1.5 枚を必要とした。しかし、今回アナログチップの開発に成功したことにより、一挙に名刺サイズの基板にまで小型化することができた。更に、今回製作した基板は、ブレッドボードであり、搭載品として部品の両面実装を行ったり、チップもパッケージではなくベアチップを用いたりすることによって、更に 1/2～1/3 のサイズにまで小型化ができると考えている。

[考察]

プラズマ密度を測定する小型装置を実現するために WFC のチップ化をはかった。このように非常に小さい領域に複数のチャンネルをインプリメントした場合、もっとも心配されるのは、チャンネル間のクロストークである。本チップに関してもそのクロストークを実験的に検証している。その結果、従来のプラズマ波動受信機におけるクロストークレベルとほとんど遜色がないことがわかっている。これはレイアウト時にチャンネル間をそれぞれシールドすることによって、チャンネル間カップリングを軽減するように工夫したことが活かされていると考えている。

また、MOS ではノイズレベルが気になる場所であるが、初段アンプのゲート面積を十分に大きくとるなどの工夫をしたことにより、入力換算値で  $100\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$  が実現できていることがわかっており、実用に十分耐えうるものとなっている。

今回、Fig.2 に示した WFC を利用した密度計測回路の小型化を図った。しかし、Fig.1 に示す測定法にもメリットがある。それは周波数のダウンコンバージョンを行っているため、高周波、すなわち、プラズマの密度が非常に高い状況においても、高速で波形をサンプリング

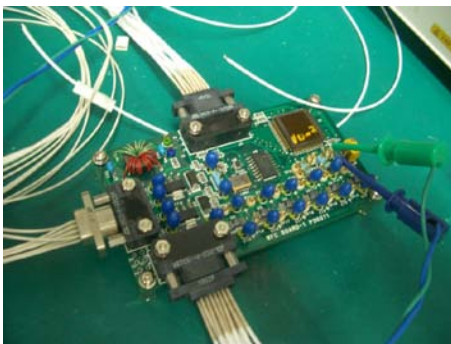


Fig.5 Breadboard of the Business card size WFC.

する必要がないからである(WFCのタイプでは密度が高くなるほど高速でサンプリングする必要がある)。Fig.2の回路はプラズマ波形観測と同時に実現できるメリットがあるが、Fig.1の方式もこの意味で重要である。そこで、我々は本研究を更に発展させるために、Fig.1の方式におけるアナログ回路の小型化にも取り組み始めている。現在、VCOの設計・試作を行っており本研究の締めくくりとして年度内に性能試験まで行うことができる予定である。

小型のプラズマ密度計測を実現するために必須である小型のアナログWFCチップの開発に成功し、また、VCOを用いた方式のチップの設計にも着手することができた。この進展は宇宙プラズマ計測においては画期的なものであり、2012年度以降のロケット実験においてこのチップを搭載した観測装置による観測を実施していく予定を立てている。

(参考文献)

1. Matsumoto, H., **H. Kojima**, T. Miyatake, Y. Omura, M. Okada, I. Nagano, and M. Tsutsui, Electrostatic Solitary Waves (ESW) in the Magnetotail : BEN Wave forms observed by GEOTAIL, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2915-2918, 1994.
2. 大家寛、大林辰蔵、インピーダンスプローブによる超高層プラズマ探測, 東京大学宇宙航空研究所報告, Vol. 2, pp.1065-1079 宇宙航空研究開発機構 (ISSN:05638100), 1966.
3. **Kojima, H.**, Plasma wave receivers onboard scientific satellites, *Science Instruments for sounding rocket and satellite*, ed. K. Oyama and F. Cheng, submitted, 2011.

[研究発表]

口頭発表

1. **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(招待講演).
2. **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(招待講演).
3. **Kojima, H.**, H. Fukuhara, S. Okada, S. Yagitani, H. Ikeda, Y. Miyake, H. Usui, H. Yamakawa, and Y. Ueda, Small sensor probe for monitoring the space electromagnetic environments by the application of the miniaturized plasma wave receiver, European Geophysical Union, Wien, 2010.
4. **Kojima, H.**, H. Fukuhara, S. Okada, H. Ikeda and H. Yamakawa, Breakthrough toward the tiny plasma wave receiver onboard scientific satellites and its further application in space, 2010 Taiwan-Japan Space Instrument Workshop, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 2010.
5. Fukuhara, H., S. Okada, **H. Kojima**, H. Ikeda, and H. Yamakawa, Development of Miniaturized Observation System for PlasmaWave using Analog ASIC for Small Scientific Satellite Missions,

Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama, Japan, 2010.

6. Okada, S., H. Fukuhara, **H. Kojima**, S. Yagitani, H. Ikeda, Y. Miyake, H. Usui, H. Yamakawa, and Y. Ueda, Study on the small sensor node system for measuring space electromagnetic environment, Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama, Japan, 2010.

紙上発表

4. **Kojima, H.**, Plasma wave receivers onboard scientific satellites, *Science Instruments for sounding rocket and satellite*, ed. K. Oyama and F. Cheng, submitted, 2011.
5. 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.
6. 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.
7. **Kojima, H.**, H. Fukuhara, Y. Mizuochi, S. Yagitani, H. Ikeda, Y. Miyake, H. Usui, H. Iwai, Y. Takizawa, YH. 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.