

# スペースチェンバー設置型インピーダンス・プローブの改良

若林 誠[1]、 遠藤 研[2]、 熊本 篤志[2]

[1] 新居浜工業高等専門学校 電気情報工学科, [2] 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻

## 1. はじめに

インピーダンス・プローブは、宇宙空間の電子密度を高精度で計測する装置であり、Oya[1966]による開発以降、多くの観測ロケットや科学衛星に搭載された実績がある (Oya et al., [1979], Uemoto et al.,[2010]等)。宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の大型スペースチェンバーにおいても、プラズマ生成を伴った各種実験の際、チェンバー内部の電子密度を計測するためのインピーダンス・プローブを使用することが可能であるが、現状では少数の研究グループにしか活用されていない。この理由として、測定の設定アップに手間がかかる事が考えられ、改善が検討されている。

本研究では、スペースチェンバー設置型インピーダンス・プローブに FPGA を用いることにより、現状より更にシンプルな装置に発展させ、装置の利便性および稼働率を向上させる事を目的とする。これは平成 24 年度から実施している研究であるが、25 年度はチェンバー実験を実施する段階には至らなかったため、ここでは 25 年度中における進捗状況について述べる。

## 2. インピーダンス・プローブの原理とチェンバー設置型の概要

プラズマ中に浸した導体棒に高周波電界を印加すると、等価的に LC 共振回路として扱う事ができ、特定の周波数で共振を起こすことが知られている。導体棒に印加する周波数を掃引すると、図 1 に示すような周波数特性となり、周波数の低い方・高い方での共振はそれぞれ Sheath Resonance (SHR) 及び、Upper Hybrid Resonance (UHR) として観測される。インピーダンス・プローブは周辺プラズマの UHR 周波数を決定することにより、式(1)から電子密度を得ることができる。

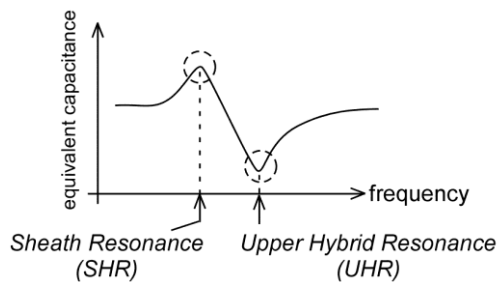


図 1. プラズマ中に浸した導体棒の周波数特性

$$N_e = 1.24 \times 10^4 (f_{UHR}^2 - f_c^2) \quad [cm^{-3}] \quad (1)$$

$$\left[ \begin{array}{l} f_{UHR} : \text{UHR 周波数}[\text{MHz}] \\ f_c : \text{電子サイクロトロン周波数}[\text{MHz}] \end{array} \right]$$

図 2 に、インピーダンス・プローブにおける回路の概略を示すが、図中の左側にある Direct Digital Synthesizer (DDS) から高周波電界が印加され、図の右側にある差動アンプから出力される信号の振幅を検波する。DDS から入力する高周波電界の周波数を掃引してゆくと、差動アンプの出力振幅が極小となる周波数を決定することができ、これによって周辺プラズマの UHR 周波数が把握できる。また、正確な UHR 周波数を計測するためには、回路内部に発生する浮遊容量の影響が無視できないため、図 2 に示されるコンデンサのブリッジ回路を使うことで、その影響をキャンセルする工夫がなされている。

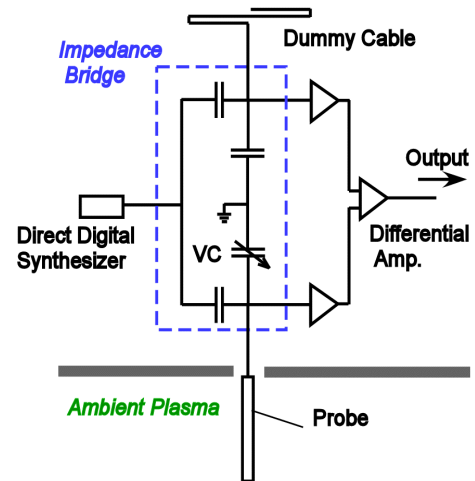


図 2. インピーダンス・プローブの概略図

インピーダンス・プローブの利用は、宇宙空間プラズマに限定したものではなく、実験室におけるプラズマにも使用することができる。例えば、宇宙科学研究所の大型スペースチェンバーでは、プラズマ生成を伴う各種実験の際、チェンバー内部の電子密度を計測できるようにするため、インピーダンス・プローブが設

置されている。この装置はブリッジ回路およびセンサー一部だけがチェンバー内部にあり、そこにチェンバー外の発振器から高周波電界を印加している。また、ブリッジ回路の出力信号もチェンバー外部に伝送され、オシロスコープに入力される(この概要を図3に示す)。

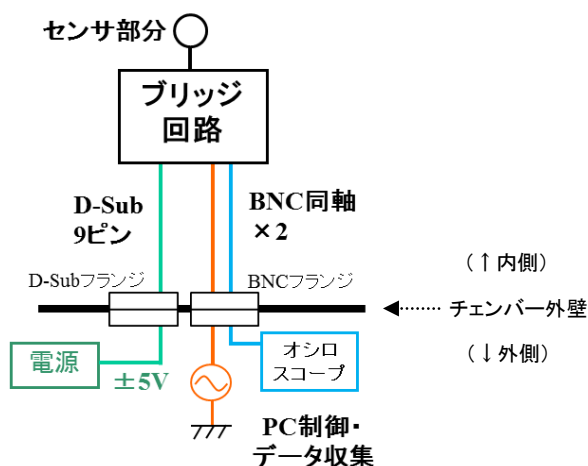


図3 スペースチェンバー設置型インピーダンス・プローブにおける配線図

これら発振器とオシロスコープは、LabVIEWで構成されたソフトウェアで同期制御されており、パソコンの画面上でプローブ周辺の電子密度を把握することが可能である。チェンバー内部にはブリッジ回路とセンサーのみ配置されるので小型・軽量であり、可動アームにも取り付け可能である。更に、センサーは球型とロッド型の2種類から選ぶことができる。

スペースチェンバー設置型をセットアップする上では、チェンバーの内外においてBNC同軸ケーブルを2本(ブリッジへの入力信号用、およびブリッジからの出力信号用)と、D-sub(9pin)コネクタを1本(回路への電源供給)接続する必要がある、それぞれフランジに設けられたコネクタを介して接続される。特にBNC同軸ケーブルのコネクタは、フランジ上に円形に配置されており、内外での接続を即座に把握しにくい。接続は導通チェックを行うことで確認できるものの、チェンバー内外での導通チェックは1名では困難な場合がある。そこで本研究では、より利便性を高めたシンプルな装置とすることを検討している。

### 3. FPGAを用いた改良

スペースチェンバー設置型インピーダンス・プローブを、よりシンプルな装置に改良するため、FPGAを用いた回路構成に変更することが考えられている。改良を行った場合の配線図を図4に示すが、FPGAを用いることにより、D-sub(9pin)コネクタを1本接続するだけでセットアップが完了することになる。

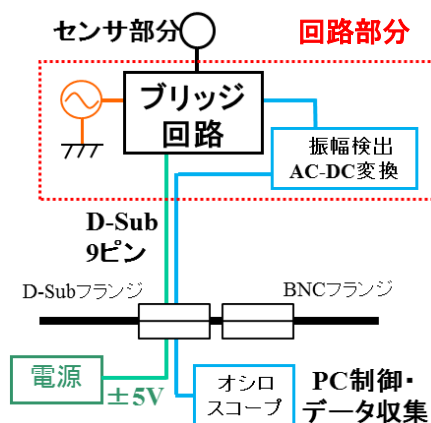


図4 FPGAによる改良を施した場合の配線図

24年度はFPGAを用いて、DDSを構成するところまでで実験を行っており、信号を処理する部分は従来のアナログ回路を用いていた。25年度は信号処理もFPGA内部で行うことを目指し、図5に示すような回路構成とした。このうち、今年度検証した部分はDAコンバータ及びADコンバータ、ブリッジ回路であり、図5では赤色で示している。以下ではその詳細について述べる。

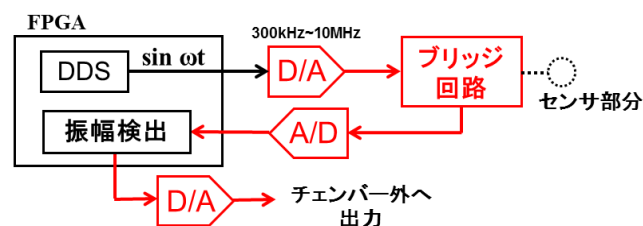


図5 FPGAを用いた場合のブロック図

### 4. ブリッジ回路への入力信号の生成

ブリッジ回路への入力信号は、24年度と同様にFPGA内のDDSによって生成する。DDSはXilinx社のISE Design Suite 12に付属するDDS Compiler 4.0によって構成した。ここでは300kHz~10MHzの周波数を1秒間で掃引するよう設計し、分解能は12bitとした。クロックは50MHzであり、周波数分解能は12.2kHzとなる。

このDDSから出力される12bitのデジタルデータを、DAコンバータを用いてアナログ信号に変換する。DAコンバータはAnalog Devices社製のAD9762を用いた。また、このDAコンバータは電流出力であり、かつ差動出力となっているため、シングルエンドでの電圧出力となるようLinear Technology社製のLT6600-10及び、Analog Devices社製AD8130を用いている。これらの回路構成において必要な外付け抵抗の定数等は、各素子のデータシートを参照した。回路の概要を図6に示す。

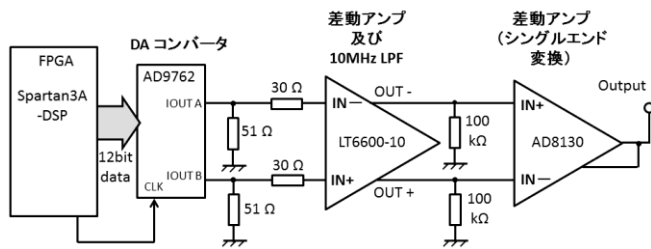


図 6 ブリッジ入力信号を生成する DA 変換回路

## 5. ブリッジ回路からの出力信号の処理

一方、ブリッジ回路からの出力信号は AD コンバータを用いてデジタルに変換し、FPGA に入力する。ここでは AD コンバータとして Analog Devices 社製の AD9236 を用いたが、これは差動入力であるため、シングルエンド信号から差動信号へ変換する必要があるため、Analog Devices 社製の AD8138 を用いることにした。この回路の概要を図 7 に示す。

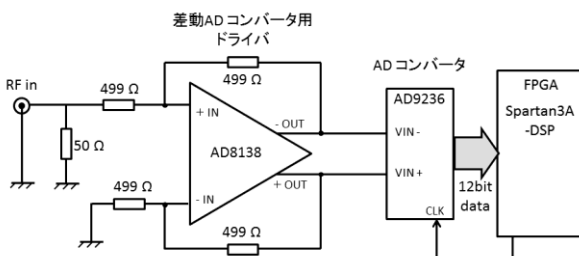


図 7 ブリッジ回路からのアナログ信号をデジタル変換する回路

デジタルデータとして FPGA に入力された波形は、FPGA 内部で信号処理され、振幅データのみを出力する。その際の振幅データはデジタル値であるが、図 6 と同様の回路を経由してアナログ電圧として出力される。

## 6. ブリッジ回路の製作

24 年度の構成では、ブリッジ回路も従来のアナログ回路から転用して用いていた。25 年度は新たに基板加工機 (LPKF 製 ProtoMat S62 : 図 8) を用いてスペースチェンバー専用の回路を作成した。

基板加工機用のデータを作成するにあたり、電子回路基板設計用 CAD である OPUSER XP-7 (ユニクラフト社製) を用いた。このソフトウェアを使用することにより、回路図作成から PCB レイアウト作成、基板加工データ出力までを一貫して行う事ができる。また、PCB レイアウト作成過程においては 3D 表示も可能であるため、完成時のイメージを容易に得ることができる。

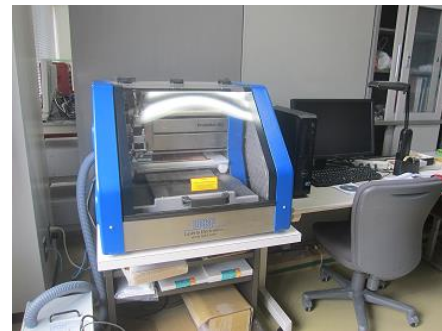


図 8 ブリッジ回路製作に用いた基板加工機 (LPKF 製 ProtoMat S62)

製作したブリッジ回路には、入力及び出力用の同軸ソケットと、電源供給用コネクタが備えられており、外形寸法は 7cm×10cm である。この外観を図 9 に示す。

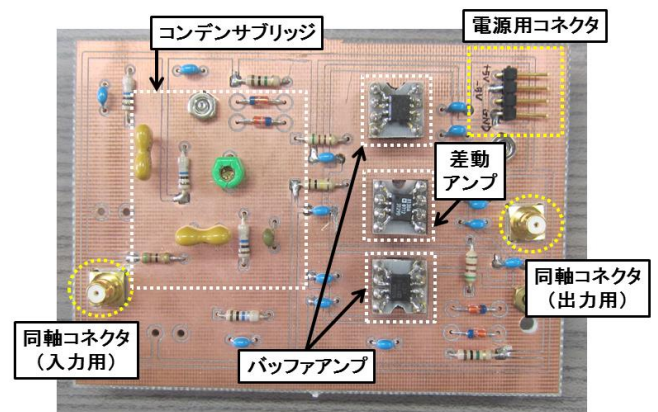


図 9 製作したブリッジ回路

## 7. 製作された回路

実際のスペースチェンバーで実験を行う回路を図 10 に示す。図 10 に示される回路は 30cm×35cm×8cm のアルミケース内に収められているが、図中右側の銅箔部分の回路はブリッジ回路のみ使用しているため、図 9 の回路に置き換える予定である。

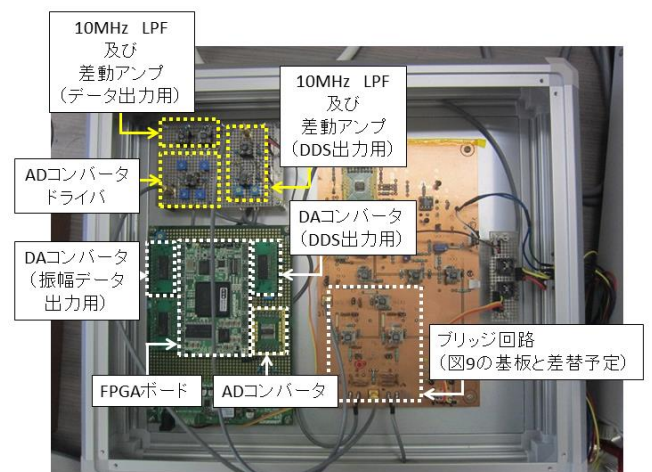


図 10 チェンバー実験で使用する回路

尚、現在は試作回路の段階であるため、このようなサイズの装置となっているが、将来的には FPGA ボードを含めて全て 1 つの基板に実装し、小型・軽量の回路とする。

## 8. まとめと今後の予定

25 年度はチェンバー実験を実施する段階には至らなかったが、年度内にはハードウェア構成を決定することができ、回路の試作を行った。26 年度は FPGA に信号処理（入力信号の振幅を検波し、出力する）を行うプログラムを実装し、動作試験を行う。

## 参考文献

- Oya, H., Study on boundary value problems of magneto-active plasma and their applications to space observation, PhD. thesis, Kyoto University, 1966.
- Oya, H., T. Takahashi, and A. Morioka, Electron density distribution and particle precipitation in south Atlantic anomaly: Report on gyro-plasma probe observation installed on TAIYO, *J. Geomag. Geoelectr.*, **31**, S95, 1979.
- Uemoto, J., T. Ono, T. Yamada, T. Suzuki, M.-Y. Yamamoto, S. Watanabe, A. Kumamoto, and M. Iizima, “Impact of lithium releases on ionospheric electron density observed by impedance probe during WIND campaign”, *Earth Planets Space*, **62**, 589, 2010.
- 若林 誠, 工藤 啓, 遠藤 研, 熊本 篤志, “スペースチェンバー設置型インピーダンス・プローブの改良”, 平成24年度スペース・プラズマ研究会講演集17.