

FPGA を用いた観測ロケット搭載用インピーダンスプローブの開発

鈴木 朋憲¹, 熊本 篤志¹, 小野 高幸¹, 若林 誠², 遠藤 研³

1) 東北大学 大学院理学研究科, 2) 新居浜工業高等専門学校, 3) 東北大学 理学部

1. はじめに

インピーダンスプローブ法は、プラズマ中のアンテナインピーダンスの共振周波数からプラズマの電子密度を導出する方法であり、電子密度の高精度な絶対値計測ができるという長所を持っている[1]。これまでに多くの観測ロケットや科学衛星に搭載された実績があり、2011 年度にも観測ロケット S-520-26 号機および S-310-40 号機への搭載が予定されている。

我々は、それらの観測ロケットへ搭載するインピーダンスプローブ (NEI: Number density of Electrons by Impedance probe) の開発を進めてきた。本研究開発に際しては、FPGA の適用、シース容量値の高時間分解能計測[2]などの新規要素を取り入れており、我々が従来用いてきたインピーダンスプローブよりも利便性の高いものに仕上がっている。現在は、環境試験を行う段階に入っている。本稿では、宇宙科学研究所のスペースサイエンスチェンバを用いたプラズマ内動作試験について報告する。

2. FPGA の適用

今回の開発における最も大きな改良は、インピーダンスプローブの電子回路部に FPGA を適用している点である。FPGA を用いるメリットとしては以下のような点が挙げられる。

- (1) 観測器の小型化/軽量化ができる
- (2) ファームウェアの再利用や改良が容易である
- (3) 時間分解能を従来のインピーダンスプローブよりもフレキシブルに設定できる
- (4) 位相成分の計測が従来よりも容易になる
- (5) 共振周波数の自動検出への適用にも向いていると考えられる

このように、FPGA 化することによって、計測器のスペックの改善や開発の上での利便性の向上が期待される。

図 1 (a) は、これまでに我々が観測ロケット S-310-35 号機, S-520-23 号機, S-310-38 号機に用いてきたインピーダンスプローブ[3, 4], (b) は今回 FPGA を適用したインピーダンスプローブのブロック図をそれぞれ示している。RF 信号の生成や、振幅/位相の計算などを FPGA 内でデジタル的に行うようになっている。図 2 は、S-520-26 号機用に開発されたインピーダンスプローブの電子回路部の写真である。同じ基板上に、プラズマ波動受信機 (PWM) の電子回路も収められている。

時間分解能は、最高で約 60 msec を実現できるシステムに仕上がっており、これまでに我々が使用してきたインピーダンスプローブの時間分解能 ~500 msec から大きく向上した。

時間分解能は、各観測ロケットのテレメータのレートに応じてフレキシブルに設定できるようになっている。観測ロケット S-520-26 号機では 250 msec, S-310-40 号機では 125 msec で周波数掃引を行うようにファームウェアが設計されている。

3. プラズマ内動作試験

開発したインピーダンスプローブが真空中やプラズマ中において正常に動作することを確認するため、宇宙科学研究所のスペースサイエンスチェンバを用いた環境試験を実施した。2010 年 7 月 12-16 日の期間に行った試験においては、真空中において FPGA, A/D コンバータ, DCDC コンバータなどの電子部品の温度計測を行った。その結果、1 時間程度の連続使用をしても、それぞれの部品の温度は正常に動作する範囲に収まっていることが確認できた。

2010 年 10 月 11-15 日には、後方拡散型プラズマ源を用いてチェンバ内にプラズマを生成し、プラズマ内動作試験を行った。図 3 は、その際のチェンバ内の配置の様子である。写真のように、観測ロケット用に新規開発したインピーダンスプローブと参照用のアナログインピーダンスプローブを設置した。このときの背景真空度はおよそ 3×10^{-5} Pa, 注入した Ar ガスのガス圧はおよそ 1.7×10^{-2} Pa であり、電子密度 $10^4 - 10^5$ /cc のプラズマを生成して実験を行った。

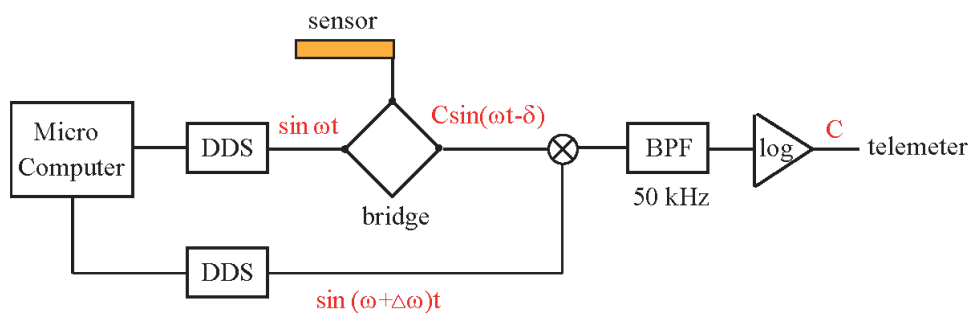
図 4 は、FPGA を適用したインピーダンスプローブによって計測されたプローブ等価容量の絶対値と位相 (a, b), およびアナログインピーダンスプローブによるプローブ等価容量の絶対値の測定結果を表している。アナログインピーダンスプローブの方がプラズマ源から遠方に位置していたため、図 4 の (a) と (c) では共振周数が若干ずれているが、両者は同様の出力をしていることが分かる。従って、本実験によって FPGA を適用したインピーダンスプローブがプラズマ中においても動作することを実証できた。

4. まとめ

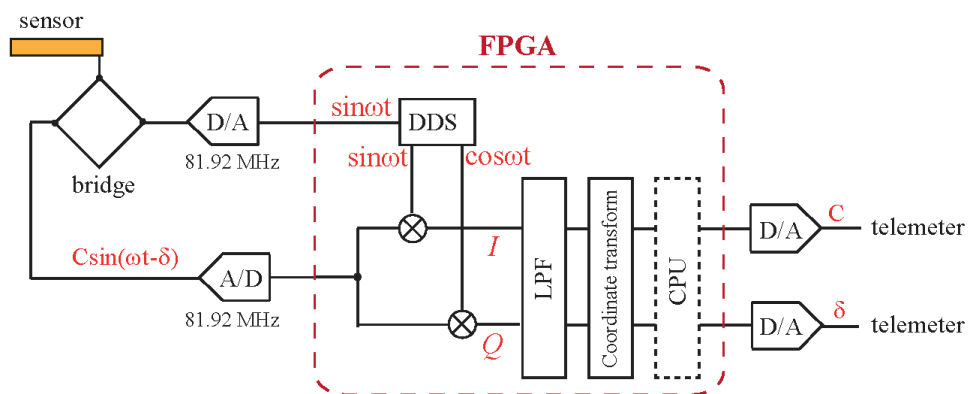
宇宙科学研究所のスペースチェンバにて、FPGA を採用した観測ロケット搭載用インピーダンスプローブの動作試験を実施した。高域混成共鳴 (UHR) 周波数やシース共鳴 (SHR) 周波数における共振など、プラズマ中のアンテナインピーダンスの特性が正常に出力されており、プラズマ内での正常な動作を確認できた。来年度の観測ロケット実験において、電子密度計測に成功し、各々のロケット実験に貢献することが期待される。

謝辞

観測ロケット搭載用インピーダンスプローブの開発は、株式会社システム計測の協力のもとで行われている。本実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の共同利用設備であるスペースサイエンスチェンバを用いて行われた。



(a)



(b)

図 1. (a)これまでのインピーダンスプローブ，および(b)FPGA を適用したインピーダンスプローブのブロック図。点線で囲まれた部分が FPGA 内で処理される。

図 2. 観測ロケット S-520-26 号機搭載用の NEI/PWM の電子回路部

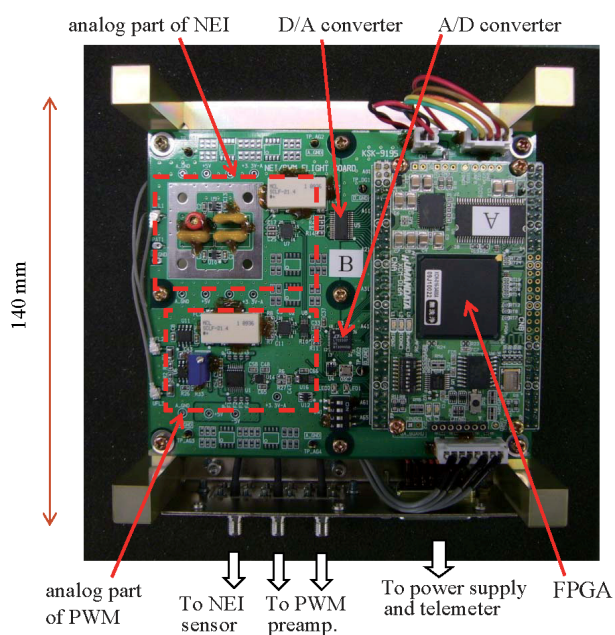


図 3. チェンバ内の設置の様子

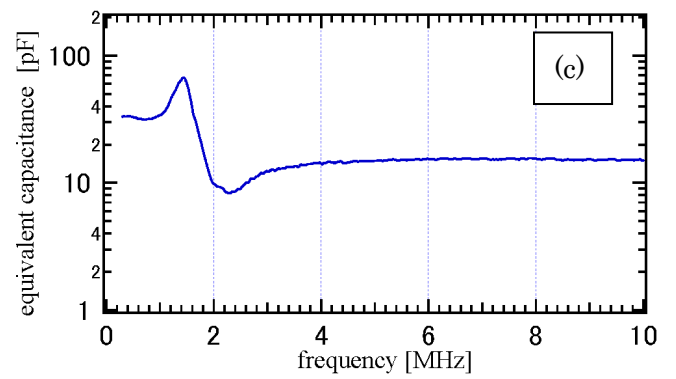
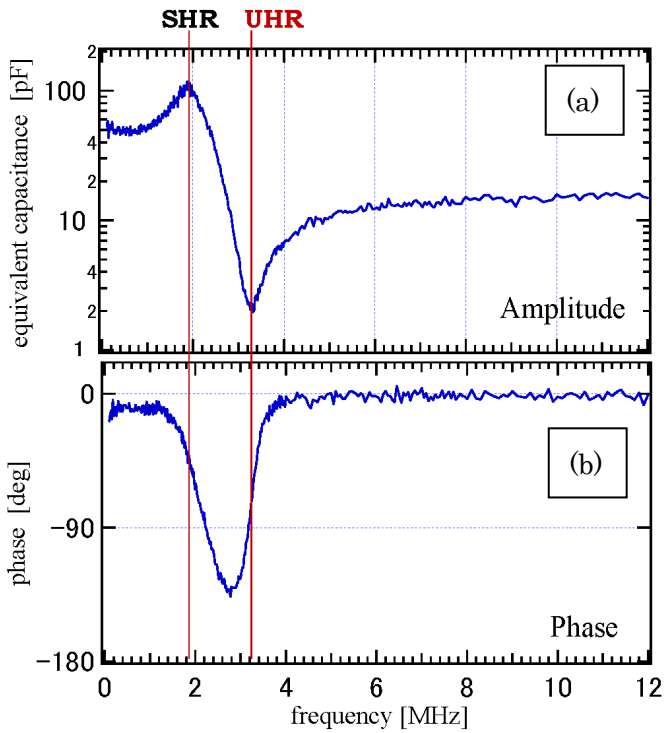
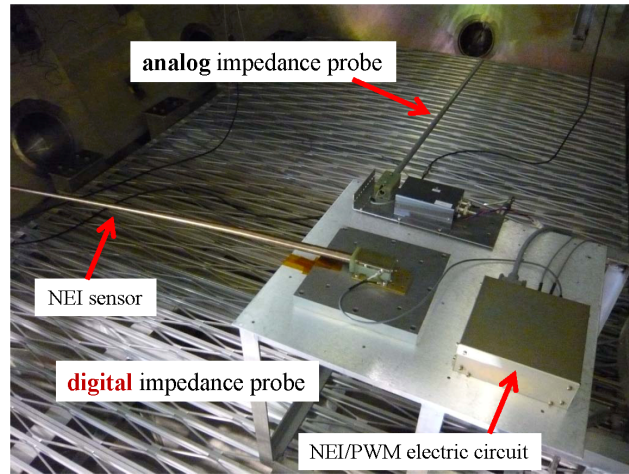


図 4. FPGA を適用したインピーダンスプローブによって計測された絶対値と位相 ((a), (b)), 参照用のアナログインピーダンスプローブによる絶対値(c)。

参考文献

- [1] Oya, H., and T. Obayashi, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **20**, 199, 1966
- [2] Suzuki, T., et al., *Earth Planet Space*, **62**, 579, 2010
- [3] Wakabayashi, M., and T. Ono, *Earth Planets Space*, **58**, 1147, 2006
- [4] Uemoto, J., et al., *Earth Planet Space*, **62**, 589, 2010