

低電子密度領域におけるインピーダンス・プローブ観測の 高精度化に関する研究

若林 誠[1]、 鈴木 朋憲[2]

[1] 新居浜工業高等専門学校 電気情報工学科

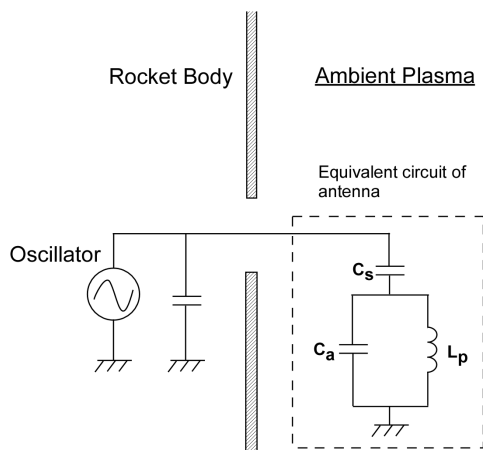
[2] 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻

1. はじめに

インピーダンス・プローブは、宇宙空間における電子密度を±3%以下の高精度で観測する装置であり、Oya[1966]によって日本における実用化がなされた装置である。これまで、様々な観測ロケットや科学衛星に搭載され、多くの成果を残してきた実績のある装置であるが、インピーダンス・プローブはその原理上、電子密度が高い領域（およそ 10^4cm^{-3} 以上）においては高精度な観測が可能であるものの、電子密度が低い領域においては誤差が±10%以上となる場合がある。電子密度が低い領域の電離圏構造については、これまでのロケット実験などではあまり注目されて来なかったが、インピーダンス・プローブ観測において低電子密度領域の精度が向上することで、例えば中緯度域スポラディック E 層に付随する構造をより明らかにすることが可能となる。これを実現する方法として、位相検出型インピーダンス・プローブの使用が考えられ、これによって低電子密度領域での高精度観測が可能かどうかについて、大型チェンバーを用いた観測実験によって検討を行うことが、本研究の目的である。

2. インピーダンス・プローブの原理とロケット観測

インピーダンス・プローブは、プラズマ中に挿入した導体棒に高周波信号を印加し、その等価容量の周波数特性を計測することで、周辺プラズマの UHR 周波数を得ることができる。プラズマ中にある導体棒は、等方的で磁場の無いコールドプラズマという条件の下では、シース容量： C_s 、導体棒の静電容量： C_a 、プラズマの持つインダクタンス： L_p を用いて、図1のように LC 共振回路と等価となる。ここで、 C_a と L_p の並列共振周波数が、周辺プラズマの UHR 周波数であることが知られており、測定された UHR 周波数の値から、式(1)により周辺プラズマの電子密度を決定することができる。



$$N_e = 1.24 \times 10^4 (f_{UHR}^2 - f_c^2), \quad \dots \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} N_e : \text{電子密度 } [\text{cm}^{-3}] \\ f_{UHR} : \text{周辺プラズマの UHR 周波数 } [\text{MHz}] \\ f_c : \text{電子サイクロトロン周波数 } [\text{MHz}] \end{array} \right)$$

図1 プラズマ中における導体棒の等価回路

この手法では、プラズマ中に伸展した導体棒の等価容量を、精密に測定する必要があるが、このとき電子回路内部における浮遊容量が大きな誤差要因となる。そこで、図2に示すようなブリッジ回路を採用し、浮遊容量の影響をキャンセルする工夫がなされており、ブリッジ回路からの出力電圧を計測することで、導体棒の等価容量を計測することができる。 C_a と L_p の並列共振周波数（周辺プラズマの UHR 周波数と等価）においては、並列回路のインピーダンスは無限大になるため、ブリッジ回路からの出力電圧は極小値をとるため、このときの周波数をもって UHR 周波数を決定する。また、ここで高周波信号を生成する素子としては、

DDS(Direct Digital Synthesizer)を採用し、高精度かつ広帯域な周波数掃引を実現している。

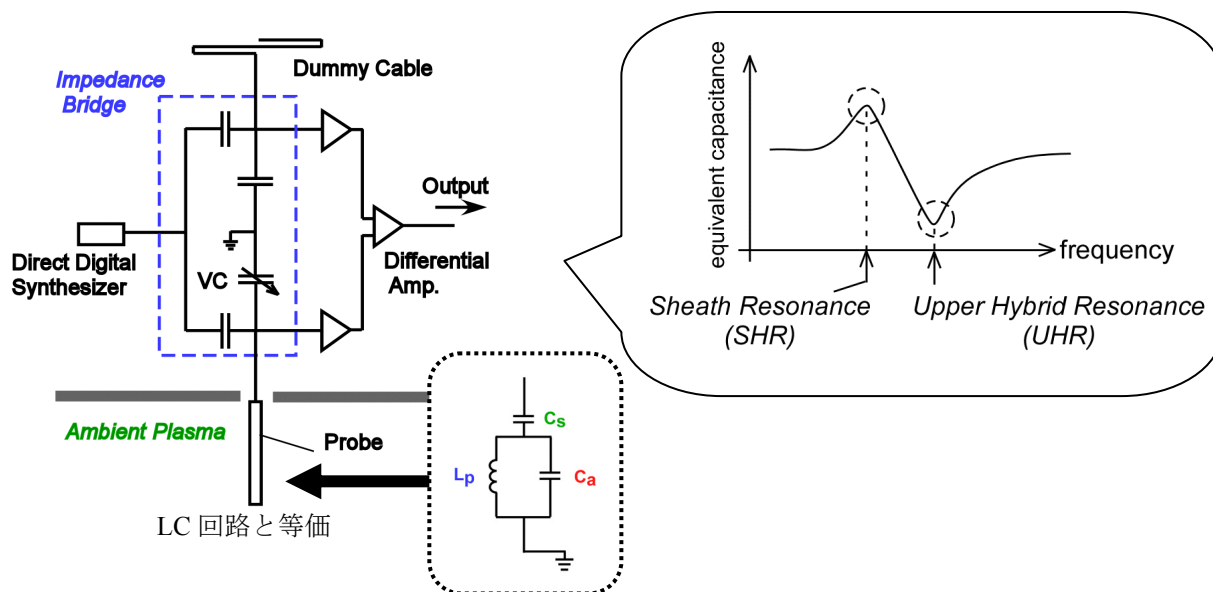


図2 ブリッジ回路の模式図 および 計測の概念図

3. 低電子密度領域における誤差要因と対策

インピーダンス・プローブの測定誤差は以下の2点、すなわち「1. DDSの周波数ステップ(テレメータのサンプリング周期)」「2. 観測波形に重畳するノイズ」に由来しており、この概念を図3に示す。

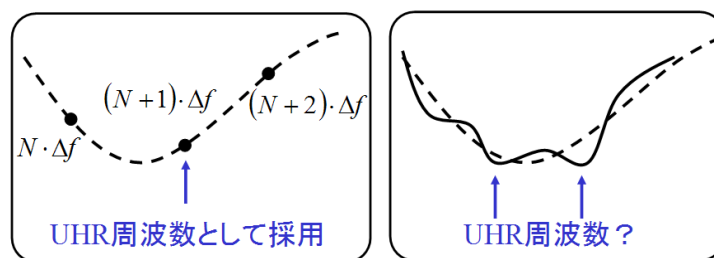


図3 UHR検出において生じる誤差の概念図

左: DDSの周波数ステップによる誤差。DDSは予め決められた周波数ステップ(Δf)ずつ周波数を掃引するため、各ステップの間の値は分からない。

右: ノイズなどの影響による誤差。値が同程度の極小値が複数存在すると、どちらがUHR周波数であるか判断できない。

まず1について説明する。DDSは外部からのデジタル信号によって周波数を決定するため、通常は数kHz刻みのステップを予め決めておき、その周波数ステップの数を変化させることで周波数掃引を行う。等価容量の極小値を決める際、特に電子密度が低い領域においてはQ値が低く、極小値が1箇所に限らない可能性がある。このとき、周波数が1ステップ分(ここでは10kHzとする)ずれると、UHR周波数の「真の値」も小さいために、相対的に誤差が大きくなる。仮に 10^4cm^{-3} 程度の電子密度があれば、1ステップずれた際の誤差は $\pm 3\%$ 程度であるが、 $3 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$ 程度の低い密度であれば $\pm 17\%$ まで誤差が大きくなる。この点は、周波数ステップを小刻みにすることで改善可能であるが、その分だけ掃引が遅くなり、観測ロケットなどに搭載した際の空間分解能が低くなる。また、テレメータのサンプリング周期を上げることも、テレメータ資源に限りがあるため困難であると思われる。

次に2について説明する。これは図3(右)に示すように、波状のノイズによって極小値の候補が複数ある場合である。これも1と同じく、観測したUHR周波数が低いほど、測定誤差が大きくなることが分かる。

こういった誤差要因を取り除くにあたり、位相検出型インピーダンス・プローブの使用が考えられる。位相検出型とは、ブリッジ回路の出力電圧を計測すると同時に、ブリッジ回路における入出力信号の位相差を検出することができるようにしたタイプで、図4に測定例を示す。理想的な状況においては、UHR 周波数において位相差が 90° となることが分かる。これを用いる利点は、「位相差信号は UHR 周波数を直線的に横切る」ことであり、この概念を図5に示す。直線的に横切る場合は、関数でフィッティングすることが容易であるため、周波数が離散的であっても中間の値を推測できることになり、上記1、2のいずれの場合においても高精度な観測が期待できる。

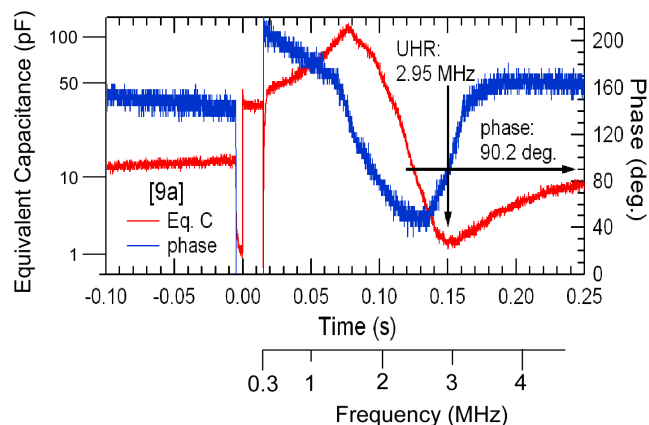


図4 位相検出型インピーダンス・プローブによる測定例

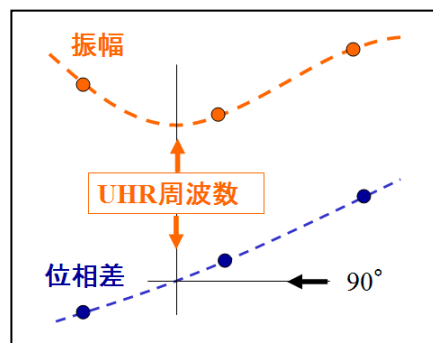


図5 位相検出型における計測の概念図

ここで問題となるのは、必ずしも UHR 周波数で位相差が 90° になるとは限らないことである。特に電子密度の低いところでは位相差が 90° にならない場合が多い。逆に言うと、「UHR 周波数が低い場合は、位相差が何度のときに UHR 周波数となるか」という定量的な関係が得られれば、観測精度を上げることが可能となることが言える。そこで、様々な電子密度をもつプラズマを観測し、測定する UHR 周波数の大きさと、その周波数における位相差の間にはどのような関係があるか、大型スペースチェンバーを用いた実験を通じて試みた。

4. チェンバーを用いた観測実験

大型スペースチェンバーを用いた実験は、2010 年 8 月 27～30 日の日程で実施された。位相検出型インピーダンス・プローブの参照データとして、チェンバーに設置されている標準のインピーダンス・プローブによる測定を同時に実施した。ここでは、地球磁場のもとで 1.4～3.2MHz の UHR 周波数を持つプラズマを 8 通り観測し、また磁場なしの状態では 0.9～3.4MHz の UHR 周波数で 9 通りのプラズマを観測した。一例として、地球磁場のもとで 2.89MHz の UHR 周波数を検出した場合の測定結果を図6に示し、実験期間中のデータ（ブリッジ出力電圧と位相差）を図7および図8に示す。地球磁場の下での結果と、磁場なしの状態での結果ともに、UHR 周波数で位相差が必ずしも 90° にならないということが見て取れる。これについて、以下で考察を行う。

5. 考察

観測結果の波形を見る限りでは、UHR 周波数が低くなるに従って、UHR 周波数における位相差は 90° より小さくなってゆくように見えるため、「UHR 周波数の大きさ」と「UHR 周波数における位相差」の間には負の相関関係が期待される。

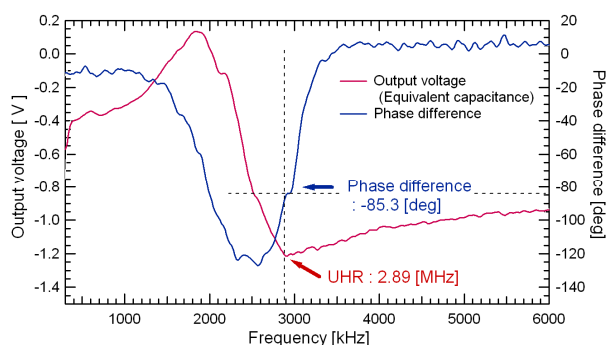


図6 位相検出型インピーダンス・プローブの測定例

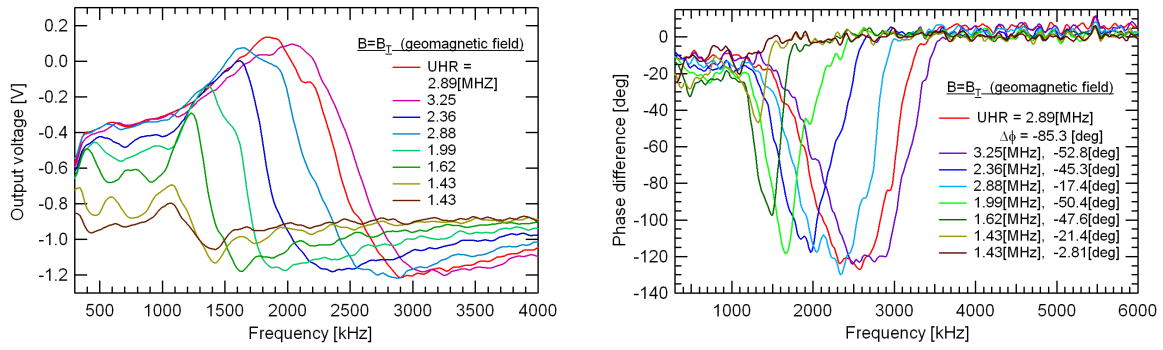


図7 地球磁場の下での測定データ（左：ブリッジ出力電圧、 右：位相差）

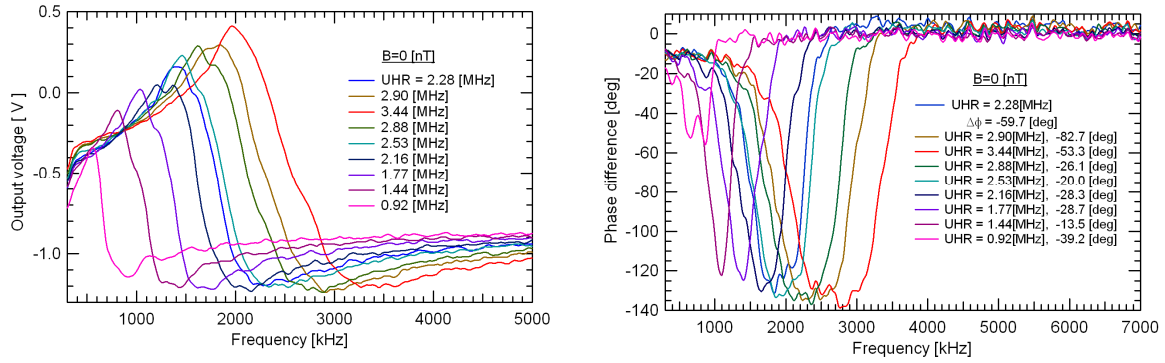


図8 磁場なしの状態における測定データ（左：ブリッジ出力電圧、 右：位相差）

そこで、両者をプロットした結果を図9に示す。図9によると、両者に負の相関関係が傾向としては見られるものの、定量的な関係を示すほど明確には現れていない。この原因としては、位相差はUHR周波数を急峻に通過するため、わずかなノイズなどに影響されて位相差の値が大きく変化してしまうことによると思われる。ノイズの影響が少なく、かつチェンバー内部でなるべく様なプラズマを計測したものを選択すれば、UHR周波数と位相差の定量的な関係が見えてくる可能性が考えられ、これはリファレンスデータを参照しながら今後検討する必要がある。

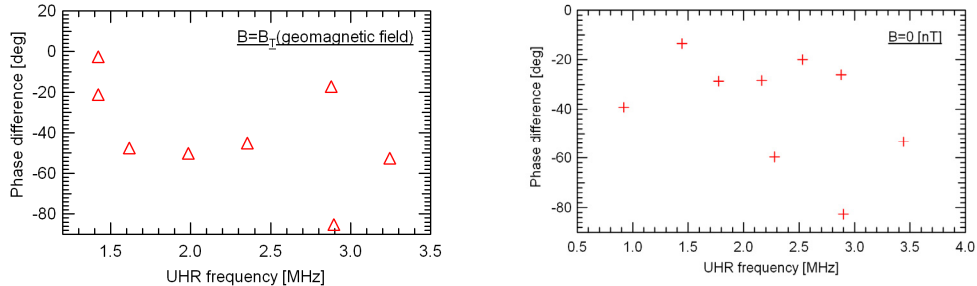


図9 測定データのまとめ（左：地球磁場の場合、 右：磁場をキャンセルした場合）

6. まとめ

本研究では、インピーダンス・プローブにおける低電子密度領域の精度向上のため、位相検出型の利用を検討した。UHR周波数の大きさと、UHR周波数における位相差の値に定量的な関係が求められるかどうか、チェンバー実験を通じて検証したところ、現段階では定量的な関係は見られなかった。原因としては、位相差がUHR周波数を急峻な傾きを持って通過するため、わずかなノイズなどに影響されることであると思われる、この点について再検討が必要である。

7. 謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同利用設備を利用して行われ、また日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究B）の御支援により実施されたものである。

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.