

浮遊型プローブによるプラズマ測定

進藤春雄、大須賀康平、秋元隆宏、磯村雅夫、阿部琢美
(東海大学 工学研究科) (JAXA)

hshindo@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1、はじめに

地球環境とりわけ荷電離粒子が存在する電離圏プラズマは地球大気の一部としてその振る舞いの理解が重要であると同時に、近年地殻変動との相関が指摘されるなど、グローバルな地球環境のモニター領域として注目される。それ故に電離圏プラズマの精密測定は大気環境制御の視点と同時に地殻変動モニタリングの視点からもその重要性が増している。

本研究では新しい浮遊型のプローブ法を提案し、電離圏プラズマ等のスペースプラズマの精密測定が可能となるような測定法の確立を目的とする。すなわち、浮遊状態にあるプローブ法ではプラズマからの電流測定が不要なために、低電子温度で低電子密度の状態にあるスペースプラズマの精密測定が可能になると考えられる。本研究では従来のエミッシブプローブ法[1-5]を原理的に拡張し[6-9]、プローブの加熱電圧に対する浮遊電位の変化からプラズマ諸量の電子温度、電子密度、プラズマ電位さらには電子エネルギー分布関数を決定するものであり、プラズマからの電流測定を基本とする従来プローブ法に比べ、測定回路の微小な駆動電流のみで測定可能な本測定法はスペースプラズマの精密測定に最適と考えられる。

本測定法は、従来、半導体製造装置等に多用される高周波プラズマの診断用として考案されたものであるが、本研究では、対象とするプラズマを高周波プラズマから、電離圏プラズマに代表されるような低電子密度かつ低電子温度のプラズマ（以下スペースプラズマと称する）に置き換えて実施した。具体的には（1）既に関済済みの本測定装置を用い、スペースプラズマの典型的条件での測定を試みた。（2）測定結果の評価・分析より、プローブ材料ならびに

寸法、さらには測定電子回路に改善を加え、スペースプラズマ測定装置として最適化を検討した。（3）従来法の標準的方法である Langmuir Probe 法を用いて同一条件におけるスペースプラズマの測定を行い、測定結果の比較ならびに評価・検討を加え、本プラズマ分析装置の客観的評価を行った。

従来、本測定法を各種の高周波プラズマの診断に応用し、実験データの蓄積を行ってきた。その結果、誘導結合型プラズマや容量結合型プラズマさらには絶縁壁容器内プラズマの診断[10]が可能で、プラズマの諸量、電子温度、電子密度、プラズマ電位さらには電子エネルギー分布関数を決定し、従来法の Langmuir Probe ならびに Double Probe の結果と比較することから、その妥当性を検証した[10]。最近では、RF (Radio Frequency) およびマイクロ波酸素プラズマの下流域（拡散領域）において電子密度 $10^6(\text{cm}^{-3})$ 台の測定を実施し、Langmuir Probe 法の測定結果と比較した。その結果、Langmuir Probe 法では測定困難な条件でも本測定法では測定が可能であることを実証済みである。以上のことより、電離圏環境に近い電子密度が $10^4\text{-}10^6(\text{cm}^{-3})$ の DC プラズマにおいて本測定法が精密測定法として有用となることが期待でき、従来法において、測定電流を大きくするために取られていたプローブ寸法の増大化にともなう幾つかの諸問題が解決できると期待される。

2、測定原理

本浮遊型プローブによる電子温度、密度の測定原理はパルス電圧で加熱されたエミッシブプローブのエミッション電子およびプラズマからプローブへ流入するプラズマ電子が作る電流値の関係から求めることが出来る。図1はプローブの電圧一電流特性を片対数グラフで示したものである。加熱

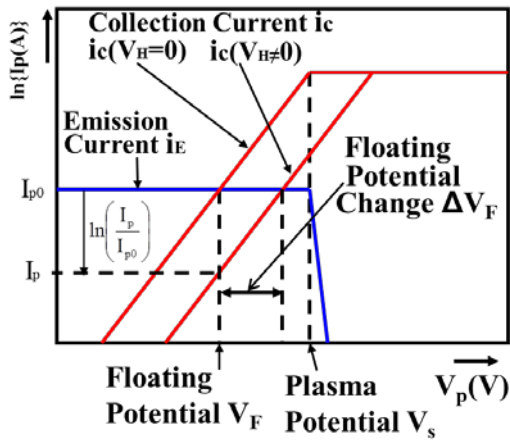


図1 浮遊型プローブの測定原理

電圧 V_H がオフのとき、浮遊状態にあるプローブ電位はエミッション電流 i_E とコレクション電流 i_C の等しくなる電位 V_F の値となるが、エミッション電流が充分大きくなるとこの V_F がプラズマ電位 V_s を示し、ことを利用すれば V_s の精度の良い測定が可能である。この技術はエミッシブプローブの代表的な使用法でプラズマ診断に広く用いられている。[1-5]

本プローブ法では更に加熱時に現れる電圧 V_H によりコレクション電流の値が瞬間的に変化し、その結果得られる V_F の変化電圧 ΔV_F がプラズマ電子のエネルギーの情報を持つことを利用する。すなわち、エミッション電流 i_E とコレクション電流 i_C との間には次の積分の中間値の定理が成立する。

$$i_c(V_F) = \frac{1}{V_H} \int_{V_F + \Delta V_F - V_H}^{V_F + \Delta V_F} i_c(V) dV \quad (1)$$

ここで、測定対象は V_F ならびに ΔV_F である。さらに、プラズマ電子がマックスウエリアンである場合、 ΔV_F は次のような式で解析的に求めることができる。

$$\Delta V_F = -\frac{kT_e}{e} \ln \left\{ \frac{kT_e}{eV_H} \left[1 - \exp \left(-\frac{eV_H}{kT_e} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

ここで、 T_e はプラズマ電子温度であり、 ΔV_F の測定値から電子温度 T_e を求めることができる。一方、(2) 式はプローブ電位がプラズマ電位 V_s 以下の条件で成立するが、

プローブ電位が V_s を超えた場合の ΔV_F はエミッション電子の温度 T_w を含むようになり[8]、測定値 ΔV_F から T_w を算出し、エミッション電流からプラズマ電子密度を算出することが出来る[10]。

以上がマックスウエリアンプラズマの測定原理であるが、非マックスウエリアンの場合には(1)式を経由し、プラズマ電子のエネルギー分布関数を求めることが出来る。

3、高周波プラズマの測定

本浮遊型プローブでの測定は各種の高周波工業プラズマにおいて行われている。誘導結合型プラズマや容量結合型プラズマさらには絶縁壁容器内プラズマの診断[10]が可能で、プラズマの諸量、電子温度、電子密度、プラズマ電位さらには電子エネルギー分布関数の測定が浮遊状態で可能であることを示してきた。さらにはドライエッチング等で用いられる SF_6 ガスや酸素ガスプラズマの実ガスでも測定可能であることを実証している。

図2には周波数 13 MHz の誘導結合プラズマにおいて得られた浮遊電位 V_F およびその変化 ΔV_F の測定生データを加熱電圧 V_H の関数として示した。Ar ガス圧力 3 mTorr において高周波電力 50 W から 700 W までの条件で得られたものである。図中には前記(2)式で得られる ΔV_F 理論値についても実線で示してある。浮遊電位 V_F の測定値には、いずれの高周波電力条件で2つの特性電位が現れており、本浮遊型プローブ

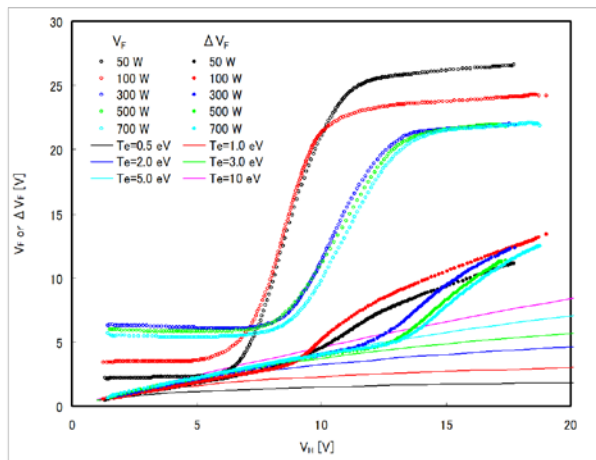


図2 誘導結合型プラズマの測定

測定法が有効であることを示している。すなわち、加熱電圧 V_H の低い領域で得られている特性電位はいわゆる浮遊電位 V_f であり、加熱電圧 V_H の高い領域で得られている特性電位はプラズマ電位である。一方、浮遊電位の変化 ΔV_f の測定では、その値は (2) 式から得られている理論値とよく合致しているのがわかる。すなわち、その測定値は加熱電圧 V_H の低い領域でいずれの高周波電力条件において理論値と合致し、これよりプラズマ電子温度が決定できる。加熱電圧 V_H の高い領域においてその測定値は理論値を大きく外れるようになるが、これはプローブ電位がプラズマ電位 V_s を越えて電子電流飽和領域に入っているためである。従って、電子温度の決定は比較的低い V_H の領域で行われ、 V_H の高い領域は除外される。一方、加熱電圧 V_H の高い領域での ΔV_f の理論値は (2) 式よりは複雑になるが、解析的に求めることが出来[8]、この理論式はプラズマ電子温度 T_e 以外にエミッション電子温度 T_w の関数にもなる。このことより、プラズマ電位を越えている領域で得られる ΔV_f 測定値を用い、エミッション電子温度 T_w を決定し、エミッション電流の値からプラズマ電子密度を算出することが可能である[10]。

図 3 (a)、(b)は、上記のように方法で得られた電子温度、電子密度ならびにプラズマ電位の測定結果をラングミュアプローブ法で得た結果と比較して示したものである。図 2 の場合と同様に、誘導結合型プラズマにおけるチャンバ半径方向分布を比較したものである。図 3 (a)において、電子温度ならびに電子密

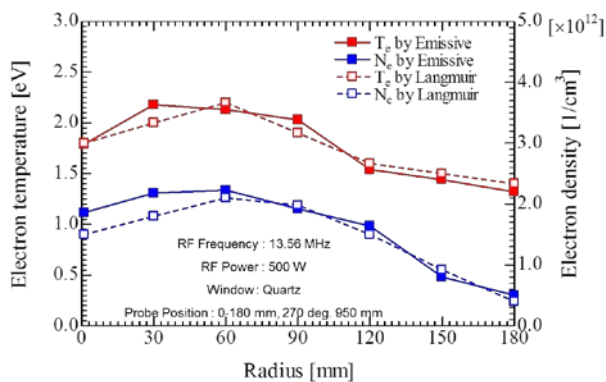


図 3 (a) 電子温度と電子密度の測定

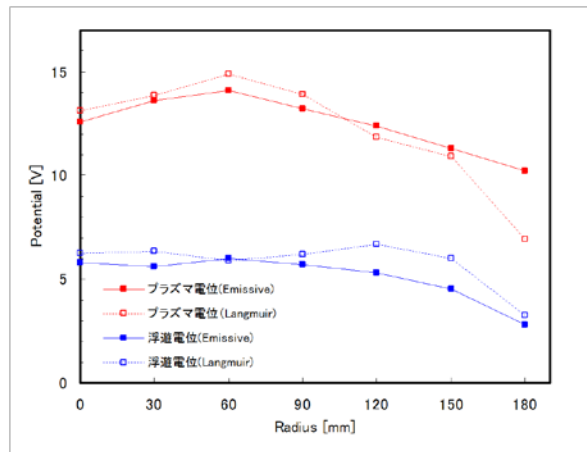


図 3 (b) プラズマ電位の測定

度の両測定結果には大きな矛盾はなく、本浮遊型プローブ法の有効性は明らかである。図 3 (b) におけるプラズマ電位の測定結果においても同様のことが言える。

一方、本浮遊型プローブによる電子エネルギー分布の測定手法を今回初めて確立することに成功した。以下にその結果を述べる。

プラズマ電子のエネルギー分布関数を $f(E)$ とした場合、 $f(E)$ はプラズマコレクション電流 i_c と良く知られた関係を持つ[11]。この関係式を用いると、本プラズマ測定法において被測定量である V_f 、 ΔV_f 、 V_H ならびに ΔV_f の一階微分量で $f(E)$ を表わすことが出来る。本研究ではこの関係式を用いて、誘導結合型プラズマでの電子エネルギー分布の決定を試みた。図 4 にはその結果の一例を示した。図における Ar3mTorr 圧力において得られた測定値を基に、上記の手法に基づき決定した電子エネルギー分布を示したものである。横軸は電子エネルギー E (eV) であり、縦軸は Electron Energy Probability Function (EEPF) を任意目盛で示してある。図 4 によると、高周波電力が 50W、100W の低 RF パワー条件では上に凸状のいわゆる Druyvesteyn-like[12] の分布になるが分る。これは低 RF パワーの条件で高周波プラズマの生成のモードが容量結合型となり、アンテナからの強い静電界の影響を受けているためである。一方 RF パワーが大きくなるとその分布は徐々に直線型となるようになり、RF 電力 500W、700W の高 RF パワーでは Maxwell 分布になることが分かる。高 RF パワーの条件では高周波プラズマの生成モードが誘導結合型となり、高電子密度状態で電子衝突が活発になるため Maxwell 分布になると考えられる。図 4 に示されているように、本プラズマ測定法での電子エネルギー分布測定は有効であり、スペースプラズマでの適用が期待される。なお、浮遊状態での EEPF 測定は初めてとなることを強調したい。

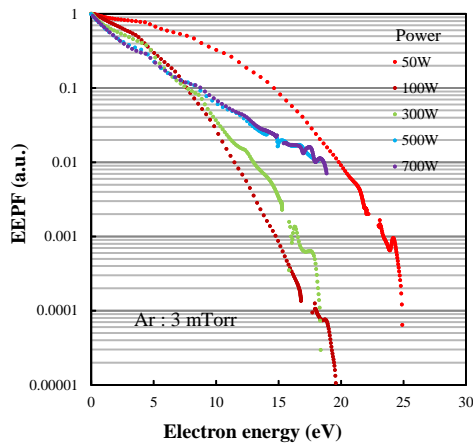


図4 電子エネルギー分布の測定

4、スペースプラズマの測定

前述したように、本浮遊型プローブによる高周波工業プラズマの測定においてはその有用性が示された。この結果を基に、本浮遊型プローブ法を用い、今回初めてスペースプラズマの測定を行った。測定に用いたプラズマは JAXA の共同利用設備である大型スペースチャンバー内に生成された後方拡散型プラズマである。圧力 0.02Pa のアルゴンプラズマであり、その放電電流は 100 mA-200 mA である。また測定に用いたプローブは① Ti 0.2Φ L 6 cm-20 cm、② W 0.03Φ L 2 cm、③ SUS 0.3Φ L 10cm の3種類である。

測定に用いた上記3種類のプローブのうち②W 0.03Φ L 2 cmのプローブは前記3節において述べた高周波プラズマの測定において標準的に用いたプローブであり、実験室プラズマとスペースプラズマ測定の比較のために用いたものである。測定の結果、②のプローブによるスペースプラズマの測定では有意の結果を得ることが出来なかった。この理由は、②のプローブ寸法は30μΦ、2 cm長と小さく、低電子密度のスペースプラズマ測定限界以下であったと考えられる。

図5にはスペースプラズマ測定で得られた結果の一例を示した。ここで用いたプローブは③プローブの寸法 0.3Φ、10 cm長のものであり、 ΔV_F 測定生データとそれより得られる電子温度の結果を示したものである。放電電流が100 mAおよび200 mAの

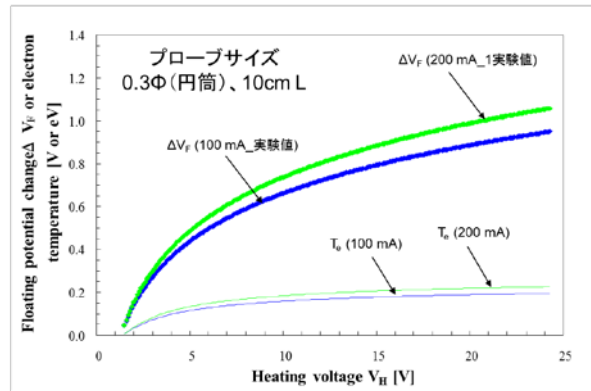


図5 スペースプラズマでの測定

場合を示した。図中の電子温度は ΔV_F 測定値より(2)式を用いて算出したものである。得られた電子温度の値は加熱電圧 V_H により多少の変動はあるが、おおよそ0.18eVの値を示している。また、この値には放電電流が大きくなると僅かではあるが増加の傾向がみられる。

一方、本測定法で得られた電子密度の値を図6に各条件ごとにヒストグラムで示した。放電電流は100mA、200mAの条件である。測定に用いたプローブは前記のとおり、TiおよびSUSの場合である。

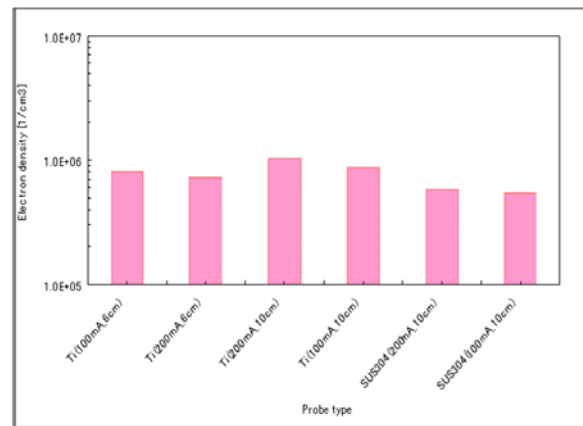


図6 スペースプラズマでの電子密度測定

図6の結果から分かるように、電子密度の測定値は $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ から $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ の間にあり、従来ラングミュアプローブで測定されている値と矛盾はない。

表1には図5のように各種プローブにおいて測定された電子温度 T_e とプラズマ電位 V_s および浮遊電位 V_f をまとめて示した。表には、 ΔV_F の2階微分から求めた V_s と電子温度から算出される V_s 計算値も示してある。表1の結果から分かるように、いずれのプ

	Te [eV]	Vf [V]	Vs [V] (2階微分)	Vs [V] (Maxwellian)
SUS304 (100 mA)	0.180797	0.998654	1.80268	1.902639273
SUS304 (200 mA)	0.193888	1.009981	1.87836	1.979418457
Ti (100 mA)	0.191503	1.006596	1.84079	1.964109001
Ti (200 mA)	0.201794	1.042903	2.00263	2.051872882

表 1 測定結果のまとめ

ローブ条件においても電子温度は放電電流 100mA で 0.18-0.19eV、放電電流 200mA で 0.19-0.20eV と大きな矛盾はない。またプラズマ電位 Vs は 1.8-2.0V の範囲で両方法で得た値で良くあっている。

本測定法による表 1 の結果と従来法との比較では、同一プラズマ条件でラングミュアプローブ法で得た電子温度の値が 0.10eV であり、本プローブ法による結果が高い値になっている。この理由は本プローブ法では、主にプラズマ電子の浮遊電位以下の高エネルギー電子をサンプリングすることが理由と考えられ、今後電子エネルギー分布関数の測定を含めて詳細を明らかにする必要がある。

謝辞

本プラズマ分析法の開発に際しては、理研 O B の雨宮宏先生に多くのご教示を頂きました。記して謝意を表します。

本プラズマ分析装置の開発は(独)科学技術振興機構 (J S T) 「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の開発支援を受けました。記して謝意を表します。

REFERENCES

- [1] R. F. Kemp and J. M. Sellen, Jr.: Rev. Sci. Instrum. **37** (1966) 455.
- [2] W. Yao, T. Intrator, and N. Hershkowitz: Rev. Sci. Instrum. **56** (1985) 519.
- [3] C. Forrest and N. Hershkowitz: J. Appl. Phys. **60** (1986) 1295.
- [4] T. Honzawa: Rev. Sci. Instrum. **58** (1987) 401.
- [5] S. Takamura, N. Ohno and T. Kuwabara: Contrib. Plasma Phys. **44** (2004) 126.
- [6] H. Shindo, M. Konishi and T. Tamaru: Rev. Sci. Instrum. **59** (1988) 2002.
- [7] H. Shindo and Y. Horiike: Jpn. J. Appl. Phys. **30** (1991) 578.
- [8] K. Kusaba and H. Shindo: Rev. Sci. Instrum. **78** (2007) 123503.
- [9] J. Sheehan and N. Hershkowitz, Plasma Sources Sci. Technol. **20** (2011) 063001(Review Paper)
- [10] Y. Taniuchi, T. Yamada, T. Tokieda, M. Utsumi, M. Isomura, and H. Shindo: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 116101.
- [11] 雨宮宏：日本物理学会誌、第 39 巻 2 号、pp119-127(1984)
- [12] 雨宮宏、坂本雄一：真空、第 28 巻 4 号、pp177-192(1985) (1984)