

プラズマ中における起電力体の 電位に関する実験的研究

佐々木 進・長井 孝*
堤井 信力*・河島 信樹

(1984年12月15日受理)

Experimental Study on Potential of a Body with Electromotive Force in Plasma

By

Susumu SASAKI, Takashi NAGAI,
Sinriki TEII, and Nobuki KAWASHIMA

Abstract: We have experimentally studied the electrical potential of a body which has an electromotive force in plasma. It has been found that the potential of the body is usually inclined to be negative with respect to the space potential, while it gets to be positive when the body has an emissivity of electrons. These results can be applied to study the potential of the satellite Io which has a strong electromotive force in the Jupiter magnetosphere. They will be also applied to control the electrical potential of a large facility such as the space station flying in the ionosphere which generates $V \times B$ electromotive force.

第1章 序 論

起電力を伴った物体が、プラズマ中に孤立している系は、実験室プラズマの場合、非常に特殊な配位と考えられ、研究論文も殆んどない。ところが、このような系は、宇宙空間においては、特殊なものではなく、比較的多いと考えられている。その身近でよく知られた例が、木星衛星イオである。イオ衛星は、木星磁気圏内で公転しているため、その速度と木星磁場によるダイナモ作用のため、約400KVの起電力を持っていると見積られている[1]。実際イオ衛星が正負両極を持ちその電位差がきわめて大きいことは、米国の木星探査衛星パイオニア10号による次のような観測事実により支持されている。

* 武蔵工業大学工学部

1. イオ公転軌道付近で、150 KeV 以上の高エネルギー電子が検出された。このことは、イオ付近で 150 KV 以上の空間電位差が存在し、それによって電子の加速が行われていることを意味している。
2. イオ公転軌道に水素の雲がトラス状に広がり、その領域から水素のライマン α 線 (強度 200 レーリー) が励起されている。更にイオ付近から強力なナトリウム D 線が放射されている。これらの事実は、イオから水素及びナトリウムが散逸していることを示している。そのメカニズムは、イオ負領域へのイオンボンバードメントによるイオ表面からの水素及びナトリウムの蒸発によるものと解釈される。

このような、ダイナモ作用による起電力は磁場を伴う連星系では、常に発生しうる。起電力体の周辺にプラズマが存在すれば、電流系が形成され、その負荷を通じてエネルギーが解放される。特に起電力体の電気伝導度が高い場合、この起電力体は、内部抵抗の小さい電源として、大量のエネルギー放射が可能である。イオ衛星の場合も、その起電力が木星磁気圏に強いエネルギー作用をしていると考えられ、木星デカメータ波の変調もイオの相対位置に関係しているものがあることが見い出されている[2]。最近の電波天文学・X線天文学の急速な発達に伴い宇宙空間に存在する強力な電波源・X線源には、連星系を構成しているものがあることが判明しつつある。例えば科学衛星“はくちょう”で詳細観測されている X 線パルサー Velax-1 は巨星と中性子星との近接連星系と考えられている。このような連星系が、何故強力なエネルギー放射源になるかについては、未だ定説はないが、エネルギー放射のしくみのひとつとして、ダイナモ起電力を考えることができる。

ダイナモ起電力がエネルギー放射のソースとなる場合の基本的メカニズムは、起電力の発生、電流系の形成、周囲のプラズマ負荷を通してのエネルギー放射であるが、後二者については、その起電力体が周囲のプラズマに対してどのような電位になるかが本質的な問題となる。本研究では、特にこの点に注目し、様々な環境条件(磁場強度、周辺プラズマ密度、中性ガス密度、起電力体の表面電気状態)の下に、起電力体の電位がどのように決まるかを、実験的に研究した。

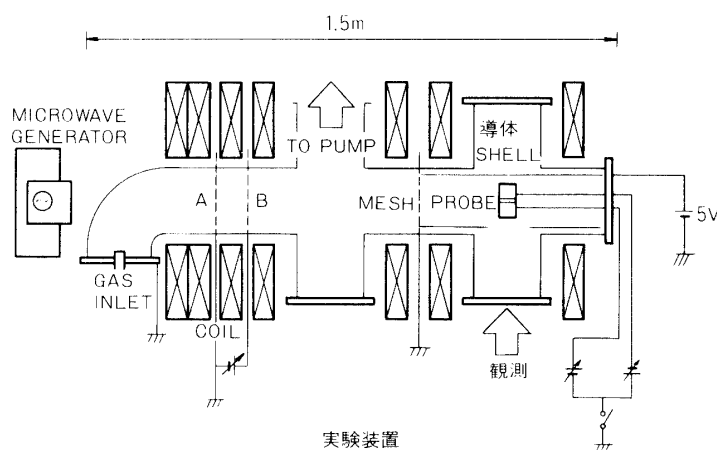
プラズマ中での孤立起電力体の電位の研究は、ただ単にダイナモ起電力を持つ天体现象への応用にとどまらず、今後建設されようとしている宇宙大型建造物(例えば、1990年代に実現する大型スペースステーション)の電氣的性質の予測、更にはその能動的な電位制御にも応用できるものである。地球周辺軌道周回建造物は、その飛翔速度と地球磁場のダイナモ作用により一般に起電力を発生するが、その構造スケールが大きい場合、その起電力は、極めて大きいものとなり得る。例えば、10 km スケールの太陽発電所を高度 250 km 付近に建設した場合、その両端での最大起電力は、数 KV にも達し、その周辺プラズマに対する電氣的性質を知ることは、運用安全上からも重要である。

実験は、プラズマ中に高電圧を印加した双電極プローブを挿入して、両電極の周辺プラズマに対する電位を調べるとともに、負電極側に電子エミッターをとりつけて、その電位に対する影響を調べた。この電子エミッターは、起電力天体が表面に高密度プラズマを持つ場合を模擬するとともに、その結果を強い起電力を有する大型人工飛翔体の電位制御に応用しようとするものである。

第2章に実験装置の説明、第3章に実験結果、第4章に実験結果の天体现象への適用及び今後の宇宙開発への応用について述べる。

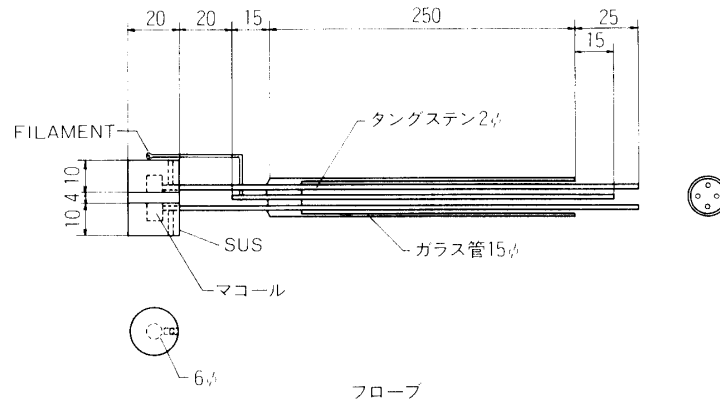
第2章 実験装置

実験装置は、第1図に示すようにプラズマ発生領域と、プローブ実験領域とからなりそれぞれの領域に独立した磁場コイル系を用い、最大 1000 Gauss 迄の縦磁場を印加することができる。プラズマ発生領域では、2.45 GHz, 最大出力 4.5 KW のマグネトロンを使用し、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) により、プラズマを生成する。共鳴磁場強度は、875 Gauss である。プラズマ発生領域に He ガスを導入して、安定した定常プラズマを生成する。プラズマ発生領域での典型的なプラズマパラメーターは、真空度 10^{-4} Torr の時、密度 $10^8 \sim 10^9 / \text{cc}$, 電子温度 10 eV である。実験領域のプラズマ密度の制御は、第1図中メッシュ A (接地) に対しメッシュ B に正電位を印加し、プラズマ吸収を制御してソース領域からのプラズマ流量を調節することによって行なう。制御可能な密度範囲は、真空度 1×10^{-4} Torr, 磁場強度 300 Gauss の時、 $4 \times 10^4 / \text{cc} \sim 5 \times 10^6 / \text{cc}$ である。実験領域の 4 インチパイレックス管は、その内部を接地した導体シェルでおおい、上流側には電位固定のため接地されたメッシュを置いた。最下流の金属フランジは、コレクターとして使用し、+5 V の電圧を印加して、その電流を計測し、実験領域に流入するプラズマ量をモニターした。プラズマ密度の計測は、ダブルプローブを用いて行った。電圧印加用プローブは、絶縁のためのマコール (セラミック系耐高温絶縁体) 円柱の両側にステンレスの円柱を装着して、双電極式とした (第2図)。プローブ電極には、導電性の黒色塗料をぬり、マコール表面には、絶縁性の黒色塗料をぬることによって、2次電子放出を防止するとともに、光の反射を少なくして、光学観測を容易にした。更に負電極から約 1 mm のところに、タングステンフィラメント (定格 7.2 V, 0.55 A) を装着した。フィラメントからの熱電子は、負電極電場の存在により加速放出され、等価的に負電極での電流増加を可能にする。第3図に本実験の電氣的ブロック図を示す。双電極プローブに電圧を印加する電源 (P 1) 及び

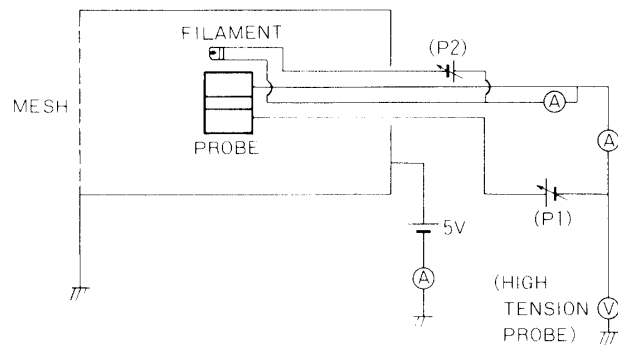


第1図 実験装置。プラズマは ECRH により定常的に生成し、電位固定のためのメッシュを通して実験領域へ導入する。

フィラメント電源 (P 2) は、高インピーダンスプローブでグラウンドと結ばれ、電気的にはほぼ絶縁されている。



第2図 実験に用いたプローブ、電極表面に導電性の黒色塗料を塗って使用した。



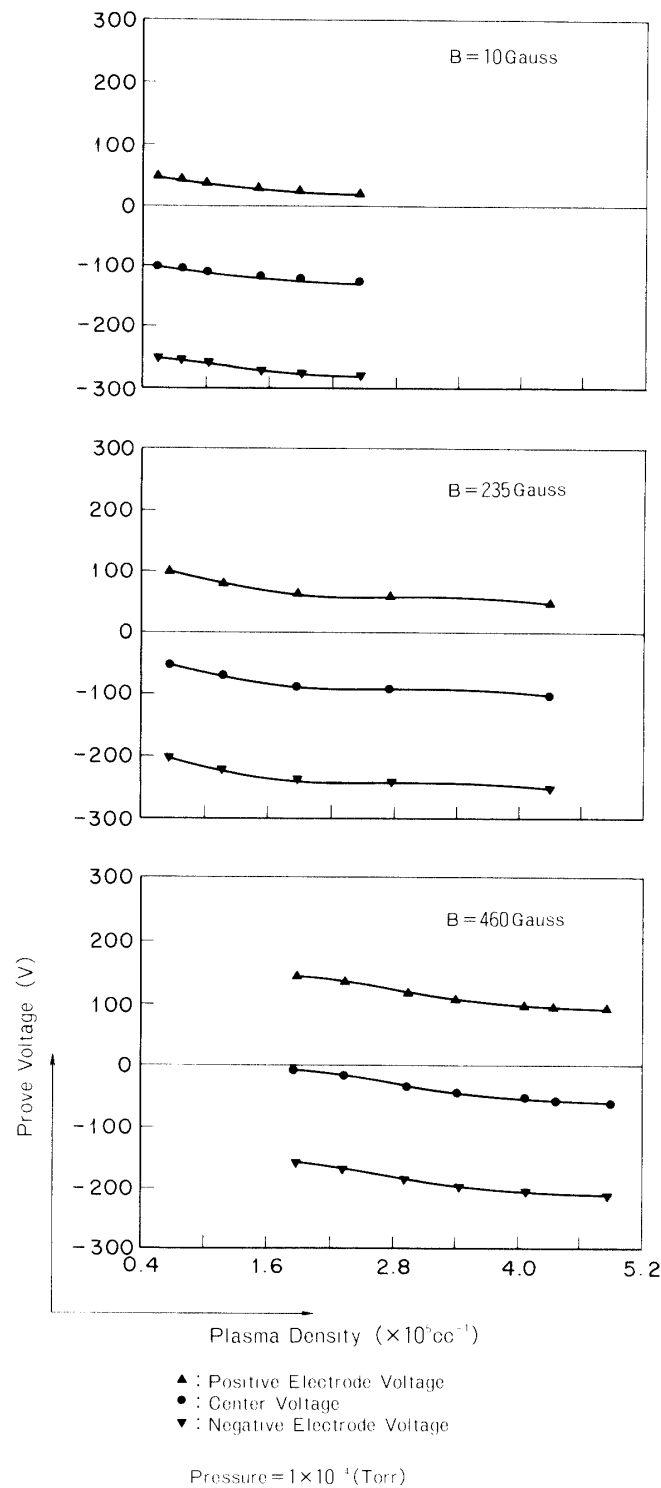
第3図 実験の電気的ブロック図。電位測定には、高圧プローブを用い、フィラメントからの電子放出量はヒーター電源 (P 2) により調整する。

第3章 実験結果

3-1 起電力体のプラズマ中での電位測定

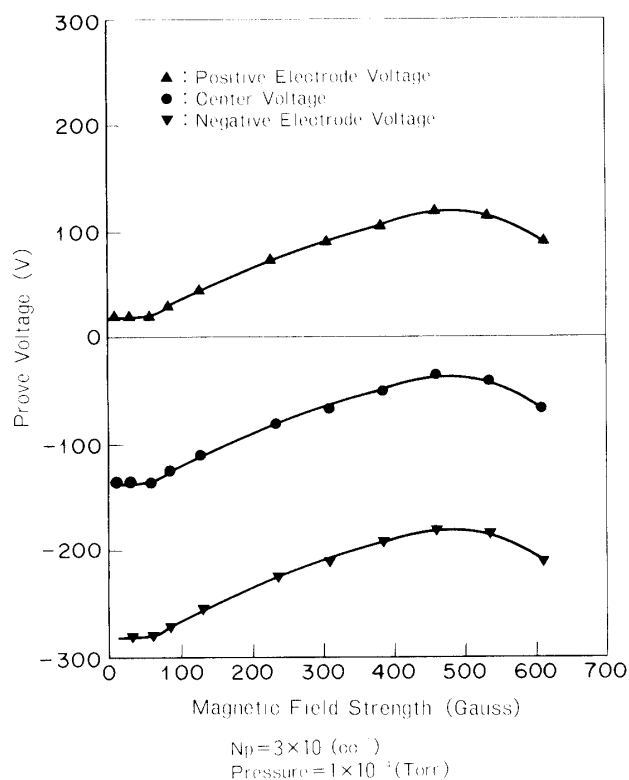
プラズマ中(密度 $\sim 1 \times 10^5 \text{ cc}^{-1}$)に、第2図で示した双電極プローブを挿入し、両極間に高電圧(代表的には 300 V)を印加して、周囲のプラズマに対する両極の電位関係を調べた。この場合、電圧印加電源は、プラズマ周囲壁と電気的に絶縁している。

第4図に、真空度 1×10^{-4} Torr, 磁場強度 10, 235, 460 Gauss のときの、プラズマ密度—プローブ電位特性を示す。ここでいうプローブ電位とは、プローブに 300 V 印加したと



第4図 プラズマ密度—プローブ電位特性. 磁場強度 10, 235, 460 Gauss の場合について示した. 中心電位はプラズマ密度が大きい程, 負側にシフトする傾向がある.

きの、グラウンドに対する正負両極の電位及び、中心電位（中心電位とは、両極電位の平均値と定義する。）である。この場合、プラズマ電位は、ほぼグラウンド電位になっていると考えて良い。どの場合も、印加した 300 V は、両極に ± 150 V（すなわち中心電位 = 0 V）に等分されずに、全体として負側にシフトしていることがわかる。また、このような電位不平衡の磁場強度依存性（真空度 1×10^{-4} Torr, 密度 3×10^5 cc $^{-1}$ ）を第 5 図に示した。一般的な傾向としては、この電位の不平衡は、プラズマ密度がより大きいほど負側へシフトし、磁場がより大きいほどそのシフト量が小さくなる。



第 5 図 プローブ電位の磁場強度依存性。磁場強度が強い程、負側へのシフト量が小さくなる傾向がある。

このようなプラズマ中での孤立系の電氣的釣り合いは、正電極側で集める電子電流 (I_e) と、負電極側で集めるイオン電流 (I_i) との釣り合いで決まる。すなわち、

$$I_i = I_e \quad (1)$$

(1)式は、イオン及び電子の速度を v_i 及び v_e とし、シースの実効表面積を、陰極側シース (イオンシース) S_i 、陽極側シース (電子シース) S_e とし、周囲のプラズマ密度を n_p とすれば、

$$en_p S_i v_i = en_p S_e v_e \quad (2)$$

と表わされる。すなわち、

$$S_i v_i = S_e v_e \quad (3)$$

プラズマ電子の熱速度は、イオンの熱速度よりもはるかに大きいので、(3)の釣り合いの式が成立するには、

- 1) 陰極側シース S_i が陽極側シース S_e に比べて極めて大きくなる。(すなわち、イオンシースが陽極側にはり出すことによって、 S_e がほとんどなくなる。)
- 2) 陽極側にとび込む電子の速度が減速をうける。この場合、陽極側も、プラズマ電位に対し、わずかに負側になる必要があり、印加電圧が 300 V の時、陽極がほぼ 0 V、陰極が -300 V (中心電位 -150 V) となるはずである。

という2つの場合が考えられる。

本実験の場合、熱速度は、 $v_i \sim 1000$ m/sec, $v_e \sim 2 \times 10^6$ m/sec ($T_e \sim 10$ eV) 程度と考えられるので、

1)の場合では、

$$\frac{S_i}{S_e} \sim 2 \times 10^3 \quad (4)$$

程度となる。この状態は、陰極側シース S_i が陽極側にまで張り出して、陽極側シース S_e を実効的に小さくすることによって実現されると考えられる。

いずれの場合にも、プラズマ中に挿入された起電力体は、一般に強く負側に沈むことになる。

3-2 負電極に装着した電子エミッタの影響

3-1において、プラズマ中に存在する起電力体は、全体として負電位になることを示した。ここで、負電極側に電子エミッタを装着し、シース内に熱電子を発生させた場合、その電位に対する影響がどのようなものになるかを調べた。

これは、天体现象への応用として、起電力体表面がバックグラウンドにあるプラズマより、高密度プラズマで構成されている場合を模擬するものである。

起電力体表面がプラズマでできている場合、正確には、負電極側からの電子放出のみでなく、正電極側からのイオン放出を模擬する必要がある。しかし、一般に電子電流 I_e の方が電位変化にはるかに大きい影響を与えること及び、イオンエミッタ装着の実験的困難さから、本実験ではタングステンフィラメントからなる、電子エミッタのみを使用した。

第6図に、電子エミッタを点灯し、そのエミッション電流を増加させた場合の正負両極及び、中心電位の変化を示した。(プラズマ密度 1×10^5 cc $^{-1}$, 磁場強度 10 Gauss, 真空度 1×10^{-4} Torr)。

エミッション電流 I_E が、約 0.1 mA 以下のとき、中心電位は負側にシフトしているのに対し、それ以上エミッション電流を増加させると、電位が正側に移行することがわかる。これは、エミッタからの電子が、負電極で加速放出されるため、プローブ全体として電子が失われ、正電位に移行するためだと考えられる。この場合、釣り合いの式は、

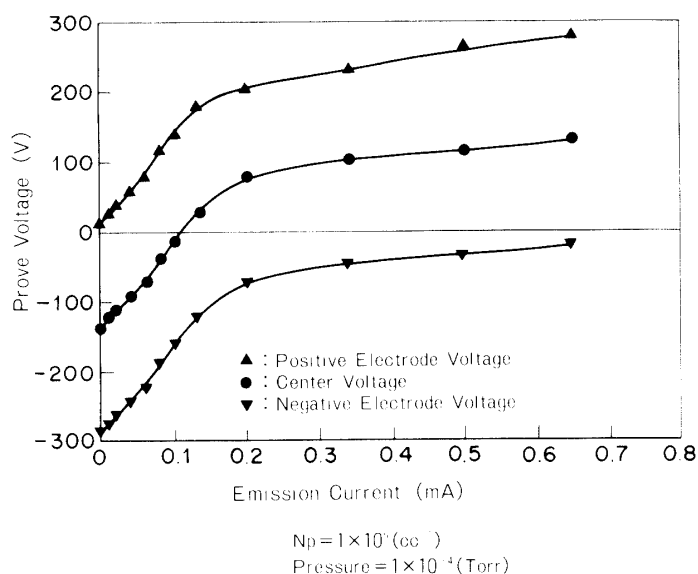
$$I_i + I_E = I_e$$

であり,

$$I_i \ll I_E \text{ より}$$

$$I_E = I_e \tag{5}$$

(I_i ; イオン電流, I_e ; 電子電流, I_E ; エミジョン電流)



第6図 プローブ電位のエミジョン電流依存性, エミジョン電流の増加にともない, 中心電位は正側へ移行する.

負電極側のフィラメントからのエミジョン電流と, 陽極側で集めるプラズマからの電子電流の釣り合いで電位が正側に移行することは, 第7図で示すように独立に測定した負電極側のエミジョン電流電圧特性と, 正電極側のプローブ特性からも示すことができる. フィラメントのエミジョン特性は, 電流が0.5 mA以下の時, 印加電圧に対し, 空間電荷制限の下で急速に増加するが, それ以上の電流では, 熱電子制限の為飽和する傾向がある. 両極間の電位差が300 Vの時には, この特性から, 陽極側に200 V, 陰極側に-100 Vの電位配分(中心電位50 V)で釣合がとれることになる. 但し, 実際の双電極プローブでは, 電極間の相互の電位の影響から, 平衡点は更に正側に移行する. 第8図に外部条件一定(真空度 1×10^{-4} Torr, 磁場強度10 Gauss)にしたときの, プローブ電位-エミジョン電流特性のプラズマ密度依存性を示す. このグラフを見ると, プラズマ密度が大きいほど電位が負の方向に傾向していることがわかる. (5)式において, 電流系の釣り合いがとれていることを述べたが, 例えば, エミジョン電流0.5 mAの時, それが釣り合うプラズマ密度は,

$$I_E = I_e = \frac{1}{4} n_p q v_e S$$

から

$$n_p = \frac{4I_E}{qv_e S} \quad (6)$$

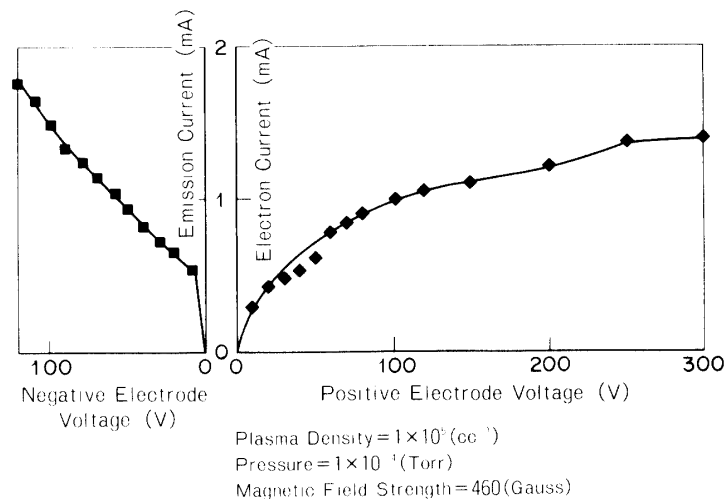
$$I_E = 0.5 \times 10^{-3} [\text{A}], \quad S = 4 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$$

であるので,

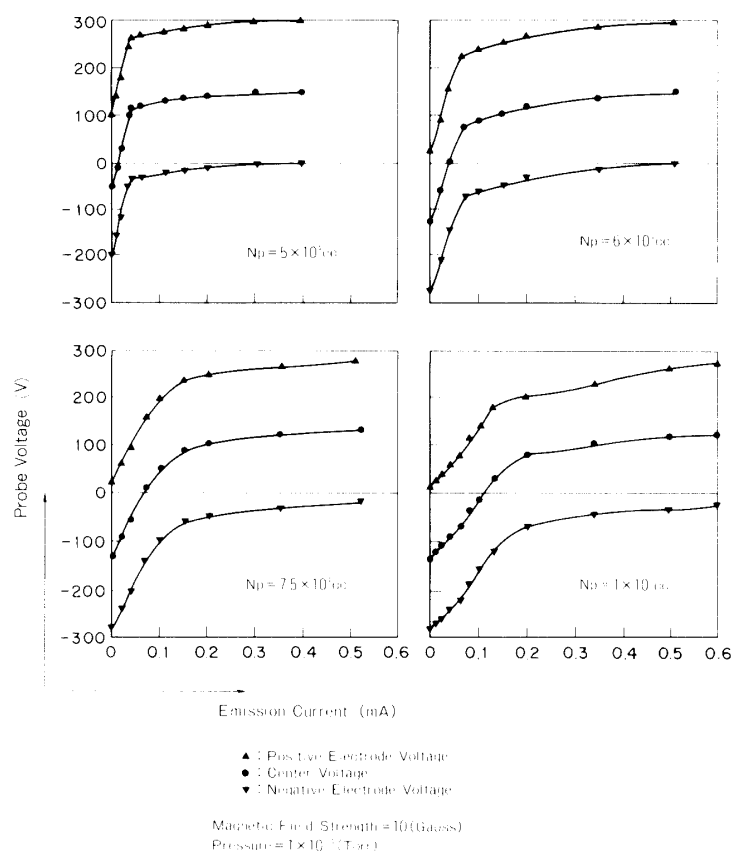
$$n_p \sim 10^7 / \text{cc}$$

プラズマ密度がこの程度になると、フィラメントからのエミッションの効果は、相対的になくなっていくことになる。実際、第9図に示すように、密度が 10^6 cc^{-1} オーダーになると、電子エミッタの効果が少ないことがわかる。第10図にエミッタ効果の磁場強度依存性を示す。(密度 $1 \times 10^5 \text{ cc}^{-1}$, 真空度 $1 \times 10^{-4} \text{ Torr}$) これから、磁場強度が強いほど正側に移行しやすいことがわかる。これは、磁場強度が強くなると、フィラメントからの電子が陽極に入りづらくなり、エミッタの効果が大きくなるためと解釈される。

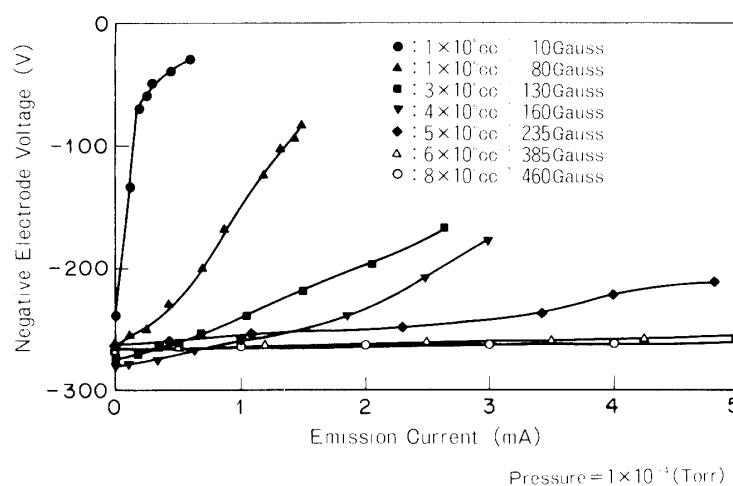
第11図に、密度 10^5 cc^{-1} , 磁場強度 10 Gauss における真空度依存性を示す。ここでは、プローブ電圧は中性ガス密度にあまり依存しないことがわかる。このことは、この実験では放電現象は関与していないことを示している。



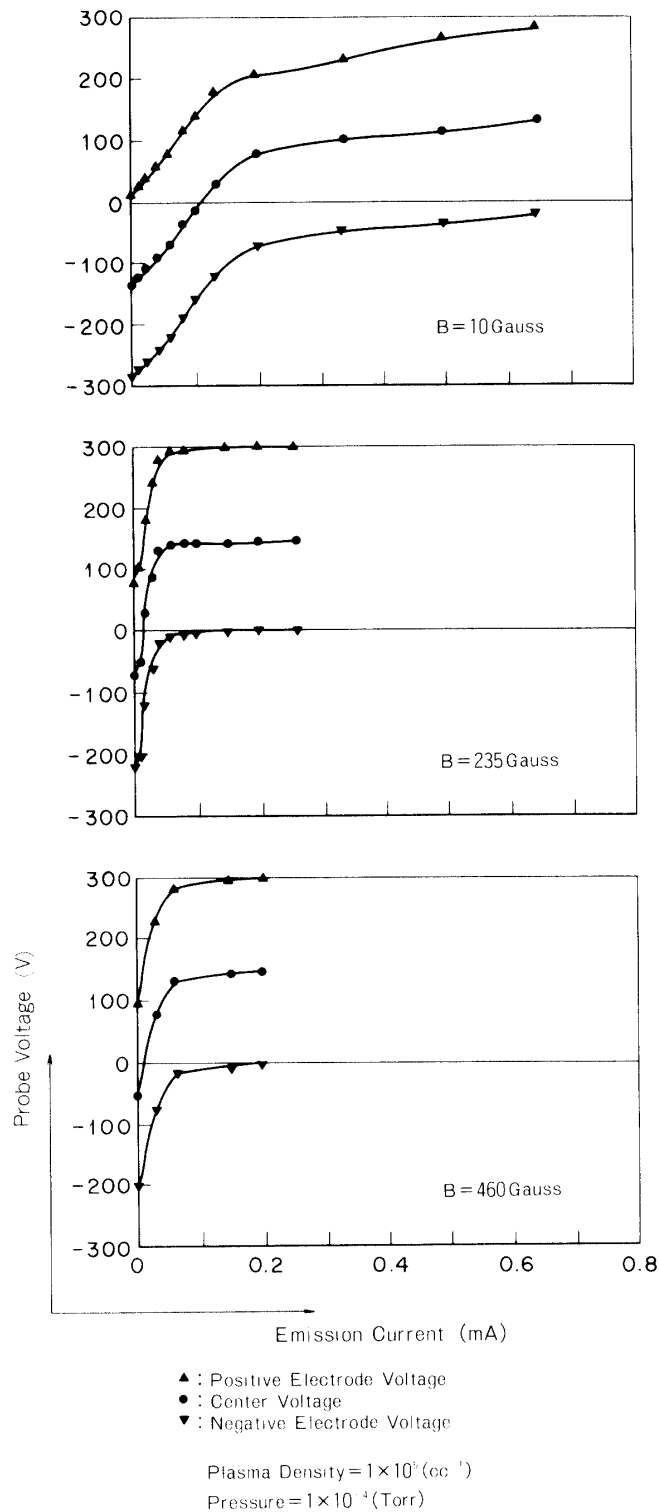
第7図 陽極，陰極を独立にした時の，両極でのエミッション特性及びプローブ電流特性を示す。両極の電位差 300 V の時は，200 V，-100 V に振り分けられることがわかる。



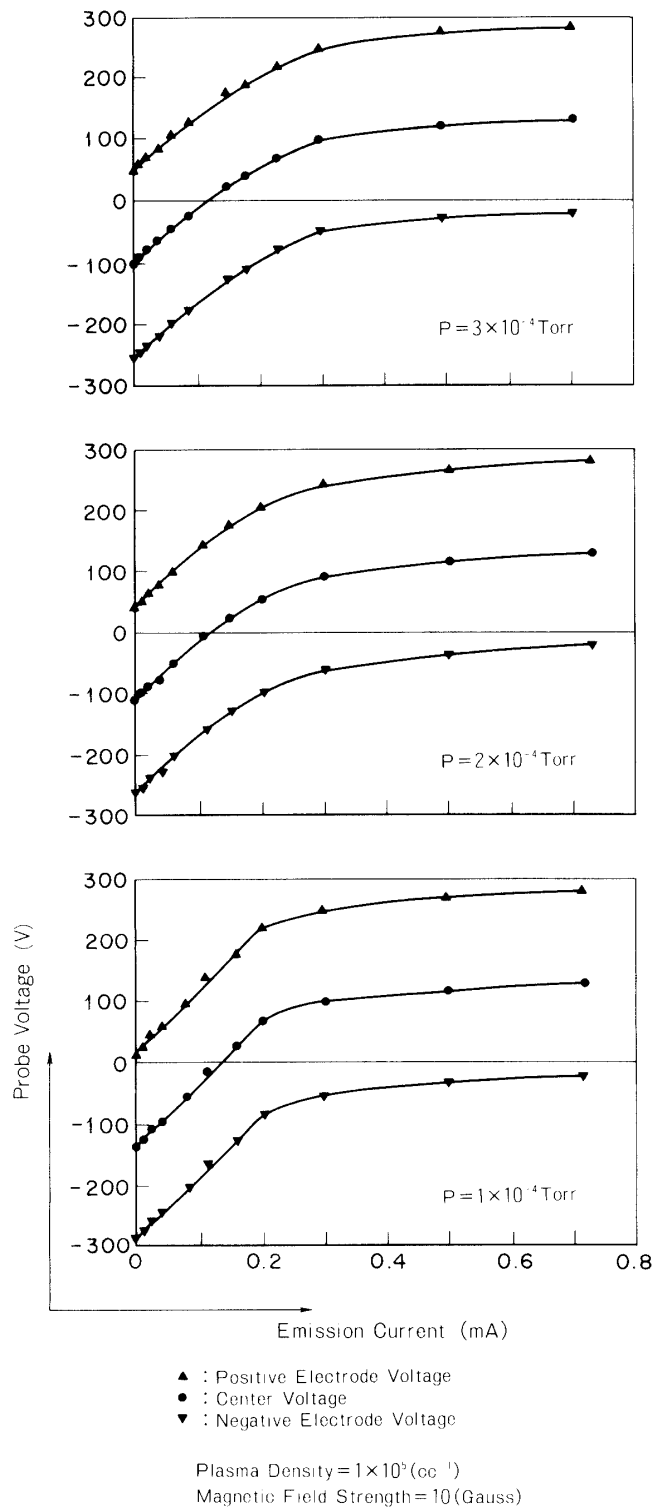
第8図 エミッション電流—プローブ電位特性のプラズマ密度依存性.



第9図 プラズマ密度を大きくした時のエミッション電流に対する負極の電位変化. プラズマ密度が $5 \times 10^6 / \text{cc}$ 以上程度では, エミッターの効果は失われる.



第10図 エミッション電流ープローブ電位特性の磁場強度依存性。磁場強度が強い時、正方向へのシフトが大きい傾向がある。



第11図 エミッション電流—プローブ電位特性の真空度依存性. 特性は, 中性ガス密度にはほとんど依存しないことがわかる.

第4章 宇宙プラズマ現象への応用

4-1 木星の衛星イオへの応用

序論で述べたように、木星イオ衛星には、強い起電力が発生している。この電氣的配位、即ち、磁化プラズマ中に、起電力体が存在する配位は、本実験と全く同じである。実験パラメータを、木星イオ系の場合と比較すると、

		木星イオ系	本実験
起電力体の直径	スケール	3260 [km]	2.5×10^{-2} [m]
磁場	強度	0.02 [Gauss]	10~460 [Gauss]
背景プラズマ	密度	200 [CC ⁻¹]	$4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$ CC ⁻¹
起電力		400 [kV]	300 [V]
背景電子	ラーモア半径	5.4 [m]	$2.3 \times 10^{-4} \sim 10^{-2}$ [m]
表面の電子	放出能力	1×10^{-5} [A/m ²]	最大 2.6×10^{-1} [A/m ²]

であり、スケーリング則は必ずしも成立していない。

イオ衛星の電氣的モデルは、Pioneer 10号の観測に基づく Shawhan のモデル[1]が代表的であり、正負シースの厚さは、イオ電離層最上部から 10~50 km とされている。負シースで加速されたイオ電離層電子は、木星電離層に向い、加速された木星磁気圏の熱プラズマ電子は、正シースを通過してイオ電離層内に入り、イオと木星磁気圏の間で電流系が形成されていると考えられる。このような場合、実験 3-2 配位（負電極に電子エミッタがある場合）に相当し、その平均的電位は正側に傾くことを、本実験は示している。イオの起電力が、正負等分された場合、負電位側で加速放出される電離層電子電流量が、正電位側で集める木星磁気圏電子電流よりも多いときに、正電位側に傾いた状態になる。イオの電離層密度が、木星磁気圏密度の 300 倍あることを考慮すると、イオ起電力が正負等分されず、正電位側に傾いていることは、充分予測される。

さらに、本実験は、起電力体負側の電子放射能力の増減にともない、その電位が強く変化する可能性を示している。イオ電離層密度は、日照及び日陰（木星の陰になるとき）とで、大きく変動すると予測され、それに伴って、イオ衛星の大きな電位変動が発生する可能性がある。この電位変動は、必然的にイオ-木星磁気圏間の電流変動をもたらし、エネルギー放射に影響を与える（イオ変調）。地球で観測される木星電波のイオ公転周期(1.769 日)に同期した変調は、このような電位変動に関連している可能性がある。

4-2 宇宙開発への応用

スペースシャトルの実運用が進むにつれ、宇宙空間への大型建造物の建設が現実のものとなりつつある。1990年代には、米国でスペースステーションの建設が予定され、2000年代には、大型の太陽発電衛星等の建造物が次々と建設される。これらの建造物は、建設費用・運送費の点から高度 300~500 km の電離層中に建設されることになっている。

このような地球近接軌道では、磁場強度が大きく、導電性の大型建造物では、その周回速度と磁場による、高電圧起電力が発生する。この場合の電氣的配位は、実験3-1配位(プラズマ中に電子放射能のない起電力体が存在する場合)に相当し、電離層プラズマ ($10^5 \sim 10^4 \text{ cc}^{-1}$)の電位に対し、平均的には強く負に帯電することが予測される。本実験のパラメータを10 km スケールの大型建造物を高度300 km に建設した場合と比較すると、次のようになる。

		宇宙大型建造物	本 実 験
起電力体	スケール	10 [km]	2.5×10^{-2} [m]
磁 場	強 度	0.3 [Gauss]	10~460 [Gauss]
背景プラズマ	密 度	10^5 [CC ⁻¹]	$4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$ [CC ⁻¹]
起 電 力		~2.4 [kV]	300 [V]
電子ラーマー	半 径	5×10^{-2} [m]	$2.3 \times 10^{-4} \sim 10^{-2}$ [m]

加速された電子による電離効果は無視できるので、発生した起電力2.4 kV はほぼ全て負側へかかると考えられる。

このような電位傾向は、宇宙の大型建造物を設計する場合、考慮する必要がある。全体が強く負側にシフトした場合、建造物全体がイオン衝撃を受けることになる。例えば、太陽発電衛星等の場合、このイオン衝撃による太陽電池表面の蒸発・破損が考えられる。このような場合、本実験3-2で示したようなエミッターを陰極側に設定することにより、比較的容易に、その電位を制御することができる。

第5章 結 論

プラズマ中にある起電力体の、プラズマに対する電位関係を、様々な周囲条件(プラズマ密度、磁場強度、中性ガス密度、起電力体の電子放出能力)の下で、実験的に研究した。

その結果、起電力体の平均電位は、プラズマ電位に対して、一般に負にシフトするが、負極に電子エミッターをつけることにより、平均電位が正に移行することが見いだされた。

この結果は、木星磁気圏内に存在する強い起電力体である木星イオ衛星に適用でき、イオの電離層が、その電位関係に強い影響を与えている可能性のあることがわかる。さらに、本実験結果は、宇宙空間に将来建設される、大型建造物の電位予測及び、電位制御にも応用することができる。

今後、本実験を基に、起電力体の粒子輸送・エネルギー放射を行っている宇宙空間の連星系への具体的な応用をはかることを予定している。

参 考 文 献

- [1] Shawhan, S. D., C. K. Goertz, R. F. Hubbard, D. A. Gurnett and G. Joyce, in The Magnetospheres of Earth and Jupiter, 1975
- [2] Bigg, E. K., Nature 203, 1008, 1964