

## 飛翔体帯電に伴う電離現象の実験的研究

佐々木 進・田沢 仁志\*  
河島 信樹・堤井 信力\*

(1983年2月4日受理)

### Laboratory Experiment on Plasma Discharge Surrounding a Charged Body in a Magnetized Plasma

By

Susumu SASAKI, Hitoshi TAZAWA,  
Nobuki KAWASHIMA, and Shinriki TEII

**Abstract:** Ionization phenomena around a positively charged body in a magnetized plasma has been studied experimentally, in relation to the charging effect of a spacecraft emitting an electron beam in space. Rotating electrons driven by magnetic field and electric field have been found to cause an effective ionization around the charged body. This effect can be applied to explain the experimental results that the charging effect of the spacecraft emitting a high power electron beam has been generally much weaker than the predictions based on the charging models previously proposed.

#### 1. 序 論

近年、宇宙空間プラズマ現象解明のため、飛翔体（ロケット、衛星）を利用した電子ビーム放出実験が盛んに行われ、1983年にはスペースシャトルによる大出力電子ビーム放出実験（最大7.5 kV, 1.6 A）が行われることになっている（SEPAC計画）[1]。この計画では、電子ビームによる人工オーロラの励起、プラズマ波動の励起、電子エコー実験が主要科学テーマとして研究される。

これらの飛翔体による電子ビーム放出実験で従来から問題になっていることは、電子ビーム放出に伴う飛翔体の帯電である。宇宙空間で電子ビームを放出することは、孤立系か

---

\* 武蔵工大工学部

ら電子をうばうことになるので飛翔体は当然大かれ少なかれ正電位に帯電する。宇宙空間が完全な真空であるとすれば、電子ビームによる帯電は、飛翔体の静電容量を  $C$  とすれば、

$$V_F = \frac{I_E}{C} t$$

$V_F$  : 帯電電圧

$I_E$  : ビーム電流

$t$  : 時間

である。飛翔体の容量は典型的には 1000 pF 程度なので、ビーム電流が 1 A のときは、わずか  $10 \mu\text{s}$  で飛翔体は 10 kV にまで帯電する。このことは逆に言えば、10 kV の加速電圧の電子銃で 1 A のビームを放出すれば  $10 \mu\text{s}$  でビームが放出されなくなることを意味している。現実には、宇宙空間にはプラズマが存在するので、帯電はプラズマから飛翔体へ供給される電子によって緩和される。

プラズマから供給される電子電流を考慮すると上の式は

$$V_F = \frac{I_E - I_R(V_F)}{C} t$$

$I_R(V_F)$  : 電位  $V_F$  のときプラズマから供給される電子電流

となる。即ち定常的には

$$I_E = I_R(V_F)$$

で決まる電位まで飛翔体は帯電する。

上式右辺はいわゆるプラズマ中での正電位シングルプローブ特性であり、この関数形さえわかればこの式で帯電電圧を知ることができる。プラズマ中でのシングルプローブ特性は古くから研究されており、印加電圧が電子温度に比してそれほど大きくない場合には Langmuir の特性をもち既にプラズマ計測手段として確立している。高電圧を印加した場合にも、理論的には Beard & Johnson の理論[2]が提案されており、更には磁場を考慮した Parker & Murphy の理論[3]、プローブ周辺の乱流を考慮した Linson の理論[4]がある。

ところが、これらの理論を実際の宇宙空間でのビーム放出実験に適用すると矛盾が生じることが数多くの実験で次第にわかってきた。例えば、上記モデルでも半径 1 m の球形飛翔体からは、500 mA の電子ビームを放出した場合約 6 kV に帯電するはずなのに、1969 年に行われた Hess の実験[5]では、8.7 kV の加速電圧で 500 mA の電子ビームを放出するのに成功している。この程度の電流が殆んどエネルギーを失うことなく実際に放出されたことは、それによる Aurora ray の観測結果から支持されている。即ち現実には、宇宙空間で電子ビームを放出した場合、通常のシングルプローブ理論が予測する以上の電子電流が飛翔体に供給されていることになる。

この重要な矛盾は、電子ビームによる人工オーロラの生成、電子エコー現象[6]の実証

といった華かな科学成果にかくれて深く考察されることがなかったが、1978年 Bernstein [7]等によって行われた大型スペースチェンバー(25m $\times$ 18m $\phi$ )での電子ビーム放出実験での、Beam Plasma Discharge のデモンストレーションにより、上記の矛盾が解決されるという考え方が有力になってきた。この現象は、真空度  $10^{-5}$  Torr 程度のガス中に電子ビームを放出すると、電離によってビーム周辺にプラズマが生成され、そのプラズマと電子ビームにより二流体不安定性が励起され、その波動によって RF 放電がひきおこされるというものである。若しこの現象が宇宙空間でも励起されれば、飛翔体周辺に大量のプラズマが生成されることになり、宇宙空間プラズマパラメータから予測される以上の電子電流が飛翔体へ供給されうることになる。

しかしながら、Beam Plasma Discharge が実際に宇宙空間で帯電体周辺で励起されるかについては疑問があり [8]、また、実験的にも証明されていない。

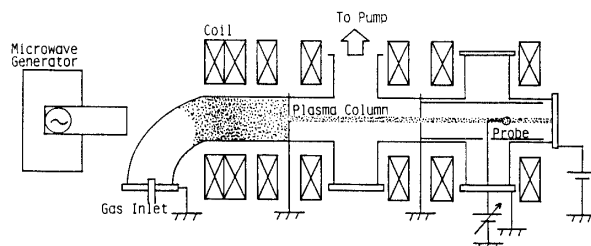
我々は、飛翔体の帯電を予想以下におさえている飛翔体周辺の高密度プラズマ生成の原因は、ビームそのものにあるのではなく、むしろ帯電現象に起因するのではないかという考えのもとに、その実験的検証を試みた。

地球磁場の存在する地球周辺宇宙空間(電離層)においては、通常の飛翔体のスケールでは電子の運動は、磁場の影響を強く受ける。このような状況下にある帯電体の周辺では、電子は  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  のドリフト運動を行い、その運動に起因する電離現象が、飛翔体周辺に大量のプラズマを作る可能性がある。磁場に垂直方向の電子のドリフト運動と磁場に平行方向の電場による運動は、飛翔体周辺に電子をトラップすることになり、バックグラウンドに存在する中性ガス量が少ないにも拘らず( $\sim 10^{-7}$  Torr)、飛翔体周辺での高い確率での電離が可能となる (Rotating Electrons Discharge Model) [9]。

このような現象が実際に発生するかを調べるため、磁化プラズマコラムと近接する球プローブに正電位の高電圧を印加して、プローブ周辺のプラズマ状態の光学的観測、プローブの電圧・電流特性の測定を行った。第2章に実験装置の詳細、第3章に主な実験結果及びその解釈を示す。第4章では本実験結果の宇宙空間電子ビーム放出実験への応用を述べる。

## 2. 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縦磁場(0~1000 Gauss)を印加することができる。



第1図 実験装置. プラズマは、電子サイクロトロン共鳴加熱で定常的に作り、コラム状にして実験領域に導入する。

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て、電子サイクロトロン共鳴加熱によってプラズマを生成する。共鳴磁場強度は約 900 Gauss で、本実験装置で生成されるプラズマのパラメータは、ソース領域で、

$$\begin{aligned} T_e &\sim 10 \text{ eV} \\ T_i &\sim 0.2 \text{ eV} \\ n_e &\sim 10^8 \sim 10^9 \text{ 1/cc (真空度 } 10^{-4} \text{ Torr)} \end{aligned}$$

である。

He ガスをプラズマ発生領域に導入し、ポンプ領域との間にしきり板(穴径 5 $\phi$ )を入れることによって実験領域が高真空度の場合にも安定したプラズマ生成ができるようにした。

プローブ実験領域は、接地された導体シェルで 4 インチガラス管内部をおおい、上流にはしきり板(穴径 10 $\phi$ )をおいてプラズマコラムを形成した。しきり板の通し穴位置は、管軸から約 20 mm 上に設定した。プローブは 20 mm $\phi$  のステンレス球を用い、ほぼ管軸上に位置させ、プラズマコラムがプローブに直接当たらぬ様配置させた。本実験で一様プラズマを用いず、プローブと直接接触しないプラズマコラムを用いた理由は、第 3, 4 章で示すようにプローブ周辺での回転電子群の存在を明らかにするために都合のよい配置だからである。実験領域へのプラズマフロー量は右側フランジに +10 V を印加して測定した。実験領域でのプラズマと電離層のプラズマパラメータの比較を第 1 表に示す。各スケールは、となり、中性ガス密度のスケール及び、磁場強度のスケールは、電離層で

	実験領域	電離層
$l/L$	$6.7 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$
$r_{ie}/l$	$4 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$
$\lambda_D/l$	$8 \times 10^{-1}$	$7.7 \times 10^{-5}$

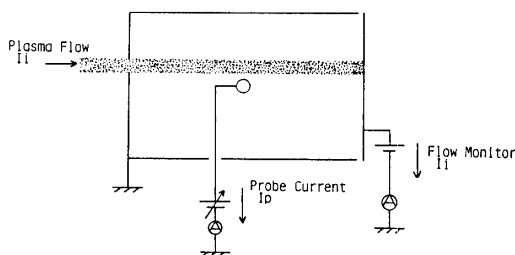
の電子ビーム放出実験を模擬していると考えてよい。

第 2 図に実験原理の説明図を示す。実験領域に導入されたプラズマ量はコレクターによ

	実験領域	電離層
$n_e$ 電子密度	$10^6 \text{ cc}^{-1}$	$10^6 \sim 10^5 \text{ cc}^{-1}$
$T_e$ 電子温度	$\sim 5 \text{ eV}$	0.1 eV
$n_n$ 中性ガス密度	$3.5 \times 10^{12} \text{ cc}^{-1}$	$10^9 \text{ cc}^{-1}$
B 磁場強度	10~760 Gauss	0.3 Gauss
L 平均自由行程	30 m	$10^5 \text{ m}$
$\lambda_D$ デバイ長	1.6 cm	2.3 mm
$l$ スケール	2 cm	30 m

第 1 表 本実験と電離層のプラズマの代表的パラメータの比較表。スケールは、実験に用いたプローブ径とスペースシャトル寸法を比較した。

って正確に測定される。プローブに正電圧を印加するとイオンはおいかえされて、実験領域には電子のみが流入することになるが、原理的に電子の流入量はプローブ電圧によって大きくはかわらない。実験領域への流入量で規格化したプローブ電流が1を越えたときには、この実験領域でプラズマが新たに生成されたことを意味することになる。



第2図 実験原理図。プラズマコラム(5 mm $\phi$ )と球プローブ(20 mm $\phi$ )は約20 mm 離し、直接プラズマがプローブにあたらぬように測定した。

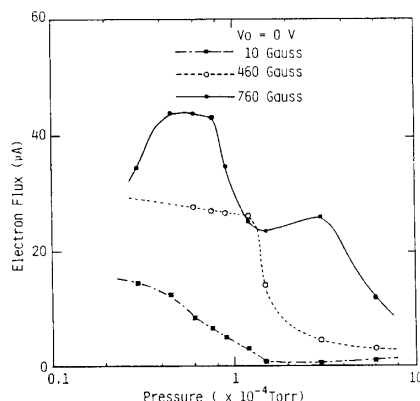
### 3. 実験結果

実験領域へのプラズマ流入フラックス量は、実験パラメータ（真空度、磁場強度、マイクロ波パワー）に複雑に依存する。第3図に磁場強度10, 460, 760 Gaussでの各真空度に対する流入量の変化を示した。これは、プラズマ生成条件の違いと実験領域に到達する迄の中性ガスとの衝突頻度等の要因によるものと考えられる。異なるパラメータでのプローブ電流の絶対値を比較する場合には、プローブ電流を入力フラックス量で規格化した値(Gain)を用いることによって初期条件の差を減殺した。

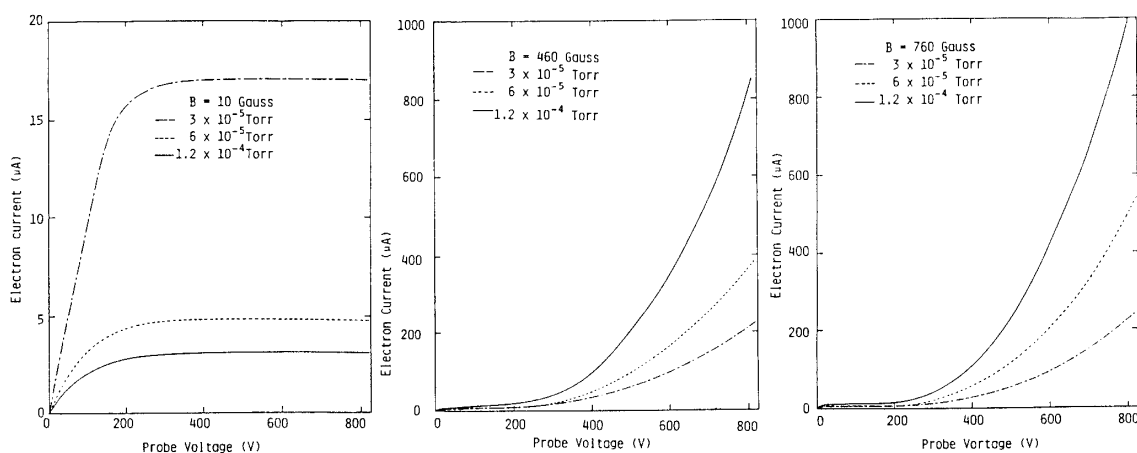
#### 3-1 プローブ電圧・電流特性

各真空度 ( $3 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4}$  Torr), 各磁場強度 (10~760 Gauss) でのプローブ電圧・電流特性を第4図に示す。図から明らかなように、磁場強度が小さいときには(10 Gauss), 200 V 付近で電流が飽和しているのに対し、磁場強度が大きいときには200 V 付近から急速に電流が増加し、きわだった違いがある。

電流値を入力フラックスで規格化した値(Gain)で比較することにより(第5図)、磁場の強弱によるプローブ電流の様子の違いがはっきりとわかる。即ち磁場が弱い場合には、電圧を上げていくと、実験領域に入ったフラックスが全てプローブに流れ込む(Gain $\sim$ 1)にすぎないが、磁場が強い場合には明らかに入力フラックス以上の電流がプローブへ流れ込んでおり(Gain $\gg$ 1), しかも電圧が高い場合には電圧増加に対し、電流が指数関数的に増加している。このことは、磁場が強い場合には、実験領域内に極めて強力なプラズマ生成メカニズムが存在していることを示している。実験領域の長さは約30 cm なのに対し、電離の平均自由行程は、真空度  $10^{-4}$  Torr の場合でも電離断面積を  $10^{-16}$  cm $^2$  として約30 m なので、実験領域に入ってきた電子が、プローブ電圧によって加速され、電離によって新たにプラズマを生成したとしてもその増加分は1%弱であり、とうてい本実験のような



第3図 コレクターで測定した電子電流フラックスの真空度依存性。



第4図 プローブ電圧・電流特性。(a)10 Gauss, (b)460 Gauss, (c)760 Gauss. 10 Gauss のときは、約200 V で電流が飽和するのに対し、磁場強度が強いときは、指数関数的に増加する。

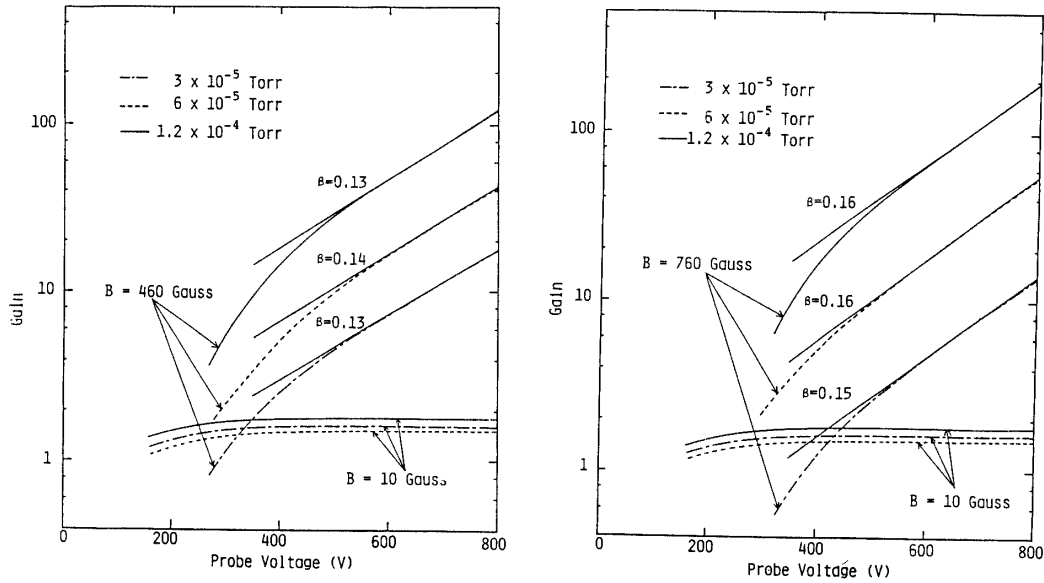
Gain (最大200倍) を説明することはできない。

### 3-2 プローブ電流の磁場依存性

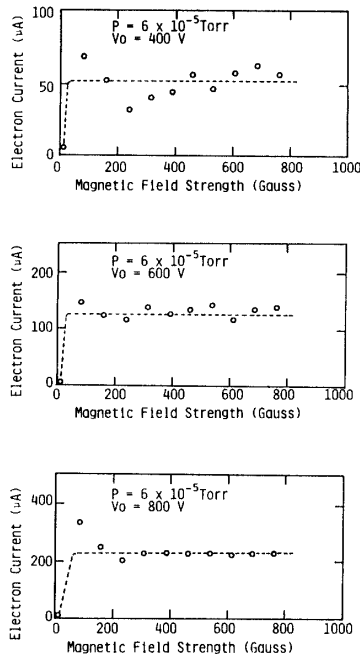
前節で示した様に、プローブ電流の異常な増幅現象には強い磁場の存在が、本質的な役割を果たしている。このことを詳細に調べるため、プローブ電圧を固定し(400, 600, 800 V)、そのプローブ電流の磁場依存性を測定した(第6図)。どの場合でも磁場強度が数十 Gauss を越えると急速に電流が増加し、しかも、それ以上の磁場強度では、特に顕著な依存性はないことがわかる。電流増幅のおきはじめの磁場強度のしきい値を各電圧について詳細に測定すると、第7図の様な結果が得られる。これにより、電圧が高い程磁場強度のしきい値は大きくなることがわかる。

### 3-3 プローブ電流の真空度依存性

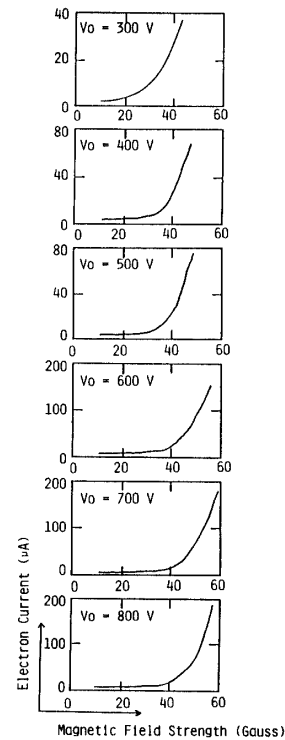
実験領域内での真空度に対するプローブ電流依存性を第8図に示す。パラメータは、(a)はプローブ電圧200 V, (b)は400 V, (c)は600 Vでのプローブ電流を磁場強度460, 760



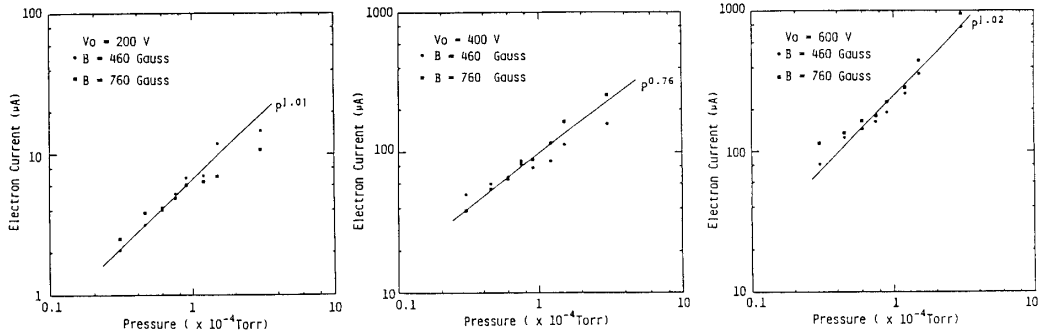
第5図 プローブ電流を実験領域への流入電子量で規格化した量 (Gain) のプローブ電圧依存性. (a)460 Gauss, (b)760 Gauss. 比較のため磁場10 GaussのGainをそれぞれに示した.  $Gain \propto 2^{\beta \frac{V}{P}}$  としたときの  $\beta$  の値を図中に示している.



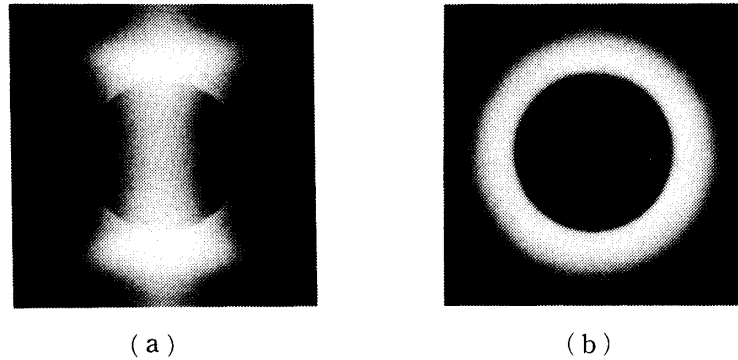
第6図 プローブ電流の磁場強度依存性. 磁場の弱いときは電流増幅がおきないのに対し, 磁場が100 Gaussを越えると電流増幅がみられる. また, 磁場が100 Gaussを越えると電流は磁場に強くは依存しない.



第7図 電流増幅が発生するための磁場強度のしきい値. 電圧が大きくなるにつれしきい値も増加する.



第8図 プローブ電流の真空度依存性.  $V_0=200, 400, 600$  V, 磁場強度 460, 760 Gauss. 電流は, 真空度に対しほぼリニアに比例する.



第9図 プローブ周囲の写真観測例.  
(プローブ電圧 600 V, 磁場強度 460 Gauss, 真空度  $6 \times 10^{-5}$  Torr) (a) 磁場に対して垂直方向からの観測. (b) 磁場に対して平行方向からの観測. 明るく輝いている所でプラズマが大量に作られていると考えられる.

Gauss について測定したものである. (a), (b), (c)ともにプローブ電流は真空度に対してほぼリニアに依存して増加し, 傾きはそれぞれ(a)で1.01, (b)で0.76, (c)で1.02である.

### 3-4 光学観測結果

このような電子増幅現象が発生したとき, プローブ周辺がどのような状態になっているかを, カメラの長時間露出によって観測した(第9図). (a)は, 磁場に垂直方向からの写真で, (b)は磁場に平行方向からの写真である(プローブ電圧 600 V, 磁場強度 460 Gauss, 真空度  $6 \times 10^{-5}$  Torr). これによると, プラズマコラムと球プローブは約 10 mm 離れているにもかかわらず, プローブ周囲に磁場と平行な明るい部分は, その場所での高エネルギー電子の存在とプラズマ生成を示唆しており, この領域で, 3-1~3に示した電子増幅が強く行われていると考えてよい. プラズマコラム(電子コラム)とプローブとが直接放電した場合には, コラムとプローブとを結ぶ直線上の放電跡が観測されるはずであり, 第9図



の均一な明るさの円環の存在は、このような直接放電はおきていないことを示している。

### 3-5 電子増幅のメカニズムの検討

実験結果をまとめてみると、

1. 磁場強度が数十 Gauss 以上の時大きな電子増幅現象がおきる。
2. このプローブ電流の増幅現象は、プローブ電圧に対しては指数関数的に依存する。磁場に対しては、増幅が生じるためのしきい値が存在し、このしきい値は電圧とともに大きくなる。また、真空度に対しては、ほぼリニアに依存する。
3. このようなプローブ電流増幅現象が生じている場所は、プローブ周辺の磁場に平行な軸を持つ円環領域と考えられる。

ここで、本実験で見られたような電流増幅現象がどのようなメカニズムで発生するかを検討してみる。

実験領域に流入した電子は、プローブによる電場で加速され後方のフランジに到達するが、一部の電子はその途中で中性ガスと衝突し、ある確率で電離を引きおこし実験領域に2次的な電子を発生させる。実験領域に流入してくる電子フラックス量を  $I_i$  [ケ/sec] とすると、フランジに到達するまでに2次的に生成する電子数  $I_s$  [ケ/sec] は、

$$I_s = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I_i(Z) n_n \sigma(V) dZ$$

である。ここで、

$n_n$  : 中性ガス密度

$\sigma(V)$  : 電離断面積

$L$  : 実験領域内の電子行程

これら2次的に生じた電子及び、電離に関与してエネルギーを失った電子の運動を考察すると、

#### 1. 磁力線に垂直方向の運動

電子は磁場 ( $\mathbf{B}$ ) と電場 ( $\mathbf{E}$ ) の影響の下で第10図右図に示すような  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  旋回ドリフト運動を開始する。その旋回中心の速度は、

$$V_\theta = -\frac{eBr}{2m} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{eBr}{m}\right)^2 + \frac{4reE}{m}}$$

ここで、 $m$  : 電子質量

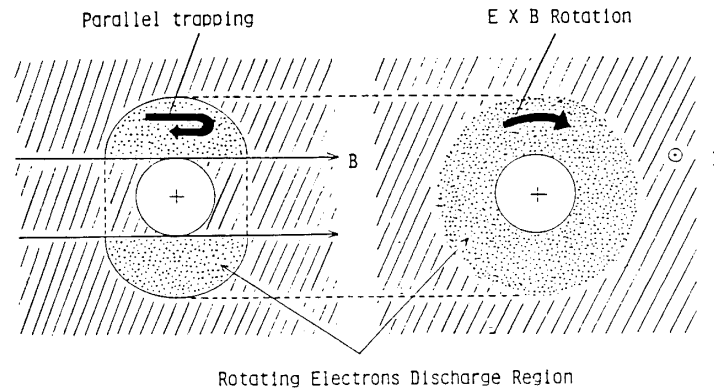
$r$  : 回転半径

$e$  : 電子電荷量

$B$  : 磁場強度

$E$  : 電場強度

となり、この式は  $r > \frac{4mE}{eB^2}$  のときはよく知られたドリフトの式  $V_\theta \sim \frac{E}{B}$  に帰着する。即ち、電子の旋回中心は一定の回転半径で一定の速度でプローブの回りを回転し続けるこ



第10図 Rotating Electrons Discharge Model での放電領域。

とを示している。

## 2. 磁力線と平行方向の運動

電子はプローブ（正電位）と周囲壁（グラウンド）によって形成されるポテンシャルウェル内で第10図左図に示す様な往復運動をし続ける。これらの電子はエネルギー的に導体壁まで到達することは考えられない。

1及び2のことから、電子はプローブの周囲にトラップされ、ラ旋運動をくり返して最終的には再び中性ガスと衝突することになる。このことは、たとえバックグラウンドの中性ガス密度が小さく、電子と中性ガスとの衝突の平均自由行程が実験領域のスケールよりもはるかに大きい場合でも、プローブ周辺での電子のトラッピング効果のため、プローブ周辺で電離が引き起こされることを意味している。この電離についやされるエネルギーは、正電位プローブによる電場によって与えられ、電子は中性ガスとの衝突によってよりプローブに近い平衡軌道に移っていく。電離によって新たに作られた電子も、同様のトラッピング効果をうけて新たな電離を引き起こす。この行程をくり返しながら電子は増幅され、中性ガス密度が小さい場合でも空間的な電離確率が増加し、いわゆるなだれ電離現象（放電）を引き起こすことができる（Rotating Electrons Discharge Model）。この過程で生じたイオンは、そのラーモア半径が大きいいため、磁場の影響を強く受けず容易に周囲壁に到達する。

以下このモデルの定式化を試みる。

2次的に生成された電子及び、電離に関与してエネルギーを失った電子1ケは、磁場を横切ってプローブに到達するまでに、第11図に示すように最大

$$2^{\beta \frac{V_0 - V_i}{\phi}} \quad (V_0 - V_i \gg \phi)$$

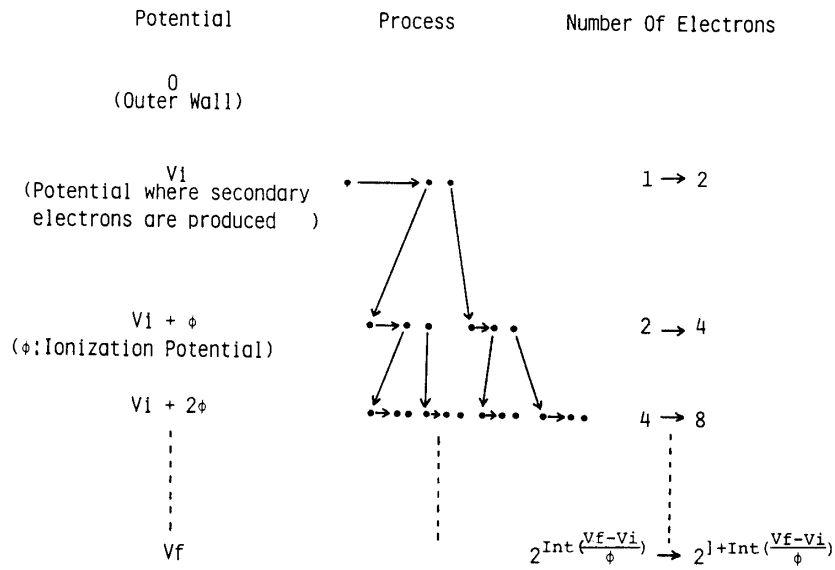
まで増幅されると考えられる。ここで、

$V_0$ ：プローブ電圧

$V_i$ ：2次的電子が生成された場所の空間電位

$\phi$ ：電離ポテンシャル

$\beta$ ：電子のプローブに対して持っているポテンシャルエネルギー（ $V_0 - V_i$ ）の



第 11 図 電流増幅のプロセス説明図.

うち  $\beta (< 1)$  の割合で電離についやされると考える. 残りの  $(1 - \beta)$  は励起, 他  
 の非弾性散乱によるもので, 電圧・ガス密度に強く依存しない確率的なもの  
 と考える.

したがって, この場合のプロープ電流は,

$$I_p = \int_r \int_\theta \int_Z 2i_i(r, \theta, Z) \cdot 2^{\beta \frac{V_0 - V_i(r, \theta, Z)}{\phi}} r dr d\theta dZ$$

$i_i(r, \theta, Z)$ :  $(r, \theta, Z)$  の場所で単位時間, 単位体積当り発生する 2 次電子  
 数

ここで He の電離確率は約 200 V で最大となり, また, 磁場に平行方向のシースのディメ  
 ンションは, 磁場に平行方向には容易に電場が緩和されるため, プロープの大きさ程度で  
 あることを考慮すると, プロープの半径を  $a$  として, 上式は近似的に,

$$I_p = 2n_n\sigma(200) \cdot 2a \cdot 2^{\beta \frac{V_0 - 200}{\phi}} I_{in}$$

と表わすことができる. または, 入力電流で規格化した  $Gain$  は,

$$Gain = \frac{I_p}{I_{in}} \propto n_n 2^{\beta \frac{V_0}{\phi}}$$

となる.

このモデルと実験結果とを比較してみると,

1. このような電子増幅が発生するためには, 流入してきた電子 (1 次電子) が直接プ  
 ロープに入らない様な磁場強度 (しきい値) が必要で, 本モデルで空間電場の形を円  
 筒コンデンサー型と近似すれば, このしきい値は次の表のように計算できる.

プローブ電圧	300 V	400	500	600	700	800
磁場強度	34.1 gauss	39.3	44.0	48.2	52.0	55.6

(プラズマコラムとプローブの距離10mm)

(プラズマコラムとプローブの距離 10 mm)

実験データ第7図と比較すると、モデルから計算されるしきい値は実験データとあまりよい対応はしていないが、これはコラムとプローブの距離が 10 mm 以上離れているためであると考えられる。

2. プローブ電流 *Gain* のパラメータ依存性は、電圧に対して  $\beta=0.1\sim 0.2$  ととることにより、電圧が高い場合  $2^{\beta \frac{V_0}{V}}$  の形になっている (第5図)。各条件下での  $\beta$  の測定値を表にすると、のようになる。全て 0.1~0.2 の間の値となり、大きなばらつきは見ら

真空度 磁場強度	Torr $3 \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$7.5 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$
460 gauss	$\beta = 0.13$	0.11	0.14	0.1	0.13	0.13	0.17
760	0.15	0.13	0.16	0.12	0.14	0.16	0.15

れない。真空度については、第8図に示したように、ほぼニアに依存しておりモデルと一致している。また、このモデルはしきい値以上の磁場強度では、電流の磁場依存性はないことを示唆しているが第6図に示す様に、プローブ電流は、100 Gauss ~800 Gauss の広い範囲にわたってほぼ一定である。

3. プラズマ生成領域は、モデル上第10図に示すような領域と考えられ、写真観測の結果 (第9図) と合致している。

以上示した様に、本実験で得られた電流増幅現象は、Rotating Electrons Discharge モデルで非常によく説明することができる。

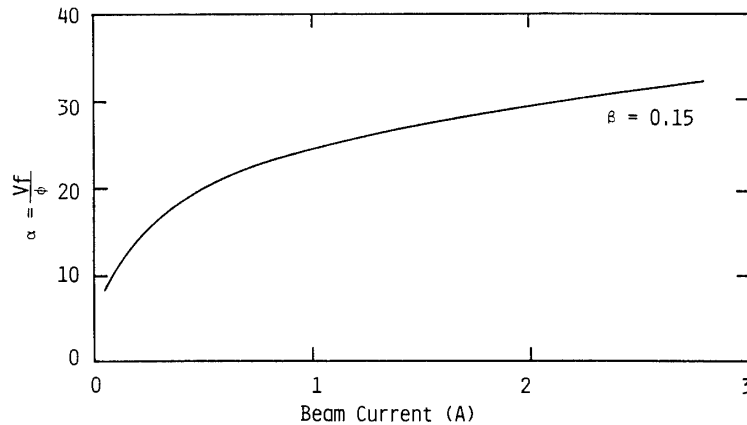
#### 4. 宇宙空間電子ビーム放出実験への応用

第2章で述べた様に、本実験のパラメータは電離層域で行われる飛翔体からの電子ビーム放出実験を Scaling law を通じて模擬しており、本実験で示した様な Rotating Electrons Discharge 現象が、宇宙空間でも発生する可能性がある。

ここで、SEPAC の実験に関連して、高度 250 km のプラズマ環境でオービターから最大 7.5 kV, 1.6 A の電子ビームを放出した場合の帯電を考察する。このプラズマ状態での飽和電子電流は、

$$i_s = \frac{1}{4} n_e e v_e \sim 1 \text{ mA/m}^2$$

である。オービターの大部分は絶縁材でおおわれているため導電表面積が、メインエンジン部約 70 m<sup>2</sup> しかないことを考慮すると、1.6 A ものビームを放出した際には極めて強い帯電が発生することが、従来のプローブ理論から予測される。しかし、本実験で示したよ



第12図  $I_p = 9 \times 10^{-3} \alpha 2^{\beta(\alpha-10)}$  の曲線 ( $\beta = 0.15$  の場合)。

うな Rotating Electrons Discharge が発生すると、オービターの帯電は大幅に緩和される可能性がある。

正電位に帯電している飛翔体周辺で放電が発生した場合、磁場に垂直方向の電場のスケールは、帯電電圧分のエネルギーを持ったイオンのラーモア半径程度と考えると、シース領域に宇宙空間プラズマから供給される電子電流は、シースの半径を  $r_s$  として

$$I_{in} \sim 2\pi r_s^2 i_s \quad \left( r_s \sim \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m_i V_F}{e}} \right)$$

これらの電子が2次電子を生じて電子増幅が行われるとすると、3-5で示した式より、

$$I_p = 16\pi a n_n \sigma \frac{m_i V_F}{B^2 e} 2^{\beta} \frac{V_F - 200}{\phi} i_s$$

となる。 $i_s = 1$  mA,  $B = 0.3$  Gauss,  $\phi \sim 20$  V,  $2a \sim 10$  m,  $n_n \sim 10^9$  1/cc として、

$$I_p \sim 9 \times 10^{-3} \alpha 2^{\beta(\alpha-10)}$$

$$\alpha = V_F / \phi$$

の関係式が得られる。

したがって、本実験で得られた  $\beta$  の値 0.15 を仮定した場合、上記関数形は第12図に示す曲線となる。従ってこのモデルでは、1.6 A のビームをスペースシャトルオービターから放出してもオービターの帯電電圧は高々600 V にしかならないことがわかる。ちなみに、スペースシャトル OSS 1 で行われたユタ大学の電子ビーム放出実験では 1 kV, 100 mA のビーム放出が行われ、帯電電圧は約 100 V 程度であったと言われているが、上記モデルでも 200 V 以下程度と計算される。このような強力な帯電中和現象が実際に宇宙空間で発生するか否かは、本年9月に予定されている Spacelab 1 号機 SEPAC 計画での大出力電子ビーム放出実験で明らかにされるであろう。

## 5. 結 論

宇宙空間で飛翔体から電子ビームを放出した場合の帯電現象は、従来のプラズマ中プローブ特性から予測されるものよりもかなり低いことが、過去のロケット実験の結果から指摘されていた。本研究では、高電圧プローブ周囲に発生する放電現象を実験的に確認し、そのメカニズムがプローブ周囲にトラップされる高エネルギー電子群に起因するというひとつの理論モデル (Rotating Electrons Discharge) を設定して検証した。

本実験で確められた高電圧帯電体周辺の放電現象は、宇宙空間における飛翔体からの電子ビーム放出に伴う帯電現象にも適用でき、帯電体周囲に励起される放電現象により、電子ビームを放出している飛翔体の帯電が大幅に緩和されることが確認できた。

この報告で提案した Rotating Electrons Discharge モデルは、木星磁気圏の中で強い帯電をしていることが確認されている IO 衛星周辺のプラズマ諸現象とも密接な関係があると考えられ、次の研究提案として実験準備を進めている。

本研究は、武蔵工業大学堤井研究室と宇宙科学研究所との共同研究として行われたものである。

## Reference

- [ 1 ] Obayashi, T., Space Experiments with Particle Accelerators: SEPAC-SEPAC Program for First Spacelab Mission-Rep. Ionos. Space Res. Japan, 2, 159 (1978)
- [ 2 ] Beard, D.B. and F.S. Johnson, Ionospheric Limitations on Attainable Satellite Potential, J. Geophys. Res., 72, 4113-4122 (1961)
- [ 3 ] Parker, L.W. and B.L. Murphy, Potential Build up on an Electron-Emitting Ionospheric Satellite, J. Geophys. Res., 72, 1631-1636 (1967)
- [ 4 ] Linson, L.M., Current-Voltage Characteristics of an Electron-Emitting Satellite in the Ionosphere, J. Geophys. Res., 74, 2368-2375 (1969)
- [ 5 ] Hess, W.H., M.C. Trichel, T.N. Davis, W.C. Beggs, G.E. Kraft, E. Stassinopoulos, and E.J.R. Maier, Artificial Aurora Experiment: Experiment and Principal Results, J. Geophys. Res., 76, 6067-6081 (1971)
- [ 6 ] Winckler, J.R., R.L. Arnoldy, and R.A. Hendrickson, Echo II: A study of Electron beams injected into the high latitude ionosphere from a large sounding rocket, J. Geophys. Res., 80, 2316 (1975)
- [ 7 ] Bernstein, W., H. Leinbach, P.J. Kellogg, S.J. Monson, and T. Hallinan, Further laboratory measurements of the beam plasma discharge, J. Geophys. Res., 84, 727-7278 (1979)
- [ 8 ] Sasaki, S., K. Takahashi and N. Kawashima, Beam Plasma Discharge in Space Experiment with a High Power Electron Beam, ISAS Res. Note RN. 190 (1982)
- [ 9 ] Sasaki, S., Y. Yagi, A. Yamori and N. Kawashima, Charging Model of a Spacecraft Emitting an Electron Beam in Space