

宇宙空間での電子ビーム放射にともなう飛翔体の帯電と放電現象

佐々木 進 田沢 仁志 長井 孝 河島 信樹 堤井 信力
(宇宙科学研) (武蔵工大) (宇宙科学研) (武蔵工大)

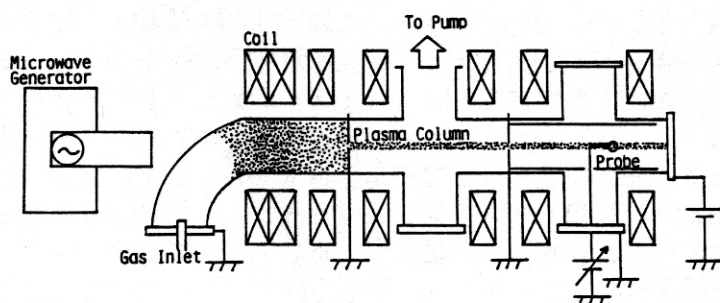
§1. 序論

宇宙空間での飛翔体を用いた電子ビーム放射実験は、1969年 Hess 等 [1] が開始して以来、人工オーロラの生成によるオーロラメカニズムの研究、電子エコーによる宇宙空間電場、磁場の遠隔探査、壁のない空間での波動・粒子相互作用の研究といった目的で、盛んに行われるようになった。これらの実験で従来から問題になっているのは、電子ビーム放出にともなう飛翔体の帯電現象である。通常の飛翔体のスケールでは、無限遠に対する真空中の静電容量は、1000 pF 程度なので、真空中では 100 mA の電子ビームを放出すれば、0.1 m sec で 10 KV 迄帯電する。実際には、宇宙空間には希薄プラズマが存在するので、この状況は緩和されるが、宇宙空間プラズマからの飽和電子電流は 1 mA/m^2 にすぎず、100 m^2 以上の導電表面を持たない限り、100 mA 以上の電子ビームを強い帯電なく放出することは不可能と予測される。ところが過去のロケット実験の結果を見ると、現実には、帯電は、上述の予測よりはるかに小さいことが判明している。このことは、ビーム放射にともなって、飛翔体周辺に大量のプラズマが生成され、それによって帯電が緩和されていることを意味している。電子ビーム放射にともなう大量のプラズマ発生メカニズムとしては、Beam Plasma Discharge (BPD) が従来から提案されている。これは、ビームプラズマ相互作用によって励起した波動が、RF 放電をひきおこすというメカニズムで、実験室レベルでは、既に 1963 年に、Getty [2] 等によって研究されており、現在ではプラズマ生成のいひとつの方法としても確立している。1978 年に、Bernstein 等 [3] が、NASA、JSC の大型スペースシャープを使用し、宇宙空間での電子ビーム放射実験を模擬し、実際に BPD を観測してからは、宇宙空間での電子ビーム放射実験においても BPD は容易に発生し、それが帯電現象を抑圧するメカニズムであると実験家達は考えるようになっていた。しかしながら、宇宙空間での飛翔体からの電子ビーム放射実験では、閉じた壁がなく加熱電子のトラップングが行われないこと、飛翔体が正電位に帯電し加熱電子を吸収すること、飛翔体カイオ：熱速度以上の速度で飛翔するため一本の磁力管へのビーム入射時間が短いこと等が、実験室実験の場合と異っており、宇宙空間では BPD が発生しづらいと我々は考えている [4]。ビーム放射中の飛翔体周辺にプラズマが発生するもうひとつのメカニズムとして、帯電にともなう電子群のトラップング効果による放電現象を考えることができる [5]。地球磁場の存在する地球周

辺宇宙空間においては、通常の飛翔体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正電位帯電体の周辺では、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かかわらず、($\sim 10^{-6}$ 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)。本研究では、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接続するフローアに正電位の高電圧を印加して、フローア周辺のプラズマ状態の光学的観測、フローアの電圧・電流特性の測定を行った。§2 に実験装置の説明、§3 に実験結果とその解釈を示す。§4 では、昨年11~12月に飛翔したスペースシャトル9号機で行われた電子ビーム放射実験 (SE PAC) への本実験結果の応用を述べる。

§2. 実験装置

実験装置は、オ1図に示すようにプラズマ発生領域 (左側) とフローア実験領域 (右側) 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。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振加熱によってプラズマを生成する。共振磁場強度は、約100 Gauss である。本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 $10^9 \sim 10^{10}/\text{cc}$ 、電子温度10 eV 程度である。Heガスをプラズマ発生領域に導入し、ポンプ領域 (中央) との間にしきり板 (穴径5φ) を入れることによって実験領域が高真空の場合にも安定したプラズマ生成ができるようにした。フローア実験領域は接地した導体シェルのガラス管内部をふくみ、上流にはしきり板 (穴径10φ) をあいてプラズマコラムを形成した。しきり板の穴位置は、管軸から20



オ1図 実験装置

mm ずれた所に設定した。フローブは、20mm ϕ のステンレス球を用い、ほぼ管軸上に位置させ、プラスマコラムがフローブに直接当たらぬ様配置させた。本実験で同様プラスマを用いるフローブと直接接触しないプラスマコラムを用いた理由は、あとで示すように、フ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。実験領域へのプラスマ流入量は、右端フランジに+10Vを印加し、その電流測定によってモニターした。実験領域でのプラスマと電離層のプラスマパラメーターの比較をオ1表に示す。

	実験領域	電 離 層
n_e 電子密度	10^6 cc^{-1}	$10^6 \sim 10^8 \text{ cc}^{-1}$
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 cc^{-1}
B 磁 場 強 度	10~760 Gauss	0.3 Gauss
L 平均自由行程	30 m	10^5 m
λ_D デバイ長	1.6 cm	2.3 mm
ℓ スケール	2 cm	30 m

オ1表 本実験と電離層のプラスマの代表的パラメーターの比較。スケールは実験に用いたフローブ径とスペースシールド寸法を比較した。

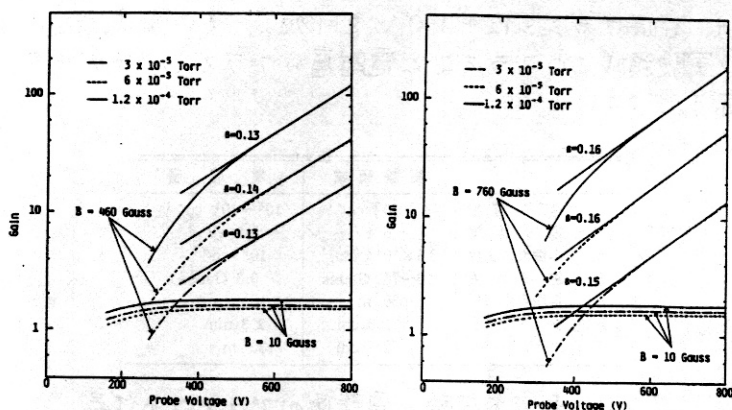
§3 実験結果とその解釈

実験領域へのプラスマ流入フラックス量は、実験パラメーター（真空度、磁場強度、マイクロ波パワー）に複雑に依存する。これはプラスマ生成条件の違いと実験領域へ到達する迄の中性ガスとの衝突頻度によるものと考えられる。異なるパラメーターでのフローブ電流の絶対値を比較する場合にはフローブ電流を入力フラックス量で規格化した値（Gain）を用いることにより初期条件の差を減殺した。

3-1. フローブ電圧・電流特性

各真空度（ $3 \times 10^{-5} \text{ Torr} \sim 1.2 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ ）、各磁場強度（10, 460, 760 Gauss）でのフローブ電圧・電流特性をオ2図に示す。図から明らかなように、磁場強度が小さい時には（10 Gauss）、200V付近で電流が飽和しているのに対し、磁場強度が大きき時には200V付近から急速に電流が増加し、きわだった違いがある。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フローブに流れ込む（Gain ~ 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フ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スマ生成メカニズムが存在す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 フロー電圧によって加速され、電離によって新たなプラズマを生成したとしても その増加分は 1% 程度であり、とうてい本実験のような Gain (最大 200) を説明することはできない。



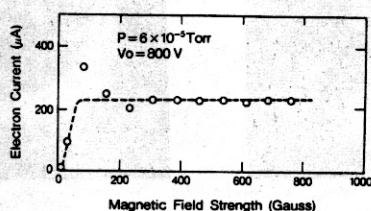
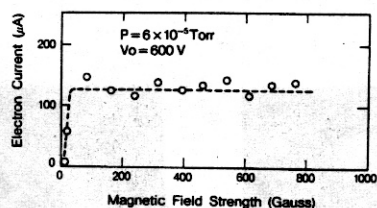
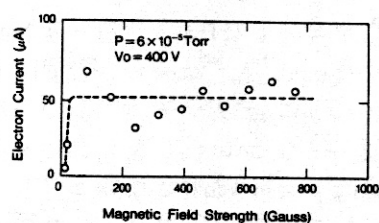
オ2図. フロー電流を実験領域への流入電子電流量で規格化した量 (Gain) のフロー電圧依存性 (磁場強度 10, 460, 760 Gauss). 図中 β は $\text{Gain} \propto 2^{\beta \sqrt{\phi}}$ (ϕ : 電離ポテンシャル) と表わした時の値

3-2 フロー電流の磁場強度依存性

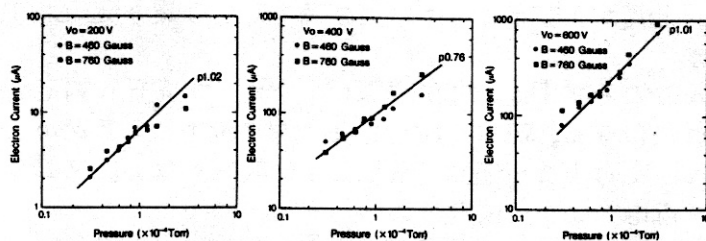
上で示したように、フロー電流の増大現象には、強い磁場の存在が本質的な役割を果たしている。このことを詳細に調べるため フロー電圧を固定し (400, 600, 800 V)、フロー電流の磁場依存性を測定した (オ3図)。どの場合でも磁場強度が 数十 Gauss を越えると急速に電流が増加し、しかもそれ以上の磁場強度では 特に顕著な依存性はないことがわかる。電流増大のめきはじめの磁場強度は、電圧が高い程大きいことも測定された。

3-3 フロー電流の真空度依存性

実験領域内での真空度に対するフロー電流依存性を オ4図に示す。パラメータは フロー電圧 200, 400, 600 V, 磁場強度 460, 760 Gauss である。(1) ずれの場合も フロー電流は真空度に対し ほぼリニアに依存して増加する。



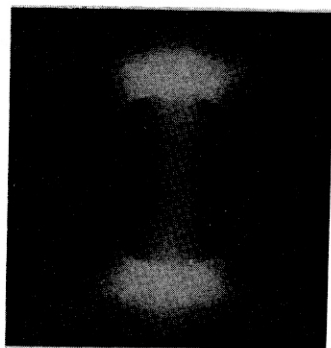
オ3図. フロード電流の磁場強度依存性. 磁場の弱い時は電流増巾があきないのに対し. 磁場が数十 Gauss を越えると電流増巾がみられる. 又磁場が 100 Gauss を越えると電流は磁場には強く依存しない.



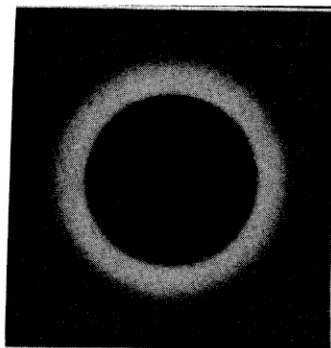
オ4図. フロード電流の真空度依存性. フロード電圧 200, 400, 600 V の場合. それぞれ真空度の 1.02, 0.76, 1.01 乗に比例する.

3-4. 光学観測結果

このような電子増中現象が発生した時 フローブ周辺がどのような状態になっているかを カメラの長時間露光によって観測した(オ5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(フローブ電圧600V, 磁場強度460 Gauss, 真空度 6×10^{-5} Torr). フローブ周囲に存在する明るい部分は、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 前述の電流増中は この部分で行われていると考えてよい。



(a)



(b)

オ5図. フローブ周囲の写真観測.

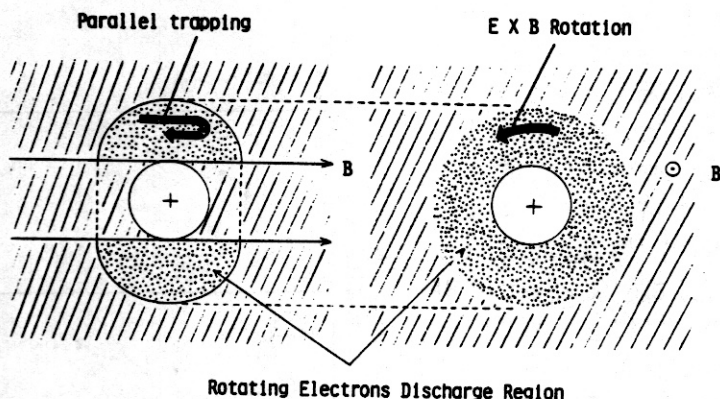
3-5. 電子電流増中のメカニズムの検討

以上の 実験結果をまとめると

1. 磁場強度が、数+ Gauss 以上の時、大きな電子電流増中現象が発生する。
2. このフローブ電流の増中現象は フ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 増中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小さくなる。又真空度に対しては、ほぼ1ニアに依存する
3. このようなフローブ電流増中現象が生じている場所は、フローブ周囲の磁場に平行な軸を持つ円環領域と考えられる。

ここで 本実験で観測された電子電流増中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、フローブによる電場で加速され、後方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、ある確率で電離をひきおこし実験領域に2次的な電子を発生させる。これら2次的に発生した電子及び電離に関与してエネルギーを失った

電子は、磁力線に垂直方向には、磁場と電場の影響の下で、オム図右図に示すような旋回ドリフト運動をする。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まわりを回転しつづける。一方磁力線と平行方向には、これら電子は、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、オム図左図に示すような往復運動を続ける。



オム図. 磁化プラズマ中の正電位帯電体周囲にある電子の運動

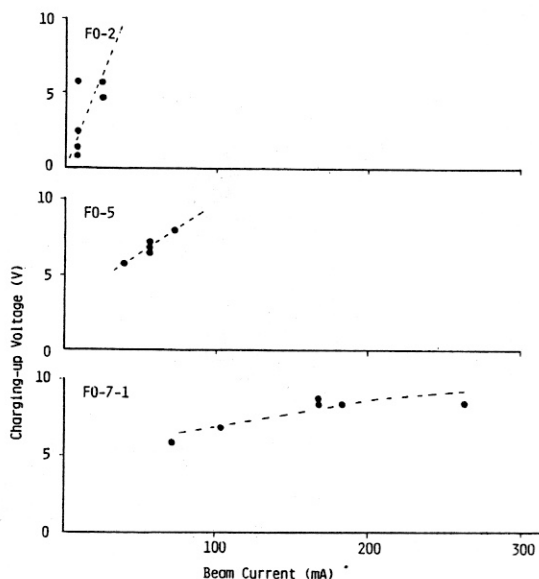
これら電子は、プローブと周囲壁との間にトラップされ、旋回運動をくり返して最終的には、再び中性ガスと衝突することになる。このことは、たとえばバッファグラウンドの中性ガス密度が小さく、電子と中性ガスとの衝突の平均自由行程が実験領域のスケールよりもはるかに大きい場合でも、プローブ周辺での電子のトラッピング効果のため、プローブ周辺で電離がみきおこされることを意味している。この電離に費されるエネルギーは、正電位プローブによる電場によって与えられ、電子は、中性ガスとの衝突によって、よりプローブに近い平衡軌道に移っていく。電離によって新たに作られた電子も、同様のトラッピング効果をうけて新たな電離をみきおこす。このプロセスを繰り返しながら電子電流は増中され、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）をみきおこすことができる（Rotating Electrons Discharge モデル）。この過程で生じたイオンは、そのラーモア半径が大きいため、磁場の影響を強く受けず、容易に周囲壁に到達する。

§4 SEPAC 実験への応用

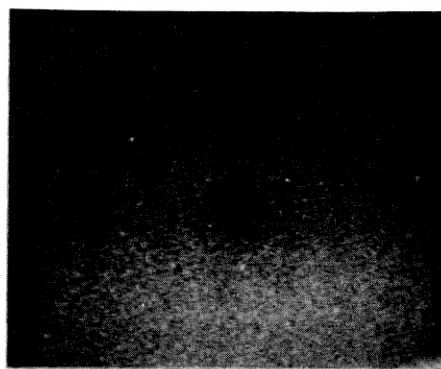
SEPAC 実験は、1983 年 11 月末に打ち上げられたスペースラブ 1 号機（STS 9 号機）で、日米共同実験として実施された〔6〕。電子ビ-

装置の最大出力は 5KV 300 mAであり、計測器としては、低照度TVカメラ、電子エネルギー分析器、ラングミュアプローブ、フローティングプローブ、波動受信機、フォトメーターが搭載された。オービターが帯電すると、ラングミュアプローブの信号が正側にシフトするが、このシフト量から逆にオービターの帯電電圧を知ることが出来る。オービターの帯電電圧のビーム電流依存性をいくつかの

実験シーフェンスについて
 オ7図に示す。図よりF0-2
 と呼ばれる実験シーフェンス
 の時、最も帯電が大きかった
 ことがわかる。高電圧帯電時
 の帯電電圧の計測は、電子エ
 ネルギー分析器で行うことに
 していたが、帯電にともなう
instrumental な *effect* が非
 常に大きく、地上テストデー
 タとの比較によって得られた
 予備的結果は、F0-2 の場合
 ビーム電流100mA以上で、キロ
 ボルト以上の帯電が発生した
 と思われる。この時、TVカ
 メラで観測したオービター搭
 載荷台は白く輝き、又中空に
 白い雲状のものが発生したこ
 とが認められた(オ8図)。
 オービターの輝きは、オービ
 ターの帯電が、キロボルト程
 度になったことを示しており
 、白い雲の存在は、放電現象
 が励起されたことを示唆して
 いる。この放電の発生する条
 件を、パービアンズ($E/V^{1/2}$)
 及びビーム電流値でまとめた
 のが、オ9図である。この放
 電が、地上実験でよく見られ
 るBPDに起因するものとする
 れば、パービアンズに対し、
 しきい値を持つはずであるが
 、実験データはむしろビーム



オ7図. SEPAC実験でのオービターの帯電電圧



オ8図. TVカメラで観測したビーム放射中のオービター周辺に現れた“白い雲”

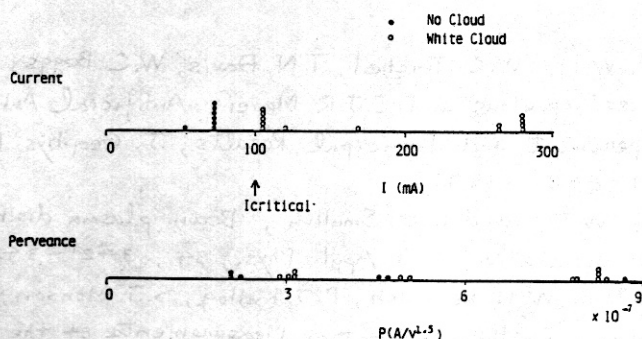


図9. “白い雲”(放電)の発生する条件. 電流に対しては明確なしきい値があるが、パーベンスに対してはない。

電流にしきい値があることを示している。ビーム電流は、帯電電圧に対応するので、この放電は帯電電圧があるレベル(kV)を越えた時、励起されたと見る方が正しそうである。この白い雲はオービター後部、即ち唯一の大きなコンデンサである *main engine* 付近で発生していることが、TVのデータから明らかになっている。SEPA C 実験の行われた高度は、250 km で真空度は、 1×10^{-6} Torr 以下のため、アークあるいはグロー放電の発生した可能性はない。SEPA C 実験のデータは、ぼう太で未だ最終結論は得られていないが、これ迄のデータ解析の結果は、オービターがキロボルト程度迄帯電した時、オービター導電部付近で、REBにもとずく放電現象が励起された可能性がきわめて強いと言える。

3.5 結論

宇宙空間で飛行体から電子ビーム放射を行った場合に引き起こされる放電現象のメカニズムのひとつを実験的に研究した。磁化プラズマ中では、正電位帯電体の周囲にドリフト運動をする電子がトラップされ、それに基づく放電現象が発生しうることを示した。SEPA C 実験で観測された放電と見られる現象も、本実験で示した Rotating Electrons Discharge にもとずく現象である可能性が強い。

参考文献

- [1] Hess. W.H., W.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)
- [2] Getty. W.D., and L.D. Smullin, Beam plasma discharge: Build-up of oscillations, J. Appl. Phys., 34, 3421-3429. (1963)
- [3] Bernstein, W., H. Leinbach, P.J. Kellog, S.J. Monson, and T. Hallinan, Further Laboratory Measurements of the Beam Plasma Discharge, J. Geophys. Res., 84, 7271-7278 (1979)
- [4] 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)
- [5] Sasaki. S., H. Tazawa, N. Kawashima and S. Tei, Rotating Electrons Discharge Model for a Spacecraft Emitting a High Power Electron Beam in Space, to be published (Journal of Geomagnetism and Geoelectricity)
- [6] Obayashi. T., and SEPAC Team, Space Experiments with Particle Accelerators: SEPAC/SPACELAB-1, ISAS Res. Note RN.255 (1984)