

小型電子銃を用いた電子ビームによる帯電実験

萩原通伸・佐々木進・河島信樹

An Experiment on Spacecraft Charging by a Small Electron Gun System

By

Michinobu HAGIWARA, Susumu SAKAI and
Nobuki KAWASHIMA

Abstract: An experiment on spacecraft charging due to an electron beam emission has been performed with a small electron gun system in a large space chamber. It was found that the charging effect is considerably suppressed by the existence of the ambient plasma or neutral gas. Potential control of the spacecraft by the electron beam emission was also studied with this system.

1. 実験目的, 概要

宇宙空間での電子ビーム放出実験は, 人工オーロラの生成, 波動の励起, エレクトロンエコーの研究といった分野で, 近年盛んに行われている. 又1980年には, スペース・シャトルを用いた大出力電子ビーム放出実験 (SEPAC) が予定されている.

宇宙空間で飛翔体から電子ビームを放出すると, その飛翔体は, 周囲のプラズマに対し, 正電位に帯電する. この帯電現象は, 飛翔体自身の安全性に関係しているだけでなく, プラズマ物理的にも興味深いものである.

実験室において, 宇宙空間での飛翔体による電子ビーム放出実験に近い状態を再現するために小型電子銃装置 (最大出力 600 [V], 3.8 [mA]) を製作した. このシステムは, 電子銃だけでなく, その電源, コントロール等を内部に持っており, チェンバー内でチェンバーボディと電気的に絶縁して設置することにより, 宇宙空間での飛翔体による電子ビーム放出実験を模擬することができる. またチェンバー内では, 電子ビームを直流的に放出すると, 壁からのアウト・ガスにより真空度が悪くなる. この電子銃システムは, マイクロ秒オーダーで立ち上がることができるように製作した. このシステムを用いて, 1977年12月宇宙研の大型チェンバーで, 飛翔体シミュレーション実験を行った. 実験は順調に行われ, 帯電の時間的変化の様子, 周囲に存在するプラズマ, 中性ガスが帯電に及ぼす影響等の情報が得られた. 更に応用実験として, 電子ビームによる衛星電位制御のシミュレーションを行った.

衛星が、プラズマ密度のうすい宇宙空間を飛翔する場合、しばしば負電位に帯電し、放電を誘起して、事故をおこすことが報告されている。これは、ひとつには、高エネルギーの電子が衛星に飛び込むためと考えられる。衛星が、負電位に帯電した時、それを中和する方法として、衛星に電子銃装置を付け、電子ビームを放出して中和することが考えられる。これを試験するため、小型電子銃装置に別の電子銃から電子ビームを照射して、負電位に帯電させ、そこで小型電子銃装置から電子ビームを放出して帯電中和することを試みた。

2. 小型電子銃装置

Fig. 1 にシステムの構成図を示した。

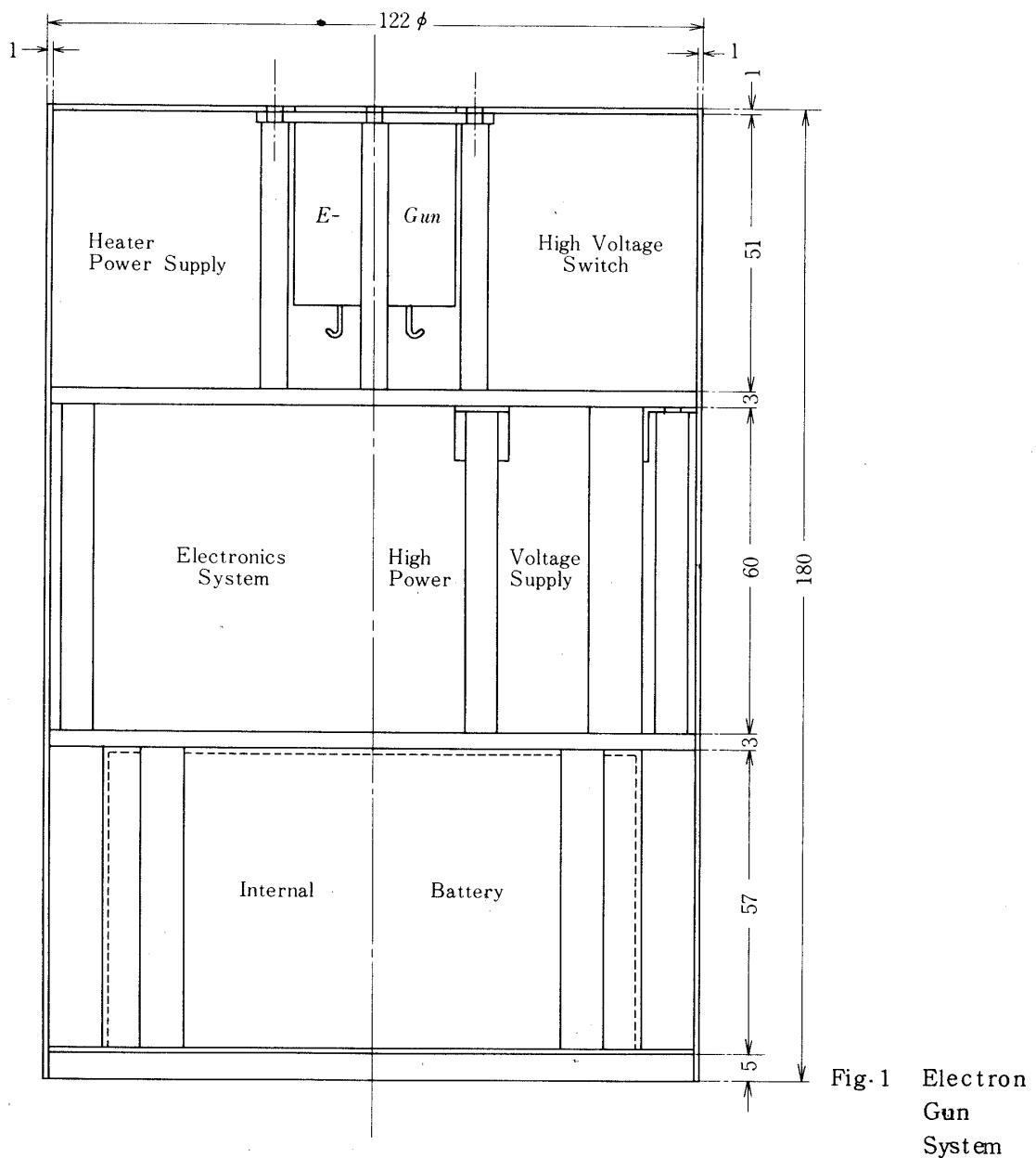


Fig. 1 Electron Gun System

2.1 内部電池

ニッケル・カドミウム蓄電池

450 RS をシリーズに 23 個, 28.75 [V], 450 [mA]

2.2 高圧電源

零から 5 [V] までの入力信号を加えることにより, 零から 1 [kV] までリニヤーに変化する出力が得られるようになっている.

1 次側入力電圧 28 [V] \pm 4 [V]

2 次側出力 1 [kV] 10 [mA]

2.3 エレクトロン・ガン

径 24ϕ [mm] の 4 ピンのハーメチック・シールを土台にしたステンレス製である. ヒーターは, 7.2 [V] 0.55 [A] の豆球を用いた. 電子銃の構造を Fig. 2 に示す.

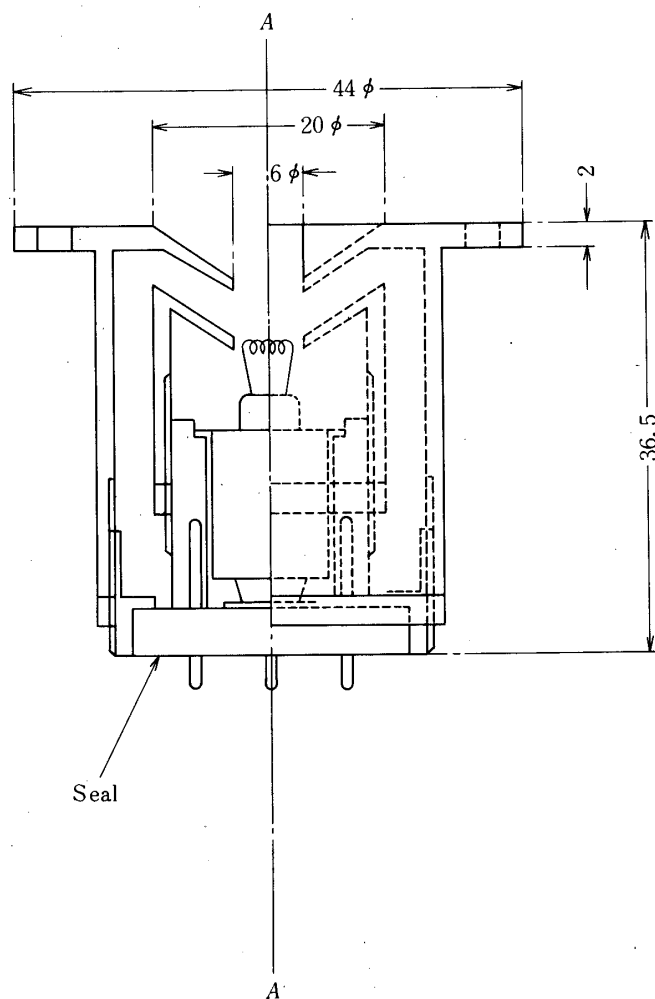


Fig. 2 Electron Gun

2.4 エレクトロニクス

2.4.1 概 要

実験室において、宇宙空間での衛星になるべく近い状態で実験するためには、電子銃システムを測定機器等すべての物と絶縁して実験を行う必要がある。従って、電子銃動作も光学的指令でスタートさせ、あらかじめ内部に設定されたプログラムに従って、ヒーター点火、高圧印加を行い、所定時に電子ビームを放出するようなシステムを作成した。1 サイクル分の動作を行うと、自動停止して、次の指令を待つようになっている。上記は内部 (INT) 動作の場合であるが、外部より種々の制御信号を送ることによって、外部 (EXT) 動作もできるようにしている。外部制御信号としては、スタート信号、EXT ON/OFF、INT/EXT シーケンス設定、ヒーター設定、高圧設定があり電源も外部からとることができる。

2.4.2 構 成

- インターフェース部
 - INT 動作時 レーザ受光
 - EXT 動作時 外部よりの指示受け
- 電 源
 - バッテリー電圧安定化
- コントロール部
 - シーケンス・ロジック
- 高圧コントロール部
 - 高圧電源にシーケンスに従った指令を出す。
- ヒーターコントロール部
 - ヒーター電源にシーケンスに従った指令を出す。
- ヒーター電源
 - 入力 28 [V] DC MAX
 - 出力負荷 4~8 [V] MAX 0.5 [A]
 - 絶縁耐力 1 [kV] 以上

2.4.3 動 作

- INT 動作
 - 内部に設定したシーケンスプログラムを Fig. 3 に示す。
 - ヒーターの電流値、加速電圧、パルス幅は可変である。
 - 受光と同時にヒーター ON となり、ヒーターが安定な状態になるように、ビーム放出は 5 秒待つ。5 秒から 15 秒までの 10 秒間に、加速電圧を 2 秒ごとに、-0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1 [kV] と、5 段階に変化させ、その 2 秒間に 4 回高圧スイッチを ON して、ビーム放出を行う。次に、15 秒時にヒーターパワーを上げて、25 秒まで同様に高圧スイッチを ON にし、25 秒時にさらにヒーターパワーを上げて、35 秒まで同様に行ない、35 秒で自動停止する。
- EXT 動作
 - INT スタート (パルス)

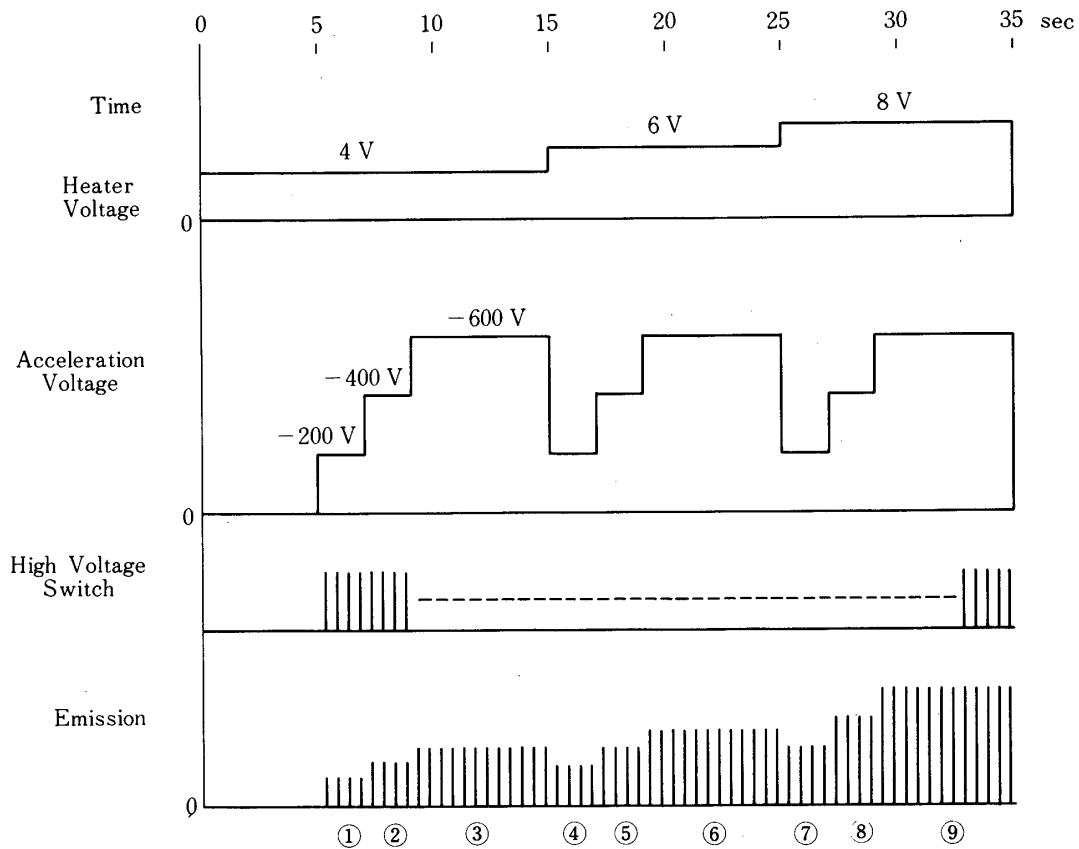


Fig. 3 Time Sequence

INTシーケンスによる動作をスタートさせる信号

INT/EXT

INT, EXTの選択 (ラッチングリレー受)

シーケンス設定 (パルス)

EXT時の高圧スイッチON

ヒーター設定 (レベル)

ヒーター電圧の設定 DC入力

高圧設定 (レベル)

高圧電源出力の設定 DC入力

あらかじめ決められたシーケンスを外部よりスタートさせることができる。またヒーター電源、高圧電源は、外部からのDC入力に比例した出力値が得られるようになっている。ビームを放出させるための高圧スイッチも必要なパルス幅のパルスを加えることによって、ビームの幅を変えることができる。以上記述したエレクトロニクスブロック・ダイアグラムをFig. 4に示す。

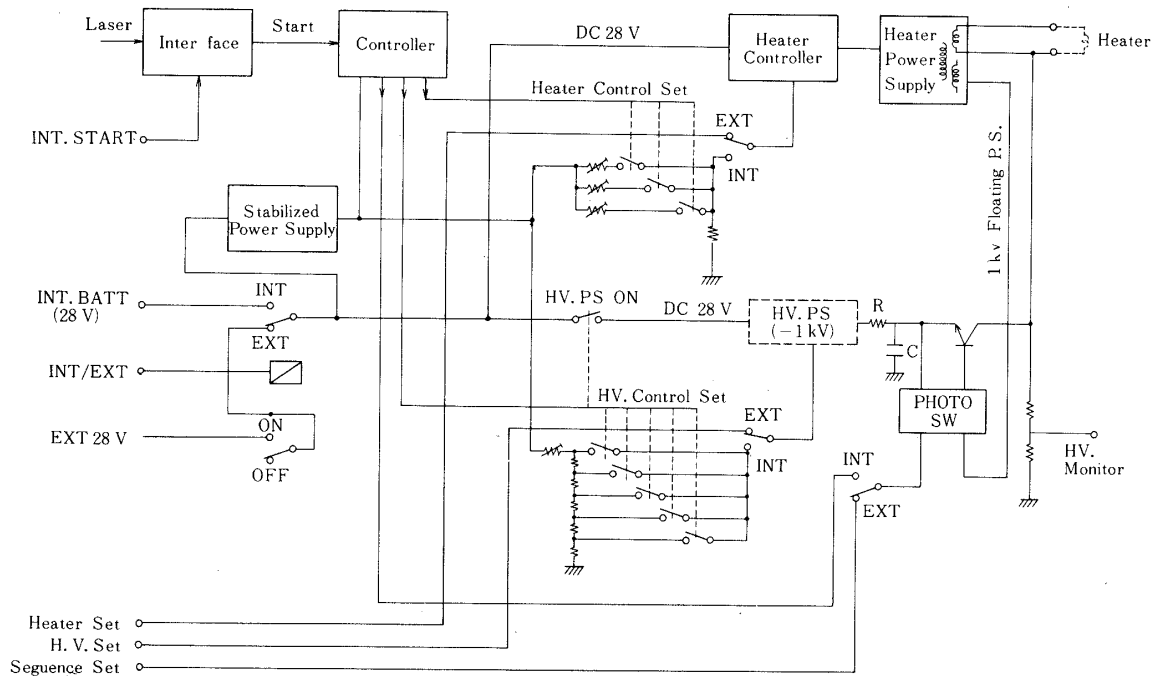


Fig. 4 Block Diagram of Electronics

3. 実験方法

電子銃システムは、大型チェンバー ($2\text{m}\phi \times 3\text{m}^l$) のほぼ中央に上からつるして設置した。実験の全体の配置を Fig 5 に示す。

3.1 付属装置

3.1.1 帯電中和テスト用電子銃装置

小型電子銃装置に外部から電子ビームを照射して、負に帯電させるための装置。出力は、定格 6 [kV] 、 500 [mA] で、定常運転ができる。

3.1.2 磁場拡散型プラズマ発生装置

作動ガスは Ar で放電電流、作動ガス圧を調整することにより、実験領域に $10^2 \sim 10^6$ (個/cc) のプラズマを生成することができる。

3.1.3 計測器類

プラズマ密度測定用に球プローブ、帯電電圧測定用に高圧プローブを用いた。その他チェンバー内には、アンテナ 3 本、可動プローブ等を設置した。

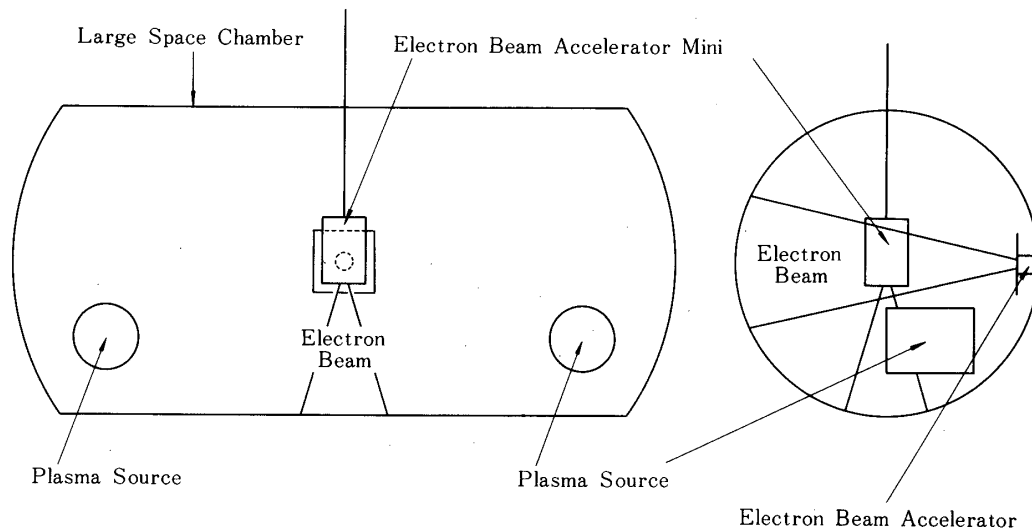


Fig. 5 Experimental Layout

3.2 実験モード

実験は、アース・モード、フローティング・モード、完全フローティング・モードの3種類について行った。

3.2.1 アース・モード

(電子銃アースとチェンバー壁とを電氣的に接続したモード)

電源及び動作のスタートは、外部から行う。シーケンスは、内部コントロールの設定通りで行った。エミッションは、電子銃アースとチェンバー壁との間に入れた1 [KΩ] の抵抗で検出する。実際に実験したシーケンスは、Fig. 3に示したとおりである。今回の実験は、全てこのシーケンスで行った。電子銃の加速電圧は、-200, -400, -600 [V] の3種類で実験した。Fig. 3に示すように、ヒーター電圧と加速電圧のパラメーターの組み合わせから1周期で9個の異なったデータが取れる。真空度は、 $p = 3 \times 10^{-6}$, $p = 5 \times 10^{-6}$, $p = 1 \times 10^{-5}$, $p = 5 \times 10^{-5}$, $p = 7.4 \times 10^{-5}$ [Torr] について実験を行った。ガスは、Arを用いた。

3.2.2 フローティング・モード

(電子銃アースとチェンバー壁とを電氣的に絶縁したモード。但しコントロール・スタート及び電源は、外部から行う。)

フローティング電圧は、1000:1の高圧プローブで測定した。高圧プローブの抵抗値は、100 [MΩ] である。シーケンスは、アース・モードの時と同様である。真空度は、 $p = 3 \times 10^{-6}$, $p = 5 \times 10^{-6}$, $p = 7.5 \times 10^{-6}$, $p = 1 \times 10^{-5}$, $p = 2.5 \times 10^{-5}$, $p = 5 \times 10^{-5}$, $p = 7.5 \times 10^{-5}$, $p = 1 \times 10^{-4}$ [Torr] の場合について実験を行った。またプラズマ密度に

については, $n = 1 \times 10^5$, $n = 3 \times 10^4$, $n = 2 \times 10^4$, $n = 1 \times 10^4$, $n = 4.5 \times 10^3$, $n = 5 \times 10^3$, $n = 3 \times 10^3$, $n = 1 \times 10^3$ [個/cc] の各場合で実験を行った.

3.2.3 完全フローティング・モード

(電子銃アースとチェンバー壁を電氣的に絶縁し, コントロール及び電源も内部で実験するモード)

小型電子銃装置の電源, コントロール等すべて, 内部を使用し, スタートはレーザー光で行った. しかし, フローティング電圧を測定するためには, 大きな値の抵抗をチェンバー壁と電子銃アース間に接続しなければならず, そういう意味では, 完全なフローティング状態ではないが, 宇宙空間で飛翔体から電子ビームを放出するという状況に最も近い状態である. フローティング電圧は 10 [M Ω] の $10:1$ のプローブで測定した. シーケンスはアースモードと同じである. 真空度は, $p = 2.7 \times 10^{-6}$, $p = 1 \times 10^{-5}$ [Torr] の時とプラズマ密度 $n = 1 \times 10^3$ [個/cc] の各場合について, 実験を行った.

4. 実験結果

4.1 電子銃システムの基本性能

アース・モードの時の加速電圧, ビーム電流 ($V_{HV} - I_E$) 特性を両対数グラフにプロットしてみると, Fig. 6 のようになる. この特性は, 理論的には,

$$I_E [A] = p / 10^6 V_{HV}^{3/2} [V] \quad (1)$$

(p : 定数)

となるはずで, 実験と比較してみると, $p \simeq 2.1$ となり, Fig. 6 は関係式 (1) を満たしている. これによって, システムの電子銃は, 正常に動作したと言える. フローティング・モードでの実験では, 回路構成上正確なエミッション電流のモニターができなかった. しかし, 今迄の同種実験で, アース・モードとフローティング・モードとで, 電子銃の特性差は, ほとんどないことがわかっており, フローティング・モードでも Fig. 6 に示すエミッション特性になっていると考えてよい. また, 得られた加速電圧, ビーム電流の特性は, 真空度には, それほど強く依存しなかった.

4.2 フローティング・モード実験

4.2.1 立ち上がり

電子ビーム放出に伴うフローティング電圧の典型的な立ち上がりを Fig. 7 に示す. ビームのパルス幅は, 25 [μ sec] で, ビームの放出時間中フローティング電圧は, 直線的に立ち上がっている. この場合の立ち上がりの傾きは 5.6 [V/μ sec] である. ビーム放出に伴うフローティング電圧の立ち上がりは, 完全真空中では, チェンバー壁と電子銃システムとの容量 C 及びビーム電流 I_E とで決まる. 電子銃を定電流電源と考えれば,

$$V_F / t = I_E / C \quad (2)$$

となり, 容量 C は, 実測から約 1250 [pF] である. この議論を Fig. 7 の条件 ($I_E = 3.8$ [mA]) の場合にあてはめると, $V_F / t = 3$ [V/μ sec] となり予想値と実験値は, ほぼ合っ

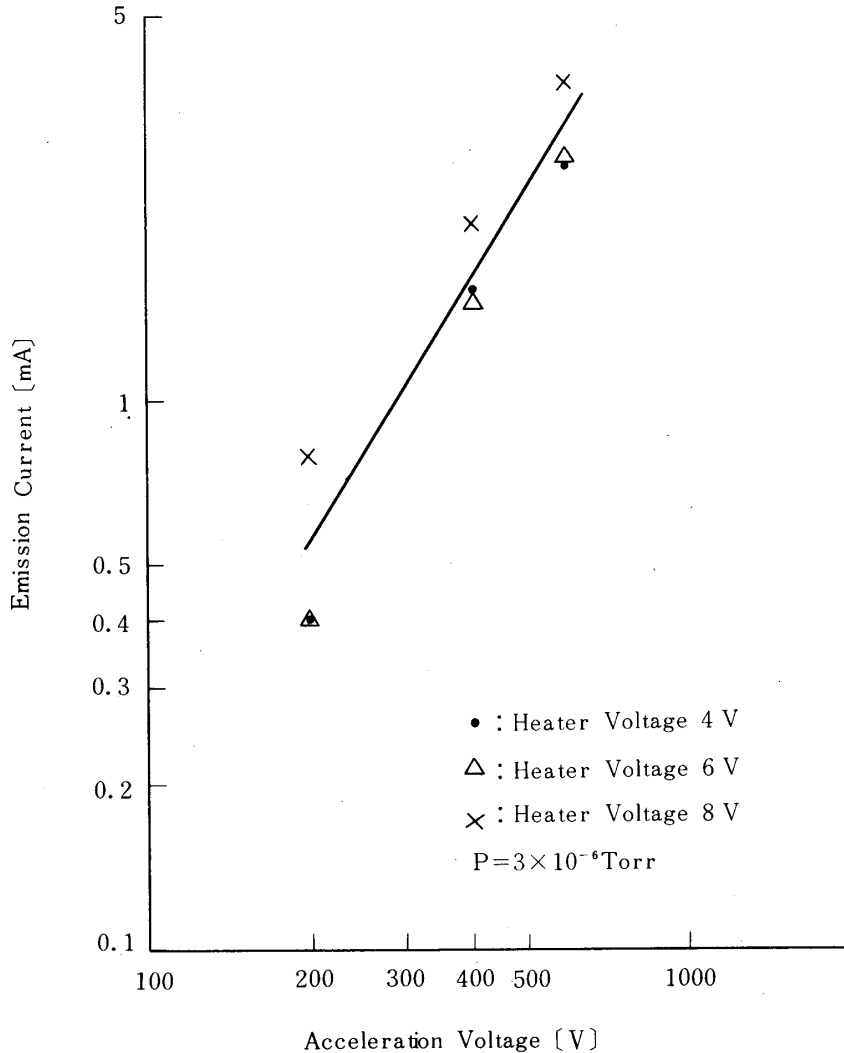


Fig. 6

ている。このことは、真空度のよいところで電子銃を動作させた時は、電子銃システムの対地容量を電子銃という定電流電源で充電するモデルを使うことができることを示しており、宇宙空間の実験でも周囲のプラズマの存在が、無視できるような大電流の電子ビームを放出する場合には、飛翔体のフローティング電位は、ここで示したような立ち上がりを行うことが予想される。

真空度が悪くなると、Fig. 8 に示すように、一般に立ち上がりが遅くなる。これは真空度が悪い場合には、ビームによってプラズマが生成され、それによって電子銃システムに帰還電子が供給されるためと考えられる。逆にこの立ち上がり方の変化から、生成されたプラズマの情報を得ることができる。例えば、真空度 1×10^{-4} [Torr] で $V_{HV} = 600$ [V] の動

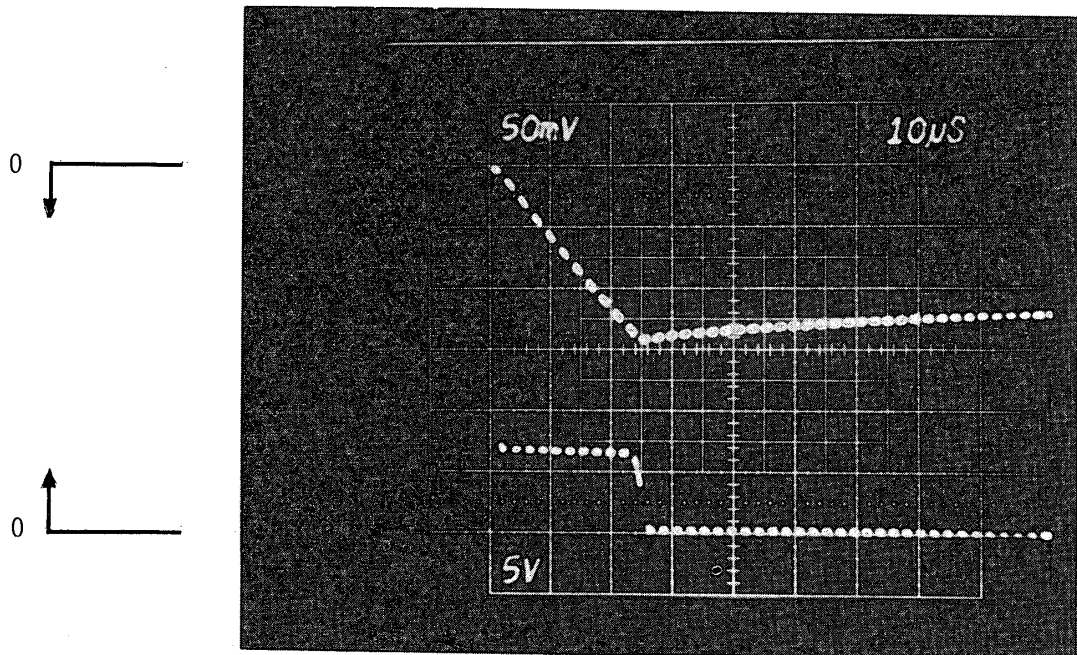


Fig. 7

作時は,

$$V_F/t = (I_E - I_R)/C \quad (3)$$

(I_R : 帰還電子の電流)

から, $I_R \sim 3.1$ [mA] となりシステムの表面積から計算すると, プラズマ密度は, $n = 3 \times 10^5$ [個/cc] 程度と計算される. 無論 I_R は V_F の関数なので, このエスティメイトは, 正確なものではない. 周囲にプラズマが存在する宇宙空間の実験では, 帰還電子電流がビーム電流と比して, 無視できない場合には, 飛翔体電位の立ち上がりは, ここで見られたように, 帯電々圧の立ち上がり完全真空中の場合よりも小さくなることが, 予想される.

4.2.2 緩和

緩和は, 完全真空中では, システムの対地容量 C と, 検出抵抗 R とで決まり,

$$V_F = V_{FO} e^{-t/RC} \quad (4)$$

という式で表わせる. この実験では, $RC = 125$ [msec] であり, これを実測値と比較してみると, Fig. 9に示すように実測値と予想値は一致している. ところが電子ビーム OFF した直後は, 理論的には,

$$V_F = V_{FO}(1 - t/RC) \quad (5)$$

と近似されその傾きは, Fig. 7のパラメーターの場合には, 1.12×10^{-3} [V/ μ sec] となる

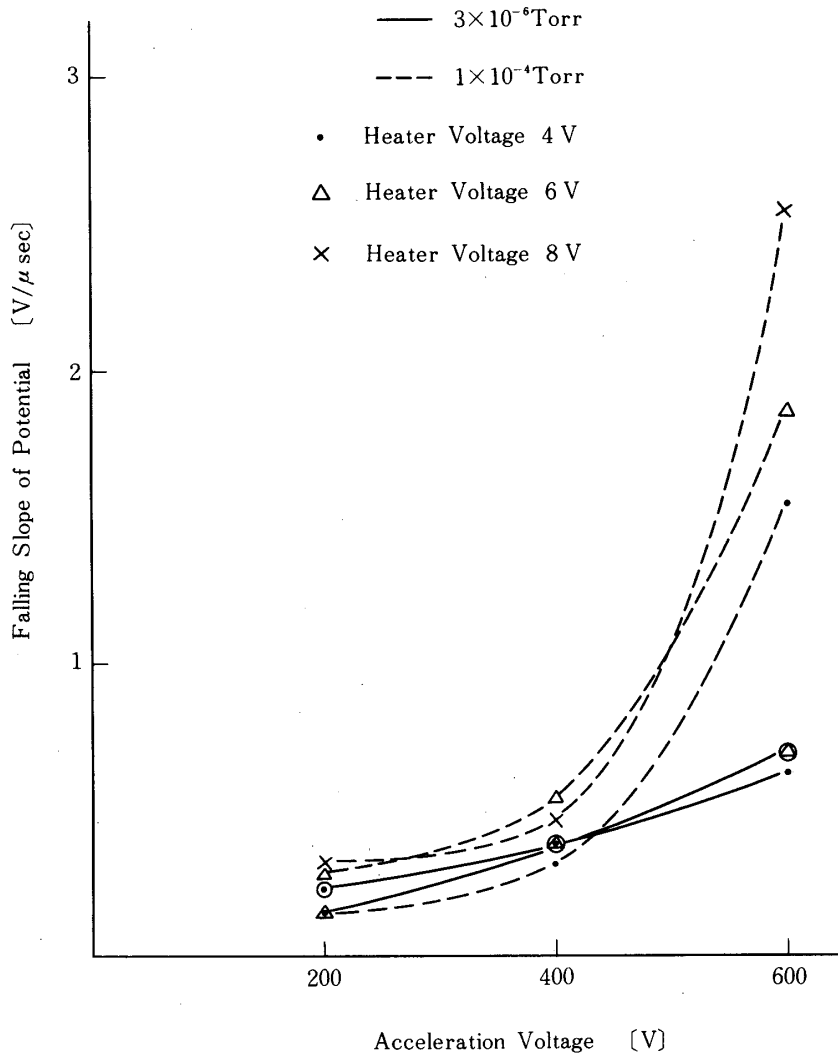


Fig. 8

はずであるが、実測値は、 5×10^{-1} [$V/\mu\text{sec}$] であり大きな差がある。この違いは、電子ビームを切った後も、電子ビームによって生成されたプラズマがまだしばらく残っているためであると考えられる。プラズマの残存時間は、この実験の場合約 1 [msec] であると予想される。

真空度が悪いと電子ビームによるプラズマの量が増加するため、ビームを切った後の立ち下がりが次第に早くなる。この様子を Fig. 10 に示す。

宇宙空間での飛行体からの電子ビーム放出の場合は、周囲にプラズマが存在するため、帯電が緩和されると考えられる。Fig. 11 (b) にプラズマ内で小型電子銃を動作させた時の帯電の様子を示した。真空中で電子ビームを放出場合の (a) よりも立ち上がり、おさえられると共に、直線的な立ち上がりを示さなくなる。プラズマが存在する場合は (3) 式は、

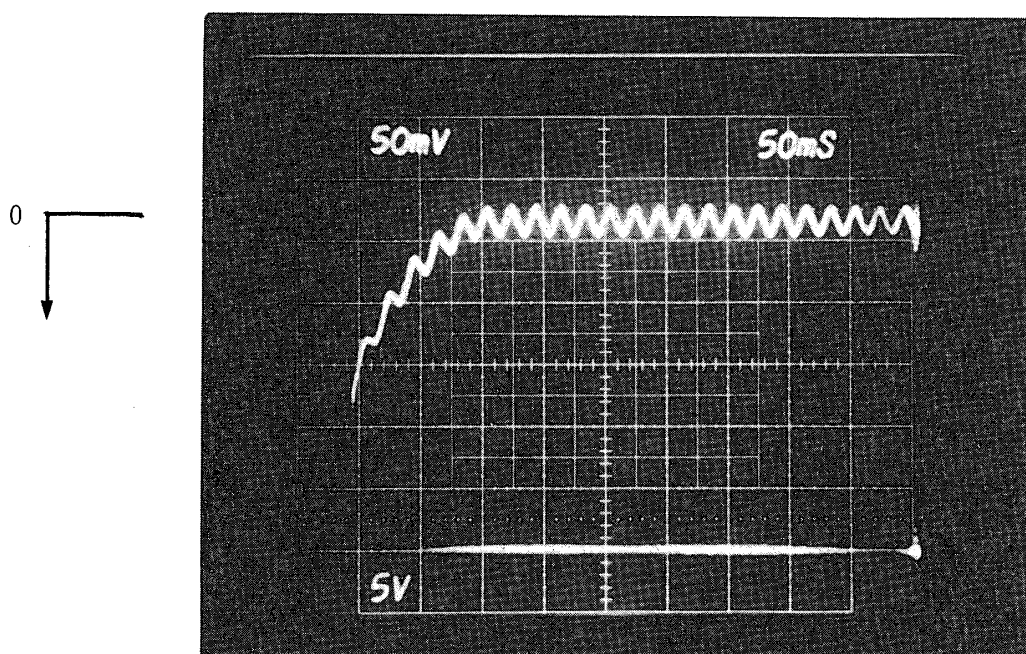


Fig. 9

正確には,

$$V_F(t) = 1/C \int_0^t (I_E - I_R) dt$$

又は,

$$dV_F/dt = 1/C(I_E - I_R)$$

(6)

で与えられる。 I_R はプラズマから電子システムへの帰還電子電流で、プラズマの存在によって V_F が真空中の場合よりも、小さくなると共に I_R は、 V_F が大きい程多いので、傾き dV_F/dt は時間と共に小さくなるが、これらの式で説明される。立ち上がり方は、真空中の場合よりも大きくなっているが、これは立ち下がりの式

$$dV_F/dt = -1/C(V_F/R + I_R) \quad (7)$$

で I_R の存在により dV_F/dt が大きくなることから説明される。

4.3 完全フローティング・モード実験

立ち上がり、立ち下がりについて、前述のフローティング・モードと完全フローティング・モードを比較してみると、Fig. 12 に示すようにあきらかに差がある。完全フローティング・モードの時の方が立ち上がり、立ち下がりの傾きが大きい。これは完全フローティング・モードの時の方がシステムとチエンバー壁との容量 C が小さくなったためである。計装を外部に接続したフローティング・モードの場合の容量が 1250 [pF] であるのに対し、完全

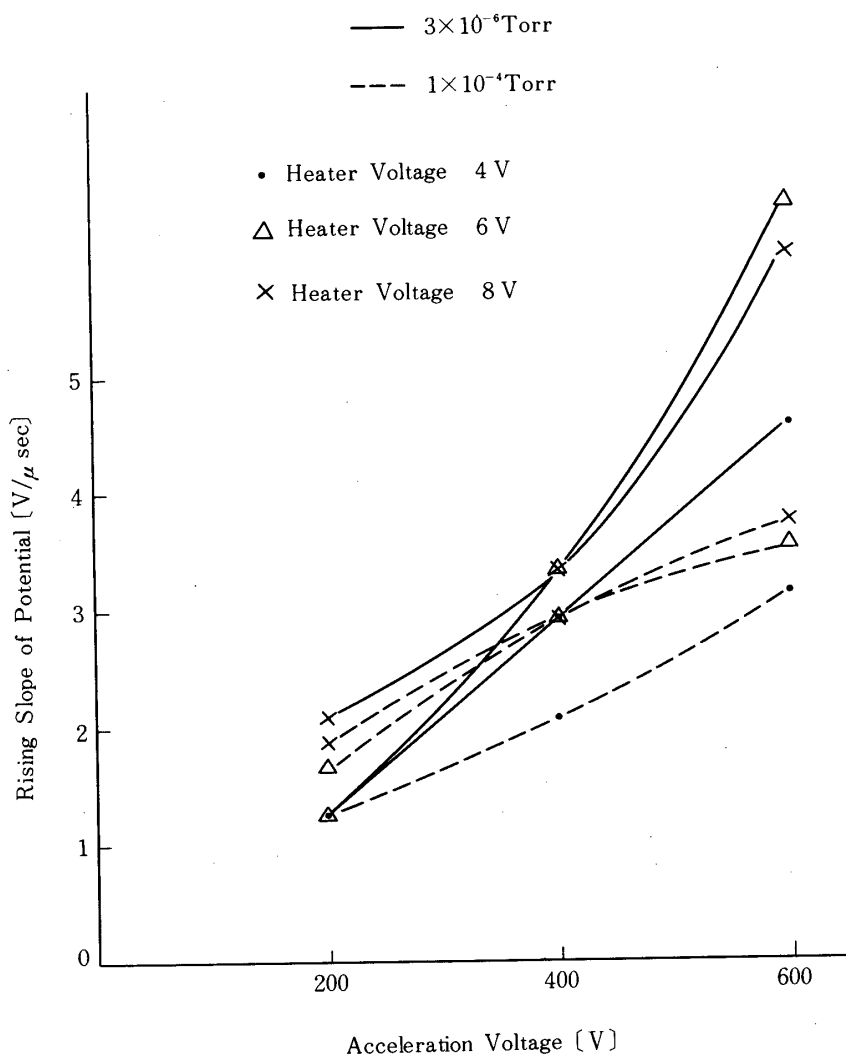


Fig. 10

フローティング・モードの場合は、400 [pF] である。従って立ち上がりの予想値は Fig.12 の (b) のパラメータの場合 $V_F/t = I_E/C = 9.5 [V/\mu \text{sec}]$ となる。実験値は Fig.12(b) より $V_F/t = 10.7 [V/\mu \text{sec}]$ となりほぼ合っている。

一方立ち下りの予想値は、第 (5) 式から $RC = 4 [\text{msec}]$ であり実測値とほぼ合っている。電子ビームを OFF した直後の立ち上がりの計算値は、フローティング・モードと同様に、第 (6) 式から $5.9 \times 10^{-2} [V/\mu \text{sec}]$ となる。実測値は、 $6.7 \times 10^{-1} [V/\mu \text{sec}]$ でありこの違いは、ビームを切った後にもまだプラズマが残っているためである。

宇宙空間での飛翔体からの電子ビーム放出実験を実験室で、シミュレートするという意味からは、電子銃システムの対地容量は、できるだけ小さい事が望ましい。対地容量が小さければ、相対的に小さなビーム電流、短いパルス幅で、帯電状態を作ることができ、周囲の壁

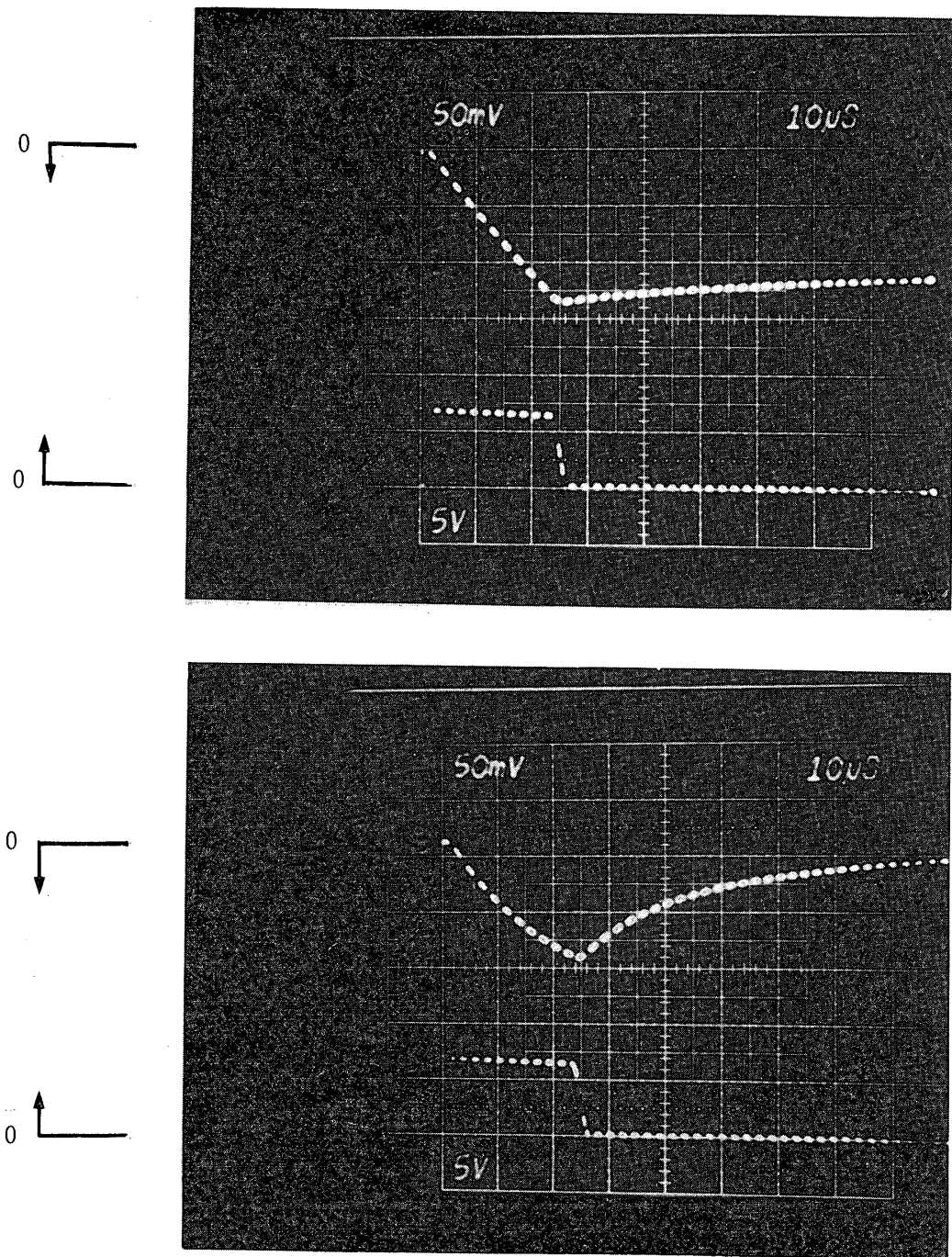


Fig. 11

からの影響（ビーム照射に伴うアウト・ガスや2次電子の影響）が少なくすむからである。更に完全フローティング・モードの実験では、チェンバー内外を結ぶ計装線のインダクタンスの影響がないので、より宇宙空間での実験に近いものとなる。この実験では、完全フロー

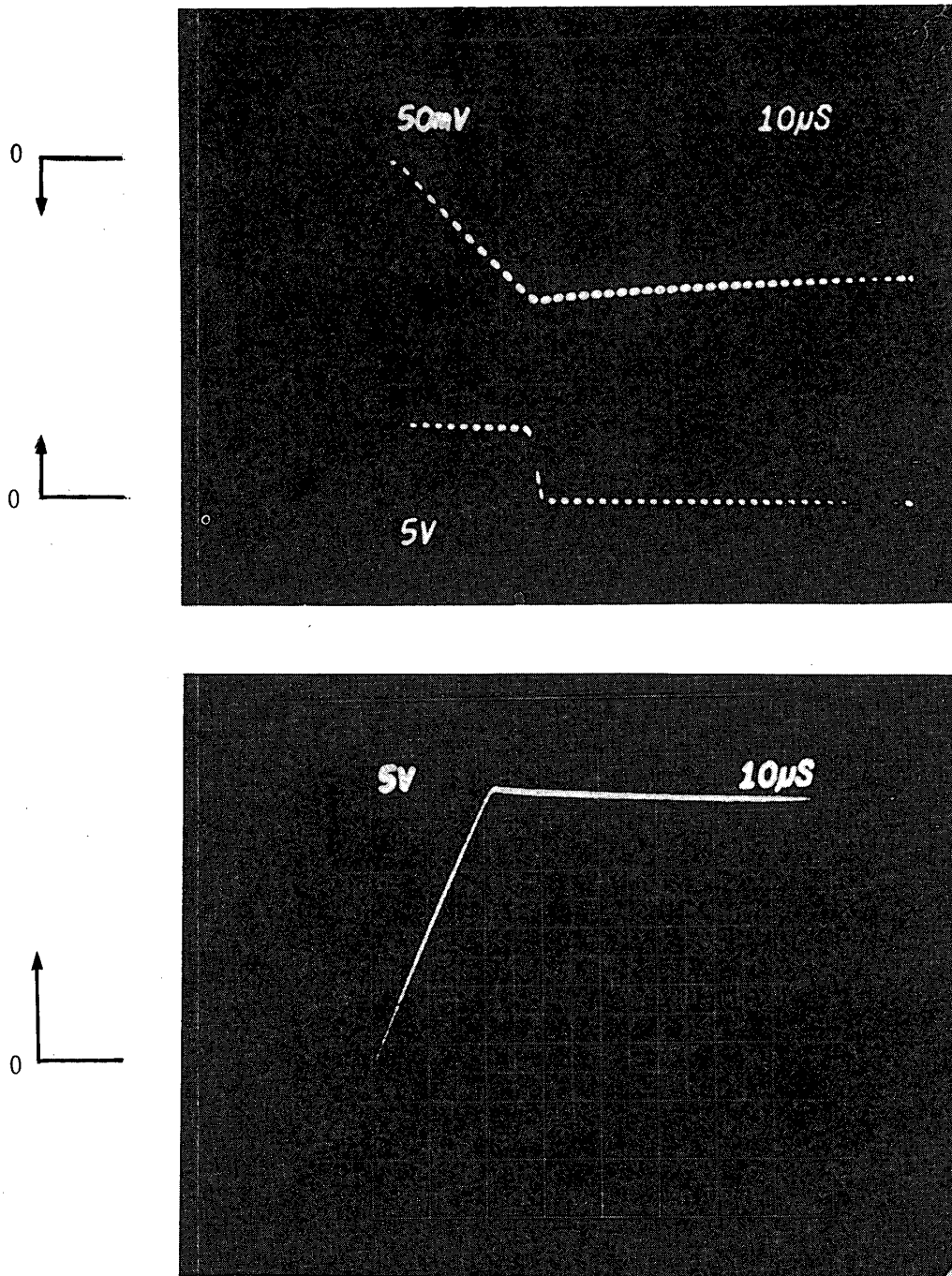


Fig. 12(a), (b)

ティング・モードと言っても、電子銃システムの帯電電圧測定用のケーブル及び機器が、ぶらさがっているが、将来は帯電電圧測定に他の方法、例えば別の電子ビームを用いる等して、真の意味での完全フローティングでの実験を行う予定である。

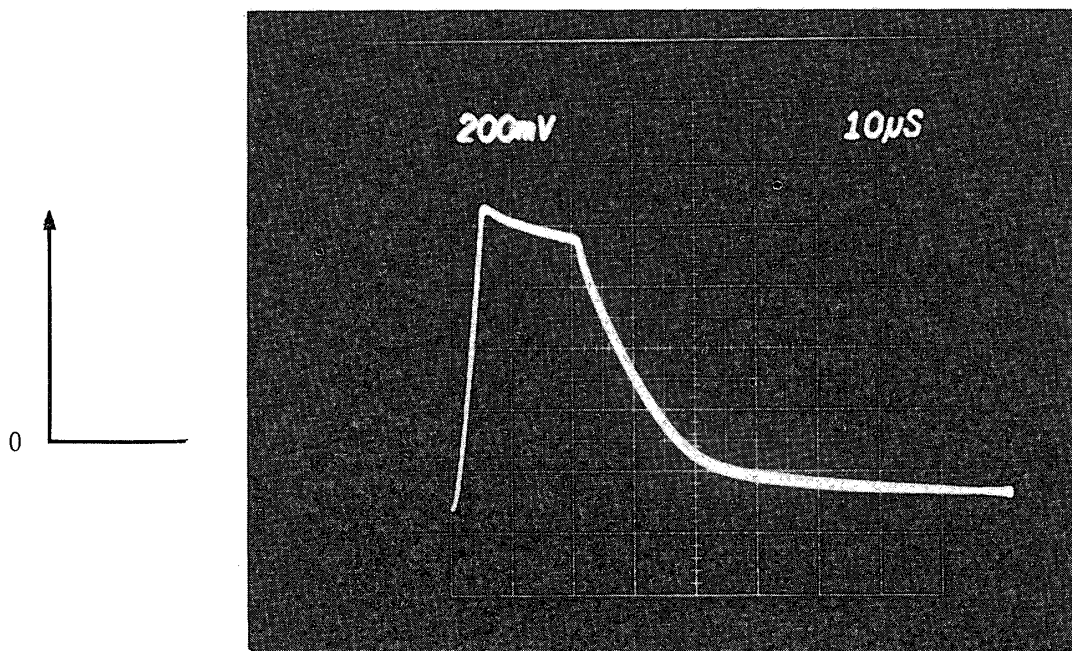


Fig. 13

5 衛星電位中和シミュレーション実験

衛星が負に帯電した時、それを中和するため衛星から電子銃を用いて電子ビームを放出するという考えは、古くからあり、今回開発した小型電子銃システムを用いてその効果を試験した。小型電子銃装置を負に帯電させるために、別の電子銃から電子ビームを照射した。この実験では、照射用の電子銃を2.7[kV]、60[mA]で直流的に動作させた。両電子銃の相対位置は、Fig. 5に示したとおりである。小型電子銃に照射される実効ビーム電流は1～2[mA]程度と見積られる。この状態で小型電子銃を動作させた例を、Fig. 13に示す。小型電子銃システムは電子ビームの照射を受けて、最初約-200[V]に帯電しているが、電子ビームを放出すると逆に約+600[V]に逆帯電する。これは照射ビーム量よりも放出ビーム量(3.8mA)の方が重いためであり、放出ビーム量を少なくすることによって、完全な中和を図ることができる。Fig. 13での逆帯電電圧の立ち上がりは真空中での立ち上がりよりもはるかに大きい。この原因は現在不明であるが、実効的に小型電子銃システムから、電子が多く放出されたことを示しており、電子銃からの電子ビーム量が増加したためか、2次電子の影響の2つが考えられる。但し、この方法を実際の衛星に応用する場合には、この実験でみられたような逆帯電を防ぐため、常に衛星のポテンシャルをモニターし、その信号で電子銃のビーム電流、加速電圧を制御しなければならない。

6 結 論

小型電子銃装置を開発し、それを用いて宇宙空間での飛翔体からの電子ビーム放出に伴う飛翔体帯電のシミュレーション実験を行った。帯電は、加速電圧及びビーム電流が大きい程大きく、周囲のプラズマ密度、中性大気密度が高い程小さい。これらの帯電の立ち上がりの様子は、電子銃システムとチェンバー壁との容量を電子銃からの正味の電子電流（ビーム電流と帰還電流との差）で充電するというモデルで、説明できることがわかった。又帯電の緩和は、電子銃システムとチェンバー壁との容量に充電された電荷が検出抵抗及び周囲のプラズマを通して、放電すると考えることによって、説明できる。これらの結果は、電子銃システムとチェンバー壁との容量を飛翔体と周囲のプラズマとの間の容量におきかえることによって、飛翔体の帯電現象に応用することができる。本実験での測定は、システムの帯電電圧のみにしぼったが、今後更にこの装置を用いて、ビームの拡がり、帰還電子電流の分布、周囲のポテンシャルの様子、ビームによる波動励起、といったビーム放出に伴う現象の総合的な研究を行っていく予定である。

1978年3月17日 新設部（科学）

Figure Captions

- Fig. 1 小型電子銃システムの構成図。装置は、ビーム放出口、受光部、コネクタ部を除きステンレスのカバーでおおわれている。
- Fig. 2 電子銃部、ヒーターは市販の豆球（MB-72p）を用いている。
- Fig. 3 システム内部に設定したシーケンス・プログラム。一周期に①～⑨の9種類の電圧、電流の組合わせのビームを放出することができる。
- Fig. 4 エレクトロニクスブロック・ダイアグラム。
- Fig. 5 実験装置の配置図（側面図、断面図）。
- Fig. 6 小型電子銃システムの加速電圧-ビーム電流特性。図中の直線は、パービアンス2.1の理論線を示す。
- Fig. 7 Upper beam: フローティング電圧 (50 V/div)
Lower beam: ビーム電流
加速電圧 600 [V], 真空度 $p = 3 \times 10^{-6}$ [Torr].
- Fig. 8 帯電電圧立ち上がりの真空度依存性、加速電圧（ビーム電流）が小さい時は、真空度依存はめだたないが、加速電圧（ビーム電流）が大きくなると、低真空領域で立ち上がり小さくなる。
- Fig. 9 フローティング電圧の緩和過程 (50 V/div) 高インピーダンスで測定している為、50 [Hz] の振動がのっている。加速電圧 600 [V]. 真空度 $p = 1.0 \times 10^{-5}$ [Torr].
- Fig. 10 ビームを切った直後の帯電電圧の緩和過程加速電圧（ビーム電流）が小さい時は、真空度に強く依存しないが、加速電圧ビーム電流が大きいた時は、真空度の低い方が立ち下がりの傾きが大きくなる。
- Fig. 11 (a)外部からプラズマを生成しない時の帯電の様子。(b)外部からプラズマ

を生成した時の帯電の様子。 $(n = 5 \times 10^3 \text{ [個/cc)})$ プラズマが存在すると、帯電電圧そのものが小さくなるだけでなく、立ち上がりの傾きが小さくなり、立ち下がりの傾きが大きくなる。加速電圧 600 [V] 真空度 $p = 7.5 \times 10^{-6}$ [Torr]。

Fig. 12 (a)フローティング・モードでの帯電電圧 (50 V/div)。(b)完全フローティング・モードでの帯電電圧 (50V/div),完全フローティング・モードの方が、立ち上がりの傾きが大きく、立ち下がりの傾きが小さい。

加速電圧 600 [V] 真空度 $p = 3 \times 10^{-6}$ [Torr]

Fig. 13 小型電子銃に外部から定常的に電子ビームを照射して、負に帯電させ、 $t = 0$ で小型電子銃からパルスビームを放出した時の写真。照射ビーム量よりもビーム放出量の方が多い場合で、逆帯電している。