

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-398

5cm電子衝撃型イオンエンジンの噴出ビームに
関する実験的研究

中村嘉宏・東久雄・宮崎勝弘

1975年1月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

5cm電子衝撃型水銀イオンエンジンの噴出ビームに 関する実験的研究*

中 村 嘉 宏** 東 久 雄**

宮 崎 勝 弘**

Experimental Investigation on Beams Exhausted from a 5cm Mercury Electronbombardment Ion Engine

By Yoshihiro NAKAMURA, Hisao AZUMA
and Katsuhiko MIYAZAKI

ABSTRACT

To make use of an ion engine as a propulsion device for a spacecraft, it is important to know if the charged particles exhausted from the engine might make such influences on the mission of the spacecraft as radio wave interference in communication or experiments, contamination for sensors, spacecraft electric potential raising etc. In this point of view, the nature of the exhausted beam is required to be studied in details.

This paper presents the relations between engine operation parameters and the properties of the beams exhausted from a 5cm electronbombardment mercury ion engine. The process of the neutralization of the beam is considered.

Space distributions of ion and electron current density of the beams were experimentally obtained using a Faraday cup and a flat plate probe. It is assured that the shapes of the ion current density distributions are intimately related to the permeance of the ion flow. This is deduced from the dimensional analysis of basic equations for ion flow.

The space and floating potentials of the beam were measured using an emission probe and a flat plate. The space potential is determined mainly by the space charge limited condition of electron current between a neutralizer and the beam edge.

1. 序 論

イオンエンジンは、化学ロケットと違って、かなりの重さの電源を必要とするという不利があるにもかかわらず、人工衛星の位置姿勢制御や、軌道遷移等の特に長時間ミッションに用いると、比推力が高いために推進剤の消費率が小さくなり、全体としてペイロードの増加に役立つ。最近の宇宙用太陽電池パネルの高性能、軽量化によって、¹⁾不利の度合は低くなり、エンジンシステムの発

展と相まって、イオン推進は実用の時期にきている。アメリカでは、NASAのSERT-II計画として、これまでのイオンエンジンの飛行試験としては最も規模の大きかった、半年間軌道飛行試験での項目別試験により、電子衝撃型イオンエンジンが宇宙でも期待通りの性能を発揮し、宇宙での使用について問題ないことがあらためて明らかにされた。^{2)~7)}

イオンエンジンの宇宙での使用に際して問題となるのは、エンジン自身の性能、寿命、信頼性等の他に、化学ロケットにはない荷電粒子の放出から起るものである。

*昭和49年2月27日 受付

**宇宙研究グループ

すなわち、噴出プラズマビームが人工衛星で使われる通信あるいは実験の電波を妨害しないか、各種センサーに利用される光の障害とならないか、また、自分で使う太陽電池を汚染しないかといった質問がある。こういう質問に答えるための基礎となるのは、エンジンからの噴出ビームの各種分布について測定し、その性質を知ることであろう。SERT-II 計画は、エンジンが実際に宇宙で長時間作動し、所定の推力等の性能を出すかということと、上記のような質問に答えるための種々の測定で占められている。エンジンの宇宙実験と地上実験で得られたデータの比較により、エンジンの作動ばかりでなく、噴出ビームの状態も宇宙と地上でよく一致し、限られ空間である真空タンク内でのビーム測定も意味のあることが確認された。

筆者等は、直径5cmの小型電子衝撃型水銀イオンエンジンを試作試験して、そのイオン源の放電特性、イオン加速特性およびそれらの関係について調べ報告したが⁸⁾、こういう全体的な特性と同様に重要な、エンジンからの噴出ビームについて測定実験を行ったので報告する。実験は、エンジンから噴出されるイオンビームのイオン電流密度分布、拡がり角、さらにイオンビームの電子による中和の様子、中和によりできるプラズマビームの電位分布等についてである。イオンビームの分布は、イオン源である放電室でのイオン、電子の密度、エネルギー分布、プラズマの電位分布、磁場とも関連があり、ビーム測定により多少は放電室内の様子が見える。さらに、ビームのイオン電流密度分布に大きな影響を与えるものは、加速電極配置構成、加速電圧等プラズマからのイオンの抽出加速に関係する量である。相互の関連性を明ら

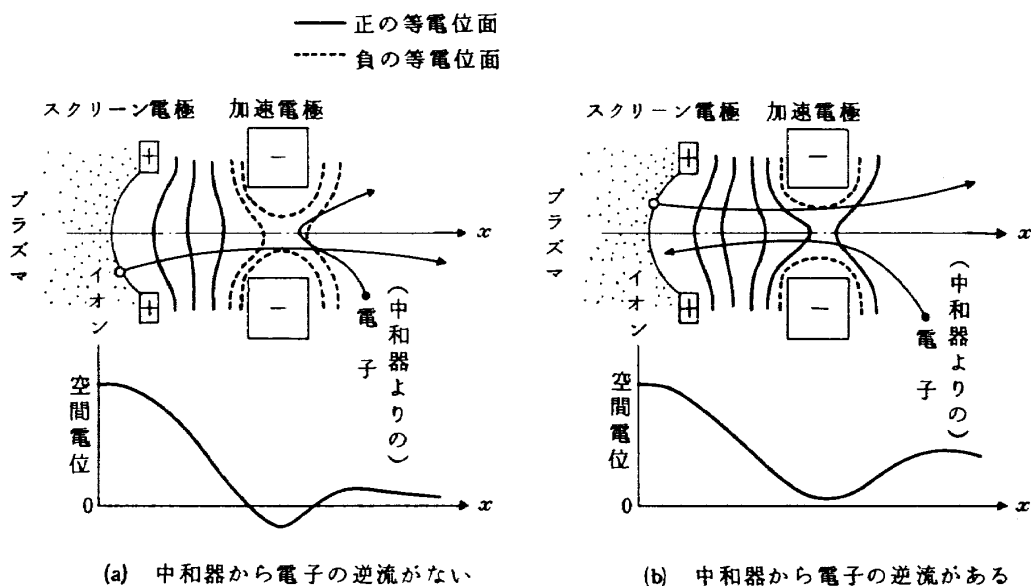
かにすれば、一部データにより他を推しはかることができる。ここでは特に加速領域に重点を置き、そのイオンビームへの影響を考えデータを整理してみた。

イオンビームはもとより、中和によって得られるプラズマビームも密度が薄いので、周囲気圧を高める等の特殊な方法を用いないと光学観測はできず、プローブ挿入による測定が主となる。どのようなプローブをどのように使えば、ビームを乱さずにその性質を知ることができるかということも、プローブとその使い方をいくつか試み検討した。

2. イオンの静電加速と中和

2.1 イオンの加速と中和のための電位分布

電子衝撃型イオンエンジンでは、放電室で生成されたプラズマ(内部プラズマ)からイオンだけが抽出加速される。下流に置かれた中和器から放出された電子がイオンビームを中和する。放電室の一端に多数円孔のあいた2枚の電極を設置し、それらの電位と孔や電極間隔等寸法を適当に選ぶことにより、イオンの加速噴出を工合よく行い、しかも中和器からの電子が上流の放電室へ向わないようにする。電極附近の様子の概略を第1図に示す。内部プラズマ中のイオンは熱運動等により、電子とともに拡散する。プラズマに接するスクリーン電極附近に飛来するイオンは両電極電位差によって形成された電場により静電的に電子から分離され加速される。一方電子はそれぞれのエネルギーに応じてある程度イオンについてゆくが、電子にとっては減速電場であるので反射される。プラズマとイオン流の間でできる境界面をプラズマ境界と呼ぶ。宇宙空間や機体の電位より、放電室およびスク



第1図 イオン加速電極附近の電位分布の概念

リー電極の電位を充分高く、外側の加速電極電位を低くし、イオンをできるだけ多く抽出加速するとともに、中和器からの電子の逆流を防ぐ。電子が中和器から上流に向くと、第1図(a)のように、必ず中和器より電位の低い空間に到達してしまうようにする。中和器は、ほぼ機体の電位に保たれている。もし、高いスクリーン電極電位に比べて、加速電極電位を充分深くしないと、加速されるイオンの電荷による空間電位の上昇もあって、第1図(b)のように、中心附近に、中和器より高い電位の道ができ、電子はそこを通過して逆流することになる。電極の寸法としては、極端な場合を考えればわかるように、電極間隔に比べて孔直径が大きすぎると、孔中心附近に電極電位の影響が効果的におよびず、電子の逆流が起りやすく、イオンの加速すら不可能になることがある。

中和によって下流にもプラズマが形成される。この外部プラズマの上流端は、ほぼ中和器の電位にあるといえる。この外部プラズマの境界が、仮想的な第3電極を形成する。場合によっては、本当の孔あき電極を置くこともある。イオンは空間電位分布にしたがって加速され、減速され、最終的には、ほぼスクリーン電極電位すなわち正味加速電圧 V_a に相当する速さになる。両電極の電位差 V_a を加速電圧、加速電極の電位 V_a を、イオンがそれだけ減速されるということと減速電圧ともいう。

2.2 イオン流の相似則

十分に稀薄で、無衝突であるイオン流の基礎方程式は、次のようになる。

各イオンに対する運動方程式

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -q \nabla \varphi \quad \dots\dots\dots (1)$$

ポアソン方程式

$$\nabla^2 \varphi = -4\pi q n \quad \dots\dots\dots (2)$$

連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (q \int \mathbf{v}_i d n) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 m_i 、 q 、 \mathbf{v} はイオンの質量、電荷、速度、 t は時間、 φ 、 n は電位と数密度である。これらの式を無次元化するために、プラズマ境界での電流密度 j_0 、加速電圧 V_a 、電極間距離 a_0 を選び、代表値として、速度

$$v_0 = \sqrt{\frac{2q}{m_i}} V_a, \text{ 密度 } n_0 = \frac{j_0}{q v_0}, \text{ 時間 } t_0 = \frac{a_0}{v_0} \text{ を用$$

いると、次の無次元方程式が得られる。

$$\frac{d\tilde{\mathbf{v}}}{d\tilde{t}} = \frac{1}{2} \tilde{\nabla} \tilde{\varphi} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tilde{\nabla}^2 \tilde{\varphi} = \mathcal{L} \tilde{n} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\tilde{\nabla} \cdot \tilde{\mathbf{J}} = \tilde{\nabla} \cdot \left(\int \tilde{\mathbf{v}} d\tilde{n} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、ポアソン方程式中の \mathcal{L} は重要なパラメタで、

$$\mathcal{L} = 2\sqrt{2}\pi \sqrt{\frac{m_i}{q}} \frac{j_0 a_0^2}{V_a^{\frac{3}{2}}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる。境界条件としては、プラズマ境界上で

$$\tilde{j}_{\perp} = 1, \left(\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{S}} \right)_{\perp} = 0, \tilde{\varphi} = \tilde{\varphi}_p \quad \dots\dots (8), (9), (10)$$

スクリーン電極上で

$$\tilde{\varphi} = 1 + \tilde{\varphi}_a \approx \tilde{\varphi}_p \quad \dots\dots\dots (11)$$

加速電極上で

$$\tilde{\varphi} = \tilde{\varphi}_a \quad \dots\dots\dots (12)$$

外部プラズマ境界上で

$$\tilde{\varphi} = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。 $\tilde{\varphi}_a$ は無次元化された加速電極電位で負の値をとる。これらの式からわかることは、もし、

- (1) 電極の寸法配置が相似であれば、
- (2) $\tilde{\varphi}_a$ を一定に保ち、
- (3) パラメタ \mathcal{L} を等しくすれば、

相似なイオンの流れが実現される。すなわち、上の条件を満たす相似な2つの流れがあれば、プラズマ境界の形、対応する各イオンの軌道、電流密度分布の形等が相似になる。

条件(1)では、両電極の厚さ、孔径、および間隔が相似であることが必要であるが、最も重要な寸法は、空間の電位傾斜に関する電極間隔である。この間隔を保持する方法、放電防止を考えた両電極間電位差等が関係して電極間隔が決定される。孔径は、電極間隔に応じて適正な電場を形成し、1つの孔でできるだけ抽出するイオン電流を大きくし、高速イオンの直接攻撃を逃げ、しかも構造的に弱くならないようにする。

適正な電極寸法配置であれば、条件(2)の φ_a の影響は小さい。両電極附近の電場がイオンの流れにおよぼす影響は、上流のプラズマ境界に近い領域で強く、加速電極附近の下流では弱いと考えられる。それは上流では、イオンの速さが小さく、単位長さ当りの滞在時間が長いからである。但し、 φ_a が非常に大きいとか、下流での中和が不充分であると影響が表われよう。

条件(3)は、 \mathcal{L} に含まれる量を適当に選ぶことにより満足される。イオンエンジンでは、イオンは主に1価の電荷で q は一定である。推進剤によって、質量 m_i を変え

ることができ、例えばアルゴンを用いて水銀イオン流を模擬することもできる。また大きな寸法の電極配置で小さな寸法のものを用いた流れを模擬することもできる。推進剤、電極配置を固定すれば、 \mathcal{L} の中で残るのは

$$j_0 / V_e^{\frac{3}{2}}$$

で、この値が同じであれば相似な流れが実現される。このように抽出イオンの電流、イオンビームの電流密度分布は、加速電圧と、プラズマ境界面に入射するイオン電流密度によってきまる。最終的なイオン噴出速度、比推力は、正味加速電圧できまる。

2.3 イオンビームの電子による中和

イオンエンジンでは、イオン源から加速電極を用い静電的にイオンを抽出加速して、エンジン後方へ高速で噴出させることにより推力を得る。推力は次式で表わされる。

$$F = \dot{m}_i v_i \cos \theta = \sqrt{2(m_i/q)} I_{bi} \sqrt{V_b} \cos \theta \quad \dots\dots (14)$$

\dot{m}_i ; ビームのイオン流量 v_i ; イオン噴出速度
 I_{bi} ; ビームイオン電流 V_b ; 正味加速電圧
 q/m_i ; イオン質量当り電荷 θ ; イオン噴出速度の中心軸となす平均角

噴出されるイオンは正電荷をもっているため、エンジンを宇宙で使う場合には、噴出イオンビーム中に電子を注入して、中和を行う必要がある。中和には二つの目的がある。

- (1) 常に噴出イオンと同数の電子を放出して宇宙機あるいは人工衛星の電荷の蓄積を防ぐ。もしこの条件が満足されないで、例えば、放出電子電流がイオン電流より小さいと、負の電荷がたまり、機体の電位が次第に低下して、加速されたイオンが再び引戻されるか、さらには加速されないという事態も起きよう。
- (2) できるだけ噴出口の近くまでビームの電荷を中和、すなわちプラズマ状態にし、イオンの電荷によるビームの空間電位の上昇と、それから起るイオンの減速、拡散による推力低減を防ぐ。上記(14)式の θ を大きくしないことである。

この2つを式で表わすと、イオンと電子の電流および数密度が等しいとして、

$$(1) \quad I_{bi} = I_{ne} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$(2) \quad n_{bi} = n_{be} \quad \dots\dots\dots (16)$$

である。条件(2)がビームの全領域で達成されることはなく、一般に、下流へ行くに従ってイオンと電子の混合が進み、満足度が高くなると思われる。一方、加速電極の

すぐ近くでは電子が存在せずに、イオンだけの領域がある。このイオン流領域とプラズマ流との境界を中和面と名づければ、中和面があまり下流になるとビーム電位の上昇、ビームの拡がり角増大などが起り好ましくない。

以上の2条件が必要であるが、(1)の条件が優位に立つ。

中和を行うために、中和器すなわち電子放出面をイオンビーム中に置く場合と、外側に置く場合が考えられる。いずれの場合も、電子源とそれよりも電位の高いビームとの電位差により電子がビーム中に引き込まれる。いま、イオン電流 I_{bi} のビームの中和を考える。中和器の電子放出面の面積を A_e 、ビーム端までの距離、電位差を ℓ 、 V_{cp} とすると、放出面の電子放射が充分で電子が空間電荷制限下で放出されるとすれば、比例定数 k を用い、放出電子電流は、

$$I_{ne} = k A_e V_{cp}^{\frac{3}{2}} / \ell^2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

である。(15)式を用いると、カップリング電圧 V_{cp} は、

$$V_{cp} = (I_{bi} \ell^2 / k A_e)^{\frac{2}{3}} = I_{bi}^{\frac{2}{3}} / K \quad \dots\dots (18)$$

$$K = k A_e / \ell^2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる。 K は空間的電子放出能力ともいえようが、これが大きいと、ビームイオン電流が同じであれば、中和器に対するビームの電位は低くなる。この能力が小さいときは、電子抽出電圧すなわちビームの電位が高くなって、イオン電流に等しい電子電流を達成する。ビームと放出面との距離が小さい方が容易に電子がでることがわかる。この容易さからすると中和器をビーム中に置いた方がよいが、高エネルギーイオンの直接攻撃を受けるので、それによる浸蝕が大きく寿命が短い。そのためイオンエンジンの中和器は、普通、ビームの外側に置かれる。

3. 実験の方法と装置

実験は、直径 1.5 m、長さ 3 m の真空タンク内で、5 cm イオンエンジンを作動させて行われた。真空タンクは、油拡散ポンプ、ルーツポンプ、油回転ポンプにより排気され、さらに水銀等の凝縮性ガスは、タンク内に設置されている液体窒素で冷却されたコンデンサーに捕えられ、エンジン作動中、約 $1 \sim 3 \times 10^{-6}$ Torr の圧力に保たれる。実験に用いられたイオンエンジンの構造、コレクター、プローブ等の配置および電気配線の概略を第2図に示す。

3.1 イオンエンジン

イオンエンジンは、水銀を推進剤とする、フィラメント型のものである。プラズマからのイオンの抽出、加速

を受けもつ2枚の電極の中、放電部に近いスクリーン電極には、直径4mm、外側の加速電極には、直径3.5mmの孔がそれぞれ85個あけられている。エンジンの大部分は高電位にあるので、中和器からの電子の逆流防止、外部への電気的影響を避けるよう、エンジン全体がシールド網板で覆われる。特に、中和器からは正の高電位部分が絶対に見えないように、前面の加速電極孔部の外側は、孔のない板でシールドされている。中和器は、長さ約15cmで、 0.3ϕ のタングステン線または、 1ϕ のシーズヒータの表面に酸化剤を塗布したものをを用いた。これをエンジン前面シールド板に絶縁板を介して取り付けしたが、上流端がエンジン加速電極から20mm、イオンビームの外縁から5~10mm離れるよう、流れ方向に巾約10mmに6往復ジグザグに曲げ、ビーム周りに沿って長さ約25mmとなるようにした。シーズヒータの方がタングステン線に比べて、加熱に必要な電力が小さく、表面積が大きいので、中和器として有効である。エンジンの作動、全体性能については、文献(8)に述べられている。

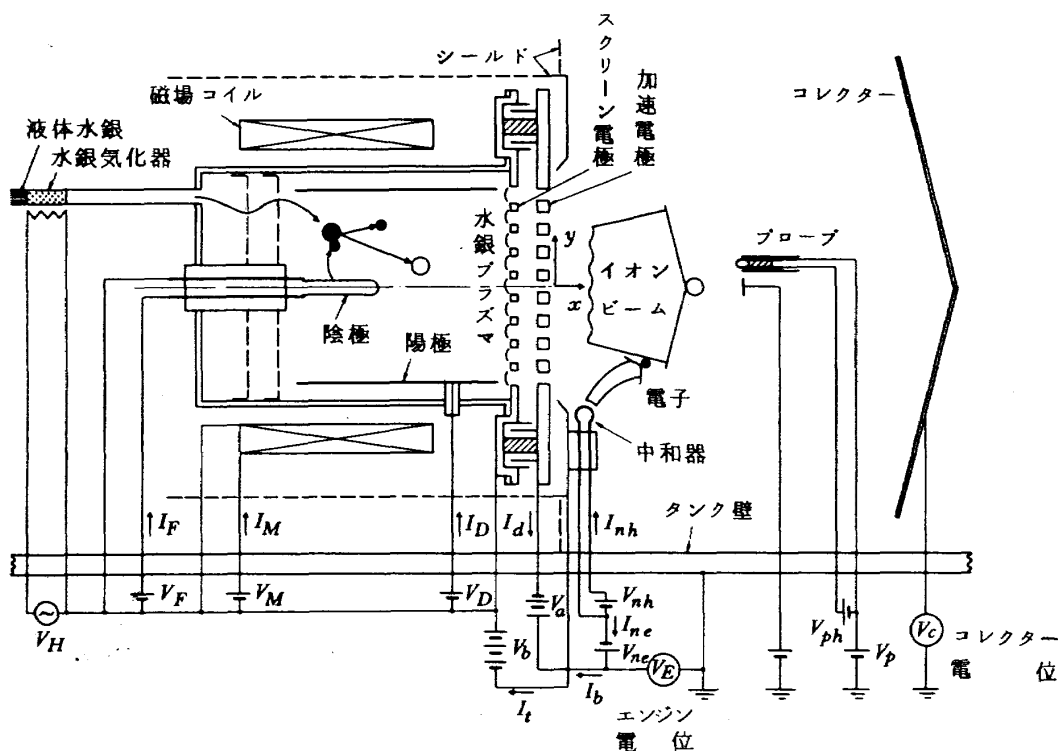
エンジンから加速噴出される数 10 km/sec の高速イオンと、中和器からイオンビームに注入される電子をなるべく全て捕えるために直径1mのステンレス製の大きなコレクターを、エンジンの下流約1.5mに設置した。イオンの反射を避けるために、コレクターは開き角 60° の円錐状にした。

3.2 プロープ

(1) 電流密度分布 噴出イオンビームの空間的電流密度分布を測定するために、第3図に示される2種類のプローブが用意された。図(a)に示されるのは、直径5mmのステンレス円板を細いアルミ管で支持したものであるが、高速イオンの衝突による2次電子放射およびイオンが反射するという可能性がある。このために、図の(b)に示されるような入口の直径5mmの深いファラデーカップも準備した。プローブの電位は場合に応じて変えられ、電流は抵抗を通してXYレコーダーで記録される。

(2) 電位分布 空間電位の測定には、第4図(a)に示されるエミッションプローブを用いた。これは熱電子放出を利用したもので、2本のガラス管から外に出た 0.1ϕ のタングステン線からなり、このフィラメントを充分加熱して熱電子放出可能状態に保ち、その電位を変化させる。電子放出面の電位が周囲電位より低いと電子は放出され、高いと放出が押えられる。外部からのイオン、電子の入射による影響は、フィラメントを加熱しないで得られる電圧-電流特性から知ることができる。第4図(b)に測定点の電位決定の例が示される。図からわかるように、2つの場合の電流が一致する最低電位がその点の電位である。

空間電位を測定するために、前述の電流密度を測定するための円板も使用された。円板を高抵抗を介して電気



第2図 実験装置概略

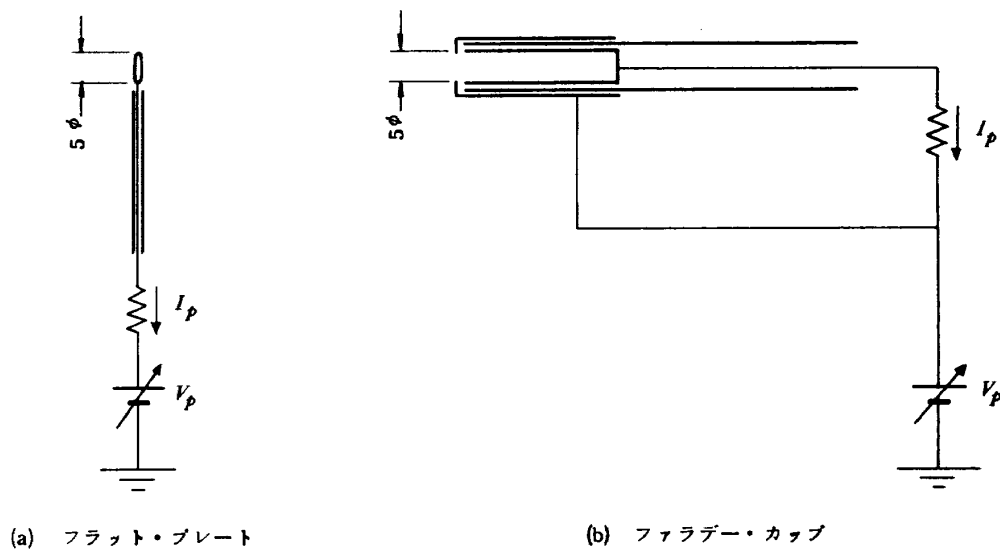
的に浮かし、空間のフローティング電位を知ることにより空間電位分布を推定する。空間電位は、これで得られる電位より多少高いはずである。

実験は、水銀流量をある設定値に保ち、エンジンを色々な状態で作動させ、その時の噴出ビームについて測定を行う。コレクターを接地(タンク壁電位)した場合には、中和器を働かせて、いくらでも電子を放出すればエンジンの作動は行われる。しかし、真空タンクという外壁に囲まれた中で、宇宙での作動に近づけることが必要で、ここではエンジン、コレクターともに浮かした状態で実験することが多い。したがって、エンジンから放出されるイオンと電子の電流は等しく、コレクターに捕えられるイオンと電子の数も同じになり、中和の主要条件を満足し、宇宙での作動に近いといえる。この場合、エンジンとコレクターのタンク壁に対する電位は、電圧計で測ることができる。

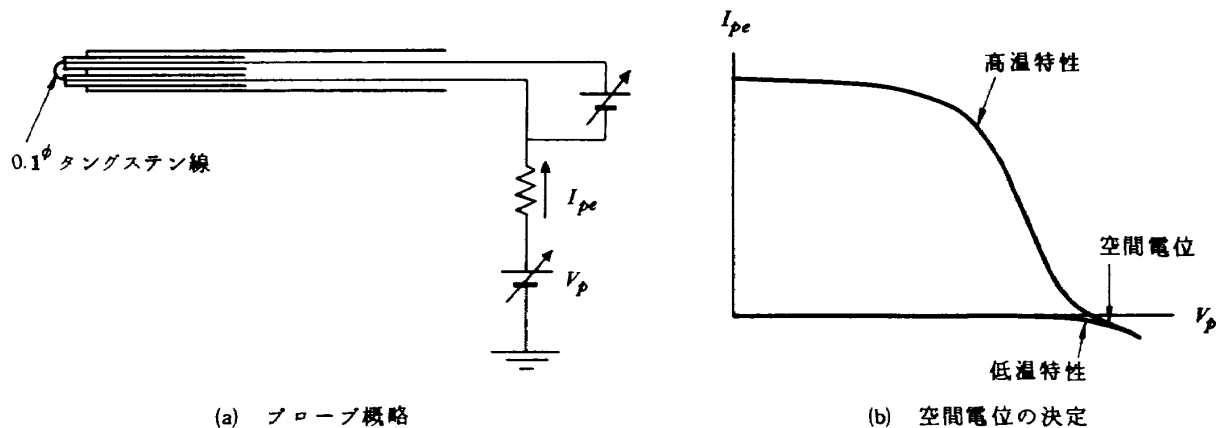
測定に使われるプローブは、移動装置にとりつけられ、

円筒状であるエンジンおよび噴出ビームの中心軸に沿う方向(x 方向)に平行に移動でき、それに垂直な方向(y 方向)には、中心軸から600mm離れた平行軸まわりの回転により移動できる。プローブは、主にビーム中心軸を横切るように設定される。

イオン電流は、プローブを中和電位に対して負電位にして、電子を追い返すことによって測定し得る。イオンのエネルギーは充分高いので、多少のプローブ電位によって、イオンの流れが乱されることはない。一方、電子を単独で捕えることは困難で、イオンと共に捕え、上記イオン電流と比較して電子電流が得られる。しかし、電子の方はプローブ電位の影響を受け易く、本来はプローブを空間電位に保って測定すればプローブ挿入の影響が最小になると思われるが、場所によって空間電位が異なること、時によっても多少異なり真の空間電位に保ち難い。



第3図 電流密度分布測定用プローブ



第4図 エミッション・プローブとその特性

4. 実験結果と考察

イオンエンジンの作動状態を写真にとったものが、第5図に示される。エンジンが放電だけで、イオンの加速が行われていない場合の写真が図(a), (b)に、また、スクリーン、加速両電極間に高電圧を加えてイオンの加速が行われている場合の写真が図(c), (d)に示される。図の(a), (c)は前面から見たもので、放電部はフィラメントからの白色光にプラズマの青い光が混ざっている。加速の行われない場合には、青い光を出すプラズマがそのまま図(b)のように噴き出し、前面から見ると、図(a)のようにその光で加速電極がぼやけてしまう。イオンの加速が行われると、光を出さないイオン状で噴出するため、図(c)のように電極の孔の形、配置がはっきりと見分けられる。この大きさのエンジンでは、イオンビーム電流は40 mA程度での作動が適当であるが、この場合エンジンを横から観測していると、放電だけのときは、肉眼でも、弱く青く発光するプラズマ噴流が見える。加速電圧を加えてイオンの加速が始まると同時に、この光は全然見えなくなる。このように普通の作動では、イオンビームの形を見ることができないが、特に、タンク内の気体密度を少し高くすれば、その気体粒子が高速イオンとの衝突で励起されて出す光により、ビームが形を現わす。図(d)は、エンジンに供給される水銀の流量を特に大きくして作動したときの写真である。これは、放電室でイオンにならずに噴出する水銀原子が、後からくる高速イオンとの衝突で励起され放射する光が捕えられたものである。

横からとった写真から、プラズマの球状噴流にたいして、イオンは直線的で、あまり拡がらずに噴出していることがわかる。

推進剤の流量は、水銀気化器の温度を調節して選ぶことができるが、あまり流量が大きいと、加速両電極間での放電が頻繁になり、一方流量が小さいと磁場による電子のカットオフ状態等で放電室での放電が不可能あるいは不安定になるのでエンジンの作動範囲はビーム電流で10~50 mAである。ビーム電流が比較的大きい40 mAでの作動が安定で放電の心配も少ないので、40 mAイオンビームを主として調べる。この場合、放電々圧は40 V、放電々流は0.5~0.6 Aとした。まず適当な水銀流量で放電、イオンの加速を行い、それから流量を調節して、得られるビーム電流を設定値に保つ。

中和器が適度に加熱され、電子が放出されれば、イオンエンジンの作動は行われるが、電子放出能力が小さいと噴出ビームの電位が高くなり、電位が高すぎると異常放電が起りエンジン作動が不可能になる。ビーム電位の高低は、コレクター電位の高低で知ることができる。ビ

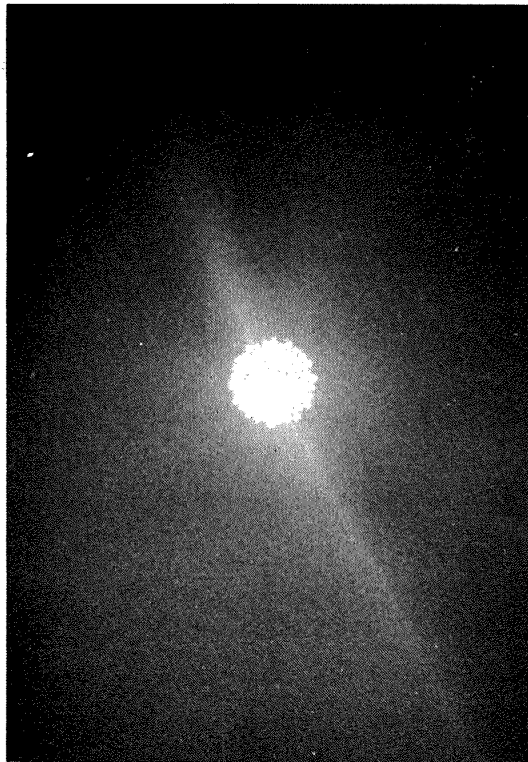
ーム中の電流密度を測定するのに、ファラデーカップを用いるのが最良と思われたが、それ自身およびその支持部がイオンビームの障碍となり、それらがビーム中にない時より、ビーム電位はかなり下ることがわかった。この障碍をできるだけ小さくするために、前述の円板プローブで支持部も細くした結果、ビーム電位への影響はかなり改善された。イオン電流密度の測定結果も、ファラデーカップによるのとはほとんど差が見られなかった。このことは、イオンが高エネルギーなので、下流での多少の電位変化の影響を受けず、また、円板からの2次電子放射があまりないことを意味する。以上により、主に円板プローブが電流密度測定に用いられる。

4.1 電流密度分布

イオン電流密度の半径方向(y方向)分布の1例が、ビーム中心軸に沿う、加速電極からの距離xをパラメータにして、第6図に示される。ビーム電流の大きい場合($I_b = 40 \text{ mA}$)には、エンジンに最も近い位置での分布に表われる電流密度の山と谷は、山が加速電極の孔に対応すると思われる。エンジン近くで約 2 mA/cm^2 のイオン電流密度が、エンジンから遠くなるにつれて小さくなり、ビームが拡がっていることがわかる。下流に行くにつれて、山と谷も滑らかになり、次第に中心軸上で最大の電流密度となる平凡な形の分布になる。中心軸上の最大値の半分の電流密度を与える半径の変化は、第7図に丸印で示される。これにより、ビームはほぼ直線的に拡がり、その拡がり半角は約 6° であることがわかる。試みに、全イオンがこの拡がり角をもつ軌道に沿って噴出されるとすると、拡がりによる推力損失は約5%である。第6図(b)にはビーム電流の小さい場合の電流密度分布の変化が示されているが、ビーム電流が大きい場合より上流で分布が滑らかになる傾向が認められる。

(1) イオン電流密度の加速電圧による変化

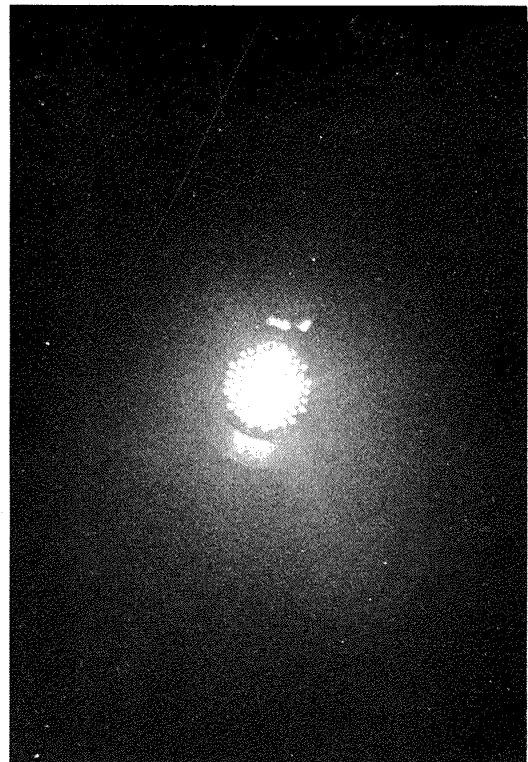
他のパラメータを一定に保ち、加速電圧だけを変えて、イオン電流密度分布への影響をみる。エンジンからの距離が $x = 5 \text{ cm}$ では第8図のようになる。この図の例によると、加速電圧が低い場合には、ビームの中心から縁の方まで、電流密度が割合一定である。加速電圧が高くなると、縁の部分に比べて中心部の電流密度の増加が顕著である。加速電圧が高くなるとわずかではあるがビームの巾がせまくなるのが認められる。これは、プラズマ境界面が電圧によって変り、高いとイオンビームが収束するためと思われる。加速電圧が十分に高い場合の電流密度分布は、放電室中、特にスクリーン電極に近い場所でのプラズマ密度分布に対応すると考えられる。このことから、放電室中のプラズマ密度は、中心部が高いといえ



(a) 放電室放電のみ、イオン加速なし



(b) 放電室放電のみ、イオン加速なし

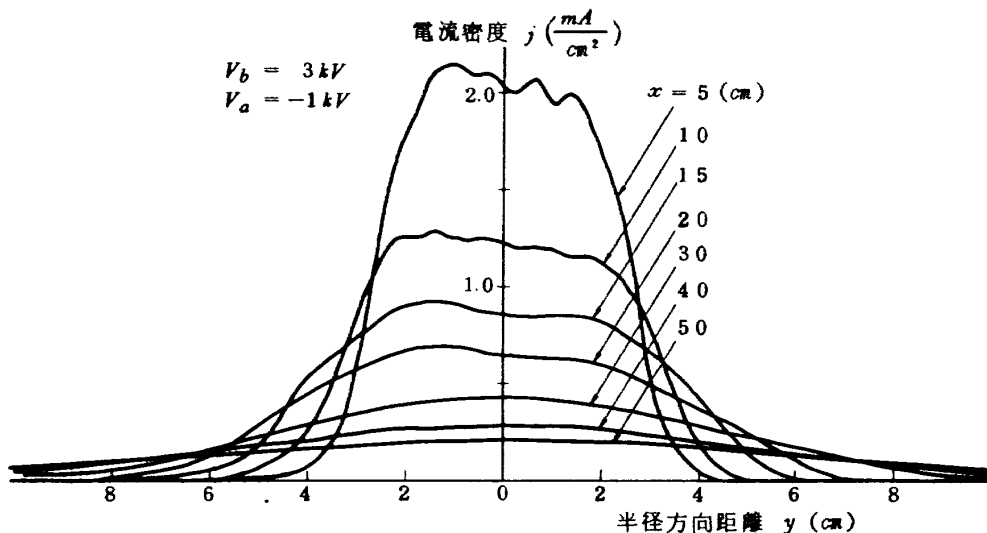


(c) イオン加速あり

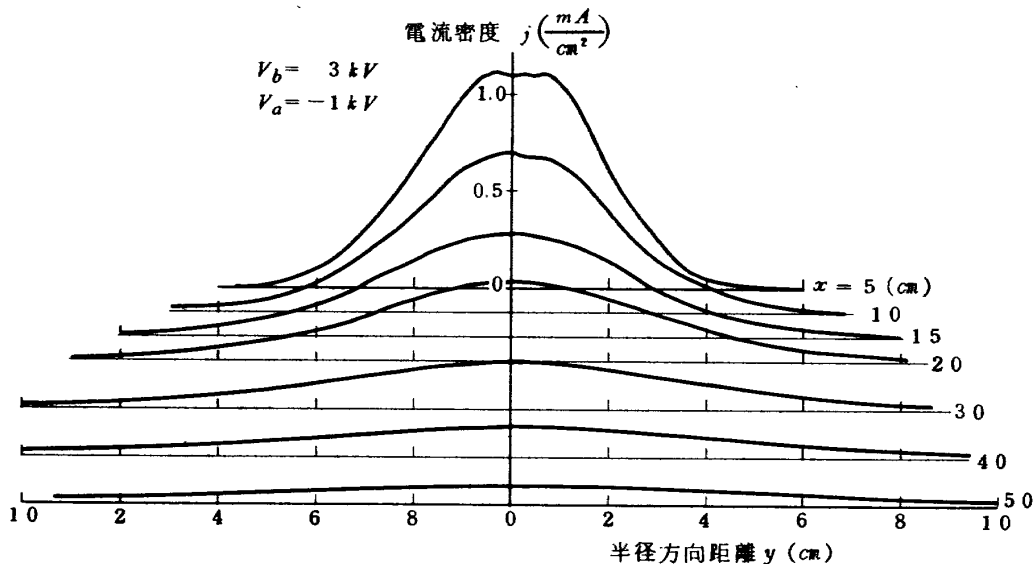


(d) イオン加速あり (水銀流量; 大)

第5図 イオンエンジン作動外観

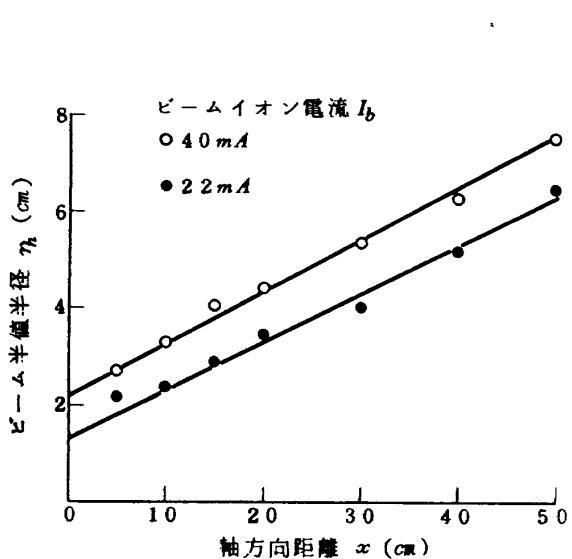


(a) ビームイオン電流 40 mA

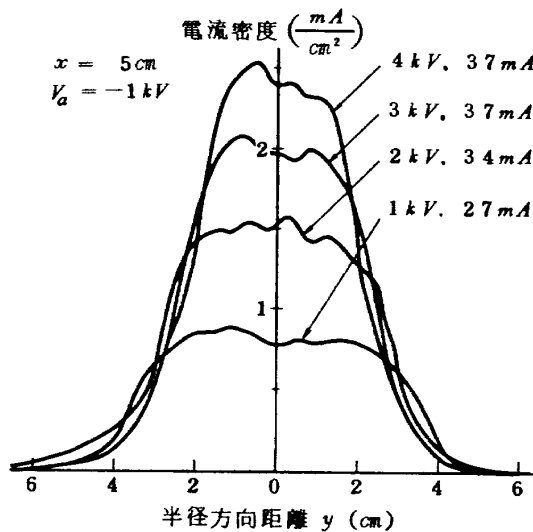


(b) ビームイオン電流 22 mA

第6図 ビームイオン電流密度分布



第7図 イオンビームの拡がり



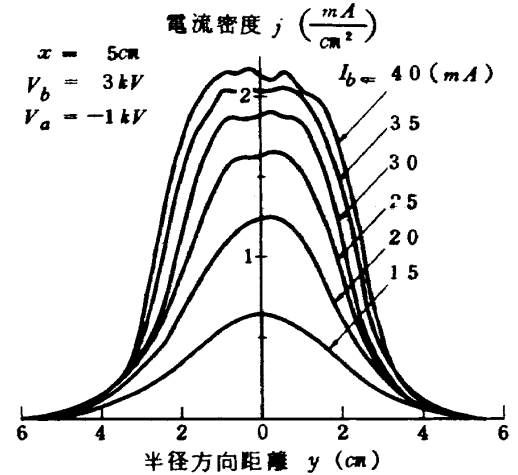
第8図 ビームイオン電流密度分布の加速電圧による変化

る。中程度の加速電圧では、加速電極部でのプラズマからのイオン抽出能力にたいして、中心部では放電室のイオン供給能力が多少余力があるが、外周部では既に飽和の傾向をみせているということがいえる。イオンエンジンとしては、電極の全ての孔で同じようなイオン加速状態にあることが望ましく、十分に高い加速電圧でも、電流密度一定の分布を得る、すなわち、放電室でのプラズマ密度が一様になるのが理想である。

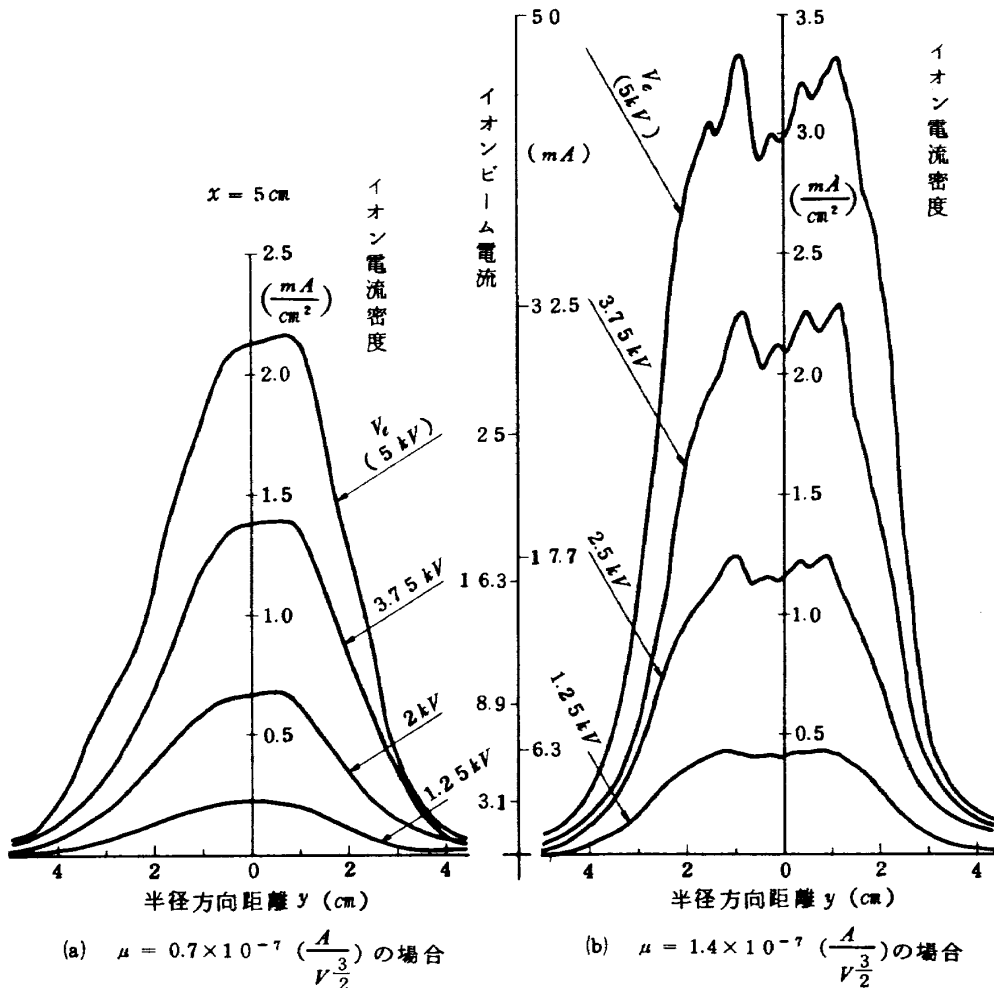
(2) イオン電流密度分布の水銀流量による変化

加速電圧等を一定に保ち、水銀流量を変えた場合には、イオン電流密度は第9図のようになる。電流密度の大きさは別として、分布の形の変化は加速電圧の変化に対するのと似ている。流量の小さい場合には、中心に近い程電流密度の大きい分布で、流量の大きい場合は、電流密度の一様な、比較的平らな分布となる。ここでも、与えられた加速電圧 $V_a = 4 \text{ kV}$ に対して、流量の小さい場合は、放電室で下流に拡散してきたイオンのほとんどが抽出加速されるが、流量が大になるとイオンの抽出能力に疑問がもたれる。

(3) エンジンの相似作動によるイオン電流密度分布
加速電極の寸法、配置および加速されるイオンの種類が不変であるので、エンジンの相似作動は加速部での $j_0 / V_a^{3/2}$ の数値を一定にすることによって実現できよう。ここで、プラズマ境界面でのイオン電流密度 j_0 は、場所



第9図 ビームイオン電流密度分布の水銀流量による変化



(a) $\mu = 0.7 \times 10^{-7} \left(\frac{A}{V^{3/2}} \right)$ の場合

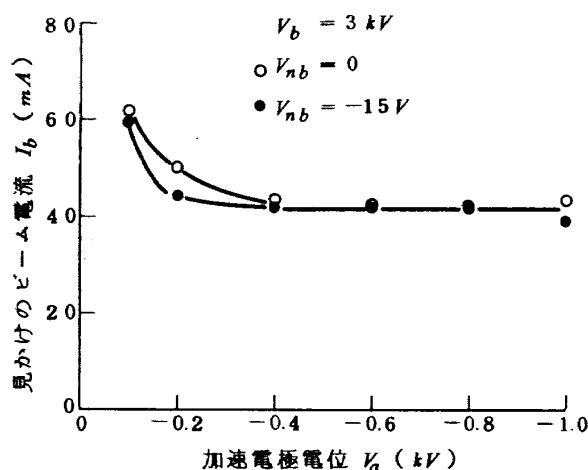
(b) $\mu = 1.4 \times 10^{-7} \left(\frac{A}{V^{3/2}} \right)$ の場合

第10図 ビームイオン電流密度分布の相似性

によっても変わるので、代りに全イオン電流 I_{bi} を使い、水銀流量、放電々力、磁場をそれに応じて、ほぼ比例して変える。このようにして得られるパービアンズ $\mu = I_{bi}/V_a^{3/2}$ の値が同じになるエンジン作動でのイオン電流密度分布を示したのが第10図である。明らかに、パービアンズの値によって分布の形が変わるが、同一パービアンズでは相似な分布形が得られる。このように数多い電極の孔をもつエンジンでも相似分布が得られたということは、 I_{bi} の中味で一定でない部分 j_0 の半径方向の分布形が、水銀流量の変化に対して、目立つ変化をしていないことを意味する。これは、水銀流量に対して、放電々力、磁場を適当に選んだことにもよろう。

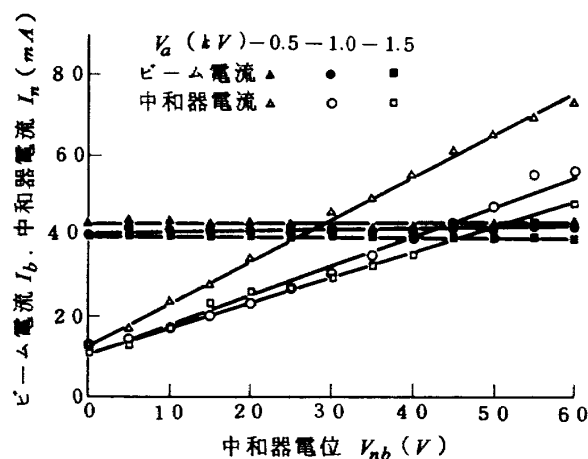
4.2 イオンビームと中和器との干渉

中和器から放出される電子が上流の高電位部へ引かれて逆流しないよう、一般には、前述のように加速電極を負電位にする必要がある。この電位はどの程度であるかを知るために、正味加速電圧 V_b を 3 kV に保ち、 $I_b = 40 \text{ mA}$ のビームについて、加速電極電位を変えて、電子の逆流の有無を調べた。第11図によると、 V_a が約 -0.4 kV より低いとビーム電流が一定であるが、これより浅い電位では、見かけ上ビーム電流が増加する。この増加は、イオン電流の増加とは考えられず、明らかに電子が加速電極の孔を通り抜けて逆流することを示す。この場合は、エンジンを正常に作動させるには加速電極は、 -0.4 kV より深くすればよいといえる。この実験シリーズでは、加速電極の孔径は 3.5ϕ であるが、別の機会に 2.5ϕ の孔径の電極を用いた場合に、 $V_a = -100 \text{ V}$ でも逆流が起らず、 -50 V 近くでやっと逆流がみられた。これは当然予想されることで、孔径が小さいために、最も電位の高くなる孔中心部への電極電位の影響が強いためである。



第11図 中和器放出電子の逆流

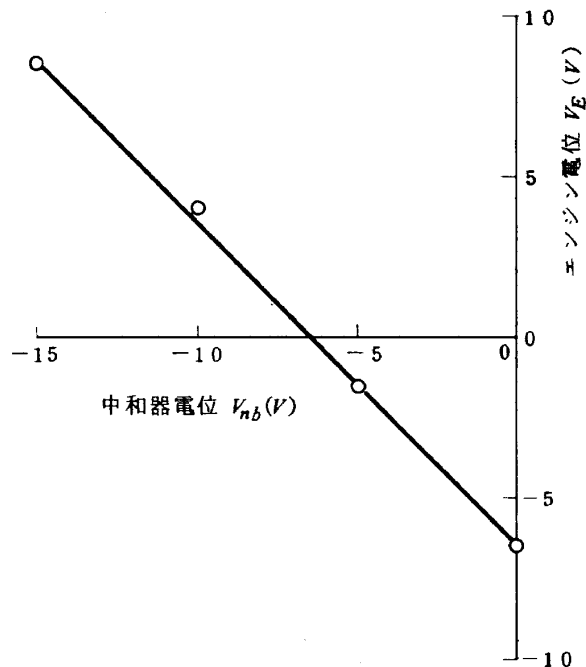
試みに、イオンエンジン（外側シールドと支持部分）およびコレクターをタンク壁と同電位にし、中和器の電位を変えてみた。第12図に、中和器の電位に対する、イオン電流と中和器からの電子電流の関係が示される。 $V_a = -1 \text{ kV}$ では、中和器電位 $V_{nb} = -45 \text{ V}$ のときだけイオンと電子の電流が等しく一見中和が行われているようである。電子電流は、 $V_{nb} < -45 \text{ V}$ ではイオン電流より大きく、 $V_{nb} > -45 \text{ V}$ では小さくなり、中和の第一条件を満たさない。別の加速電極電位でも傾向は同じである。しかし、電子不足のときにみられる放電もなくエンジンは順調に作動する。電子電流がかなり不足しても、電位の高いビーム中へ電子がトラップされ、空間的にはある程度中和が行われていると思われる。一方、電子電流が過大の場合でも、電子はコレクターに飛来するのではなく大部分がタンク壁へ行く。このようにタンク壁の存在は、中和の実験には大きな影響を与える。この影響をできるだけ小さくするには、エンジンをタンクから完全に電気的に浮かせて、タンク壁を宇宙電位と考えればよいだろう。さらにコレクターを浮かせて、ビームを全部捕集すれば、噴出ビームによる、エンジンとタンクとの電気的結合を断つことができる。これでもなおタンク壁があるという影響は残るだろうが、これにより宇宙での使用条件も一応満足する。



第12図 中和器電位に対する電流の変化
(コレクター接地)

ビーム電流 $I_b = 40 \text{ mA}$ の場合について、各部の電位の関係を見る。エンジンとコレクターの電位はタンク壁電位を基準にとり、中和器電位はエンジン電位を基準にとる。第13図に中和器電位の変化に対するエンジン電位の変化を示す。両電位の関係はほぼ直線的で中和器電位によって、エンジン電位を適当に選ぶことができる。エンジン電位は、宇宙での機体電位と考えられ、宇宙空

間でエンジンを使用する場合に、そこに存在するプラズマとの干渉を左右するものとして重要である。干渉を小さくするために、エンジン電位をできるだけ宇宙空間プラズマ電位近くに保つことが望ましいといわれる。^{6), 9)} 中和器とエンジンの電位の関係は直線的ではあるが、タンク壁電位を基準にした中和器の電位を求めると、ほぼ $-6.5V$ と一定である。コレクターすなわちビームの電位もほとんど変化しないことから、中和器からの電子放出に有効なビームと中和器間の電位差は、不変であることがわかる。逆に考えてみると、タンクという宇宙に対するビームの電位が決まり、ビームと中和器間電位は一定で、結局、宇宙電位に対してエンジンの電位だけが変わることになる。



第 13 図 中和器電位に対するエンジン電位の変化

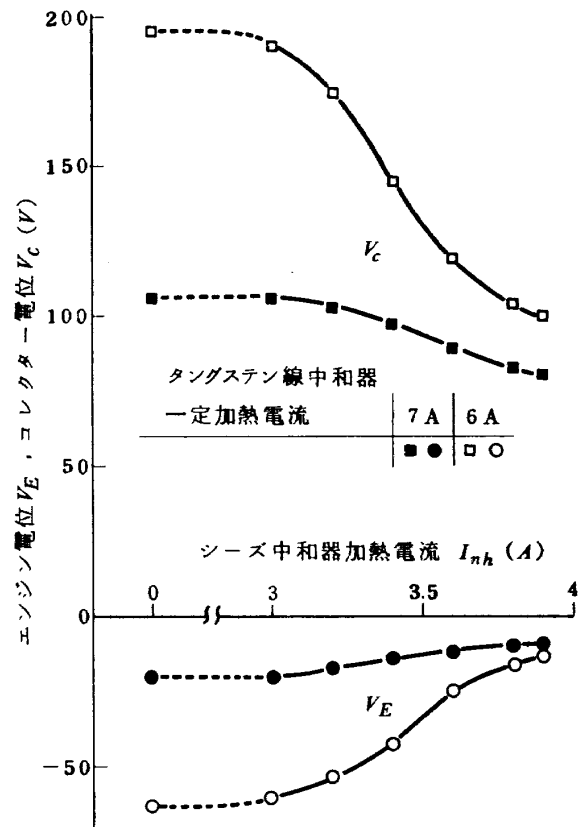
勿論、中和器の電子放出状態やイオンビームの状態が変ればビーム電位は影響を受ける。

中和器の加熱電流を変えると、同一イオンビームでもコレクターおよびエンジンの電位が変化する。中和器加熱電流を大きくするとコレクター電位すなわちビーム電位が下がるが、これは中和器の単位面積当りの電子放出が盛んになるためとは考えられない。それは、ビームのイオン電流すなわち全電子放出電流が不変であり、また加熱電流を一定にして、イオン電流を増せば、それだけ電子放出も増すからである。実験で安定作動の行なわれた中和器加熱電流範囲では、電子の大部分は放射制限ではなく、空間電荷制限下で放出される。

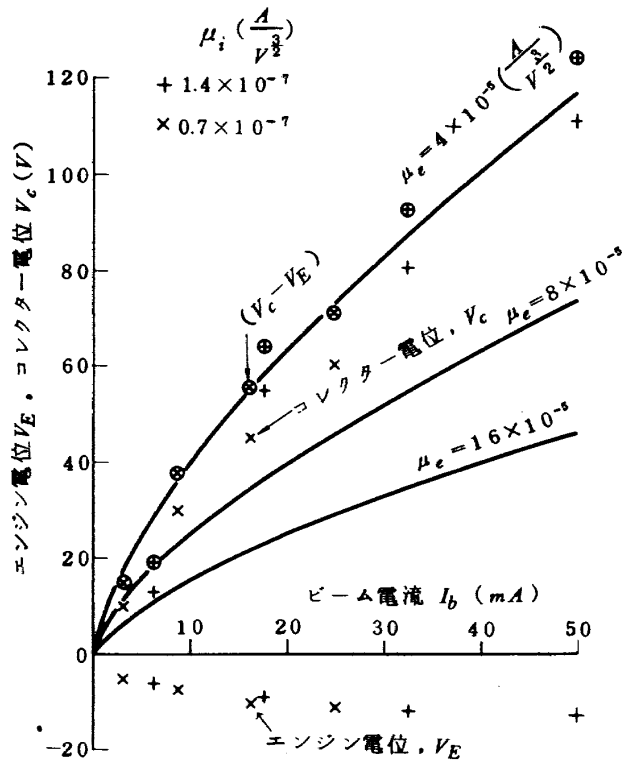
前出の式を考えると、中和器の位置は、この場合不変

であるから、加熱電流変化により、中和器の電子放出可能面積が変わる結果、ビームの電位が変化することになる。中和器のフィラメント温度には、部分的に高低があり、特に支持棒に近い部分の温度が低いはずである。加熱電流増加につれ、それまで電子放出がなかった部分も高温になり、電子放出可能となるということで説明される。さらにエンジン作動に安全なためと、面積効果を見るために、タングステン線およびシーズヒーターの二つの中和器を取り付け、フィラメント中和器加熱電流を一定に保ち、シーズ中和器の加熱電流を変化させて、コレクターおよびエンジン電位の変化を調べた結果が第 14 図に示される。加熱電流を増大させるにつれて、初め一定の両電位が、 $3A$ を越えると次第に下ってくる。これは、シーズ中和器の表面温度も次第に高くなり、電子放出可能な温度になるからである。この中和器の面積分だけ電位が下ることがわかる。加熱電流が高い方で電位降下の割合が下ってくるのは、中和器表面積に限りがあることを示す。

中和器からの電子放出の様子をさらに詳しく調べるために、中和器加熱電流を一定に保ち、イオン電流すなわち放出電子電流の変化に対するエンジンとコレクター電位の変化をみると第 15 図のようになる。ここで、イ



第 14 図 中和器電子放出能力によるエンジン、コレクター電位の変化



第15図 ビームイオン電流によるエンジン、コレクター電位変化

表1 パービアンズ選定

加速電圧 V_e (kV)	ビームイオン電流 I_{bi} (mA)	
5	50	25
3.75	32.5	16.3
2.5	17.7	8.9
1.25	6.3	3.1
パービアンズ $\mu_i (\frac{A}{V^{3/2}})$	1.41×10^{-7}	7.06×10^{-8}

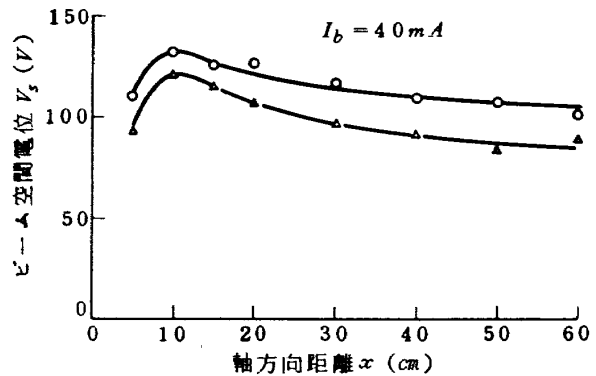
オンビームの形が一定になるよう、表1のように、加速電圧に対してビーム電流を調節し、イオンビームのパービアンズ μ_i を一定になるようにした。イオンビームの形は、第10図に示されたが、パービアンズの影響をみるため二つの μ_i を選んだ。この場合、中和器電位はエンジン電位と同じにし、コレクター電位を、ビーム電位の代りとする、コレクターとエンジンの電位差がカップリング電圧すなわち電子抽出電圧とみなせる。この抽出電圧は、第15図で、外側に丸印をして表わされている。この図から、ビーム電位は、イオンビーム電流には関係するが、 μ_i の違いによる目立った差がみられない。

μ_i の相異はビームの拡がり、すなわち中和器とビームの間隔との間隔の相異として、電子の抽出に効果をもつと思われる。 μ_i の二つの値でこの間隔の変化の割合が小さいといえる。

実験点は、電子についてのパービアンズ μ_e が一定の電子放射の曲線の中の一にほぼ一致することから、イオンビームが電子抽出電極の役割をはたし、任意のビーム電流に対して、中和器との間で、(8式)にしたがう電位差を自動的に保持することが推定できる。

4.3 噴出ビーム中の電位分布

これまで、ビームの電位をコレクター電位で代用したが、ビームの中の電位分布はどのようになっているだろうか。ビーム電流 40 mA の中和ビームについて、エミッションプローブで電位分布の測定をした結果が次に示される。第16図はビームの中心軸に沿っての電位分布で



第16図 ビーム空間電位の軸に沿う分布の例

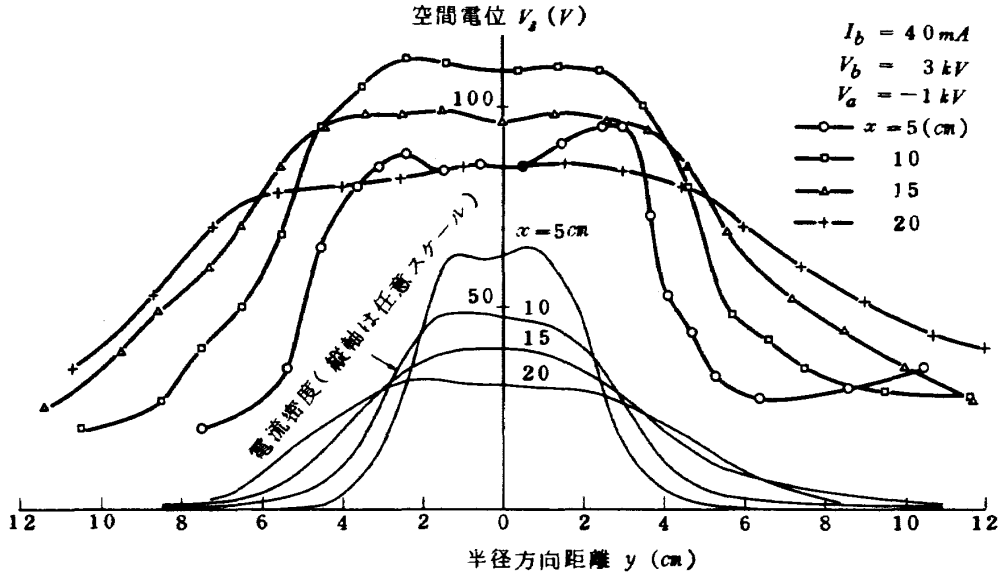
ある。加速電極からの距離 x が 5 cm から 10 cm まで、ビームの電位は次第に高くなり、10 cm 付近で最高で、そこから下流へ行くにつれ電位はゆるやかに下降し、コレクター電位につながる。第17図には、ビームの半径方向の電位分布が示される。比較のため、同じエミッションプローブを用いて得られた、対応する位置での電流密度分布の概要が細線で同じ図に描かれている。空間電位は、ビームの存在する所で高く、電流密度が中心附近の電流密度のほぼ半分の値を与える半径より内側では、多少の凸凹はあるが一様であり、そこから外へ行くにつれて次第に下っていく。ビーム外側でイオンの存在しない空間でも、電位がかなり高められている。

空間電位とは異なるが、その電位に近い値を与えると思われる浮動電位を測定した結果が第18図に示される。これは、電流密度を測定するのに用いた円板プローブを電氣的に浮かせてイオンビーム中を移動させ、その電位を X-Y レコーダーに記録したものである。エミッション・プローブ使用の場合は、測定点にプローブを固定し

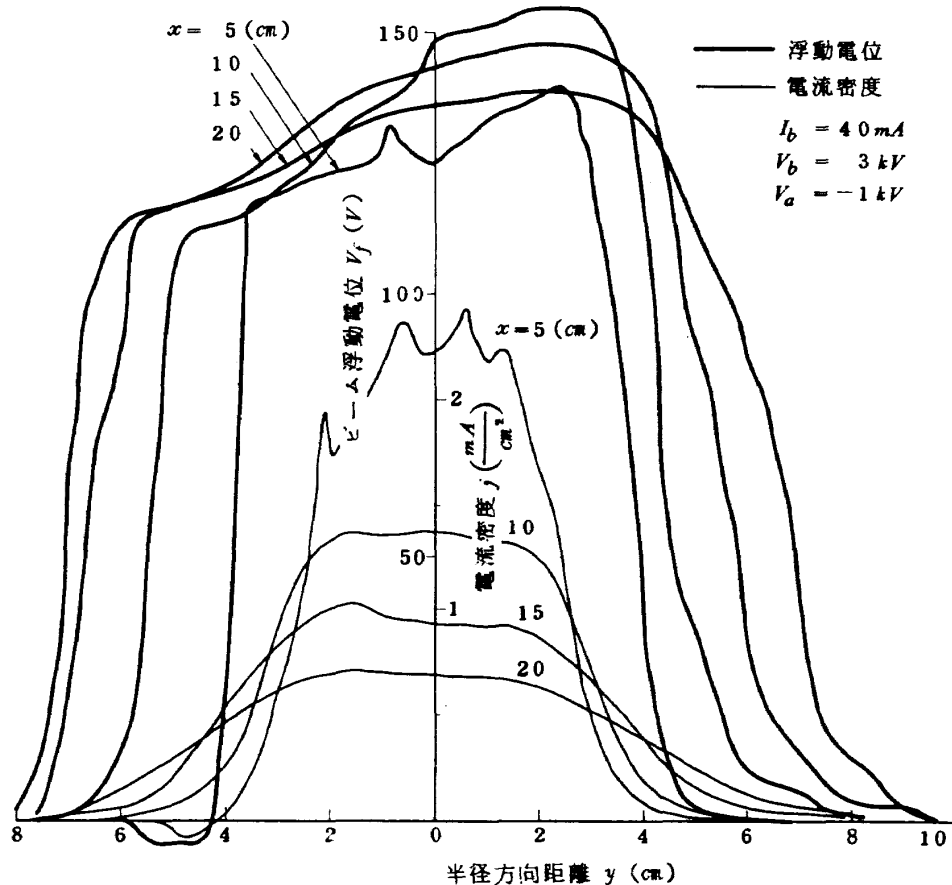
て、プローブ電位の掃引をしたのち、空間電位が決定されるのに対し、円板のフローティング・プローブ使用の場合は、プローブを移動させながら電位の記録ができるので、データを得るのにはずっと簡便である。

エミッション・プローブによる空間電位分布とこの浮

動電位分布との相異をみると、浮動電位は当然のことながら、ビームの外側で急激にタンク壁電位近くまで下るのに対して、空間電位はゆるやかに下がっていたことである。同時測定を行なわなかったため、値そのものを比較することはできないが、中心附近の両電位に大きな差は



第 17 図 ビーム空間電位の半径方向分布の例



第 18 図 ビーム中の円板プローブ浮動電位の分布

ないようである。浮動電位分布に顕著なのは、分布の中心から左側の電位が低くなっている。これは、エンジンのそれに対応する側に中和器があり、電子がそちら側に多少集まっているためと思われる。

電位分布を参考に中和プラズマ流の概略を想像するために、ポアソン方程式(2)をエンジンやビームの形状から円筒座標表示

$$\frac{1}{y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y^2} + \frac{1}{y^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -4\pi qn$$

で表わす。円周(θ)方向の変化がなく、ビームの中心附近を考えると、第3項と第1項を省略すると、

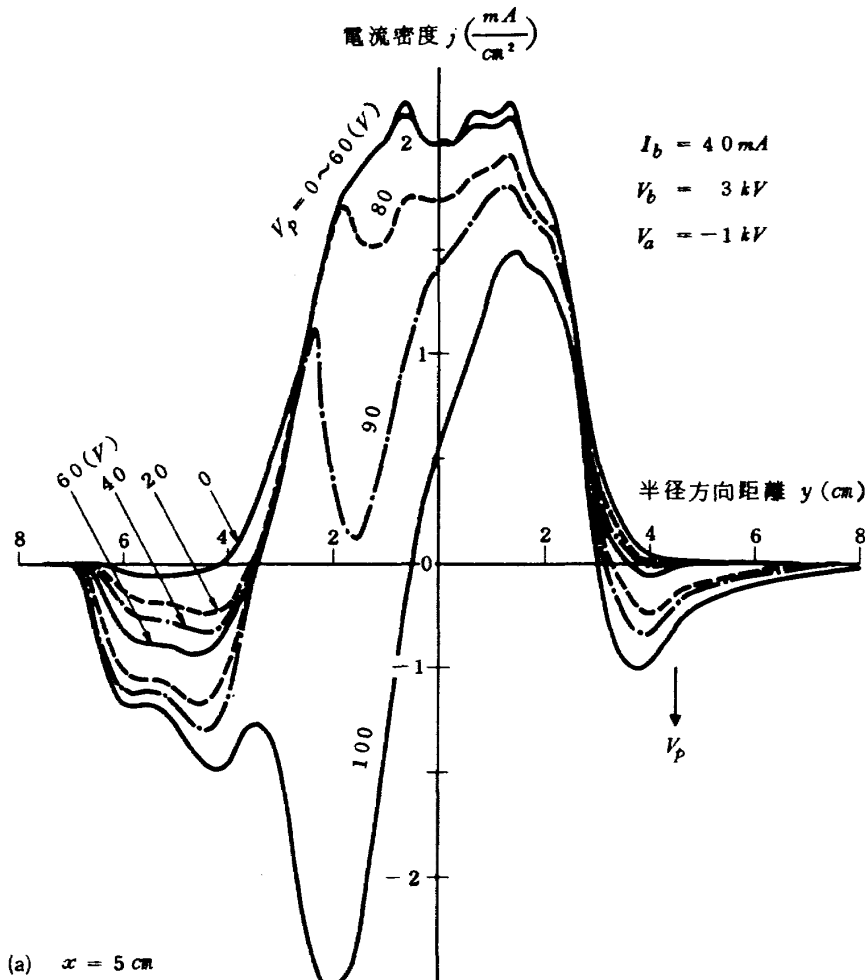
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx -4\pi qn$$

となる。第16, 17図より、 x = 約15cmより上流では左辺が全部負であり、したがって右辺も負、すなわち電荷密度は正となる。ここでは、イオンの数密度の方が大きく、余分の正電荷の作る電場による中和器からの電子の抽出、加速に続いて混合が行なわれる領域といえる。

$x = 20$ cmより下流では電位傾斜の変化はゆるやかではあるが、 $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$ は正で、 $\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}$ は負になり、上式の左辺は上流に比べ0に近づいている。ここでは、数密度もイオンと電子が接近し、完全な中和により近い状態になっている。

4.4. 電子電流密度分布

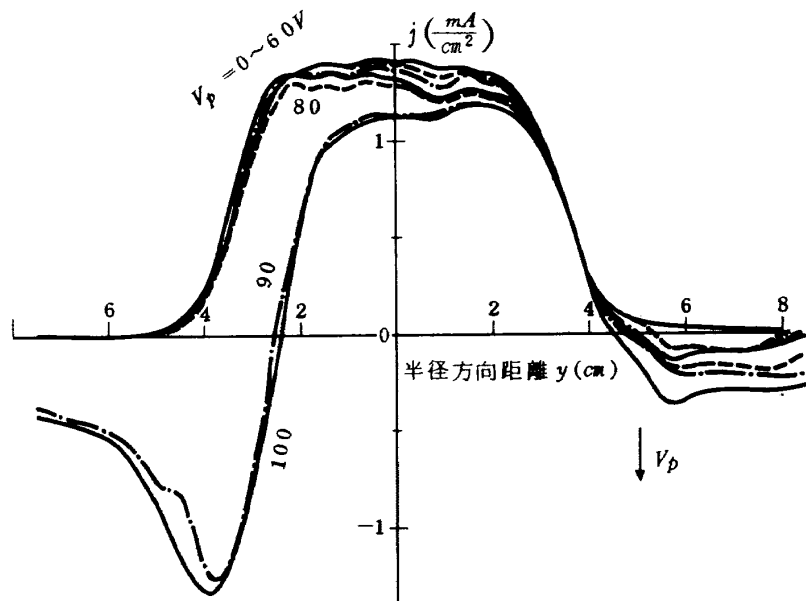
ビーム中で、主流のイオン流に中和器からの電子がどのように混ざるかということは興味がある。電子の密度と速度の分布が測定できればよいが、イオンのように一方向に高エネルギーをもたないので、そのイオンとの分離もできなく、精度ある測定は困難である。イオン電流密度の測定に用いた円板プローブによれば、イオンとともに電子も捕えることができる。高エネルギーのイオン流は、プローブ挿入の影響をほとんど受けないので、イオン単独の電流密度との差から、電子電流密度が得られる。電子流の方は、プローブの影響を受け易いが、プローブが測定点の空間電位に保たれれば、流れへの影響は最小と考えられる。しかし、空間電位は一定でなく、ブ



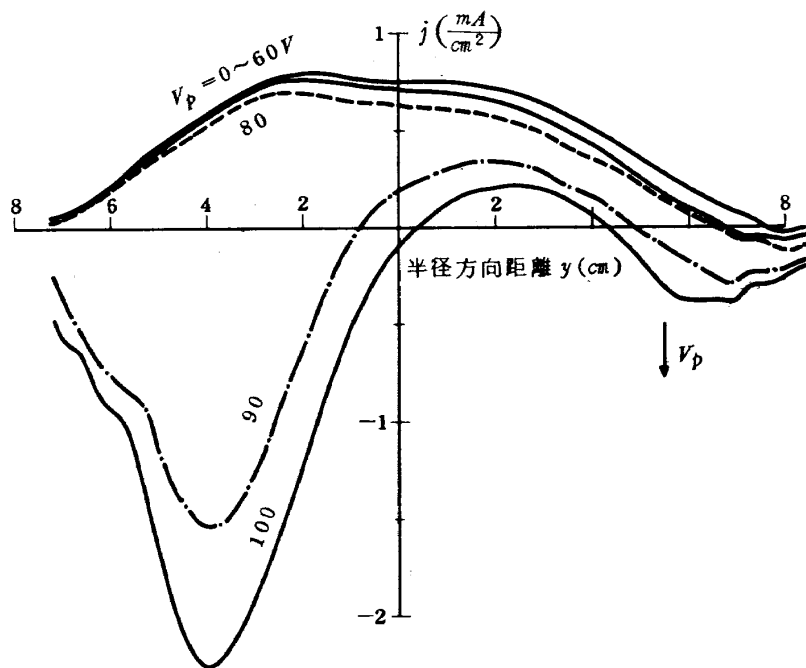
第19図 電流密度分布のプローブ電位による変化

プローブを移動しながら空間電位を測定し、プローブをその電位にするという操作もむずかしいので、プローブ電位を一定に保ち電流密度分布を記録し、その電位を段階的に変えてみる。プローブ電位をパラメタにした電流密度分布の一例を第19図に示す。この例だと、場所によって多少異なるがビームの電位と思われる90V附近で分布が変わり、低い電位では、プローブに入ってくる電子が少ない。イオン電流との差をとって、各プローブ電位での電子電流密度分布に直すと第20図のようになる。これ等の分布から、イオンビームがほぼ軸対称の電流密

度分布をもっていたのにかたいして、電子は、中和器のある側に片寄っていることと、中和器と反対側のビームの縁近辺にもいるが、中間で電子の少ないところがある。電子電流密度の非対称性は、中和器の片寄った分布にもよると思われる。中和器から引き込まれた電子は、イオンの影響を受けながらビーム中を横断し、反対側の縁で再び半径方向の向きを変え、ビーム中にトラップされて下流へ向う。イオンとともに適当な電位分布を形成し、結局その影響のもとにビーム中で半径方向に大きな振動を繰返しながらイオンとの混合が進むと思われる。しか



(b) $x = 10\text{cm}$



(c) $x = 20\text{cm}$

第19図 電流密度分布のプローブ電位による変化

し、数密度としては $10^8/cm^3$ 程度と小さいので、測定領域下流でも、各部で数密度一致ということとはできないのであろう。

電子電流密度の分布は、電位、ビーム中での振動の他に、電子の熱運動等によっても大いに影響される。こういう影響を調べるには別のプローブと計測方法が必要で、ラングミュア・プローブ等の使用が考えられる。

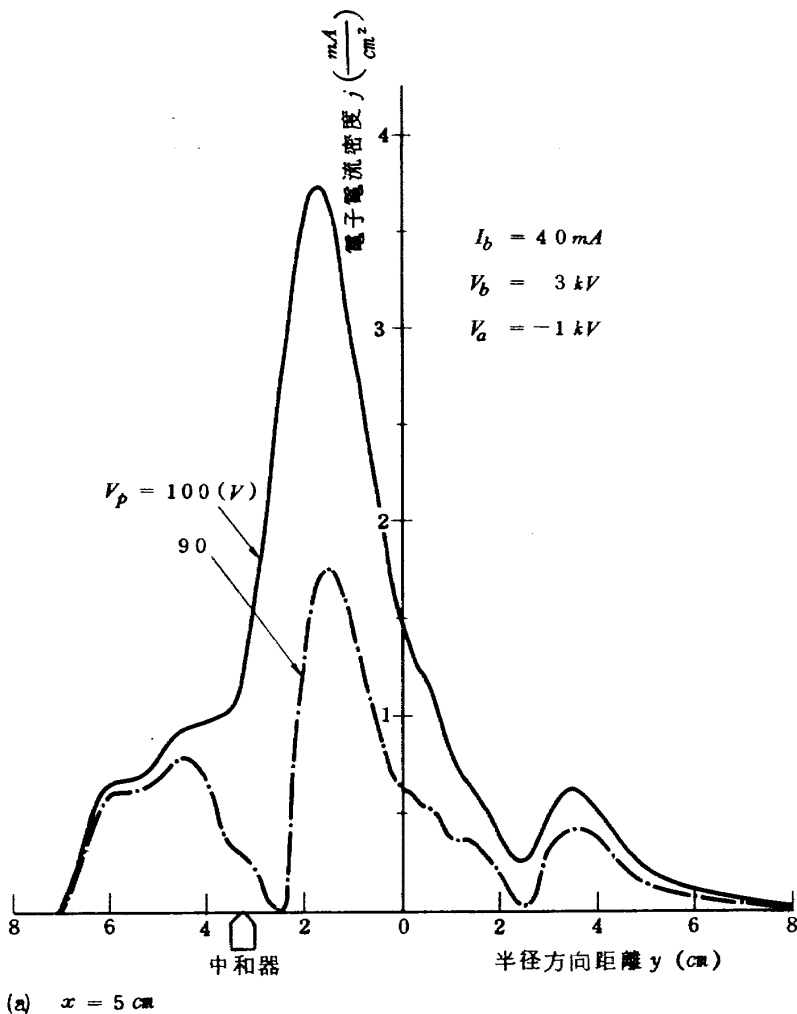
5. 結 論

ビーム直径5 cmの電子衝撃型水銀イオンエンジンからの噴出ビームについて、各種プローブを用いた実験研究より次のことがいえよう。

- 1) ビームのイオン電流密度は、ファラデー・カップまたは平板プローブを用いて測定でき、ビームの概要を知ることができる。分布の形は、エンジンの作動条件によって変わるが、ビームイオン電流と加速電圧で作るパービアンスの関数である。
- 2) ビームに挿入されるプローブまたはその支持部が

ビーム寸法に比べて充分小さくないと、ビームの電位や中和電子の流れに影響が表われる。

- 3) ビームの拡がりの半角は約 6° である。
- 4) ビームの電位は、中和器とビーム端との間の空間電荷制限により必要電子流供給が行われるということと決まる。この電位を低くするには、フィラメント型中和器を使う場合には、中和器とビーム間距離を短くするか、電子放出面積を増すかによる。ホロー陰極中和器を用いれば空間電荷を小さくできる。
- 5) エンジン外壁(あるいは機体)の電位は、中和器とエンジン外壁との電圧(中和器電位)によって変え得る。
- 6) ビームの電位分布は、エミッション・プローブにより測定できるが、支持部とビームとの干渉をできる限り小さくする必要がある。
- 7) ビーム中の電子電流密度の精度よい測定は非常に困難である。ビームの空間電位附近に保たれた平板プローブでの測定によれば、分布の形はイオン電流



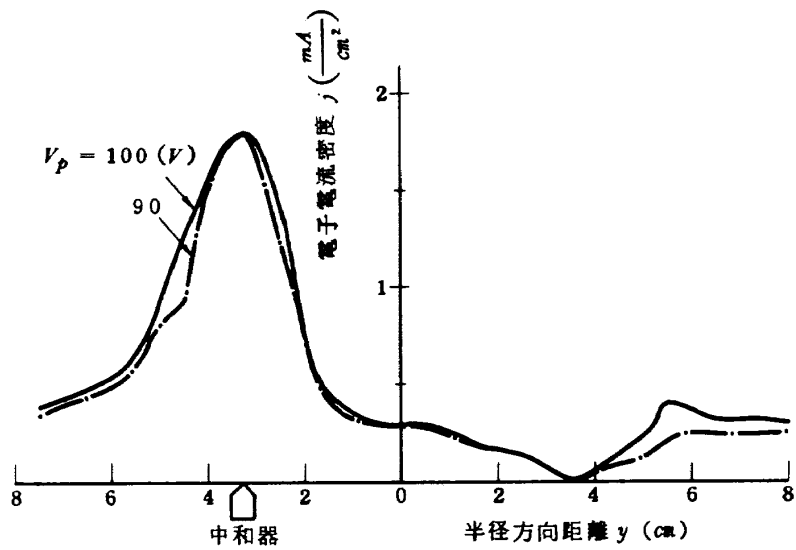
第20図 ビーム空間電位附近のプローブに流入する電子の電流密度分布

密度と異なり，電子は，ビーム中心より周辺近くに集まる傾向が見られるが，特に中和器のある側にそれが顕著である。

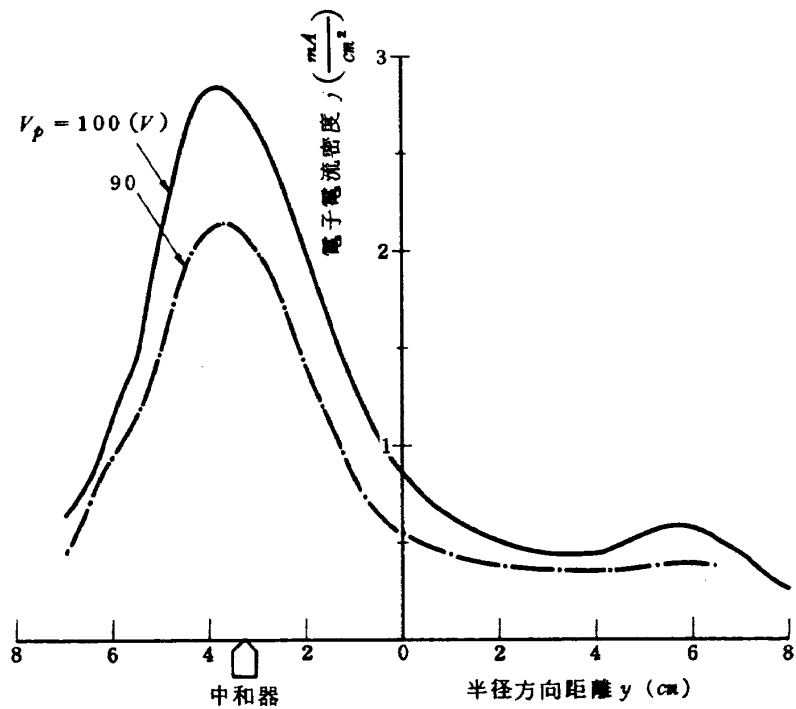
6. 記号説明

- a_0 電極間距離 (代表的距離)
- A_e 中和器の電子放出面積
- F 推力
- I_b ビーム電流

- I_{be} ビーム電子電流
- I_{bi} ビームイオン電流
- I_{ne} 中和器放出電子電流
- I_{nh} 中和器加熱電流
- j 電流密度
- j_0 プラズマ境界面での電流密度
- k 比例定数
- K 中和器電子放出能力
- l 中和器，ビーム間距離



(b) $X = 10 \text{ cm}$



(c) $X = 20 \text{ cm}$

第 20 図 ビーム空間電位附近のプロープに流入する電子の電流密度分布

\mathcal{L}	無次元相似パラメタ
m_i	イオン質量
\dot{m}_i	イオン質量流量
n	数密度
n_{be}	ビーム中の電子数密度
n_0	代表的数密度
q	電荷
r_h	ビーム半径
s	境界面に沿う長さ
t	時間
t_0	代表的時間
v	速度
v_i	イオン速度
V_a	加速電極電位 (減速電圧)
V_b	スクリーン電極電位 (正味加速電圧)
V_c	コレクター電位
V_{cp}	カップリング電位
V_e	加速電圧
V_E	エンジン(機体)電位
V_{nb}	中和器電位
V_p	プローブ電位
x	軸方向距離
y	半径方向距離
θ	円周方向角
Θ	イオン噴出速度の中心軸となす平均角
φ	電位
μ	パービアンス
μ_e	中和器電子放出系のパービアンス
μ_i	イオン加速系のパービアンス

参 考 文 献

- 1) Masek, T.D. and Macie, T.W., "Solar Electric Propulsion System Technology", AIAA Paper No. 70-1153, AIAA 8th Electric Propulsion Conference, August 1970.
- 2) Rulis, R.J. "SERT II: Design Requirements for Integrating Electric Propulsion into a Spacecraft", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 8, No. 3, March 1971.
- 3) Kerslake, W.R. et al., "SERT II: Mission, Thruster Performance, and In-Flight Thrust Measurements", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 8, No. 3, March 1971.
- 4) Bagwell, J.W., "Review of SERT II: Power Conditioning", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 8, No. 3, March 1971.
- 5) Shaw, G.A.D. and Falconer, J.D., "SERT II: Solar Array Power System", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 8, No. 3, March 1971.
- 6) Jones, S.G., Staskus, J.V., and Byers, D.G., "Preliminary Results of SERT II: Spacecraft Potential Measurements Using Hot Wire Emissive Probes," AIAA Paper No. 70-1127, AIAA 8th Electric Propulsion Conference, August 1970.
- 7) Staskus, J.V., and Burns, R.J., "Deposition of Ion Thruster Effluents on SERT II Spacecraft Surfaces", AIAA Paper No. 70-1128, AIAA 8th Electric Propulsion Conference, August 1970.
- 8) 中村嘉宏, 東久雄, 宮崎勝弘, "電子衝撃型水銀イオンエンジンの研究", 航空宇宙技術研究所報告, NAL TR-326, 1973年7月
- 9) Ogawa, H.S., Cole, R.K., and Sellen, J.M., Jr., "Measurements of Equilibration Potential Between a Plasma "Thrust" Beam and a Dilute "Space" Plasma, AIAA Paper No. 69-263, AIAA 7th Electric Propulsion Conference, March 1969.

航空宇宙技術研究所報告398号

昭和50年1月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
