

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-326

電子衝撃型水銀イオンエンジンの研究

中村嘉宏・東久雄・宮崎勝弘

1973年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

- TR-311 界面最大引張り応力基準での固体推進での降伏曲面 (三次元) について
On a Failure Criterion of a Solid Propellant under Tri-axial Stress Fields 1973年3月 遠藤修司, 河田幸三
- TR-312 最適制御理論を応用したフレア制御系について
Simulation Study on Flare Control System by Optimization Theory 1973年3月 渡辺 顯, 堀川勇壮
- TR-313 BTE 翼型の遷音速二次元翼列についての一実験
Experimental Investigation of Two-Dimensional Cascade Performances with Blunt Trailing Edge Blade Sections at Transonic Inlet Mach Number Range 1973年3月 坂口 一, 近藤 博
高森 晋, 岩下敬吾
- TR-314 低アスペクト比後退角平板翼の遷音速フラッタ特性におよぼす翼端付加質量の重心位置の影響
Some Effects of Center of Gravity Locations of Added Mass on Transonic Flutter Characteristics of Low Aspect Ratio and Sweptback Thin Cantilever Wing 1973年3月 中井 暎一, 森田甫之
菊池孝男, 東久保正
高橋 実
- TR-315T Natural Vibration and Flutter of Cylindrically Curved Panels Apr. 1973 Yuji Matsuzaki
- TR-316 推力中断型固体ロケット用プロペラントの組成と圧力指数の関係
Relation between the Compositional Variables and the Pressure Exponent of Controllable Solid Rocket Propellant 1973年4月 五代富文, 清水盛生
伊藤克弥, 西村久男
種村利春, 藤原 勉
- TR-317 ファンエンジンの性能に関する考察
Some Considerations on the Performance of the Fan Jet Engine 1973年5月 鳥崎忠雄, 森田光男
関根静雄
- TR-318T A Convergence theorem of nonlinear semi-groups and its application to first order quasilinear equations June 1973 Tadayasu Takahashi
- TR-319 フライングテストベッド全機作動実験
—予備・第一次・第二次実験—
Ground Operation Tests of Flying Test Bed for VTOL Aircraft at National Aerospace Laboratory 1973年6月 滝澤直人, 田辺義一
渡谷昭義, 小川敏雄
藤枝敦俊, 甲斐忠夫
宮本義人, 鳥崎忠
小野幸一
- TR-320 地球の重力の作用下にある人工衛星の運動に関する研究—運動が長期間にわたる場合—
The Study on the Motion of an Artificial Satellite in the Earth's Gravitational Field—in the Case of the Long Maneuver of Free Orbital Motion— 1973年6月 武内澄夫
- TR-321 空冷軸流タービンの空力性能に関する研究
(第1報 空冷タービンの設計および全体性能に関する実験研究)
Cold-Air Investigation of an Air-Cooled Axial-Flow Turbine (Part 1 Turbine Design and Overall-Stage Performance without Supply of Cooling Air) 1973年12月 山本孝正, 高原北雄
能瀬弘幸, 井上重雄
臼井 弘, 三村富嗣雄
- TR-322 IC 演算増幅器を利用した乱流頻度計
Application of Intergrated Circuit Operational Amplifiers on Turbulence Intermittency Meters 1973年6月 綿貫忠晴, 佐藤淳造
- TR-323 月と太陽の引力の作用下にある地球の人工衛星の運動に関する研究
The Study on the Motion of an Artificial Earth Satellite under the Gravitational Attractino of the Sun and Moon 1973年7月 武内澄夫, 松島弘一

電子衝撃型水銀イオンエンジンの研究*

中村嘉宏**・東久雄**・宮崎勝弘**

Experimental Investigations on a 5 cm Mercury Electron Bombardment Ion Engine

By Yoshihiro NAKAMURA, Hisao AZUMA
and Katsuhiko MIYAZAKI

A 5 cm-diameter mercury electron bombardment ion engine with a filament type cathode was tested. As an accelerating system, screen-accelerator grids were employed.

The effects of the variations of the parameters, such as flow rate of mercury, magnetic field strength, discharge voltage, discharge power and accelerating voltage, on the ion beam current were investigated. The mass utilization efficiency of the propellant is derived as a function of the ion production cost.

The relations of ion beam current to accelerating voltage are normalized on the basis of the similarity law for ion flow. The characteristic curves are very close, but there are small differences between them. Probably these differences are caused by conditions in the discharge chamber. Glass as well as metal was used as a screen grid material. In the case of the glass screen grid, the drain current becomes small at the lower accelerating voltage and the saturation of the beam current with the increase of the accelerating voltage is more gradual than in the case of the metal screen grid.

1. 緒 言

従来の化学ロケットに対する非化学ロケットの概念が現れたのは、二十世紀初頭のことである。その非化学ロケットの中で、性能的に優れ、実用に近いものに電気推進ロケットの一つである、イオンエンジンがある。

イオンエンジンについては、アメリカ、ソ連をはじめ、欧州各国でもその実用化のために開発研究が進められている。殊にアメリカにおいては、電子衝撃型イオンエンジンについて、SERT(Space Electric Rocket Test) I 計画(1964年)での弾道飛行、SERT-II 計画(1970年)での半年間の軌道飛行により、宇宙空間での試験を既に行っており^{1),2)}、多少の問題点はあったが成功し、実用の目途がついたといえる。

我国においては、若干遅れてスタートしたが、ここ数年、電子衝撃型イオンエンジンの実用化を目指して

開発がすすめられている。

この報告書では、我々の一連の実験研究の第一段階として、フィラメント陰極を使用した、5 cm 電子衝撃型イオンエンジンの実験結果について報告する。

本実験は、試作一号機として、製作及び実験技術を身につけることを主眼とし、5 cm 型イオンエンジンの放電特性、加速特性等を調べることにより、性能向上への足掛りを得ることを目標にした。

2. 記 号

- B_c 中心磁束密度
- C_i イオン生成コスト
- d 加速電極、スクリーン電極間距離
- e 電子電荷
- F 推力
- I_b ビーム電流
- I_c コレクター電流
- I_D 放電電流
- I_d ドレイン電流

* 昭和48年2月7日受付

** 宇宙研究グループ

I_F	フィラメント加熱電流
I_H	水銀気化器加熱電流
I_M	磁場コイル電流
I_{ne}	中和電子電流
I_{sp}	比推力
I_t	総イオン電流
j	イオン電流密度
j_0	プラズマ境界へ流入するイオン電流密度
\dot{m}	水銀流量
m_i	イオン質量
\dot{m}_i	イオン流量
P_D	放電電力
P_0	必要全電力
P_j	噴出イオンジェットパワー
S	プラズマ境界総面積
V_a	加速極電位
V_b	正味加速電圧
V_c	コレクター電位
V_D	放電電圧
V_e	加速電圧
V_F	フィラメント加熱電圧
V_H	水銀気化器加熱電圧
V_M	磁場コイル電圧
V_{ne}	中和器電位
v_i	噴出イオン速度
ϵ_0	真空の誘電率
η_P	電力効率
η_{PD}	放電電力効率
η_u	推進剤利用効率

3. イオンエンジン

3.1 イオン源の条件

イオンエンジンには、接触電離型、電子衝撃型、高周波放電型等があるが、イオンエンジンとは、正原子イオンが適当な静電場によって加速されて、推力を得るエンジンの総称である。

イオンエンジンは、推進剤供給系、イオン源、イオン加速系、イオンビーム中和系の四つの要素から成立している。これに加えて電源およびパワーコンディショナーが必要となる。

これらをイオンエンジンとして働かせるためには、種々の条件が必要となるが、例えば、現在最も関心のあるイオン源についていえば³⁾、次の条件を備えていることが必要である。

1. イオン源から引出されるイオンの平均電流密度

が十分高く、加速部面積が適当な大きさである。

2. 充分軽量である。

3. 可能な限り効率よく、電気エネルギーをイオンの運動エネルギーに変えること。

4. 2, 3年の長く、しかも信頼できる寿命を持つこと。

5. 事実上、推進剤の原子をほとんど全てイオンにしなければならない。これは飛行の経済性から望ましいばかりでなく、さもないと、イオン源からのがれた中性原子が加速機構付近にただよい散乱、浸蝕、絶縁破壊を起すからである。

3.2 電子衝撃型イオンエンジンの作動原理と性能

電子衝撃型イオンエンジンは、イオン源として放電を利用したもので、発明者の名をとって、カウフマン型イオンエンジン⁴⁾ともいわれ、接触型イオンエンジンとともに、1950年代の後半より、特にアメリカで精力的に研究がなされてきた。図1に、実験に使用した電子衝撃型イオンエンジンの断面と配線図を示す。

推進剤としては、通常水銀を用いる。これは、水銀が保存に容易であることや、ミッションを考慮した必要パワー、比推力等の関係から、現在最も適当とされている。

水銀は貯蔵タンクより蒸発器に送られ、そこで蒸気となり放電室に入る。放電室は、円筒状の陽極と、その軸上にある陰極とから成っている。その両極間には数十Vの電位差が与えられ、陰極から放出された電子は加速されて、水銀に衝撃を与え電離する。その結果、放電室内にプラズマが形成される。電離効率を高めるために、軸方向に磁場をかけて電子に回転運動を与え、電子が陽極に到達する迄の飛行距離をのぼし、電子と水銀原子との衝突機会を増大させる。磁場は、実験室においては、放電室の外側に巻いたコイルに電流を流すことによって与えられるが、実用の際には、放電室両端の適当な形の磁極と、放電室外に設けた両磁極を結ぶ数本の永久磁石によって得られる。

このようにして放電室の中に形成されたプラズマから、放電室の一端に配置された2枚の穴あき電極板の間に高電圧をかけ、イオンだけを静電的に加速する。二枚の電極のうち、プラズマに接するものをスクリーン電極、外側のものを加速電極と呼び、直径数mmの円い孔が多数、相対する孔の中心軸が一致するようになっている。両極間の電位差が十分に大きく、プラズマの状態と適合すると、加速されたイオンビームの収束が良好になって、加速電極へ直接飛び込むイオンはほとんどなくなり、イオンは孔を通して外部へ高速

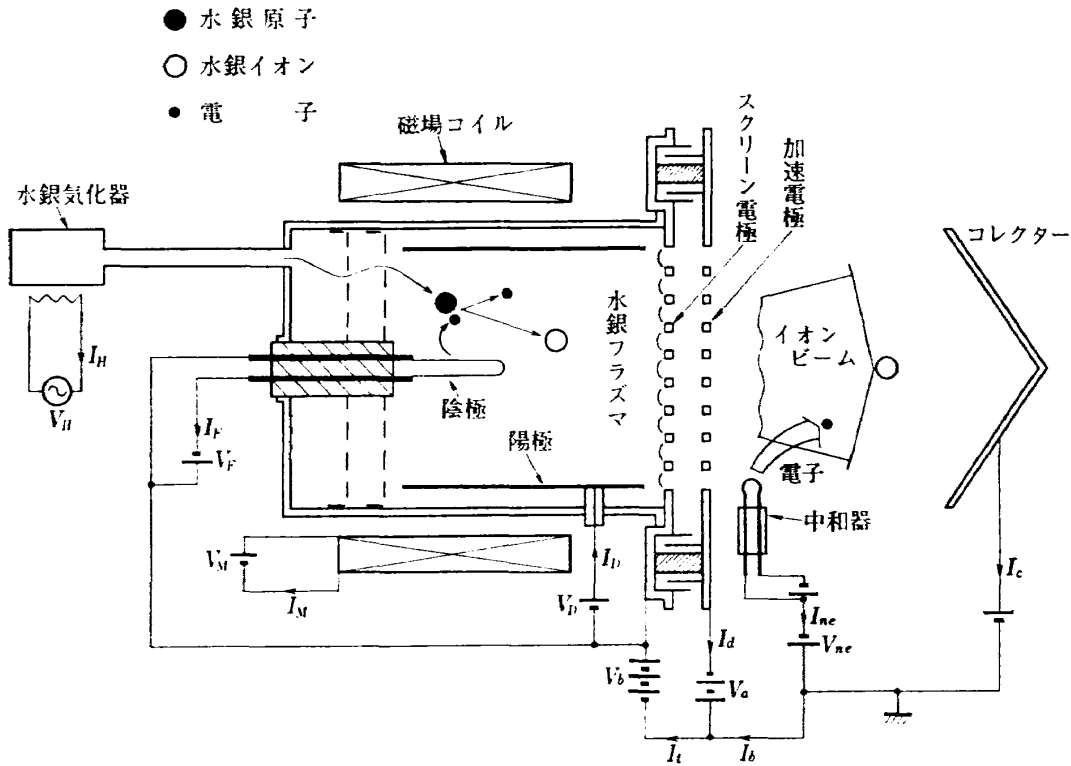


図 1

で噴出する。

引き出されるイオンビームの量には限界があって、そのイオン電流密度は、Child-Langmuir によって与えられた次の関係

$$j = \frac{8 \epsilon_0}{9} \left(\frac{e}{2 m_i} \right)^{1/2} \frac{V_e^{3/2}}{d^2}$$

によって制限される。しかし、推進剤供給量がイオンの抽出能力より少ない場合には、勿論、推進剤供給量がその限界を与える。

イオンエンジンを宇宙で使用する場合には、正イオンばかり放出すると宇宙船が負に帯電し、放出したイオンを引戻すことになるし、イオンビームも電子不足で電位が高く、後からくるイオンを押し戻すことになり、結局、イオンの加速が出来なくなる。こういう不都合をなくすために、加速した直後にイオンビームの中へ絶えず同数の電子を注入して、宇宙船およびビームの中和を行なう。この役目は中和器がする。

イオンを加速し、中和器からの電子の放電室への逆流を防ぐような空間電位分布となるよう、各電極に電位を与える。図 2 に関連電極附近の様子と電位分布の概略を示す。プラズマからのイオン抽出に有効なのは加速電圧 V_e 、電子の逆流防止に有効なのは加速極電位 V_a である。イオンは V_e, V_a だけ加速、減速されて

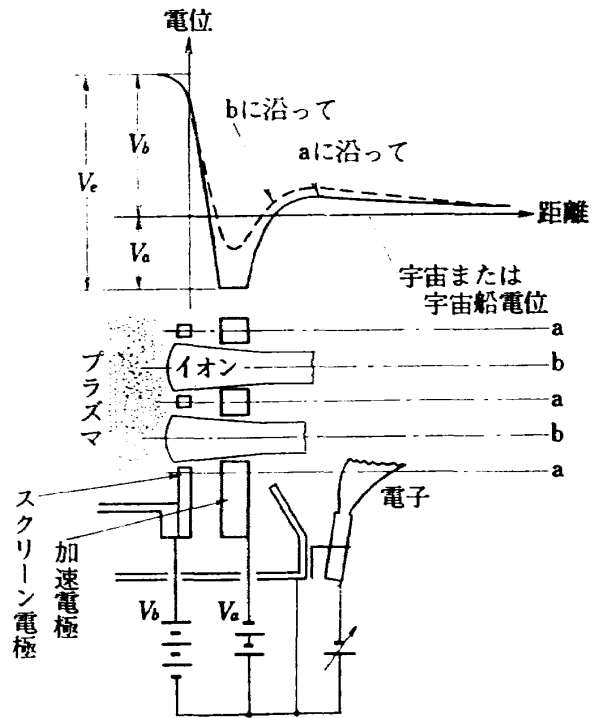


図 2

最終的に正味加速電圧 (スクリーン電極の電位分) V_b に対応する速さで噴出する。即ち水銀の場合、

$$v_i (\text{km} \cdot \text{s}^{-1}) = 0.982 V_b^{1/2} (\text{Volt})$$

である。

性能としては、推力 F 、比推力 I_{SP} 、必要全電力 P_0 、効率 η 等が重要である。重量は当然出来る限り軽くしなければならない。

噴出イオンのパワー（ジェットパワー）および推力は

$$P_j = \frac{1}{2} \dot{m}_i v_i^2 = I_b V_b$$

$$F = \dot{m}_i v_i$$

で与えられ、推力を得るのに有効に利用されるイオンの流量 \dot{m}_i （イオンビーム電流 I_b に比例）と推進剤供給流量 \dot{m} の比、およびジェットパワーと必要全電力 P_0 との比が、それぞれ推進剤利用効率、パワー効率であり、両者の積がエンジン効率となる。すなわち

$$\eta_u = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}}$$

$$\eta_p = P_j / P_0$$

$$\eta = \eta_u \cdot \eta_p$$

両効率とも高いことが望ましいが、一方が高いと他方が低くなりがちである。

性能のもう一つの目安として、イオン生成コストがある。これは、一つのイオンを生成するために要した放電エネルギーであって、放電の有効性を見るのに便利である。すなわち

$$C_i = \frac{P_D}{I_b/e} \quad (\text{eV/ion})$$

で与えられる。水銀原子の電離エネルギーは 10.4 eV、二価電離のそれは 18.7 eV である。イオン生成コストをなるべく低く、これらの値に近づけることが必要であるが、現在、大型電子衝撃型イオンエンジンでは、 $\eta_u = 90\%$ で $C_i = 200 \text{ eV}$ が得られている。

4. 実験装置と方法

4.1 真空槽

本実験に使用した真空槽は、電気推進実験用として昭和46年1月に、当研究所に設置されたものである。総ステンレス製で、直径 1.5 m、長さ約 3 m の大きさである。排気系として、550 ϕ の油拡散ポンプ二台、排気速度 6,500 l/min の油回転ポンプ 1 台、6,000 m³/hr と 1,400 m³/hr のメカニカルブースタ 1 台ずつを備え、内部に液体窒素冷却によるコンデンサを持っている。コンデンサは、液体窒素貯めと配管の上に張られた、総面積約 40 m² のフィンから成っている。

最高到達真空度は、 1×10^{-7} Torr で、イオンエンジン作動中においても、 $1 \sim 2 \times 10^{-6}$ Torr の高真空を維持することが出来た。

図3に真空槽とコンデンサーの概観を示す。

4.2 イオンエンジン

実験に使用したイオンエンジンの断面は、図1に示してあるが、次のようなものである。

陽極は直径 50 mm、長さ 75 mm の筒状である。陰

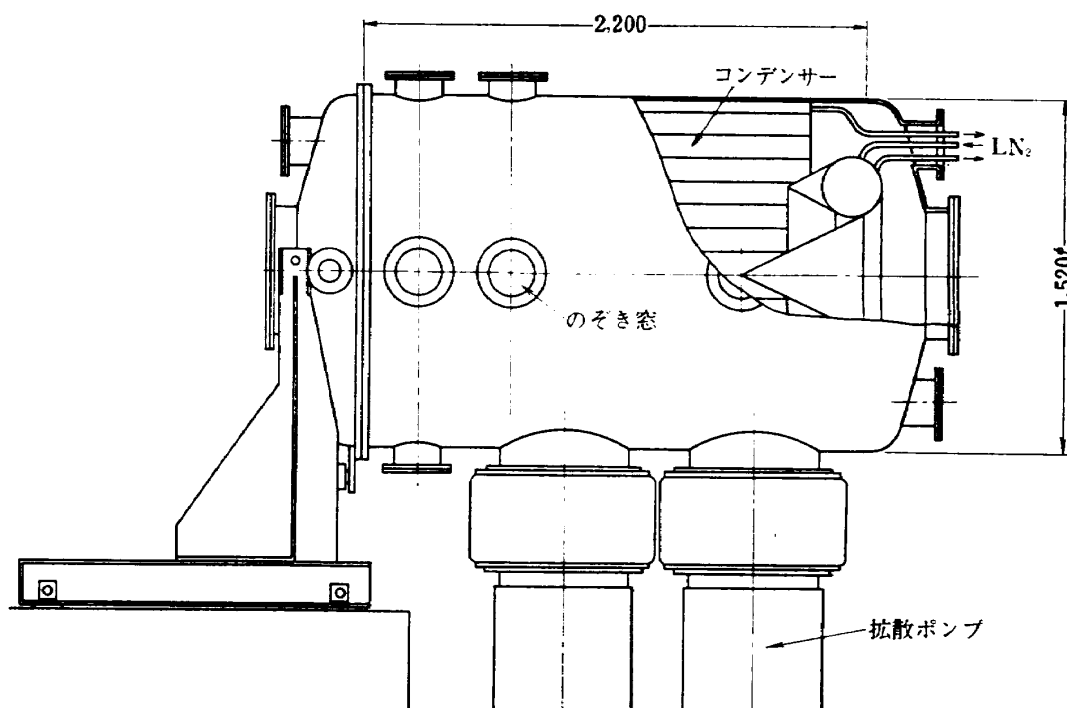


図 3

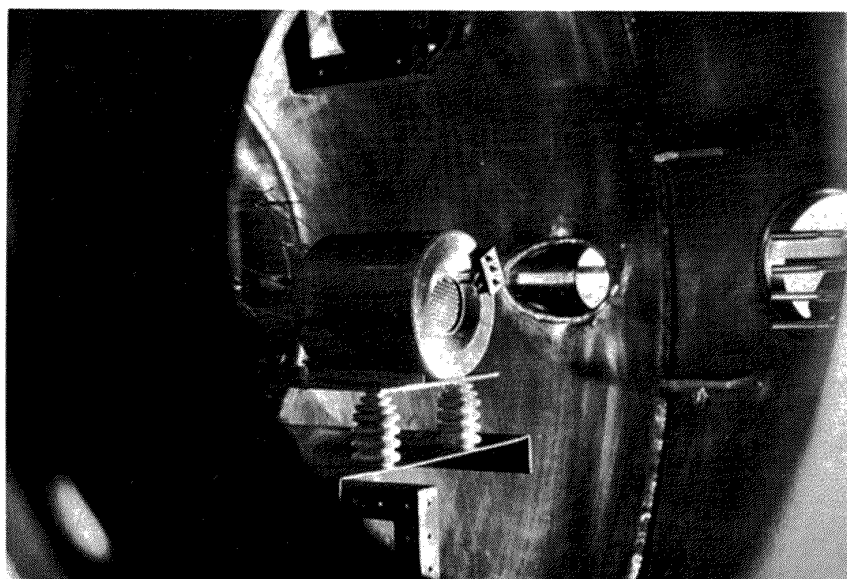


図 4

極には、直径 0.3mm のタングステンフィラメントを用い、長さおよそ 70mm をヘアピン状にして陽極の中心軸に沿って取付けた。

加速電極の材質には SUS 27 のみ、スクリーン電極には、SUS 27 と石英ガラスの二種類を用い、その差異を調べた。加速電極には直径 3.5mm、スクリーン電極には直径 4.0mm の孔がそれぞれ 85 個、相対する孔の芯が一致するようにあけられている。このときのスクリーン電極の開口比は、54.4% である。両電極は、上流側の面が 3.0mm 間隔になるように取付けられている。

放電室内の磁場は、放電室の外側に巻いたコイルに電流を流して形成した。コイルは、幅 70mm に 60 巻してあり、放電室の中心でコイル電流 1A におよそ 9 ガウスが相当する。またコイルは、加速電極の方から見て、1 対 4 の割合に分割することが出来て、磁場の形状を変えることが出来るようになっている。

図 4 に真空槽に取付けたイオンエンジンの写真を示す。

4.3 水銀流量の制御と測定

推進剤として水銀を使用した。水銀流量はきわめて微量なので、制御と測定は困難が多い。

水銀気化器として、ボイラーとオリフィスを組合せたもの（オリフィス型）と、多孔質金属を加熱するもの（ポラス型）の二種類を使用した。図 5 にその形状を示してある。

オリフィス型（図 5 (a)）ではボイラーを加熱して

出来た水銀蒸気が、オリフィスを通して放電室に送られるが、オリフィスで音速になることから、ボイラーの温度（即ち水銀蒸気の温度）を熱電対で測ることにより、計算で流量を求めた。しかし、ボイラーの熱容量が大きいために、温度の制御、即ち流量の制御が困難であった。また、ボイラーの側壁の温度を、水銀蒸気温度としたために、精度は良くないと思われる。

一方、ポラス型（図 5(b)）では、多孔質金属にしみ込んで来た水銀を、まわりに巻いたヒーターで加熱することにより蒸気化する。多孔質金属はステンレス製で、直径 5mm、長さ 5mm、ろ過精度 2μ のものを使用した。やはりこの多孔質金属の温度を熱電対で測ることにより、一定温度に保ち、あるいは変化させ流量を制御した。流量の測定は⁵⁾、毛細管（直径 0.5mm）の水銀柱の減りから読み取った。多孔質金属が一定温度に保たれていても、水銀柱の高さにより若干の流量変化が見られたが、5~10 分毎に水銀柱の高さを記録することにより、流量はかなり正確に知ることが出来た。

多孔質金属付近の温度上昇による水銀の膨張が、水銀柱の高さに与える影響は、ヒーター加熱開始後、充分時間を置いて計測することにより無視することが出来る。水銀気化器から放電室迄の配管は、水銀が管壁で凝結ししないように、まわりにヒーターを巻き加熱してある。

本実験では、無重力状態でも使用でき、流量制御の容易なポラス型水銀気化器を主として用いた。

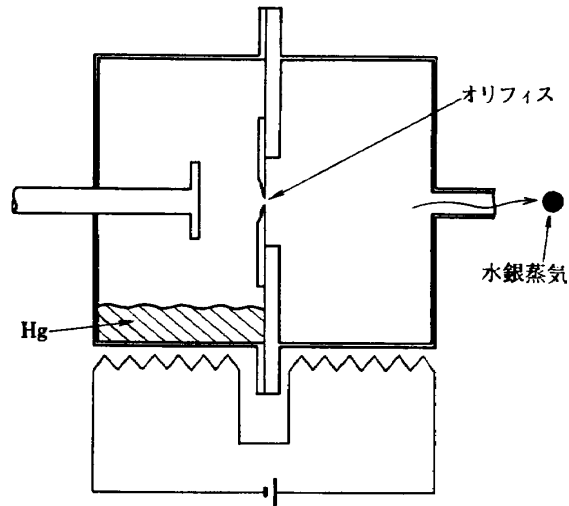


図 5 (a)

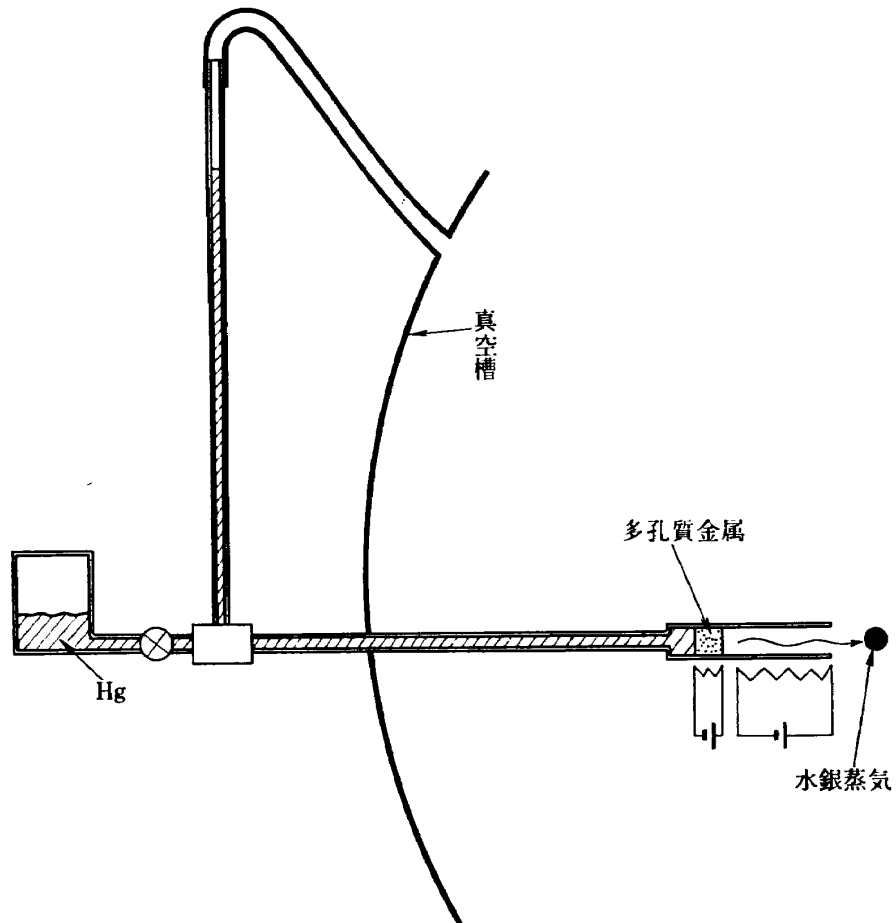


図 5 (b)

4.4 実験方法

イオンエンジン本体、水銀気化器は真空槽内部に固定し、水銀流量読取りのための毛細管は、真空槽外に設置した。

イオンエンジンの下流およそ 50 cm に、イオンビー

ムのコレクターとして、SUS 27 製で、直径 60 cm、半角 30° の円錐板を設置し、イオンビーム電流を測定した。形状を円錐としたのは、水銀ジェットが、イオンエンジンの方にはね返ることを防ぎたいからである。

実験に使用したエンジンの形状、電気配線は図1に示した通りであるが、真空槽は零電位に接地しており、またコレクターは通常は零電位であるが、400V迄の正電位をかけられるようになっている。これは、コレクターからの二次電子を防ぐためである。

この実験では、中和器からの電子の放出によるイオンビームの中和は行なわなかった、コレクターとイオンエンジンは連絡しており、エンジンに負電荷がたまることはない。エンジンとコレクターの間隔が比較的短く、真空槽内に浮遊している電子がイオンビームを中和していると思われる、イオンビームは順調に噴出された。

実験は水銀流量を一定に保ちながら、磁場、放電電圧、放電電流、加速電圧等を変化させて加速されるイオン電流の測定を行った。

5. 実験結果と考察

5.1 放電特性

放電室内で放電を行なわせ、プラズマを効率よく作ることは、イオンエンジンの性能に極めて重要である。即ち出来る限り少ない電力で、ほとんどの水銀をイオン化することが必要である。

放電を支配しているのは、水銀流量、放電電圧、放電電流、磁場の強さと形状等であって、これらの要素

は互に相関を持っている。我々の目的の一つは、これらの相関を明らかにして、イオンエンジンに最適な放電の条件を探し出すことである。

図6に、我々のイオンエンジンの放電特性の一例が示してある。ここで、水銀の流量 \dot{m} を、すべての原子が一価のイオンになったとして、電流に換算したもので表わすことにする。即ち、mA 相当で表わす。

図6によると、一定の強さの磁場をかけておき、放電電圧を零から上げてゆくと、ある値の放電電圧で突然放電が開始する。さらに放電電圧を上げてゆくと、徐々に放電電流も増加してゆく。図6には示していないが、逆に放電電圧を下げてゆくと、放電を開始した電圧を過ぎても放電は続いており、 $I_M=0$ の場合には、放電電圧を水銀の電離電圧位にさげる迄放電は持続する。

これは磁場の強さにかかわらず、ほぼ同じ傾向であった。即ち、一度放電が起って、プラズマが形成されると、その放電を維持するためには、放電開始時の電圧よりかなり低い電圧で充分である。磁場の強さを変化させると、放電開始電圧も変り、磁場が強くなるに従って、放電開始電圧は高くなっている。

放電電圧を一定にして放電させ、磁場を強くしてゆくと、水銀流量の多少により、放電電流は増加したり減少したりする。磁場を更に強くすると、水銀流量が

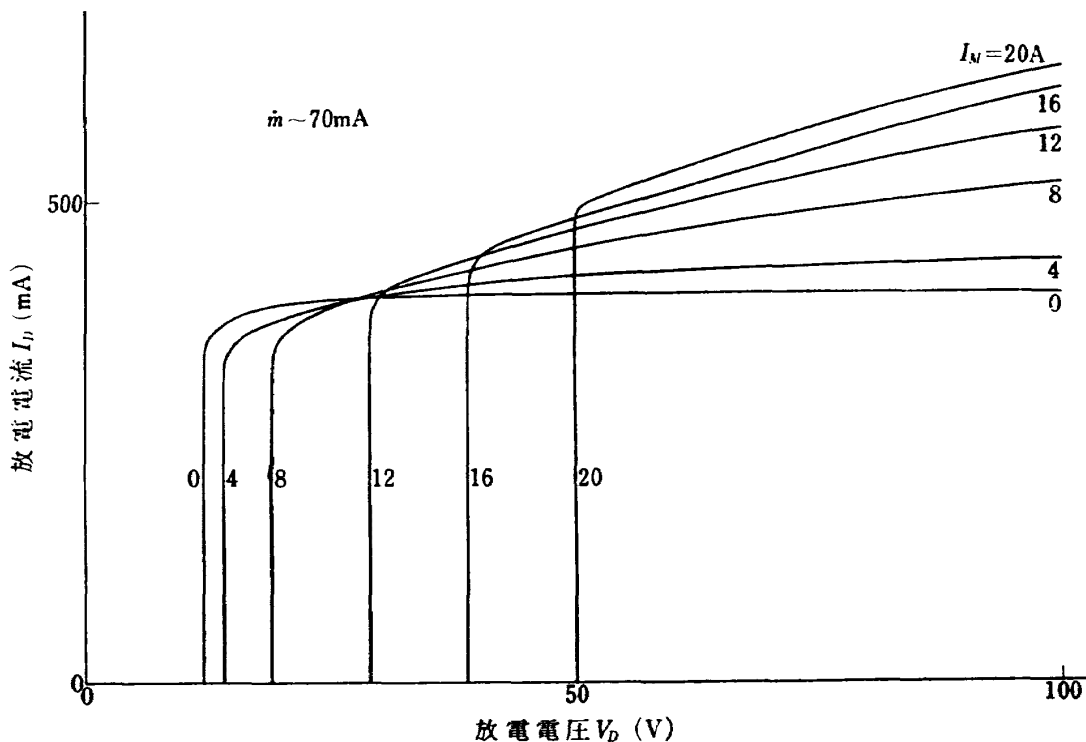


図 6

少ない場合には、放電が止ってしまうことがある。これは磁場による放電の cut off 現象である。

放電の有効性の判断は主としてイオン生成コストによるが、このことについては、5.5 に述べる。

5.2 イオンビームの抽出と加速特性

放電室内で形成されたプラズマから、イオンのみを抽出し、加速する。加速機構の特性について、スクリーン電極に SUS 27 と石英ガラスの二種類を用いて実験を行った。

加速機構の電位分布とイオンビームの抽出、加速状態については、すでに概略を図2に示したが、スクリーン電極が SUS 27 と石英ガラスの場合では、電位分布に差異が出ると思われる。

スクリーン電極が金属の場合、等電位線はスクリーン電極を避けるように分布するが、これに反して、ガラス電極の場合は、等電位線はスクリーン電極に浸透するように分布していると思われる。図7にそれぞれの電位分布の概念を示す。

両電極間の電位差 V_a が充分高くないと、プラズマ境界が下流に凸面状に押し出されるような電位分布となり、イオンの収速が悪くなり、加速電極に流れ込むイオンが多くなる。この加速電極に流れ込むイオン流をドレイン電流と呼ぶ。抽出され、加速電極の孔を抜けて加速されるイオンの電流をビーム電流、ビーム電流とドレイン電流との和を総イオン電流と呼ぶ。

図8に、加速極電位 V_a をパラメータとして、加

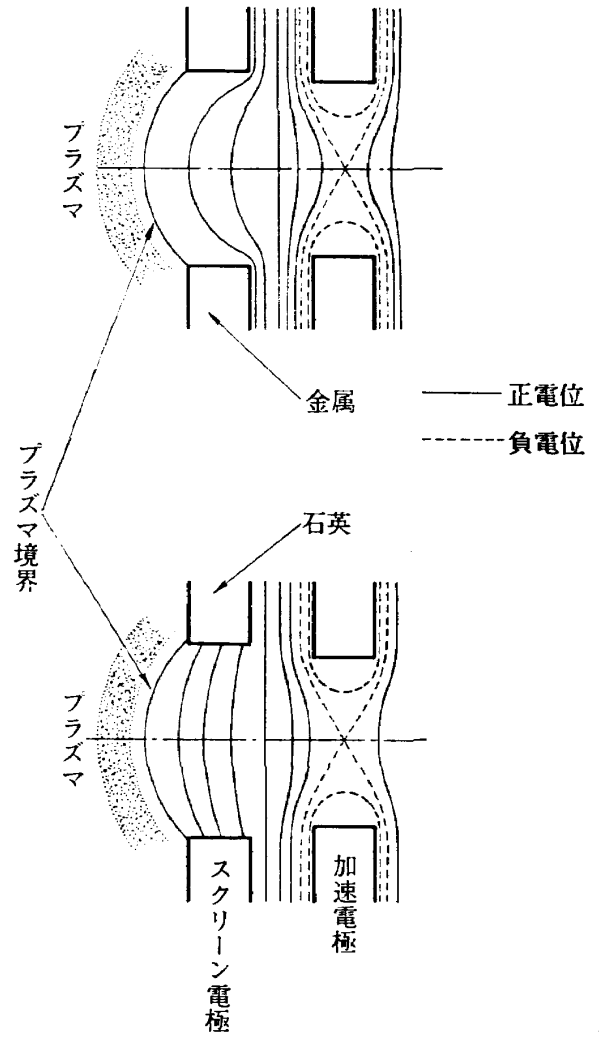


図 7

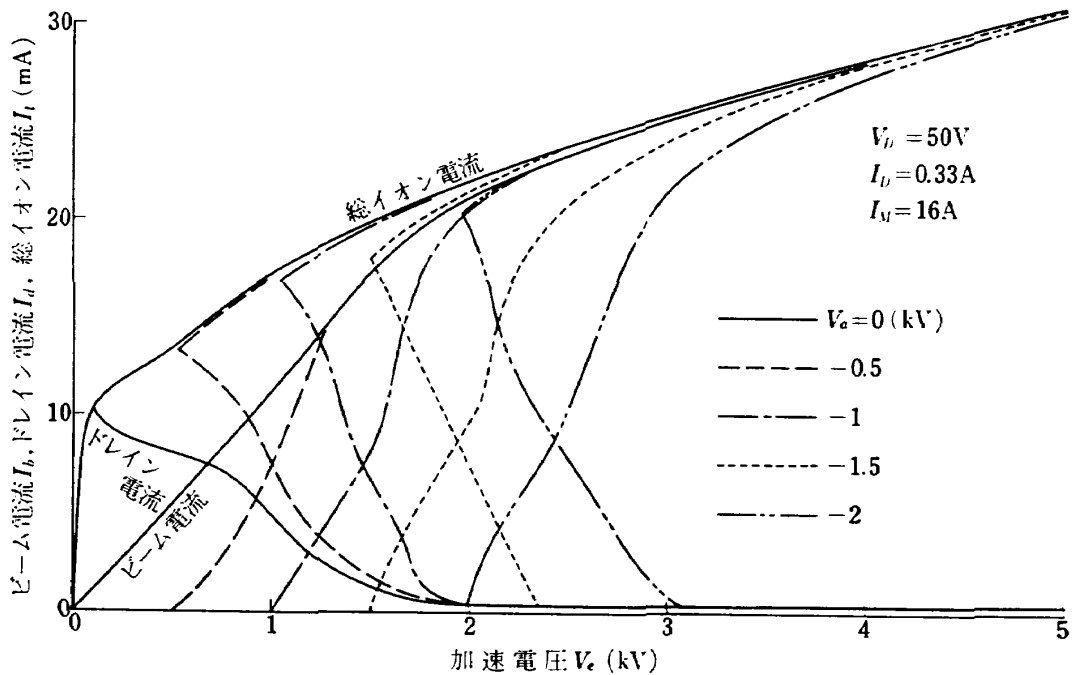


図 8

速電圧 V_e と、ビーム電流、ドレイン電流、総イオン電流との関係が示してある。 $V_e = V_b + |V_a|$ であるから、横軸は V_a を一定にして V_b を変化させた。

図8によると、 V_b を 0 から増加させたとき、初めはドレイン電流が多いが、 V_b の増加に従いビーム電流がふえて、 V_b がある値以上になるとドレイン電流は微少になることが分る。例えば、 $V_a = 0$ の場合では、 $V_b = 2\text{ kV}$ でドレイン電流は微少になり、ビーム電流が総イオン電流の大部分を占める。ドレイン電流が多いと、無駄な電力を消費するばかりでなく、加速電極の損傷を招くので、ドレイン電流が微少になる加速電圧で、イオンエンジンを作動させることが望ましい。しかし加速電圧が高すぎると、絶縁破壊を起し易い。

加速極電位 V_a を増してゆくと、ドレイン電流が微少になるのに必要な V_b は小さくてよいが、 V_e は大きくなることが分る。しかし、総イオン電流は、 V_a の値に拘らずほぼ一致しており、 V_e の値によって決定されると言ってもよい。それ故、中和器を使用していない今回の実験では、放電状態のイオンの加速特性へ

およぼす影響を調べるのに、以後 $V_a = 0$ として実験を行った。

図9に、放電電力一定 ($P_D = 40\text{ W}$) で、水銀流量を変化させた場合の加速特性を示す。放電室内のプラズマ密度は水銀流量の増加に伴い増加しているはずである。図9によると、得られるビーム電流は放電室内のプラズマ密度によって制限されることが分る。即ち抽出することの出来るイオンは、プラズマ境界に飛び込んで来るものだけであって、加速電圧の増加と共にビーム電流が増加するのは、プラズマ境界が、加速電圧に応じて、Child-Langmuir の空間電荷制限によるイオンの抽出能力に見合うような形状を作ってゆく、即ちプラズマ境界面積が拡大するからである。

さて、イオンビームに関して、電極の形状が相似で $j_0/V_e^{3/2}$ が一定であれば、抽出されるイオンビームの形状も相似であることが知られている。ここで j_0 はプラズマ境界に流れ込むイオンの電流密度である。そこで横軸に $V_e/j_0^{2/3}$ の代りに $V_e/\dot{m}^{2/3}$ 、縦軸にプラズマ境界総面積 S の代りに $j_0 S/\dot{m} = I_b/\dot{m}$ をとって、水銀流量をパラメータとしてその関係を、スクリーン

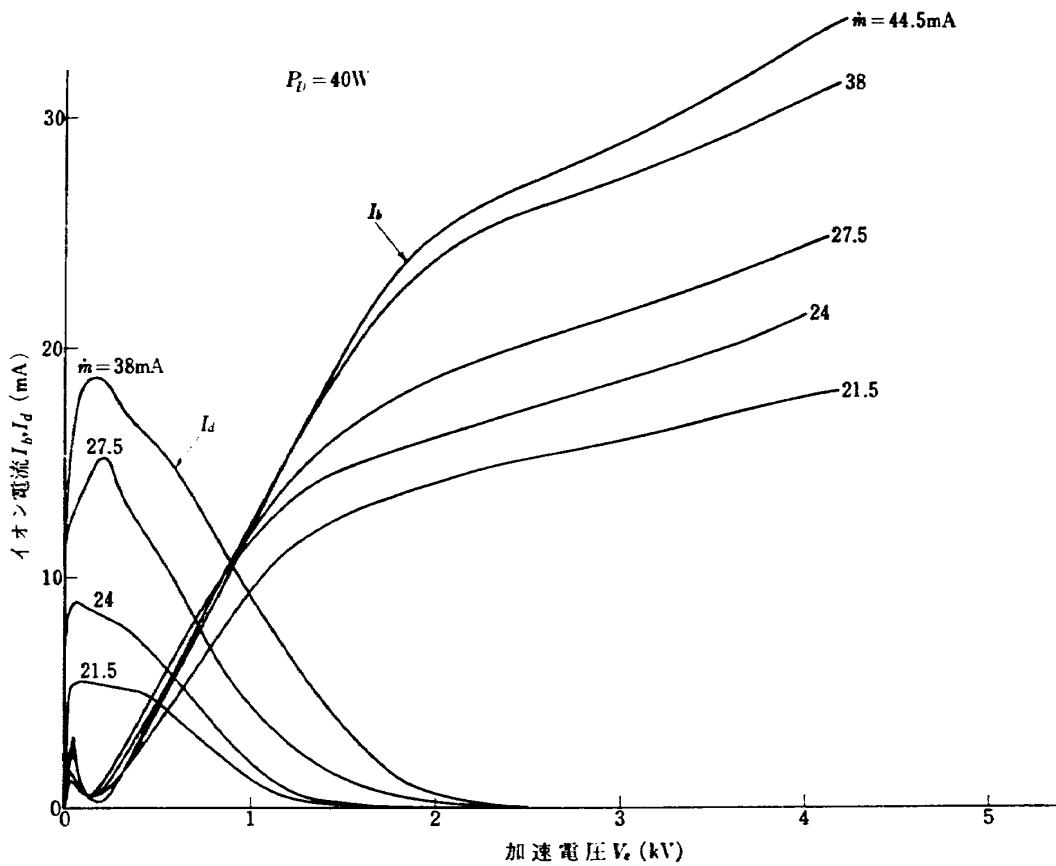
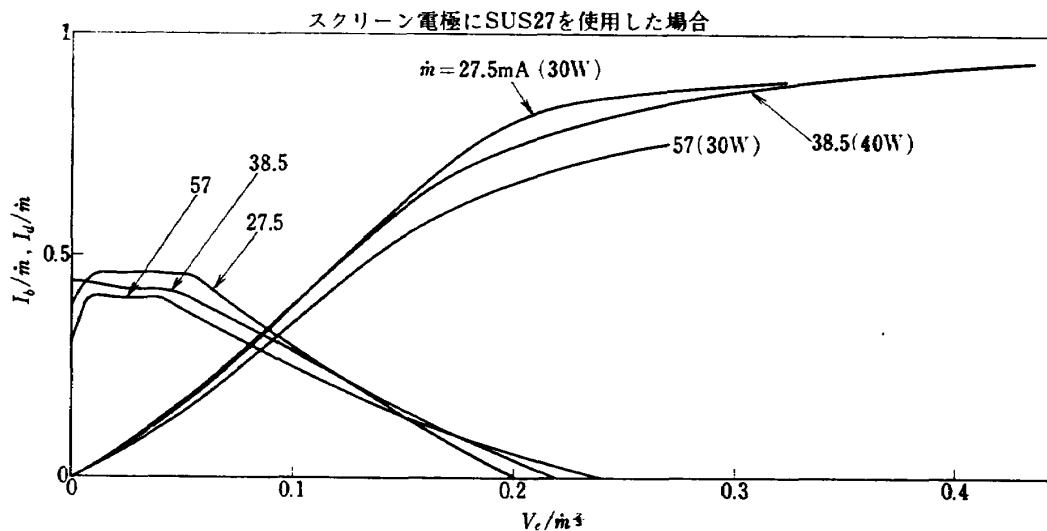
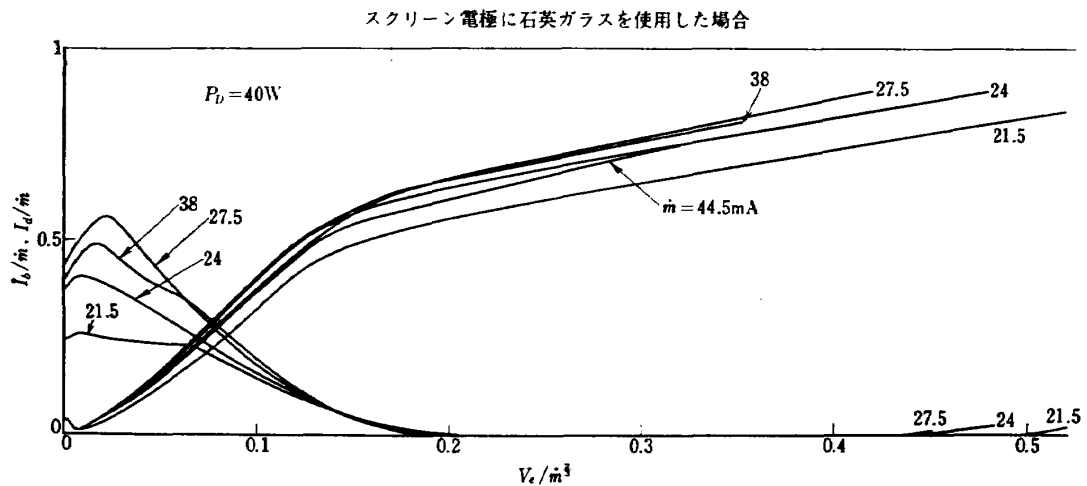


図 9



電極が SUS 27 の場合と石英ガラスの場合について図 10 に示す。水銀流量により、特性曲線に若干の違いがあるのは、実験条件によって電離率が異なり、 j_0 と \dot{m} が比例関係にないためと思われる。

ここで、スクリーン電極が SUS 27 と石英ガラスの場合を比べて見る。石英ガラスの場合、SUS 27 に比して低い加速電圧で、ドレイン電流を微少にすることが出来る。しかし、ビーム電流については、加速電圧の増加によるビーム電流の飽和は緩やかで、その特性曲線の肩の位置に差がある。また、石英ガラス電極の場合、 $V_e=4\text{kV}$ 以上で、僅かながらドレイン電流の増加が見られた。これは加速電圧の増大により、プラズマ境界が深くなり過ぎ、イオンの収束がうまくゆかないためと思われる。

5.3 磁場の形状、強さの影響

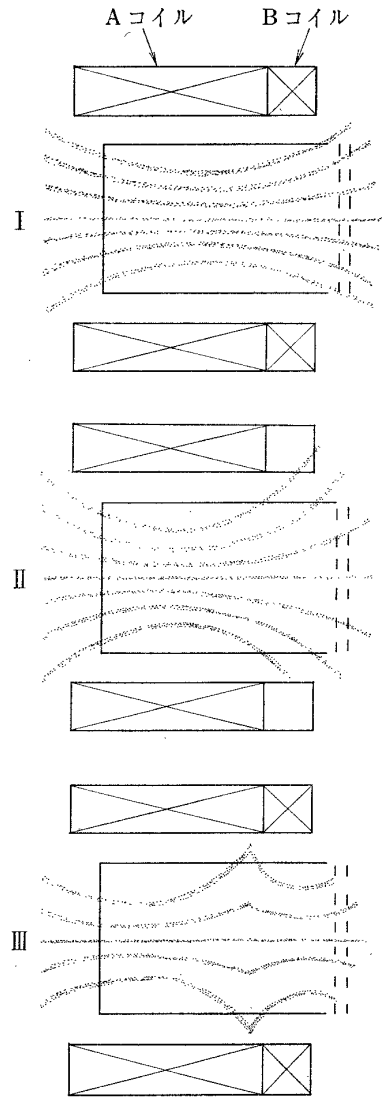
まず、放電室内の磁場の形状を変化させ、その放電と加速への影響を調べた。

実験方法は、図 11 に示すように、磁場コイルを 4:1 の割合に二分し、各々のコイルに流す電流を変えることに依って、三種類の磁場の形状を作り出した。図 11 に、三種類の磁場の形状概念が示してある。

Case I は、Aコイル、Bコイルに同じ向きの電流を流した場合で、放電室内にはほぼ一様に磁界が通っている。これは今迄実験を行ったものである。

Case II は、A コイルのみに電流を流した場合で、加速機構付近で、より広がった形になっている。

Case III は、AコイルとBコイルの電流の向きを逆



放電室内の磁場の形状

図 11

にしたもので、カusp状の磁場を形成している。

実験は、水銀流量およそ 38 mA 相当、放電電圧 70V で行った。

磁場コイル電流 10A で行った放電の特性は次の通りであった。

	V_D (V)	I_D (mA)	I_M (A)
Case I	70	440	10
Case II	70	420	10
Case III	70	410	10

Case II は Case I に比べて、加速機構付近の磁場が弱いと思われるので、磁場コイル電流を 20A 迄増加させた。このとき得られたイオンビーム電流を図

12 に示す。図 12 から明らかなように、Case I が、Case II, III よりも多くのイオンビーム電流を抽出することが出来、かつ放電電力が三ケース共ほとんど変わらないことから、Case I が効率的に最もすぐれていると言える。この報告書では、この項以外はすべて Case I の磁場の形状で実験を行った。

次に、Case I の形状の磁場で、その強さを変えて影響を調べた。

放電特性への影響については、5.1 ですでに述べたが、放電電圧一定で、加速電圧 V_e をパラメータとして、磁場コイル電流と放電電流との関係を図 13(a), (b) に示す。

図 13 によれば、磁場が強くなるに従って、放電電流が増す場合 (a) と減る場合 (b) であることが分るが、これは、水銀流量や放電電圧に依存している。

また加速電圧 V_e が放電電流に影響を及ぼしていることも知ることが出来る。図 13 (b) では、加速電圧 V_e が、3~4 kV になって来ると、磁場による放電の cut off 現象が、弱い磁場でも現れて来ることが分る。これは、水銀流量が比較的少い ($\dot{m} \sim 24 \text{ mA}$ 相当) とところで起っているが、放電室からのイオンの抽出が多いと、放電室内のプラズマ密度が薄くなり、磁場の強さによっては、放電を維持出来なくなるためと思われ

る。

一方、磁場の強さと、ビーム電流との関係を三種類の水銀流量について示したものが、図 14 である。これによると、磁場の強さの影響は、磁場を強めたとき最初は顕著であるが、ビーム電流がピークに達した後は、ほとんど影響を与えていない。また水銀流量の増加につれて、そのピークに達する磁場の強さも増加している。

上述のように、磁場の強さの最適値は、水銀流量、放電電圧、加速電圧等に依存していることが分る。

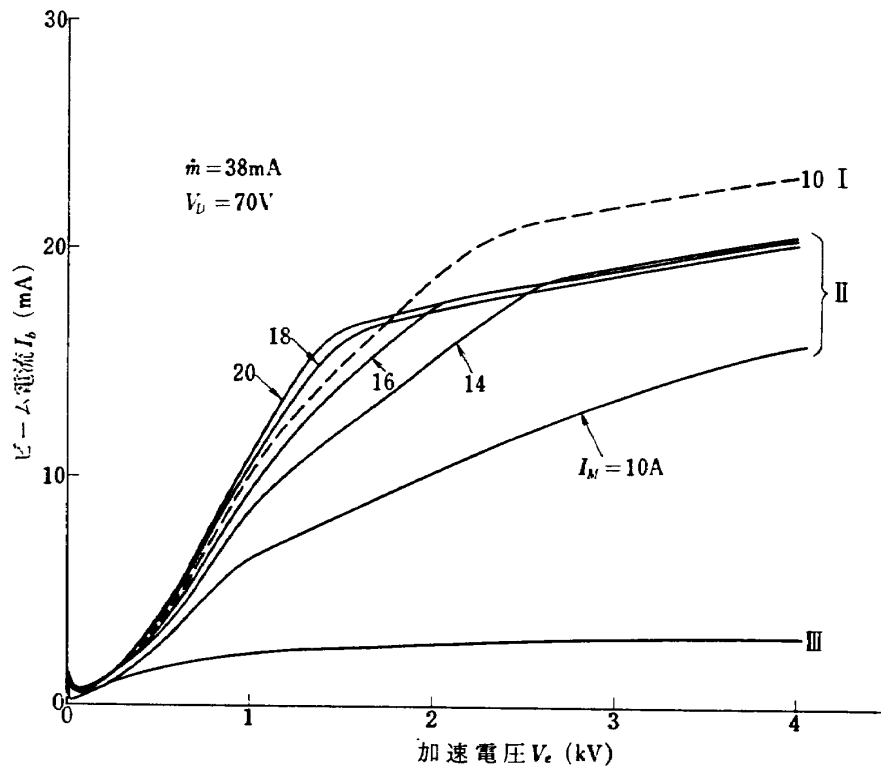


図 12

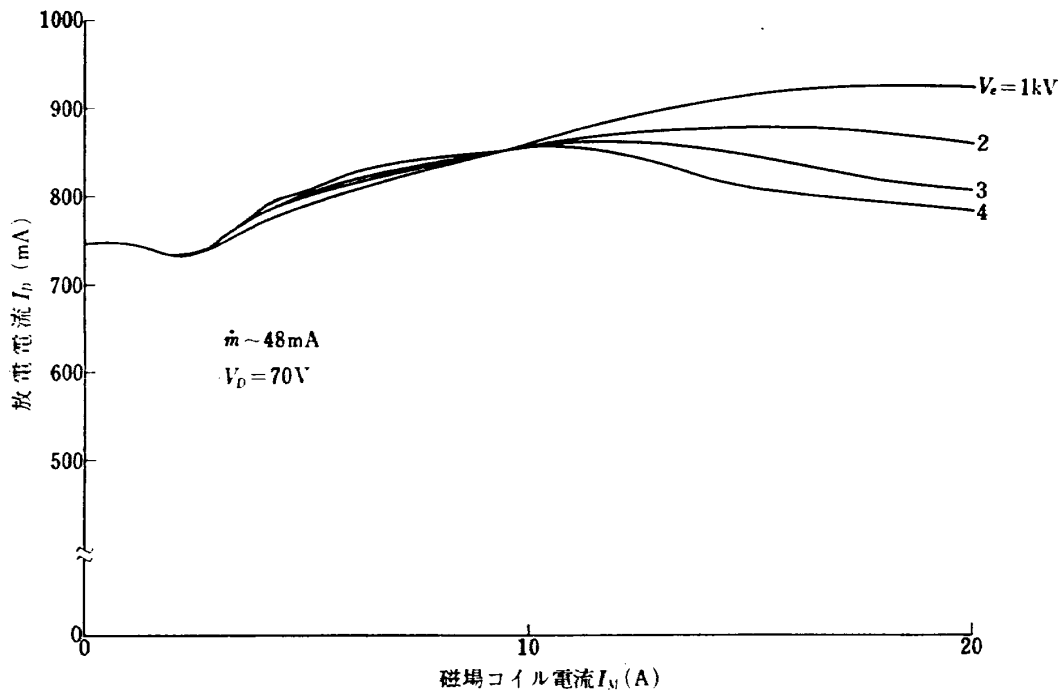


図 13 (a)

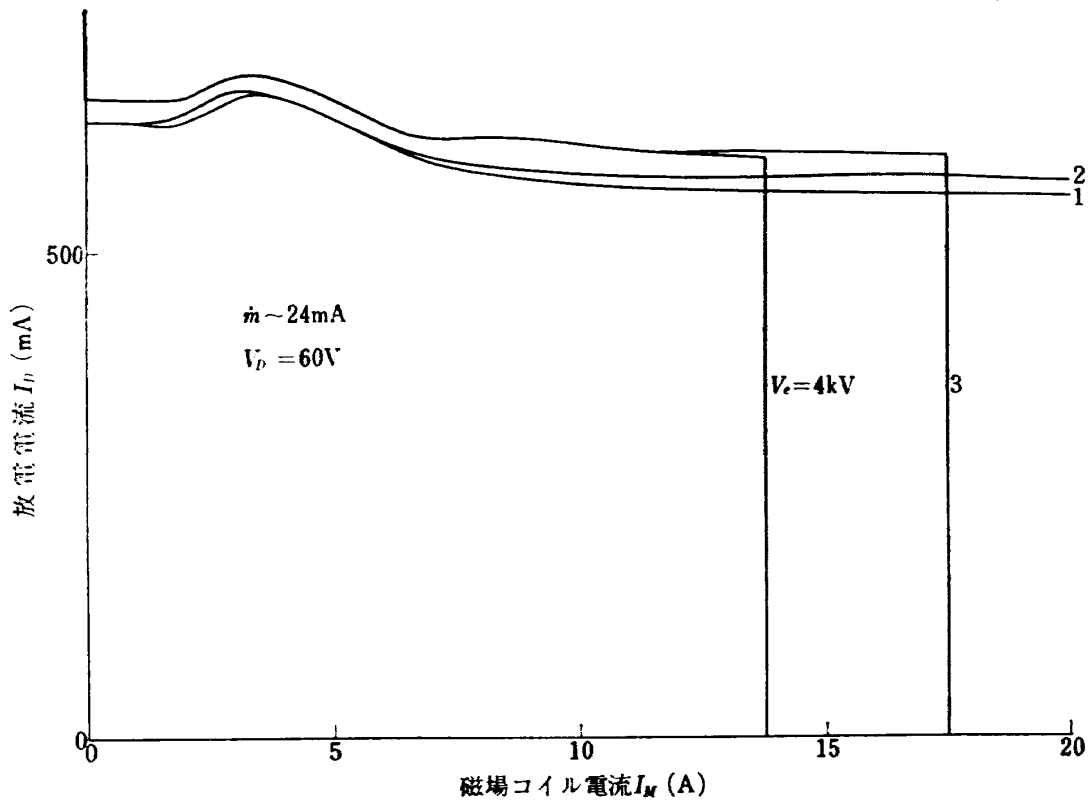


図 13 (b)

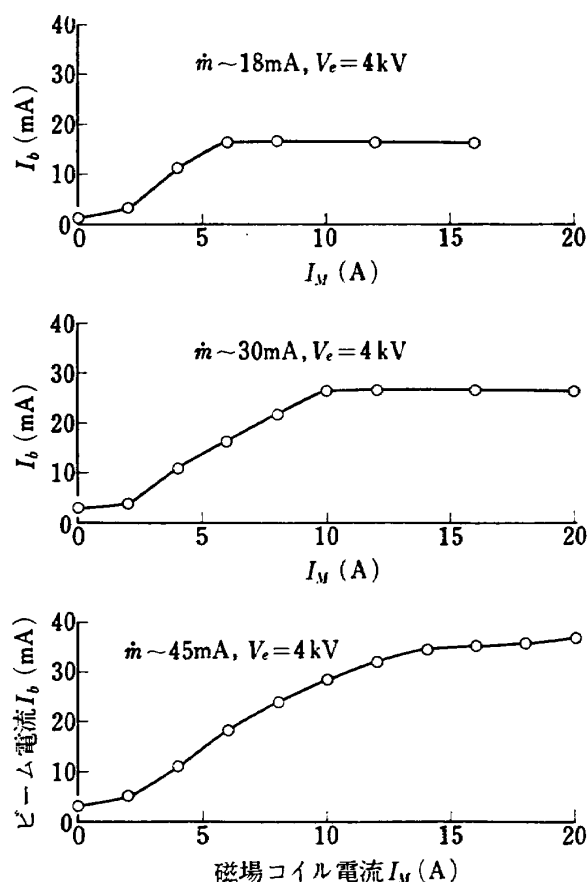


図 14

5.4 放電電圧、放電電力の影響

プラズマを形成する放電の電圧あるいは電力は、イオンエンジンの効率に少なからぬ影響を及ぼす。ここでは、放電電圧と放電電力の推進剤利用効率 η_u 、イオン生成コスト C_i への影響を見る。

まず、放電電力を一定にして、放電電圧の影響を調べる。放電電力を一定に保つために、フィラメント陰極の加熱電流を変化させた。放電電圧により、フィラメント陰極から放出される電子のエネルギーを制御することになる。水銀の電離エネルギーは 10.4 eV、二価電離は 18.7 eV であるが、電子のエネルギー変化は、放電機構に微妙な影響を与えると思われる。

結果の一例を図 15 に示す。図 15 から、放電電圧によって、得られるビーム電流の加速電圧に対する傾きが違っていることが分る。大ざっぱに言って、 $V_D = 30 \sim 40 \text{ V}$ あたりで二分されており、放電電圧の高

い方が傾きが急である。また、ドレイン電流は、放電電圧が高い程少くなり、ビーム電流の多さと対応していない。

ここで、二価イオンの数の割合を考えると、放電電圧によって 2~3% (30V) から 10% (60V) も存在する^{6),7)}。二価イオンの存在により、加速されるのが全て一価のイオンと考えた場合より、推進剤利用効率および推力は低下する。また、加速特性も多少影響を受けるはずである。

水銀流量をパラメータとして、放電電圧と推進剤利用効率の関係を示すと図 16 のようになる。水銀流量が少い程、推進剤利用効率は良くなっており、放電電圧の最適値は水銀流量によって幾分違っているが、 $V_D = 40 \text{ V}$ 前後であることが分る。陰極にイオンが衝突し、陰極が浸蝕されること、また上に述べた二価イオンの増加を考えると、放電電圧は出来る限り低い

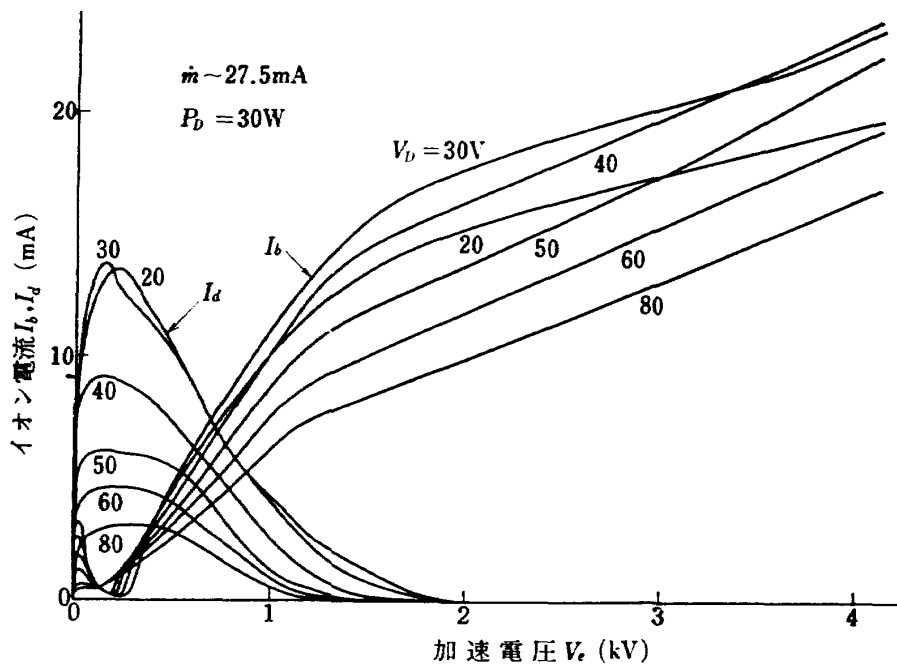


図 15

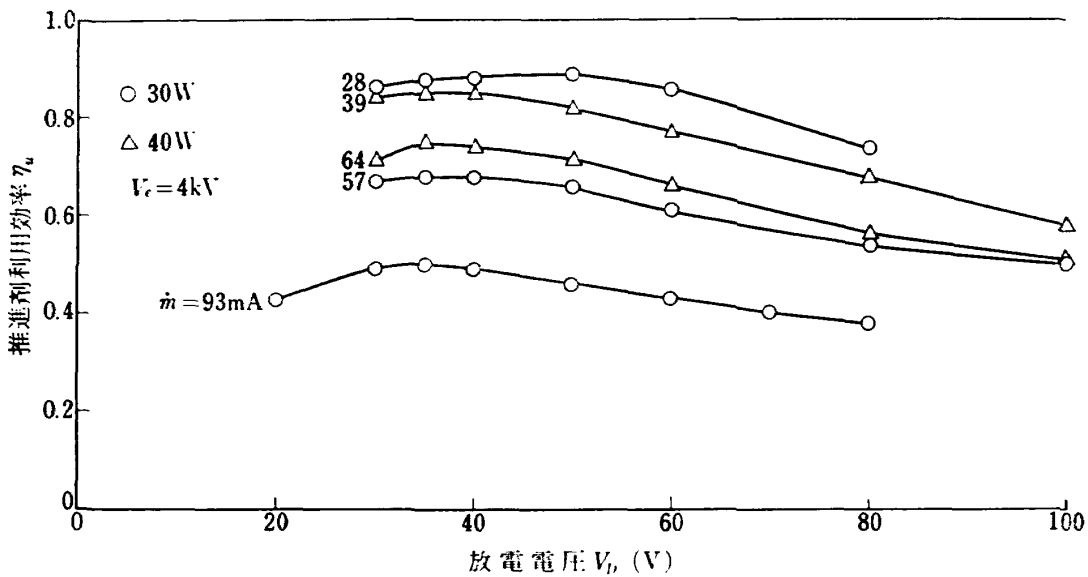


図 16

ことが望ましい。そこで 30V から 40V が放電電圧の最適範囲であるといえる。

この放電電圧 30~40V は、水銀の電離確率最大となる電子エネルギーと一致している^{8),9)}。

次に、放電電力の加速特性、イオンビーム電流への影響を調べる。水銀流量 39mA 相当、放電電圧 40V

の場合の放電特性を、放電電力をパラメータとして、図 17 に示してある。放電電力は、やはり、放電電圧を一定として、フィラメント陰極の加熱電流を変化させることにより制御した。

図 17 から、放電電力の増加とともに、得られるイオンビーム電流は増加してゆくが、段々と飽和してゆ

く傾向になることが分る。また、損失電流も、放電電力の増加に応じて増加している。

ここで、4kV の一定加速電圧で、放電電力に対する、推進剤利用効率 η_u とイオン生成コストとの関係

を表わすと、図 18 (a), (b) のようになる。放電電力の増加により、10 W 付近では、推進剤利用効率は急に伸びているが、段々と飽和状態に近づいている。一方、イオン生成コストは放電電力の増加につれ

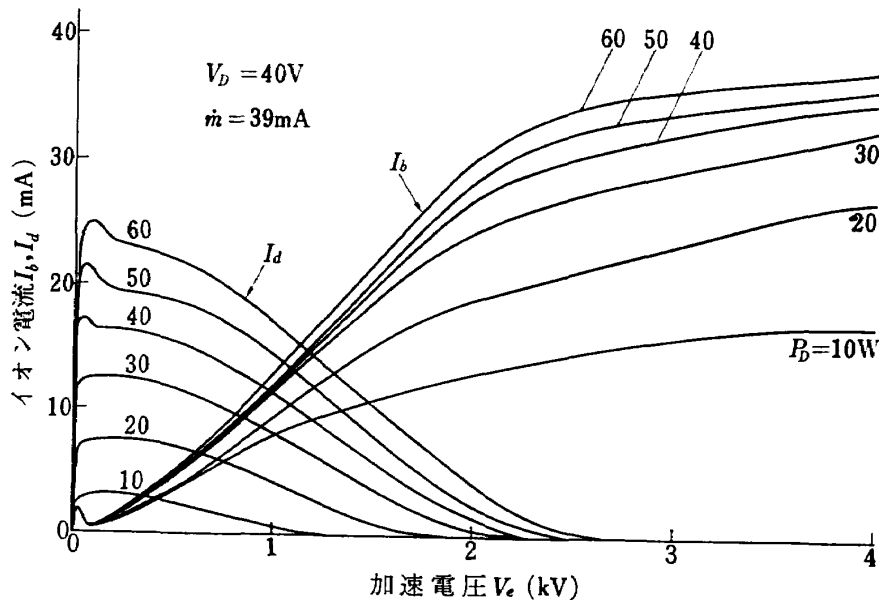


図 17

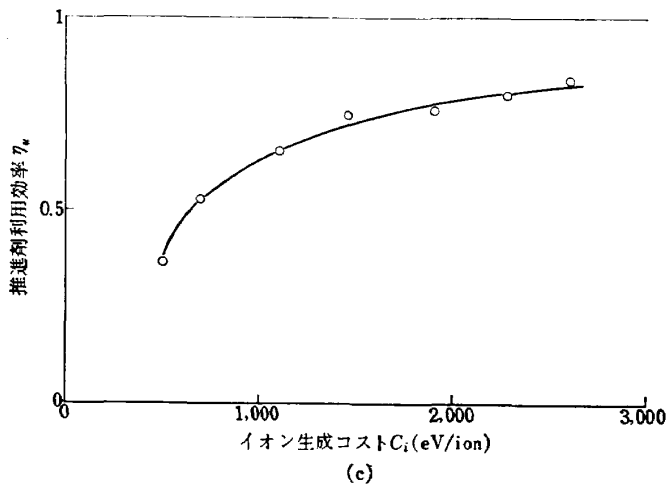
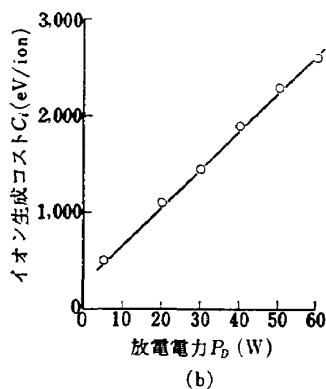
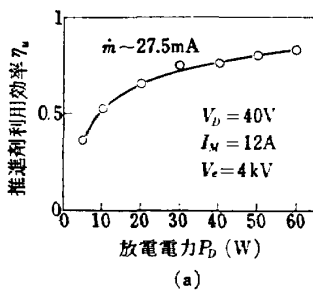


図 18

て、ほぼ直線的に高くなっている。

イオン生成コストと推進剤利用効率との関係をまとめてみると、図 18 (c) のようになり、推進剤利用効率を高めることと、イオン生成コストを低くすることは、相反する要求で、なかなか折合が難しい。

5.5 イオンエンジンの性能

イオンエンジンの性能の目安として、推進剤利用効率 η_u 、パワ効率 η_p 、推進機効率 η 、それに加えて、イオン生成コストが考えられることは、すでに述べた。

しかしここでは主として、推進剤利用効率と、イオン生成コストの二つを考察することとする。現段階では、パワ効率、推進機効率を厳密に考えることはあまり意味がないといえるからである。というのは、一つには、例えば、パワ効率を評価する場合、必要全電力のなかに、水銀を蒸気化するのに要して電力、フィラメント陰極を熱するのに要した電力を省いてしまうことは出来ない。磁場コイルに要した電力は、実機において永久磁石を用いるので考える必要はない。しかし、現在は、簡単だが熱損失の大きい陰極を用いており、必要全電力の評価は行っても意味がない。

それ故、イオン生成コストを評価するとき、考慮し

ている電力は放電電力のみで、フィラメント陰極に要した電力は考えていない。こうすると、将来陰極を損失の少ない、例えばホロー陰極に変えた場合にも、放電の効率を比較出来る利点がある。

上述のように、水銀蒸気化に必要な電力と、フィラメント陰極加熱に必要な電力を無視した電力効率を、放電電力効率 η_{PD} とすれば、電力効率 η_P 、イオン生成コスト C_i との関係は次のようである。

$$\begin{aligned} \eta_P < \eta_{PD} &= \frac{P_j}{P_D + P_j} \\ &= \frac{1}{P_D/P_j + 1} \\ &= \frac{1}{(I_D \cdot V_D)/(I_b \cdot V_b) + 1} \\ &= \frac{1}{C_i/(eV_b) + 1} \end{aligned}$$

エンジンの大きさとスクリーン電極の開口比が決ると、効率を左右するのは、加速電圧、放電電圧、放電電力、磁場の形状と強さ、水銀流量等であることは、すでに述べたが、以下それらをまとめてみる。

水銀流量をパラメータとして、放電電力と推進剤利用効率の関係を表わすと、図 19 (a), (b) のようにな

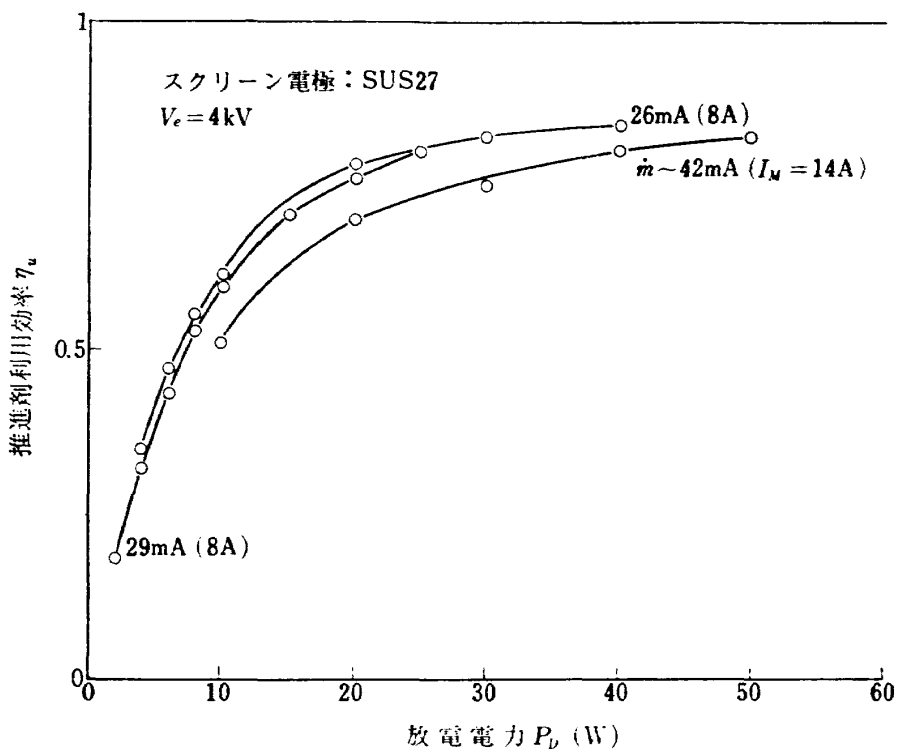


図 19 (a)

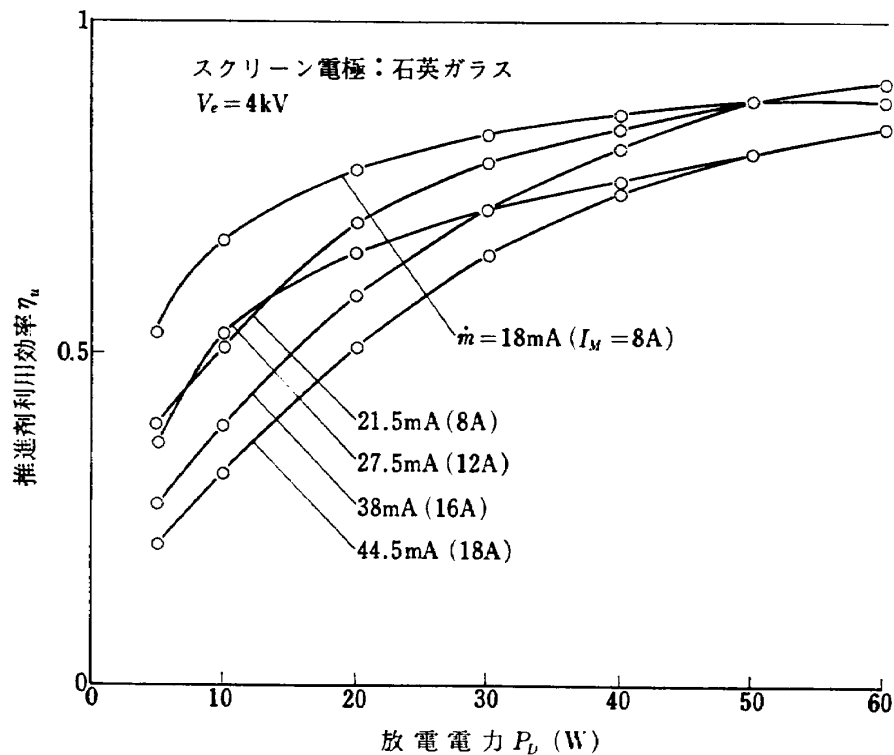


図 19 (b)

る。図 19 (a) は、スクリーン電極に SUS 27 を使った場合、図 19 (b) は、石英ガラスを使った場合である。石英ガラスの場合、水銀流量の多少による差が顕著に現れており、放電電力が小さいところでは、水銀流量が少い程推進剤利用効率がよく、放電電力が大きくなると、ほぼ同じ値になってゆくことが分る。又、SUS 27 と石英ガラスの曲線の形状に、特に放電電力の低いところで違いが出ている。

図 19 (a), (b) から、水銀流量をパラメータとして、イオン生成コストと推進剤利用効率の関係をまとめたものが図 20 (a), (b) である。20 (a) は、スクリーン電極が SUS 27 の場合、20 (b) は石英ガラスの場合である。やはり、SUS 27 の場合は水銀流量による差はあまり出ないが、石英ガラスの場合、イオン生成コストの低いところで、水銀流量により、推進剤利用効率にかなりの差が出ている。例え

ば、イオン生成コスト 500 eV 付近では、放電電力はほぼ 5W であるから、水銀流量の多少にかかわらず、ほぼ同量のビーム電流が得られたことになる。しかし、イオン生成コストが高くなると、推進剤利用効率は大体同じ値に落ちついて来る。

η_{PD} も参考のために示してある。推進機効率 $\eta = \eta_P \cdot \eta_u$ を $\eta \sim \eta_{PD} \cdot \eta_u$ で代用すると、効率についての大体の目安を得ることが出来る。最高でも、およそ 60% 以下である。

図 19, 20 の実験は、磁場の強さを最適に行ったものであるが、それを考慮せず、任意の条件で行った実験結果を図 21 に示す。図 21 は、イオン生成コストと推進剤利用効率の関係を示したものであるが、1500 eV 以上の電力を消費しても、推進剤利用効率は飽和状態で、あまり向上を期待できないことが分る。

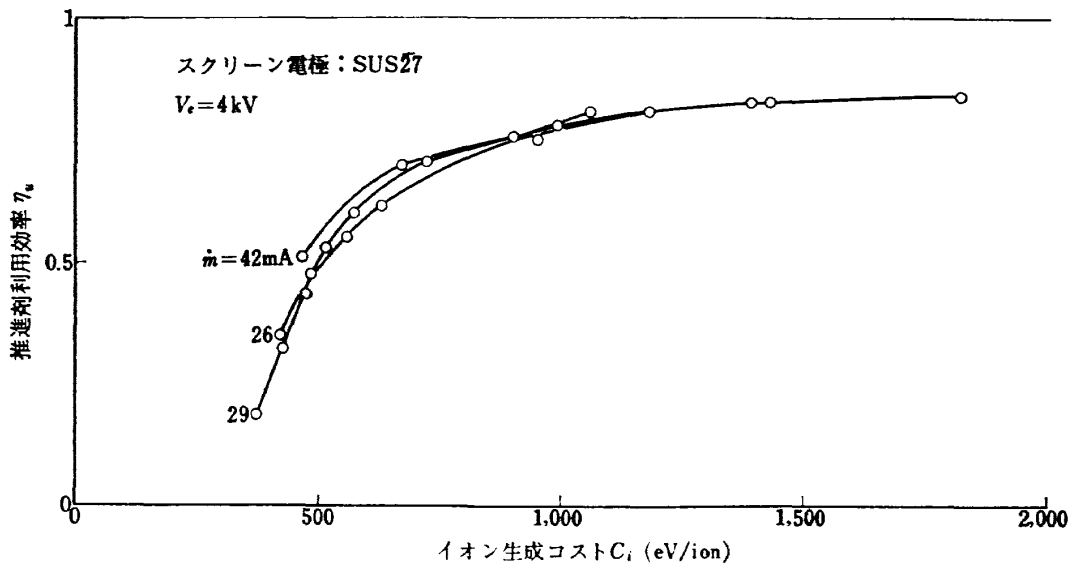


図 20 (a)

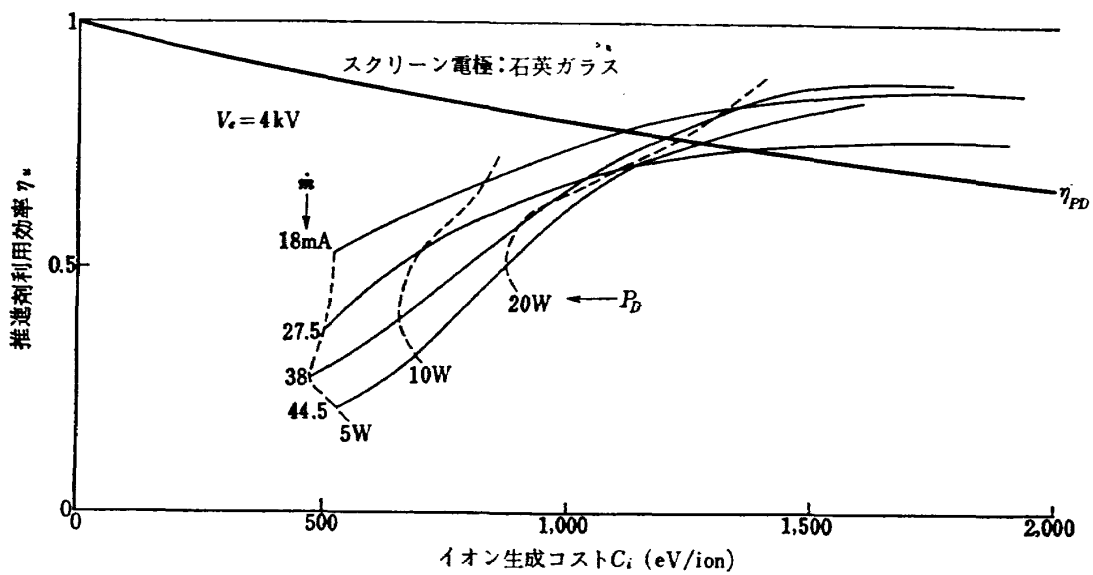


図 20 (b)

ここで、このイオンエンジンの性能の一例を挙げておこう。

水銀流量 \dot{m} 38 mA 相当 $\sim 0.08\text{ mg/sec}$
 放電電圧 V_D 40 V
 放電電力 P_D 40 W
 中心磁束密度 B_c 140 ガウス
 正味加速電圧 V_b 4 kV

ビーム電流 I_b 31 mA
 推力 F 4 mN
 推進剤利用効率 η_{ps} 82%
 比推力 I_{sp} 5,100 sec

ただし推力 F 、中心磁束密度は実験的に得られた電流、電圧を用いて計算で求めたもので、実測値ではない。

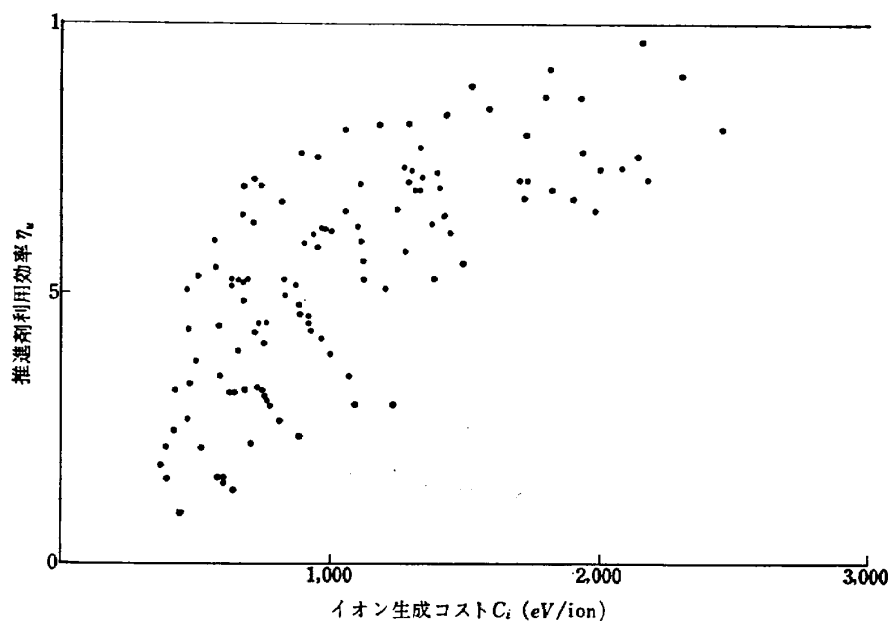


図 21

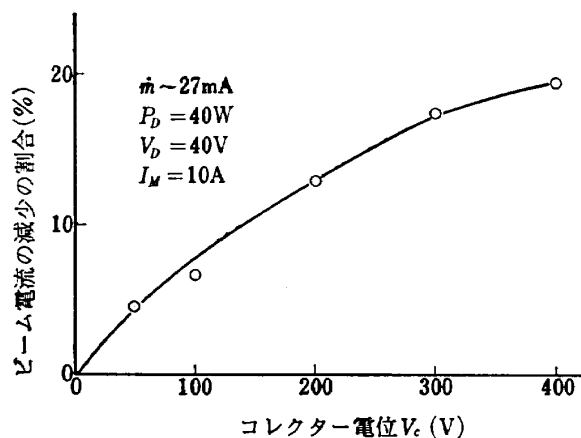


図 22

このイオンエンジンの性能向上のためには、フィラメント陰極をホロー陰極に取換えること、スクリーン電極の開口比をさらに大きくすること、磁場の形状をもっと工夫すること、等方法が残っているが、5 cm 型のイオンエンジンでは、効率の大幅な向上は望めないと思える。というのは、小型イオンエンジンでは放電室体積に比して、再結合によってイオンが失われる放電室内壁の面積が相対的に大きくなるからである。

最後に、イオンエンジンから噴出されるイオンビームを正しく測っているかどうかという問題がある。

噴出されたイオンはコレクターの表面をたたき、コ

レクターの表面から二次電子が放出されて、イオン電流が多めに測られることになる。

そこで、コレクターに正の電位をかけて、二次電子の放出を防いだ。その結果を図 22 に示す。横軸はコレクターにかけた電位、縦軸はイオンビーム電流の測定値の減りを、コレクター電位が 0 の時の値に対する割合で表わしたものである。

コレクター電位数百ボルトでは、イオンビームには影響を与えず、二次電位を防ぐには充分と思われるが、およそ 20% 近くの減少を示している。

6. 結 語

この実験は、イオンエンジンに関する一連の実験の最初のもので、次の実験への足掛りを得ることが出来た。実験結果は一応満足すべきものであるが、イオンビーム電流の測定に不確かさがあるのは不満である。この問題を解決すると共に、次に進む方向としては、イオンエンジンについては、ホロー陰極の使用、性能向上計測については、推力の直接測定、イオンビームの測定等である。

参 考 文 献

- 1) Cybulski, R. J. et al., "Result from SERT I Ion Rocket Flight Test," TN D-2718, 1965, NASA.
- 2) Rulis, R. J. et al., "SERT II Papers," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 8, No. 3, March 1971
- 3) Stuhlinger, E. et al., "Electric Propulsion; A New Technology", *Astronautical Engineering and Science*, 1963, McGRAW-Hill.
- 4) Kaufman, H. R. "An Ion Rocket with An Electron-Bombardment Ion Source," TN D-585, 1961, NASA.
- 5) Hyman, J. Jr. et al., "LM Cathode Electron Bombardment Thrusters", AIAA Paper No. 69-302 AIAA 7th Electric Propulsion Conference, Williamsburg, Virginia, March 1969.
- 6) Milder, N. L., "Comparative Measurements of Singly and Doubly Ionized Mercury Produced by Electron Bombardment Ion Engine", TN D-1219, 1962, NASA.
- 7) Kohlberg, I. and Nablo, S., "Physical Phenomena in Bombardment Ion Source", AGARDograph 88, 1966, Gordon and Breach.
- 8) Bleakney, W. "Probability and Critical Potentials for The Formation of Multiply Charged Ions in Hg Vapor by Electron Impact", *Physical Review*, Vol. 35, January 1930.
- 9) Nottingham, W. B. "Ionization and Excitation in Mercury Vapor Produced by Electron Bombardment", *Physical Review*, Vol. 55, January 1939.

- | | | | |
|---------|--|---------|----------------------------------|
| TR-324 | 偏揺れ振動するT型尾翼に働く、非定常ローリングモーメントの測定
Measurement of Rolling Moments Acting on the Stabilizer of T-tails Oscillating in Yaw | 1973年6月 | 市川輝雄, 磯貝紘二
安藤泰勝, 江尻宏 |
| TR-188T | 浮動型1自由度積分ジャイロの不等弾性誤差
Analysis of the Anisoelastic Errors of a Floated Single Degree of Freedom Integrating Gyro | 1973年6月 | 大月正男, 新宮博公
田畑浄治, 鈴木孝雄
円居繁治 |
| TR-325 | ロケットの分離特性に関する研究
Some Investigation on the Separation Characteristics of a Two-Stage Vehicle Model | 1973年7月 | 宇宙研究グループ |

航空宇宙技術研究所報告 326号

昭和48年7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	株式会社東京プレス 東京都板橋区桜川 2~27~12
