

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-475

ホローカソードの実験的研究 (I)

東久雄

1976年10月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# ホローカソードの実験的研究 (I)\*

東 久雄\*\*

## Experimental Study of Hollow Cathode (I)

By Hisao AZUMA

Mercury vapor fed hollow cathodes were studied experimentally. Various operating parameters including mercury flow rate, keeper current, collector voltage and collector distance were employed. Several open type hollow cathodes with different orifice diameters were tested in order to determine the scale effect. Hollow cathodes were operated in both spot and plume modes, in order to obtain different kinds of voltage-current characteristics. Transition from one mode to the other at a constant mercury flow rate was attained by varying the keeper current across a specific current level. The scale effect of orifice diameter indicated that at the mode transition point, the collector current was a specific function of the number density of the mercury vapor in or near the cathode orifice. The increase in cathode heater current caused an increase in collector current in the spot mode, while a decrease in the plume mode as the difference between the modes.

An enclosed type cathode was also tested and proved that it had the advantage of low keeper voltage and current compared with the open type.

### 1 緒 言

電子衝撃型イオンエンジンには、主放電用の主陰極および中和器としての陰極が必要で、これらがイオンエンジンの寿命を決めるといわれている。この陰極の開発は、長寿命、小エネルギー損失を求めて、構造の最も簡単な金属フィラメント型から、酸化物被覆型を経て、現在ホローカソードに至っている。ホローカソードは、構造、作動において複雑ではあるが、寿命、消費電力の点で優れており、現在では世界的にこの型の陰極が採用され、研究されている。<sup>1)~3)</sup>

このホローカソードをイオンエンジンの電子源として用いるためには、確実に放電が開始して安定した放電が得られ、同時にイオンエンジンの大きさ、および主陰極か中和器かに応じて、適合した水銀流量で必要な放出電子量が得られねばならない。振動や高温の繰り返し作動に耐える耐久性が要求されることは勿論である。

図1にイオンエンジンの断面図を示し、ホローカソードの使い方を示す。主放電用のホローカソードは、主放電を行うための電子を供給することがその役割であるが、同時にホローカソードを通して放電室に推進剤としての水銀を送り込んでいる。大型(10cm~30cmクラス)エンジンでは、ホローカソードを通す以外にバイパスを設

けて水銀を送るため、ホローカソードは必要な電子量さえ供給すればよい。即ちホローカソードを通る水銀流量は任意でよく、バイパスを通る水銀量により、安定な放電、低いイオン生成コスト、高い推進剤利用率が得られるように調節が可能である。一方小型(5cmクラス)エンジンでは推進剤のすべてをホローカソードを通して送っており、ホローカソードを通す水銀流量は、必要とされる噴出イオンビーム量から決ってくる。例えば5cmイオンエンジンの主放電用ホローカソードには、40mA相当前後の水銀量を供給して、400mA前後の電子放出が要求される。この水銀と電子により放電室で放電を起してイオンを生成し、加速機構により抽出加速して推力を得るため、この水銀は推力を得るのに有効に利用されている。中和器用ホローカソードは主放電用ホローカソードと異り、噴出イオンと同数の電子(5cmエンジンでは30mA前後)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と共にイオンビームを中和することを目的とする。このため中和器用ホローカソードを通して送られる水銀は主放電とは無関係で、推力を得ることに有効でない。即ちここで消費される水銀は推力を得る上からは損失であり、多く消費される程、推進剤利用率を低下させる。同様にこのホローカソードで消費される電力も損失である。水銀消費、電力消費共少い方が望ましいが両者は相反する傾向にある。

本研究では、ホローカソードが上述したようなイオン

\* 昭和51年8月26日受付

\*\* 宇宙研究グループ

エンジンの電子源として適切であるかどうかを知ることが目的として、基本的な特性について調べ、放電を支配する種々のパラメータを求めてその影響を明らかにした。実験はホローカソードの前にコレクタ（図5参照）を置き、主放電用ホローカソードでは放電室の、中和器用ではイオンビームの模擬とした。実際のイオンエンジンでは、主放電用ホローカソードから噴出されたプラズマは、バッフル（図1参照）を介して放電室のプラズマと接しており、二つのプラズマ領域のカップリングが起ると考えられ、図5のようなモデルは単純すぎると思われるが、ホローカソードの基本的特性は求められるであろう。中和器用では、コレクタがほぼ完全にイオンビームを模擬すると思われる。

## 2 ホローカソードについて

### 2.1 構造

本実験に使用したホローカソードの構造断面図を図1に示す。外径3mmφ、内径2mmφのタンタル管の先端には、中心に小さなオリフィスをもつ厚さ1mmのトリウムタングステン円板が電子ビーム溶接されている。オリフィスは電子ビームであけたもので、0.05mmφ、0.06、0.08、0.10、0.12、0.15、0.20、0.25、の各種の径がある。

タンタル管内部には炭酸バリウム（商品名R500）を塗布したタンタル箔を巻いて、オリフィス直前迄つめ込んである。タンタル箔の大きさは約10mm×25mmで、オ

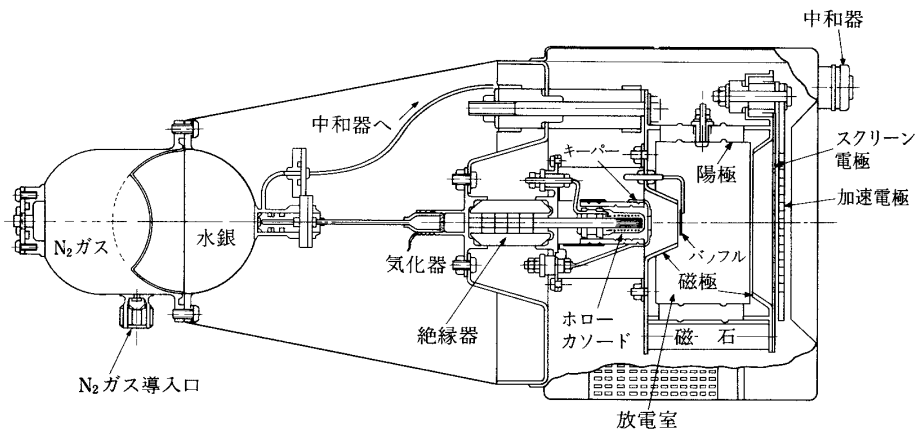


図 1 5 cm イオンエンジン断面図

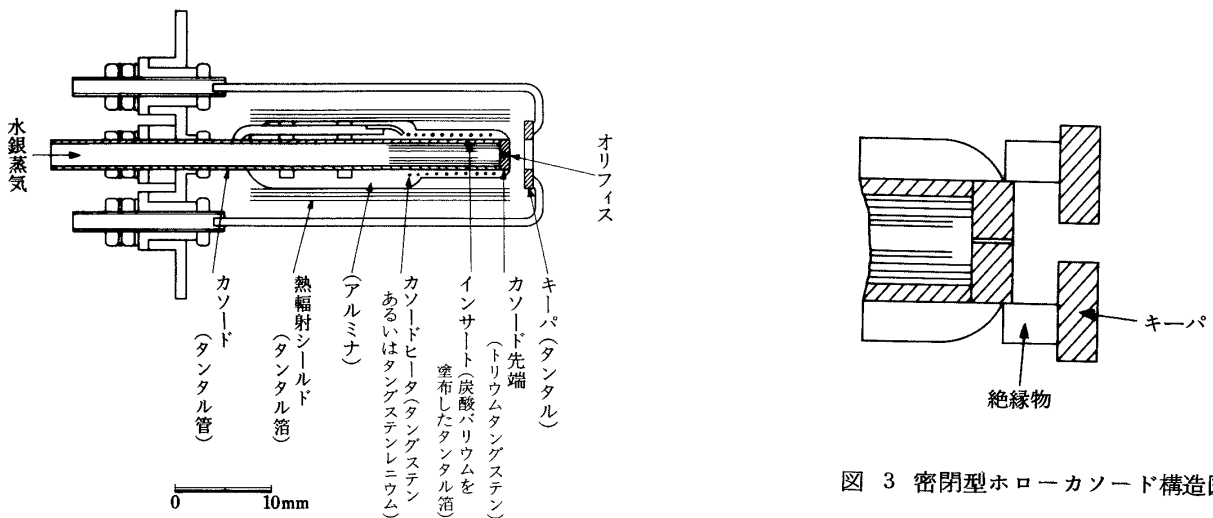


図 2 ホローカソード（開放型）構造図及び名称と材質

図 3 密閉型ホローカソード構造図

リフィス直前が空洞になるように切欠が入れている。

タンタル管外側には、0.3mmφのタングステンレニウムまたはタングステン線がヒータとして10mm間に10巻してあり、そのまわりには、アルミナをプラズマコーティングして、タンタル管に固定しかつ絶縁してある。ヒータの両端は、一方はタンタル管に、他方は端子に電子ビーム溶接してある。

ヒータの外側には、ヒータの輻射による熱損失を防ぐ目的で、タンタル箔を4〜5重に巻き、熱シールドとしている。このタンタル箔はタンタル管に接地してある。

カソード先端から約1.5mmのところ、外径7mmφ、内径3mmφ、厚さ1mmのタンタルの円環が取付けてある。これはキーパと呼ばれるもので、放電の開始及び維持に必要である。この図2の型を開放型と呼び、図3に示したような、カソード先端とキーパ間を絶縁物質で覆った型を、密閉型と呼ぶことにする。密閉型ではキーパの内径を1mmφとした。

カソードの温度を測るために、タングステン・26%レニウムタングステンの熱電対をカソード先端の側面に電子ビーム溶接した。

### 2.2 放電機構

放電機構については多くの研究がなされているが、プラズマと金属表面間の現象が明らかでないうえ、ホローカソードが小さく、カソード内部のプローブ測定等も困難なため、推量の域を出ていない。

放電開始のためには、キーパに瞬時正の高電位をかけることによって、カソード先端のオリフィスを通して、カソード内の電子を抽出加速する方法がとられる。この放電開始の種として必要な電子は、カソード内に挿入されたバリウムによって、熱放出される。即ち、タンタル箔に塗布された炭酸バリウムは加熱すると酸化バリウムと炭酸ガスに分解する。 $(BaCO_3 \rightarrow BaO + CO_2)$  更に短時間、1200°K迄温度を上げてフラッシュしてやると、酸化バリウムはバリウムと酸素に分解する。

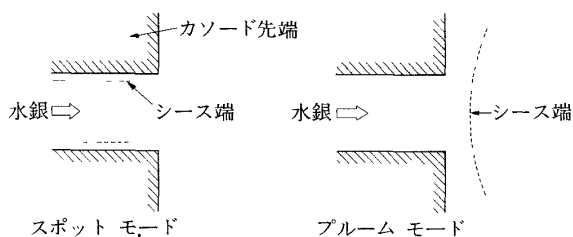


図4 シース端の位置

$(BaO \rightarrow Ba + \frac{1}{2} O_2)$  この酸化物の中に存在するバリウムが電子放出をつかさどる。この操作を活性化と称するが、このように活性化された酸化物陰極の仕事関数は、1.0〜1.5V、熱電子放出定数は $0.01 \sim 5 A/cm^2(^\circ K)^2$ 、動作温度は、1000〜1150°Kである<sup>4)</sup>。

放電には二つのモード、即ちスポットモード及びブルームモードと呼ばれているものがあることが知られている。ブルームモードの放電では、カソードから噴出されたブルーム全体が青白い光を放つ。一方スポットモードではオリフィス近傍にのみ明るいスポットが見られる。

Csiky<sup>1)</sup>はカソードから噴出されたプラズマの密度測定からシース厚さを求め、図4のように推定している。即ち、スポットモードでは、シース厚さがオリフィス半径より小さく、等ポテンシャル線がカソード内部迄入り込んでいる。ブルームモードではプラズマ密度は薄く、シース端はオリフィスの外へ出ている。FearnとPhilip<sup>2)</sup>はオリフィス前部の形状を変えた実験で、スポットモードでは、カソード内部での電子の供給が支配的であることを示した。またJacobsenとEubank<sup>5)</sup>はカソード内部にfire ballが存在するとし、その半径等を求めている。

### 3 実験方法と装置

実験は、6インチの油拡散ポンプと液体窒素冷却によるトラップを備えたパイレックス管の中で行なった。図5に上から見た実験装置の概略図を示す。ホローカソー

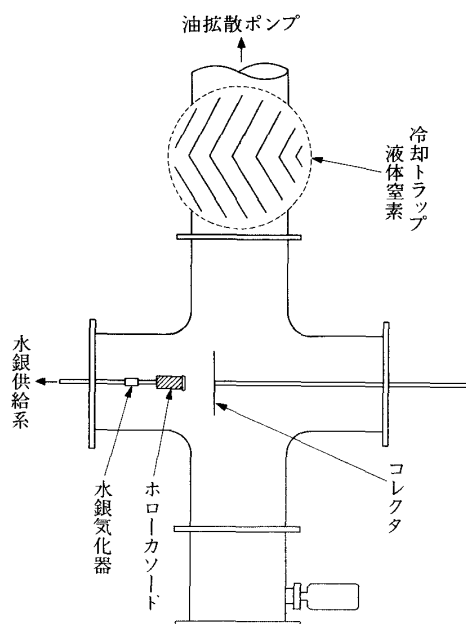


図5 実験装置概略図

ド作動中、パイレックス管内の真空度は、水銀流量の少いときで  $6 \times 10^{-6}$  Torr, 多いときで  $7 \times 10^{-5}$  Torr 程度である。

水銀供給率は水銀気化器としてステンレスの焼結金属を用い、その温度を変えることにより水銀流量を制御した。水銀流量は毛細管の水銀柱の減りから読みとった。水銀柱の先端は大気中に開いており、水銀は一気圧で押されるようになっている。

電気配線を図6に示す。

実験手順は、まずカソードヒータで数分間、カソードが赤熱状態になるまで加熱する。次に水銀気化器も加熱して水銀を送り、十分な水銀流量になったとき、カソードに対して約300Vの電位を瞬時、キーバにかけると放電は開始する。放電がいったん開始するとカソードヒータは切る。カソードヒータを切っても放電は持続し、また水銀流量を減らしても放電は持続する。

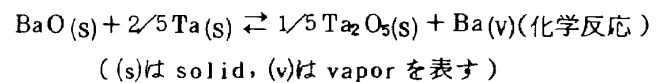
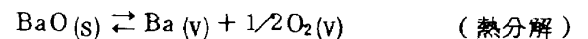
## 4 実験結果と考察

### 4-1) 放電開始条件

ホローカソードの放電を開始させるためには、二つの条件が必要である。第一にカソード内部での熱電子放出が十分であること。このためには2.2)で述べたように、酸化バリウムを活性化したうえで、バリウムの動作温度に保つ必要があるが、実際は、活性化に必要な温度で、数秒ないし数十秒保っているのが実用的である。活性化に必要な温度は、カソード先端温度で約1350°Kである。いったん活性化されると、より低い温度で放電開始に十分な電子が供給される。しかし時間がたつと再びフラッシングしてやらねばならない。これは主として、酸化バ

リウムが真空槽中の水蒸気により、水酸化物に変成するためである。

一方しばしばフラッシングを繰り返すと、バリウムが消失して放電開始が難しくなる。フラッシングの繰返しは100回程度が限度であろう。あまり高温で長時間フラッシングすると、ヒータ部を損傷するばかりでなく、タンタル箔及びバリウムの消耗を早める。カソードヒータを切って、ホローカソードを定常運転しているときでも酸化バリウムは消失する。次のような消失過程が考えられている<sup>5)</sup>。



これに加えて、塗布したバリウムは振動によりタンタル箔からはげ易い。これらの欠点のため、このインサートに代えて、多孔質の金属に Ba 源を含浸させた、いわゆる含浸陰極の使用が考えられている。

第二の条件として十分な水銀蒸気密度が必要である。オリフィス径  $0.12\text{mm}\phi$  では、約  $50\text{mA}$  相当以上の水銀流量のとき、キーバとカソード間に約  $300\text{V}$  の電圧を瞬時かけると放電は開始する。しかしこれよりかなり少ない水銀流量で放電が開始することがある。また水銀流量が多いときは、数十Vのキーバ電圧で放電開始が可能な場合もあるが、この場合は通常の水銀流量(約  $40\text{mA}$  相当)よりはるかに多く、コレクタ電流も多くなり過ぎるので実用的でない。実用的には、定常放電状態の水銀流量(約  $40\text{mA}$  相当)で放電が開始して、そのまま定常状態になることが望ましい。オリフィス径によっても放電し易さに違いがあると思われる。経験的にはオリフィス径が大きい方が放電し易く、オリフィス径  $0.05\text{mm}\phi$  のものは一度も放電しなかった。このことはオリフィス径が小さい方が同じ水銀流量でもオリフィス内の水銀粒子密度は高くなるので放電し易いのではないかの予想と逆で、オリフィス径が小さいとキーバの電位がオリフィス内に浸透し難いためと思われる。また、オリフィスが小さいと、酸化物その他の微小粉等による目づまりの可能性も増す不利もある。

確実に放電が開始する条件を定量的に求めるのは今後の課題である。

### 4-2) 放電特性

放電パラメータとしては、コレクタ電圧  $V_A$ , コレクタ電流  $I_A$ , キーバ電圧  $V_K$ , キーバ電流  $I_K$ , それに水銀流量  $m$  がある。イオンエンジンの電子源として利用されるのは、コレクタ電流  $I_A$  であり、キーバ電流  $I_K$  は電力

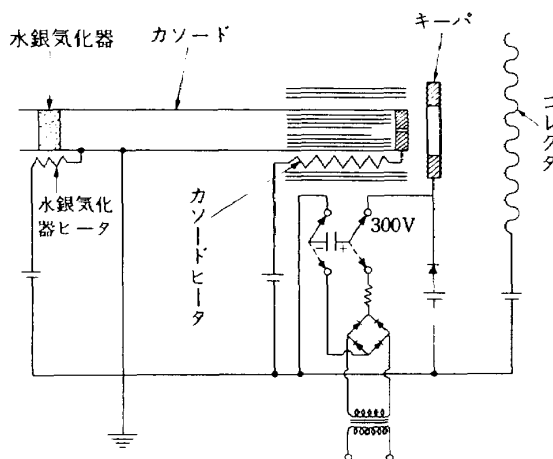


図6 電気配線図

損失となる。

先端オリフィス径  $0.25\text{mm}\phi$ 、開放型のホローカソードについて、水銀流量  $\dot{m}$  をパラメータとして、コレクタ電圧  $V_A$  と電流  $I_A$  の関係を求めたものが図7である。キーバ電流  $I_K$  を  $0.8\text{A}$  と一定にして、コレクタ電圧  $V_A$  を変化させると、次の三つの明らかに区別出来る領域に、コレクタの電圧、電流特性は分れる。

- (1) 低コレクタ電圧、高コレクタ電流の領域
- (2) 高コレクタ電圧、低コレクタ電流の領域
- (3) (1)(2)の中間の遷移領域

(1)はスポットモード、(2)はブルームモードの放電である。(3)は不安定な放電を示した。水銀流量によっても放電特性は変化し、水銀流量が多いとスポットモードしか現れず、コレクタ電流も多いが、水銀流量が少くなるに従ってコレクタ電流も減り、ブルームモードへの遷移もたやすくなる。更に水銀流量が減るとブルームモードしか現れなくなる。

キーバ電流を  $0.2\text{A}$  にした場合を図7に点線で示してある。この場合はブルームモードの放電しか現れない。水銀流量の多い場合 ( $34\text{mA}$  相当) でもブルームモード

で、これはキーバ電流が少ないためと思われる。

そこでキーバ電流と放電モードの関係を調べた。コレクタ電位  $V_A = 20\text{V}$ 、水銀流量  $\dot{m} \sim 27.5\text{mA}$  相当と一定にして、キーバ電流を変化させたときのコレクタ電流とキーバ電圧の変化を図8に示す。キーバ電流を徐々に増加させると、最初はブルームモードを示しているが、キーバ電流  $I_K = 0.6\text{A}$  付近から、放電に不安定な振動が起り始めて、 $I_K = 0.75\text{A}$  まで続き、急にコレクタ電流が増大して放電は安定する。コレクタ電流に応じて、キーバ電圧も急な変化を示し、以後放電はスポットモードとなる。遷移領域は、水銀流量によって左右に移動し、水銀

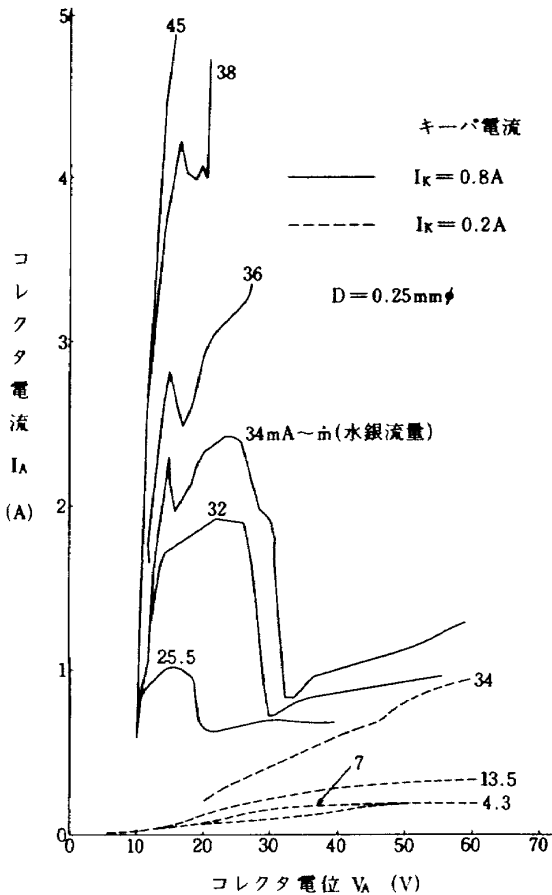


図7 放電特性 (オリフィス径  $0.25\text{mm}\phi$ )

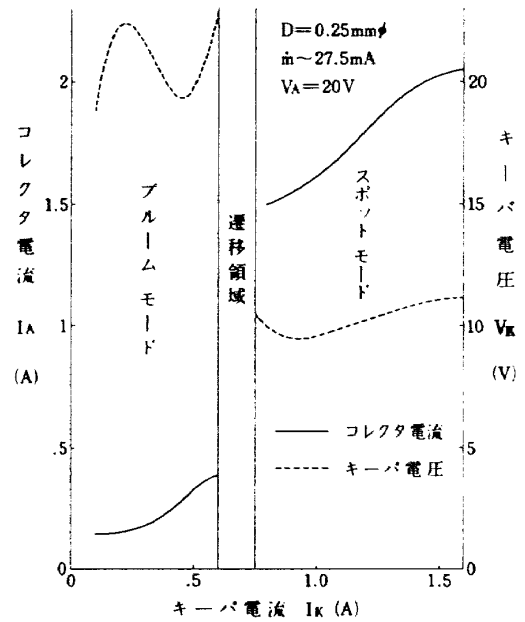


図8 放電モードへのキーバの影響

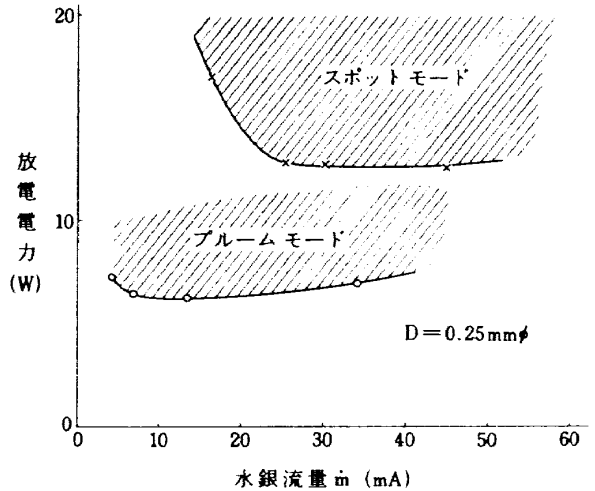


図9 水銀流量と放電電力の関係

流量の多いときは、小さいキーパ電流でスポットモードとなり、水銀流量の少いときには、ブルームモードしか実現できない。以上のことから、放電モードを支配するものは、水銀流量とキーパ電流といえる。

スポットモードあるいはブルームモードの放電を起し、

水銀流量とキーパ電流を一定にしておいて、コレクタ電圧を徐々に減少させ、放電が自続している最少の電力 ( $I_A V_A + I_K V_K$ ) を調べ、水銀流量との関係を示したものが図9である。オリフィス径  $0.25\text{mm}\phi$  について行ったので、ブルームモードでは水銀流量は少く、かつ放電電

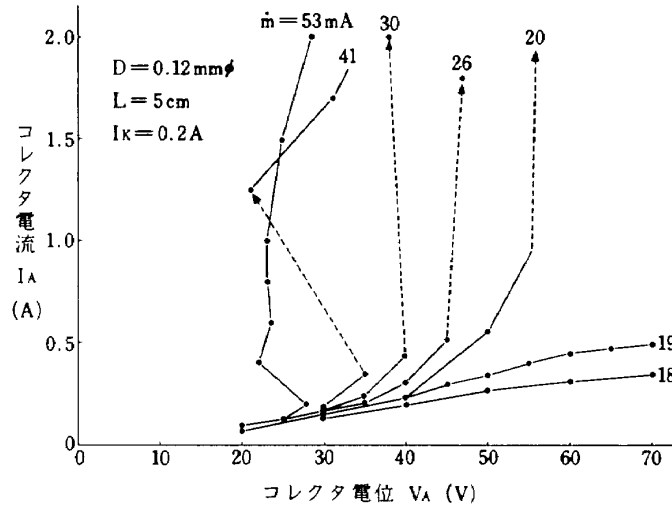


図 10 放電特性 (オリフィス径  $0.12\text{mm}\phi$ )

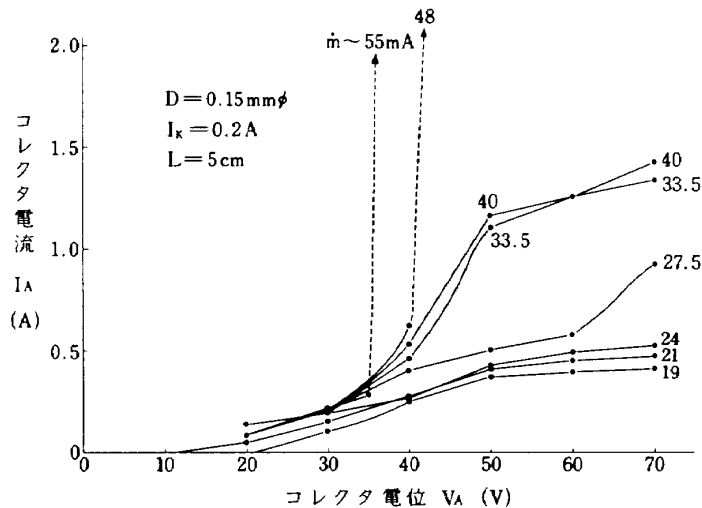
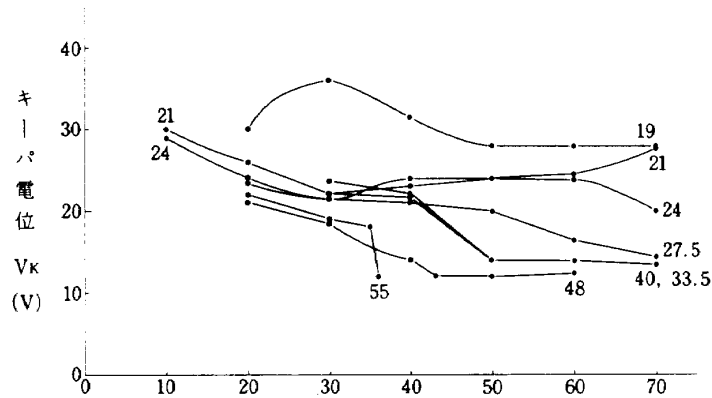


図 11 放電特性 (オリフィス径  $0.15\text{mm}\phi$ )

力も少ないが、スポットモードでは水銀流量、放電電力ともより多く必要であることが分る。また両モードとも水銀流量の少いときにはより多くの放電電力が必要とされることも示されている。

4-3) オリフィス径の影響

先端オリフィス径の大きさの効果をみるために、図8のオリフィス径  $0.25\text{mm}\phi$  の他に、それぞれ  $0.12\text{mm}\phi$ 、 $0.15\text{mm}\phi$ 、 $0.20\text{mm}\phi$  のオリフィス径をもつ三種のホローカソードの放電特性を調べ比較した。キーパ電流  $I_K = 0.2\text{A}$ 、カソード・コレクタ距離を  $5\text{cm}$  とし、水銀流量をパラメータとして、コレクタ電圧・電流の関係を求めたものを、それぞれ図10、図11、図12に示す。

オリフィス径  $0.12\text{mm}\phi$  (図10) ではコレクタ電位を上げていくと、水銀流量約  $20\text{mA}$  相当を境として、それ以上では、ブルームモードからスポットモードへの遷移が見られる。水銀流量が少くなるにつれて、遷移の起るコレクタ電位は高くなり、同時にコレクタ電流も多くなることが分る。一方  $20\text{mA}$  相当以下の水銀流量では、コレクタ電位を高くしてもブルームモードの放電しか起らない。水銀流量  $53\text{mA}$  相当は、電源の電流リミット、電圧フリーで、他の場合は、電圧リミット、電流フリーで実験を行った。

オリフィス径  $0.20\text{mm}\phi$  (図12) では、実験した水銀流量の範囲内ではスポットモードへの遷移は起らず、ブルームモードの放電だけである。これは4-2) で述べたオリフィス径  $0.25\text{mm}\phi$  (図7) の  $I_K = 0.2\text{A}$  の場合と同じ現象である。つまりオリフィス径が大きくなると、キーパ電流が少い ( $\sim 0.2\text{A}$ ) 場合では、スポットモードの放電は起り難い。

オリフィス径  $0.15\text{mm}\phi$  (図11) では、 $0.12\text{mm}\phi$  と  $0.20\text{mm}\phi$  の中間の現象が現われている。特に、水銀流量  $40\text{mA}$

A,  $33.5\text{mA}$  で、ブルームとスポットモードの中間領域と思われる放電が現れているが、コレクタ電位  $50\text{V}$  以上のキーパ電位の低さからスポットモードと思われる。

これら三つのホローカソードのブルームモードからスポットモードへの遷移の条件を知るため、水銀流量と、遷移する直前のコレクタ電位、コレクタ電流の関係を示したのが図13-aである。スポットモードへの遷移は、水銀流量が少い程高いコレクタ電位で起り、またオリフィス径が大きい程多量の水銀流量を要することが分る。ここで、ブルーム放電時のカソード先端温度の測定から、水銀粒子温度を  $700^\circ\text{K}$  と仮定して、オリフィス内水銀粒子密度を求め、水銀流量の代りに横軸にとってまとめると、図13-bのようになる。オリフィス径  $0.12\text{mm}\phi$  と

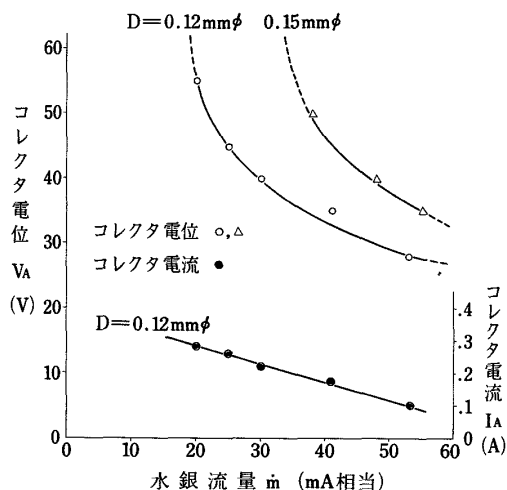


図 13-a

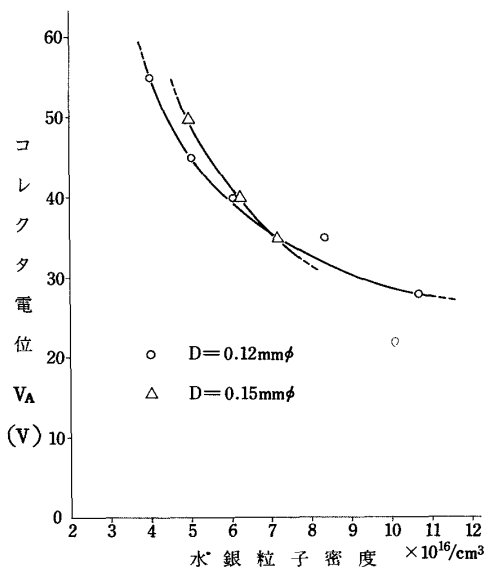


図 13-b ブルームからスポットモード遷移時の諸量

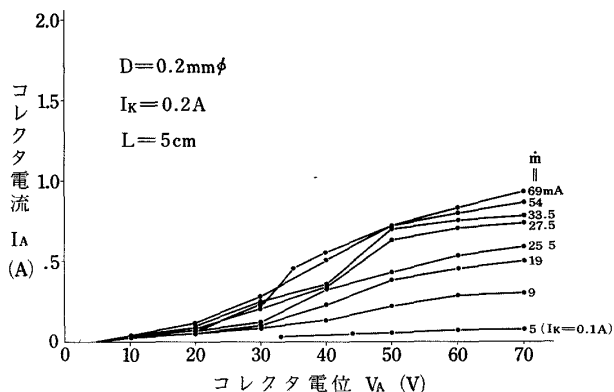


図 12 放電特性 (オリフィス径  $0.20\text{mm}\phi$ )



0.15mmφの曲線はほぼ一致し、ブルームモードからスポットモードへの遷移は、オリフィス内あるいはその近傍の水銀粒子密度とコレクタ電位に依存していることを示している。

水銀流量 19mA 相当で、三種のホローカソードの放電特性を比較したのが図 14-a である。放電はブルームモードで、コレクタ電圧電流特性は三種ともほぼ同じ傾向を示している。このことはブルームモードの放電がオリフィス外の現象、即ちカソードから噴出されたブルーム内でのイオン化が放電特性を決めることを表わしていると思われる。

ここで図 14-b に示したような同心球の仮想陰極と仮想陽極間の空間電荷制限電流から、ホローカソードとコレクタ間の空間電荷制限電流を求める。ホローカソード

では、半径  $r_0$  の球内で電子が供給され、電子は半角  $\theta$  の円錐状に噴出されると仮定する。球形電極の空間電荷制限全電流は

$$4\pi \times 2.33 \times 10^{-6} \frac{V_A^{3/2}}{r^2 \alpha^2} \quad [A]$$

で与えられる<sup>7)</sup>。 $\alpha$ は $r/r_0$ の関数である。コレクタを球状陽極の一部とし、 $r=5\text{cm}$ 、 $r_0=0.5\text{cm}$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\alpha^2=1.777$ として、ホローカソードからコレクタへの空間電荷制限電流を計算したものを図 14-a に示してある。実際には、ホローカソード、コレクタ間にはイオンが存在しており空間電荷制限電流より多く流れるはずである。それ故この $V^{3/2}$ に比例した曲線は近似値にすぎないが、実験値と比較的よく合致している。コレクタ電位が 30V 以下では、実験値は下にずれているが、これはコレクタ電位がキーバ電位より低くなると、キーバの影響が強くなり、コレクタ電流が少くなると思われる。コレクタ電位 60V 以上でも実験値は下にずれるが、これは電子の供給が不足するためと思われる。

4-4 カソードヒータの影響

放電中はカソードまわりに巻いたヒータは切るのが普通であるが、放電中も加熱し、その影響を調べた。

ヒータ電流をパラメータとして、コレクタ電圧、電流特性を図 15 に示す。オリフィス径 0.25mmφのホローカソードで、スポットモードは水銀流量 30mA 相当、ブルー

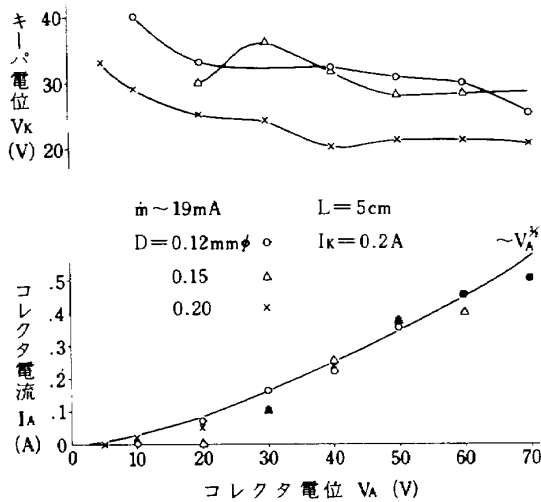


図 14-a ブルームモード放電特性の比較

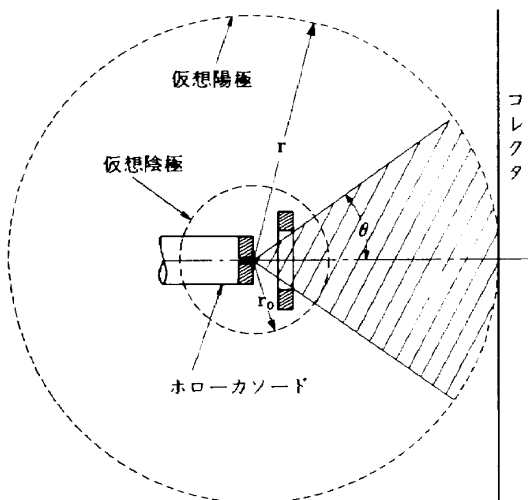


図 14-b

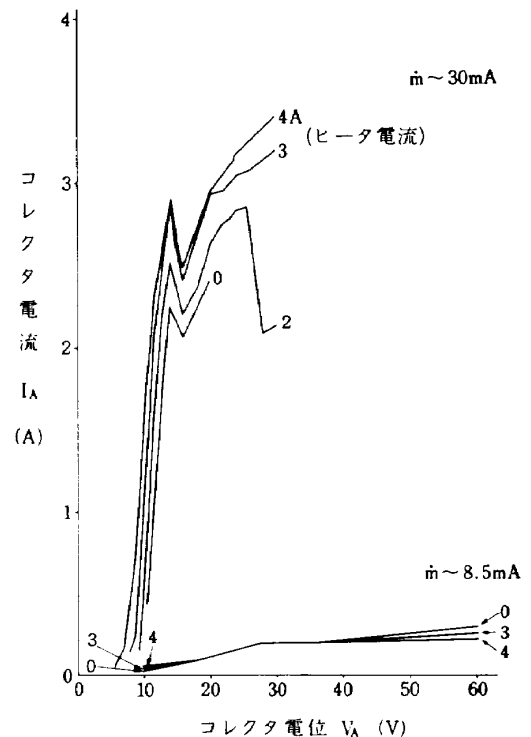


図 15 カソードヒータの影響

モードは水銀流量  $8.5\text{mA}$  相当で行った。スポットモードでは、ヒータ電流の増大に伴い、大幅にコレクタ電流が増加する。一方ブルームモードでは、顕著な変化は見られないが、コレクタ電位が高いところではコレクタ電流は減少するが、低いところでは逆に増大するという傾向を示している。

このことは、スポットモードではカソードの温度が上ると、バリウムあるいは、カソードを構成する、タンタル、トリウムタングステン等の金属表面から、熱電子放出がたやすくなるためと思われる。ブルームモードでは、コレクタ電位の低いところではカソードでの熱電子放出が影響するが、コレクタ電位が高いところでは、ヒータ電流がふえるに従い、水銀蒸気の温度が上ってオリフィスからの噴出速度が増大し、水銀粒子密度が低くなるため、カソード、コレクタ間でのイオン化が少くなるため、上記の傾向を示すものと思われる。

また更に、ブルームモードの場合に、コレクタ電位

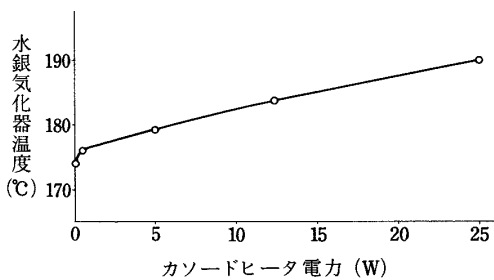


図 16 放電消滅に対するカソードヒータの影響

$V_A = 30\text{V}$ , キーパ電流  $I_K = 0.15\text{A}$  と一定にして、水銀流量を徐々に減少させ、放電の消滅する水銀流量（水銀気化器温度で表わしてある）とカソードヒータ電力との関係を示したのが、図 16 である。これによるとカソードヒータを働かせない方が、より少ない水銀流量で放電を自続できることが分り、図 15 で説明したことの裏付けにもなっている。

4-5) 極少水銀流量の場合の放電特性

既に緒言で述べたように、中和器としてのホローカソードで消費される水銀は推力に寄与しないので、推力に關していえば無駄となり、推進剤利用効率を低下させる。このため、消費電力との兼ね合いもあるが、中和器用ホローカソードでは、水銀流量は出来る限り少ないことが望ましい。5 cm イオンエンジンでは、主放電は  $40\text{mA}$  相当前後の水銀流量で行うが、中和器用はその 10 分の 1 程度、あるいはそれ以下の水銀流量で放電させ、必要な電子量（約  $30\text{mA}$ ）を供給したい。

このような極少水銀流量の場合の放電特性を調べるため、オリフィス径  $0.20\text{mm}\phi$  のホローカソードで、コレクタ電流を一定（ $40\text{mA}$  と  $25\text{mA}$ ）にして、徐々に水銀流量を減らしていったときのコレクタ電位とキーパ電位の変化及び消費電力（ $I_A V_A + I_K V_K$ ）の変化を図 17 に示す。キーパ電流は  $0.1\text{A}$  に一定して行った。水銀流量が減少するにつれ、コレクタ電位、キーパ電位とも高くなり同時に消費電力も多くなる。これによると、水銀消費を少なくすることと電力消費を少なくすることは相反する要求であることが分る。また実用的には、コレクタ電位、

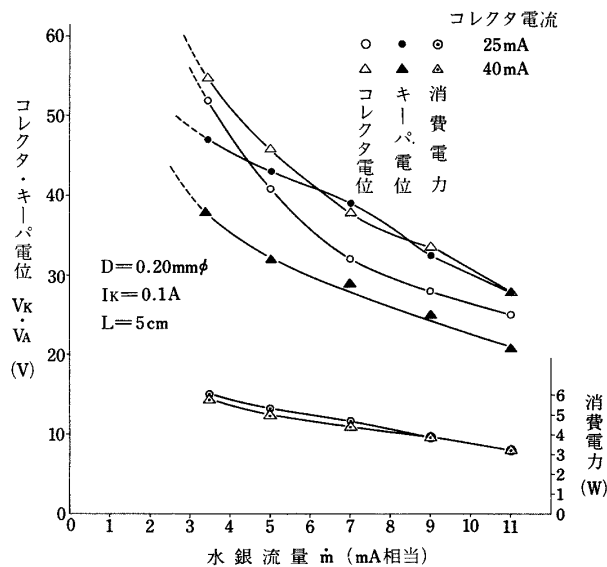


図 17 極少水銀流量の場合の放電特性

キーバ電位が高いと電力消費が多いのみならず、その電位に相当するエネルギーを持ったイオンにカソードがたたかれて、カソードの損傷が早くなる。これらの理由から、中和器用ホローカソードとしては、極少水銀流量でもコレクタ電位、キーバ電位が低くなるようなキーバ等の形状を工夫すると同時に、最適な水銀流量を決める必要がある。

WardとKing<sup>6)</sup>は中和器用として放電、つまりブルームモードの放電が自続するためには、第1次電子ビームによって生成されるイオンの数密度が、第一次電子自身の数密度より大きいことが必要であるとして、次式を与えている。

$$\frac{n_+}{n_B} = 3.61 \times 10^{16} \frac{\dot{m} V_B^{1/2}}{l \cdot \sin \beta} \frac{\sigma}{i}$$

但し水銀粒子温度 1000°K,  $kT_e/e \sim 1V$  としてある。

ここで  $\frac{n_+}{n_B}$  第1次電子の数密度と生成されるイオンの数密度

$\dot{m}$  水銀粒子流量 (equivalent amperes)

$\sigma$  電子と中性水銀原子の電離断面積 ( $cm^2$ )

$V_B$  電子エネルギー (volts)

$l$  ビーム長さ (cm)

$\beta$  ビームコーンの半角

いま、カソードとキーバの間で放電が起るとして、 $\frac{n_+}{n_B}$  を求めてみる。 $l$  をカソードキーバ間距離  $\sim 2mm$ , 電子ビームはカソードオリフィス先端からキーバ穴に広がって伸びているとして、 $\beta \sim 45^\circ$ , 水銀粒子温度を 700°K  $V_B \sim V_K - 10v$  (カソード内プラズマ電位を約 10v と仮定する) として計算すると、例えば  $\dot{m} \sim 3.4mA$ ,  $V_K = 55V$  の場合は、 $\sigma \sim 5.2 \times 10^{-16} cm^2$  として  $\frac{n_+}{n_B} \sim 3$ ,  $\dot{m} \sim 11mA$ ,  $V_K = 28V$  の場合は  $\sigma \sim 3 \times 10^{-16} cm^2$  として  $\frac{n_+}{n_B} \sim 3.6$  程度であり、WardとKingの与えた条件内に入っている

#### 4-6) カソード・コレクタ距離の影響

カソードとコレクタの距離によっても、放電特性は変わってくる。緒言で述べたように、イオンエンジンの主放電では、コレクタで模擬しているものの位置は明確ではないが、中和器では、カソードとコレクタの距離は中和器とイオンビームの距離と考えてよい。スポットモードとブルームモードについて、それぞれコレクタ電圧、キーバ電流、水銀流量を一定にしてコレクタ位置を移動し、コレクタ電流とキーバ電位の変化をみたのが図18である。スポットモードではカソード・コレクタ距離によりコレクタ電流に大幅な変化が見られ、その変化は三つの

領域に分れている。対応するキーバ電位も三領域に分れているが、その変化幅は小さい。このことから三領域ともスポットモードであると思われる。一方ブルームモードではコレクタ距離による変化は少い。水銀流量が少くなると、コレクタ電流はほぼカソード・コレクタ距離に逆比例して減少しており、空間電荷制限電流に近づいている。Csiky<sup>1)</sup>はカソード・コレクタ距離によって放電モードが変わるとし、遠いとブルーム、近いとスポット、その中間に電子放射によってスポットにもブルームにもなる領域があるとしているが、カソード・コレクタ距離の変化による放電モードの遷移は起らなかった。

#### 4-7) 密閉型ホローカソードの場合

図3のようにカソードとキーバの間を絶縁物質で覆った密閉型ホローカソードの放電特性を調べ、開放型と比較する。キーバ孔径の小さな密閉型を使うと、カソードとキーバ間の水銀粒子密度を高くでき、安定した放電が得られるのではないかと考えられる。このためキーバの内径を  $1mm \phi$  とし、キーバ位置をカソード先端から  $1mm$  とした。

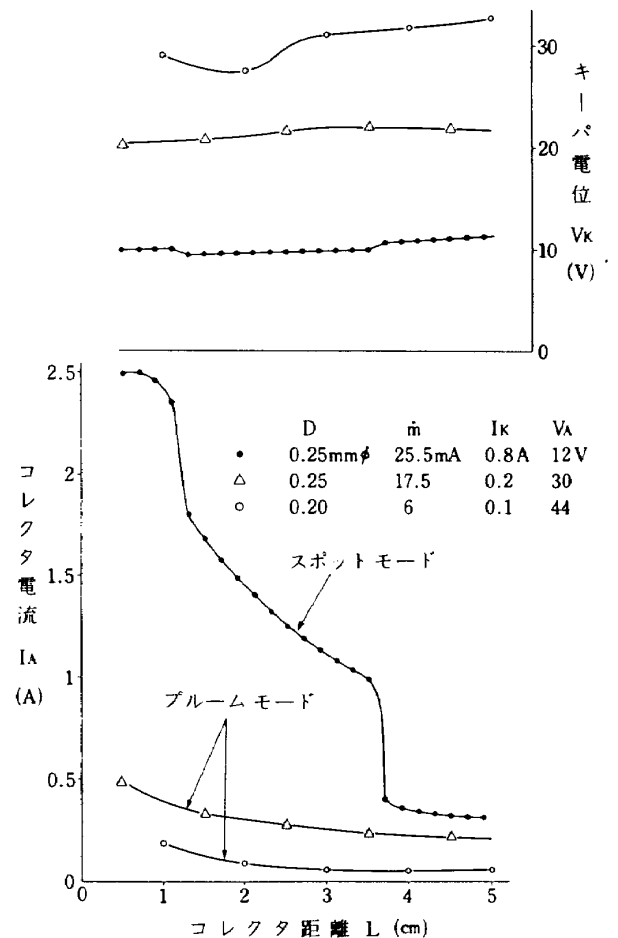


図 18 カソード・コレクタ距離の影響

オリフィス径  $0.20\text{mm}\phi$  について、コレクタ電圧・電流特性とキーパ電位の変化をコレクタ距離をパラメータとして図19に示す。キーパ電流  $I_K = 0.1\text{A}$  と一定にして放電を行なった。コレクタ電位が約  $20\text{V}$  以下ではコレクタ電流はほとんどなく、電流はすべてキーパに流れ込んでいる。しかし、あるコレクタ電位でいったん電流がコレクタに流れ始めると、コレクタ電位の増加につれてコレクタ電流は急激に増大する。そのコレクタ電流が流れ始めるコレクタ電位は、コレクタ位置によりかなりの差があることが分る。この特性を  $L=5\text{cm}$  について開放型ホローカソードの特性(図10, 11, 12)と比較すると、開放型オリフィス径  $0.15\text{mm}\phi$ 、水銀流量  $40\text{mA}$ 、 $33.5\text{mA}$ (図11)の特性と類似している。これらの密閉型と開放型( $40\text{mA}$ )のキーパ電位を比べてみると、密閉型ではキーパ電流  $0.1\text{A}$  で  $8\text{V} \sim 10.5\text{V}$ 、開放型ではキーパ電流  $0.2\text{A}$  で  $14\text{V} \sim 24\text{V}$  の範囲にある。密閉型はキーパ電流、電圧とも開放型の半分程度で作動し、キーパでの

消費電力も少なくてよい。ブルームモードからスポットモードへ遷移したとき、キーパ電位の変化は開放型では約  $10\text{V}$  程度であるのに密閉型では  $2\text{V}$  程度である。このように密閉型では開放型よりもキーパの影響が強く表れている。

キーパの影響を知るために図20にキーパ電流を変化させたときのコレクタ電流とキーパ電位の変化を示す。これは図19と同じ水銀流量  $44\text{mA}$ 、コレクタ電位  $41\text{V}$ 、 $L=5\text{cm}$  で行ったものであるが、開放型(図8)のような、キーパ電流の増減による放電モードの遷移は起らない。

極少水銀流量の場合の放電特性を図21に示す。水銀流量を徐々に減少させ、コレクタ電流  $40\text{mA}$  と  $25\text{mA}$  のときのコレクタ電位とキーパ電位及び消費電力を求めたものである。開放型ホローカソードの極少水銀流量の放電特性(図17)と比較すると、水銀流量  $4\text{mA}$  以上では、同量のコレクタ電流を引き出すためには、密閉型の

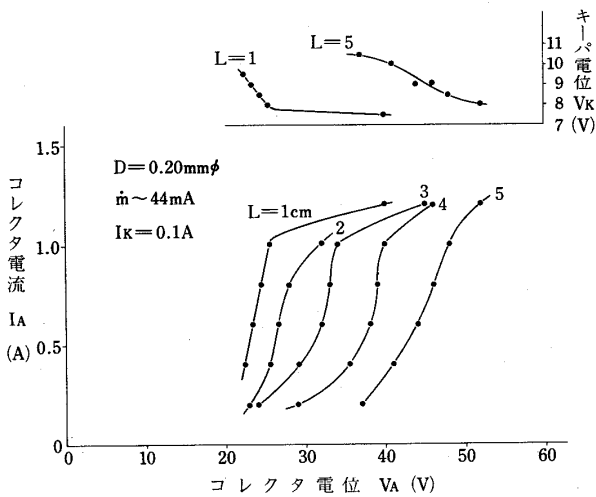


図 19 放電特性(密閉型, オリフィス径  $0.20\text{mm}\phi$ )

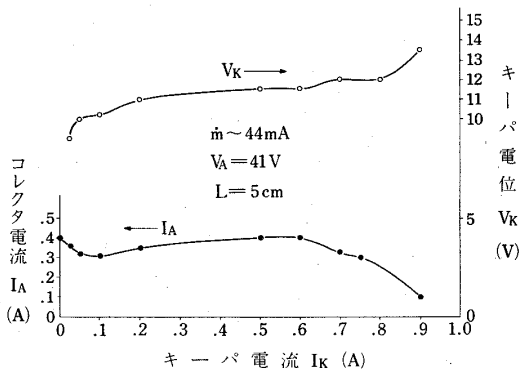


図 20 キーパ電流の影響(密閉型)

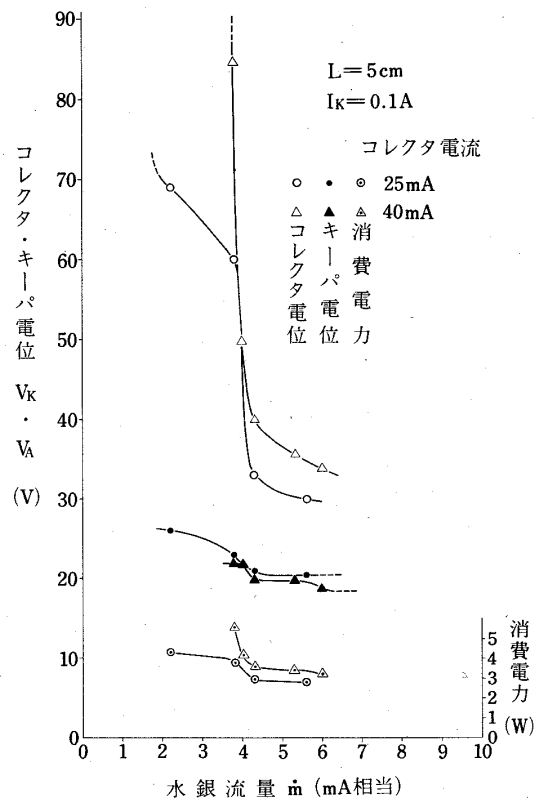


図 21 極少水銀流量の場合の放電特性(密閉型)

方が約10Vも低いコレクタ電位でよい。一方水銀流量4mA以下では密閉型のコレクタ電位は急に上昇し、開放型より高くなる。キーバ電位についても、密閉型の方が開放型より10V~20Vも低い値になっており、密閉型のコレクタ電位のコレクタ電流による変化は、開放型と比べて極めて小さい。消費電力も密閉型の方が少ない。以上の結果から、水銀流量4mA以上では、コレクタ電位、キーバ電位とも低く、かつ消費電力も少ない密閉型の方が開放型よりも中和器として適しているといえる。水銀流量4mA以下で、密閉型のコレクタ電位が急に高くなっているのは、電子のとり合いに関して、密閉型では開放型に比してキーバの影響が強く、水銀流量が少くなり電子の供給が少くなると特にその影響が表れ、所定のコレクタ電流を得るにはコレクタ電位が高い必要があるためと思われる。

キーバの影響を見るために、コレクタ電位を一定にしてキーバ電流を変化させて、コレクタ電流とキーバ電位の変化をみたのが図22である。これによると、一定のコレクタ電位で最大のコレクタ電流が得られるキーバ電流が存在することが分る。このキーバ電流で放電は最も安定していると思われる。水銀流量4mAでは、キーバ電流0.1A以下、0.25A以上で放電は消滅した。更に少ない水銀流量(2~3mA)では、放電が持続するキーバ電流の幅は一層狭くなることが分った。このことから水銀流量が少くなればなる程、水銀流量に応じた適当なキーバ電流を選ぶ必要があると思われる。

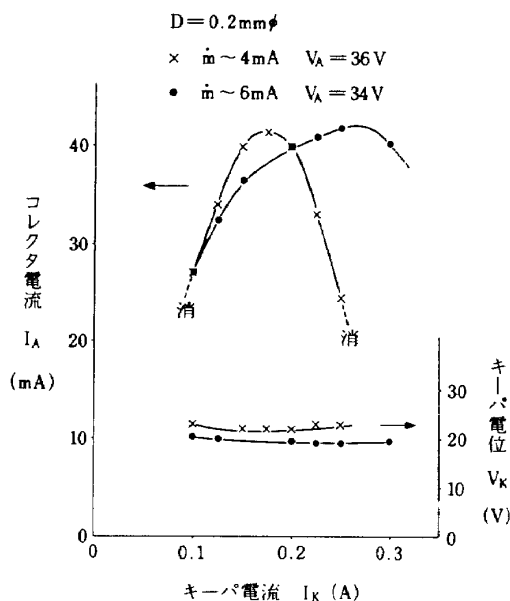


図 22 極少水銀流量の場合のキーバ電流の影響

図22の特性を考察すると、例えば  $\dot{m} \sim 4 \text{ mA}$  の場合、キーバ電流を0.1Aから増大させるとコレクタ電流も増大するが、これは電離がふえて電子の供給がふえるためであろう。また  $I_k = 0.175 \text{ A}$  を超えるとコレクタ電流は減少してくるが、これはキーバとコレクタの電流の取り合いで、キーバが取り過ぎるため起ると思われる、僅かではあるがキーバ電位が増大している。

## 5 ま と め

ホローカソードの試作、実験研究の結果、以下のことがいえる。

(1) コレクタ電圧、キーバ電流等を適当に選ぶことにより、イオンエンジンに適した水銀流量で、必要な放出電子量を得ることが出来る。

(2) 耐久性に問題があるのは、カソードヒータ部とカソード内に挿入した、炭酸バリウムを塗布したタンタル箔である。

(3) オリフィス径0.06mmφ以下のホローカソードは放電の開始は難しく、オリフィス径が大きい方が比較的容易である。

(4) 開放型では、放電モードを支配するのは主として水銀流量とキーバ電流である。

(5) オリフィス径による放電特性の違いを調べ、ブルームモードからスポットモードへの遷移時には、オリフィス内あるいはその出口近傍の水銀粒子密度とコレクタ電位との間に一意的な関係がある。

(6) カソードヒータの影響を調べて、スポットモードではカソードの金属表面から、ブルームモードでは、オリフィスから噴出される水銀粒子の電離によって電子が供給されることが確認された。

(7) 約3mA相当まで水銀流量を少なくして放電を維持することができたが、水銀流量が少なくなると、コレクタ電位、キーバ電位とも高くなる。

(8) 密閉型では開放型に比較し、キーバ電流、電位が小さくてすむ。

(9) 中和器用の極少水銀流量の場合は、密閉型の方が開放型に比べコレクタ電位、キーバ電位とも低く、消費電力も少ないので有利である。

(10) 極少水銀流量の放電では、電離効率とキーバ、コレクタ間の電流の取り合いの関係から、最も安定した放電を与えるキーバ電流がある。

今後の問題として以下のことが残っている。

(1) 放電開始条件を定量的に明らかにする。

(2) ブローブ測定により、両放電モードの違いをより

明らかにする。

- (3) ノイズの大きさ, 発生条件を明らかにする。
- (4) インサートとして, 含浸陰極を使用する。

## 6 謝 辞

終りに, ホローカソード製作に技術的協力をしていただいた日本電子工業株式会社の山口氏, 日産自動車株式会社宇宙航空事業部製造部技術課の宮木氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Csiky, G.A., 'Measurements of Some Properties of a Discharge from a Hollow Cathode' NASA TN D-4966.
- (2) Philip, C.M., 'A Study of Hollow Cathode Discharge Characteristics' AIAA Paper No 70-1087.

(3) Fearn, D.G. and Philip, C.M., 'An investigation of Physical Processes in a Hollow Cathode Discharge' AIAA Paper No 72-416.

(4) 浜田成徳, 和田正信 '真空管工学' コロナ社

(5) Jacobsen, R.A. and Eubank, H.P., 'Evidence of Fireball Phenomena in Hollow Cathode of Electron Bombardment Ion Thrusters' Journal of Spacecraft and Rockets MARCH 1973.

(6) Zuccaro, D., 'Mercury Vapor Hollow Cathode Component Studies' AIAA Paper No 73-1141.

(7) Ward, J.W. and King, H.J., 'Mercury Hollow Cathode Plasma Bridge Neutralizers' AIAA Paper No 67-671.

(8) ダウ, W.G., '電子工学の基礎 I' 共立全書

---

## 航空宇宙技術研究所報告475号

昭和51年10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

---