

ISSN 0389-4010
UDC 621.455.4:
629.7.036.73

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1099

12cmカウフマン型キセノンイオンエンジンの実験的研究

宮崎勝弘・早川幸男・北村正治

1991年3月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

12cmカウフマン型キセノンイオンエンジンの実験的研究*

宮崎 勝弘*¹ 早川 幸男*¹ 北村 正治*¹

Experimental Investigation of a 12 cm Diameter Kaufman Xenon Ion Thruster*

Katsuhiro MIYAZAKI*¹, Yukio HAYAKAWA*¹ and Shoji KITAMURA*¹

ABSTRACT

An experimental investigation was performed on discharge performance improvement of a 12 cm diameter Kaufman-type xenon ion thruster to study the effects of discharge chamber configurations on discharge performance. Various discharge chamber configurations were constructed by changing the shapes and heights of the pole piece, the positions of the main hollow cathode, the cathode baffle diameters, and the discharge chamber magnets. These parameters were selected because they are relatively easy to change and have a large influence on discharge performance. Thruster operation tests were then conducted using each of these experimental configurations.

Results revealed that a straight cylinder type pole piece provided lower ion production costs and higher discharge voltages than an inside brim pole piece, although differences only slight. Larger diameter cathode baffles gave higher discharge voltages, with the effects of baffle diameter changes on the characteristics of ion production cost with respect to propellant utilization efficiency, being larger in the brim pole piece than in the straight cylinder one. A 30 mm high brim pole piece gave the best discharge performance. As the main cathode was placed nearer to the baffle, the discharge voltage increased and the discharge performance improved. Stronger discharge chamber magnetic fields subsequently concentrated the ion production regions in the center of the chamber.

Discharge chamber configurations appropriate for operational use ion thrusters were selected based on these results.

Keywords: Xenon Ion Thruster, Discharge Performance

要 旨

本研究は、ビーム噴射口径12cmのカウフマン型キセノンイオンエンジンの性能向上の研究の一環として、放電室部品の形状、寸法等が放電性能に与える影響を明らかにすることを目的とした。このため、放電室部品のうち特に放電に関係の強いポールピースの形状および高さ、ポールピース内の主陰極の位置、バッフル径、放電室磁場の強さ等を変更してエンジン作動試験を行った。

* 平成2年12月27日受付(received 27 December 1990)

*¹ 宇宙研究グループ(Space Technology Research Group)

その結果、次のことがわかった。つば無し形状のポールピースは、つば付き形状のものに比較しイオン生成コストは低く、放電電圧は高いが、差は小さい。主陰極バッフル径を大きくすると放電電圧が上がる。つば付きポールピースでは、バッフル径の変更が推進剤利用効率対イオン生成コスト特性に与える影響が、つば無しポールピースに比較して大きい。ポールピース高さの最適値は、30mm程度である。主陰極をバッフルに近づけるにしたがって、放電電圧は上がり、エンジン性能は向上する。放電室磁場の強化はイオン生成領域を放電室中心部に集中させる。

また、本エンジンを実用に供する場合に適切と考えられる放電室形状を選定した。

1. ま え が き

イオンエンジンとは推進剤をイオン化し、静電場によってイオンを加速噴射し、推力を得るエンジンの総称である。化学ロケットに比べ推力は小さいが比推力が1桁以上高いという特徴をもつ。大型静止衛星の軌道保持用スラスタとしてイオンエンジンを用いた場合、従来のヒドラジンを推進剤としたスラスタに比べて推進剤重量を大幅に軽減できる。これによって、衛星の機器搭載能力を大幅に向上させることができる¹⁾。

イオンエンジンの推進剤として、従来水銀が用いられてきた。しかし、目標とするイオンエンジンを研究するにあたり、衛星搭載上の問題点のないキセノンが用いられるようになった。このため、キセノンイオンエンジンに関し、基本性能の確認および性能の向上が求められた。

イオンエンジンの性能として放電性能およびイオン抽出性能がある。放電性能とは、供給された推進剤をいかに効率良く電離するか、すなわちいかに低い放電電力でいかに多くのイオンを生成するかという性能である。放電性能には(1)放電室の寸法、形状、磁場および(2)推進剤供給法が関係している。イオン抽出性能とは、放電室で生成されたイオンをいかに効率よく多量に引き出して、加速噴出するかという性能であり、(3)スクリーン電極および加速電極から成るイオン抽出系が関係している。

本研究においては、12cm カウフマン型キセノンイオンエンジンについて、上記の(1)に関連し、主陰極まわりの放電室の形状、寸法が放電性能に与える影響を実験的に調べる。このため、ポール

ピースの形状および高さ、ポールピース内の主陰極の位置、バッフル径、放電室磁場の強さ等を変えて放電室形状を変更し、それぞれの形状においてエンジン作動試験を行って放電室特性を取得した。

上記(2)の推進剤供給法については、本研究の供試エンジンにおいては、主陰極供給推進剤流量と直接供給(主供給)流量の比のほぼ最適値が、既に明らかになっている。

上記(3)のイオン抽出系については、大口径のエンジンでは、電極の熱歪対策として電極形状を皿型とする必要があることが明らかになっている²⁾。本研究の供試エンジンにおいても皿型電極を採用している。

イオンエンジンの作動には高真空の試験環境を必要とする。エンジンの性能評価においては、特に真空槽内のキセノンのイオンエンジンの放電室内への逆流が問題となる。すなわち、真空度が十分に高くないと、真空槽内に残留しているキセノンが電極穴を通して放電室内へと逆流し、正規の推進剤供給流量以上にキセノンが供給されることになる。このため、エンジン性能が過大評価される。

従来推進剤として用いられてきた水銀に対しては、比較的簡単な真空装置により良好な真空度が得られた。これは液体窒素で冷却したシュラウドが真空槽内の水銀蒸気を凝縮し、実効的に真空排気するためである。

しかし、推進剤がキセノンに変更されたため、当所の従来の試験装置では十分な真空度を得ることができなくなった。これまでのカウフマン型イオンエンジンの試験は、このような試験条件で行

われていた³⁾。

本研究での試験では、新たに製作した大型試験装置を使用した。新試験装置は、大面積のクライオパネルを内蔵しており、12cm キセノンイオンエンジンの試験を行うのに必要な試験環境が得られる^{4,5)}。

本報告では、以下に本研究で用いた供試エンジンおよび試験装置、試験方法、放電性能の評価法、試験項目と結果、結果のまとめを述べる。最後に付録としてこれまでの当所のイオンエンジン研究の経緯について記す。

2. 供試体および試験装置

2.1 供試体

本試験に用いたイオンエンジンの外観写真(中和器は取付られてない)を図1に示す。その構成および概略断面を図2に図式的に示す。シールドケースを取り外したエンジンの写真を図3に示す。各部の寸法等を表1に示す。

エンジン本体は、中和器および推進剤主供給系

用絶縁器を除きほぼ軸対称形状をもつ。放電室上流側中央部にはイオン生成用電子源である主陰極が取付られている。大部分の推進剤を供給する主供給系からの推進剤を放電室に導入する分配器は、放電室上流壁(ベース磁極板)に円環状に取付られている。この推進剤は、推進剤分配器にかけられた24個の穴から一様に放電室内に供給される。

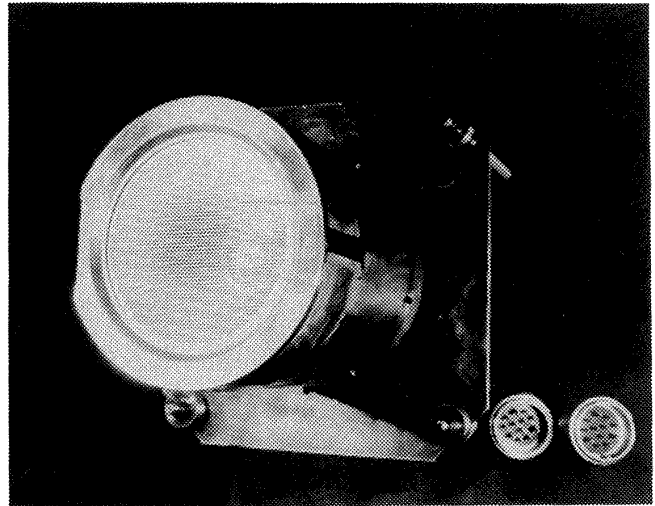


図1 供試イオンエンジンの外観

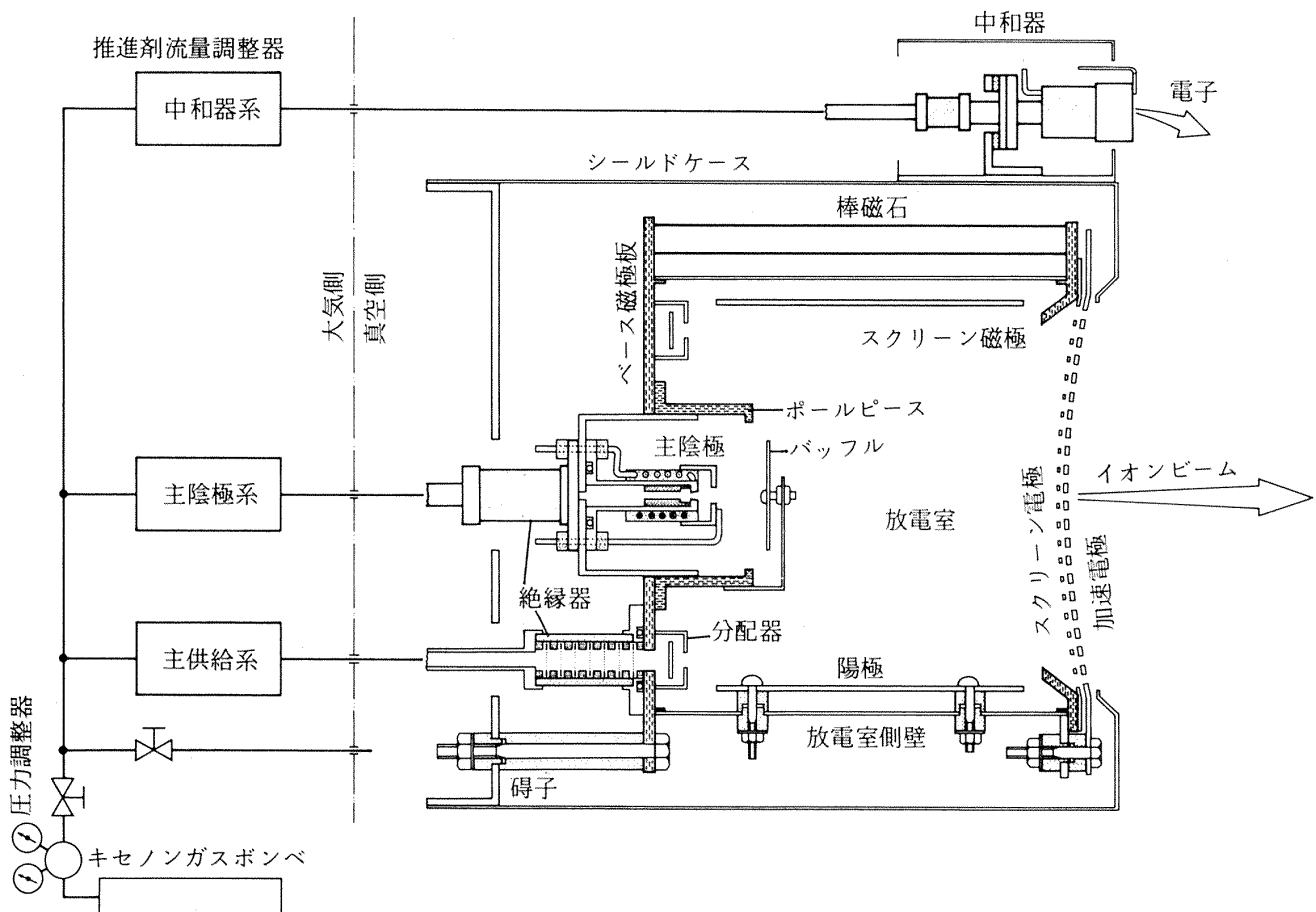


図2 イオンエンジンの構成および概略断面

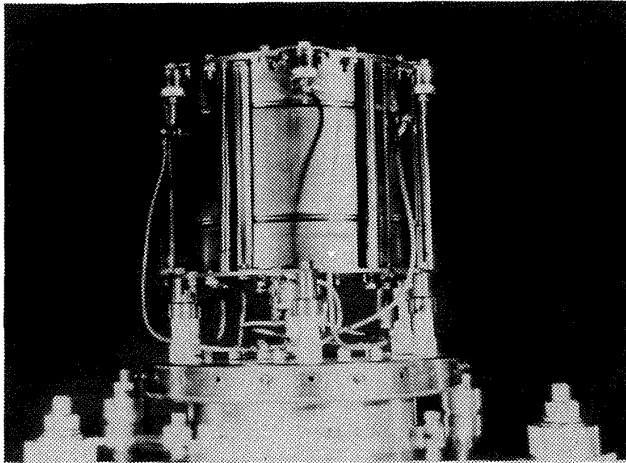


図3 イオンエンジン放電室

放電室側壁の内側には円筒形状の陽極が取付られている。放電室側壁の外側には、放電室磁場形成用の棒磁石（複数個）がほぼ等間隔で配置されている。放電室下流側には、スクリーン電極と加速電極から成るイオン抽出系が取付られている。

イオンエンジンは次のような原理で作動する。主陰極から放出された熱電子（1次電子）が陽極電圧で加速され、放電室内のキセノン原子と衝突することによってキセノン原子をイオン化し、プラズマが定常的に生成される。放電室の下流端に取付られたスクリーン電極および加速電極には、それぞれ正の高電圧および負の高電圧がかけられる。これら2枚の電極が作り出す静電場によって、放電室内のプラズマ中のイオンが電極穴を通過して下流に連続して抽出加速され、推力を発生する。

放電室には、磁場が形成されている。この磁場は、主陰極から放出された電子に回転運動を与え、陽極に達するまでの距離を長くして、キセノン原子との衝突の機会を高くし、イオンの生成効率を上げる役割をもつ。磁場は放電室外に配置された棒磁石（永久磁石）によって、上流側のベース磁極板を介したポールピースと、下流側に配置されたスクリーン磁極の放電室内への突起との間で形成される。その磁力線はラップ形状となる。

図4は、有限要素法を用いた磁場解析プログラムによって計算した磁力線形状を示す⁶⁾。磁場の強さは、中心軸上の最大値で3.7mT、ポールピースとバッフルの間隙部で数mTであり、測定値も

表1 供試体各部の寸法

放電室	内径	130 mm
	長さ	100 mm
陽極	内径	120 mm
	長さ	80 mm
スクリーン電極	口径	120 mm
	穴径	2.0 mm
	厚さ	0.3 mm
	開口率	69 %
加速電極	口径	120 mm
	穴径	1.2 mm
	厚さ	0.5 mm
	開口率	25 %
棒磁石 (基準形状)	材質	アルニコ5
	直径	6 mm
	長さ	100 mm
	本数	6本

計算値とほぼ一致している。この磁場を作り出すためのポールピースの形状・大きさ、主陰極の位置関係が性能に影響する。

なお、このような磁場形状を持つイオンエンジンを発明者にちなんでカウフマン型とよぶ。

ポールピース下流側の開口端近くにはバッフルを設ける。バッフルは、放電室内でのイオン生成が効率よく行われるよう主陰極からの電子を放電室に導く働きをもつ。非磁性体で作られているので、放電室磁場の形状には影響を与えない。図5に放電室内のポールピースおよびバッフルの写真を示す。

使用したスクリーン電極および加速電極は、多数の穴のあいたステンレス製の円板形状であり、放電室側に凸となるよう皿型に成形されている。2枚の電極間隔は約0.7mmに保った。

放電を利用して熱電子を放出させる中空陰極（ホローカソード）を主陰極として使用した。図6にその概略を示す。陰極管に挿入されたインサ

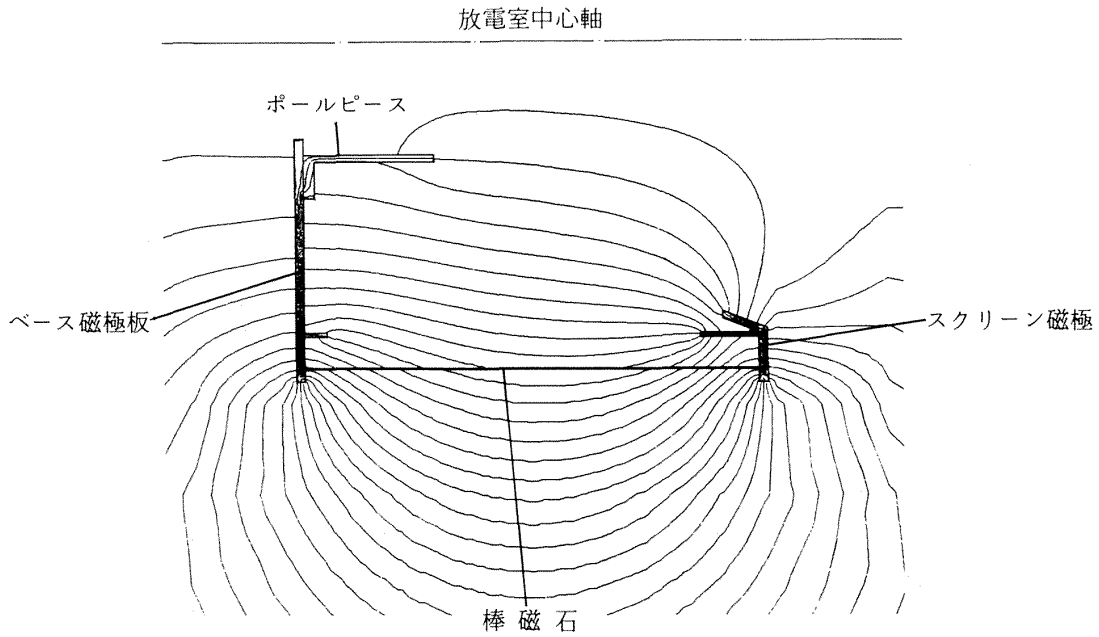
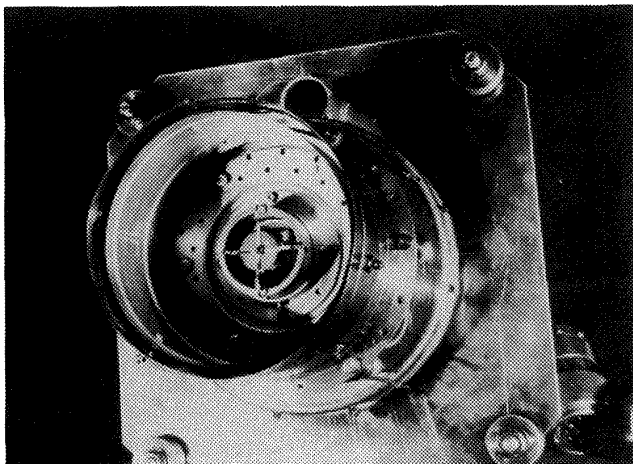
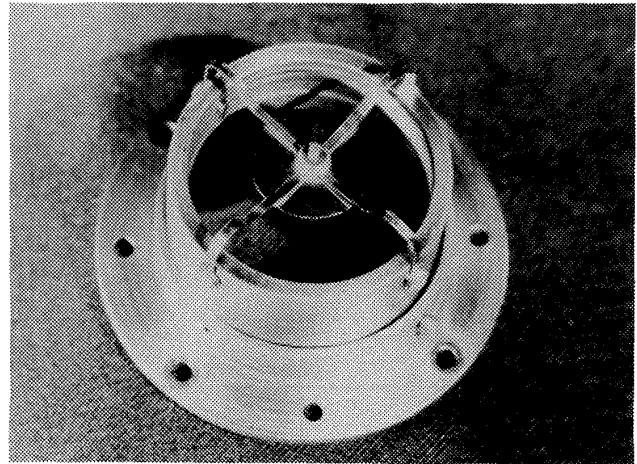


図4 カウフマン型イオンエンジンの磁場



(a) 組込んだ状態



(b) 本体

図5 ポールピース部の写真

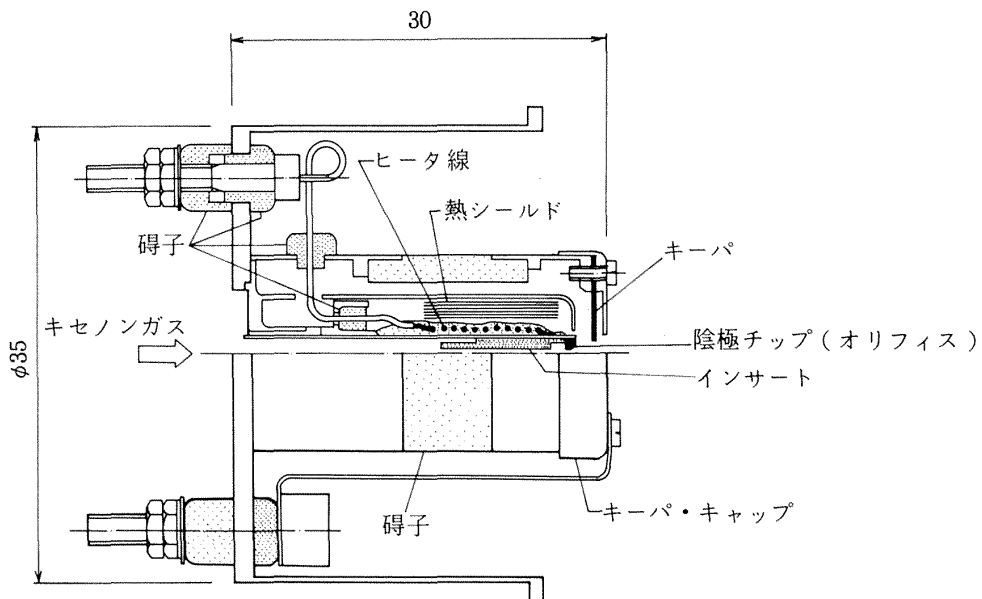


図6 主陰極(単位 mm)

ートは、熱電子を効率良く放出させるためバリウム化合物等を含浸させた焼結金属である。主陰極での放電の維持のため、主陰極にはキセノンガスを供給する。主陰極の始動のためには、陰極本体とキーパ間に電圧（約170V）をかけ、かつヒータで加熱する。主陰極放電が開始すると、ヒータ加熱を停止する。

供試体への推進剤供給は3系統有し、主供給系、主陰極系および中和器系である。各系統には推進剤流量調整器によって必要流量が供給される。推力に関係するのは主供給系と主陰極系である。ともに絶縁器を介して放電室内に導入される。主供給系推進剤は更に分配器を通して放電室内に一樣に供給されるようにしてある。

主供給系および主陰極系の供給路中に設けられた絶縁器は、放電室を高電位（ビーム電圧）に保ちつつ推進剤を供給するためのものである。絶縁器内部にはスペーシング（絶縁物）と金網が多段に設けられており、高電圧を分割して絶縁をは

かる。

宇宙で衛星からイオンのみを放出すると、衛星は負に帯電してしまう。中和器は、イオンと等量の電子を放出し、衛星が負に帯電するのを防ぎ、イオン加速を可能にする働きをする。中和器の構造は、主陰極とほぼ同じである。

シールドケースは、中和器からの電子が放電室に回り込むのを防いでいる。

2.2 電源配置

イオンエンジンの作動には7台の電源が必要である。図7はその接続系統を示す。

ビーム電源および加速電源は定電圧電源であり、その他の電源は定電流電源である。放電電源および主陰極用のヒータ電源とキーパ電源は、ビーム電源の正側出力に接続されており、これらの電源と放電室全体を正の高電位に保つことができる。

エンジンの始動時には、中和器用および主陰極用のヒータ電源を作動させ、中和器および主陰極

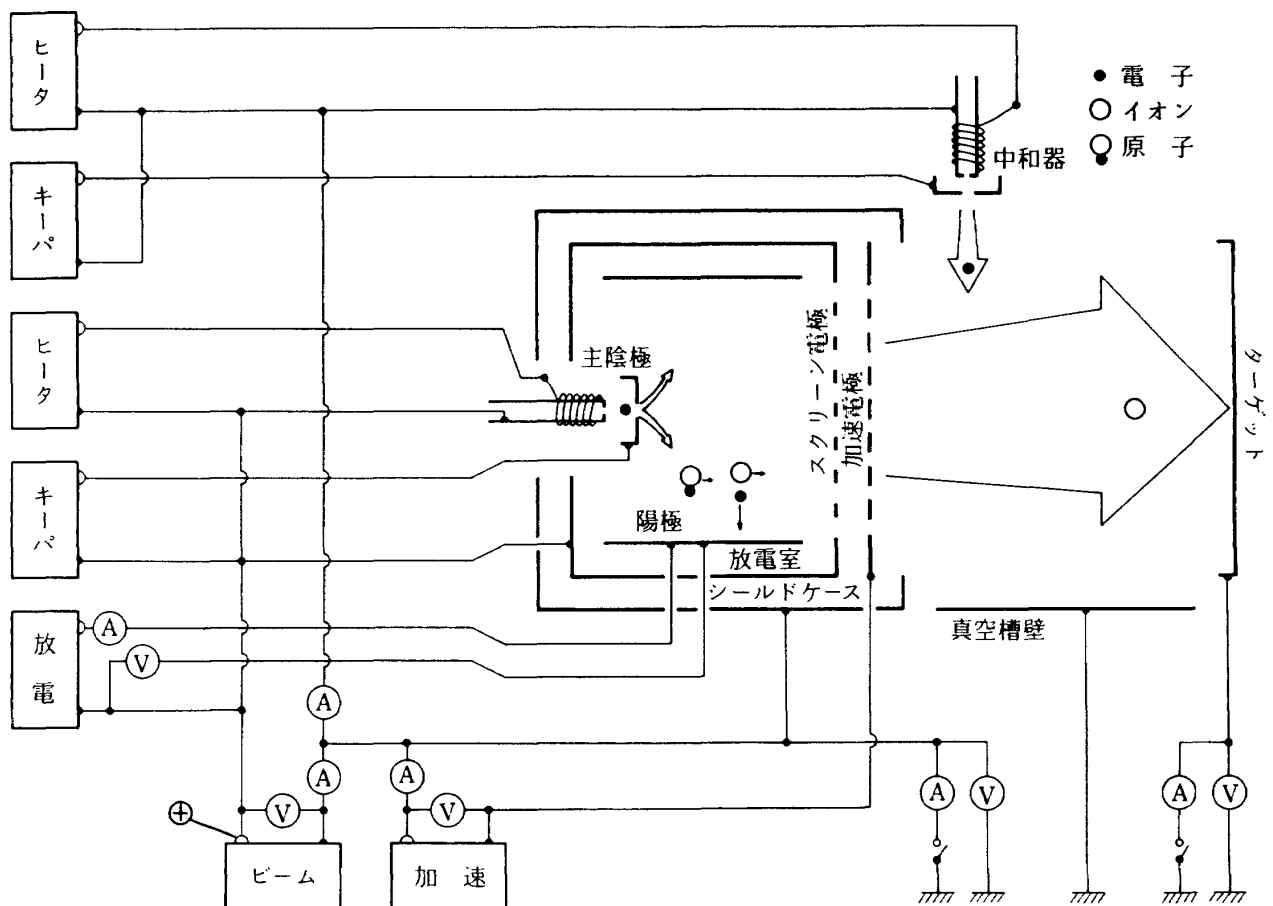


図7 電源系統図

を点火（主陰極本体とキーパ間の放電）させる。主陰極が点火すると同時に主陰極と陽極間の放電が誘発される。一定時間放電の安定をはかった後、ビーム電源および加速電源を作動させてイオンビームの抽出加速を行う。各電源はパーソナルコンピュータで制御され、上記の一連のエンジン作動も自動的に行われる。

加速されたイオンのほとんどはターゲットに入り、一部は真空槽本体に入る。電源系およびターゲットにはそれぞれ電流計および電圧計が接続してある。また、電流計にはスイッチが設けてあり、ターゲットおよび電源系を接地状態または浮動状態にすることができる。浮動状態にすることで宇宙空間における電氣的浮動状態での作動を模擬できる。

2.3 試験装置

イオンエンジン試験においては高真空かつクリーンな環境が要求される。本試験に用いたイオンエンジン宇宙環境装置の概略断面を図8に示す。

真空槽本体は主真空槽部と副真空槽部に分かれている。主真空槽部は直径3m、直胴部長さ3mであり、下流側鏡板内側には他から電氣的に絶縁されたターゲットが取り付けられている。副真空槽部

は直径1.5m、長さ1.2mである。全体として約7mの長さとなっている。ターゲット側から撮った同装置の写真を図9に示す。

主真空槽部には、50Kレベルのクライオパネルおよび100Kレベルのクライオパネルとシールドがある。これらは、ヘリウム冷凍機を用いて冷却される。100Kクライオパネルと真空槽本体壁の間には断熱材（薄膜多層断熱方式）を設けて壁からの熱の侵入を減らしている。また、ターゲットおよび副真空槽シールドは220Kに冷却される。

キセノン排気は主に50Kクライオパネルによって行われ、その他の気体はターボ分子ポンプおよび20Kクライオポンプによって排気される。キセノンに対する排気速度は、約 $80\text{m}^3/\text{s}$ であり、ターボ分子ポンプおよび20Kクライオポンプの排気速度（窒素）は、それぞれ $5\text{m}^3/\text{s}$ および $10\text{m}^3/\text{s}$ である。

イオンエンジンは、押し出し装置に取り付けた状態（図10）でエンジン格納槽内に格納される。エンジン格納槽は内径55cm、長さ55cmであり、口径55cmのゲート弁を介して副真空槽に接続されている。このゲート弁は、イオンエンジンの部品等の交換および位置変更を行うときに、真空槽内部に大気を入れずにエンジンを取り扱うための

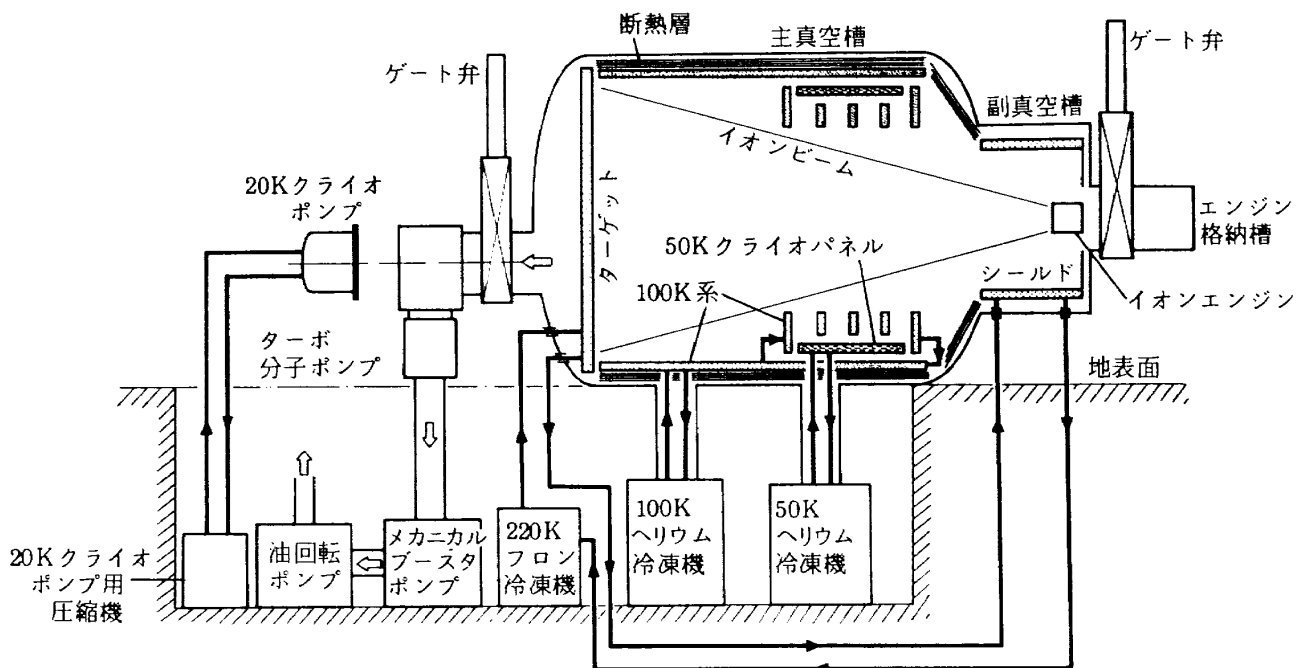


図8 イオンエンジン試験装置の概略断面

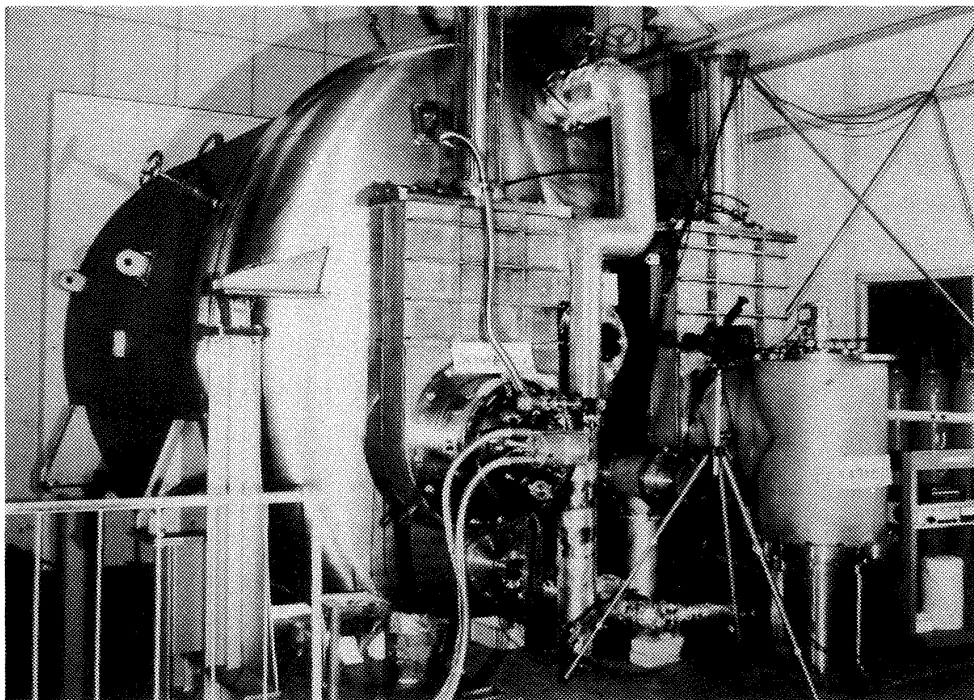


図9 イオンエンジン試験装置の外観写真

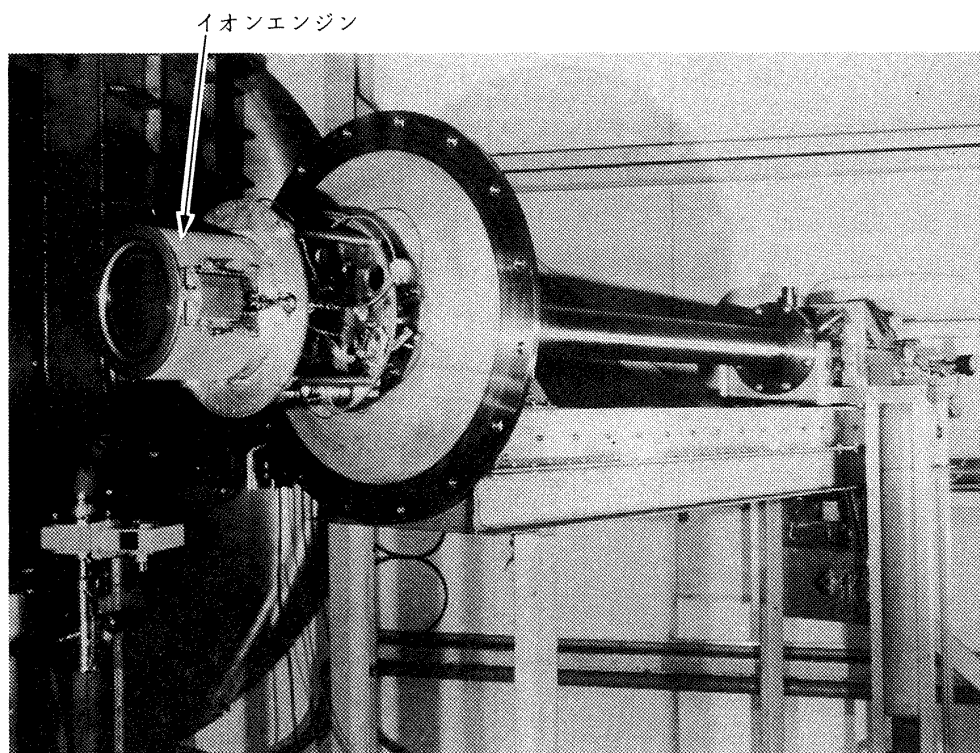


図10 押し出し装置（イオンエンジン取付け状態）

ものである。

押し出し装置は、比較的口径の小さい格納槽内から大口徑をもつ副真空槽内へイオンエンジンを移動させる役割をもつ。これによってエンジン周辺のキセノンの排気速度が大きくなり、エンジン周辺を高真空にすることができる。

操作手順として、格納槽を格納槽用ターボ分子ポンプで十分排気した後にゲート弁を開き、エンジンを移動させる。

2.4 推進剤供給装置

高圧ポンベに貯蔵されているキセノンは、圧力

調整器で圧力を下げた後、主陰極系および主供給系、中和器系それぞれの流量調整器を介して、エンジンに供給する。この推進剤供給装置は押し出し装置上に設置されている。

試験に先立って、推進剤供給系の内部漏れ試験および真空漏れ試験を実施し、漏れが十分小さいことを確認した。これは、キセノンの正常な供給の確認および大気中の酸素の混入防止のためである。推進剤中に僅かでも酸素が混入すると、陰極内に挿入されたインサートが劣化する。インサートが劣化するに従って放電電圧が高くなる。更に劣化が進むと放電維持が困難となる。

試験に際しては、予め供給系を十分排気した後、更にキセノンを用いてパージと真空排気を繰り返してからキセノンを供給した。その理由は、供給配管として細くかつ長い管を使用しているために、管の排気コンダクタンスは極端に小さく、長時間真空排気しても配管内には空気が残留する可能性があるからである。

2.5 大気開放操作

試験項目の変更のためイオンエンジンの部品の交換または位置変更を行うときには格納槽を大気開放するが、その導入気体に乾燥空気を用いた。それは、大気中の水分がイオンエンジン性能に影響を与えるからである。インサートは特に大きな影響を受ける。また、推進剤供給配管内への水分付着は真空排気に長時間要するばかりか酸素発生の原因となる。

3. 試験方法

3.1 作動条件

イオンエンジンの作動条件は、ビーム電圧1kV、加速電圧-0.6kVとした。主陰極キープ電源は始動時以外は切って、主陰極放電は主放電によって維持した。主放電電流はほぼ2.2Aから3.2Aの範囲で変更した。

放電室に供給した推進剤流量は、主陰極流量53mA相当および主供給系流量478mA相当で、合計531mA相当である。この合計流量は、推進剤利用効率(3.3節参照)を90%、ビーム電圧を1kV

としたときの推力計算値が25mNとなる値である。ただし、噴射イオンビームは全て一価であり、ビーム拡がりはないと仮定している。このときの比推力は3500秒となる。

主陰極流量対主供給系流量の流量比は性能に影響を与えるが、これまでの多数の試験結果では合計流量のうち10%前後を主陰極に供給した場合良い性能を示すことから、この流量比で一定とした。

中和器キープ電流は0.5Aとした。中和器流量は、通常40mA相当とした。始動時には、点火の促進のため流量を増した。

なお、上記の推進剤流量単位(mA相当)は、キセノン原子が一価イオンとなったと仮定した電流値で表したもので、1mA相当は 1.384×10^{-2} cm³/min(1気圧, 0°C)または 1.361×10^{-3} mg/sの流量となる。

ビーム抽出に伴い試験装置内のビームが当たる部分からの気体放出があり、試験装置の圧力は上昇する。その後時間の経過とともに下降する。定常状態では $2.3 \sim 2.7 \times 10^{-4}$ Pa(窒素相当)であった。なお、旧試験装置(直径1.5m真空槽)でのエンジン作動時の真空槽内圧力は約 1.7×10^{-2} Pa(窒素相当)であったので、今回の試験では真空度が約2桁向上したことになる。

3.2 データの取得

イオンエンジンは大気開放の影響と放電に伴う熱の影響によって、特性が安定するまである程度時間を必要とする。影響する項目として次の①~③が考えられる。

① スクリーン・加速電極の電極間隔が変化する。放電が開始すると、スクリーン電極は放電室内側であるため加速電極に比べ急速に温度が上昇する。そのため伸びに差が生じ、間隔が変化する。

② 放電室磁石の温度上昇に伴う特性の変化のため、放電室磁場の強さが変化する。

③ 主陰極からの熱電子放出特性が変化する。エンジン部品および部品位置を変更する度に、エンジンの大気暴露が必要である。このため取るインサートが特にその影響を受けて、熱電子放出性能が回復するまで時間を要する。

このため、本試験ではイオン抽出開始からデータ取得まで約90分間待機することにした。また、この待機の間試験装置の圧力もほぼ定常状態に達した。

データは、放電電流を0.2A ずつ変えて、放電電圧、ビーム電流、加速電極電流を予め校正したメータで取得した。この場合も、放電電流の変更の度に放電電力が変わるため、各放電電流値に対して10分間待機し、エンジン温度の安定をはかった。

放電電圧については電力供給線での電圧降下による測定誤差を除くため、別に電圧計測用補助線を設けた。推進剤流量は、ガス流に熱を加え、その温度上昇を検出する方式の質量流量計によって計測したが、精度を上げるため、実際にキセノンを使って校正を行った。

3.3 性能の比較

イオンエンジンの性能を比較する場合、良い性能とは推進剤利用効率が高く、イオン生成コストが小さい値である。推進剤利用効率 η_0 およびイオン生成コスト C_i は、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \text{推進剤利用効率 } \eta_0 (\%) &= \frac{\text{ビーム電流 (A)}}{\text{推進剤流量 (電流換算) (A)}} \times 100 \\ \text{イオン生成コスト } C_i \text{ (W/A)} &= \frac{\text{放電電力 (W)}}{\text{ビーム電流 (A)}} \end{aligned}$$

すなわち、推進剤利用効率は、計測されたビーム電流を、主供給系および主陰極への推進剤流量の和（電流換算）で割った値であり、パーセントで表わす。イオン生成コストは、放電に必要とした電力（放電電圧×放電電流）をビーム電流で割った値であり、W/Aで表わす。

同一の放電室形状に対しては、一般には推進剤利用効率を高くするためにはイオン生成コストは大きくなる。すなわち、 η_0 を横軸、 C_i を縦軸にとると右上がりの特性となる。従って、この性能線（ η_0 - C_i 特性とよぶ）が、他よりも右下に来るのが良い性能であるといえる。

イオンエンジンの放電性能は、一般的には放電

電圧を高くした方が良くなる傾向にある。しかし、寿命を評価する場合は高い放電電圧は問題となる。

放電電圧が高いと放電室内のイオンのエネルギーが高くなり、また、二価イオン（一価イオンの2倍のエネルギーをもつ）の生成が増す。このためイオンの攻撃による構成部品の侵食（スパッタエロージョン）が大きくなって、構成部品の寿命を縮める。また、侵食されて飛散した金属が、他の箇所に着すると、各電極の絶縁破壊の原因となる。

長時間の作動によって高比推力の特長が生かせるイオンエンジンにとって、寿命は非常に重要な課題であるが、本研究では寿命の問題を直接には取り扱っていない。寿命に関係する放電電圧について調べるにとどめた。

4. 試験項目と結果

4.1 ポールピース形状による性能比較

ここでは図11に示す2種類のポールピースを試験した。この2種類を区別するために「つば付き」と「つば無し」とよぶ。両者とも内径40mm、外径46mmの純鉄製円筒形であるが、つば付きポールピースには、先端内側に高さ1mmのつばが付いている。試験の構成は、共に、ポールピース高さ30mm、主陰極（先端）位置はポールピース下流面から上流側に15mm内へ、バッフル径は22mm、バッフル間隔は3mmである。

上記の2種類を選択した理由は、つぎのとおりである。多種類の形状のポールピースについて旧環境装置（直径1.5m真空装置）で試験を実施した。そこで使用したポールピースは、今回の試験で使用したポールピースとは必ずしも同じ直径ではなかったけれども、そこでの試験結果では、つば付ポールピースが最も良い性能を示し、つば無しポールピースも良い性能を示した⁷⁾。本試験項目で使用した2種のポールピースは、この結果から類推して選択した。

試験結果を図12に示す。推進剤利用効率 η_0 の上昇とともに、イオン生成コスト C_i は大きくなり、放電電圧 V_d は高くなる。同一の推進剤利用効率において、つば無しポールピースはつば付きに比較しイオン生成コストは低く、放電電圧は高い。例

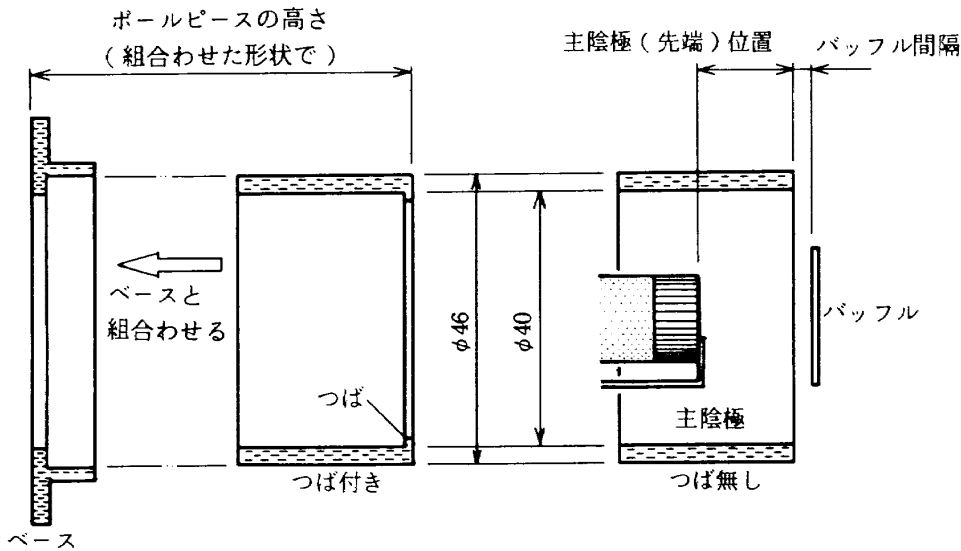


図11 ポールピースの形状 (単位 mm)

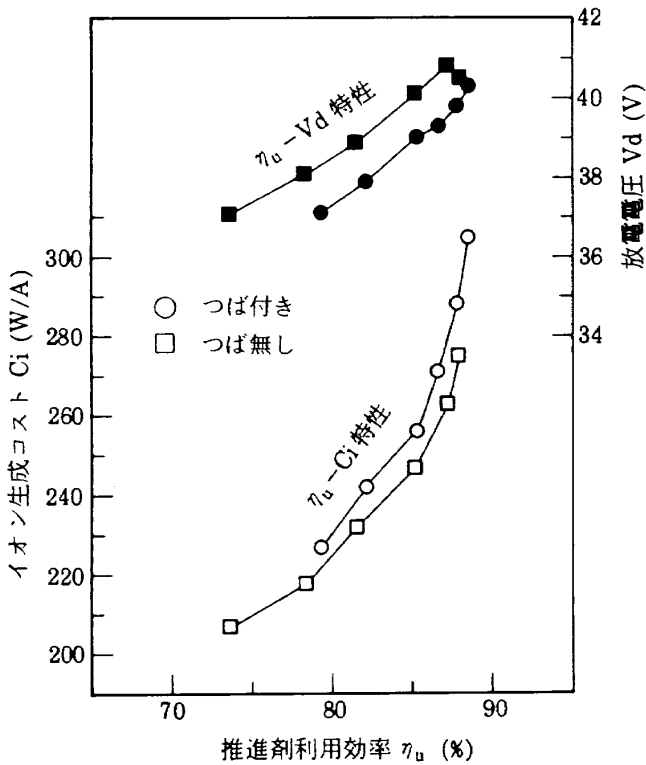


図12 ポールピース形状による放電特性の変化

例えば、 $\eta_u=85\%$ においてつば付きポールピースでは $C_i=247\text{W/A}$, $V_d=40.1\text{V}$, つば付ポールピースでは $C_i=255\text{W/A}$, $V_d=38.9\text{V}$ である。しかし、両者のイオン生成コストの差は、 8W/A であり、余り大きくない。

4.2 バッフル径による性能比較

つば付きおよびつば無しのそれぞれのポールピースに対しバッフル径を変えて試験した。試

験の構成は、共に、ポールピース高さ30mm、主陰極位置はポールピース下流面から上流側15mm内側へ、バッフル間隔は3mmである。試験したバッフル径は20mm、22mmおよび24mmである。

バッフルは、ポールピースからの磁力線を横切るように取り付けるため、主陰極からの一次電子の移動の妨げとなる。このため、バッフル径の変更によって放電電圧を変えることができる。また、バッフル間隔も放電電圧に影響するが、この一連の試験では3mmに統一した。

試験結果を図13に示す。図13の放電電圧特性は、2種のいずれのポールピースに対してもバッフル径を大きくすると放電電圧が上昇することを示す。上昇値もほぼ同様な値である。いずれの場合も推進剤利用効率の増加とともに放電電圧は上昇する。

つば無しポールピースのバッフル径20mmおよび22mmに対しては、推進剤利用効率が高いところで他とは異なった特性を示している。すなわち、放電電流が増加したにもかかわらず放電電圧は低くなっている。この領域では放電入力が増加がイオン生成の増加に寄与していない。

推進剤利用効率対イオン生成コストの特性は、2種のポールピース形状に対し異なっている。つば付きポールピースに対してはバッフル径の変更が η_u-C_i 特性に与える影響が大きく、大きなバッフル径で放電電圧が高い場合には高性能を示す。つば無しポールピースにおいては、バッフル径の変

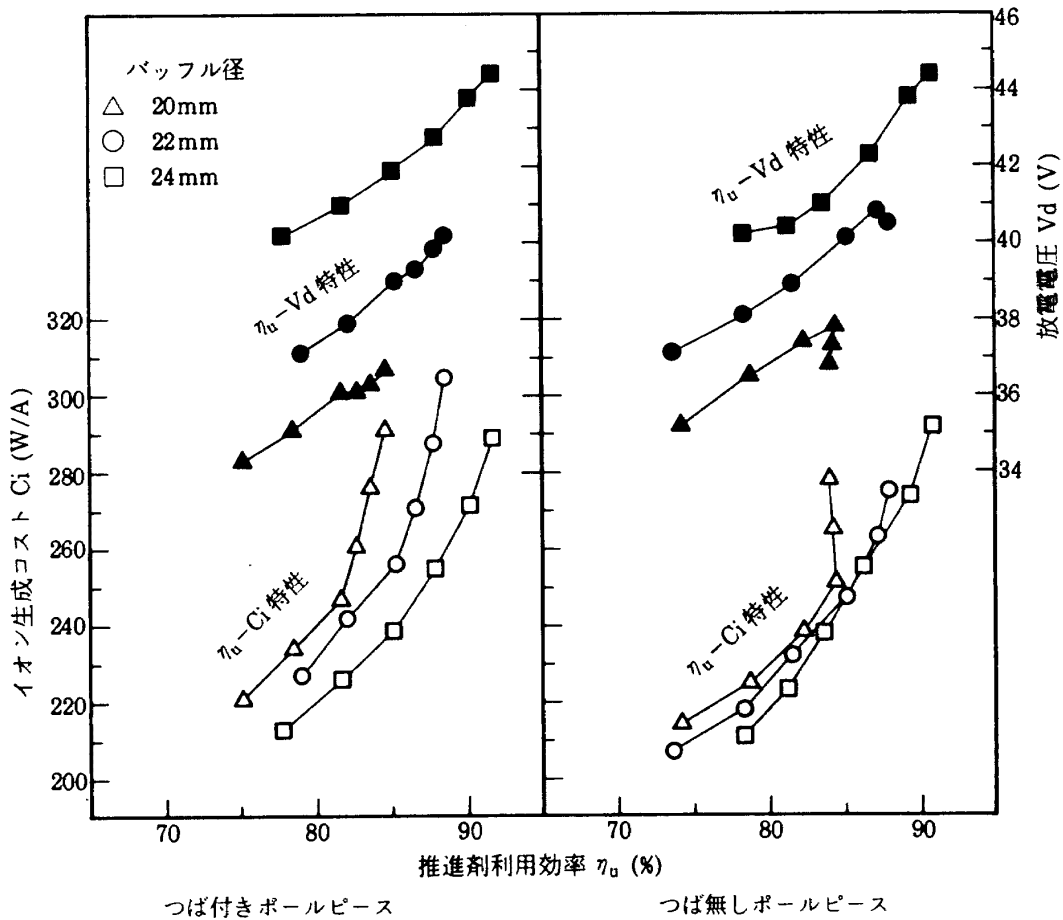


図13 バッフル径による放電特性の変化

更によって放電電圧特性が変わるにもかかわらず、 η_u - C_i 特性の変化は小さい。

4.3 ポールピース高さによる性能比較

ポールピースは図11に示すように、ポールピース部とベース部とに分かれる構造となっている。ポールピース部を替えることで高さを変えることができる。試験の構成は、つば付きポールピースを用い、主陰極位置はポールピース下流面から上流側へ15mm内へ、バッフル径22mm、バッフル間隔3mmである。試験したポールピース高さは、20mm、30mmおよび40mmである。

ポールピースの高さの変更によって、陰極と陽極の関係および陰極と放電室内磁場の関係が変わる。

試験結果を図14に示す。性能の比較では、高さ40mmのポールピースは、一連の試験の構成とした高さ30mmより、明らかに性能が悪い。すなわち、高さ40mmのポールピースでは、高さ30mm

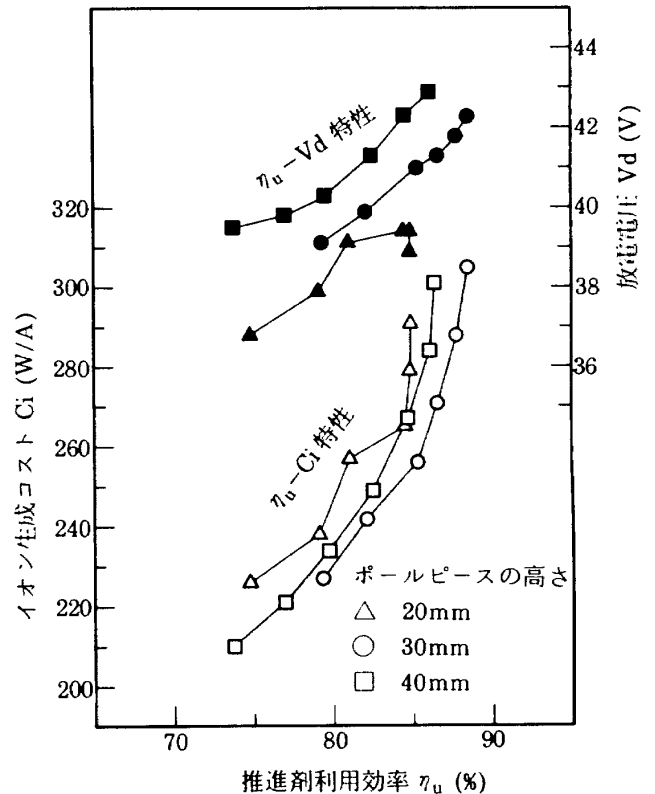


図14 ポールピース高さによる放電特性の変化

に比較し、放電電圧が高いにもかかわらず、 η_u - C_i 特性は左上方にきている。高さ20mmと30mmのポールピース比較でも30mmの方が若干良い性能である。

放電電圧特性では、ポールピースが高い方が高い放電電圧を示した。これは、ポールピースとスクリーン磁極との間隔の減少のため磁場が強化されるためおよび陰極と陽極の相対位置によって電子の移動距離が増すためであると考えられる。

高さ20mmのポールピースでは、推進剤利用効率85%近くにおいて放電電流の増加にもかかわらず放電電圧が低下するという特異的な電圧特性を示している。

4.4 主陰極位置による性能比較

主陰極は図11のようにポールピース内にあり、エンジン本体との相対位置を軸方向に変更できる構造となっている(図2参照)。これによって、バッフルとの間隔を変えることができる。試験にはつば付きのポールピースを用いた。その構成は、ポールピース高さ30mm、バッフル径22mm、バッフル間隔3mmである。試験した主陰極位置(主陰極先端とバッフル間の距離)は11mm、18mmおよび25mmである。

試験結果を図15に示す。放電電圧特性は、主陰極をバッフルに近づけるにしたがって放電電圧が上昇することを示す。これは、主陰極位置を変えることにより、主陰極から放出された電子の軌道が変わり、バッフルとの関係で放電電圧が変わることによる。18mmから11mmへの主陰極位置変更に伴う放電電圧の上昇の程度は、25mmから18mmへの変更に対する上昇より大きい。

主陰極がバッフルに近づくにつれて、推進剤利用効率対イオン生成コストの特性線は右下方に移り、エンジン性能が向上することを示している。

4.5 磁場強度による性能比較

放電室磁場は、放電室外周囲に付ける棒磁石の本数または太さによって変えることができる。試験の構成は、ポールピースにつば付きを用い、主陰極はポールピース下流面から上流側へ15mm内へ、

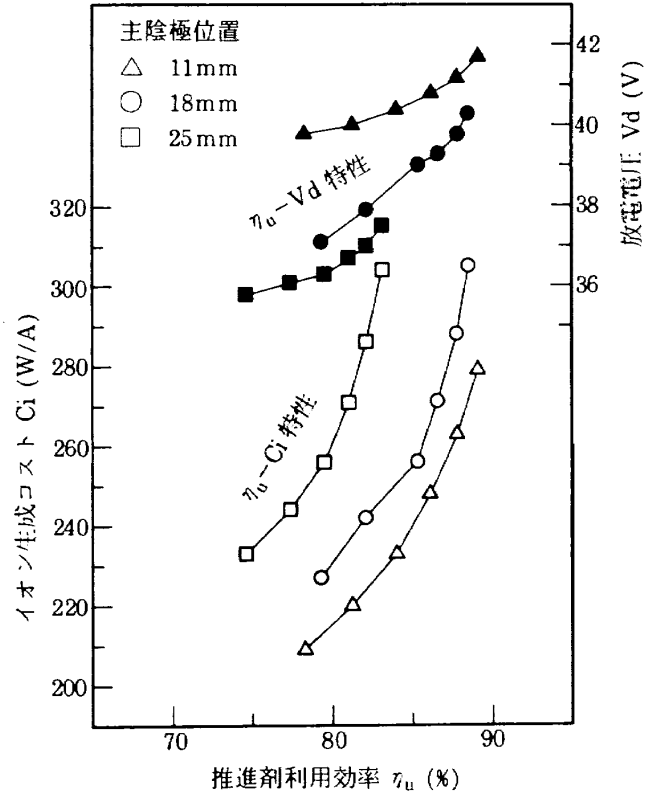


図15 主陰極位置による放電特性の変化

バッフル径22mm、バッフル間隔3mmである。試験は次の①および②の磁石構成について行った。

- ① 直径6mm、長さ100mmの棒磁石6本。
- ② 上記①に更に直径4mm、長さ100mmの棒磁石3本を追加。

なお、本節(4.5)以外の全ての試験には上記①の磁石構成を用いた。

試験結果を図16に示す。放電室磁場を強化すると、 η_u - C_i 特性は右下方に移り、性能は向上しているように見える。しかし、磁場の強化とともに放電電圧が5V近く高くなっており、比較として不十分であることがわかった。

このため、放電室磁場を強化した場合に放電電圧が基本放電室磁場での値に近くなるようにバッフル径を18mmと小さくして試験をやり直した。試験結果を図17に示す。磁石を強化しかつバッフル径を18mmと小さくすると、放電電圧特性は基本構成での特性と同様となった。しかし、 η_u - C_i 特性は左上方に移っており、磁石を強化した方が性能が悪くなることがわかる。

この原因はポールピース先端の磁力線の集中に関係している。一般に、磁場は電子が陽極に達す

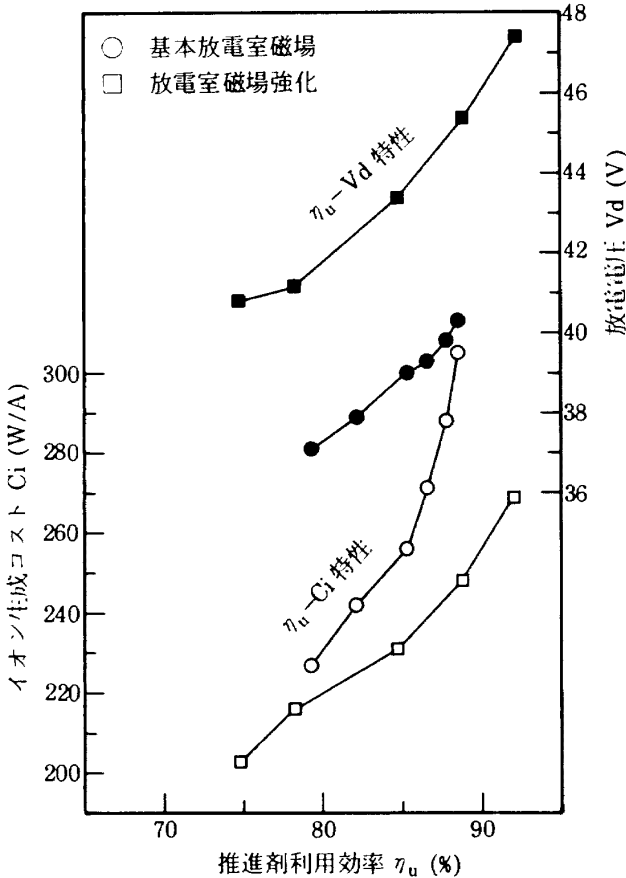


図16 放電室磁場の強さによる放電特性の変化

るまでの距離を稼ぎ、イオンとの衝撃の機会を増す働きをする。また、電子の閉じ込めにも寄与している。これらが有効に働くためには、磁力線がポールピース先端に集中する必要がある。磁力線が集中していれば、磁場を強化することによって電子の閉じ込めが更に良くなり、性能の向上が望める。

実際は、図4から判るように、磁力線はポールピース先端に集中しているのではなく、ベース磁極板やポールピース内側の上流域からも出ている。磁石を強化すれば、ポールピース先端磁場が強化されるが、その周りの磁場も強化し、磁場の強い領域が広がる。

そのために、イオン生成領域は放電室中心部に狭められる。これによって、電子が原子と衝突する機会が減少すると考えられる。また、磁場の強い領域が広がるとバッフル効果を増すので、放電電圧は高くなる。

放電室磁場を強化した場合にイオン生成領域が放電室中心部に偏っていたことは、次の事実から

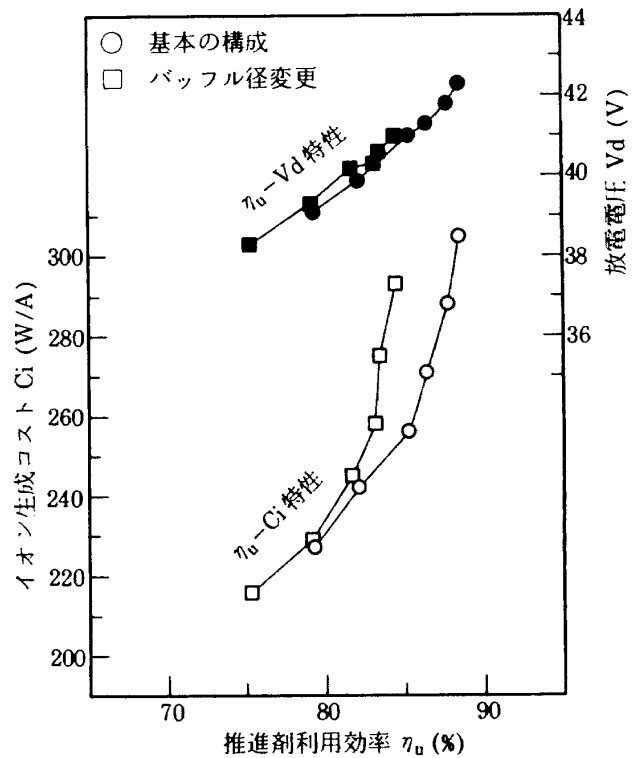


図17 放電室磁場の強さによる放電特性の変化 (バッフル変更)

わかる。イオン生成領域が放電室中心部に偏ると、ビーム抽出に際して中央部のイオン密度が高過ぎて、抽出されたイオンの集束が不十分となる。集束が不十分であるイオンが加速電極に衝突するため、加速電極電流は通常より大きい値を示す。また、イオンの衝突は加速電極を損耗する。

実際、放電室磁場を強化した場合、加速電極電流が通常値 (1.8mA) に比較して大きく (3.6mA)、また、試験終了後、加速電極の穴径が中央部で拡大していたことから、イオン生成領域の集中があったことがわかる。

4.6 総合比較

ここでは、試験を行ったエンジン形状について全体的な性能比較を行う。また、本エンジンを実用に供する場合にどの形状が適するか検討する。

全体の試験の結果を表2にまとめる。表2では、それぞれの放電室形状に対して推進剤利用効率80%および85%における放電電圧およびイオン生成コストを示した。データが取得できなかった場合は空欄とした。なお形状番号1は基本放電室形状を示す。また主陰極位置はポールピース上流端面

表2 エンジン性能のまとめ

形状 番号	ポールピース 形状 高さmm	バップル 径 mm	主陰極 位置 mm	磁場	$\eta_u=80\%$		$\eta_u=85\%$	
					Ci W/A	Vd V	Ci W/A	Vd V
2	つば付 30	20	15(18)	基本	240	35.6	291	36.8 *1
1	つば付 30	22	15(18)	基本	231	37.3	255	38.9
3	つば付 30	24	15(18)	基本	221	40.7	239	41.9
4	つば無 30	20	15(18)	基本	230	36.8	251	37.8 *2
5	つば無 30	22	15(18)	基本	225	38.5	247	40.1
6	つば無 30	24	15(18)	基本	218	40.3	248	41.6
7	つば付 20	22	15(18)	基本	247	36.5	265	37.4
1	つば付 30	22	15(18)	基本	231	37.3	255	38.9
8	つば付 40	22	15(18)	基本	235	38.5	271	40.5
9	つば付 30	22	8(11)	基本	215	39.9	240	40.6
1	つば付 30	22	15(18)	基本	231	37.3	255	38.9
10	つば付 30	22	22(25)	基本	261	36.5	---	---
1	つば付 30	22	15(18)	基本	231	37.3	255	38.9
11	つば付 30	22	15(18)	強化	220	41.8	233	43.7
12	つば付 30	18	15(18)	強化	235	37.6	293	39.0 *3

※1 84.6%
 ※2 84.4%
 ※3 83.1%

主陰極位置:主陰極先端面とポールピース下流面の距離
 () 内数字:主陰極先端とバップルの間隔

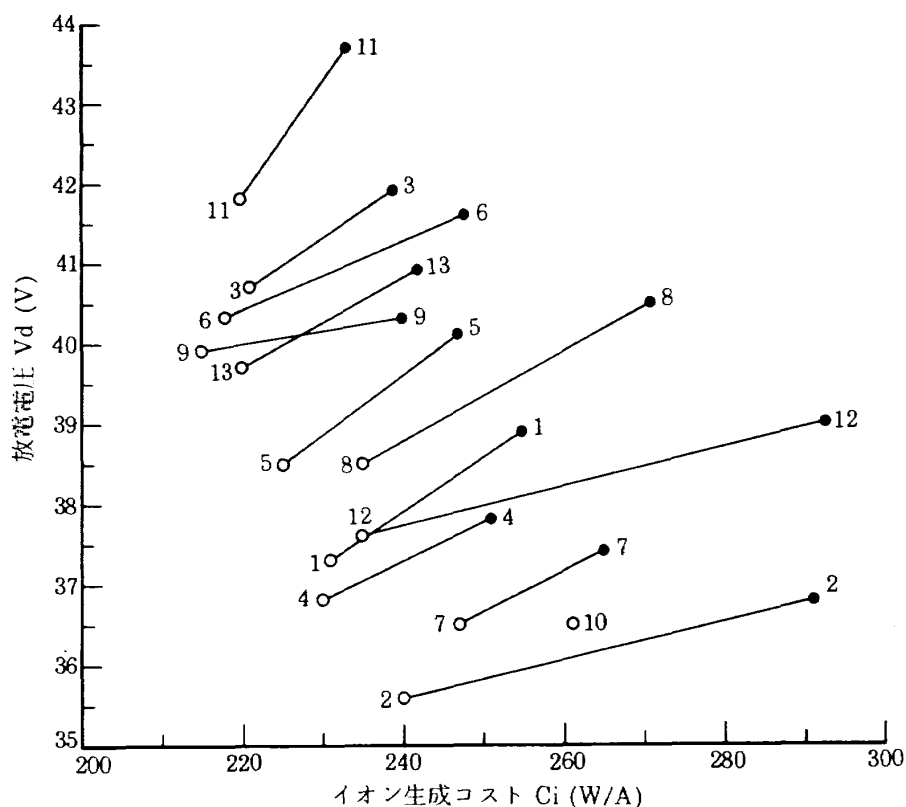


図18 イオン生成コスト対放電電圧

から内側への距離で示した。

図18は、表2の放電電圧およびイオン生成を図示したものである。現状の供試エンジンでは推進剤利用効率90%の実現は困難であり、同80%~85%での使用が妥当である。寿命の点から放電電圧は40V程度以下が必要であり、37V程度以下が望ましい。この基準から放電室形状1,4および5が適切な形状と考えられる。

5. ま と め

今回の試験では、ビーム噴射口径12cmのカウフマン型キセノンイオンエンジンの主陰極まわりの形状および磁場が放電性能に与える影響を明らかにするため、ポールピースの形状および高さ、バッフル径、主陰極の位置、磁場の強さ等を変更し、放電特性を調べた。

結果を次にまとめる。

(1) つば無しポールピースは、つば付に比較しイオン生成コストは低く、放電電圧は高い。両者の差は余り大きくない。

(2) 両ポールピースともバッフル径を大きくすると放電電圧が上昇する。

(3) つば付きポールピースでは、バッフル径の変更が η_u - C_i 特性に与える影響が大きく、大きなバッフル径で放電電圧が高い時には高性能を示す。

(4) つば無しポールピースにおいては、バッフル径の変更によって放電電圧特性は変化するが、 η_u - C_i 性の変化は小さい。

(5) ポールピース高さは、30mmがほぼ最適である。

(6) 主陰極をバッフルに近づけるにしたがって、放電電圧は上昇し、エンジン性能は向上する。

(7) 放電室磁場の強化はイオン生成領域を放電室中心部に集中させる。

(8) 本エンジンを実用に供する場合、放電室形状1,4および5が適切な形状と考えられる。

今回の試験では、形状変更項目を主陰極回りおよび放電室磁場に限った。その他の形状項目として、流量比の詳細な最適化、推進剤分配器形状、放電室の長さ、放電室外周磁石以外の磁石の追加取付等がある。

6. 参 考 文 献

- 1) 北村正治, 斎藤紀男, 中村嘉宏, 東久雄: 長寿命大型静止衛星の南北位置保持用イオンエンジン, 日本航空宇宙学会誌, 33 (1985), pp.100-107.
- 2) 中村嘉宏, 宮崎勝弘, 早川幸男: 皿型グリッドの製作とイオン加速特性, 第28回宇宙科学技術連合講演会前刷集, 1985, pp.456-457.
- 3) Nakamura, Y. and Kuriki, K.: Electric Propulsion Works in Japan, 37th IAF, IAF Paper 86-171 (1986).
- 4) Kitamura, S., Miyazaki, K., Hayakawa, Y. and Nakamura, Y.: Vacuum Facility for Xenon Ion Thruster Testing, Proc. of 16th ISTS, pp.95-100, Sapporo, 1988.
- 5) Kitamura, S., Miyazaki, K., Hayakawa, Y. and Nakamura, Y.: Xenon Ion Thruster Test Facility-Design and Operation, DGLR/AIAA/JSASS IEPC Paper 88-60 (1988).
- 6) 早川幸男: 有限要素法を用いた静磁場解析プログラムMAFIAの開発, 航空宇宙技術研究所資料555号, 1986.
- 7) 中村嘉宏, 宮崎勝弘, 早川幸男, 北村正治: 12cmカウフマン型イオンエンジンの性能向上, 第29回宇宙科学技術連合講演会前刷集, 1986, pp.526-527.

付録 イオンエンジン研究の経緯

1970年頃より当研究所において推進剤に水銀を用いた5cmイオンエンジンの研究が開始された。この型を基本とした5cmイオンエンジン(推力約2mN)が宇宙開発事業団(NASDA)との共同で研究・開発された。このイオンエンジンは技術試験衛星Ⅲ型(ETS-Ⅲ, きく4号)に2機搭載され, 1982年9月に打ち上げられた。この我国初の宇宙試験は多大な成果を得て終了した。この成果によって, イオンエンジンの実用化への道が開かれた。

ここまでのイオンエンジンには推進剤として水銀を用いて来た。しかし, 実利用に際して, 水銀の漏出による衛星本体等の汚染の心配や環境への配慮から推進剤の代替が検討された。イオンエンジンの推進剤に要求される条件として電離エネルギーが小さいこと(放電電力が小), 質量(原子量)

が大きいこと, 貯蔵および流量制御が容易等が挙げられる。これらの点ではキセノンが水銀に次いで適している。また現状で想定される推進剤消費量では, 資源的にも問題ないことからキセノンが選ばれた。そして, 推進剤にキセノンを用いたイオンエンジンの研究が開始された。

宇宙開発事業団はH-II ロケットの開発を進めており, このH-II ロケットのペイロードとして技術試験衛星Ⅵ型の打ち上げを計画している。ETS-Ⅵは2トン級の大型静止試験衛星で, この衛星の南北方向の位置保持のために20mN級カウフマン型キセノンイオンエンジンの搭載が決定され, 当研究所の協力のもとに開発が進められている。

ETS-Ⅵ搭載イオンエンジンは世界で初のバス機器としての運用である。この試験よりイオンエンジンの実利用のための貴重なデータが得られるものと期待されている。

航空宇宙技術研究所報告1099号

平成3年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18
