

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-751

カスプ磁場型キセノンイオンエンジンの設計論

早川幸男・北村正治・宮崎勝弘

2000年9月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目次

概要	1
第1章 はじめに	1
第2章 イオンエンジンの基礎知識	3
カスプ磁場型キセノンイオンエンジンの原理	3
イオンエンジンの性能	5
用語の説明	6
第3章 イオンエンジンの設計	7
全体設計	7
個別部品の設計	7
中空陰極	7
放電室	8
イオン抽出系	12
碍子類	17
絶縁器	18
シールドケース	18
コーティング	18
シール材	19
スパッタシールド	19
第4章 あとがき	19
参考文献	19

カスプ磁場型キセノンイオンエンジンの設計論*

早川 幸男*¹ 北村 正治*¹ 宮崎 勝弘*¹

A Theory for Designing Cusp Field Xenon Ion Thrusters *

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

ABSTRACT

A theory for designing ion thrusters is described for the following two purposes. Firstly, to share the information required to design ion thrusters with people with minimal knowledge of ion thrusters. Secondary, to show how much influence the partial designing has on the overall performance of the ion thruster. The information provided is not limited to our original information and many references are included.

As is generally the case in designing, the theory is not perfectly objective. The pursuit of objectivity is generally difficult and not always worth the labor. The principle of ion thruster operation and a definition of its performance are described here. This is followed by designing of basic parameters and individual parts. Selection of material and dimensions are described for some parts.

Developing reliable ion thrusters or those with greater performance requires experiments at each phase of designing. Evaluation of ion thrusters, however is not described in this material. This will be described in another paper.

Keywords: ion thruster, ion engine, cusp field, electric propulsion, xenon

概 要

カスプ磁場型イオンエンジンの設計論について述べる。目的は二つあり、一つはイオンエンジンについてあまり詳しくない人でも一通りの設計ができるだけの情報を提供すること、もう一つはイオンエンジンの各部の設計が全体の性能にどの程度影響を及ぼすのかを明らかにすることである。特に前者については独自の情報はもちろん、他者の文献を紹介することも重要と考え、なるべく主要なものを漏らさないように努力した。文献目録としても役立つと考えている。

設計という問題の性質上、話が客観の範囲から逸脱することもある。客観性の追求には自ら限界があり、仮にそうしても結果は大して変わらないということを冒頭に述べる。次にイオンエンジンの作動原理と性能の定義について触れ、この後に全体設計と個別部品の設計の話が続く。個別部品の設計のところでは物によっては材質の選定や細かい寸法の決め方についても述べてある。

確実に動作するイオンエンジン、あるいはより高性能なイオンエンジンを開発するためには、途中で何度も実験を行なって決めなければならないところが多々あるが、本資料では試験法については記していない。これについては別の資料で述べるつもりである。

第 1 章 はじめに

イオンエンジンは1960年以前に当時NASAのLeRCに

勤務していたKaufman¹によって発明されたものである。米国では1960年代に精力的に研究が行なわれ、1970年の時点で既に現在のイオンエンジンに近いものの動作原理と設計製造技術が確立していたと考えられる²。実際1970年にSERT (Space Electric Rocket Test) で2度目の宇宙実験に使われたイオンエンジンには中空陰極が使用されており、十分に完成されたものであった³。これ以降

* 平成11年10月29日受付 (received 29 October 1999)

*¹ 革新宇宙プロジェクト推進センター
(Space Project and Research Center)

のイオンエンジン研究の大きな流れとしては、皿状電極の採用、カスプ磁場型放電室の採用、推進剤の水銀からキセノンへの転換が挙げられ、現在では長寿命を目指してC/C電極の採用が主要なテーマとなっている。現在の米国では、これらの変化を完全に吸収した上にさらに洗練されたイオンエンジンの設計製造技術を確立している。しかしながら残念なことに、最近では詳しい製造技術やそれに直結する設計法についてはあまり発表されることが無くなってきている。ただ設計法のうち製造に直結しない部分についてのみ、発表が行なわれているのが実状である⁴。従ってこれらの技術を有しない人がイオンエンジンを設計製造しようとする場合には、既に発表された古い技術による他は自ら技術を確立していかなければならない。以後本資料においては、単に設計という場合には、製造に密接した部分、すなわち設計図を書くことを指すものとする。

筆者等は過去10年以上にわたりカスプ磁場型キセノンイオンエンジンの性能向上のために研究を積み重ねてきた。その結果現在のイオンエンジンの性能は初期のものに比べて格段に高くなったことは確かであるが、具体的に何によってどの程度向上したかを示すことは容易ではない。その理由は大きく分けて二つある。一つは試験条件が完全に一致しているという保証が無く、性能の変化が試験条件のばらつきの中に埋もれてしまうことが多いということである。例えば一般的な質量流量計の誤差はフルスケールの1%以下となっているが、主に使用する流量はフルスケールの半分とか10分の1なので相対誤差はもっと大きくなっている。実際24時間以上の連続試験を行なうと、外気温の変化に応じて性能が変化することが分かる。元々効率の高いイオンエンジンで1%の性能差というのはかなり大きいと言うことができ、この性能差がイオンエンジン側の変化によるものかどうかを判定することは困難である。もう一つはイオンエンジンの特定部分を変化させて性能への影響を調べようとしても、それ以外の部分が常に同じであるという保証が無いことである。最も顕著な例は大気曝露により含浸陰極の特性が変わってしまうことである。さらに高い頻度で大気曝露と運転を繰り返すと陰極の性能は急激に低下してしまうので、全く同じイオンエンジンだとしても異なる評価を受けることになる。このような状況においても尚性能の僅かの差を見出そうとするならば、周囲の温度湿度を一定に保ち、また統計的な判断が可能になるまで多数の試験を繰り返す必要がある。一言で言えば非常にコストが掛かるということであり、これに類する事態はイオンエンジンに限らず世間に多々存在する。結論を先に言えば、次のような判断を下すことが最も妥当であると言える。

「イオンエンジンの形状の僅かな変化、例えば磁石の位

置を5mm動かす等ということは、当然性能に影響を及ぼすであろうが、これを正当に評価することは評価のために必要なコストに値しない。」

それでは「過去10年以上にわたって行なってきたこと」はあまり役に立たないのか、という疑問が湧いてくるのは当然のことである。何がどの程度性能の向上に効果があったかということについて、効果が歴然と現れている件については既に学术论文として発表してきた。しかし効果が顕著でない件については、これまで発表をしてこなかった。これは論文の体裁を整えることも可能かもしれないが、既に記したように試験条件が十分な確度で保証できないので、堂々と公表できるような代物ではなくなるからである。また逆に性能が大きく低下したという件も多々あったが、これらも論文にするには適当でないので発表をしてこなかった。しかし論文にならないからといって、こういう情報を埋もれさせておいて良い筈はない。視点を変えて見れば、効果が顕著でないということは、既に高い完成度に達している可能性があるとも言える。この場合何故このような設計が行なわれたかを示すことは、それだけで充分有意義であると考えられる。また更なる性能向上のために努力しようとする人に対しては、力を入れれば効果が出る所とそうでない所を区別する判断材料となり、同じ労力でより高い成果を期待できるものと考えられる。

実際にイオンエンジンを設計するに当たっては、具体的に磁石の位置等を指定しなくてはならない。このとき殆どの方は過去の論文等に、設計例、できれば設計法までが記されていないか探すであろう。実際過去の少なからざる論文等には設計例が載っているが、その殆どが学术论文として何らかのテーマに基づいて書かれており、その中から設計法まで読みとることは容易ではない。中には設計法の一部が載っているものも極く少数あるが、具体的な設計手順を示したものは皆無である。本資料は論文とは趣を異にし、厳密さは欠くものの、設計者の立場から一応の設計手順を詳しく示したものである。厳密さを欠くということは前段落で述べたように、例えば最適な磁石の大きさを示す根拠となる正確な実験結果等が存在しないことを意味する。従って通常の論文等では当然あるべき所に参考文献を示していないことがあることを断っておく。当然本資料に示されたことが最善であるとは言えないが、全く何の知識も無い人が設計するよりは少しはマシな物ができること確信している。

前もって断っておくが、筆者等には実際に衛星搭載用のイオンエンジンを設計した経験はない。従って搭載用に付きものの徹底的な軽量化や耐振動性については詳しく検討したことはない。またあらゆる物に付きまとうコストの問題についても同様である。しかし常にこれらの

ことを意識して設計するように心掛けており、性能最優先で重さは気にしないというような態度は取っていない。敢えてこれらのことを追求してはいないということである。例えばネジ類にはすべてステンレス製を使用しているが、軽量化のためにチタン製にするべきか、あるいはコストを下げるために真鍮製にするべきかという検討はしていない。強度、重さ、価格等を調査して何が最適かを考えなければならないのか、あるいは考えること自体コストがかさむので避けた方が良いのか、というようなイオンエンジンに限定しない一般製造法的な問題については深く立ち入らないことにした。

反対にイオンエンジンに特有な製造法的な問題についてはなるべく詳しく述べるようにした。コストを下げるためには、なるべく規格品を利用することが望ましいことは言うまでもない。しかし規格の無い特殊な部品や、規格品では性能的に充分でない場合には部品から設計しなくてはならないこともある。このような物についてはなるべく部品レベルの設計法や製造法について述べるように努めたが、残念ながら漏れなくという訳には行かなかった。一つの例が中空陰極である。これに関する具体的な設計製造法は一部のメーカーが持っており、筆者等は本質的なところには触れず、仕様や外形のみを指定して製作依頼することが実状となっている。このような物についてはその旨を明らかにすることで、「イオンエンジン設計法」としての完備性を保つことができると考えている。自らは設計の経験のないものについては、参考のため構造や機能の説明を記述した。

話が唐突に見え、違和感を感じるであろうと予測されるところが多々あることを予め断っておく。これは多少なりとも複雑なことを短時間で説明しようとしたため、すべてを順序立てて演繹的に説明する場合の時間的な負担を避けるためにはやむを得ないと考えている。初めて目を通したときには唐突に見えても、実際の設計を通してイオンエンジンの全容を理解した時点では、違和感も無く読み進められると思う。かつてイオンエンジンの設計や組立に従事したことがある人を除いては、この資料を読んだからといって、いきなりまともなイオンエンジンが設計できると期待しない方が良い。イオンエンジンには机上の計算だけでは決められないところや、複雑な理論や計算に頼るよりも実験的に決めた方がコスト的にも精度の点でも有利なところがたくさんあるからである。

設計の話に入る前にイオンエンジンの原理、性能の定義および専門用語についての説明を加えた。専門家にとっては冗長ではあるが、読者には専門家でない人も想定している。性能の定義については、当所において過去に混乱があったのでその旨についての説明も加えた。参考文献のほとんどは英語で書かれているので、便宜を図

り一部の用語には英訳も付けてある。読者には各種製造法を理解し、簡単な機械製図のできる大学の機械系学科卒業程度の知識を要求する。プラズマ物理学の基礎知識があれば望ましい。

第2章 イオンエンジンの基礎知識

カスプ磁場型キセノンイオンエンジンの原理

カスプ(cusp)磁場型キセノンイオンエンジン(ion thruster, ion engine)は最近の代表的な電子衝撃型(electron bombardment)イオンエンジンである。電子衝撃型イオンエンジンは機能上イオン生成部とイオン加速部及び中和器(neutralizer)に分類される。イオン生成部は放電室とも呼ばれ、電子を推進剤(propellant)のキセノン原子に衝突させることにより電離させイオンを生成する。イオン加速部は2枚の電極間(electrode, grid)に電圧をかけて放電室(discharge chamber)から供給されるイオンを加速する。3枚の電極を使用するものもあるが、これは寿命の延長等を目的としたもので、イオンの加速には関係無い。中和器は機能的に他の部分から独立しており、単体の中空陰極(hollow cathode)からなる電子源である。またイオン加速部は通常イオン加速系(ion acceleration system)イオン抽出系(ion extraction system)またはイオン光学系(ion optics system)のいずれかで呼ばれる。エンジンの構造を図1に示す。

放電室に対して推進剤のキセノンガスは大部分が分配器(propellant plenum)を通して、一部が中空陰極を通して供給される。どちらの経路にしてもそれぞれ絶縁器(isolator)と呼ばれる所を通過している。これは放電室全体が約1000Vの電位に保たれるため、何の方策も講じないで地表電位のタンクからガスを供給すると、配管の内部で放電を起こしてしまい、イオン加速に必要な電圧を印加できなくなってしまうからである。中空陰極とは一種の傍熱型電子源で、直熱型電子源より寿命の点で遙かに有利であり、非常に高価ではあるが長時間無保守での作動が不可欠な宇宙用としては欠かせないものである。

中空陰極から放出された電子は、最終的には陽極である放電室壁に到達するが、その途中で推進剤の気体原子^{*1}に衝突し、これを電離することが期待される。この電離の機会を増やすために放電室内には磁場を配し、電子が真っ直ぐ陽極に行かないようにする。この磁場の形状によって電子衝撃型イオンエンジンをさらに細かく分類することができる。カスプ磁場型は、放電室内に強力な磁石を極性を交互にして設置するもので、隣り合う磁石

*1 通常推進剤は一原子分子なのでこう呼ぶ。多原子分子を解離させずに電離させることは一般に困難である。

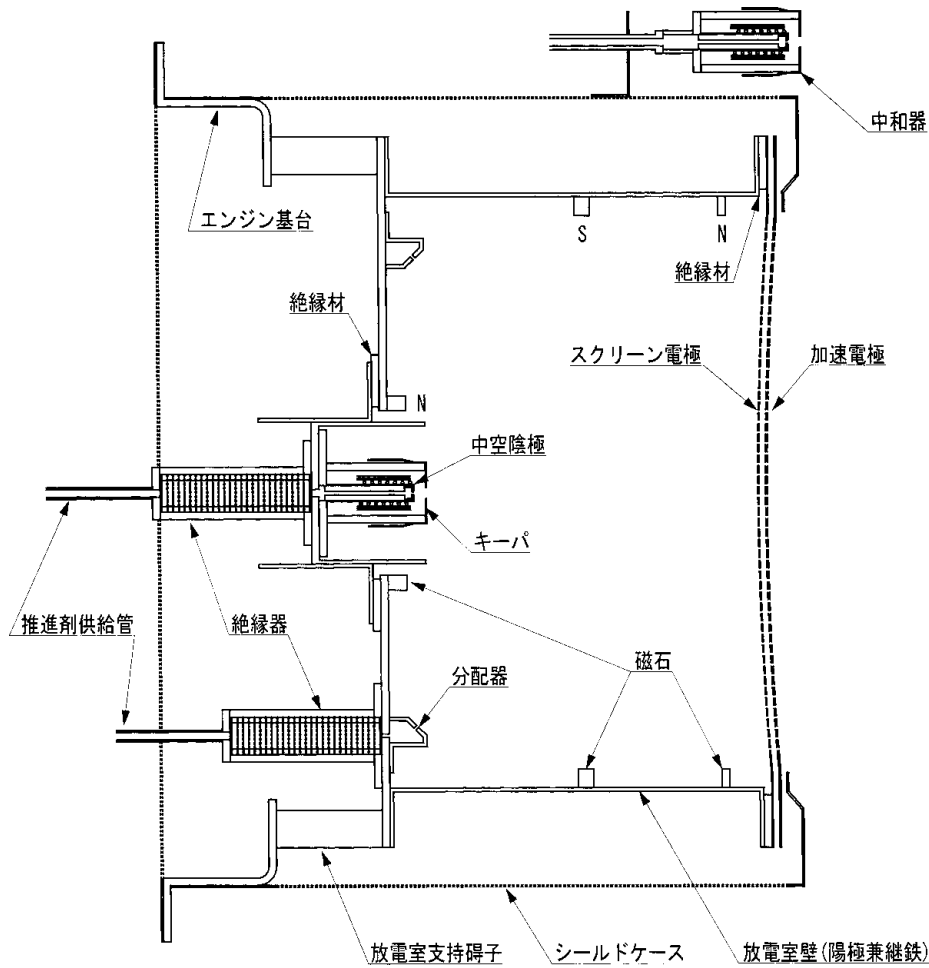


図1 イオンエンジンの構造

との間を磁力線で結ぶ格好になっている。電子は磁力線に巻き付くような形で移動するという性質があるので、放電室全体が同じ陽極電位であるにも拘らず、磁石の表面（側面は除く）が主に陽極として電子を吸収する働きをする。

放電室内で生成されたイオンは、放電室内の僅かな電場によりイオン抽出系の方へ導かれる。イオン抽出系は2枚の電極から構成され、内側のものをスクリーン電極（screen electrode）、外側のものを加速電極（accelerator electrode または単に accel electrode）と呼ぶ。我国では電極の代わりにグリッド（grid）という言葉を中心に用いるがこれでも世界的に通用する。これらの電極には図2に示したように、多数の孔があいており、孔の位置は双方の電極でほぼ同じになっている。「ほぼ同じ」という意味については「イオン抽出系の設計」の所で詳しく述べる。スクリーン電極の孔に近づいたイオンは、電場によって孔の中に引きずり込まれ、2枚の電極間の電場で加速され、加速電極の孔から抜けて行く。

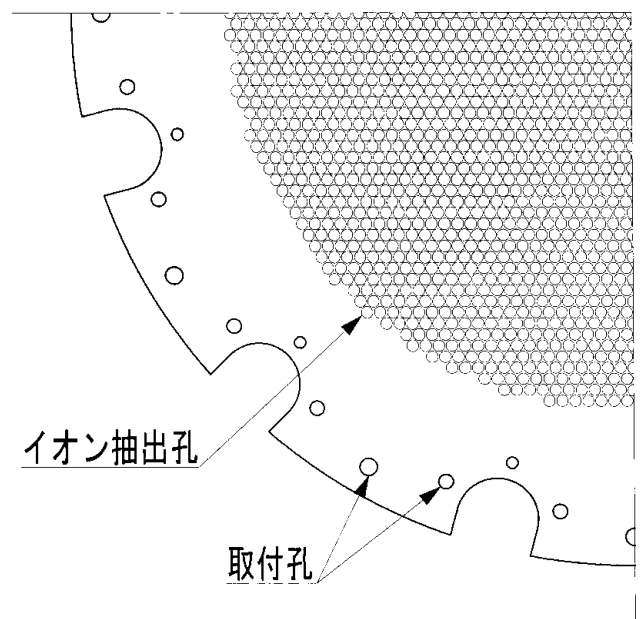


図2 イオン抽出電極(1/4)

イオンエンジンの外部には中和器と呼ばれる単体の中空陰極が設置される。これは放出したイオンと同数の電子を放出して衛星の電位を一定に保つためのものである。放出する電子電流を能動的に制御する必要はなく、単に中和器キーバとの間で放電をさせておけばよい。取付位置も特にイオンエンジンの近くである必要はないが、配線・配管の利便上イオンエンジンの一部として取り付けられる。

イオンエンジンの性能

現実には供給したすべてのキセノン原子がイオンとなって推力に寄与するわけでもないし、加えた電力がすべてイオンの運動エネルギーに変換されるわけでもない。即ち推進剤にも電力にも損失が発生し、この損失が少ない程性能の高いイオンエンジンと言える。

推進剤の損失の程度は推進剤利用効率という指標によって表すことが一般的である。これは単位時間に加速されたイオンの数を単位時間に供給したキセノン原子の数で除したものである。式で表すと

$$C_i = \frac{J_b m_A}{e N_A \dot{m}}$$

となる。ここで J_b はイオンビーム電流、 m_A は分子量を kg 単位で表したものの、 e は素電荷、 N_A はアボガド口数、 \dot{m} は推進剤流量である。式ではイオンはすべて一価であると仮定しているが、現実には二価以上のものも含まれており、通常は三価以上は無視して二価についてのみ補正を加える。推進剤流量としては、放電室やイオン抽出系の性能を評価する際には放電室に供給する流量を採り、システム設計の際には中和器流量も加えるやり方が一般的である。尚推進剤流量はすべての原子が素電荷を負っていると仮定して電流の単位で表すと複雑な係数を排除できて便利である。

イオンの加速以外に必要な電力の中で、不可欠なのは中和器用電力とイオン生成用電力である。前者は中和器用中空陰極の性能のみに依存しており、イオンエンジンの設計の善し悪しによって変わるものではないので、ここでの検討の対象から外す。後者はイオンビーム電流にほぼ比例して増減するものであり、この比例定数をイオン生成コストと呼ぶ。式で表すと、

$$C_i = \frac{P_d}{J_b}$$

となる。ここで P_d は放電電力である。イオン生成コストはイオンエンジンが大きくなる程低くなる傾向がある。

設計動作点におけるイオン生成用電力はイオンビームエネルギーの 10% ~ 25% 程度とかなりの割合を占めるので、これを低くすることが重要となる。

このようにイオンエンジンの性能は推進剤利用効率とイオン生成コストで表され、前者が高く後者が低いのが良いイオンエンジンと言える。しかし推進剤利用効率とイオン生成コストは互いに独立していないので、これらを同時に最適化することは不可能であり、適当な動作点を選ぶことが必要となる。また推進剤利用効率とイオン生成コストは放電電圧の関数でもあり、ある限度を超えなければ一般に放電電圧が高いほど性能が良くなるし、一般に電子衝撃型イオンエンジンでは推進剤流量の分配比を変えることによってある程度放電電圧を制御できる。そこでイオンエンジンの性能を評価するとき、放電電圧と推進剤利用効率を指定してこのときのイオン生成コストで評価するという手法が採られる。

放電電力は放電電源の出力から求められるが、放電電源とビーム電源の接続の仕方によって求め方が異なることに注意しなくてはならない。放電電源の正極をビーム電源に繋ぐと原理的には明快であり、放電電源の出力 (= 放電電力) でイオンを生成し、ビーム電源の出力でイオンを加速することになる。一方放電電源の負極をビーム電源に繋ぐ方法もあり、この場合放電電源の出力の内、放電電圧とビーム電流の積に相当する分に関しては、イオン生成ではなくイオン加速のために使われていることになる。式で表すと、

$$P_d = V_d J_d - V_d J_b = V_d J_e$$

となる。ここで V_d は放電電圧、 J_d は放電電流 (= 陽極電流)、 J_e はエミッション電流 (= 陰極電流) である。またビーム電圧はビーム電源の出力電圧と放電電源の出力電圧の和ということになる。当所では当初から後者の方式を採用してきた。それだけなら良いのだが、 $P_d = V_d J_d$ で放電電力を算出し、ビーム電源の出力電圧をビーム電圧と呼んできたことが誤りである。この誤りは現在でも一部で続いており、文献 (英語の文献を含む) を参照する際には放電電力の計算式を確認する必要がある。1993 年以前に当所から発表されたものはすべて誤っていると言える。基本的に電源の接続は後者の方法によるので、明確に前者の方法で接続していると記述されているか式で算出されている場合を除いては、著者に明確な意識が無い場合が多く、誤っている可能性が高い。尚、電源の接続方法として後者が一般的である理由を記しておく。最近では絶縁器の性能が良くなって無くなったものの、以前は絶縁破壊があった。このとき前者の接続方法だと、ビーム電源と放電電源が並列状態になってしまい、放電

電源に逆電流が流れて一瞬で壊れてしまう*²。信頼性の無い絶縁器を試すときには後者の方法にすべきである。後者の場合、放電電圧は必ずしも一定ではないので、正確を期するならばビーム電源の出力電圧を微調整しなくてはならないのが面倒なだけである。ビーム電圧の放電電圧分の違いについては、一般に放電電圧はビーム電圧に比べて非常に小さいので、僅かなビーム電流の差として影響が現れるだけである。放電電圧の僅かな変動がビーム電圧を変動させたとしても、その影響は検出できないくらい小さい。

電源まで含めたイオンエンジンシステムの性能の指標としては、推進器効率(thruster efficiency) η_T が使用され、これは

$$\eta_T = \frac{T^2}{2\dot{m}P_{in}}$$

で定義される。ここで T は推力、 \dot{m} は中和器流量も含めた推進剤流量、 P_{in} は電源入力である*³。二価イオンとビーム広がりを無視すると右辺は単純に推進剤利用効率と電源効率の積になる。

用語の説明

具体的な設計の話をする前に、設計に最低限必要でここまで説明していないイオンエンジン用語について説明する。

○イオンビームレット (ion beamlet)

一組の電極孔から抽出されるイオンの集合体のことを言う。単にビームレットとも言う。ビームレットの向きはビームレットを構成するすべてのイオンの運動量ベクトルの合成ベクトルとして定義され、ビームレットの集合体がイオンビームとなる。ビームレットの大きさはすべてのイオンを一価としたときの電流値で表される。

○開口率 (open area fraction)

板状の物(イオン抽出電極やシールドケース)の単位面積当たりの孔の部分の面積。

○皿状電極 (dished grid)、凸型 (concave) 電極と凹型 (convex) 電極

イオン抽出系は定格運転時には300~400 の温度に達する。金属製電極の場合、平板のままだと温度が上昇する際の熱膨張により予測不可能な形に歪んでしまう。こ

うなるとすべての電極が偶然同じように歪む場合を除けば、電極同士が接触してしまう。そこでこれを避けるために予め電極を皿状に成形しておき、すべての電極が熱膨張により同じように歪むようにする手法が取られる。このように成形された電極を皿状電極と言い、曲率の付け方で2通りに分類される。曲率の中心が上流側にあるのを凸型、下流側にあるのを凹型と言う。

○残りしろ (電極の)

= 孔中心間距離 - 孔径

○発散角 (イオンビームまたはイオンビームレットの)

理想的なイオンビームはすべて同じ運動量ベクトルを持つイオンから構成されるが、現実には方向においても絶対値においても同じではない。この内方向に関してどの程度まとまっているかを表す指標として発散角が用いられる。通常発散角は合成運動量ベクトルを軸として、95%のイオンを内包する円錐の半頂角で定義される。発散角の測定の際にはすべてのイオンの運動量の絶対値は方向によらないと仮定される。

○パービアンス (perveance)

通常は孔1個当たりの正規化パービアンス(normalized perveance per hole)のことを言い、3通りの定義の仕方があるが^{1,5}、基本的にはイオンビームレット電流をスクリーン・加速電極間電圧の3/2乗で割った値に比例する。これは1次元の空間電荷制限則(Child's law)により、平行電極間を流れる荷電粒子数の最大値が電極間電圧の3/2乗に比例することからきている。実際には3次元の現象となるので1次元の最大パービアン스에達することはなく、理論的に最大パービアンスを求めることは今のところ不可能である。尚、“perveance”という単語を載せている英語辞典は今のところ皆無である。

○比推力 (specific impulse)

推進器の特性を表す指数で、現在でも尚SI単位系を無視して、「1kgの推進剤で1kgfの推力を持続できる時間を秒単位で表したものの。」と定義されることが一般的である。化学推進の場合には比推力が高いほど性能が高いと言えるが、イオンエンジン等の電気推進の場合には、比推力を上げると電源の質量が増えるので一概には言えない。

○ビームレット偏向 (steering)

スクリーン電極孔と加速電極孔の中心軸を平行を保ったままずらすことにより、ビームレットの向きを変えることができる。これをビームレット偏向と言い、中心軸とビームレットの向きのなす角を偏向角という。過去には加速電極を分割して異なる電圧を印加することによりビームの向きを変える方法も研究されたことがある²。

*² 一般に電源は逆電流に非常に弱い。

*³ 推進効率(propulsion efficiency)とは異なる。

第3章 イオンエンジンの設計

全体設計

最初に決めなくてはならないことは推力と比推力である。一方システム設計側からは推力と電力と質量が要求されるかも知れないが、要求が妥当なものであれば比推力と電力と質量は整合する。ミッションに応じて最適の比推力があるが、ここではその求め方には触れず、比推力が天下りの与えられたものとして設計することを考える。尚イオンエンジンの比推力はかなり広範囲に選ぶことが可能であるが^{*4}、あまり低いと他の推進器の方が有利なることを断っておく。比推力がおおよそ2000秒以下ではホール型スラスタにすることを検討すべきである。比推力が高い方についてはイオンエンジンの独壇場と言え、推進剤を選べば1万秒以上でも問題ない。

推力 T と比推力 I_{sp} が決まるとおおよそのビーム電流 J_b と電圧 V_b が決まる。これらの関係は次のようになる。

$$T = \dot{m} g I_{sp} = \dot{m}_e u$$

$$\dot{m}_e = \frac{\dot{m}_A J_b}{e N_A}$$

$$u = \sqrt{\frac{2e N_A V_b}{\dot{m}}}$$

ここで g は重力加速度、 \dot{m}_e はイオンとして加速されたキセノンの流量、 u はイオンの平均速度である。尚イオンはすべて一価と仮定した。 \dot{m}_e は \dot{m} からイオンにならずに中性原子のまま出ていった分と中和器流量を引いたもので \dot{m}_e/\dot{m} は取り敢えず0.8~0.85としておけば良い。これにより式から u 、式から J_b が求まり、 u を式に代入すると V_b が求まる。イオン抽出系の平均ビーム電流密度は、過去の類似のイオンエンジンのデータから求まり、おおよそ25~41A/m²である^{6,7,*5}。これを目安に J_b から口径を決めれば良い。 J_b を3Aとすると、イオン抽出系の口径はおおよそ30~39cmとなる。口径はハードウェアそのものなので後から変更することは困難であるが、 J_b はある程度変えられるし、事実上 I_{sp} が多少変わっても問題ないので V_b もある程度変えられる。一般に V_b には100V単位の切りの良い数字が割り当てられる。

J_b が決まるとおおよその放電電流が過去のイオン生成コストと放電電圧のデータから求まる。口径14cmでは最大3.5A、口径35cmでは最大16A程度となる^{8,9}。これ以上は特にここで細かく決める必要はない。

個別部品の設計

設計の順番は原則的に内から外へということになる。主な物だけについて書き出すと、最初は中空陰極、次に放電室、以下イオン抽出系、シールドケースと続く。

中空陰極

冒頭に述べた通り筆者等には中空陰極の設計経験は無いが、長寿命の中空陰極となると規格品が存在するほど一般的な物ではなく、適当な物やメーカーが見つからなければ自ら設計しなくてはならないことも充分にあり得る。そこでその設計法の代わりに構造と原理について説明する。

図3に中空陰極の構造を示す。中空陰極はその中空部を流れる推進剤のガスを電離することにより、見かけ上非常に高い電流密度で電子を放出することができるが、測定が困難なので詳しい物理的現象はあまり解明されていない。主として電子を放出するのはインサート(insert)と呼ばれる部分で、長寿命を要求されるインサートには含浸陰極(impregnated cathode)を使用する。含浸陰極は多孔質タングステン(porous tungsten)に酸化バリウム等の物質を含浸させたもので、含浸物質は中空陰極の使用と共に次第に消耗し、これが尽きるまで使用できる。インサートはタンタル製の円筒内に納められており、点火時にはこの周囲に巻かれたヒータで必要な温度まで加熱する。イオンが陰極の表面を叩く事によって発生した熱により、熱電子放出部を充分高温に保つことができるので、通常は一旦放電が開始したらヒータ電流を切らなくてはならない。これは一般的にはヒータ電流を切った状態で適当な温度が保たれるように断熱が施され、ヒータを点け放しておくと過熱してしまうからである。円筒の先端部には蓋が溶接されており、ガスと電子の出口部分として直径がコンマ数mmのオリフィスが形成されている。この径が小さ過ぎると電子が出にくくなって、放電が不安定になりやすく、大き過ぎると中空陰極内部の圧力を適度に保つ為のガス流量が大きくなり、温度が低下して放電が維持しにくくなる。先の断熱の程度と関連させて、適当な大きさにしなくてはならない。オリフィスの外側には、キーパ(cathode keeper)と呼ばれる円盤状の電極が設けられ、点火時に高電圧を印加して点火をし易くする^{*6}。主放電と独立してキーパ放電を

*4 健全な選択の範囲内では電力一定で比推力を減らして推力を増やすことができる。推力を増やさなくても良いのなら、比推力はいくらでも下げられる。

*5 これはあくまでも平均値であり、平均値が低くても局所的には電流密度が高くなることもあり得る。

*6 放電開始の事を慣用的に「点火」と呼ぶことがある。

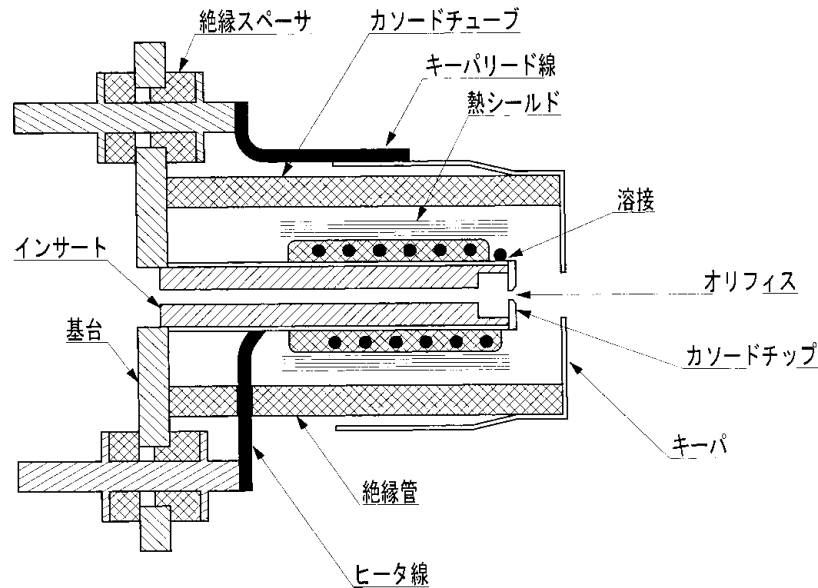


図3 中空陰極の構造

維持・停止することが可能である。

中空陰極の調達方法としては、放電電流と放電室に合うように外形を指定して完全に特別注文するやり方から、既製品を購入するまでが考えられる。地上で使用するイオン源用の物は寿命が短いので適当でなく、宇宙用ということになるとメーカーはかなり絞られてくる。カタログ等は存在しないし、受注生産なので取り付け部の形状についてはかなり融通が利くようである。ちなみにキセノン用の中空陰極の寿命として、28,000時間を達成したという報告もある¹⁰。

放電室

ここではカスプ磁場型イオンエンジンの放電室の設計方法について述べる。放電室は基本的に放電室壁と永久磁石により構成され、陽極電位とする。プラズマの閉じ込めの観点から、中空陰極本体を除いて陰極電位面はなるべく小さくなることを目標とする。但しスクリーン電極はイオン抽出性能を上げるために陰極電位とする。磁石はすべて閉じた曲線または折線の上に配置されるものとする。この曲線また折線は一般的に放電室の中心軸周りに対称であり、複数の磁石で構成される。以後一つの曲線または折線に属する磁石の全体を「磁石列」と呼ぶ。放電室壁は単なる気体の容器という役割の他に放電回路の導線と磁気回路の継鉄の役割を兼ねる。継鉄であるが故に純鉄で作られており、この上に磁石を直接配置する。殆どの放電電流は磁石に集中するので磁石が陽極であると言える。磁石の表面に薄い絶縁層を乗せ、さらにその上に陽極を乗せる方法も考えられ¹¹、実用化している可

能性も否定できない。これは磁石の保護という点では有利であるが、絶縁層と陽極の厚みによって陽極表面の磁束密度が下がるので性能低下を覚悟しなくてはならないし、当然製作費も高くなる。また磁石と磁石の間に陽極を設け、放電室壁と磁石を陰極電位に保つ方式 (magneto-electrostatic confinement: MESC) も考えられ、高い性能を謳う論文も一度発表されたことがあるが¹²、試験環境などの詳細が不明な上に継続的な発表も無いままに研究が終了し、信憑性に欠ける。この方式は磁場設計がそう簡単ではなく、安定した放電も困難と思われ、放電室の候補としては失格である。以下では最も基本的な、磁石を陽極とする方式について考えることにする。その後述べるように磁石の放熱を促進するという目的で、磁石と放電室壁が隙間無く密着する構造を前提として話を進める。この場合でも若干の余裕を含めて磁石は200以上で十分な磁力を発揮できなくてはならず、現時点ではサマリウム-コバルト系の磁石以外に使用可能なものは見当たらない。ここで決めなくてはならないのは放電室壁の形状、内径及び長さ、磁場形状、排熱、推進剤の導入方法である。

形状

形状を決定する際には、イオン源としての性能、質量の他に磁場設計のし易さ、製作費を考慮しなくてはならない。当然の事ながらこれらのことはイオンエンジンの一部としての面もあることを常に意識していなくてはならない。ここで言う磁場設計のし易さとは、二次元解析で済むか三次元解析が必要かと言うことで、詳しくは後で述べる。

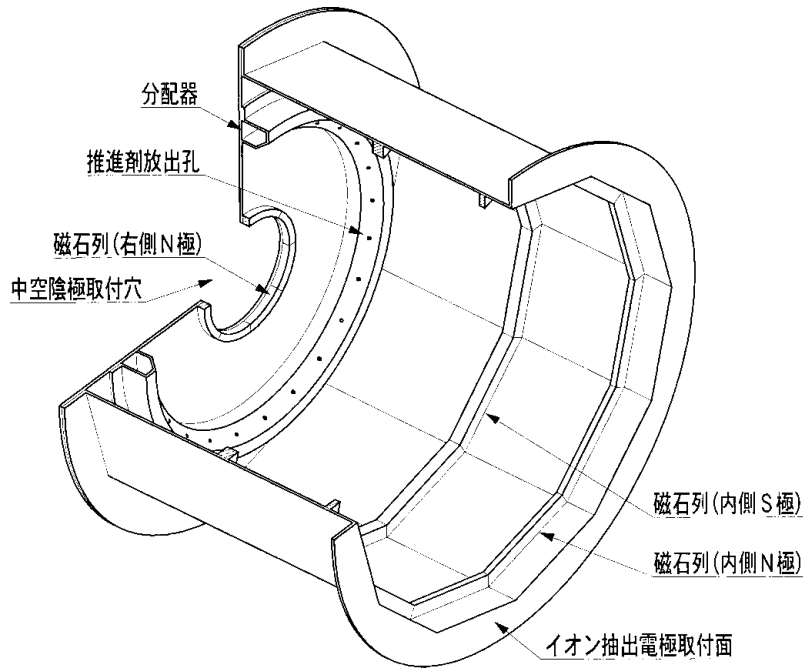


図4 正多角筒形放電室の一例

性能や磁場設計のし易さという点では先ず軸対称である半球殻、円錐殻や円筒が挙げられる。半球殻と円錐殻は軽量化の点で特に有利ではあるがこれに合う磁石まで含めて考えると製作が困難なので形状の候補としては適当でない。ただしDS-1のイオンエンジンのように円錐殻と円筒を組み合わせ、磁石を円錐部に置かないようなものはここでの分類上円筒と見なせる⁷。円筒は放電室壁の作り易さの点では最適であるが、円筒面上に配置される磁石の形状をこれに合わせなくてはならないことから、全体の製作費はそれほど下らない。加工のし易さからすると正四角筒が第一候補として考えられるが、磁場解析が3次元的になって難しい上に、プラズマの体積と表面積の比を考えるとあまり高性能は期待できない。正多角筒の場合にはある程度以上角数が多ければ磁場設計上回転対称と見なしても差し支えない。この場合には磁石形状を直線のみで構成できるために磁石の製作費は円筒の場合に比べて安くなる。しかし放電室壁の平面度を高く作らないといけないので、この分の製作費が高つく。現在のところ有効な選択肢としては円筒と正多角筒が残る。図4に正多角筒形の放電室の一例を示す。

基本形状として正多角筒を採用した場合、角数をいくつにするかという問題が生ずる。これは磁石列をいくつに分割するかという問題で、円筒の場合にも同様に発生する。結論を言えばこれは磁石の大きさから決まる。大き過ぎると指先の力で脱着が不能となり、さらに破損し易くなる。また小さ過ぎると、隣の磁石とは同極同士で

反発力が働き、これが磁石と放電室壁間の吸引力よりも大きくなって磁力のみで磁石列が構成できなくなる。実際にロケットで打ち上げる場合には耐振動性を確保するために磁力以外の保持方法を追加しなくてはならないが、それにしても磁力のみで構成できないと組立が難しくなる。磁石の断面形状にも依るが、経験上正多角筒の一辺の長さは2.5 ~ 5cmとするのが良いと考えられる。ただし放電室の上流壁上の磁石列は半径が極端に小さくなることからこの限りではなく、もっと小さい磁石を保持具によって固定する。場合によっては一個の磁石にしても良い。

内径

放電室の内径はイオン抽出系の口径に(磁石の高さ +) × 2 を加えたものとなる。この は放電室壁近傍のプラズマ密度の低いところで、どこまでイオンを引き出すかによる。 を大きく取るとことは、プラズマ密度の低いところ、別の言い方をすればここからイオンを引き出そうとしてもイオンよりも多量の中性ガスが逃げってしまうところの孔を塞ぐことになるので、推進剤利用効率が高くなる。しかしわずかとはいえ一度生成したイオンが再結合して中性ガスに戻ってしまうのでイオン生成コストが増加してしまうのと、イオンエンジンの外形が大きくなってしまいうという欠点が生じる。 を小さく取ると全く逆のことが言える。過去の研究結果によれば、 = 15mm では大きすぎると言える。現在の航技研のイオンエンジンでは = 5mm としているが、設計者の意図

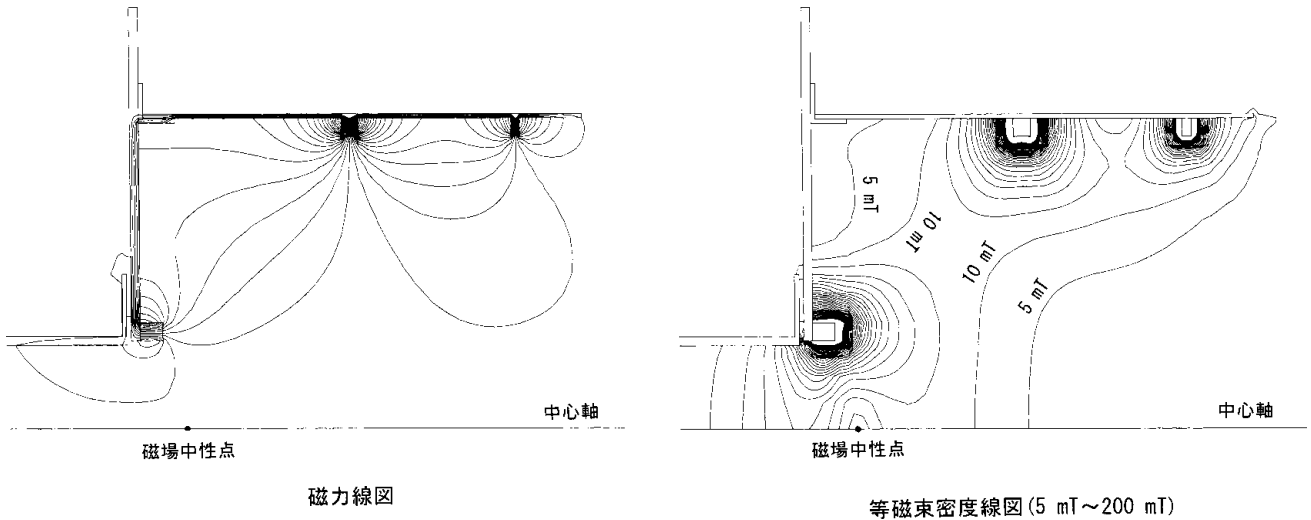


図5 カスプ磁場の解析例

により多少選択の幅がある。

長さ

長さについては、一般に長くなると推進剤利用効率とイオン生成コストが共に高くなる。また構造上、単なる質量の増加のみならず耐振動性の点から好ましからざる方向に向かう。従って許容範囲の中で最小にすることが基本となる。では許容範囲とは何を基準にして求まるかと言うことであるが、これは半径方向のプラズマ密度分布が十分に一樣になっていることが条件となる。このことを実際に確かめるには大がかりな実験が必要となるが、幸いなことにカスプ磁場については磁場形状からおよその相対的なプラズマ密度分布が推定できる(絶対値は不明)従って磁場形状の設計の際に放電室の長さが決まると言える。

磁場形状

放電室内の磁場形状の設計には磁場解析ソフトを必要とする。これにより何10ケースか試してみても、良さそうなものを選べばよい。磁場は回転対称で近似できるものとし、放電電流等により発生する磁場は永久磁石により形成される磁場に比べて無視できるとすると、ソフトに必要な能力は二次元回転対称、定常、磁性体及び磁化材への対応という極めて単純なものであり、プログラミングに多少の心得のあるものなら自作も可能である¹³。最近のパソコンなら1ケース当たり数分から数10分で結果が得られる。計算結果は数値で得られてもわかりにくいので、磁力線と等磁束密度線を描くことが必要となる。カスプ磁場の解析例を図5に示す。カスプ磁場においては放電室中央部の磁場の弱い領域(無磁場領域とも言う)においてはプラズマ密度はほぼ一樣になっている。中心軸の極く近傍では中心軸に沿って中空陰極から高速電子が流れているので、プラズマ密度が周辺より極端に高く

なっており、ここではこのことを無視することにする¹⁴。そこで無磁場領域はどこまでかと言うことが重要になる。その際電子やイオンといった荷電粒子は磁力線に平行な方向へ移動し易く、直角の方向には移動しにくいという性質のために、単純に「この磁力線が境界線」だとか「この磁束密度が境界値」だとかいうことができない。細かい話はプラズマ物理学の教科書に譲るとして、便宜上境界線を想定することが必要となる。ここではこの境界線として、「10mTの等磁束密度線と接する磁力線」を選ぶことにする*7。磁場の形状に必要な条件としては、

- 1、無磁場領域が大きい、
 - 2、永久磁石列の数が少ない、
 - 3、イオン抽出系の近傍で無磁場領域の半径が最大になる、
 - 4、中空陰極の先端を磁場中性点より下流側に置く、
 - 5、継鉄内で磁気飽和が起こらない、
- 等が挙げられるが、これ以外に満たされるべき条件として、
- 6、磁石が製作及び取り扱い可能な大きさ及び形状であること、
 - 7、磁石の排熱を考慮すること、特に高温となる中空陰極の近傍には配置しない、
- 等が挙げられる。1については当たり前のことで特に付け加えることもない。

2は先の「10mTの等磁束密度線と接する磁力線」だけでは空間を閉じられないという事実に基づくものである。

*7 厳密には複数の磁力線が該当することもあり得るが、その場合にはもっとも内側の磁力線とする。この磁力線は図5には具体的に示されていない。数値は特に10に拘らなくても良い。

即ち、ある磁石の両側に別の磁石があった場合、この磁石の表面から発し両隣の磁石の表面で終わる^{*8}。2本の磁力線の間の距離は、磁石表面で最小となるが0にはならない。ということは荷電粒子はここで磁石に接することになり損失となる。この磁力線間の隙間部分は陽極として機能しているので無くてはならないものであるが、すべての磁石列についての隙間部分の面積の和が大き過ぎれば放電電圧が下がり過ぎるし、小さ過ぎれば放電電圧が高くなるのみならず過度の放電集中の原因となり、磁石に損傷を与える可能性もある。仮に2の条件がないとすると、継鉄の上に磁石を隙間無く配置することが1の条件を最も良く満たすことになるが、放電電圧が低く過ぎて高性能なイオンエンジンとは言えなくなる。過去の研究の結果、磁石列の数については、口径が30cm程度までならイオンエンジンの大きさに拘わらず3列のときに最も性能が高くなると思われる。

3の「無磁場領域の半径」というのは、ここでは図5の放電室側壁に設置された2つの磁石間の磁力線の内、「10 mTの等磁束密度線と接する磁力線」と中心軸との間の最短距離を取る。これより下流側（図では右側）では半径は大きくなるが、上流部で生成されたイオンはあまりここまで回り込んで来ない。この半径を大きくするために、放電室壁の2つの磁石の幅に相対的に差を付けてある。下流側の磁石から発した磁力線は一部自らの反対側で終わるものを除き、大部分が隣の磁石で終わっている。ところがこの隣の磁石はさらに隣の磁石から発する磁力線も受け持っている。従って一番下流の磁石の幅は隣の磁石のおよそ半分で良いということになる。仮に磁石の幅を同じとすると、無磁場領域の境界が大きく中心軸に寄ることになる。

図5の一番上流側の磁石のようにドーナツ状で軸方向に着磁された磁石の場合、中心軸上に磁場の向きが反転する点が2つ存在する。この内右側の点のみ図5の中心軸上のドットで示す。これらの点では対称性から磁束密度が0となり、これを磁場中性点と呼ぶことにする。この二つの磁場中性点の間及び近傍に中空陰極の先端があると、放出された電子が磁力線に沿って直近の磁石に流れてしまい、イオン生成の能率が悪いばかりかこの磁石に熱的な損傷を与える可能性が高くなる。従って中空陰極の先端、厳密に言えば熱電子を放出する部分を下流側の磁場中性点よりさらに下流に位置するようにしなければならない。実際の設計においては先に磁場形状を決めてから中空陰極の位置を決めることになる。

継鉄内で磁気飽和が起きると都合の悪いことが2つある。一つは磁場が外部に漏れること、もう一つは無磁場領域が小さくなることである。純鉄の場合1mmの厚みがあれば計算上は飽和しないが、放電室の継ぎ目部分で漏れないように注意して設計、組立を行なう必要がある。

通常の設計であれば磁石が大き過ぎて困ることはないが、小さ過ぎて困ることは良くあるので注意を要する。サマリウム・コバルト系磁石は非常に強い磁力を発生する一方、機械的強度はそれほど高くない。そこで磁石を放電室壁内に取り付ける際に油断すると、磁石と放電室壁或いは磁石同士で激しく衝突し、折損してしまう可能性がある。そこで指先で充分に保持できるだけの大きさと簡単には折損しないだけの厚みを持たせることが重要となる。図5の場合で言えば、一番下流側の磁石の断面が2mm × 5mmであり、これが寸法の下限となっている。これ以上薄くするとすぐに折れたり倒れたりするし、これ以上低くすると指先で掴み難くなる。磁石の断面を縦長（磁力線に平行な方向を長くする）にするか横長にするかという問題では、縦長にした方が保持力が大きくなり、熱に強くなるということである¹⁵。

7の磁石の排熱については次項で述べる。

排熱

放電室の温度は二つの理由でなるべく低いことが望ましい。一つは中性ガスの熱速度が小さくなることによって推進剤利用効率が上がるため、もう一つは磁石の性能が満足に発揮されることで放電電圧を高め維持でき、放電電力を抑えられるということである。温度が高いと磁力が低下し、放電電圧が低下するためにビーム電流を一定に保とうとすると放電電力を増やさなくてはならず、これがさらに温度を上昇させるという悪循環に陥り、最悪の場合には磁石の不可逆減磁を招いてしまう。温度が高い場合の若干の性能低下は看過することができても、不可逆減磁だけは絶対に回避しなくてはならない。このような事情から放電室、特に磁石の排熱を考慮することが必要になってくる。事実上磁石の排熱は熱伝導により放電室壁に対して行なうしかない。そこで排熱については磁石から放電室壁への熱伝導と放電室壁から外部への熱伝達に分けて考えることにする。

磁石から放電室壁への熱伝導率を高めるためには機械的に磁石と放電室壁を密着させることが重要となる。真空中で200 に耐える伝熱用グリスのようなものがあれば申し分ない。正多角筒型放電室側壁の場合は磁石と壁の平面度を確保することに尽きる。磁石側の平面度を確保することはそれほど困難ではないが、放電室壁の方は加工法に依る。板金加工は製作費は低く抑えられるが平面度を高め難い。放電加工はこの逆であるが、現在のところ平面度を優先するとこの方法しかない。円筒型放電

* 8 磁力線はN極から発しS極で終わるという定義は無視する。以下同様。

室側壁の場合の密着性は磁石の加工精度で決まってしまうが、平面の時ほどの密着性は期待できない。そこで少しでも密着度を高めるために磁石をできるだけ短くすることが考えられる*⁹。

放電室から外部への排熱は、宇宙空間への直接の輻射熱伝達とイオンエンジン取り付け部への熱伝達による。イオンエンジンを衛星に搭載する場合には衛星側への熱伝達はなるべく抑えるべきであるので、直接の輻射熱伝達が最大になるように努力すべきである。ただ地上試験においては、周辺に液体窒素冷却シールドでも設けない限りは周辺からの輻射熱伝達を無視できないので、イオンエンジン取り付け部への熱伝達がある程度増えることは許容せざるを得ない。直接の輻射熱伝達を増やすには放電室の外側の輻射率を上げることが必要となる。しかに単に黒化処理をして輻射率を上げると太陽光に曝されたときに入熱が増えてしまうので、赤外領域で輻射率が高く可視領域で輻射率が低い物質の膜を作る方がより良いと言える。このような目的で現在では放電室の外側にアルミナを溶射している。放電室の支持碍子には、入手容易な絶縁材の中では比較的熱伝導率と強度の高いアルミナを使用している。イオンエンジン取り付け部への熱伝達を最小にするためには何らかの工夫がいる。

推進剤の供給方法

推進剤である中性ガスの供給は、供給口の場所に関して上流壁からと側壁の下流端からの二通りが考えられる。後者の場合には供給口を上流側に向けて設置する (reverse feed)。いずれもガスの放電室内滞留時間を増やして電離の機会を増やすことを意図するものである。後者の場合には前者に比べて配管が長くなり、その引き回しが複雑になるという欠点がある。またガスの分布についても、均一な方が良いのか偏在している方が良いのかという議論もある。イオンは明らかに中空陰極の延長線上で他の部分よりも多く生成されるので、この部分に中性ガスを集中的に供給することが望ましいと考えられるが、現在のところ供給方法とガス密度分布の関係はあまり分かっていない。何が良いかを論じるにはあらゆる供給口の大きさ、数、位置と向きを試さねばならず、結論を出すことは困難と言える。推進剤の供給方法を変えたら劇的に性能が向上したという話も聞かないので、それほど拘る必要はないと言える。ただ放電が非回転対称になる可能性を排除したいので、供給口の配置を軸対称にしている。

その他

永久磁石の着磁方向は一方向が一般的であるが、放射状に着磁することもできる。しかし費用が跳ね上がるので試したことはない。

イオン抽出系

ここではイオン抽出系として最も一般的な円形孔を六方最密充填配置で多数開けた薄板電極を2または3枚使用したものについて考える。最密充填配置というのは開口率の点から他に選択の余地はない。かつては開口率を上げる目的で正六角形孔のスクリーン電極の研究が行われたこともあった。しかしモリブデンで製作されたものは強度的に満足が得られるものではなかった¹⁶。さらに正六角孔の場合には引き出されたイオンビームレットの断面が歪むという問題がある。正方形孔についても同じことが言える。イオンエンジン研究のごく初期にはスリット電極が使用されており¹⁷、現在でも地上用のイオン源には一部使用されている。スリットはC/C材の繊維構造と適合することから現在活発に研究が行われているが、イオンビームの広がり特性が問題となる。これらの非円形孔は実用化には至らないと考えられるのでここでは省くことにする。ガラスに電線を埋め込んだ電極もイオンエンジンの研究の初期にあった¹⁸。これは電極間が接触しても大電流が流れないということを用意したものであろうが、電極としての性能は高い筈はなく、電極支持の技術がほぼ確立した今となってはこれを採用する理由は全くない。

具体的に電極各部の寸法を決定する前に、電極の製法について熟知しておく必要がある。それは各部寸法の最小値は製法によって決まってしまうからである。さらに製法は当然材質によって異なるので、先ず材質を決定しなくてはならない。

電極の材質

電極の材質に求められる特性としては、「熱膨張率が小さい」、「耐スパッタ性が高い」、「溶着し難い」ことが挙げられる。電極であるからには導電性は当然のことであるが、電極内を流れる電流が小さいことから「高い導電率」は要求されない。最近までは加工性が非常に悪く、高価であるにも拘わらずモリブデンが材質の定番であった。特殊な目的で比較的加工性の良く廉価なステンレス等が使用されることもあるが、上記の条件を一つも満たしていないので実用には全く適さない。非金属材料としては過去にグラファイトが使用された例もあるが、強度上厚くしなくてはならず、性能と質量の点でモリブデンには及ばず姿を消している。現在ではC/C材 (carbon-carbon

*⁹ 磁石同士の間隙は無い方が望ましいが、磁石の加工精度の問題で設計の時点で隙間を無くすることはできない。組立時に磁石の寸法を調整するかある程度の隙間を許容するかである。事実上1mm以下の隙間であれば問題は生じない。放電室上流壁については平面なので容易に磁石同士を密着させることができる。

composite)の研究が進み、ほぼ実用化の領域にまで達している。これは熱膨張率が事実上零^{*10}で、モリブデンでは不可能であった平面電極を構成することができ、そのメリットは計り知れない。しかし現在の技術レベルでは繊維間の隙間を炭素で埋め尽くすことが困難なことから、孔成形後に短く取り残された繊維が脱落したり、材質内に空隙が生じる等、寿命に不安を抱かせる部分があるので、これを解決しない限り一気にモリブデンに取って代わるということもない。現状では長時間試験を重ねて寿命を立証するしかないと言えるが、米国では既に8,000時間の連続運転を達成している¹⁹。尚モリブデンの板には熱処理によって柔らかくしたものがあろうであり²⁰、すぐ後で述べるプレス加工の際にはこの方が使いやすい。またC/C材の板には繊維の太さ、数、配置方法によって多くの種類があるが、特に開口率の大きいスクリーン電極の場合、直線上の長い繊維は孔によって寸断されてしまうのでこれによる強度を期待するもの(市販品の殆ど)は不向きで、現在唯一有望なのは短繊維をランダムな方向に配置したものである。

電極の製法

電極は適当な板材に必要な孔を開け、適当な外形に切り出すという工程で製作されるが、加工に費やす労力の殆どは極めて多数の孔開けに向けられる。C/C材の場合には現状では機械加工か放電・レーザ加工によって孔を開けるしかない。金属材料の場合にはこのほかにエッチングが利用でき、外形加工も殆ど同時にできてしまう。後者は前者に比べて孔径の精度は劣るものの、加工費が安く大量生産に向いている。また金属材料の場合には、熱膨張率が無視できないために、皿状にプレス加工する必要がある。以下これらについて順に述べる。

放電・レーザ加工の場合には被切削物に力が加わらないので、電極の寸法の制限が最も緩く、加工が精度良くできる。しかし現状では加工費が非常に高いので、数千から数万に及ぶ電極の孔を開けるのにはなるべく使いたくない。機械加工の場合には被切削物にかなりの切削抵抗が加わるので、薄板である電極、特にスクリーン電極はそのままでは加工できない。そこで適当な接着剤を用いて材料の両側にアルミ板等を接着した後で孔を開ける。この場合にしても残りしるにはある程度の余裕を見なくてはならない。特にC/C材の場合では、繊維を短くし過ぎると脱落しやすくなったり強度が著しく低下したりするので残りしるを大きく取らなくてはならず、モリブデンに比べて不利となる。イオン抽出系として組み上げる前にはこの接着剤を完全に除去する必要があるが、

C/C材の場合には接着剤が隙間に入り込んでしまうので困難な作業となる。

エッチングの場合、被加工物に力が加わらないという点では放電加工同様であるが、放電加工ほどの繊細な加工は期待できない。そもそも原理的に孔の精度はエッチングマスクの精度だけでは決まらない。腐食は板厚方向だけではなく、これと直角方向にも進行する。そこでマスク上の孔径は目的の孔径よりも小さくしておき、適当な頃合いを見計らって腐食を停止させる。実際にはマスクが板に密着していない場所があったり、腐食の進行が不均一であったりしてうまくいかないことが多く、残りしるを板厚の3分の2以上取ることが必要と言われている²⁰。結果的にできた孔はおおよそ円形であるものの機械加工で開けたものに比べればかなり歪んでいると言える。また板厚方向にも均一ではなく、板厚の中間にバリのようなものが残る¹。ただしこれはイオンエンジンの慣らし運転の時点ですぐに摩耗してしまうので、このことまで考慮して孔径を最初から小さめにしておけば問題はない。

皿状成形は一般に冷間プレスで行なう。孔加工は通常プレス加工の前にやるが、エッチングで孔を開ける場合にはプレス後にエッチングをするやり方もある。すべての電極を重ねて一度に成型するか、一枚ずつ行なうかという選択の余地もある。

冷間プレスは、水圧を利用するものが実験室レベルでも実行可能であるが、それだけでは材料のスプリングバックのためにプレス型と仕上がり形状が一致しない。そこで大きめの曲率の型を利用するとか、冷間プレスである程度整形した後、型に入れて電気炉で熱を加える方法が採られる²¹。前者の場合には、電極の厚みによりスプリングバックの大きさが異なるので、曲率を変えた型を数種類製作して試行しなくてはならない。後者の場合には、複数の電極を重ねて一時に皿状成型することも可能であるが、高温に耐える型が比較的高価である。

孔の開いた板をプレス加工すると一般に孔は歪んでしまう。特にスクリーン電極のように開口比が大きい場合にはこの変形は著しく、孔の形状のみならず、積みも積もって位置までもずれてしまう。プレス加工後に孔加工を行えば孔の変形や移動を回避できるので理想的ではある。放電加工や機械加工の場合にはNC加工機のプログラミングが複雑になることや、特に機械加工の場合には特別な治具を準備しなくてはならないなど手間がかかるせい但现在までは行われた例は聞かない。エッチングの場合にはこの方法が比較的容易に実現可能である。プレス加工の過程で剥がれないようなマスクをプレス前に施しておく方法が一般的である²¹。

電極の支持方法

* 10 繊維の配置によっては負にもできる

イオンエンジンの電極は一般的には円盤状であり、これを電極孔のない周辺部のみで支える。過去には中心部に支持点を設ける例^{22,23}もあったが長所よりも短所が目立つので現在までに淘汰されてしまった。一部では中央支持の拡張とも言えるアニュラ電極の研究も行われている²⁴。電極支持の目的は言うまでもなく電気の絶縁と適正な電極間隔の維持であり、この目的を考えられる温度変化の範囲の中で達成することが重要となる。熱歪みの無視できるC/C材の場合には絶縁にさえ配慮すれば特にどんな支持方法でも問題はない。しかし金属材料の場合には口径が大きくなるほど熱応力を放射状に逃がす、柔軟な支持方法を採用する必要性が高くなっていく。熱応力を十分に逃がさないと電極の中心軸方向の変位が大きくなるので、適正な電極間隔が維持できなくなり、最悪の場合には接触に至ってしまう。また周辺部の孔では孔中心軸のずれが大きくなるので、加速電極が偏摩耗してしまう。他方電極を柔軟に支持するということは、外部から振動を加えたときに大きく揺さぶられるということで、これはロケットによる打ち上げを考慮すると望ましくない。そこで柔軟度にも上限が生じ、適当なところを選ばなくてはならない。

電極の支持方法として理論的にも実績の点からも最も確かなのは、米国製イオンエンジンで使用されている板バネ方式である(図6)。板バネは曲げる方向によって剛性が異なるので、電極の半径方向に変形しやすいように板バネを配置すればうまくいくようである。これ以外にはピアノ線のような棒状のバネを用いる方法が挙げられ

る⁹。これで板バネ同様の対熱応力柔軟性を確保しようとすると、振動に対しては板バネよりも弱くなる。しかし振動には振れ止めで対応することができるので、製作費の低さを考えると選択肢の一つと言える。バネを使わないで熱応力を逃がす方法もある。電極の周辺の一箇所のみを固定し、他は半径方向に自由に動くことを許す方法で、小型のイオンエンジンには採用されている²⁵。しかし電極の変位が中心軸に対して対称ではないので、大型のイオンエンジンの場合には変位過程で電極の相対位置が許容範囲を超える可能性について考慮しなくてはならない。

絶縁に関しては、イオンエンジンの運転時間が増えるにつれて、飛散した導電性物質があちこちに堆積することを考慮しなくてはならない。電極間の碍子については、沿面距離を長くしたり、飛散物質が到達しにくいような構造にすることが必要である。

電極の孔径と電極間隔

イオン抽出系の中で、最初に決めなくてはならないのはスクリーン電極の厚みである。スクリーン電極はこれから加速されるイオンの出発点の電位を固定するのが主な役割で、薄いほど下流側にある加速電極に因る電場が上流側に浸透しやすくなって有利となる。そこで構造的に許容される範囲内でできるだけ薄いことが望ましい。他の電極でも同様であるが、許容される薄さの限界は、打ち上げ時の加速度や振動、設計寿命内の摩耗によって決まる。今までのところ当所では加速度と振動については考慮しておらず、モリブデン製の場合には0.3mm、C/

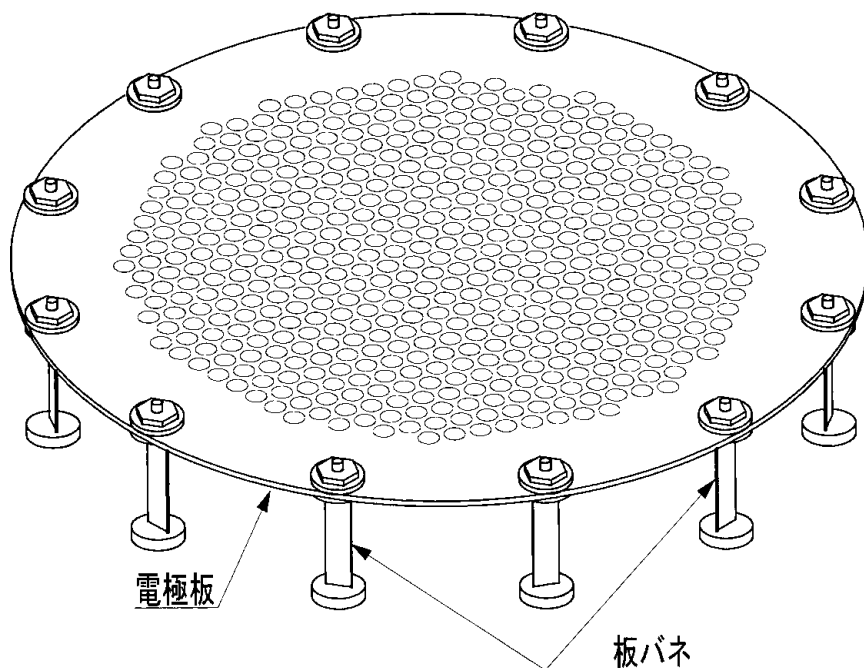


図6 板バネによる電極支持

C製の場合には0.5mmとしている。

次に決めなくてはならないのがスクリーン電極の孔中心間距離と孔径であるが、これらの間には強い相関があるので全く独立に決めるわけには行かない。十分にプラズマの電離度が高いときには開口率は高い方が良く、孔中心間距離は孔径に最小の残りしるを加えた値となる。電極の中心部ではこのような状態が期待されるが、電極の周辺部に向かうに連れてプラズマの電離度が下がり、開口率を下げて孔1個当たりのビーム電流が殆ど変わらない場合には、開口率を小さくして中性ガスの漏洩を低減させた方が性能が上がる。開口率を下げるのに孔中心間距離を変えると孔配置に整合性が無くなりうまくいかないの、これは一定にして(皿状成型による微小な変化は無視する)孔径を変化させることになる。では電極の中心部での孔径はどうやって決めるかという、これはプラズマ密度による。プラズマ密度が高くなるとシースの厚みが小さくなるため、孔径が大きすぎるとスクリーン電極による電場が孔中心まで浸透しなくなり、イオンビームが発散したり、抽出不能になったりする。逆に孔径が小さければ良いかというと、残りしるが一定の条件下では孔径が小さくなると開口率も小さくなり、板厚の影響が出てイオンビームの密度が低下するので望ましくない。また孔の数が増えたり、孔の位置精度から加速電極孔との軸ずれが無視できなくなる問題も起こる。このように電極中心部でのプラズマ密度が測定できれば孔径が決まるが、実際には測定にかなりの手間がかかることから、過去のデータを元に孔径を決め、何度か試行錯誤した上で適当な値に決めるのが手っ取り早い。かつてはカウフマン型イオンエンジンで孔径3.98mmという例³もあったが、最近のカスプ型ではプラズマ密度が高いのもっと小さくしないといけない。はっきりした基準があるわけではないが、過去の例から孔径は2mm前後が妥当であると思われる。尚当所では現在0.3mm厚のモリブデン電極の場合、残りしる0.2mm、孔径2mmを、0.5mm厚のC/C電極の場合、残りしる0.3mm、孔径1.9mmを採用している。孔中心間距離はいずれも2.2mmである。

スクリーン電極についてC/C電極の場合には以上で終わりであるが、モリブデン電極の場合には曲率を決めなくてはならない。曲率は一定である必要はないが、逆に放物面のような特別な曲面に拘る必要もないことから、プレス型を容易に製作できる一定曲率を採用する。周辺の支持部については平面のままとし、平面と曲面の境目はイオン抽出孔のある部分から充分遠ざける(孔径の2倍程度)ようにする。曲率が小さすぎると平面同様に熱応力によって予測外の変形を起こす可能性があるし、逆に大きすぎると電極の周辺部でビームレット偏向角の上限を超えてしまい推力の損失に繋がるので、どちらも望

ましくない。曲率を決める一つの指針は、周辺部に於ける電極面の傾きである。ビームレット偏向角の上限は約10度とされているので^{5,26}、周辺部での傾きが10度になるようにする。この場合電極の口径と曲率半径の間に、次のような関係がある。

$$\text{口径} = 2 \times \text{曲率半径} \times \tan 10^\circ$$

モリブデン電極で孔開け後に皿状成形する場合には上記の寸法で成形可能かどうか問題となる。同じ孔径と孔中心間距離でも、電極の曲率によっては成形可能かどうか分かれてしまい、最悪の場合には孔間の残りしる部分が切れてしまう。これについては実際にやってみる以外に方法はなく、失敗したら曲率を小さくする。それで熱応力に対応できなければ、残りしるを増やすことになる。当然のことながら皿状成形後の孔中心間距離は一定ではないことに留意する必要がある。

スクリーン電極の寸法が決まったら加速電極の寸法と電極間隔を決める。C/C電極の場合には平面なので、孔中心間距離はスクリーン電極のそれと同じになり、後は板厚と孔径と電極間隔を決めるだけでよい。モリブデン電極の場合には皿状電極特有の配慮が必要なのでこれについては後回しとし、ここでは先ず平面電極の場合について述べる。両電極孔の中心軸が一致しないことを除けば、ここでの議論は皿状電極でも通用する。電極の中心部ではプラズマの密度が高く、周辺部へ行くに連れて低くなるということを念頭に置き、最初は中心孔のみについて考える。これは中心部でパーピアンズが高く、周辺部で低いことを意味する。具体的にどの程度低いかはイオンエンジンにより異なり、一概には言えない。

この時点までにミッションからビーム電圧は決まっている筈である。通常の静止軌道以内のミッションならばビーム電圧は1000～1100Vの範囲であり、1200V程度までなら既存の実験データを参考にできる²⁷。原子力を電源にする深宇宙ミッションの場合のビーム電圧は一般にもっと高くなり、実験データが揃わない可能性が高い。この場合には数値計算を頼りにしたいところであり、実際地上用のイオン源ではこれを用いて設計しているようであるが、これはパーピアンズが高い領域での計算の収束性が悪く、高いパーピアンズを要求されるイオンエンジンの電極中心部には適用困難である。またこの手の計算ソフトはまだ入手が容易というわけではなく、自作するか高い出費が必要となり、研究の対象とする場合を別にすれば、あれば便利という程度で磁場解析のように設計にどうしても必要というものではない。加速電極電圧は大体100～500Vの範囲で決めれば良い。この電圧が低すぎると電圧印加開始時の過渡状態を乗り切れなかったり、ビーム電流が小さくなったりする。逆に高すぎるとイオンビームの広がり角が大きくなったり、電荷交換イ

オンによる損耗が激しくなる。ある程度高くなると広がりによる推力損失がビーム電流の増加による推力増加よりも大きくなり、これ以上高くしても良いことは無い。この限度は電極間隔によって変わるので一概には言えないが、高くとも500V以下である。100～300Vの範囲なら過去の実験データを参考にできる。このデータは横軸にパービアンズ、縦軸に広がり角をとったグラフ上の点として表されているが、パラメータが多すぎるのでこれらのあらゆる組み合わせについてグラフで示されているわけではない。複数のグラフのデータを組み合わせ、適当に内挿や外挿を用いて任意のパラメータに対するデータを得なくてはならない。

実験データを使用するに先だって許容発散角を決めなくてはならない。発散角が大きすぎると推力損失や周辺に損害を与えるので望ましくないことは一見して分かるが、許容値が小さすぎると達成が困難になり、推力を犠牲にするなどしなくてはならないのでやはり望ましくない。この辺は既存のイオンエンジンのデータを参考にし決めてなくてはならない。妥当な範囲は $11^{\circ} \sim 14^{\circ}$ と言える²⁸⁻³²。中には 10° を下回るようなものもあるが、これは充分下流域で測定していないことから得られた局所的な値と思われる。許容発散角が決まれば、使用できるパラメータの組み合わせが絞られてくる。この中で使用するパービアンズの下限は発散角の極小点で、上限は許容発散角の点か最大パービアンズで決まる。中心孔の動作点をなるべく高パービアンズ側にしておけば、周辺孔の動作点は一般に有利な方へ向かう。ただし主推進用のイオンエンジン等で推力可変にする場合にはもっと低いパービアンズまで使わざるを得なくなり、下限は許容発散角で決まる。

電極間隔は最終的に調整できるので取り敢えずは適当に決めておくことができる。一応スクリーン孔径の半分を目安としておけばよいが、金属フレークや僅かな電極の歪みによる絶縁破壊を避けるために0.5mm以下になることは避けるようにする。特にC/C電極の場合には炭素粉が堆積し、同一箇所です絶縁破壊を起こしやすいので0.8mm以下は避けた方がよい。加速電極の厚みの変化による性能への影響は比較的小さいので、これは設計寿命に対する摩耗量から決める。しかしいくらでも厚くできると言うものではなく、加速孔径の半分を上限とすべきである。加速孔径は発散角と推進剤利用効率に影響を及ぼす。孔径が小さいと中性ガスが逃げ難くなるので推進剤利用効率が高くなるが、発散角が大きくなってしまふ。ここでは許容発散角を与える孔径が最善の選択と言うことになる。孔径を一定とする場合には設計はこれで終わりとなり、後は間隔を調整しながらイオンビームの発散角を測定して満足できる設定が得られるかどうかを調べ

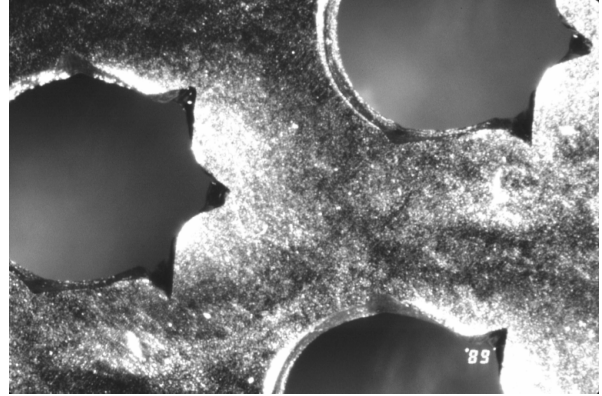


図7 加速電極の星形摩耗痕の写真

ることになる。可能ならば加速電極電圧も調整する。孔径が一定でないときには一般に周辺に向かうに連れて階段状に孔径を減らしてゆく。最周辺部における孔径は厚みの2倍とし、中間部は適当に補間する。この電極で数10時間運転し、イオンビームによる加速電極上流側の摩耗痕を確認する。低パービアンズの場合摩耗痕は星形となるが、星形の突起部分については無視して良く、以下摩耗痕の径と言う場合には星形の内接円の直径を指す^{*11}。摩耗痕が残る場合には孔径が小さ過ぎるので、摩耗痕の径を新たな孔径として加速電極を製作し直す。後は一定孔径の場合と同じ手順となる。周辺部でのプラズマ密度があまりにも低いとイオンビームレットの発散角が大きくなり、摩耗痕の径が大きくなり過ぎて孔開けが不可能になる場合も有り得る。これはスクリーン孔径が大き過ぎることが原因なので、これを小さくするかいっそ孔を開けないようにするかの選択が必要となる。また別の見方をすれば放電室の径に対して抽出系の径が大き過ぎるとも言え、どちらかを作り直さなくてはならない。

次に皿状電極の場合について述べる。モリブデン電極の場合電極間隔は冷間時と熱間時では異なるので、冷間時から熱間時までの過渡時に接触等の問題が発生しないようにしなくてはならない。これは一部は曲率の選択の問題で、凸型電極の場合には加速電極の曲率をスクリーンのそれと同じかやや小さめにし、凹型電極の場合にはこの逆とする。中心における電極間隔は平面電極のそれと同じで、周辺部ではこれと同じかやや開き気味と言うことになる。次に孔中心間距離であるが、皿状成形とビームレット偏向のためにこれはスクリーン電極のそれと異なる。さらに一定である必要もないが、そうしてもそれほど性能が低下するとも考えられないので、製作を

* 11 摩耗痕の中心が孔の中心から大きくずれている場合には星形を確認することは困難である(図7)。

容易にするために一定とする。しかしスクリーン電極同様皿状成形後には一定でなくなり、このことを考慮して孔中心間距離を決める。実際にはスクリーン電極と孔中心間距離の変化の仕方が異なるので、適当な値のもので皿状成形を行い、結果をフィードバックして決めるより他無い。以下この成形後の孔中心間距離について、どのような値が望ましいかについて述べる。孔中心間距離は両電極の最外周の孔の相対位置を基準にして求める。可能な選択の範囲としては、ビームレット偏向角が 0° から 10° の間である。実際には最終的な電極間隔の微調整により孔の相対位置が設計点から少しずれることから、制限一杯のところを設定するとこの範囲をはみ出してしまう可能性がある。簡単には半分の 5° を目標にすると良い。孔中心軸の偏心と偏向角の関係は既存の実験データか数値計算により得られる^{5,26,33}。仮にこれらのものがなくても偏心を加速孔径の1割程度とし、試験を行なって摩擦痕から値を修正するという方法もある。後は平面電極同様に試験を行なって寸法を修正していく。皿状電極の場合には、ビームレット偏向角が適当でないために加速電極上流面上の摩擦痕の中心と孔の中心がずれることがある。この場合には最外周の孔に関して、孔の中心位置を摩擦痕の中心方向に両中心間距離の約半分だけ移動させるような孔中心間距離に変更すると良い。

減速電極の設計はスクリーン電極と加速電極の設計が固まってから行なえば良い。減速電極は性能には大きく影響しないので、加速電極の設計を参考にして適当なものを製作し、イオンビームレットが当たらないように修正すれば良い。

2枚電極と3枚電極

機能的にはイオン抽出系は2枚電極で充分であり、3枚にすることにより僅かに抽出性能は向上するものの、複雑さと質量が増すという不利益の方が大きいので2枚の方が優位と言える。それにも拘わらず3枚という選択が有り得るのは、加速電極を電荷交換イオンによるスパッタから保護し、イオンエンジンの耐用時間を延ばすことにある。2枚電極の場合、加速電極下流面の孔と孔の間隙線上に電荷交換イオンが集中して摩擦する。特に3本の中間線が交わる点での摩擦は激しく、三角錘状の窪みが発生する。この窪みが上流面に到達するまでの時間が加速電極の耐用時間となり、イオンエンジンの耐用時間に対する上限の一つとなっている。減速電極を追加することにより、この部分の摩擦はほとんど無視できる程度にまで減少するので、耐用時間の上限の一つが事実上無くなることになる。ただし3枚電極にすることにより、電荷交換イオンが加速電極孔の周辺に集中するようになり、孔が大きくなり易くなる。加速電極の摩擦量を質量の変化で計った場合、2枚と3枚で大差はないと言われてい

る。孔が多少大きくなっても耐用時間的には問題がないが、性能の劣化は避けられないことに留意しなくてはならない。

凸型と凹型

凸型電極と凹型電極のどちらが優れているかという議論は昔から続いている。凸型の利点としては、僅かながら放電室の容積が大きくなるので中性ガスが電離される確率が高くなり性能が高くなることと、僅かながら電極の放射冷却性が良くなることとが挙げられる。凹型電極の利点としては、無理なくイオンビームを収束させられるので、充分下流では差がないもののイオンエンジンの近傍ではビームの断面径を小さくできることと、運転開始直後の温度的過渡期に電極間が開く方向にあって安全側であることが挙げられる。後者は熱源に近いスクリーン電極の方が加速電極よりも先に熱膨張すると考えられることによるが、電極の支持方法が適切であれば凸型でも電極が接触することはないので、これは長所とは言えない。現在までのところはっきりした優劣がついているわけではないが、数の上では凸型電極の方が多いようである。

碍子類

イオンエンジンで使用する碍子には、主なところで放電室支持碍子と電極支持碍子がある。両方とも2000V程度に耐えれば充分なので、余程小さく作らない限りは表面の電位勾配は十分小さく、表面が清浄なら沿面放電は発生しない。使用温度もせいぜい200度であり、従って碍子の性能としてはそれほど高いものを要求しない。しかし電極支持碍子には放電室内から拡散してくる金属蒸気が付着しやすいので、碍子全体が拡散経路に直接曝されるような構造は避けるべきである。また地上の真空装置内で作動させる場合にはあらゆる碍子表面が汚染の対称となるので、沿面距離には充分な余裕を持たせる必要がある。それでもイオンエンジンで使用する碍子は非常に小型なので、通常は表面にひだを付けて沿面距離を稼ぐことはしない。また釉薬も使用しない。少量生産の場合ならば加工性セラミクスや窒化ホウ素(boron nitride)という選択もあり得るが、ある程度大量になると強度の高いファインセラミクスの方が良い。現在使用している碍子はすべてアルミナ製ファインセラミクスである。

イオンエンジンでは碍子の他にも絶縁材を使用する。代表例としては放電室とイオン抽出系間が挙げられるが、ここでは設計耐電圧は100V程度と低い非常に薄いことが要求され、アルミナのような焼結材での製作は困難となる。このような部分には雲母や雲母の粉を固めた材料が適当である。

絶縁器 (isolator)

絶縁器は地表電位から切り離された放電室へ推進剤を送るための部品である。大きな電位差のあるところにガスを充填すると、ガス内で放電が起こり大きな電流が流れてしまう。この電位差とガスの圧力の関係はバッシュェンの法則として知られ、放電関係の教科書には必ず載っているが、電位差が圧力によって決まるある値以下ときには決して放電が起こらないことが知られている。絶縁器は地表と放電室の間をいくつかの部屋で仕切り、各部屋の中での電位差を放電開始電圧以下にするものである。構造的には絶縁物の配管の中に金属網とドーナツ状の絶縁物スペーサを何層にも積み上げたものとなっている。絶縁器の設計は一見易しそうに見えるが、実際に使ってみると予想しないトラブルに遭遇することが多く、対症療法で満足のゆくものを仕上げるのが最善と思える。まじめに設計をする場合に留意すべきことは、耐電圧としては少なくともビーム電圧の2倍程度をとることと、非常に細かい金属網を使用することである。イオンエンジン運転中に突然放電が消滅すると、ビーム電源回路のインダクタンスにより非常に高い電圧が絶縁器に加わる。絶縁器内で絶縁破壊が発生すると、金属蒸気が飛び散ってスペーサの内側に蒸着し、非常に厄介なことになるので、少なくとも向こうが透けて見えるような目の粗い金網は使用すべきでない。

現在使用しているものは、内径 10mm、長さ 40mm のアルミナ管の両側に取り付け用の kovar という金属をロウ付けしたもので、この管内に厚さ 1mm のアルミナ製ドーナツ状スペーサと、「綾畳折り」という非常に目の詰まったステンレス製の網を20層程度交互に積み重ねたものである。ここで一応「網」を使っていると述べたが、実際には網内部の隙間よりも配管と網の外周部の隙間の方が大きく、無垢の板でも差し支えないように思える。

実際最上流と最下流の網の代わりに0.3mm厚のタンタル製の無垢の板を入れている。このことは意外に重要で、かつてこうする前には金属網の中心部に直径1mm程度の孔が開いたことがあった。発生機構は不明であるが、中空陰極と地表側配管の共通の中心線上に細い電子ビームかイオンビームが走ったようである。絶縁器の大きさは内径、長さ共に小さくする余地は残っているが、取り扱い性や絶縁余裕も考慮しなくてはならない。尚 kovar はアルミナと熱膨張率が同じ程度なので、アルミナを金属と接合したいときに繋ぎ部分に使用される。アルミナの表面に金属を蒸着させる (metallize) ことにより、ロウ付けをすることが可能となる (図8)。

シールドケース (ground screen(米) earth screen(英))

シールドケースの役割は環境中の電子が高電位に保たれている放電室に流れ込むのを防止することにある。この目的のためには無垢の板で出来ていても良いのだが、放射冷却により放電室の温度をなるべく下げるという目的から、網状にしたりパンチングボードを使ったりしてなるべく開口率を上げるようにする。さらに開口率が同じならなるべく板は薄い方が良い。網目や孔の大きさは直径1mm以下にすべきで、これより大きいと電子が通り抜けてしまう。この条件を満たす市販のステンレス製パンチングボードの場合、開口率はせいぜい30%、板厚は0.5mm以上なので、これ以上を望む場合には板から製作しなければならない。現在使用しているものはエッチングによって開口率50%、板厚0.3mmとしたもので、軽量化という点でも僅かに貢献している。

コーティング

ロウ付けなど製造工程の途中で必要に迫られてするコーティングを除けば、イオンエンジンでコーティング

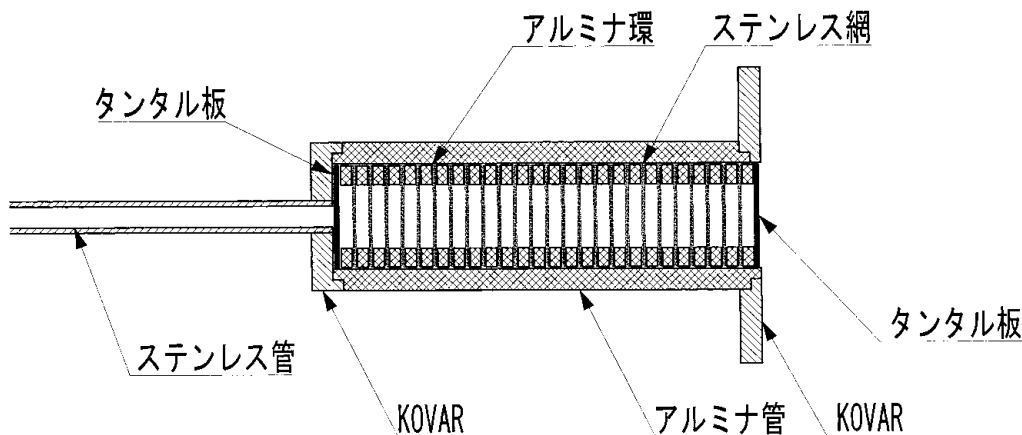


図8 絶縁器の構造

をする目的は次の二つのどちらかに分類される。一つは金属の表面をイオンによるスパッタから守ることであり、表面に導電性が必要なときには炭化チタンを、表面を絶縁材としたいときには窒化チタンやアルミナを溶射することがよく行なわれる。もう一つは放電室のところで述べたように、表面の輻射率を変えたいときであり、輻射率を上げたいときにはアルミナを溶射する。

シール材

イオンエンジンでは溶接構造を多用すればシール材を使わずに組み立てることも可能であるが、開発段階では分解・再組立ができた方が便利であることが多いので必要などころにはシール材を使用する。必要な場所は推進剤の流路で、放電室本体の組立や放電室とイオン抽出系の結合には不要である。シール材を使用する場所は通常100以上の温度になるので、有機物製のOリングは使えない。また使用するネジは一般に小型で本数をあまり増やしたくないことから、コンフラットも適当ではない。選択肢としては柔らかい金製のOリングにするか、特殊構造のリング(商品名ヘリコフレックス、Cリング)が挙げられる。

スパッタシールド

地上試験においては量の違いこそあれターゲットからスパッタ物質が飛来することは避けられない。中和器は通常ターゲット方向に開口部を曝しているので、スパッタ物質が含浸陰極を汚染する。飛散量によっては非常に短時間で中和器の機能が失われる可能性がある。そこで開口部からターゲットが見えなくなり、且つ放出電子の回り込みを許すような場所に適当な大きさの板を置くことが望ましい。

第4章 あとがき

冒頭にも述べたとおり、客観的な論文というよりは筆者の主観を多分に含んだ参考資料という趣旨で本資料をまとめ上げた。筆者の知恵では、こういう形以外ではこのようなノウハウ集を後世に残す方法が思い浮かばなかったというのが事実である。このため従来の航技研資料の範疇から逸脱してしまったが、何とか出版まで漕ぎ着けられたことについて関係者の方々の協力を深く感謝する。内容については筆者の考え違いも少なくないと思われるので、この資料を参考にする人には、内容に縛られること無く、自分の自由な発想を大事にされることを期待する。尚、「イオンエンジンの試験法」についても近日中に同様の資料をまとめる予定である。

参考文献

- 1) H. R. Kaufman; Technology of Electron-Bombardment Ion Thrusters, Advances in Electronics and Electron Physics, Vol. 36, edited by L. Marton, Academic, (1974), pp. 265-373.
- 2) G. R. Brewer; Ion Propulsion, Gordon & Breach, (1970)
- 3) W. R. Kerslake & L. R. Ignaczak; Development and Flight History of SERT Spacecraft, AIAA 92-3516, (1992)
- 4) P. J. Wilbur, J. R. Beattie & J. Hyman; Approach to the Parametric Design of Ion Thrusters, J. of Propulsion & Power Vol. 6 No. 5, (1990)
- 5) J. M. Homa; Ion Beamlet Steering for Two-Grid Electrostatic Thrusters, NASA CR-174671 (1984)
- 6) M. J. Patterson & S. R. Olson; Low-Power Ion Propulsion for Small Spacecraft AIAA paper 97-3060 (1997)
- 7) J. S. Sovey & et al.; Development of an Ion Thruster and Power Processor for New Millennium 's Deep Space 1 Mission, AIAA paper 97-2778 (1997)
- 8) S. Kitamura, K. Miyazaki & Y. Hayakawa; Cyclic Test of a 14-cm Diameter Ring-Cusp Xenon Ion Thruster, AIAA 92-3146 (1992)
- 9) 吉田英樹他; 主推進機用イオンエンジン(BBM-1)の1000時間作動試験, 第41回宇宙科学技術連合講演会 (1997)
- 10) T. R. Sarver-Verhey; 28,000 hour Xnon Hollow Cathode Life Test Results, IEPC 97-168 (1997)
- 11) J. R. Beattie; Extended Performance Technology Study: 30-cm Thruster, NASA CR-168259 (1983)
- 12) R. D. Moore; Magneto-electrostatically Contained Plasma Ion Thruster, AIAA paper 69-260 (1969)
- 13) 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, NAL TM-555, (1986)
- 14) Y. Hayakawa, K. Miyazaki & S. Kitamura; Measurements of Electron Energy Distributions in an Ion Thruster, J. of Propulsion & Power Vol. 8 No. 1 (1992) pp.118-126.
- 15) 日立金属柿沼氏との会話
- 16) 東芝との共同研究による試作
- 17) P. M. Margosian; Preliminary tests of insulated accelerator grid for electron-bombardment, NASA TM-X-1342, (1967)
- 18) H. R. Kaufman & P. D. Reader; Electrostatic Propulsion, edited by D. B. Langmuir, E. Stuhlinger & J. M. Sellen, Academic, (1961)
- 19) J. E. Polk & et al.; The Effect of Engine Wear on Per-

- formance in the NSTAR 8000 Hour Ion Engine Endurance Test, AIAA 97-3387 (1997)
- 20) **フォトカッティング若林氏との会話**
- 21) V. K. Rawlin, B. A. Banks & D. C. Byers; Design, Fabrication, and Operation of Dished Accelerator Grids on a 10-cm Ion Thruster, AIAA 72-486, (1972)
- 22) S. Nakanishi & E. V. Pawlik; Experimental Investigation of a 1.5 meter Diameter Kaufman Thruster, AIAA 67-725 (1967)
- 23) K. H. Groh & et al.; Inert Gas Performance of the RIT 35 Main Propulsion Unit, IEPC 88-098 (1988)
- 24) G. Aston, M.B.Aston & V.K.Rawlin; 50-cm Ion Engine Operation with Annular Ion Accelerator System, AIAA 95-3069 (1995)
- 25) **宇宙開発事業団成果報告会**
- 26) W. C. Lathem; Grid-Translation Beam Deflection Systems for 5-cm and 30-cm Diameter Kaufman Thrusters, AIAA 72-485, (1975)
- 27) Y. Hayakawa & S. Kitamura; Ion Beam Divergence Characteristics of Two-Grid Multiple-Hole Ion-Accelerator Systems, J. of Propulsion & Power, Vol. 15 No. 3 (1999) pp.377-382.
- 28) H. Takegahara & et al.; Beam Characteristics Evaluation of ETS-VI Xenon Ion Thruster, IEPC 93-235 (1993)
- 29) D. G. Fearn; The Proposed Demonstration of the UK-10 Ion Propulsion System on ESA 's SAT-2 Spacecraft, IPEC 88-031 (1988)
- 30) K. H. Groh & et al.; Beam Diagnostics for the Characterization of Ion Thruster Beam Parameters, IEPC 91-083 (1991)
- 31) J. R. Beattie and et al.; Flight Qualification of an 18-mN Xenon Ion Thruster IEPC 93-106 (1993)
- 32) Y. Hayakawa, K. Miyazaki & S. Kitamura; Ion Beam Characteristics of a 14 cm Xenon Ion Thruster, AIAA 94-2852 (1994)
- 33) Y. Hayakawa; Three-Dimensional Numerical Model of Ion Optics System, J. of Propulsion & Power, Vol. 8, No. 1, (1992) pp.110-117.

航空宇宙技術研究所資料751号

平成12年9月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)40-3075 ㊦182-8522
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

©禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、管理部
研究支援課資料係にご連絡ください。

