

次世代イオンエンジンの研究

The Research on the Next-Generation Ion Engine

宇宙先進技術研究グループ 早川 幸男、大川 恭志、宮崎 勝弘、吉田 英樹、北村 正治

Advanced Space Technology Research Group

Yukio Hayakawa, Yasushi Okawa, Katsuhiko Miyazaki, Hideki Yoshida, and Shoji Kitamura

Abstract

This paper describes the status of the next-generation xenon-ion-engine research at ISTA (The Institute of Space Technology and Aeronautics). A set of ion extraction grids which would be ready for producing 200-mN thrust with a shorter aging period than ever was manufactured. A problem that the heater of a graphite-orifice hollow cathode failed in repeated heating was figured out. Discharge can start in five minutes from the onset of heating the main cathode. The only subject left in the main cathode life is confirming the life of the impregnated cathode. Research and Development of graphite-orifice-hollow-cathode neutralizer started. The output filter of the laboratory-model discharge supply was modified to reduce ripples in discharge current. An ion target was modified to reduce the deposition rate at the ion thruster.

1. はじめに

本研究は、静止衛星や探査機に要求される大推力・長寿命のイオンスラスタ製造並びにイオンエンジン試験技術の確立を目標に、独自に実施したものである。

これまでに我が国で開発されたイオンエンジンと次世代イオンエンジン(Fig.1)の主な仕様を Tables 1 & 2 に示す。ETS-VIは、我が国が世界に先駆けて南北位置保持用スラスタとしてイオンエンジンを採用した衛星である。その打ち上げから11年を経た現在においては、米国や欧州における強力な国家支援の下での研究開発により、ETS-VI型用のイオンエンジンは一応確立した技術とは言え、あらゆる点で完全に見劣りのするものになってしまったと言える。この後 ETS-VIII用では寿命が大幅に延長されているが、推力と比推力を犠牲にしている。

現在の殆どの静止衛星には、寿命とペイロードの点で化学推進の遠く及ばない高比推力を発生できる電気推進器が搭載されている。これらは比推力の高さ、コストの高さ、寿命の長さのいずれでもイオン

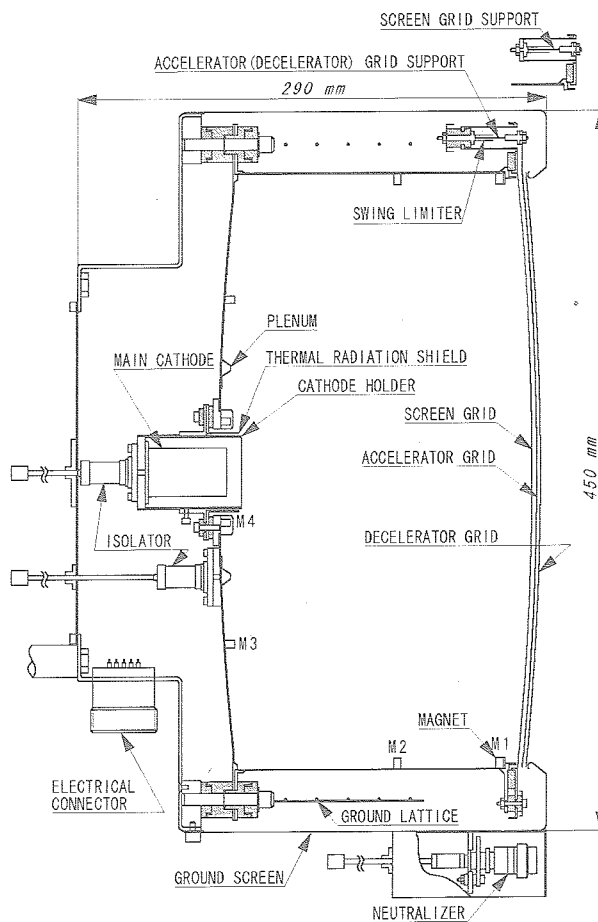


Fig. 1 35cm Thruster Cross Section

スラスタ>ホールスラスタ>アークジェットである。従って比較的中小型あるいは短寿命の衛星の場合、アークジェットやホールスラスタが採用されることが多いが、これらは既に市場に存在するので、衛星の国際競争力に差が出ることはあまりない。逆に比較的大型で長寿命の衛星の場合、イオンスラスタ以外でシステムを成立させることは困難となるが、イオンエンジンは市場に無いので、その製造技術の有無が衛星の国際競争力を左右する。探査機の場合にも、イオンスラスタ以外でシステムを成立させることが困難なものが多数ある。ここに当機構が中心となって次世代イオンエンジンの研究開発を実施してゆく意義がある。当機構での大型衛星の計画は当分無いかも知れないが、イオンエンジンの場合、ある口径のスラスタを製造する技術があればそれより小さいものは容易に製造可能であるので、大きめのスラスタの研究は無駄にはならない。また製造コストを削減すれば、より小型の衛星用として他の電気推進器に対して競争力を持たせることも可能である。

Table 1 JAXA(excluding ISAS)-Developed(Developing) Ion Thrusters

Satellite	Thrust, mN	Life, h	Isp, s	Grid Supporting	Launch Year
ETS-III	2	hundreds	2,200	Fixed	1982
ETS-VI	25	6,500	2,900	Fixed & Loose	1994
COMETS	25	6,500	2,900	Fixed & Loose	1998
ETS-VIII	20	16,000	2,200	Fixed & Loose	(2006)
(35 cm)	150(200)	30,000(3,000)	3,400	Flexible	

Table 2 JAXA(ISAS)-Developed Ion Thruster

Spacecraft	Thrust, mN	Life, h	Isp, s	Special Note	Launch Year
Hayabusa	8	18,000	2,900	ECR discharge	2003

次世代イオンエンジンの研究は、平成 14 年度までに中空陰極を除いて寿命関連の対策を完了し、平成 15 年度にはそれまでに山積していた殆どすべての問題に解決の目処が付いた。平成 16 年度には中和器の研究開発に着手した。これがスラスタの性能に関連する最後の研究開発項目である。

2. 研究の概要

平成 16 年度は以下の項目について研究を行なった。

(1) 200mN 専用イオン抽出電極

製造直後の電極表面にはバリや不純物が残っているため、高電圧を加えると容易に絶縁破壊を起こす。このため電極をスラスタに組み込んで定格以下のビーム電流で運転、これを徐々に定格まで上げていく。これをエイジングと呼ぶ。特に加速電極孔径は最適値より少し小さめに設計され、エイジングでイオンに削られて、エイジング終了時に最適値になるようになっている。150mN 用として設計された電極を 150mN で使用する場合のエイジング時間に比べて、200mN 用として使用するための時間は格段に長い。この時間を短縮するため、200mN 専用の電極を設計製作した。

(2a) 中空陰極(主陰極)

グラファイト製オリフィスの中空陰極の場合、オンオフ試験中にグラファイトとヒータの接合部の破

断という問題が発生した。この問題に対処すべく改良を行なった。この問題を除けば、残る課題はインサートの寿命確認のみとなり、これを簡便に行なうための単体試験装置を設計製作した。ここではより実際の環境に近づけるため、従来平板であった陽極を、磁石を設置した放電室に代えた。

(2b) 中空陰極(中和器)

中和器は基本的に主陰極を小型化したものであるが、これまで予算及びマンパワー上この二つを同時に研究開発する余裕はなかった。そこでスラスタの性能により大きく影響する主陰極の研究開発を先行し、その成果を元に中和器の研究開発を進めることにしていた。平成16年度に主陰極の当面の問題が解消されたのを契機に、本格的に中和器の研究開発を開始した。

これまでに製作した中和器の単体試験を行なった。この結果を基に最新の主陰極と同じ構造の中和器を設計製作した。

(3) 電源リップル低減化

電源を実負荷で運転すると、抵抗負荷時には僅かであったリップル電流が増大し、その影響により各電流電圧の計測が不可能になるほどであった(Fig. 2)。電磁干渉を抑制する観点から、このリップル電流は削減されなくてはならない。このためにPS3(放電電源)・スラスタ間のLCフィルタ(T型)の回路定数を変更し、その効果を調べた。尚、リップル電流の周波数(>1MHz)は、電源のスイッチング周波数(100kHz)とは一致せず、スイッチングはリップルの直接の原因ではない。PS1(ビーム電源)の電流リップルはPS3の電流リップルの影響と思われるが、PS1のリップルはPS3のそれよりも大きく見えるが、直流分はPS3のその5分の1程度なので、電磁干渉の原因としての両者はほぼ同等と考えられる。PS1は定電圧制御であり、実際に電圧リップルは僅かなので、比推力に及ぼす影響は皆無である。

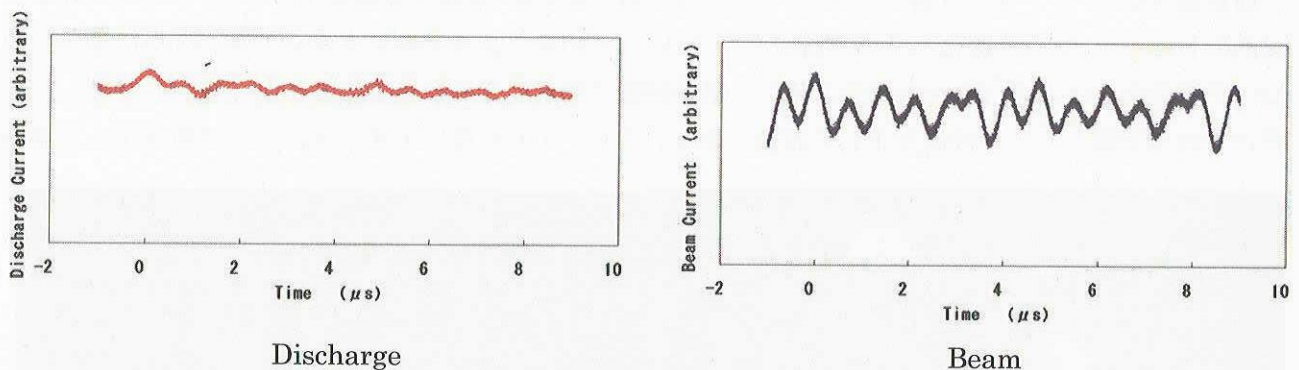


Fig. 2 Current Fluctuation

(4) ターゲット改良

イオンビーム中のイオンは約1keVのエネルギーを有するため、これが真空槽壁に衝突すると、真空槽壁の原子を弾き出す。これをイオンスパッタリング現象と呼ぶ。イオンスラスタの試験を行なう真空槽には、イオンターゲットと呼ばれる板状の装置が設置され、これにイオンビームを受けさせることによって真空槽壁の損耗を避ける。この場合、ターゲットを構成する原子がスパッタされて真空槽内に飛散する。以前約5,000hの運転試験を行なった際、このスパッタ物質が大量にスラスタに飛来したため、約2,500hを経過した時点で、電極からスパッタ物質を落とす必要に迫られた。これは電極寿命の推定を困難にするだけでなく、陰極にも影響を与えることが予想されるため、次回の長時間運転までに対策をしておく必要があった。従来のターゲットの表面は主としてチタン製であり、チタンのスパッタイールドは炭素のその約8倍(質量比、原子数比では約2倍)である。そこでスパッタ物質を低減するため、

材質を炭素系のものに代え、その効果を調べた。

3. 成果の概要

(1) 200mN 専用イオン抽出電極

電極の成形が不調のため、未だ試験を行っていない。成形不調に関するこれまでの調査により、作業内容に不適當な部分があったことが判明しているが、これが原因の全てであるかどうかは不明である。平成 17 年度に再成形を計画している。成形不調の遠因は、熟練作業者の引退によるノウハウの継承不全と成型用ホットプレス of 老朽化による設備変更にあると考えている。

(2a) 中空陰極(主陰極)

100 回のオンオフ試験後、ヒータを検査し、全く問題の無いことを確認した。さらにヒータ通電開始後、5 分以内に放電開始可能であることを確認した。

単体試験用放電室(Fig. 3)の模擬イオン抽出電極遮蔽率を調整することにより、推進剤(Xe)陰極流量、放電電圧、放電電流の 3 パラメータを同時にイオンスラスト組み込み時のそれらとほぼ一致させることができた。その際、陰極を経由しないで放電室に供給される流量を少量に制限しているため、試験に要する推進剤流量はイオンスラストを運転する場合の 10 分の 1 未満で済んでいる。

想定外の問題として、単体試験装置の真空槽が、クライオポンプによって励振されることが判明した。この振動が原因となる供試体陰極の破損を危惧し、振動に対する調査及び対策を行なった。しかしながら完全に問題を解決するには至らず、陰極の長時間試験は開始できなかった。

(2b) 中空陰極(中和器)

新規製作品(グラファイト製オリフィス)については、従来品(高融点金属製オリフィス)より長寿命を目的とし、インサート(酸化バリウム含浸タングステン)の径と長さを共に大きくした。さらに点火時のヒータ電流を 11A から 9A へと減少させた。単体試験で新規製作品が作動することは確認したが、これだけでは中和器としての性能を正しく評価できないので、H17 年度にイオンエンジンに組み込んで評価



Fig. 3 Main Hollow Cathode in Discharge Chamber for Standalone Testing (Left) and Discharge Luminescence through Masked Fake Grid (Right)

する予定である。

(3) 電源リップル低減化

実負荷時と抵抗負荷時でリップルの変化が無視できなかったのは、PS3(放電電源)電流と PS5(主陰極

キーパ電源)電流であった。PS1(ビーム電源)のリップル電流はPS3のその影響と考えられるので、これに対する直接的な対策は講じないこととした。PS3のリップル電流は、当初抵抗負荷時で直流分17Aに対し0.04A、実負荷時で直流分13.05~15.8Aに対し4Aであった。このときPS1のリップル電圧は、直流分約1kVに対し抵抗負荷時で30V、実負荷時で20~50Vと問題のないレベルであった。

いろいろな回路定数を試した結果、PS3のリップル電流は、実負荷時で直流分13.11~13.3Aに対し0.2~0.6Aとなった。リップル電流に幅があるのは、T型フィルタ内後段Lのインダクタンスの違いによるもので、これが大きくなるほどリップル電流は小さくなった。ちなみにPS1のリップル電圧は40Vで、PS3の出力フィルタの回路定数変更による影響は見られなかった。推奨される回路定数は、ETS-VIII用のそれらとほぼ同じであった。但しETS-VIII用PS3の出力電流が最大で4Aであるのに対し、ここでのPS3のそれは最大17Aなので、Lの外形と質量はそれなりに大きくなり、インダクタンスを大きくすると kilograms のオーダーとなるが、根本的な電源の回路変更を伴わずに対処できることが確認できた。

(4) ターゲット改良

ターゲットからの飛来物質の堆積速度を測定するために、スラスタの横にQCMを設置し、ターゲット以外から飛来する物質を遮るためのコリメータをその正面に設置した(Fig. 4)。使用した板の材質は、コストの点でC/Cとした。途中2回の試験を経て、最終的にターゲット全体を改造することにした。その結果、堆積速度は当初の約20%まで低減させることができた(Fig. 5、“QCM Output”は堆積物の質量に比例)。理論値に達しない原因は把握しているが、現状ではこれ以上下げることは困難で、下げるためには新規に真空槽を製作する必要がある。

ターゲット表面の材質変更により伝熱の状態が変わり、結果的にクライオパネル冷却用冷凍機の熱負荷が増えた。このため改造前にはイオンエンジンの連続運転が推力180mN位までは可能であったものが、改造後は150mN位がやっとという能力になってしまった。

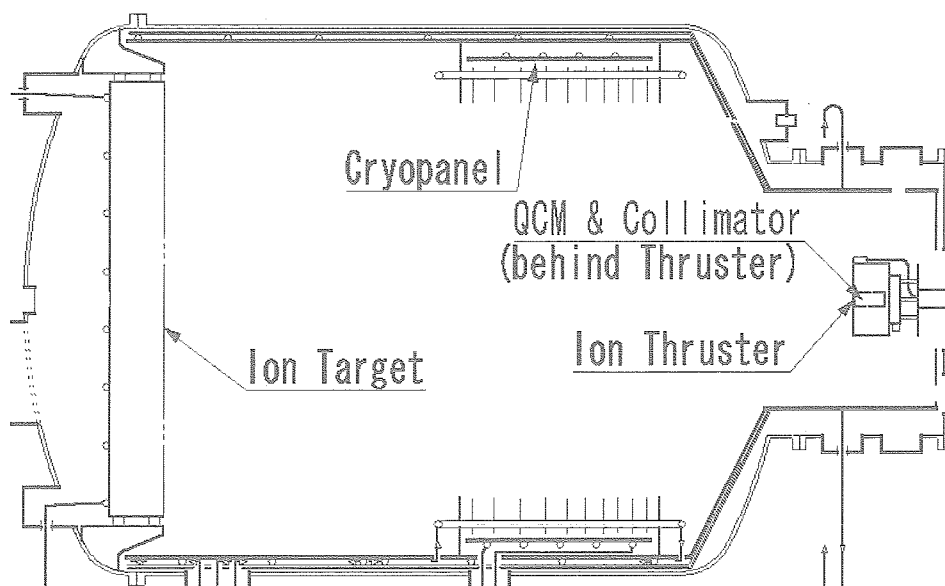


Fig. 4 Vacuum Tank

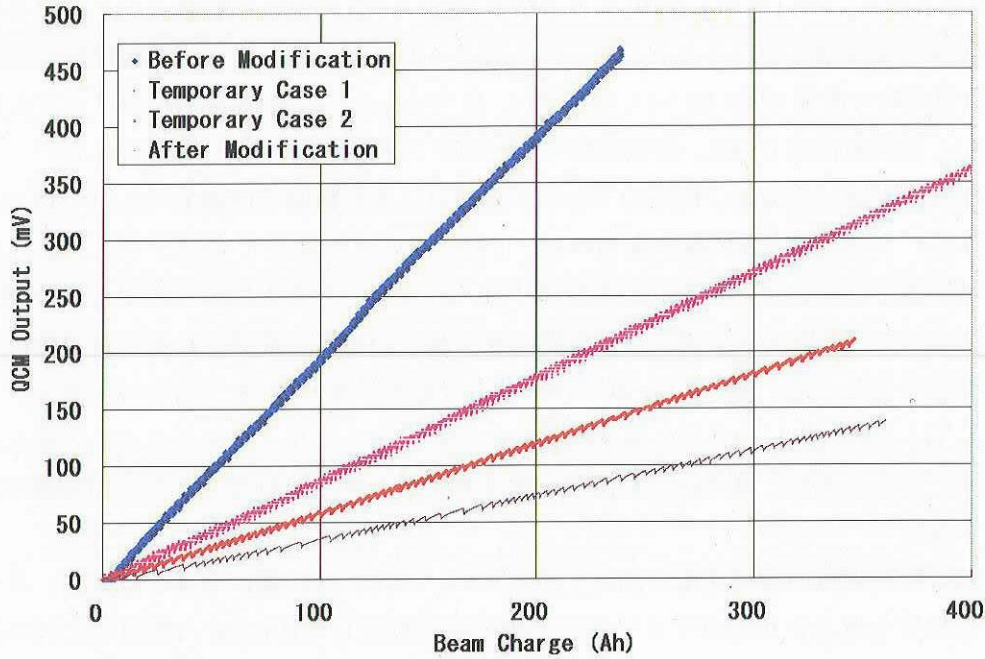


Fig. 5 Deposition Rates abeam Thruster

4. まとめ

平成 16 年度内に 200mN 専用イオン抽出電極の試験を実施できなかったが、電極の再成形後できるだけ速やかに試験を行なう。

主陰極については、これまでに解決すべき問題は全て解決した。残りは含浸陰極の寿命確認のみであり、単体試験装置の振動を低減させた後、速やかに連続運転を開始する。

中和器については、性能評価後に設計見直しを行ない、更なる性能向上を目指す。

実負荷接続時の電源出力のリップルは、十分低いレベルに抑えられることが判った。今後は実現可能な低コスト化と軽量化を目標とし、EM 製造に向けた設計仕様の検討を行なう。

ターゲットから飛来するスパッタ物質を質量比で 20%に低減させることができた。物質の主成分がチタンから炭素に置き換わったことによる影響は不明であるが、イオンスラスタの長時間運転において、電極の掃除をすることなく運転できる時間が大幅に延びることが期待できる。

これまでの研究成果を利用すれば、より小口径のイオンスラスタを極めて短時間に開発することが可能である。今後はあらゆる要求に迅速に対応すべく、口径の異なるイオンスラスタをシリーズ化していくことを検討するつもりである。