

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(Advanced Space Technology Research Group)

早川 幸男

Hayakawa Yukio

Abstract

This paper describes the status of the next-generation xenon-ion-engine research at ISTA (The Institute of Space Technology and Aeronautics). A thruster worked stably from 80 to 200 mN at a beam voltage of 1030 V. Its ion-extraction-system vibration testing was conducted independently and the ion-extraction system was strengthened after that. Graphite-orificed hollow cathodes are under study and have been operated at an emission current of 20 A. The power consumption, specific impulse and thruster efficiency at a thrust of 150 mN were about 3.4kW, 3,500s, and 77%. A laboratory-model power processor was manufactured and tested. Certain components of the test facility were renewed.

1. はじめに

本研究は、大型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。

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(図 1)の主な仕様を表 1 と 2 に示す。技術試験衛星 III 型(ETS-III)のイオンエンジンは完全な実験機器であり、寿命については特に考慮されていない。これから技術試験衛星 VI 型(ETS-VI)用にかけては、推進剤が変更されると共に推力が 12.5 倍に増強され、さらに寿命も設定されるという大きな進歩が見られる。この後 ETS-VIII 用では寿命が大幅に延長されているが、性能を犠牲にしており、実質的に大きな進歩はない。次世代イオンエンジンの仕様は、現時点で世界的に見れば当たり前のものである。我が国は世界に先駆けてイオンエンジンをバス機器として ETS-VI に搭載したにもかかわらず、その打ち上げから 10 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。

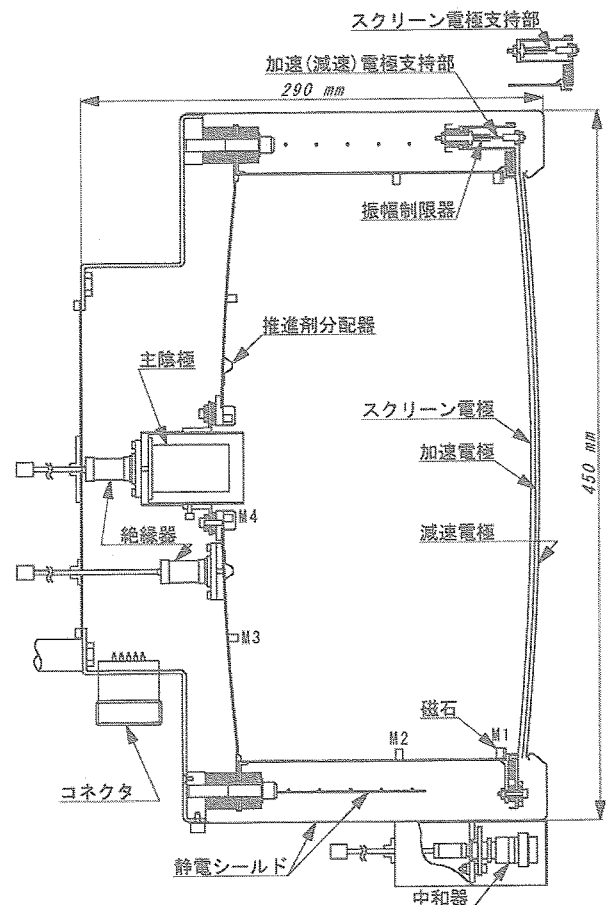


図 1 35cm 次世代型イオンエンジン

イオンエンジンは今後の静止衛星等には不可欠であることから、我が国が今後の衛星の製造について国際競争力を確保するためには、宇宙航空研究開発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必要がある。

表1 宇宙航空研究開発機構(ISASを除く)におけるイオンエンジン

衛星名	推力、mN	寿命、h	推進剤	磁場形状	打ち上げ年
ETS-III	2	数百	水銀	カウフマン型(発散型)	1982
ETS-VI	25	6,500	キセノン	カウフマン型(発散型)	1994
COMETS	25	6,500	キセノン	カウフマン型(発散型)	1998
ETS-VIII	25	16,000	キセノン	カウフマン型(発散型)	2005 予定
(次世代)	150(200)	30,000(3,000)	キセノン	カスプ型	

表2 参考：宇宙航空研究開発機構(ISAS)におけるイオンエンジン

探査機名	推力、mN	寿命、h	推進剤	特記事項	打ち上げ年
はやぶさ	8	18,000	キセノン	ECR 放電型	2003

ETS-IIIのイオンエンジン開発において、旧航空宇宙技術研究所と旧電子技術総合研究所は主要な役割を果たしたが、ETS-VI用の開発においては、新型イオンエンジンの研究開始が遅れたこともあり、メーカーの支援をするに留まった。ETS-VI用 から ETS-VIII用までの開発過程から、スラスタに関しては開発を開始する前に十分な研究をしておかないと、掛かったコストの割には良い製品ができないということが明らかになった。この反省を踏まえ、旧航空宇宙技術研究所と旧宇宙開発事業団(いずれも現技術研究本部)は(株)東芝と協力しながら、次世代イオンエンジンの研究を先行的に実施してきた。平成13年度以降は(株)東芝が脱落したものの、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。

2. 研究の概要

平成15年度は以下の項目について研究を行った。

(1) 推力変更試験

この時点における設計推力150mNのイオンスラスタが、どの程度までの大推力を発生できるかを試みた。推力200mN、寿命3,000h、消費電力5kW以下という準天頂衛星用イオンエンジンの要求仕様を満たせるかどうかを見極めることが主な目的であった。合わせて低推力領域でのデータも取得した。

(2) 電極振動試験

柔軟支持方式を採用しているイオン抽出電極の単独振動試験を実施した。通常、打ち上げ時の耐振動性についてはEM設計時に考慮すれば良いと考えられるが、イオン抽出電極の場合、その支持部の柔軟性がイオン抽出機能に大きく影響するので、EM設計時に大きく設計変更するわけにはいかない。そこで早い段階で機能と耐振動性の両立の可能性を確認する必要があった。

かつて数値構造解析を試みたこともあるが、一部モデル化が困難な部分があり、破壊強度を定量的に予測することは困難であった。そこで振動試験により求めた破壊強度を基にして、新たな設計を行う

という手法を用いることにした。

現時点では電極の材質はモリブデンであるが、加速電極と減速電極については将来より軽量で高強度のチタンに変更することもあり得る。これにより電極支持部への強度要求が緩和される。但し現時点ではチタン製電極の製造技術確立には至っていない。このため次のような方針を採っている。

1. チタン製電極に対応する支持部を完成させる。
2. 1の過程で得た知見を基に、モリブデン製電極に対応する支持部を完成させる。

支持部を含めた電極として、イオン抽出機能を有していることが必須であり、振動試験と前後してイオン抽出試験を実施した。

電極が満たすべき耐振動性として、COMETSのQTレベルを採用した。これについて表3と4にまとめた。この基準は現在においては厳しすぎるようなので、将来は見直されるものと考えている。電極はほぼ回転対称なので、回転軸方向(面外)とこれに垂直の方向(面内)について加振を行った。

表3 正弦波加速度レベル

周波数, Hz	加速度, m/s^2	掃引速度	備考
5-100	2.452×10^2	2.0 oct/min	25 G

表4 ランダム波加速度レベル

周波数, Hz	加速度, m/s^2	R.M.S.
20-70	+6 dB/oct	19.7 G
70-270	$48.02 (m^2/s^4/Hz) (0.5G^2/Hz)$	
270-400	-6 dB/oct	
400-1000	$22.09 (m^2/s^4/Hz) (0.5G^2/Hz)$	
1000-2000	-8 dB/oct	

(3) 中空陰極

長寿命化のため、従来は摩耗していた金属部品をグラファイトに置き換えた中空陰極を製作し、単体試験を実施した。これまでの数千時間の試験の結果、従来型でも30,000hは持つと予測されたが、摩耗による性能変化の影響の可能性を排除するために材質変更を行った。

(4) 電源装置

搭載型電源とほぼ同じ構成および回路方式の電源をスラスタと組み合わせて試験を実施した。これまではスラスタ中心の研究であり、イオンエンジンサブシステムとしての研究に着手したということである。入力電圧はDC100Vとした。

(5) 試験設備

老朽化と保守部品の入手不能により、正常動作が困難であったヘリウム冷凍機とフロン冷凍機の交換を実施した。これまでは各機器の老朽化のために、試験設備が突然停止する問題が生じていた。

3. 成果の概要

(1) 推力変更試験

試験結果を表5にまとめた。ビーム電圧と加速電極電圧はそれぞれ1,000Vと200Vの固定で、最高で4Aのビーム電流が得られている。このときの推力が210mNとなっているが、ビーム広がりや二価イオンの補正をしていないので、実際には5%程度下がり、200mN程度となる。推力と関連する推進器効率と比推力も同様である。推進剤利用効率は放電室流量についてのみを表しているが、比推力は全流量で算出している。ビーム電圧は外国の同クラスのスラスタと比べて最低であり、イオン抽出電極の能力の高さを意味している。例えばビーム電圧を1,210Vまで上げてても少しも高いとは言えないが、これだけで推力を10%増加させることができる。比推力についてもほぼ同様であり、推進器効率も上昇する。消費電力は5kWをかなり下回っており、これらの結果から、今後の開発による設計変更により多少性能が低下したとしても、推力200mNと消費電力5kW以下の要件は十分に満たされると考えられる。ただしこの試験結果だけでは、推力200mNにおける寿命については不明であることを断っておく。

推力を80mNまで低下させる場合においても、推進器効率の低下は顕著ではない。従ってこのスラスタ一台で、推力80mNから200mNまでの用途に対応できる。スラスタは口径が大きいほど製造が困難になるので、この研究で得た技術を利用することにより、実際には推力80mN以下のスラスタを製造することも容易である。

表5 35cmイオンスラスタの性能

ビーム電流 A	ビーム電圧 V	加速電極電流 mA	加速電極電圧 V	放電電流 A	放電電圧 V	真空槽圧力 mPa
1.543	1005	6.3	-200	8.27	29.2	0.26
2.880	1008	13.6	-200	13.94	30.0	0.46
3.452	1006	17.4	-200	16.39	30.3	0.56
3.842	1009	20.5	-200	16.69	32.3	0.63
4.004	1009	22.2	-200	17.3	32.6	0.67

推力 mN	イオン生成コスト W/A	推進剤利用効率 %	消費電力 W	推進器効率 %	比推力 s
80.7	132	90.2	1825	74.5	3440
150.9	117	90.0	3355	76.7	3480
180.7	115	90.1	4003	77.2	3490
201.4	110	90.0	4450	77.5	3490
209.9	110	90.2	4639	77.7	3500

尚、放電電圧が30Vになるように流量分配を変更したが、ビーム電流が大きいときには放電電圧30Vでは放電が不安定となったので、電圧を上げた。放電電圧の上昇は寿命の点で望ましくないなので、対策を講じる予定である。

(2) 電極振動試験

チタン製電極について、以下の結果を得た。

- 面内面外共にランダム波 1/1 加振レベル正常終了
- 面外正弦波 1/1 加振レベルで正常終了
- 面内正弦波 1/2 加振レベルで正常終了、3/4 加振レベルで破損

この結果を基に、モリブデン電極製で振動試験に耐えられるように強化した支持部を製作し、十分なイオン抽出機能を有することを確認した。

(3) 中空陰極

単体試験を実施し、放出電流 20A における運転で、電極に摩耗が発生しないことを確認した。オリフィス板の材質変更直後に発生した過冷却により点火までのヒータ加熱時間が増大する問題は、その後の対策が功を奏し、ほぼ解決した。しかし同時期に発生したもう一つの問題については、さらに処置中である。現時点で問題解決の目途が立っているが、工業所有権の観点から、ここで詳細に述べることは差し控える。

(4) 電源装置

スラストとの組み合わせ試験の結果を表 6 に示す。当初の目標であった推力 150mN での運転が十分に可能であることを確認した。効率については最新の電源と比べるとやや低いだが、この電源が設計されたのが 1997～98 年であることを考慮すると、著しく低いとまでは言えない。さらに従来はソフトスタートを使用しなければ不可能と考えられていた、高圧電圧印加が、この電源によりソフトスタート無しで可能であることが確認できた。これにより高圧電圧の手順が簡素化される。但しこれが可能なのは推力がおおよそ 180mN までで、これ以上の場合には電極の熱変形の応答時間の関係で、やはりソフトスタートが必要となる。

組み合わせ試験により、問題が二つ明らかになった。一つはノイズレベルが非常に高いことであり、EMI の発生はもちろん、計測系が正常に動かない可能性もある。もう一つは、ヒータが切れやすくなったことであり、ヒータ電源の立ち上がりが急すぎるのかも知れない。

高電圧絶縁破壊を多数経験したが、全く不具合は生じなかった。構成、回路方式、実装のいずれにおいても電氣的に十分な強度を有していると考えられる。

表 6 電源効率

ビーム電流 A	推力 mN	電源出力端電力 W	電源効率 %
2.869	152.0	3393	88.1
3.085	161.9	3606	88.1

(5) 試験設備

これまで老朽化が激しく更新が必要であった機器の内、最後に残されたヘリウム冷凍機とフロン冷凍機を更新したことにより、当面は安定して試験をできるようになった。但しフロン冷凍機は、以前のものと全く互換性がないものであり、ときどき問題が発生する。完全に問題が解決するまでには時間が掛かりそうである。

4. まとめ

スラスタは性能的に申し分なく、準天頂衛星用イオンエンジンの要求仕様も裕に満たしていることが明らかになった。これ以上の性能向上のための努力は無意味であり、今後はイオン抽出電極のエージング時間短縮を始めとした製造コスト削減や、寿命と信頼性の確保に力を置くことが重要であると考える。

最近ではランダム波加振試験のみで打ち上げている例もあるようである。だとすれば、チタン製電極のレベルで、電極支持部は完成していると言える。そうでない場合においても、最新の電極支持部はモリブデン電極を支持できるように設計されており、あとは確認のための振動試験を残すのみである。他方でチタン製電極の製造技術確立も目指す。

中空陰極は性能的に申し分なく、残る問題の解決に努力する。また単体試験とスラスタに組み込んだ場合の特性の差異を小さくするため、従来平板であった陽極を、磁石を設置した放電室に代えて試験を行う。先の問題が解決すれば、そのまま長時間試験に入る。

電源装置は性能的まずまずであり、その電氣的な強度は満足のできるものであった。今後はノイズレベルの低減を優先し、その後 EM 製造に向けた熱設計や軽量化の実施を目指す。

試験設備の老朽化の問題には一区切りが付いた。スラスタの性能試験に限れば、次世代イオンエンジンの運転は十分可能であるが、耐久試験においてはターゲットからのスパッタ物質を低減させることが必要で、このための研究を実施する。

全体的に、研究レベルでの問題の殆どは既に出尽くし、いずれも解決済みか解決の目途が立っているものばかりである。残念ながら具体的な開発の予定はないが、今は開発開始の好機と言える。