P3-087 SOLAR-C極域観測ミッション案向け イオンエンジンの開発・検討状況

西山和孝,細田聡史,小泉宏之,國中均 (ISAS•JSPEC/JAXA)





中和器単体試験用ガラスチャンバー2式 と中和器駆動装置

評価中の2式の中和器 2箇所の青白い光がキセノンプラズマ



- キセノンを用いた高比推力電気推進
- 深宇宙探査を主たるターゲットとし、静止 衛星向けのものに比べ、より長寿命であ ることを優先課題として研究開発
- 独自のプラズマ生成方式により放電室を 長寿命化
- プラズマ生成用電源として衛星搭載用の C帯進行波管増幅器を流用。実績多数の 10万時間の長寿命・高信頼電源を開発 要素なしで利用可能。
- 世界初のカーボン・カーボン複合材製の グリッド採用(ビーム光学系)による長寿命 化を実現。µ10の地上試験では2万時間 まで動作確認。
- 他方式イオンエンジンの半分以下のビーム電流密度。推力のわりに大口径になる反面、原理的には3万時間以上の長寿命と大きなトータルインパルスが期待できる。





「はやぶさ」搭載の10cmイオンエンジン µ10 (ミュー・テン)

「はやぶさ」のµ10イオンエンジン

- 小型イオンエンジンのクラスター構成 8 mN × 3(+1)台 1.1 kW, 24 mN, 59 kg
- スロットリング実績
 - 太陽距離 0.86~1.7 AU
 - 発生推力 6.1~24.5 mN
 - 消費電力 320~1150 W

Ter!	



	累積時 間	点火回 数
スラスタA	7	14
中和器A	3244	28
スラスタB	12809	428
スラスタC	11989	236
スラスタD	14830	1805
動力航行	25590	420
全スラスタ 合計	39637	

各国のイオンエンジンの飛翔実績

Organization or Country	USA	USA	NASA	NASA	ESA	ESA	ESA	JAXA	JAXA
Thruster Name	XIPS 13	XIPS 25	NSTAR	NSTAR	T5	RIT10	T5		μ10
Spacecraft	Boeing 601HP Fleet	Boeing 702 Fleet	DS1	DAWN	ARTEMIS	ARTEMIS	GOCE	ETS-8	Hayabusa
Manufacturer (Latest Name)	L-3 ETI	L-3 ETI	L-3 ETI	L-3 ETI	QinetiQ	EADS Astrium	QinetiQ	Mitsubishi Electric	NEC
lon Source Discharge	DC (Ring Cusp)	DC (Ring Cusp)	DC (Ring Cusp)	DC (Ring Cusp)	DC (Kaufman)	RF	DC (Kaufman)	DC (Kaufman)	ECR
Neutralizer Discharge	Hollow Cathode (HC)	HC	HC	HC	HC	HC	HC	HC	ECR
Pow er per Thruster (kW)	0.45	5 2.3, 4.5	0.5 ~ 2.5	0.5 ~ 2.5	0.54	0.57	0.055 ~ 0.585	0.65	0.35
Thrust per Thruster (mN)	18	3 79, 165	19 ~ 93	19 ~ 93	18	15	5 1~20	20	4.5 ~ 8
Specific Impulse (s)	2350	3400, 3500	2000 ~ 3100	2000 ~ 3100	3500	3400	500 ~ 3500	2200	3000
Number of Spacecraft	15	5 13	1	1	1	1	1	1	1
Number of Thrusters in Space	60) 52	1	3	2	2	2 2	4	4
Accumulated Operational Hours	120500	60000	16265	11400	700	7500	5000	6400	39009
Max. Operational Hours Per Thruster			16265	7632	521	5800	5000	3700	14830
Powered Flight (Ion Drive) Hours			16265	11400				6400	25590
Data As Of	2008	3 2008	2001	2010	2003	2003	3 2010	2009	2010/6/13



XIPS 13

XIPS 25

NSTAR



T5 and RIT-10 on ARTEMIS



JAXA/MELCO





μ10は世界最小規模、 μ20は中規模イオンエンジン

µ10 on Hayabusa

Microwave Discharge Ion Thrusters $\mu 10$ and $\mu 20$



Grid assemblies (Ion optics) for µ10 (855 apertures) and µ20 (3087 apertures)



u20 u20 u20 (Initial (Life Test of (High Isp u10 (Havabusa Development Laboratory Option for Model) Target) Model) Solar-C) Beam Diameter (cm) 20 20 20 10 Thrust (mN) 8 27 30 40 3000 2800 Specific Impulse (s) 2800 3800 Beam Current (mA) 500 540 140 540 Beam Voltage (V) 1200 1300 2300 1500 Accelerator Voltage (V) -350 -350 -200 -350 Decelerator Voltage (V) -30 -30 -30 -30 Microwave Power (W) 32 100 100 100 System Power (W) 350 900 1050 1700 Thrust/Power (mN/kW) 23 30 28 25 Propellant Utilization (%) 70 85 80 70 Required Thruster Life (h) 21000 13000 Ground Life Test (h) 18000, 20000 10300 (cont.) Flight Achievement (h-units) ~40000 Under Development Start of Development 1989 2000 Launch 2003 TRI 8 5

- µ10からµ20への主な変更点
 - イオン源のグリッド、放電室を大口径化
 - スクリーングリッド薄肉化、アクセルグリッド孔縮小 ٠
 - 磁場、マイクロ波投入方法、ガス導入方法を独自に最適化
 - イオン源用、中和器用のマイクロ波電力がいずれも3倍以上で あり、それに対応したマイクロ波コンポーネント(アンテナ、ケー ブル、DCブロック)を選定あるいは開発
 - 大電力化にともない、マイクロ波増幅器はイオン源と中和器と で独立化し、マイクロ波分配用のカプラーボックスは撤廃
 - 中和器は大電流用に磁場や放電室形状をチューニング

- Solar-C向けのu20最適化検討 ٠
 - スクリーン電圧を1300Vから2300Vに変更
 - これにより比推力増大によるキセノン搭載量減少、一台あたり の最大推力増大を実現
 - 30mN×4(+2)台を40mN×3(+1)台に変更
 - エンジン台数・質量減少とキセノン搭載量減少は、薄膜太陽電 ٠ 池の質量増分を上回り、システム全体としては有利に
 - エンジンシステム+キセノン質量 214 + 278kg ٠
 - エンジンシステム電力 5650W

Laboratory Model of $\mu 20$











Ion Source and Neutralizer

Front View

Side View

Life Test of the μ 20 Ion Source

- Grid life evaluation is the primary objective of the first long duration test.
- Other components (plasma generator, neutralizer, microwave feeders) have been and will be added and improved step by step.



Aperture Size Distributions Inspected at 5160h: Accel. Grid (Left) and Decel. Grid (Right)





試作モデルにおける各種 評価(温度サイクル4000回、 RF損失評価、5kV耐圧試 験、エンジン組込作動、 等・・・)で蓄積したノウハウを 元に、現在µ10用高性能モデ ルとµ20用試作モデルを作 成。

<u>µ10用高性能モデル</u>

 ・低RF損失(>5%)
 ・各種試験(放射線、振動、 熱サイクル、高電圧)を実施
 ・国産部品を積極利用

<u>µ20用試作モデル</u>

・100W以上に耐える熱設計
(耐熱部品への置換、排熱 性能の向上)
・耐久性は確保したがRF損 失が10%あり、要改善



イオン源開発状況

- C/C複合材グリッドの耐久性確認を主目的とした単体耐久試験で10,000時間到 達(2010/10)
- 大電力対応マイクロ波部品選定・評価
 - アンテナ 購入品。耐久性ありと判断。
 最重要の特殊部品であるが、互換性の高い 複数製品の調達先を国内外に確保できた。
 - フレキシブルケーブル 購入品。耐久性ありと判断。
 - セミリジッドケーブル 購入品。耐久性ありと判断。
 - DCブロック 自主開発品。耐久性ありと判断。 今年度中にさらなる挿入損失低減を目指す。
- グリッド分解検査の後、高比推力版(2300V)へグリッド間隔を調整し1,000時間程度の動作確認予定。グリッド耐久性は東京都立産業技術高等専門学校の中野正勝先生の協力により数値計算で予測済み。

アクセルグリッド電位別の電子逆流が 発生するまでの時間一覧表 350V以上の負電位を印加しておけば 32000時間以上動作可能という結論 目標寿命20000時間に対して十分

	<i>ø</i> _a =-300V	<i>ø</i> _a =-350V	<i>ø</i> _a =-400V	<i>¢</i> _a =-450V
高電流密度部 3.0mA/cm² (<i>d</i> _s =1.3 mm)	14,000 hrs	32,000 hrs	>40,000 hrs	>40,000 hrs
中電流密度部 1.4mA/cm² (<i>d_s</i> =1.0 mm)	> 40,000 hrs	> 40,000 hrs	>40,000 hrs	>40,000hrs
低電流密度部 0.5mA/cm² (<i>d_s=</i> 0.9 mm)	> 40,000 hrs	>40,000 hrs	>40,000 hrs	>40,000 hrs
電子逆流時間 最小値	<u>14,000 hrs</u>	<u>32,000 hrs</u>	<u>>40,000 hrs</u>	<u>>40,000 hrs</u>

中和器開発状況

- はやぶさ不具合対応実施中。地上耐久試験に含まれないマイクロ波供給系が要因とも考えられるが、その対策と同時に中和器本体の見直しを検討。
- はやぶさµ10PM中和器(20,000h経過後)の分解と分析
 - スパッタリング堆積物が剥離したフレークを多数発見
 - 剥離・移動後のフレークが原因となる故障モードに絞って再現実験を実施中
 - 特にマイクロ波導入部の汚染による劣化に注目
- µ20中和器(2,450h経過後)の分解と分析
 - アンテナが著しく損耗し、放電室出口がその堆積物で閉塞し動作不能に。
 - 配線ミスで30V余計にイオン衝撃をアンテナに対して加えたことが判明。これは10倍近い加速(時間短縮)試験に相当。配線修正と「はやぶさ2」のµ10向け対応策の確定版を反映した上で再試験予定。
- 改善案
 - プラズマ接触面各部に耐スパッタ性のよい材料(最良のケースでスパッタリン グ損耗を1/10以下に改善)を採用し、堆積物・フレークの発生を最小化
 - 磁場増強による動作電圧の低減とそれによるスパッタリング抑制
 - 汚染の影響を受けないマイクロ波導入構造の採用(年度内に試作予定)
- 中和器単体寿命試験 最大4式を同時並行評価。来年度までこの試験が中心。

メーカーによるサブシステム検討状況

- 以下のメーカー検討を実施済み
 - µ20イオンエンジン6台構成のシステム検討(2008年度)
 - µ20イオンエンジン系の軽量化・発熱量低減の検討(2009年度)
 - µ20イオンエンジン推進剤供給系検討(2009年度)
- 以下のメーカー検討を実施中
 - µ20イオンエンジン用高圧電源の検討(2010年度)
- イオンエンジンサブシステムに関してはワーキンググループ段階でのメーカー検討は以上で完了。

まとめ

- かねてより開発中のµ20イオンエンジンをSolar-C極域観測ミッションに適用する 場合の各種システム検討を行ってきた。
- イオン源に関しては10000時間の長時間試験の実績から耐久性に問題はないと 考える。DCブロックの挿入損失低減と、高比推力化のためのビーム電圧2300V でのイオン源動作確認が残された課題である。
- 中和器に関しては極力µ10とµ20とで中和器の設計は共通化することを目指している。現在取り組んでいる「はやぶさ2」向けの改善策の確定を待ってから、µ20向けの作動条件での耐久性確認試験を単体で実施する予定である。
- イオン源・中和器フルセットでの実時間耐久試験は年間1000万円規模のキセノン 消費であり、所要時間や試験装置のリソースを考えても現実的ではない。耐久性 を確認する項目を絞った上で、キセノン消費の少ない中和器単体の試験や、ス パッタリングしやすい材料を用いた試験時間短縮、数値シミュレーションの併用で 寿命認定の効率化を図る。