

高比推力マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10\text{HIsp}$ の グリッド設計に関する研究

Study on Grid Design for High Specific Impulse Microwave Discharge Ion Thruster $\mu 10\text{HIsp}$

○清水 裕介(東大・院)・西山 和孝(宇宙航空研究開発機構)
中野 正勝(東京都立産業技術高等専門学校)・月崎 竜童・國中 均(宇宙航空研究開発機構)

○Yusuke Shimizu (The University of Tokyo)・Kazutaka Nishiyama (JAXA)
Masakatsu Nakano (Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology)・Ryudo Tsukizaki・Hitoshi Kuninaka
(JAXA)

Abstract (概要)

This paper presents the new grid design of the $\mu 10\text{HIsp}$ microwave discharge ion thruster, which is currently under development for a Japanese Trojans asteroid probe. A software “JIEDI” simulated the performance under the condition that $\mu 10$ grid was applied to $\mu 10\text{HIsp}$ in order to prevent electron backstreaming from the neutralizer and to improve the ion transparency, which were problems for the existing $\mu 10\text{HIsp}$ grid. The result shows that the larger tapered accelerator grid holes at low ion density position make it possible to adapt the $\mu 10$ grid to $\mu 10\text{HIsp}$.

記号の説明

- ε_0 : 真空の誘電率 [$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^4\text{A}^2$]
- η_u : 推進剤利用効率
- g : 重力加速度 [m/s^2]
- e : 電荷素量 [C]
- V_s : スクリーン電圧 [V]
- m_i : イオン質量 [kg]
- I_i : グリッド部に移送されてきたイオン電流 [A]
- I_s : スクリーングリッドから引き出されたイオン電流 [A]
- D_s : スクリーングリッド孔径 [mm]
- t_s : スクリーングリッド厚さ [mm]
- l_g : スクリーン-アクセルグリッド間隔 [mm]
- V_T : スクリーン-アクセルグリッド間電圧 [mm]

1. 緒言

マイクロ波放電式イオンエンジンは、放電室内でマイクロ波放電によりキセノンを電離し、キセノンイオンを高電圧が印加された加速グリッドを用いて、静電的に噴射して推力を発生する電気推進機である。放電用ホローカソードを必要としないため、システムがシンプルであり、ヒータ断線や酸化による劣化の心配がないため耐久性や取扱いに優れている。一般的に、イオンエンジンは静止衛星の南北制御だけでなく、探査機の惑星間航行の主推進システムとして用いられてい

る。

JAXA では「はやぶさ」で開発されたマイクロ波イオンエンジン $\mu 10$ の宇宙実績を活かし、将来の木星トロヤ群小惑星探査に向けた、ソーラー電力セイルと組み合わせた高比推力イオンエンジン $\mu 10\text{HIsp}$ を開発中である¹⁾。比推力 I_{sp} は以下のように表される。

$$I_{sp} = \frac{\eta_u}{g} \sqrt{\frac{2eV_s}{m_i}}$$

この式から、 V_s を大きくすることで高比推力化を目指している。

$\mu 10\text{HIsp}$ 開発初期に比べて現在では、放電室のイオン生成性能が向上していること²⁾と、加速電圧の設定値が当時の 15 kV から 7.5 kV に変更され、比推力 7,000 秒(中和器性能込)、単体推力 25mN が目標性能となっていることから、グリッドの再設計が必須となっている。

本研究では、目標性能を満たし、かつ、スクリーン電流に対するアクセル電流を $\mu 10\text{EM}$ のグリッド全体の実際値³⁾と同程度の約 0.5%に抑制するような、グリッドの新設計を確立することを最終目標とする。

2. グリッド設計

2.1 イオンエンジングリッド イオンエンジンのグリッドは 2 枚または 3 枚で構成される。1 枚目のスクリーン (以

下, Sc) グリッドに正電圧, 2 枚目のアクセラ (以下, Ac) グリッドに負電圧が印加することで, イオンを引出・加速する機構になっており, 3 枚目のディセル (以下, De) グリッドは, 下流で生成された低速イオンが Ac グリッドに衝突するのを防いだり, Ac グリッドとの空間電位勾配によって中和器からの電子の逆流を防ぐ役割を担っている⁴⁾.

2.2 グリッド設計における要点 グリッドを最適に設計する際に考慮すべきポイントを以下に述べる.

(i)イオンビームの最適化

Sc グリッド上流に形成されるイオンシース面の形状によって, イオンビームの軌道が変化する. シース面が上流側に張り出すとイオンビームが過度に収束し, グリッド孔の中心軸上で交差して Ac グリッドに衝突する. 逆に, シース面が下流側に張り出すとイオンビームが発散し, Ac グリッドに衝突する. Ac グリッドへのイオンビームの衝突は, グリッドの損耗によるエンジン寿命の低下や, イオンビームの損失による推力の低下を引き起こすため, 最適なビーム軌道, つまり最適なシース面形状になるようにグリッドを設計する必要がある.

(ii)中和電子逆流の抑制

Ac 孔での空間電位の上昇によって Ac-De グリッド間の空間電位勾配が十分でなくなると, 中和電子の逆流が生じてしまう. 中和電子の逆流は, 推力に寄与しない電流が流れることによる電力の無駄な消費や, 誤ったビーム電流値の計測を引き起こすため⁵⁾, Ac 孔での空間電位の上昇を抑えて中和電子が逆流しないようにグリッドを設計する必要がある.

(iii)イオン透過率

イオン透過率 (Ion Transparency) は, I_i に対する I_s の割合のことであり, 放電室の性能によって決まる I_i に対してどれぐらい推力に寄与させることができるかの指標である. シース面の形状が上流側に張り出すと, Sc グリッド孔の外側からイオンを引き出すことができ, イオン透過率の向上, すなわち推力の向上につながる.

(iv)シース厚さ

シース面が Sc グリッドから離れすぎると, つまりシースが厚くなりすぎると, プラズマが不安定になり定常作動が行えなくなるため, 厚くなりすぎないようにグリッドを設計する必要がある.

(v)推進剤利用効率

中性粒子の流出が多くなると推進剤利用効率が下がる. 中性粒子はイオンとは違って電界に対して不感であるため, 流出量は最も径が小さい Ac グリッドの孔径が支配的となる. したがって, 推進剤利用効率が必要以上に下がらないように, Ac グリッド孔径を設計する必要がある.

(vi)強度・耐久性

ロケット打ち上げ時の振動やイオンのスパッタリング, グリッド間絶縁破壊時の負荷等に対する強度および耐久性が損なわれないように, グリッドを設計する必要がある.

(i), (iii), (iv)はシースの形状に依存する. シース形状は

Sc-Ac グリッド間の最大空間電荷制限電流 I_{max} に対する, I_s の割合 (規格化パービアン) と相関関係にあり, I_s/I_{max} が小さい時シース面は上流側に張り出しており, 大きい時は平面状もしくは下流側に張り出している. I_{max} は次式で与えられる.

$$I_{max} = \frac{\pi D_s^2 4\epsilon_0}{4 \cdot 9} \sqrt{\frac{2e V_T^{1.5}}{m_i l_e^2}}$$

$$l_e = \sqrt{(t_s + l_g)^2 + \frac{D_s^2}{4}}$$

2.3 既存 μ 10HIsp グリッド 過去に林らによって μ 10HIsp の研究がなされた. 表 1 に μ 10 グリッドと当時設計された μ 10HIsp グリッドの諸元を示す. 当時は放電室の生成イオン密度が低かったことから, シースが厚くなってプラズマが不安定になることを避けるために, μ 10 に比べて Sc 孔径 D_s と Sc 厚さ t_s が大きくなっている (I_{max} を小さくしている). またグリッド開口率を同等にするために, 孔数が 1/5 程度になっている.

表 1 μ 10 および初期 μ 10HIsp グリッド諸元

	μ 10 (はやぶさ 2)	μ 10HIsp (初期設計)
孔径 (Sc / Ac / De) [mm]	3.05 / 1.5 / 2.8	7.0 / 4.2 / 6.0
厚さ (Sc / Ac / De) [mm]	0.8 / 1.0 / 1.0	1.5 / 3.0 / 1.5
孔数	855	163
加速電圧 [V]	1,500	15,000

当時の実験では, Sc 電圧 15 kV, Ac 電圧 -500 V において, Sc 電流 150mA, Ac 電流 20mA が計測された⁶⁾. この実験結果からは Ac グリッドへのイオンビームの衝突と, 中和電子の逆流が発生していたと考えられている⁷⁾. イオンビーム衝突に関しては, Ac グリッド孔にテーパ加工を施すことによって 20mA から 2mA 程度まで下げることによって成功しているが, 中和電子の逆流は Ac 電圧を -700 V まで落とし込まなければ抑制できない結果となっている⁸⁾. Ac 電圧を負に落とし込みすぎると, Sc-Ac グリッド間で生成される電荷交換イオン (CEX イオン) の Ac グリッドへの衝突エネルギーが大きくなり, グリッド損耗量が増加する. したがって, Ac 電圧を下げずに中和電子の逆流を防ぐ方法が望まれる. また, 中和電子の逆流がない状態での Sc 電流が約 127 mA と計測された⁸⁾ことから, 当時の μ 10 が達成していた約 140 mA の 90 % 程度の電流を引き出しており, イオン透過率が低下していたことがわかる.

以上から, 既存の HIsp グリッドは前節の(ii)と(iii)を十分に満たしていない. 現在のイオン生成能力が向上した放電室

と組み合わせて Sc 電圧を 7.5 kV に下げた場合、 I_s/I_{max} が大きくなりシース面が平面状になり、(iii) のイオン透過率がより悪化すると考えられるため、最適なグリッドを新たに設計する必要がある。

2.4 $\mu 10$ グリッドの応用 2.2 節の(ii) を改善するにあたり、グリッド孔径を小さくする方針を考える。これは、1 孔ごとのイオンビーム電流を小さくすることで、中和電子逆流の発生原因である Ac 孔での空間電位の上昇を抑えることを目的としている。また、2.2 節の(iii) を改善するにあたり、 t_s を小さくする方針を考える。これは、 I_{max} を小さくしてシース面を上流側に張り出させることを目的としており、実際に t_s を小さくすることでビーム電流値が増大したという報告もなされている⁹⁾。

本研究では、これら 2 つの方針を考慮して、 $\mu 10$ グリッドを用いた高比推力化を数値シミュレーションにより検討し、 $\mu 10\text{Hisp}$ グリッドの新設計案の確立を目的とする。

3. 計算条件および結果

3.1 計算ツール $\mu 10\text{Hisp}$ の加速部解析には「イオンエンジングリッド損耗解析ツール JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiative)」(以下、JIEDI ツール) を用いた。JIEDI ツールとは、多孔からなるイオンエンジン加速部の 1 孔に着目し、そこで引き起こされるグリッド損耗とイオン加速系の寿命評価を目的として開発されたツールである¹⁰⁾。 $\mu 10\text{Hisp}$ グリッドの設計当時は、この JIEDI ツールはまだ開発されておらず、*igx* と呼ばれる三次元イオンビーム解析コードを用いて設計が行われた⁶⁾。JIEDI ツールは特定の時刻における電位、イオンビームの流れ、グリッド電流、損耗率などを計算することができる。図 1 に JIEDI ツールのフローチャートを示す。

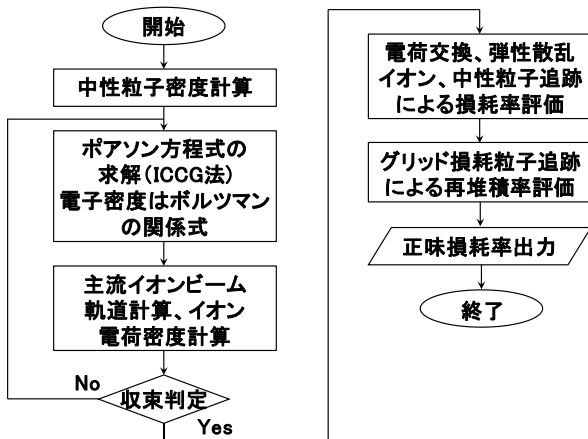


図 1 JIEDI ツールのフローチャート

3.2 計算条件① 図 2 に計算に使用するパラメータを示す。 $\mu 10$ グリッドに 7.5 kV の電圧を印加する設定になっている。Sc-Ac 間距離は、グリッド材であるカーボン複合材の絶縁破壊強度約 35 kV/cm¹¹⁾ を超えないように 3.0 mm (約 26 kV/cm) とした。

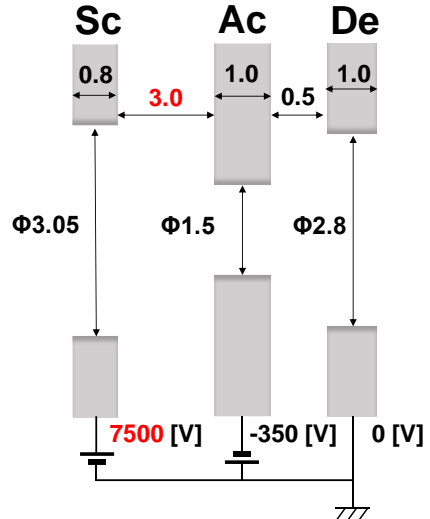


図 2 計算条件① (寸法単位は mm)

マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ には、径方向に図 3 のようなイオン密度分布が存在するため、同一グリッド上でも各孔で引き出される電流値が異なる。したがって今回は、図 3 の赤丸で示した最大電流値の孔と最小電流値の孔における計算を行った。

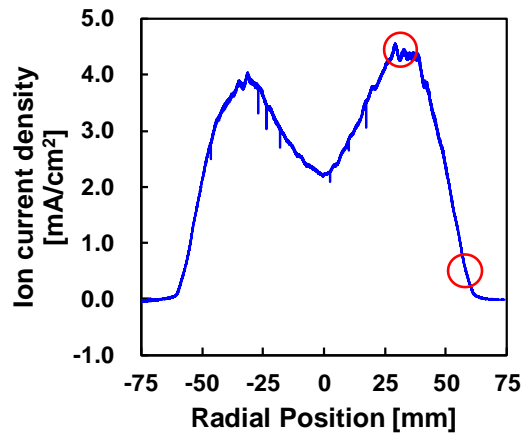


図 3 $\mu 10$ の下流 20 mm 地点でのイオン電流密度分布

3.3 イオンビーム軌道結果① 前節の計算条件①におけるイオンビーム軌道の様子を図 4 に示す。最大電流孔では Ac および De グリッドへの衝突が見られず、イオンビーム軌道が最適となっているが、最小電流孔では Ac グリッドへの衝突が見られ、イオンビーム軌道が最適ではない。

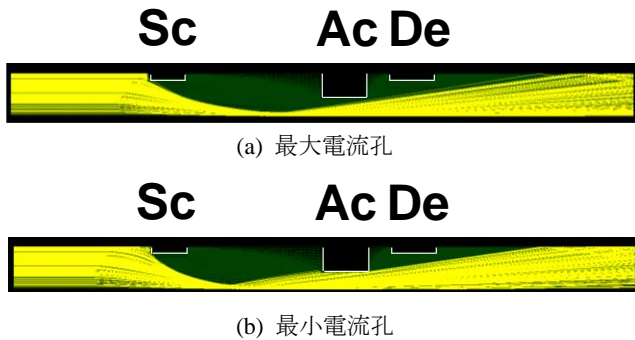


図4 各孔のイオンビーム軌道 (計算条件①)

3.4 計算条件② 最小電流孔のイオンビーム軌道が最適になるような設計を考える。単純に Ac 孔径を大きくしてイオンビームが当たらないようにすればよいが、2.2 節の(v)より、中性粒子の流出量が増えて推進剤利用効率が低下する恐れがある。そこで、図5のように Ac 孔径を少しだけ大きく (1.5 mm から 1.9 mm に) し、Ac・De 孔の下流側をテーパ形状に設定にすることでイオンビームの衝突を避ける設計にして、計算を行った。

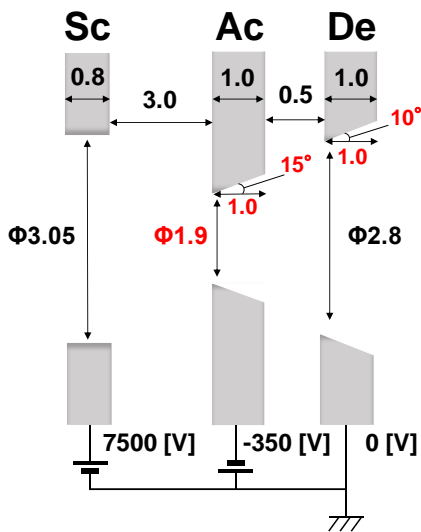


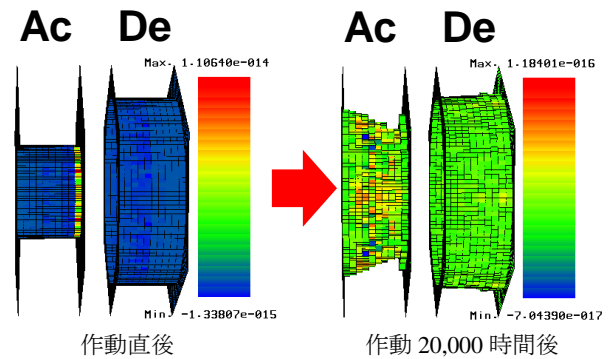
図5 計算条件② (寸法単位は mm)

3.5 イオンビーム軌道結果② 前節の計算条件②における最小電流孔でのイオンビーム軌道の様子を図6に示す。Ac および De グリッドに衝突せず、最適なイオンビーム軌道となった。

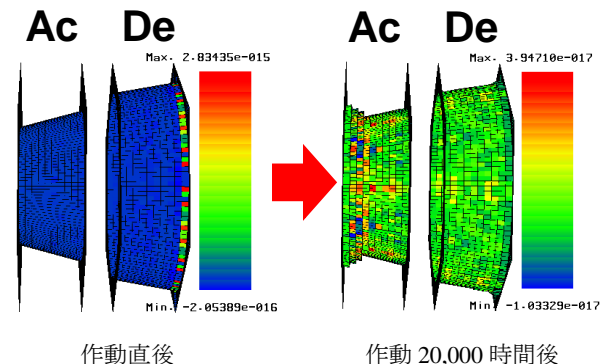


図6 最小電流孔のイオンビーム軌道 (計算条件②)

3.6 耐久性, 空間電位, イオン透過率結果 計算条件①の最大電流孔と計算条件②の最小電流孔における、作動直後および 20,000 時間後の Ac・De グリッド形状を図7に示す。どちらの孔も Ac 孔の上流側がよく損耗している。これは、Sc-Ac グリッド間距離が Ac-De グリッド間距離よりも大きいため、Sc-Ac グリッド間で生成される CEX イオンの量が多く、Ac の負電位に引き寄せられて上流面で衝突しやすいことが理由として考えられる。



(a) 最大電流孔 (計算条件①)



(b) 最小電流孔 (計算条件②)

図7 各孔の Ac・De グリッド形状変化

次に、孔軸上の最低空間電位の時間変化を図8に示す。最小電流孔は最大電流孔よりも Ac 孔径が大きいので、作動直後での最低電位は比較的高い。しかし、最大電流孔の方が空間電位の上昇率が大きくなっており、作動 20,000 時間後には約 -70 V まで上昇している。これは、CEX イオンの生成量が最大電流孔のほうが多いため、損耗が激しく、印加された負電圧の効果が孔軸上において急激に弱まったことが理由として考えられる。

最後に各孔のイオン透過率を表3に示す。比較対象として通常の $\mu 10$ (Sc 電圧 1.5 kV, Sc-Ac グリッド間距離 0.5 mm) での計算値も示している。各孔とも通常の $\mu 10$ とほぼ同等のイオン透過率を達成しており、グリッド全体としても通常の $\mu 10$ と同等のビーム電流が達成されると考えられる。

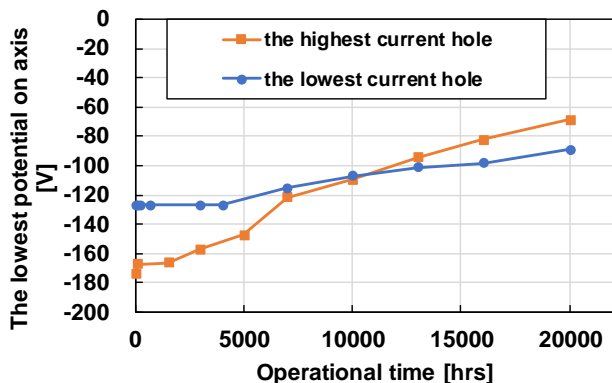


図8 各孔の最低空間電位の時間変化

4. 考察

前節の計算結果より、図9のようにイオン密度の低い外縁部と中心部（赤色部）のAc孔径を、計算条件②のように設計することで、全孔におけるイオンビームの軌道を最適にすることができると考えられる。また、孔軸上の最低空間電位の上昇が、作動20,000時間後においても最高で-70V程度までに抑えられていることから、-30V程度の中和電子は逆流しないと考えられる。シース厚さに関しては、イオン透過率が通常の $\mu 10$ と同等であることからシース形状も同様であると思われ、安定したプラズマ状態になると考えられる。

以上から、 $\mu 10$ のScグリッドと、図9のようなAcグリッドおよびテーパ加工を施したDeグリッドを用いることで、 $\mu 10\text{HIsp}$ でも2.2節の(i)~(iv)を十分満たすことができると考えられる。一方で、今回の計算では推進剤利用率を自ら設定していることと、7.5kV程度の絶縁破壊を考慮していないことから、(v)および(vi)は今後の実験で確認する必要がある。

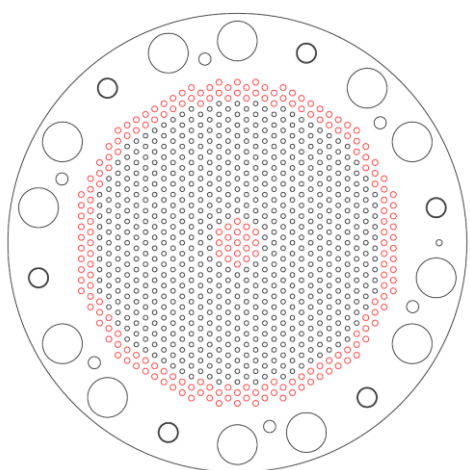


図9 HIsp用Acグリッド設計案

表3 イオン透過率の比較

	$\mu 10$ (はやぶさ2)	計算条件① および②
最大電流孔	81.7%	81.5%
最小電流孔	92.7%	92.9%

5. 結言

本研究から以下の結論が得られた。

- 中和電子逆流の抑制およびイオン透過率の向上を目的として、 $\mu 10$ グリッドを $\mu 10\text{HIsp}$ に適用させた数値シミュレーションを行った。
- イオン密度が低い外縁部と中心部のアクセラグリッド孔径を大きくし、テーパ加工を施すことで、 $\mu 10$ グリッドを用いた高比推力化が可能であることが分かった。
- 実機を製作して性能評価実験を行い、シミュレーション結果と比較する必要がある。

参考文献

- R. Funase, J. Matsumoto, O. Mori and H. Yano, "Conceptual Study on a Jovian Trojan Asteroid Sample Return Mission," J. Space Technol. Sci., Vol.27, No.1, 2013, pp.1-19.
- K. Nishiyama, S. Hosoda, M. Usui, R. Tsukizaki, H. Hayashi, Y. Shimizu and H. Kuninaka, "Feasibility Study on Performance Enhancement Options for the ECR Ion Thruster $\mu 10$," Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol. 7, No. ists26, 2009, pp.Pb_113-Pb_118.
- I. Funaki, H. Kuninaka, K. Toki, Y. Shimizu and K. Nishiyama, "Verification Tests of Carbon-Carbon Composite Grids for Microwave Discharge Ion Thruster," Journal of Propulsion and Power, Vol.18, No.1, 2002, pp.169-175.
- 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和孝, "イオンエンジンによる動力航行, コロナ社, 東京, 2006.
- J. D. Williams, D. M. Goebel and P. J. Wilbur, "ANALYTICAL MODEL OF ELECTRON BACKSTREAMING FOR ION THRUSTERS," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-2003-4560, Huntsville, Alabama, July, 2003.
- 林寛, 碓井美由紀, 中山宜典, 清水幸夫, 西山和孝, 國中均, "マイクロ波放電式イオンエンジンの高比推力化に関する基礎研究," 日本航空宇宙学会論文集, Vol.55, No.647, 2007, pp.604-611.
- 清水裕介, 中野正勝, 西山和孝, 月崎竜童, 國中均, "JIEDI ツールを用いた高比推力イオンエンジン「 $\mu 10\text{HIsp}$ 」の数値シミュレーション," 第61回宇宙科学技術連合講演会, 2E16, 新潟, 2017年10月.
- H. Hayashi, H. Kuninaka, M. Usui, Y. Shimizu, S. Hosoda, H. Koizumi and K. Nishiyama, "R&D on 10,000sec Isp Ion Engine Driven by Microwave," 44th

AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit , AIAA-2008-4810, Hartford, CT, July, 2008.

- 9) 月崎竜童, 西山和孝, 細田聡史, 小泉宏之, 清水幸夫, 國中均, “マイクロ波放電型イオンスラスター μ 10の推力増強,” 第 52 回宇宙科学技術連合講演会, 2G07, 兵庫, 2008 年 11 月.
- 10) 中野正勝, “イオンエンジン加速部グリッド寿命評価ツールの全体概要,” プラズマ・核融合学会誌, Vol.90, No.4, 2014, pp.235-242.
- 11) D. M. Goebel and A. C. Schneider, “High-Voltage Breakdown and Conditioning of Carbon and Molybdenum Electrodes,” IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 33, No. 4, 2005, pp.1136-1148.