

## イオンエンジンにおける On/Off 制御の可能性検討

## Feasibility Study of Valuable Thrust Ion Thrusters by Controlling Ion Beam Extraction Duty Ratio

○川原友太郎・飯島健介(九大・院)・竹末一平(九大・学)・山本直嗣・森田大智(九大)  
大川恭志・船木一幸(JAXA)・中野正勝(産技高専)

○Yutaro Kawahara・Kensuke Iijima・Ippei Takesue・Naoji Yamamoto・Taichi Morita(Kyusyu University)・Yasushi Ohkawa・Ikkoh FUnaki(JAXA)・Masakatsu Nakano(Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology)

### Abstract (概要)

For the demonstration of wide thrust range ion thruster, ion beam extraction was controlled by controlling the applied electric field between screen grid and acceleration grid. Extracted ion beam current history was measured for the validation of this thrust valuable system. The ion beam divergence also measured using ion collector for the evaluate the influence of the On/Off control on the plume divergence. The results shows that the time-averaged ion beam current was proportional to the duty ratio while duty ratio was from 0.01 to 1. The beam divergence is little changed against duty ratio, that is, the full widths at half maximum are about 125 mm at 750 mm downstream of the ion thruster.

### 1. はじめに

2015 年に Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)において、ブラックホール同士の合体から発生した重力波が検出された。日本においても、TAMA300やKAGRA<sup>1)</sup>をはじめ様々な重力波検出の計画が進められている<sup>2)</sup>。これら地上に設置された計器においては、基線長が限られているため観測帯域が限られている。そこで宇宙空間に長基線の干渉計を設置する Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (DECIGO) という計画がある<sup>3-4)</sup>。DECIGOは国立天文台や京都大学を中心に研究が進められており、NASAの将来計画であるLISA<sup>5)</sup>と地上検出器が検出できる帯域のギャップである0.1-10 Hzを埋めることが期待されている。

DECIGOは互いに1000 km離れた三つのドラッグフリー衛星から構成されている。衛星外部のスラスタを用いて筐体の位置をコントロールし、ミラーが常に筐体の所定の位置に浮かび続けるように制御されている。DECIGOにおいて衛星間の距離を一定に保つ必要があり、通常ドラッグフリー衛星に距離を一定に保たせる機能が必要で、筐体の位置を制御するための推力可変スラスタが求められる。このスラスタへの要求性能として、3年間の運用を想定した1000 Nsのトータルインパルス、ドラッグフリーのための10 Hzの応答速度を持ち0.1-100  $\mu\text{N}$ の範囲において推力が可変であり、かつ0.1  $\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$ という低い推力ノイズが求

められている<sup>6)</sup>。

これらの要求を満たす推進機として、FEEP<sup>7)</sup>などが先行研究であるが、計測機器を汚さないイオンエンジン<sup>8)</sup>も有力な推進システムの候補となり得る。

求められる要求の一つに3桁にも及ぶ広い推力可変範囲がある。イオンエンジンにおいて推力を変化させる方法としては、ガスの流量や引き出し電圧の変更などがある<sup>9,10)</sup>。しかしながらこれらの方法では、要求されている3桁の推力可変範囲を達成する事は困難である。

イオンエンジンにおいてイオンビームの引き出しは電極間(スクリーン電極とアクセル電極)に印加された電界によって行われる。この電極間に印加する電界のOn/Offを制御することで、イオンビームのOn/Offが制御出来るのではないかと考えた。

そこで本研究の目的は、電極間の電界のOn/Offにより推力の可変範囲拡大を実証すると共に、On/Off制御がスラスタの特性に与える影響を調査することである。スラスタ特性として寿命やビームの発散角、推進効率など様々な性能があるが本研究では、ビームの発散に注目して調査した。

電極間電界のOn/Offを制御するためには、スクリーングリッドもしくはアクセルグリッドに印加する電圧を制御する必要がある。本研究においては、アクセル電圧を制御する方法を採用した。アクセル電圧による制御を採用した理由としては、アクセル電流はスクリーン電流よりも小さく、また変更させるために必要な電荷量も少ないため応答がよ

い点が挙げられる。また、イオン源としてマイクロ波放電式イオン源を実験では用いているため、スクリーン電圧を変更するとプラズマ生成のためのマイクロ波増幅器へ悪影響を及ぼす可能性があった。そこで本研究においてはアクセル電圧を制御する方法を採用した。

## 2. 実験装置

**2.1 イオンスラスト** 使用した小型マイクロ波放電式イオンスラストの断面図を図1に示す。放電室は高さ12 mm、内径21 mmの円筒形である。このイオンスラストは9個のサマリウムコバルト磁石(4 mm×4 mm×12 mm(磁化方向))と軟鉄製のヨークからなる磁気回路によって放電室内部にプラズマを制御する磁場を形成している。DCブロックおよび同軸ケーブルを用いて周波数1.6 GHzのマイクロ波をマイクロ波増幅器から放電室に設置したアンテナに伝送している。本研究において投入マイクロ波は8 Wに固定して行った。アンテナ形状は過去の研究より推進効率がよい星型アンテナを用いた<sup>11)</sup>。このアンテナの厚さは1 mmであり、材質はモリブデン、形状はφ9 mmの円に内接している6つの角を持った星形である。引き出し電極には表1に示すグリッドを用いた。このグリッドは中野らの数値解析コード<sup>12)</sup>を用いてスクリーン電圧1500 V、アクセル電圧-300 Vで最適となるように設計したものである。本実験においては最大100 μNの推力を想定しているため、スクリーンに印加する電圧は500 Vにした。100 μNの推力発生時の見積もりとして、推進剤流量5 μg/sにおいて、全消費電力として5 W(2 Wのマイクロ波電力と1.5 Wの加速電力と0.3 W程度の中和器の消費電力と1.2 Wの電源のロス)で100 μN時の比推力は2400秒を想定している。

アクセル電圧も-150 Vに印加する予定であったが異常放電のために制御回路の損傷が頻発したため0 Vとチャンバと同電位にしている。このため本研究の作動条件では用いたグリッドは最適なグリッド形状ではなく、結果として数mAのアクセル電流が流れている。グリッドはアクセルがモリブデン、スクリーンがカーボンでできており2つのグリッド間はアルミナの円柱を用いて絶縁している。

中和に関して、アクセルグリッドへの逆流電子を防止するためには、グリッドシステムとして3枚グリッドシステムを採用するか電子源もOn/Off制御する必要があるが、今回はイオンスラスト単体での性能評価を行った。

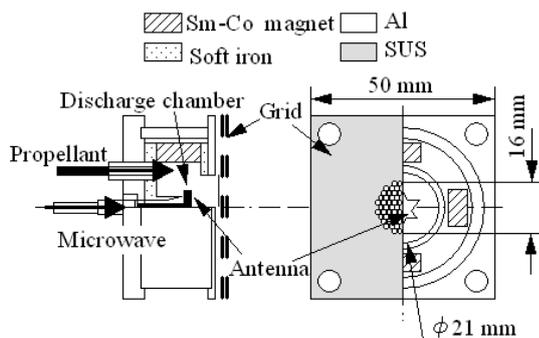


図1 小型マイクロ波放電式イオンスラスト断面図

表1 グリッドパラメータ

	Screen grid	Acceleration grid
Open area ratio, %	51	16
Hole diameter, mm	1.2	0.70
Thickness, mm		0.30
Hole pitch, mm		1.20
Material	Carbon	molybdenum
Grid gap, mm		0.20
Number of holes		91

純度99.995%のキセノンガスを作動ガスとして用いた。サーマルマスフローコントローラを用いて流量の調整を行った。このマスフローコントローラの誤差はガス流量0.4 sccm(40 μg/s)で0.009 sccm(0.9 μg/s)であった。

**2.2 アクセル電圧制御用回路** アクセル電圧をスクリーングリッドと同電圧の500 Vと0 Vを交互に印加してイオンビームのOn/Offを制御した。想定されるミッションの測定周波数帯である0.1-10 Hzの推力ノイズを増加させないことおよび10 Hz以上の応答速度を考慮するとOn/Offの繰り返し周波数は100 Hz以上、出来れば数kHz以上が望ましい。そこで100 Hzから1 kHzの間で変更しながらOn/Off制御を行った。On/Off制御にはプッシュプル回路を用いた。Metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET)にはRohm社製のSCR2160KEを用いた。用いたMOSFETはカタログ値においてドレイン、ソース間最大電圧は1200 V、400 Vの立ち上がり時間は25 nsである。

電圧の計測には100 MHz帯域の電圧差動プローブを用い、電流の計測にも帯域100 MHzの電流プローブを用いて計測した。スクリーン電流に関しては回路からスクリーン電極に向かう電流を正とし、アクセル電流に関してはアクセルから電源に向かう電流を正とした。

**2.3 真空装置** 実験は独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマチャンバ施設にて行った。真空容器は直径2.5 m、長さ5 mのステンレス容器に2台のクライオポンプと1台のターボ分子ポンプを備えており、到達圧力は $2.72 \times 10^{-5}$  Pa Pa、キセノンガス0.2 sccm(19 μg/s)流入時に $1.4 \times 10^{-4}$  Paであった。

イオンビームの計測には100×100 mm<sup>2</sup>のステンレス製の板をイオンスラスト下流80 mmに設置し、スクリーン電流と同じ帯域100 MHzの電流プローブを用いて計測した。

イオンビームプロファイルの計測には直径9 mmの円盤形コレクタを用いて計測した。端効果を避けるために同軸の直径10 mmの穴の開いた電極を設置して計測した。コレクタには-30 Vが印加されており、イオンの捕集及び電子の追い返しを行っている。イオンスラスト下流750 mmにおいて、イオンコレクタをスラスト軸と垂直方向に25 mmずつ動かしてビームプロファイルを計測した。イオンビームの計測には50 Hzのローパスフィルタを挿入したIV変換回路を用いて計測した。このためプロファイルの計測は平均ビーム電流を計測している。

### 3. 結果および考察

図 2 に On/Off の繰り返し周波数 100 Hz, On/Off の duty 比 0.5 とした時の, アクセル電圧, スクリーン電流およびアクセル電流の時間変化を示す. アクセル電圧を制御することで引き出し電流が制御出来ている事が分かる. すなわち, アクセル電圧を 0 V にすることで電極間の電位差を 500 V にするとスクリーン電流も流れはじめ, 再びアクセル電圧をスクリーン電圧と同じ 500 V に戻すと電位差は 0 V となり, 電極間の電界が無くなるためイオンは引き出されず, 結果としてスクリーン電流も 0 mA になっている. またアクセルグリッドに直接当たるイオンが多く, アクセル電流もアクセル電圧と連動して変化している.

図 3 に On/Off を切り替えた時のアクセル電圧の変化を示すが, カタログスペックとほぼ同等の 20 ns の間に 400 V から 0 V に電圧が変化しており, 500 V からの下がりをはじめ見ても 60 ns で電圧は変化している. スクリーン電流およびアクセル電流どちらも On/Off の切り替え時に大きな電流変動を計測しているが, これが実際の電流なのか, それともノイズなのかの判別が出来ていない. 数値解析<sup>13)</sup>の結果より特に注目している On/Off 直後のアクセル電流

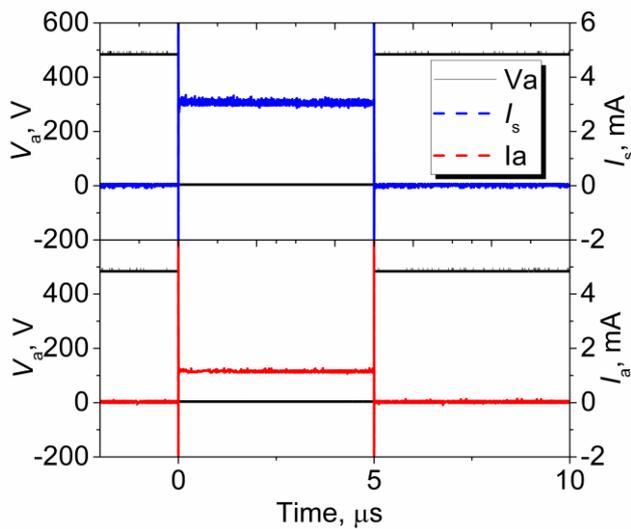


図 2 電極印加電圧および各電極電流の時間変化

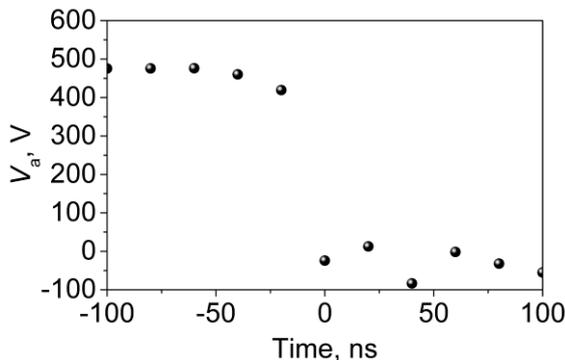


図 3 アクセル電極印加電圧の時間変化

が計測できておらず今後回路の改良を行い, 計測する予定である. しかしながら少なくとも 6  $\mu$ s 後には On/Off の移行を確認しており, この時間が無視できる程度の時間スケールにおいては制御可能であるといえる.

次に下流に設置したイオンコレクタに流入する電流により, 引き出されたイオンビームの時間変化を計測した. 図 4 に duty 比を変化させたときのイオンビーム電流の時間変化を示す. 実線がアクセル電圧, 破線がビーム電流を示す. イオンビーム電流はアクセル電圧に追従して変化しており, アクセル電圧の duty 比でイオンビーム電流も制御出来ている. また, イオンビーム電流は duty 比によらず 6.2 mA で一定であった. イオンビームの時間遅れに関しては, アクセル電流同様に切り替え時のノイズが大きく計測できていないが, スムージング処理を行った波形よりアクセル電圧を 500 V に戻した 5  $\mu$ s 後にはイオンビームも 0 mA になっており, アクセル電流と同様に少なくとも数  $\mu$ s の時間レンジで On/Off が制御出来ている. すなわち, 周期 10 ms である 100 Hz での On/Off 制御においては幅広い範囲で平均推力を制御出来ることが示唆された.

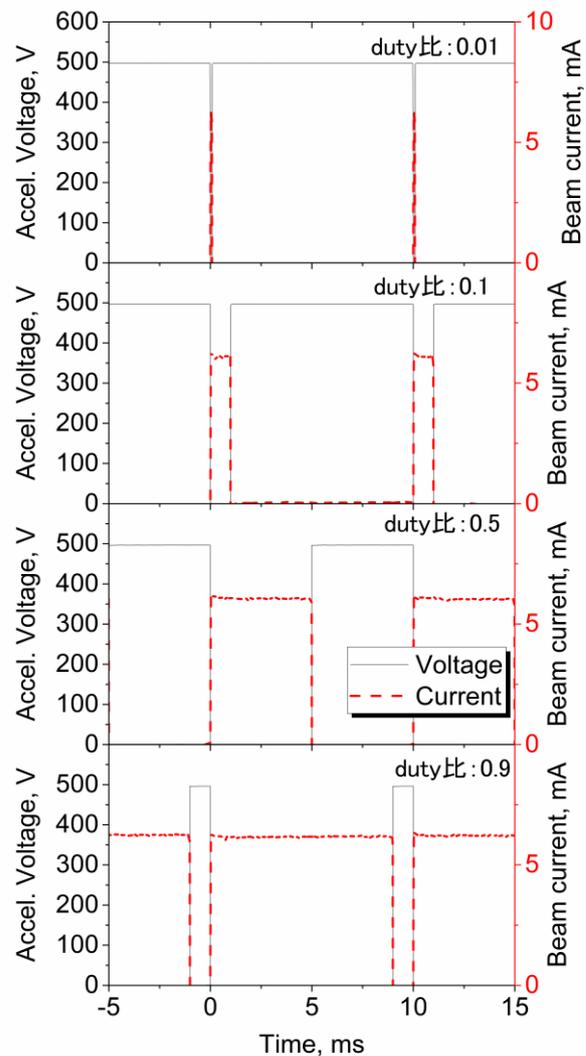


図 4 様々な duty 比によるイオンビーム電流の時間変化

次に On/Off 制御が性能に及ぼす影響を調査した。大川らの先行研究により、グリッド印加の過渡過程においてビームの発散が変化することが報告されている。よって On/Off 制御がビームの拡がりに影響を与えないかを調査する必要がある。そこでイオンコレクタを用いてイオンビーム電流密度の空間分布を計測した。図 5 に duty 比を 0.1 から 1 まで変化させたときのイオンビームプロファイルを示す。プロファイルは最大値で規格化している。0.1 以下においてはビーム電流が測定下限以下であったために計測できていない。

図 5 に示すとおり、ビームの拡がりは duty 比によらずほぼ一定であり半値全幅は表 2 に示すとおり誤差の評価が難しいがほぼ 125 mm と変化していない。よって On/Off 制御がビームの拡がりに及ぼす影響は小さい。On/Off の繰り返し周波数を 500 Hz, 1 kHz と変更して同様にビームプロファイルを計測したが、100 Hz の結果と変わらなかった。数値解析の結果<sup>13)</sup>より、影響が出る時間帯は 1 μs 程度であるため、100 Hz から 1 kHz 程度の繰り返し周波数においては On/Off 制御による影響は小さいという結果は妥当である。

電流密度からオニオンピーリング法により積分した全イオンビーム電流はイオンコレクタで計測した電流値と duty 比の積にほぼ比例している。すなわち、下流におけるイオンビームプロファイル計測からも、On/Off 制御による推力可変範囲の拡大が確かめられた。平均イオンビームの絶対値が下流 80 mm に設置したイオンコレクタと差異が生じているが、これは測定ポイントが 25 mm 間隔と粗い分布計測であったことおよび電荷交換衝突の影響が考えられるため、今後より精密な計測を行う予定である。

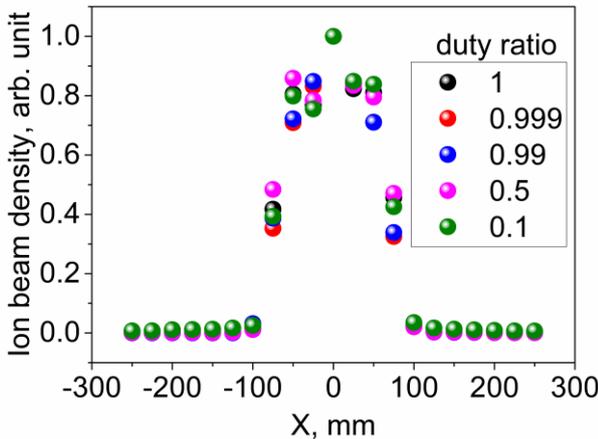


図 5 duty 比を変化させたときのビームプロファイル

表 2 積分したイオンビーム電流と duty 比の関係

Duty ratio	Full width at half maximum, mm	Estimated time-averaged ion beam current, mA
1	128 ± 10	7.1
0.999	118 ± 6	7.0
0.9	120 ± 6	7.0
0.5	131 ± 10	3.7
0.1	127 ± 9	0.5

## 4. まとめ

On/Off 制御により、イオンスラスタの推力可変範囲の拡大の実現可能性を検討した。プッシュプル回路を用いてアクセル電圧を制御し、アクセル電圧に印加する電圧の変化に追従してイオンビーム電流すなわち推力を制御出来ることを確認した。ビームプロファイル計測における時間平均し空間積分されたイオンビーム電流も duty 比にほぼ比例することを確認した。また On/Off 制御はビームの拡がりにほとんど影響を与えないことを確認した。

制御回路を改良して、過渡過程の最適化を進めると共に、寿命への影響などを調査する必要がある。また電子源とのカップリングは非常に重要なテーマであり、On/Off 制御がカップリングにどのような影響を与えるのか調査していく。さらに、On/Off 制御によって発生するノイズの評価も併せて行っていく。

## 謝 辞

本実験は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構、宇宙科学研究所「スペースサイエンスチャンバー」を利用したものです。また本研究 JAXA 共同研究平成 28 年度戦略的開発研究費を受けたものです。ここに謝意を表します。また、実験遂行に当たり細田聡史氏、西山和孝氏、月崎竜童氏および國中均氏の多大な協力により実現できました。ここに感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Y. Aso et al : Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector. Phys. Rev. D, 88, 043007, 2013.
- 2) 安東正樹 : Fabry-Perot 型レーザー干渉計重力波検出器の制御, 東京大学修士論文 pp17-18, 1996
- 3) S.Kawamura et al : The Japanese Space Gravitational Wave Antenna-DECIGO, Class. Quantum Grav.23 S125, 2006.
- 4) Ando, Masaki and Arai, Koji and Izumi, Kiwamu and Mino, Yasushi and Somiya, Kentaro : DECIGO and DECIGO pathfinder, DECIGO and DECIGO pathfinder. Classical and Quantum Gravity, 27 (8). Art. No. 084010 . ISSN 0264-9381, 2010
- 5) LISA : System and Technology Study Report, ESA document ESA-SCI, 2000
- 6) 安東正樹, 川村静児, DECIGO ワーキンググループ : 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO Space gravitational-wave telescope DECIGO, 低推力・連続加速を用いた宇宙ミッションに関する研究会論文集, p87, 2008.
- 7) 中山宜典, 小栗崇督, 岩崎純一, 船木一幸, 堀澤秀之, : 電界放出型電気推進 FEED スラスタの試作, 平成 21 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2009-48, 2010.
- 8) 泉雄大, 小泉宏之, 國中均, 松井信, 山極芳樹 : 小型マイクロ波放電式イオンスラスタのドラッグフリー作動における推力制御, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2012-043, 2012.
- 9) Sovey, J. S., Rawlin, V. K., Patterson M. J., : Ion Propulsion Development Projects in U.S.: Space Electric Rocket Test I to Deep Space I, Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, No. 3, pp. 517-526, 2001.
- 10) Kuninaka, H., Nishiyama, K., Funaki, I., Yamada, T., Shimizu Y., Kawaguchi, J., : Powered Flight of Electron Cyclotron Resonance Ion Engines on Hayabusa Explorer, Journal of Propulsion and Power, Vol.23 No.3, pp.544-551, 2007.
- 11) Yamamoto, N., Masui, H., Kataharada, H., Nakashima, H., and Takao, Y.: Antenna Configuration Effects on Thrust

Performance of Miniature Microwave Discharge Ion Engine,  
Journal of Propulsion and Power Technical Note, 22,( 2006) pp.  
925-928.

- 12) 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, J.Plasma Fusion Res. Vol.90, No4, pp235-242, 2014
- 13) 中野正勝, 山本直嗣, 船木一幸, 大川恭志: On-Off 制御時のイオンビームの過渡シミュレーション,平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2016-34, 2017.
- 14) ohkawa, Y., Takegahara, H. and Tachibana, T. : Numerical Analysis of Ion Beam Extraction Phenomena in an Ion Thruster, IEPC-01-97, 27<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, Oct. 15-29, 2001.