

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

○ 泉 雄大 (静大・院), 小泉 宏之 (東大), 國中 均 (JAXA)

松井 信 (静大), 山極 芳樹 (静大)

1. 序論

1.1 重力波観測ミッション

宇宙空間において重力波を観測するためには、ドラッグフリー衛星が必要となる。重力波とは、質量を持つ物体が加速度運動する際に伝播する時空の歪みの波のことである。そして、離れた位置にある2つの試験マスに重力だけが働く環境を整え、そのマス間の距離の変化を測定することによって計測することができる。ただし、試験マスに外部から運動量が与えられると、測定の外乱となってしまうため、ドラッグフリー制御が必要となる。主な外乱としては、20 - 40 μN の太陽輻射圧、10 - 100 μN の大気抵抗等が挙げられる。ドラッグフリー制御では、試験マスに非接触のハウジングを被せ、試験マスとハウジングの距離が一定となるようにスラスタで運動量を排出することによってこれらの外乱を抑制する(Fig. 1)。

DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (DECIGO) では、このドラッグフリー衛星を3台用いてフォーメーションフライトを行う。そして、重力波によって引き起こされる衛星間の極微小な距離の変化を基線長 1,000km のレーザー干渉計で計測する(Fig. 2)^[1-3]。DECIGO の計測対象は、0.1 - 1.0Hz 帯の重力波である。ここで得られる知見は、電磁波によるものとは全く異なった新たな天文学を拓く可能性を有している。

そして、DECIGO の技術実証を目的に、小型重力波観測衛星 DECIGO Pathfinder (DPF) の打ち上げが検討されている。この DPF の重要な開発要素として、外乱応速度を抑制するドラッグフリー制御技術も含まれている。DPF では、このドラッグフリー制御技術を用い、実際に重力波と地球重力場の観測も行い。そして、このドラッグフリー制御用のマイクロスラスタとして、イオンスラスタ、FEED スラスタなどの利用が検討されている。

本研究では、DPF でドラッグフリー制御用スラスタに要求される性能 (Table 1) を満たすようなイオンスラスタの推力制御を行う。DPF の要求に関するイオンスラスタの推力特性は、これまでの研究で調査されてきた^[4]。本研究では、この調査結果を基に、DPF のスラスタ要求を満たすように推力を制御する。また、推力特性を補完するため、推力変動に対するスラスタヘッドの温度変化の影響も調査した。

1.2 マイクロ波放電式小型イオンスラスタ μl

ドラッグフリー制御用のスラスタとして、マイクロ波放電式小型イオンスラスタ μl (Fig. 3) の利用が検討されている。マイクロ波放電式小型イオンスラスタ μl は、ISAS/JAXA や東京大学で研究開発が進められている。この小型イオンスラスタは、 μN オーダーの推力レベルや推力応答性の観点からドラッグフリー制御用のマイクロスラスタとして適している。

イオンスラスタは、推進剤を電離してイオンを生成し、静電加速

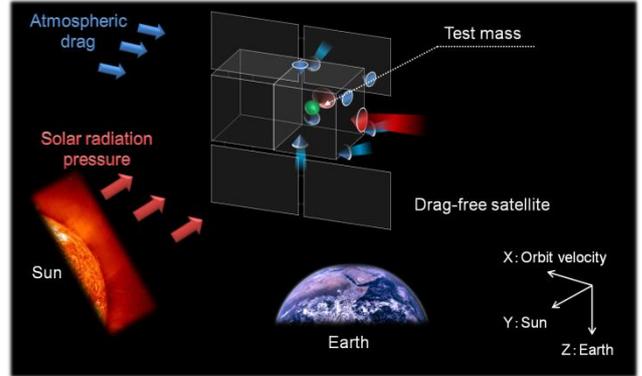


Fig. 1 Satellite with drag-free control.

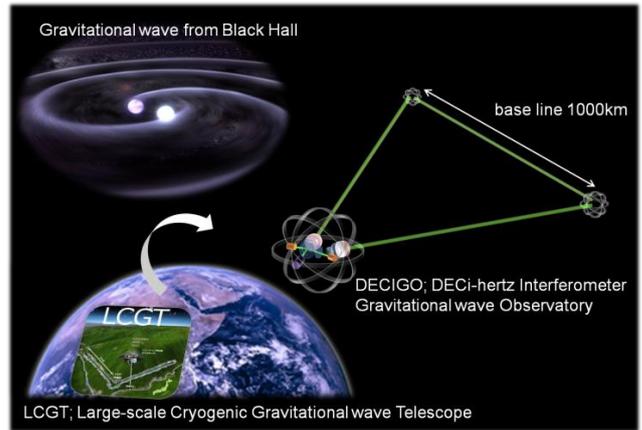


Fig. 2 DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory.

Table 1 Requirements of DPF thruster.

要求項目	要求値
推力可変範囲	5 -100% (target 0.5-100%)
推力精度	0.1 μN
推力ノイズ	< 0.1 $\mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ (from 0.1-1.0Hz)
応答速度	> 10Hz
作動時間	4300hour



Fig. 3 Miniature Microwave Discharge Ion Thruster (μl).

により外部に高速排出して推進する(Fig. 4). 小型イオンスラスタ $\mu 1$ では、磁場中の電子サイクロtron共鳴(Electric Cyclotron Resonance: ECR)を利用して、マイクロ波からエネルギーを獲得した高速電子が推進剤と衝突してイオンを生成している^[5-7]. 静電加速は、主として2枚の多孔の電極(グリッドシステム)によって行われ、生成したプラズマから正イオンのみをスクリーングリッド孔を介して引出し、スクリーングリッドとアクセルグリッドの電位差によって加速する。ここで、アクセルグリッドを空間電位に対し負電位にすることにより、下流からの電子流入を阻止している。

これまでの研究成果から、この小型イオンスラスタの推力ノイズの主要因はマイクロ波電力のノイズであることが特定されている^[4]. マイクロ波放電式小型イオンスラスタの推力変動は、マイクロ波電力や推進剤流量、イオン加速電圧など複数の要因が考えられる。これらの要因に対して、個々の変動が与える推力ノイズを見積もり、全体の推力ノイズと比較した。その結果、マイクロ波電力の変動が推力ノイズの主要因であることが判明した。

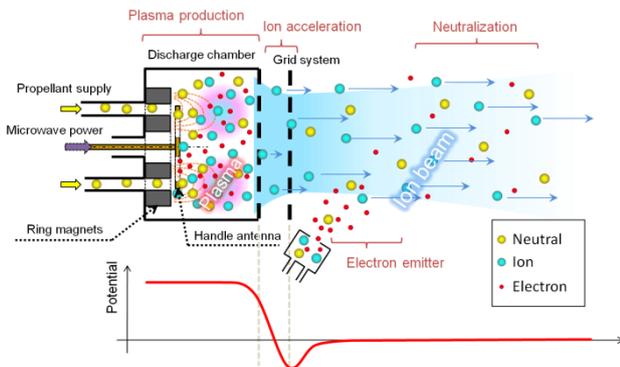


Fig. 4 Ion engine schematic diagram & potential variation.

2. 全体の実験装置

本研究における実験の主な設備は、真空系およびガス供給系、マイクロ波伝送系、高圧電源系で構成されている (Fig. 5).

直径 1.0 m, 長さ 1.4 m, ステンレス鋼の真空チェンバを使用し、内圧 4.0×10^{-3} Pa 以下で実験を行っている。推進剤(キセノンガス)流量はマスフローコントローラによって制御している。

マイクロ波電力はマイクロ波発振器から増幅器を介して小型イオンスラスタ $\mu 1$ に供給される。ただし、マイクロ波電力は、スラスタ本体に伝送されるまでにケーブルやコネクタで損失があるため、実際に供給されているマイクロ波電力はマイクロ波増幅器の出力値とは異なる。そこで、パワーメータを用いて、スラスタ本体に実際に供給されているマイクロ波電力を測定し、マイクロ波増幅器の出力値を校正している。

本実験では、イオン源のみを単体作動させており、イオンビーム中和は行っていない。イオン加速用の高圧電源の作動条件は、イオン加速電圧(スクリーン電圧) 1500 V, アクセル電圧 350 V である。これらの高圧電源は、同じ GND 電位をとっており、電源と GND の間で電流量(スクリーン電流, アクセル電流)を測定している。

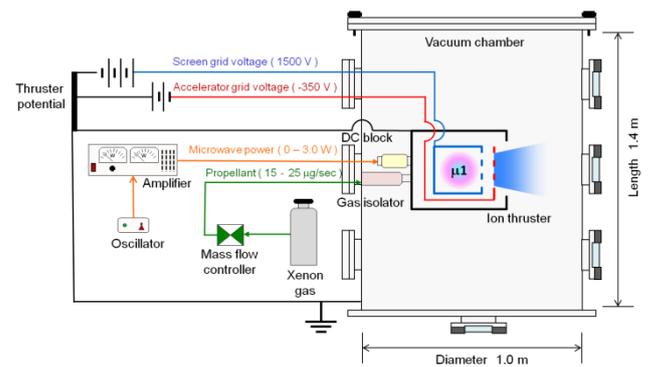


Fig. 5 Experimental configuration.

3. イオンビーム電流のフィードバック制御実験

3.1 実験方法

マイクロ波放電式イオンスラスタの推力 F は、イオンビーム J_b とイオン加速電圧 V_b によって決定する (式(1)).

$$F = J_b \sqrt{\frac{2m_i V_b}{e}} \quad (1)$$

ここで、 m_i はキセノンイオンの質量、 e は電気素量であり、多価イオンの存在や中性粒子による推力生成は考慮していない。

イオンスラスタの推力可変制御を行うためには、リアルタイムのイオンビーム電流とイオン加速電圧をフィードバックする必要がある。特に、イオンビーム電流は、能動的に与えるイオン加速電圧と異なり、作動条件によって常に変動する。そこで、Fig. 6に示すようなイオンビーム電流フィードバック制御システムを構成した。このシステムでは、リアルタイムのイオンビーム電流 V_{beam} をフィードバックして、設定電流値 V_{set} と一致するように微積分制御を行う。また、イオンビーム電流の制御パラメータはマイクロ波電力を選択している。このシステムを用いることによって、イオンビーム電流の連続可変制御、すなわち推力の連続可変制御が可能となる。

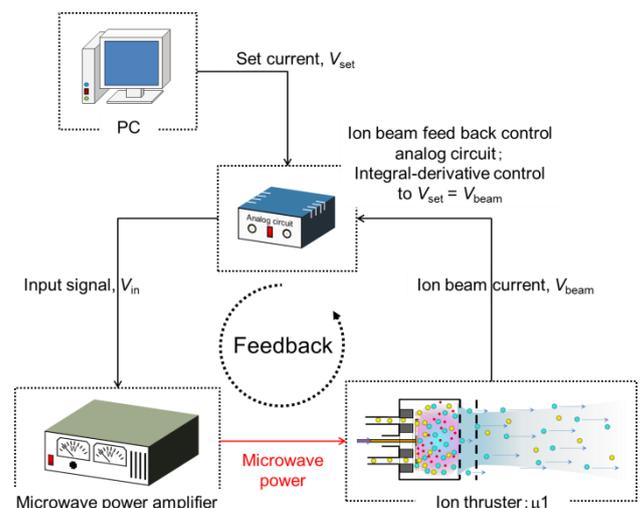


Fig. 6 Feedback control system of ion beam current.

3.2 推力連続可変制御の結果

イオンビーム電流フィードバック制御システムを用いて、イオンビーム電流の連続可変制御を実現した。イオンビーム電流のフィードバック制御システムは正常に作動し、サイン波で変化する設定電流に追従できているが、イオンビーム電流が設定電流に比べて0.01 - 0.03 mA 程度小さい (Fig. 7)。この値は、推力換算すると0.6 - 1.9 μN である。推力精度の観点から、予めこの誤差を許容するように推力制御を行うか、さらに調整を追加する必要があると考えられる。

さらに、DPFの推力応答要求を想定し、10Hzのサイン波で推力連続可変を実現した (Fig. 8)。また、この推力連続可変時の推力ノイズも0.1 - 1.0 Hzの範囲で0.01 $\mu\text{N}/\text{Hz}$ と要求値の一桁以下に抑えることができている (Fig. 9)。

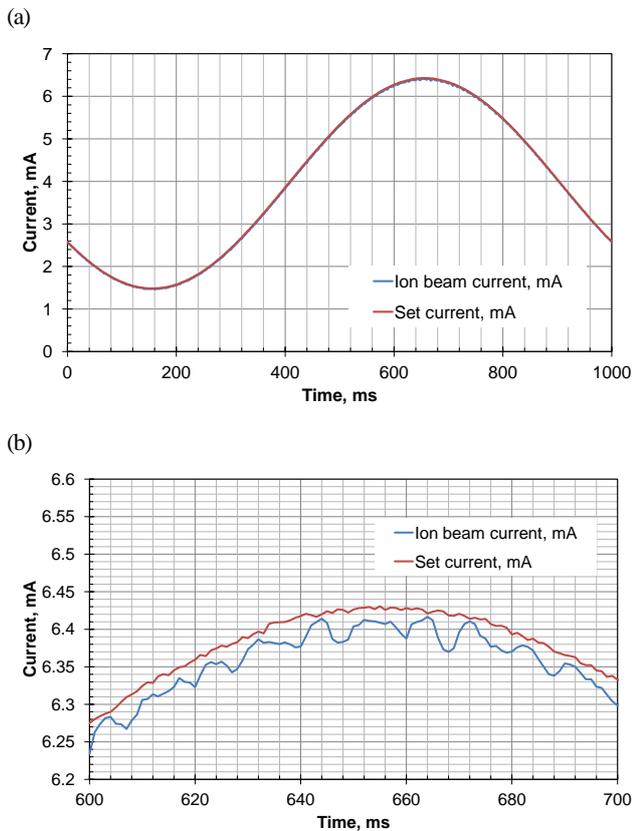


Fig. 7 (a)Feedback control of ion beam current, (b)enlarged view of graph (a).

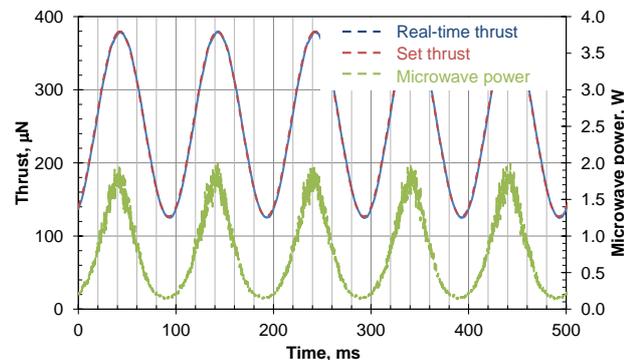


Fig. 8 10Hz sine-wave response with feedback control of ion beam current.

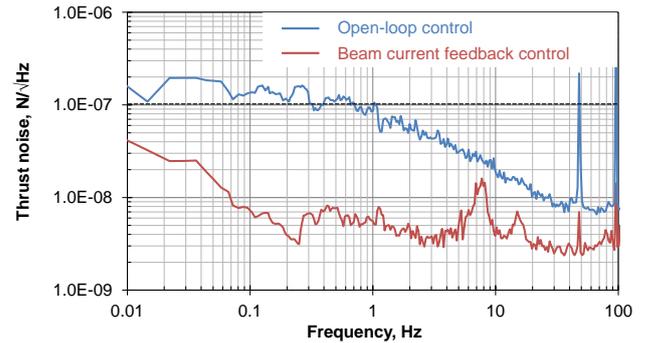


Fig. 9 Decrease in thrust noise with feedback control of ion beam current.

4. 推力ノイズに対するスラスタヘッド温度の影響調査

4.1 調査方法

推力ノイズの要因の一つとして、スラスタヘッドの温度変化の影響を調査する。推力ノイズは、推力の変動を周波数毎に分解して評価したものである。その推力変動が、スラスタヘッドの温度変化によって生じると考えられている。その理由として、イオン生成部の中性粒子の閉じ込め効率の低下や、イオン加速部のグリッド形状の変化が挙げられる。そして、ドラッグフリー作動では、推力ノイズが0.1 $\mu\text{N}/\text{Hz}$ より低いことが求められるため、その影響を把握しておく必要がある。

本調査では、スラスタヘッドの温度を20 - 100 degCで変化させている。スラスタヘッドの温度測定には、熱電対を使用しており、小型イオンスラスタの放電室外壁に設置している。そして、10×10×2 mmのマイクロセラミックヒーターを使用してスラスタヘッドを加熱する。ヒーターは、モリブデン板と真鍮板で挟んで固定している (Fig. 10)。また、ペルチェ式循環冷却器を使用してスラスタヘッドの冷却もしている。冷媒には水を使用し、冷水はスラスタヘッド固定の銅版にはんだ付けされた銅管の中を流れる (Fig. 11)。

得られたスラスタヘッド温度と推力の関係から、スラスタヘッドに生じる熱パワースペクトル密度の許容値を算出する。推力変動の周波数特性 (パワースペクトル密度 N^2/Hz) は、フーリエ変換によってプロットすることができる。そして、複数のパワースペクトル密度によって生じるパワースペクトル密度は、下記の式で表わされる^[8]。

$$S_y(\omega) = \sum_{r=1}^N |H_r(\omega)|^2 S_{x_r}(\omega). \quad (2)$$

ここで、 $S_y(\omega)$ は出力パワースペクトル密度、 $H(\omega)$ は周波数応答関数、 S_x は入力パワースペクトル密度を表している。本調査では、出力パワースペクトル密度が全体の推力パワースペクトル密度である。入力パワースペクトル密度は複数存在するが、本調査ではスラスタヘッドの熱パワースペクトル密度のみを考える。また、周波数応答関数は、スラスタヘッド温度と推力の関係から求める微分係数を用いる。この微分係数と DPF で要求される推力ノイズから、スラスタヘッドの熱パワースペクトルの許容値が求められる。

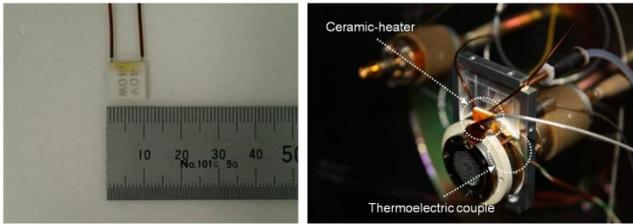


Fig. 10 Ceramic heater & setups.

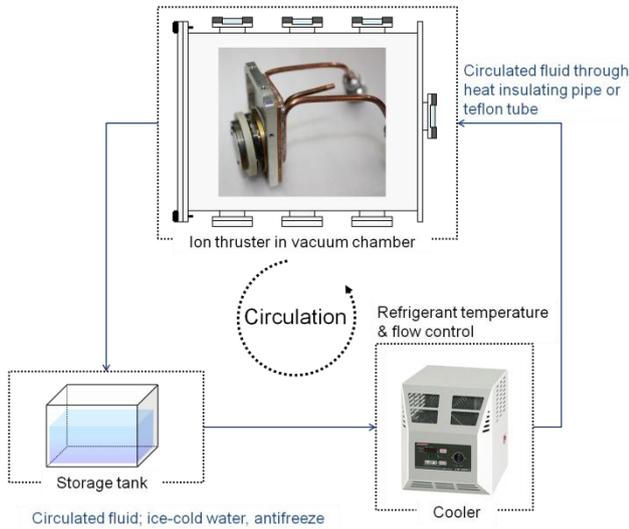


Fig. 11 Temperature control system for cooling thruster head.

4.2 スラスタヘッド温度の許容変化範囲

スラスタヘッドの温度を 20 - 100 degC で変化させた場合、イオンビーム電流は 0.12 - 0.2 mA 程度変化した (Fig. 12)。この値を推力換算すると、7.7 - 12.8 μN 程度となる。イオンスラスタの運転によって生じる熱や外部からの熱によって、スラスタヘッドの温度を変化させている。スラスタヘッド温度の上昇に伴い、推力は増加していく傾向にある。これはグリッド形状が変化したことにより、グリッド間のギャップが小さくなったことが原因であると考えられる。本実験で用いた小型イオンスラスタのグリッドシステムは 2 枚の平行平板で構成されている。この結果から、ギャップが小さくなる方にグリッド形状が変化することが分かる。ただし、20 $\mu\text{g}/\text{sec}$ の作動条件では、80 degC 以上でイオンビーム電流量が減少する傾向にあり、全く別の要因が働いているとも考えられる。

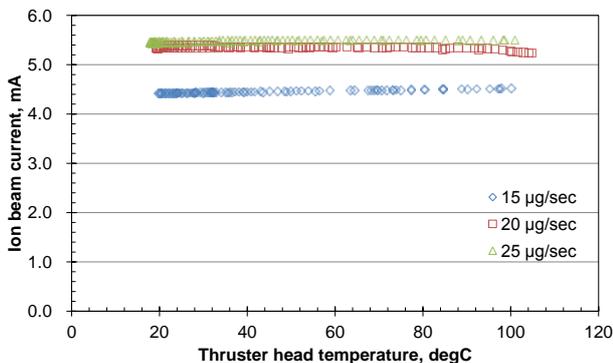


Fig. 12 Plots of ion beam current vs. thruster head temperature.

この調査の結果より求められたスラスタヘッドの熱パワースペクトルの許容値は、1.58 K^2/Hz である。この値は作動条件 15 $\mu\text{g}/\text{sec}$ のスラスタヘッド温度と推力の関係から求められており、微分係数は $7.96 \times 10^{-8} \text{ N/K}$ である。この許容値よりもスラスタヘッドに生じる熱パワースペクトル密度の値が小さければ、推力ノイズを $0.1 \mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ より低く保つことができる。

5. 結論

本研究では、マイクロ波放電式小型イオンスラスタ μI のドラッグフリー作動における推力制御を行った。主たる結論は以下の通りである。

- (1) 小型イオンスラスタ μI の推力連続可変制御にイオンビーム電流のフィードバック制御と PID 制御を導入した。
- (2) 小型イオンスラスタ μI の推力ノイズを、フィードバック制御を用いて $0.01 \mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下に削減した。
- (3) オープンループ制御時のドラッグフリー作動において、スラスタヘッド温度に対する許容パワースペクトル密度は 1.58 K^2/Hz である。

今後の課題として、現在の測定推力では中性粒子や多価イオンの影響を考慮できていない点が挙げられる。これを校正するためには、スラスタスタンドを用いた直接推力測定を行い、正確な推力を得る必要がある。

参考文献

- 1) Funaki, I., Nakayama, Y.: Micro-thruster Options for the Japanese Space Gravitational Wave Observatory Missions, *International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-308*.
- 2) D. Di Cara, S. Strandmoe et al., : RIT MicroPropulsion System on Lisa Pathfinder, *International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-325*.
- 3) C. Scharlemann, A. Genovese et al., : In-FEEP Endurance Test for LISA PF, AIAA-2009-5093, 45th joint Propulsion Conference, Denver, Colorado, 2009.
- 4) 泉 雄大, 小泉宏之.: 小型マイクロ波放電式イオンスラスタによるドラッグフリー制御に関する研究, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-047.
- 5) Koizumi, H., Kuninaka, H.: Miniature Microwave Discharge Ion Thruster Driven by 1 Watt Microwave Power, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.26, No.3, 2010, pp.601-604.
- 6) Koizumi, H., Kuninaka, H.: Ion Beam Extraction and Electron Emission from the Miniature Microwave Discharge Ion Engine μI , *International Electric Propulsion Conference, IEPC-2009-178*.
- 7) Koizumi, H., Kuninaka, H.: Performance of the Miniature and Low Power Microwave Discharge Ion Engine μI , *Proceeding of Joint Propulsion Conference, AIAA-2010-6617*.
- 8) D. E. Newland, *Random vibrations, spectral and wavelet analysis*, 3rd ed., Longman, Cambridge, 1993, pp. 67-81.