

# パルス重畳電源を用いたホールスラストのイオンエネルギー分布

○伊藤匠、山本直嗣、中島秀紀（九州大・総理工）

## 1. 研究の背景

ホールスラストはロシアが中心となって開発が進められてきた電気推進機の一つであり、これまでに 200 機以上の作動実績がある。その特徴として、イオン加速領域に電子が存在するため、空間電荷制限則を受けず、推力密度が高くコンパクトという特徴がある<sup>(1)</sup>。また、長寿命化が期待でき、高い推進効率と高比推力を両立出来ることも利点として挙げられる<sup>(2)</sup>。そのためホールスラストは地球近傍ミッションに適しており、衛星への搭載例として ESA（欧州宇宙機関）で月探査機 SMART-1<sup>(3)</sup>に用いられた。さらには NASA の小惑星捕獲ミッションにおいても 10kW 級の大型のホールスラストを用いることが計画されている<sup>(4)</sup>。このように、ホールスラストは次世代宇宙推進機として現在最も注目されている。

スラストの長寿命化、大推力化を推し進める上で、電源の小型効率化が必要不可欠であるが、電源の小型化で問題となっているのが放電振動である。ホールスラストでは作動時に様々な振動が確認されており、中でも電離不安定性に起因する放電電流振動が特に大きい<sup>(5)</sup>。放電振動の抑制は、放電室形状や磁場形状などの推進機設計により成功しているが、経年変化に伴い放電振動を起こす条件が変わるため、スラストの寿命まで放電振動を抑制することは困難である。このため、放電振動に備えて電源容量を多めにとっておく必要があり、電源の容量・重量の増加を招いている。

しかし、放電振動は本来ホールスラストの作動において自然に発生するものであり、作動停止さえしなければ無理に放電振動を抑制しなくても良いのではないかと考え、放電振動を許容し、スラストにとって無理のない作動をさせる電源として「パルス重畳電源」が提案され、このパルス

表 1 各電源による性能比較

	DC 電源	パルス重畳電源
推進効率	0.22	0.26
推力電力比[mN/kW]	50	57
推力[mN]	10.0	9.5

重畳電源を使用すると推進効率、推力電力比に向上がみられた<sup>(6)</sup>。両者の電源を用いた場合の性能の比較を表 1 に示す。

しかしながら、パルス重畳電源を用いた場合、スラストへの入力電圧「放電電圧」が変動する。しかもこの電圧は、パルスのチョッピング周波数やインダクタ、コンデンサなどの回路定数の変化で変わる。入力電圧の変化は、プラズマ生成・加速領域の空間ポテンシャルの変動に直結するため、排出されるイオンの運動エネルギーの変動や平均エネルギーの低下やエネルギー幅が広がることが懸念されている。このため、最適なパラメータ選定のために入力電圧波形とイオンエネルギー分布の関係を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、「パルス重畳電源」を用いた際の入力電圧波形とイオンエネルギー分布の関係を調査することを目的とする。

## 2. 実験装置

### 2.1 実験体系

ホールスラストは外径 72 mm、内径 48 mm のマグネチックレイヤ型ホールスラストを使用した。使用したホールスラストを図 1 に示す。外部に設置した 4 つのソレノイドコイルとスラスト中心部に設置したソレノイドコイル、軟鉄で作られた磁極により半径方向の磁場を作り出す。陰極にはホローカソード(Ion tech 社製 HC252)を使用

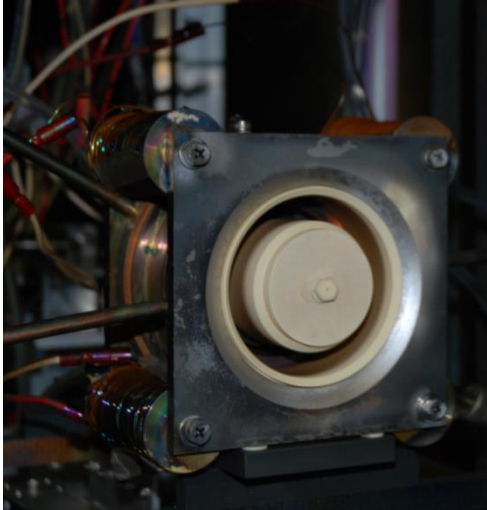


図1 ホールスラスタ写真

した。作動ガスはキセノンを用い、ガス流量は 0.272 mg/s に固定した。

スラスタの作動実験は直径 1.0 m , 長さ 1.2 m のステンレス製真空容器内で行った。真空ポンプの排気速度は空気で  $4.2 \times 10^3$  l/s であり、到達圧力は  $4.00 \times 10^{-4}$  Pa, ガス流入時に  $1.50 \times 10^{-2}$  Pa であった。

放電電圧及び放電電流をデータロガーを用いて測定するとともに、スラスタ下流 300 mm の位置にイオンエネルギーアナライザ (RPA : Retarding Potential Analyzer)を設置し、イオンのエネルギーを計測した。

## 2.2 非平滑チョッパ型電源

図 2 にパルス重畳電源のひとつである非平滑チョッパ型電源の回路図を示す。本回路は小型の DC-DC コンバータにおいてよく見られる形式である。太陽電池からのバス電圧が入力の  $V_{in}$  にあたり、MOSFET のスイッチングパルスのデューティ比を変化させ、「平均的な出力電圧」として式(1)で与えられる出力電圧  $V_{out}$  の調節を行う。

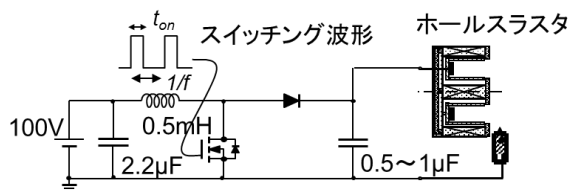


図2 非平滑チョッパ方式電源回路

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{1}{1-duty} = V_{in} \times \frac{1}{1-t_{on} \cdot f} \quad (1)$$

一般的な DC-DC コンバータでは、電圧変換の後に平滑用の大型コンデンサを必要とするが、この回路では出力パルス波形をそのままホールスラスタの入力電源とするので大型の平滑用コンデンサは必要ない。そのため、長寿命のフィルムコンデンサやセラミックコンデンサの使用が可能となり、電源の長寿命化が期待できる。また、小容量のコンデンサしか用いないため、宇宙機においては大きな利点である。

本実験では回路定数を  $L=0.5\text{mH}$ ,  $C=0.5\mu\text{F}$ ,  $duty=0.333$  (平均出力電圧 150V) とし、チョッピング周波数を 10kHz から 28kHz まで 2kHz 毎に計測を行った。

## 2.3 イオンエネルギー分布関数

放電電圧波形とイオンエネルギー分布の関係を調べるために、RPA を使用してイオン分布を計測する。図 3 に RPA の概略図を示す。RPA はコレクタに前面に 4 枚のグリッドが設けられており、RPA に入ってくるイオンビームに対してグリッド (IRG) に正電位を印加し、そのエネルギーに満たない低エネルギーイオンを遮断することによってグリッドに印加した電位以上のエネルギーをもつイオンのみを捕集する装置である。ただし、検出される電流値は  $\mu\text{A}$  から  $\text{nA}$  オーダーと非常に小さいため、増幅、絶縁、フィルタ回路を備えた I-V 変換回路を接続する。

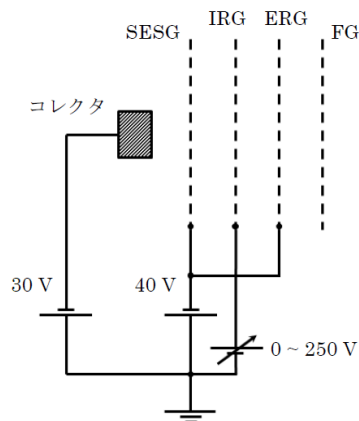


図3 RPA 回路図

### 3. 結果と考察

#### 3.1 DC 電源での計測

非平滑チョッパ型電源での測定を行う前に、DC 電源を使用した際のエネルギー分布を測定した。推進剤はキセノン、推進剤流量 1.36 mg/s、放電電圧 150V での観測波形を微分・規格化することで得られるイオンエネルギー分布関数 (IEDF) を図 4 に示す。エネルギー分布関数の横軸はエネルギー幅を比較するために 0 ~ 200 eV 一定としている。

得られた IEDF からピークの位置は 80 eV 程度であり、放電電圧から考えると低い、これは設計点よりもかなり低流量で作動しているために低くなってしまったと考えられる。

#### 3.2 非平滑チョッパ型電源での計測

次に、非平滑チョッパ型電源を用いてエネルギー分布の測定を行った。推進剤や推進剤流量、磁場形状などのパラメータは DC 電源での計測と同じとし、チョッピング周波数を変化させて計測を行った。

図 5 にチョッピング周波数 10kHz での IEDF を

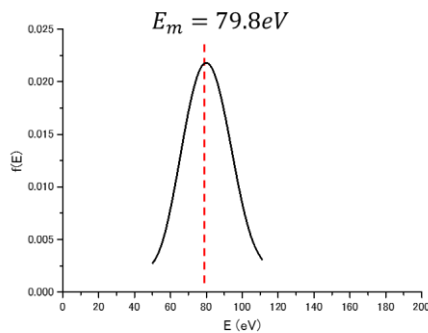


図 4 IEDF (DC150V)

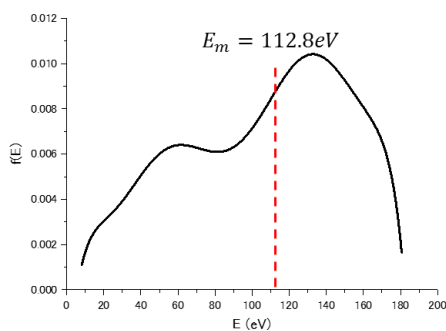


図 5 IEDF (10kHz)

示す。図 5 より、DC 電源の IEDF と比較してエネルギー幅が広がり、ピークが 2 つ現れていることがわかる。これは、放電電圧がおよそ 100V~200V の範囲で揺れており、チョッピング周波数が低い場合には放電電流の同期がみられず、放電電圧が高い時に生成されたイオンと、放電電圧が低い時に生成された低速のイオンの 2 種類のイオンを計測したためだと考えられる (図 6 参照)。

次に周波数を上昇させて計測を行った。図 7~10 にそれぞれの IEDF を示す。12kHz 以降は放電電流の同期が確認でき、イオン平均エネルギーが減少していくことがわかった。チョッピング周波数の上昇に伴い、電圧の変動幅やピーク電圧が小さくなったこと、放電電圧と放電電流の位相がずれたためだと考えられる。また変動幅が小さくなったために、エネルギー幅も狭くなっていくことが確認できる。

計測を行った 26kHz まで、放電電流の同期は確認できたが、22kHz 以降は IRG の出力波形のノイズが大きく、IEDF 及びイオンの平均エネルギー

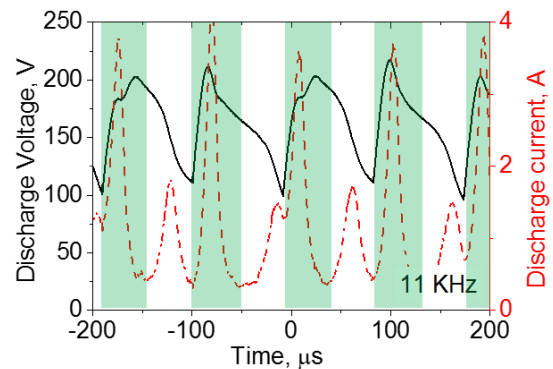


図 6 放電電圧・電流履歴

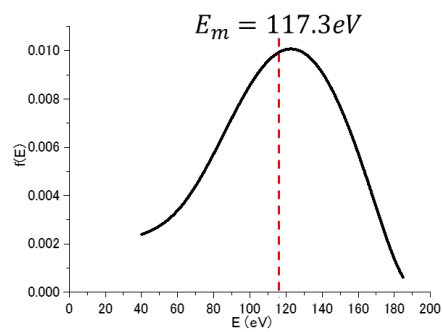


図 7 IEDF (14kHz)

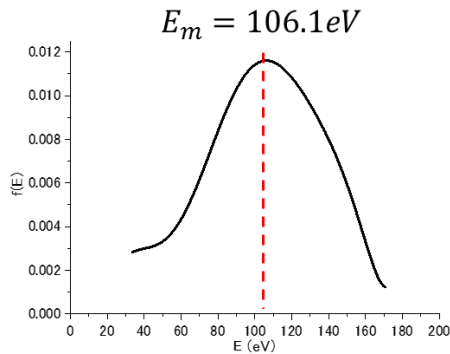


図 8 IEDF(16kHz)

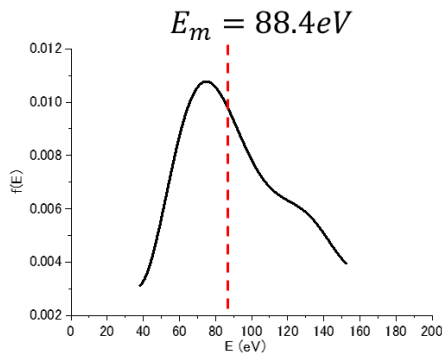


図 9 IEDF(18kHz)

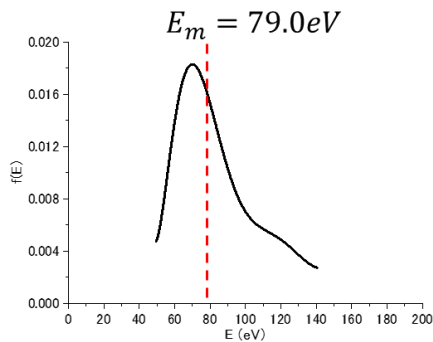


図 10 IEDF(20kHz)

ギーを測定することができなかった。I-V 変換回路でのフィルタによるノイズカットや電源などを見直す必要があると思われる。

次に、図 11 に DC 電源及び非平滑チョッパ型電源のイオン平均エネルギーの比較を示す。12kHz 以降の同期範囲内において、チョッピング周波数が高くなるにつれて平均エネルギーは減少するものの、DC 電源よりも高い平均エネルギーを持つことがわかった。ただし、同条件での過

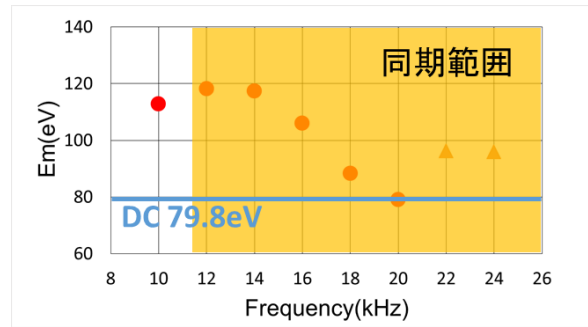


図 11 イオン平均エネルギー比較

去の作動実験において、推力に関しては周波数によらずほぼ一定の値を得ている。つまり、イオン平均エネルギーの減少分を補う程度に推進剤利用効率が上昇している可能性がある。

#### 4. 結論

ホールスラスタを DC 電源及び非平滑チョッパ型電源で作動し、イオンエネルギー分布関数の計測を行った。その結果、非平滑チョッパ型電源を用いると、予想通りエネルギーの幅は広がり、さらに放電電流が非同期の際には 2 つのピークがみられた。

今後、磁場形状や推進剤の流量、放電電圧を変化させて計測するとともに、推進剤利用効率の変化やイオンビームの発散角、寿命などの影響も調査し、パルス電源の改良を行っていく。これと並行して、推進機形状とパルス電源の関係も合わせて調査していく。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 23686123 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- (1) V. V. Zhurin, H. R. Kaufman, R. S. Robinson, "Physics of Closed Drift Thrusters," Plasma Sources Sci. Technol. 8, 1999, R1-R20.
- (2) 田原弘一, "最近の電気推進機の開発研究とプラズマ技術", 新たな宇宙開発を拓く核融合技術, J. Plasma Fusion Res. Vol.83, No.3, p266, 2007.
- (3) C. R. Koppel and D. Estublier, "The SMART-1 Electric Propulsion Subsystem," AIAA-2003-

4545, 39th Joint Propulsion Conference, Huntsville, Alabama, July 20–23, 2003.

- (4) I. G. Mikellides, et al, “The Effectiveness of Magnetic Shielding in High- $I_{sp}$  Hall Thrusters”, 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013.
- (5) N. Yamamoto, K. Komurasaki, Y. Arakawa, “Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters, “J. Propulsion & Power, Vol.21, (2005) pp.870-876.
- (6) 山本直嗣, 民田太一郎, 大須賀弘行, 竹ヶ原春貴, 栗木恭一, “ホールスラストのパルス同期方式の開発”, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2012-024, 2012.