

ホールスラストのパルス同期駆動方式の開発

九州大学 山本 直嗣
三菱電機(株) 民田 太郎
三菱電機(株) 大須賀 弘行
首都大学東京 竹ヶ原 春貴
首都大学東京 栗木 恭一

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ひとつであり、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、このため推力密度が高くコンパクトという特徴がある(図1参照)¹⁻⁵⁾ また長寿命化が期待でき、比推力1500-2000秒で効率が50%以上とよいという点も利点である。そのためホールスラストは人工衛星の軌道変更や、人工衛星や宇宙大型建造物の南北制御などの地球近傍ミッションに適しており、宇宙機への搭載例として、月探査のSMART-1⁶⁾の主推進や静止衛星の南北制御⁷⁾などが挙げられる。今後の宇宙推進においても主要な地位を占めると考えられ、NASAの457M⁸⁾やロシアD-160⁹⁾等に見られるように、有人探査時やSSPS建設用カーゴの主推進機として、数十kW級の大型電気推進機の開発も進められている¹⁰⁻¹⁴⁾

日本においても様々な研究機関において、研究開発が行われており、¹⁵⁻²⁰⁾ (財)無人宇宙実験システム研究開発機構の業務委託において三菱電機は5kW級の電気推進機の開発に成功している。²¹⁾ 現在のホールスラスト研究・開発の方向性として、「放電振動抑制」と「長寿命化」そして「大推力化」が挙げられる。大推力化を推し進める上に置いて無視できないのが、システム全体の小型軽量化と低消費電力化である。100kWクラスのシステムにおいては、1%のロスでも1kWの廃熱になるため、これまで以上に電源の小型化と高効率化が求められる。

電源の小型化において問題となるのが、放電振動である。ホールスラストでは様々な振動が確認されているが²²⁻²⁵⁾、その中でも電離不安定性に起因する放電電流振動^{25,26)}がとくに大きく、電源への負荷が重い。放電振動の抑制に関しては、電源制御²⁷⁾や作動パラメータ選定、推進剤の供給方法^{19,29)}や放電室形状²⁶⁾や磁場形状³⁰⁾などの推進機設計などにより、放電振動の抑制に成功している、しかしながら、経年変化に伴い放電振動を起こす条件は変わるため、EOLま

で放電振動を抑制し続けることは困難である。このため放電振動に備えて、電源容量のマージンを多めに取っておく必要があり、そのため電源の容量および重量の増加を招いている。

そもそもホールスラストの電源は定電圧源として、作動させているが必ずしも最適とは限らない。実際に定電流制御での作動は定電圧制御よりも作動停止しやすくなるが、定電力制御にすると定電圧制御よりも安定になることが分かっている。³¹⁾ 安定性=電流振動の振幅の大小ではなく、作動維持と定義し直し、放電電流振動を許容して、スラストにとって、自然な、無理のない作動をさせる電源の方が適しているのではないかと考えた。すなわち、スラストのインピーダンス変化と協調し、電源条件を変化させる電源である。放電電流が小さく、放電を維持したい時は、定電圧源として働き、パルスの大電流が流れているときは定電流源として働く電源である。

そこで本研究の目的は、「汎用DC電源」ではなく、スラストの特性に合わせた新しい概念の電源すなわち、スラスト動作に適した、スラストが動作しやすいような電源を作製し、スラストとかみ合わせて動作確認し、その特性および性能を検証することである。

2. 実験装置

製作したホールスラスト断面図を第1図に示す。加速チャンネルの外径は70mm内径は50mmであり、チャンネルの材質は窒化ホウ素である。陽極はチャンネル出口から30mm上流に設置している。図2に示すとおり、4つの外部ソレノイドコイルと、写真では見えないが、一つのスラスト中心部のソレノイドコイルと軟鉄で作られた磁極によって加速チャンネル内に半径方向の磁場が印加されている。このコイルに流す電流および内側と外側に流す電流の比を変化させ、加速チャンネル内に印加する磁束密度の大きさおよび磁場形状が調整可能である。本研究においては、図3に示すとおり、なるべく磁力線が加速チャンネル内において加速チャン

ネルと垂直になるようにしている。半径方向の磁束密度はスラスタ出口上流 1 mm で最大になるように磁場形状を設計した。径方向には磁束は一定なので、磁束密度は加速チャンネルの内側壁面で最大となり外側に行くに従い減少する。

推進剤にはキセノンを用いた。陰極にはホローカソード(Ion tech 社製 HC252)を使用した。作動ガスにはキセノンを用い、作動ガス流量は 0.272mg/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 の真空チャンバで行った。真空ポンプの排気速度は空気で 4.4×10^3 l/s であり、到達圧力は 1.2×10^{-4} Pa でスラスタ作動時圧力は 2.5×10^{-2} Pa 以下であった。

図 4 に測定系を示す。スラスタヘッドに流れる電流および印加する電圧をデータロガーおよびオシロスコプを用いて測定するとともに、スラスタ下流 30 cm に直径 2 mm のイオンコレクタを設置しイオンビームの変動も測定した。さらに推進性能を評価するために、振り子式スラストスタンドを用いて推力を算出した。この振り子式スラストスタンドの誤差は 0.5 mN at 10mN であった。

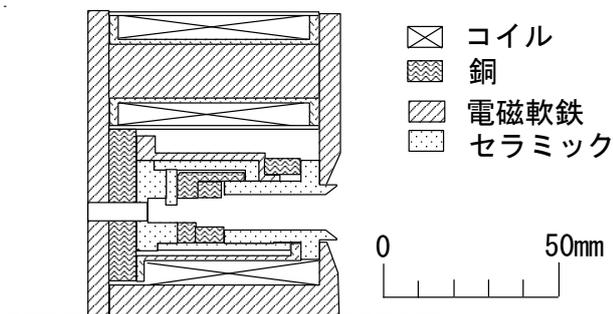


図 1 ホールスラスタ断面図

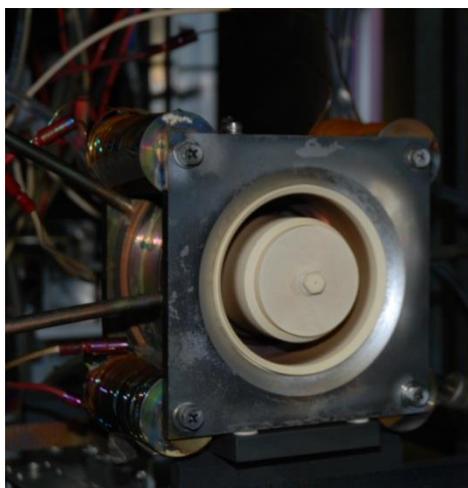


図 1 ホールスラスタ写真

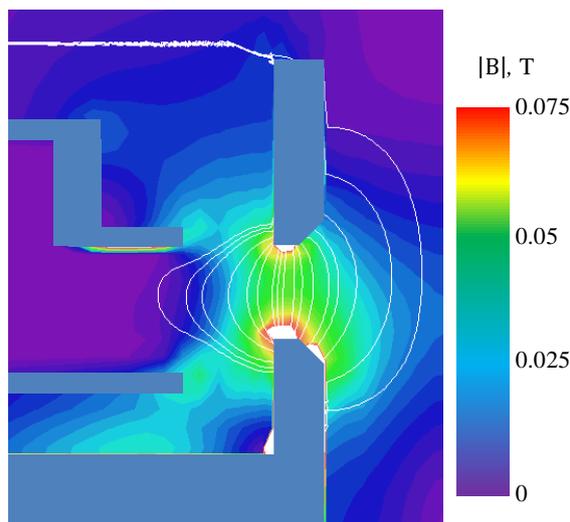


図 3 磁場形状分布, 外部コイル 4 A, 内部コイル 1 A (Magnum 3.0 による数値解析)

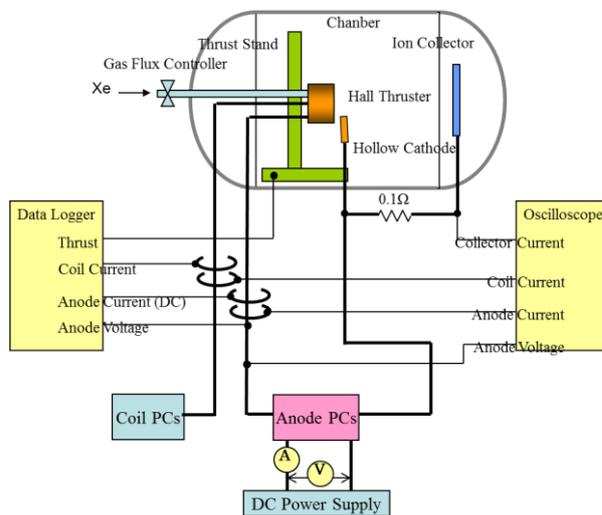


図 4 ホールスラスタ計測システム概要

3. 結果と考察

3.1 矩形波重畳方式

新しい電源を試す前に、電圧一定ではない条件でのスラスタの振る舞いを観察するため、図 5 に示した回路を用いて、ホールスラスタに矩形波を重畳し、放電電流を観察した。図 6 に内部コイル電流 0.5 A, 推進剤流量 1.36 mg/s で放電電圧は 200 V をベースに 50 V の矩形波を 22 kHz, デューティ比 25% で重畳させたときの

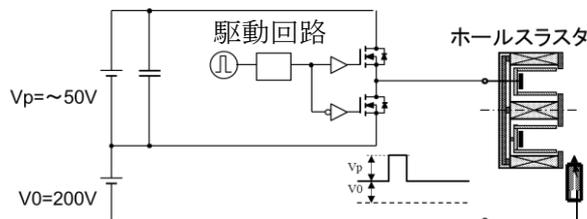


図 5 矩形波重畳方式電源回路図

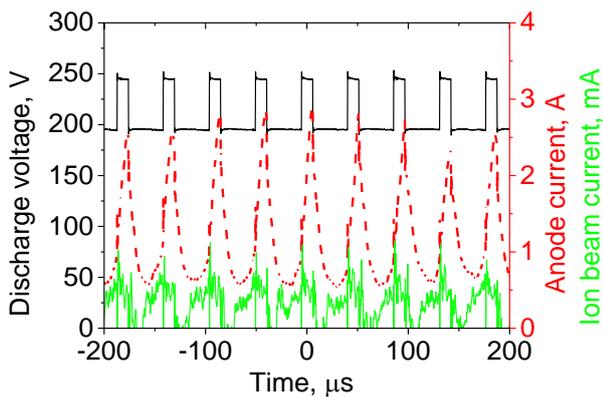


図6 矩形波重畳時の電流履歴

電流放電振動とイオン電流の様子を示す。放電電圧が上昇するタイミングで放電電流も増加し、電源の動作にスラスタが追従している様子が確認できる。放電電圧 250 V 一定での放電電流振動の周波数は 20 kHz であり、印加した矩形波の周波数である 22 kHz はこの周波数よりも高いにもかかわらず、放電電流は追従している。さらに、放電電流が振動しているだけではなく、下流のイオン電流も同じ周波数で振動していること。これはプラズマ生成も同じく 22 kHz で振動しており、スラスタの作動は電源によってコントロールされていることが分かる。

そこで矩形波の周波数を変更して電流特性がどのように変化するかを調査した。図7に周波数を 15, 17, 20kHz としたときの電圧/電流波形を示す。LC 共振系を交流駆動する場合と類似の特徴が現れていることが分かる。すなわち、スラスタは周波数が低い時は C 負荷として振る舞い、結果として電流の位相が進み、一方、周波数が高いと L 負荷となり、電流の位相が遅れる。このように、LC 共振系としてホールスラスタのモデル化を行うことが可能であることが分かった。

また推進性能に関しても詳細にみると、図8に示すとおり、周波数が低い 15 kHz 時は電力も小さく抑えられているが、推力も低いことが分かる。電流と電圧の位相がほぼそろっている 17 kHz においては推力も大きくなるが電力も大きく、結果として推進効率としては最低となる。20 kHz の時には、位相が遅れ、電力が大幅に減少する一方、推力は 17 kHz の時と変わらないため、結果として 20 kHz の時の推進性能は高い。これらの結果より、少し電流の位相が遅れた条件で作動させるべきであることが示唆された。

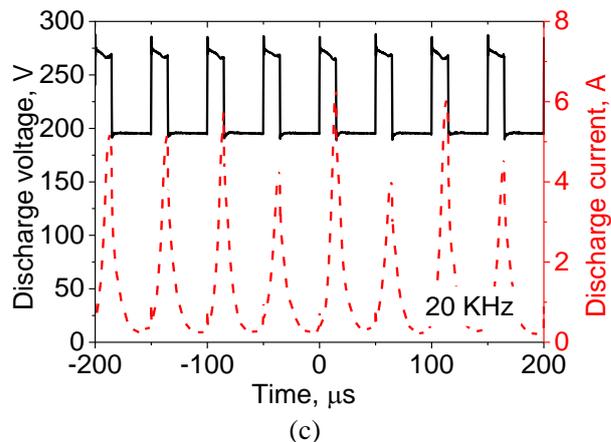
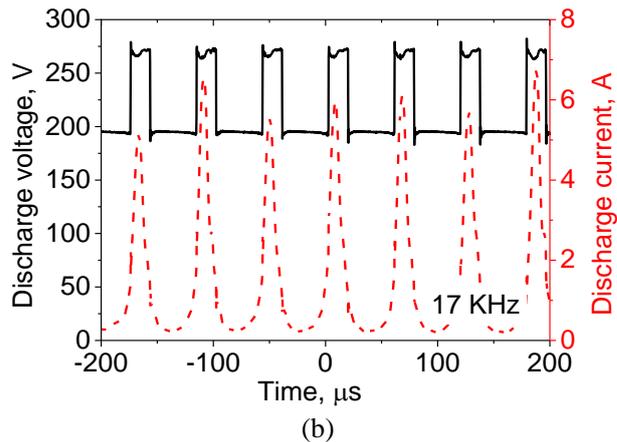
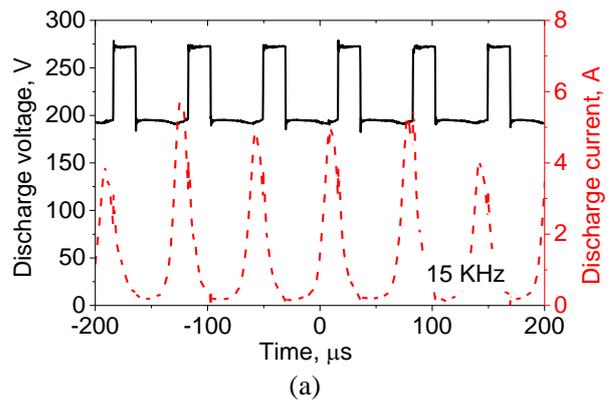


図7 矩形波の周波数依存性、チョッピング周波数(a)15 kHz, (b)17 kHz, (c)20 kHz

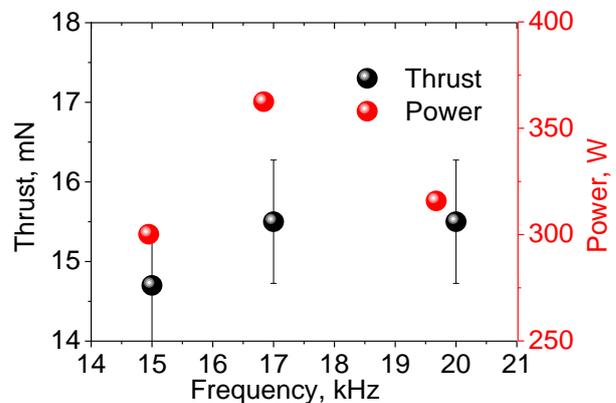


図8 矩形波周波数と推進性能

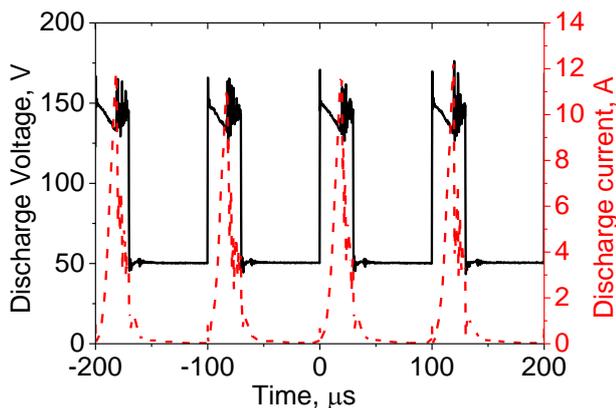


図9 ベース電圧 50 V での放電電流履歴

またベースの電圧を 100 V に下げても放電は維持されるが、50 V まで下げても図 9 に示すとおり、放電が止まる時間帯ができる。このような条件では、推力は低下し、しばらくすると作動が停止するなど、安定に作動することが困難となった。このため、ある程度のベース電圧が必要であることが分かった。

3.2 非平滑チョッパ型電源

図 5 に回路図を示す。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。宇宙機への搭載においては、太陽電池からのバス電圧が入力の V_{in} にあたり、チョッパの Duty を変更し、「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} を調節している。

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

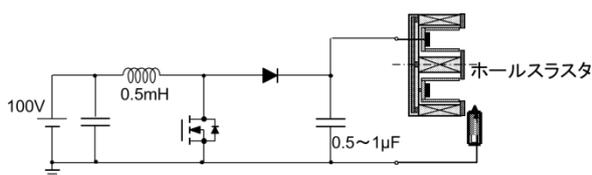


図 10 非平滑チョッパ方式電源回路図

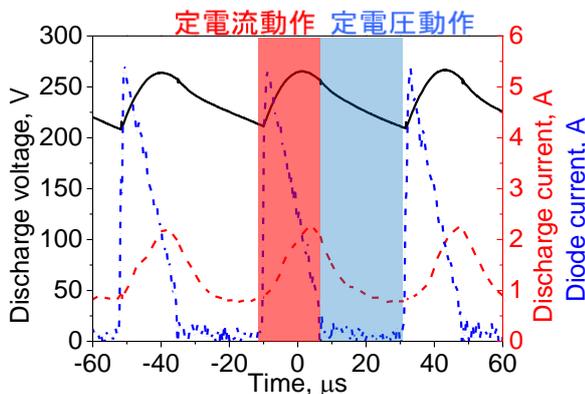


図 11 非平滑チョッパ方式電流・電圧履歴

前節において、必ずしも定電圧制御で作動させる必要がないことが示せた。そこで平滑化のために必要だった出力コンデンサの容量を小さくして電圧の変動を許容した。これは今までの電源設計の思想を 180 度方向転換する結果であるが、適切なコンデンサとインダクタ、およびチョッピングの周波数を選択することによって、放電のインピーダンス変化に併せて電源の特性も変化する、スラスタと電源の協調動作を可能とする。すなわち、放電インピーダンスが低い時にはリアクトルからの電流によってパルス的な大電流を安定的に供給でき、放電インピーダンスが高い時には、コンデンサの電圧によって、電流が小さいときでも放電を維持させることが可能となる。

図 11 に出力コンデンサ $0.5 \mu\text{F}$ 、 $V_{out}=250 \text{ V}$ 、内側コイル電流 0.5 A 、チョッピングの周波数を 24 kHz としたときの放電電流、放電電圧およびダイオードに流れる電流の履歴をしめす。赤の領域は放電電流が大きく、インダクタからダイオードを通して電流が供給されており、青の領域は放電インピーダンスが高く、コンデンサから電流が供給され、電圧を高く保ち、放電を維持していることが分かる。

図 12 に出力 $C=1 \mu\text{F}$ 、 $V_{out}=150 \text{ V}$ 相当、内側コイル電流 0.5 A での推力と消費電力のチョッピング周波数依存性を示す。図中の青の帯の領域がスラスタと電源が同期している作動範囲である。推力、消費電力とも周波数の増加に伴い減少している。12 KHz で推力および消費電力が高いが、これは他の周波数と比較して 12 kHz での放電電圧が高いことに起因する(図 13 参照)。16 kHz, 18 kHz においてはきれいに同期しており、矩形波重畳回路と同様にチョッピング周波数の増加に伴い、電流の遅れが現れ、これが消費電力の減少につながっている。一方、チョッピング周波数 20 kHz においては、同期している

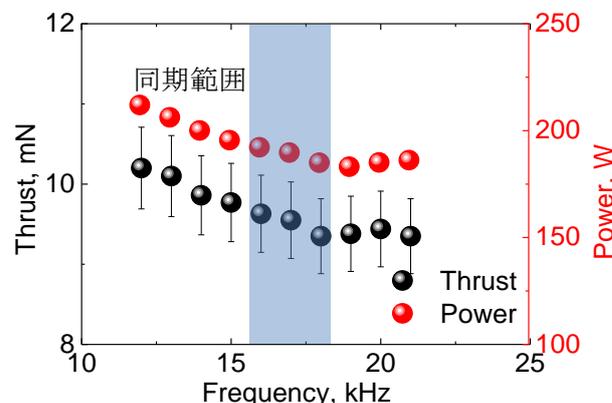


図 12 非平滑チョッパ方式電流・電圧履歴

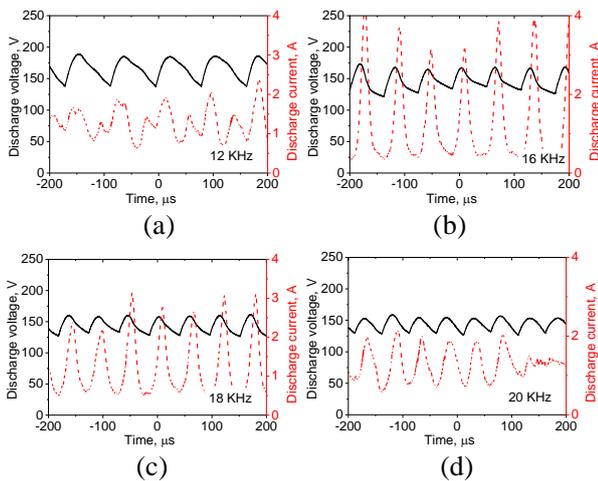


図 13 非平滑チョップ方式電流・電圧履歴

時間帯と同期していない時間帯が混在しており、さらにチョッピング周波数を増加させると完全に同期しなくなる。一方、低周波数側で見ると、チョッピング周波数の低い 12 kHz においては、電流は 2 倍程度の周波数で振動している。電圧の上昇時に電流の上昇が見られるため、全く同期していないわけではないが、協調して動作しているとは言い難い。

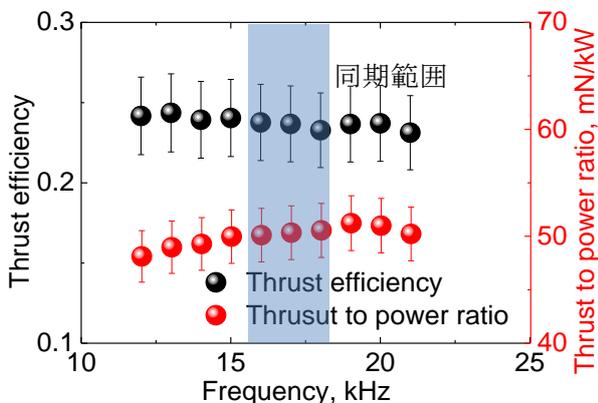


図 14 非平滑チョップ方式での推進性能

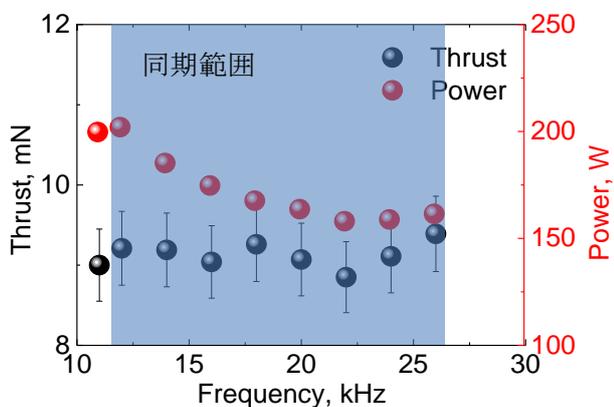


図 15 非平滑チョップ方式電流・電圧履歴

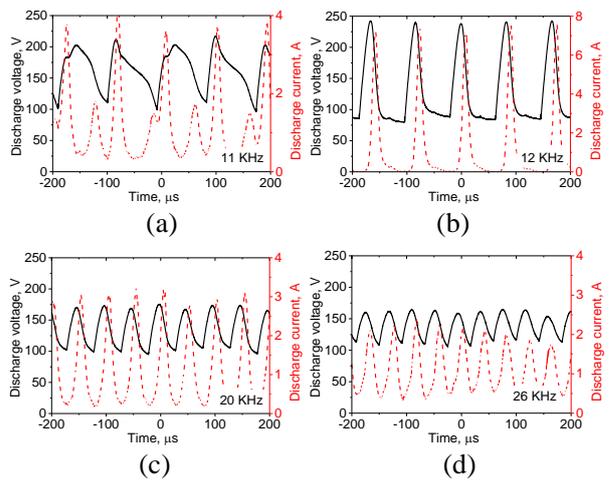


図 16 非平滑チョップ方式電流・電圧履歴

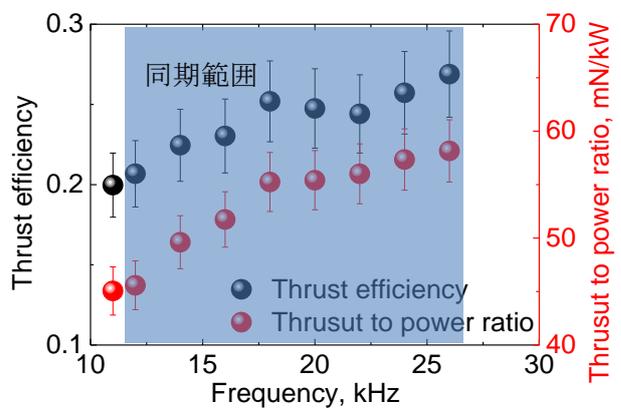


図 17 非平滑チョップ方式電流・電圧履歴

これらの結果として、図 14 に示すとおり推進効率ほぼ一定で、推力電力比は増加している。定電圧制御で放電電圧 150 V での推進効率は 22% で推力電力比も 50 mN/kW あることから推進効率、推力電力比共にほぼ変わっていない。

次に、出力コンデンサの容量を半分の 0.5 μF にして同様に消費電力と推力を測定した。図 15 にこのときの消費電力と推力のチョッピング周波数依存性を示す。先ほどの条件と異なり、同期する周波数は広がっていることが分かる。これは、図 16 にも示すとおり出力コンデンサの容量を小さくすると電圧の変動幅が大きくなり、結果的に電源のコントロール可能な範囲が広がった。消費電力はチョッピング周波数の増加に伴い減少しているが出力コンデンサの容量を半分にしたことにより、推力はチョッピング周波数によらずほぼ一定であることが分かる。これは、チョッピング周波数の増加に伴い、電流の位相が遅れると共に、電圧のピークの値も減少しているからである。

推力の周波数依存性がほとんど見られないことから、イオンの平均エネルギーはほとんど変

わっていないと考えられるが、今後イオンのエネルギー分布関数計測を行い、検証する必要がある。

回路定数を調節することで、図 17 に示すとおり、同期制御範囲も広がり、推進性能が改善されている。この値は定電圧制御と比較してもスラストスタンドの誤差以上の改善点が認められた。この性能改善のメカニズムとして、電離不安定 (Prey-Predator model) と電源がうまくみ合った結果であると言える。すなわち、図 18 に示すようなサイクルがうまく働いたと考える。

- ① プラズマ密度が低い状態で、中性粒子は補充されていく。このとき電源は徐々に電圧を増加させているが、中性粒子密度が低いため、放電電流は抑えられている。
- ② 電圧が高い状態となり、これに伴い電子の平均エネルギーは大きくなり、同時に中性粒子の補充により中性粒子密度が増加している。この結果として、雪崩的に電離が生じ、結果として放電電流が増加する。生成されたイオンは放電電圧が高い状態で生成したため、生成場所の静電ポテンシャルも高い状態となる。よってイオンは十分に加速される。
- ③ 中性粒子の枯渇により、電離度が低下し電流が減少する。それに歩調を合わせて電源が電圧を低下させるため、電子電流およびは抑制され、電子の平均エネルギーも低下する。一方、生成されたイオンはすでに加速されているので、推力には影響しない。

④ ①に戻る。

結果として、電子温度が高い時間帯でイオンは生成され、この時間帯は放電電圧が高いため、生成領域のポテンシャルも高く、推力は低下せず、また、中性粒子が枯渇している時間帯は低電圧で放電維持に努めるため、消費電力が下がり、性能向上した。

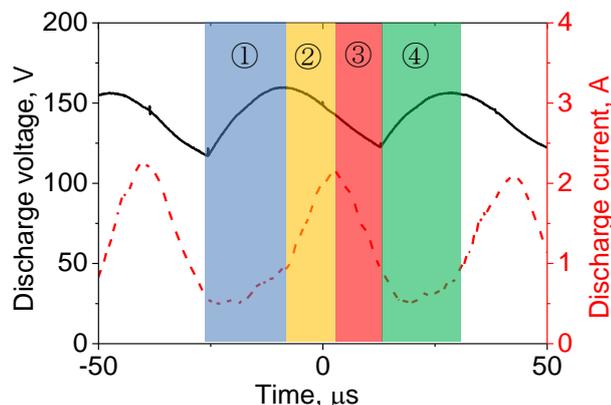


図 18 非平滑チョップ方式電流・電圧履歴

4. 結論

ホールスラストを数種類のパルス重畳電源で駆動し、同期制御の確認および推進性能の測定を行った。その結果として、回路動作として最も損失が少なく、パルス動作する放電負荷の駆動に適していると考えられる、「非平滑チョップ型電源」を開発、スラストの駆動特性が取得した。回路定数を調節することで、同期制御範囲を大幅に改善することも確認した。同等程度の電圧の DC 駆動の場合と比較して、チョップ駆動の場合、高い推進効率および推力電力比が得られた。

非平滑チョップ型電源の利点として、大容量の平滑コンデンサをなくし、小容量のフィルムもしくはセラミックコンデンサしか使わないので電源そのものが長寿命であると言える。また小容量のコンデンサしか用いないので、宇宙機においては大きな利点であると言える、小型軽量化に大きく貢献する。小型軽量また性能向上の二つの利点を持つ、スラストと電源の協調作業が可能な「非平滑チョップ型電源」は、ホールスラストの電源として主流になる可能性を秘めていると言えよう。

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) E. Y. Choueiri, "Fundamental difference between the two Hall Thruster Variants," Phys. Plasmas, 8, 11, 2001.
- 3) Zharinov, A. V. and Popov, Yu. S., "Acceleration of Plasma by a Closed Hall Current," Soviet Physics-Technical Physics, Vol. 12, Aug. 1967, pp. 208-211.
- 4) H. R. Kaufman, "Technology of Closed-Drift Thrusters," AIAA journal, Vol. 23, No. 1, 1985, pp.78-86.
- 5) V. Kim, "Main physical feature and processes determining the performance of stationary plasma thrusters," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, 1998, pp. 736-743.
- 6) 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.
- 7) R. Myers, Overview of Major U.S. Industrial Electric Propulsion Programs, AIAA-2004-3331, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion

- Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, July 11-14, 2004
- 8) J. A. Linnell, A.D. Gallimore, "Efficiency Analysis of a Hall thruster Operating with Krypton and Xenon," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.22, pp. 1402-1418, 2006.
 - 9) S.Tverdokhlebov, A. Semenko, and J. Polk, "Bismuth Propellant Option for Very High Power TAL Thruster," AIAA Paper 2002-0348, Jan. 2002.
 - 10) B. Arkhipov, et. Al., "Development and Investigation of Characteristics of Increased Power SPT Models," IEPC-93-222, Sept. 1993.
 - 11) D. T. Jacobson, R. S. Jankovsky, "Performance evaluation of a 50 kW Hall thruster," AIAA-1999-457 37th, Reno, NV, Jan. 11-14, 1999
 - 12) J. Szabo, B. Pote, V. Hruba, "L. Byrne, R. Tedrake, G. Kolencik, H. Kamhawi, T. W. Haag, "A Commercial One Newton Hall Effect Thruster for High Power In-Space Missions," AIAA 2011-6152, July, 2011, San Diego, California.
 - 13) S. Zurbach, P. Lasgorceix, N. Cornu, "A 20kW high power Hall effect thruster for Exploration, 61st International Astronautical Congress, Prague, CZ. IAC-10.C4.4.2
 - 14) P. Rossetti, C. Casaregola and M. Andrenucci, "30 kW-Class Hall Thruster: a Key Building Block for Propulsion Needs of Future Space Transportation and Exploration," IEPC-2011-211
 - 15) K. Komurasaki and Y. Arakawa, "Hall-Current Ion Thruster Performance," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 8, No. 6, 1992, pp. 1212-1216.
 - 16) アノードレイヤ型ホールスラスターの作動特性、山本直嗣、中川貴史、小紫公也、荒川義博、日本航空宇宙学会論文集、Vol. 51 (2003) No. 596 pp.492-497
 - 17) 田原弘一、後藤大亮、藤岡崇志、北野貴久、白崎篤司、安井利明、吉川孝雄、"低電力ホールスラスターの基本作動特性と推進性能," 日本航空宇宙学会論文集、Vol. 50, No. 583, pp. 318-324, 2002
 - 18) A. Ando, M. Tashiro, K. Hitomi, K. Hattori, and M. Inutake, "Beam extraction from a Hall-type ion accelerator," *Review of scientific instruments*, **79**, 02B705 2008.
 - 19) T. Miyasaka, Y. Shibata, K. Asatio and K. Segawa, "Investigation of Acceleration Channel Processes in Hall Thrusters by Particle Simulations," *Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci.*, Vol. 7, No. ists26 pp.Pb_83-Pb_88, 2009.
 - 20) 桑野寛久、國中均、中島秀紀、マイクロ波放電式ホールスラスターのチャンネル内プラズマ状態およびチャンネル長さとのスラスター性能の関係、日本航空宇宙学会論文集、Vol. 55, No. 639, pp.188-194, 2007.
 - 21) T. Ozaki, Y. Inanaga, T. Nakagawa, Y. Kasai, K. Matsui. "Development status of high power xenon Hall thruster of MELCO," ISTSpaper 2006-b-34, 25th international symposium on space technology and science, 2006.
 - 22) E. Choueiri, "Plasma oscillations in Hall thrusters," *Physics of Plasmas*, 8, 4 1411-1426, 2001.
 - 23) G. N. Tilinin, "High-Frequency Plasma Waves in a Hall Accelerator with an Extended Acceleration Zone," *Soviet Physics-Technical Physics*, Vol. 22, 1977, pp. 974-978.
 - 24) V. I. Baranov, Yu. S. Nazarenko, V. A. Petrosov, A.I. Vasin and Yu. M. Yashonov, "Theory of Oscillations and Conductivity for Hall Thruster," AIAA Paper 96-3192, July 1996.
 - 25) N. Yamamoto, K. Komurasaki, Y. Arakawa, "Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters," *J. Propulsion & Power*, Vol.21, (2005) pp.870-876.
 - 26) Boeuf, J. P., and Garrigues, L., "Low Frequency Oscillation in a Stationary Plasma Thruster," *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, No. 7, 1998, pp. 3541-3554.
 - 27) 大須賀 弘行, 黒川 不二雄, 民田太一郎, 山本直嗣, 三浦末志, 航空宇宙技術, Vol. 10 (2011) pp.19-25
 - 28) N. Yamamoto, S. Yokota, K. Watanabe, A. Sasoh, K. Komurasaki, Y. Arakawa, "Suppression of Discharge Current Oscillations in a Hall Thruster," *Trans. Jpn. Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.48 (2005) pp.169-174.
 - 29) 福島靖博, 横田茂, 小紫公也, 荒川義博, 日本航空宇宙学会誌論文集, Vol.58, No.672, pp.8-14, 2010
 - 30) S. Yokota, D. Takahashi, S. Cho, R. Kankeko, M. Hosoda, K. Komurasaki, Yoshihiro, ISTS-Paper 2011-b-25.
 - 31) N. Yamamoto, T. Nakagawa, K. Komurasaki and Y. Arakawa Effect of Discharge Oscillations on Hall Thruster Performance, Proc. of the 23rd Int. Symposium on Space Technology and Science (2002) pp.319-324.