パルス型プラズマスラスタの二段放電動作^{*1}

Double Discharge Operation for a Pulsed Plasma Thruster

大 川 恭 志^{*2}・橘 武 史^{*3}
Yasushi OKAWA and Takeshi TACHIBANA

Key Words: Propulsion, Electric Propulsion, Pulsed Plasma Thruster, Late-Time Vaporization

Abstract: Double discharge operation for a pulsed plasma thruster (PPT) was proposed and the preliminary experiments were conducted to improve the lower propellant utilization efficiency of PPTs that is attributable mainly to a late-time vaporization problem. In the double discharge operation, two successive discharges were produced with a microseconds-order interval to accelerate the late-time vaporization gas generated in a primary discharge by the electromagnetic interaction in a secondary one. Experimental results showed by adopting the double discharge operation the effective exhaust velocity was increased compared with the one in the ordinary PPT operation. This velocity increment indicated that the ratio of electromagnetically accelerated propellant gas to total propellant consumption was risen in the double discharge operation. Furthermore, when the time interval between the two discharges was shorter than the single discharge duration, it was observed that the impulse bit, specific impulse and thruster efficiency were higher than those in the ordinary operation.

1. は じ め に

パルス型プラズマスラスタ (Pulsed Plasma Thruster, PPT) は、電気エネルギーを運動エネルギーに変換して推力を得る電気推進機の一つであり、小型、軽量および簡便な機構を特徴とする。近年、打上コスト削減やリスク低減等の要求から、重量 50 kg 程度以下の小型人工衛星の需要が高まっており、上記の特徴を有する PPT はこれら小型衛星の姿勢制御や軌道離脱用の推進機として注目を浴びてきている。特に、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 等の高分子化合物を推進剤とする固体推進剤型 PPT (固体 PPT) は、その簡便な機構による信頼性の高さから、衛星搭載の実績も多い¹⁾。しかしながら、短時間のアーク放電からの入熱により固体推進剤を昇華させる機構を持つ固体 PPT には、推進剤消費量の制御が困難であるという本質的な問題があり、これが他の電気推進機に比較して大幅に推進効率が低い原因となっている。本研究は、この推進剤消費の問題に着目して固体 PPT の推進性能向上を目指すものである。

通常の固体 PPT の動作では、始めにイグナイタの小エネルギー放電によって電極間の絶縁破壊が生じ、高電圧コンデンサに蓄えられた電気エネルギーが解放されることで、パルス大電流アーク (ピーク電流 ~ 10 kA) が電極間に形成される。このアーク放電は、発生直後の段階では推進剤表面近傍に存在しており、アーク柱からの放射および高温粒

子の流入が熱輸送の主な担い手となって、推進剤表層部の蒸気化がなされると考えられている。この状態の後、電流ループによる自己誘起磁場とアーク電流とのローレンツ作用により、アーク柱自体は下流方向に加速・排出され、推力が発生する。このような機構により、固体 PPT においては推進剤供給用のタンクやバルブ、マニホールド等が必要なく、この簡便性が固体 PPT の最大の特徴であると言える。

しかしながら、プラズマ加速が行われるアーク放電の持続時間 (≈ アークが電極間に滞在する時間: ~ 30 μs) に比較して、推進剤表層部での熱輸送に要する時間 (100 μs オーダー) が長いと、推進剤の全蒸気化量のうちの多くの割合が放電終了後に放出され²⁻⁴⁾、有効な電離・加速がなされないと考えられている。これが Late-Time Vaporization (LTV) と呼ばれる現象であり、LTV ガスの排気速度は、ローレンツ加速によるプラズマ排気速度に比較して一桁以上小さいため、LTV 現象は固体 PPT の低推進性能の最も大きな要因の一つとなっている。

本稿では、この LTV ガスを効率的に電磁加速するための手段として、固体 PPT の二段放電動作 (Double Discharge Operation)⁵⁾ を提案するとともに、その初期実験の結果について報告する。

2. PPT の二段放電動作

本研究で提案する PPT の二段放電動作とは、1 回の推力発生動作の中で、μs オーダーの間隔で 2 回の連続した放電を発生させるものであり、1 段目の放電 (Primary discharge, PD) により生じた LTV ガスが電極間に残留している間に 2 段目の放電 (Secondary discharge, SD) を発

^{*1} © 2003 日本航空宇宙学会
平成 14 年 6 月 6 日原稿受理

^{*2} 日本学術振興会

^{*3} 九州工業大学工学部

第1図 二段放電動作用 PPT 回路

生させ、PD の LTV ガスを有効に電離・加速することを狙ったものである。本動作により、全推進剤消費量に対する LTV ガス割合の低下、および有効排気速度の増大が期待できるものと考えられる。本実験では、 $25\ \mu\text{s}$ の放電の後に $300\ \mu\text{s}$ 程度推進剤の蒸気化が持続したとする LTV 現象の測定結果例²⁾を参考にして、PD と SD の時間間隔 (Delay time, τ) を決定した。

第1図に PPT の二段放電動作用回路を示す。短時間間隔での連続放電は、PPT の陽極に接続された2系統のコンデンサおよび大容量サイリスタによって実現される。同図中、A-ch が PD 用、B-ch が SD 用のエネルギー導入回路であり、イグナイタへの着火信号と同時に、任意の時間間隔において A-ch と B-ch にそれぞれゲート信号を送ることにより、 μs オーダーの間隔での連続した二段放電動作を可能としている。ただし、本回路を用いることにより、通常の PPT の動作で生じる放電電流の反転成分は除去されるため、この反転電流により発生する推力分 (回路の抵抗やインダクタンスに依存するが、本実験の設定では全推力の 10% 程度) は、二段放電動作においては回路損失になると考えられる。

また、今回の二段放電動作実験では、PD および SD の両方でイグニッション放電を発生させたが、後述のように、SD におけるイグニッション放電の要否は、設定した放電間隔 τ に依存するものであった。

3. 実験装置および実験方法

本研究で使用した実験装置の概略を第2図に示す。真空槽は直径 $0.3\ \text{m}$ × 長さ $0.6\ \text{m}$ の円筒形であり、ターボ分子ポンプおよび油回転ポンプによる2段の真空排気がなされている。PPT 動作中の真空度は $0.5\ \text{Pa}$ 以下であった。また、コンデンサバンクを含めた電源系はすべて真空槽外に設置されており、これらは電流導入端子により真空槽内の PPT ヘッドに接続されている。このため、PPT 主放電回路のインダクタンスおよび抵抗は、他機関での研究と比較して大きな値となっている (単段放電動作の場合で、 $L \approx 2.5\ \mu\text{H}$, $R \approx 250\ \text{m}\Omega$)。

主な測定項目は、インパルスビット (1 回の推力発生動作による力積, I_b)、マスショット (1 回の推力発生動作により消費される推進剤重量, Δm)、および放電電流波形の

第2図 実験装置概要

第3図 PPT ヘッド

3 項目とした。インパルスビットは、文献 6) を参考に製作した微小推力測定用の推力振り子により測定し、各動作点での 5~6 回の測定値の単純平均をその動作点での測定結果とした。各条件におけるインパルスビットの測定誤差は最大約 30% であり、標準偏差の最大は約 $4\ \mu\text{N}\cdot\text{s}$ であった。また、マスショットは約 500 回の推力発生動作の前後における推進剤の重量変化から計算しており、この値については、予備実験において 5000 回の運転を行った場合との誤差が 10% 以内であることを確認している。比推力および推進効率、このインパルスビットおよびマスショットの測定結果から算出した。上記の測定誤差範囲は、第4章に後述する二段放電動作による性能変化量と同等のものであるが、第4章の議論は複数の投入エネルギー条件およびコンデンサ容量比条件における実験結果に基づくものであり、十分な再現性があるものと考えられる。放電電流波形は市販の電流プローブにより測定した。

第3図に本実験に用いた PPT ヘッドを示す。本スラスタは、推進剤に PTFE を用いた平行平板電極型 PPT であり、電極材料にはモリブデンを使用している。電極幅 d は陽極、陰極とも $15\ \text{mm}$ 、電極間隔 h は $30\ \text{mm}$ 、イグナイタ位置は推進剤端面から $5\ \text{mm}$ 下流とした。

実験の主な設定値を第1表に示す。本実験では、通常の PPT 回路を用いた単段放電動作 (Ordinary discharge operation)、および第1図の回路を用いた二段放電動作の両者を、総投入エネルギーを同等とした条件で比較した。全ての設定において総コンデンサ容量は約 $18.5\ \mu\text{F}$ であり、放電電圧

第 4 図 単段放電動作および各二段放電動作の放電電流波形 ($E \approx 23 \text{ J}$, $C_A/C_B = 2/2$ (for Double Discharge))

第 1 表 設 定 値

	Ordinary	Double discharge
Propellant	PTFE	PTFE
Total capacitance (μF)	18.5	18.5
Ignitor voltage (kV)	2.0	2.0
Discharge voltage (kV)	1.0–2.2	1.0–2.2
Capacitance ratio, C_A/C_B	–	4/0, 3/1, 2/2, 1/3
Delay time, t (μs)	–	0, 5, 100, 1000

を変化させることで総投入エネルギーを決定している。二段放電動作については、PD と SD との放電間隔 τ を主パラメータとし、本実験系の放電回路特性（放電持続時間 $\approx 25 \mu\text{s}$ ）および文献 2) を参考にして、PD と SD の発生を同時とする設定（ $\tau = 0 \mu\text{s}$ ）から、電極間の LTV ガスの存在がほぼ無視できると考えられる $\tau = 1000 \mu\text{s}$ までを比較した。（ $\tau = 5 \mu\text{s}$ については、当初 $\tau = 10 \mu\text{s}$ の設定としたものが、サイリスタへのゲート信号とイグナイタへの着火信号とのずれにより短くなったものである。）また、PD と SD のコンデンサ容量比 C_A/C_B は、4/0, 3/1, 2/2, 1/3 の 4 ケースとした。単段放電と二段放電ともに、動作間隔は約 1 s である。

4. 実験結果

4.1 二段放電動作の確認 単段放電動作時および二段放電動作時（ $\tau = 0, 5, 100, 1000 \mu\text{s}$ ）の PPT の放電電流波形の比較を第 4 図に示す。同図 (a) ~ (e) 全てにおいて総投

入エネルギー E は約 23 J であり、(b) ~ (e) の二段放電動作については $C_A/C_B = 2/2$ である。

同図 (a) より、単段放電動作では、通常の PPT のパルス放電において観察される減衰振動波形が得られている。（放電時間が $60 \mu\text{s}$ 程度と比較的長くかつ減衰が早いのは、既述のように放電回路のインダクタンスおよび抵抗が他機関において研究されている PPT^{1,7)} に比較して大きいためである。）これに対し、同図 (b) ~ (e) の二段放電動作では放電電流の負成分はほぼ 0 であり、コンデンサとスラスト陽極との間に設置したサイリスタにより、電流の反転が妨げられていることが確認できる。同図 (b) では、使用した回路は二段放電用であるが、放電間隔 τ が 0 であるため、ピークが 1 つの放電波形となっている。また、(c) についても、放電間隔 τ が放電の持続時間に比較して小さいため、1 ピークの波形が得られている。 $\tau = 100 \mu\text{s}$ と $\tau = 1000 \mu\text{s}$ の設定については、放電間隔が十分大きいので、独立した 2 つの放電ピークが観測された。

また、上記 (c) ~ (e) の各場合における SD 開始時のイグナイタの動作については、 $\tau = 1000 \mu\text{s}$ の設定では SD 用のイグニション放電によって SD 主放電が誘起されていたが、 $\tau = 5 \mu\text{s}$ および $\tau = 100 \mu\text{s}$ の場合には SD 用イグニションの前に（サイリスタにゲート信号が到達した時点で）SD 主放電が始まっており、この両者については SD 用イグニションは不要であることが確認された。この結果は、PD 開始後少なくとも $100 \mu\text{s}$ までは、電極間に PD による LTV

第2表 PD と SD のコンデンサ容量比によるインパルスビットの比較 ($E \approx 43 \text{ J}$, $\tau = 5 \mu\text{s}$)

Capacitance ratio, C_A/C_B	4/0	3/1	2/2	1/3
Impulse bit, I_b ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)	69	93	104	87

第5図 放電間隔によるインパルスビットの比較

ガスが存在することを示唆している。

次に、PD と SD のコンデンサ容量比 C_A/C_B (投入エネルギー比と等価) を変化させた場合のインパルスビットの比較を第2表に示す。ここではPD と SD との放電間隔 τ は $5 \mu\text{s}$ 、総投入エネルギー E は約 43 J とした。同表より、二段放電動作時のインパルスビットは、 $C_A/C_B = 2/2$ とした場合に最も大きく、 $C_A/C_B = 4/0$ の場合に最も小さいことが確認できる。これらのインパルスビットの違いは、A-ch または B-ch への電流の偏りにより、第1図に示した電気回路の抵抗成分による損失が変化することによって生じるものと考えられるが、その詳細な理解のためには今後さらに検討が必要である。

これらの結果により、今回設計・製作した二段放電用 PPT 回路が適正に作動したことが示された。以下では、インパルスビットが最大となった $C_A/C_B = 2/2$ の場合について、放電間隔 τ の影響に重点をおいて、PPT の二段放電動作による推進性能変化について述べる。

4.2 放電間隔の影響 単段放電動作および二段放電動作 ($\tau = 0, 5, 100, 1000 \mu\text{s}$) におけるインパルスビットと投入エネルギーの関係を示す。ここでは、投入エネルギー E を約 $10 \sim 31 \text{ J}$ ($\tau = 0 \mu\text{s}$ については約 $18 \sim 31 \text{ J}$) の範囲で設定しており、第4図に示した放電電流波形は本図中の 23 J 付近の各点に対応する。

第5図は、二段放電のインパルスビットが、その放電間隔に強く依存することを示している。単段放電 (Ordinary) を基準とした場合、 $\tau = 100 \mu\text{s}$ および $\tau = 1000 \mu\text{s}$ の場合のインパルスビットは全エネルギー領域において単段放電よりも小さいのに対し、 $\tau = 0 \mu\text{s}$ ではほぼ同等であり、 $\tau = 5 \mu\text{s}$ の場合には、 $E \approx 10 \text{ J}$ の点を除いて単段放電よりも大きなインパルスビットが得られている。以下に、推力簡易計算モデル⁸⁾ を用いて、この放電間隔の影響について考察する。

第3表 各放電間隔設定におけるインパルスビットの理論値と実験値との比較 ($E \approx 23 \text{ J}$, $C_A/C_B = 2/2$)

	Calculation ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)	Measurement ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)
$\tau = 0 \mu\text{s}$	121	44
$\tau = 5 \mu\text{s}$	118	51
$\tau = 100 \mu\text{s}$	92	35
$\tau = 1000 \mu\text{s}$	94	30
(Ordinary)	(108)	(46)

平行平板電極型 PPT の電磁作用による推力 T は、放電電流による自己誘起磁場の発生および両者の相互作用によるローレンツ加速が損失なく行われると仮定した場合、次式で表すことができる。

$$T(t) = \frac{\mu_0 J(t)^2}{2} \left(\frac{h}{d} \right) \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の誘電率、 $J(t)$ は各時間 t における放電電流、 h は電極間隔、 d は電極幅である。さらに、1回の推力発生動作によるインパルスビットは、放電持続時間を t_d として以下のように求まる。ここで、二段放電動作の場合の放電持続時間 t_d とは、PD 開始から SD 終了までの時間である。

$$I_b = \int_0^{t_d} T(t) dt \quad (2)$$

第4図 (b) ~ (e) の各設定における放電電流変化を上式に代入し、 $E \approx 23 \text{ J}$ でのインパルスビットを計算した結果を第5図中の測定結果とともに第3表に示す (第4図 (a) の単段放電については、使用回路が異なるため参考値として示した)。測定結果に比較して計算結果が2倍以上の値となっているのは、インパルスビットの算出において、放電電流による自己誘起磁場の発散成分およびローレンツ加速の推力軸方向外成分を考慮していないためである。

第3表中の計算結果は、放電チャネル内の放電・加速機構が全ての設定において同一と仮定したものであるため、これを測定結果と比較することにより以下の考察が可能である。まず $\tau = 0 \mu\text{s}$ と $\tau = 5 \mu\text{s}$ とを比較すると、放電電流波形がほぼ同様なために、両者のインパルスビットの計算値は同等であるが、実験値では $\tau = 5 \mu\text{s}$ の方が約 10% 大きい。この違いは、 $\tau = 0 \mu\text{s}$ の場合には PD と SD とが同時に発生するのに対し、 $\tau = 5 \mu\text{s}$ の場合には SD 開始時にすでに $5 \mu\text{s}$ 分の中性粒子群および荷電粒子群が推進剤近傍に存在しているために、その残留推進剤ガスが SD において電離・加速されたことに因るものと推察できる。

また、 $\tau = 100 \mu\text{s}$ と $\tau = 1000 \mu\text{s}$ の場合については、両者のインパルスビットが計算結果においても他の設定に比較して 25% 程度小さい。このことから、実験においてこの両者のインパルスビットが他の設定に比較して小さかった主な原因は、PD と SD とがそれぞれ独立した放電となったことで、エネルギー投入に要する時間が長くなった点にあると考えられる。一方、 $\tau = 100 \mu\text{s}$ と $\tau = 1000 \mu\text{s}$ のインパ

第 4 表 単段放電と二段放電との推進性能比較

	E (J)	I_b ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)	Δm (μg)	I_{sp} (s)	η_t (%)
Ordinary	44	81	5.9	1400	1.3
Double($\tau = 5 \mu\text{s}$)	43	104	6.2	1700	2.0

ルスビットを互いに比較した場合、放電・加速機構の違いを考慮していない計算値ではほぼ同等であるのに対し、実験結果では $\tau = 100 \mu\text{s}$ の場合の方が約 12% 大きい。この違いは、 $\tau = 100 \mu\text{s}$ の場合には、PD で生じた LTV ガスが SD 開始時に放電チャンネル内に残留しており、その一部が SD によって電磁加速されたことにより生じたものと考えられる。

これらの点から、二段放電動作を行うことによって推進剤ガスの電磁加速割合を増加させることが可能であると言える。ただし本実験の設定では、通常の PPT よりも大きなインパルスビットが得られたのは、PD と SD が 1 つの放電波形となる短時間の放電間隔の場合のみであった。以下に、優位性が見られた $\tau = 5 \mu\text{s}$ の場合について、単段放電との推進性能の比較を述べる。

4.3 単段放電と二段放電との推進性能比較 単段放電と二段放電 ($\tau = 5 \mu\text{s}$, $C_A/C_B = 2/2$) の両者について、投入エネルギーが約 43 J の点においてマッシュットおよびインパルスビットの測定を行い、推進性能を求めた。両者の比較を第 4 表に示す。同表より、二段放電 ($\tau = 5 \mu\text{s}$) の場合には、単段放電と比較して 25% 以上大きいインパルスビットが得られていることが分かる。この違いは、投入エネルギーが大きいほど両者のインパルスビットの差が広がるとする第 5 図の傾向と一致するものである。このインパルスビットの違いに対し、両者のマッシュットの差は約 5% であることから、二段放電を用いたことにより、推進剤消費の増加を伴わずにインパルスビットが増大したことが確認できる。この結果は、二段放電の適用により PPT の推進性能全般の向上が可能であることを示すものである。

また、比推力が推進剤ガスの有効排気速度に比例することを考慮すると、第 4 表に示される二段放電動作 ($\tau = 5 \mu\text{s}$) による比推力の増加は、有効排気速度の増大を表すと言える。この結果は、第 3 表より得られた推察を支持するものであり、二段放電動作の適用により、全推進剤蒸気化量のうち電磁加速される推進剤ガスの割合が増加したものと考えられる。

4.4 今後の課題 上述の結果により、PPT への二段放電動作の適用は、蒸気化した推進剤を有効に電離・加速するために有効であることが示された。しかしながら現段階では、放電チャンネル内および電気回路部での現象には不明確な点があり、定量的な説明がされていない問題が多い。こ

れらの問題を検討するためには、放電部の荷電粒子や中性粒子の物性を高速度カメラやプローブ診断等により測定し、投入したエネルギーの各物理過程への配分状態を評価することが必要である。また、電気回路部の抵抗およびインダクタンスを小さくすることで単位時間あたりの放電部へのエネルギー投入量を増加させ、推進性能の向上を図ることも今後の課題である。

5. ま と め

パルス型プラズマスラスタの性能低下要因の 1 つと考えられている Late-Time Vaporization を軽減する手段として二段放電動作を提案し、その初期実験を行った。二段放電動作用の電気回路は、2 系統のコンデンサおよび大容量サイリスタにより構成され、放電電流波形の測定により同回路が適正に動作することが確認された。さらに、放電間隔をパラメータとした実験を行った結果、二段放電動作の適用により、電磁加速される推進剤ガスの割合が増加することが示され、これには Late-Time Vaporization ガスの利用も含まれることが示唆された。また、二段放電の放電間隔を放電時間に比較して短く設定した場合には、単段放電の場合よりも、インパルスビット、比推力および推進効率が上昇することが確認され、適正なパラメータの選択により、推進性能全般の向上が可能であることが示された。今後は、放電回路の改良により更なる推進性能の向上を図るとともに、放電チャンネル内の詳細な現象評価を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) Burton, R. and Turchi, P.: Pulsed Plasma Thruster, J. Propul. Power, **14** (1998), pp. 716-735.
- 2) Spanjers, G., McFall, K., Gulczynski III, F. and Spores, R.: Investigation of Propellant Inefficiencies in a Pulsed Plasma Thruster, AIAA Paper 96-2723, 1996.
- 3) Spanjers, G., Malak, J., Leiweke, R. and Spores, R.: Effect of Propellant Temperature on Efficiency in the Pulsed Plasma Thruster, J. Propul. Power, **14** (1998), pp. 545-553.
- 4) Mikellides, P. and Turchi, P.: Modeling of Late-Time Ablation in Teflon Pulsed Plasma Thrusters, AIAA Paper 96-2733, 1996.
- 5) Okada, M., Okawa, Y. and Tachibana, T.: Double Discharge Operation for Pulsed Plasma Thrusters, 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC Paper 01-156, 2001.
- 6) Yanagi, R. and Kimura, I.: A New Type Target for the Measurement of Impulse Bits of Pulsed Plasma Thrusters, AIAA Paper 81-0712, 1981.
- 7) Igarashi, M., Kumagai, N., Sato, K., Tamura, K., Takegahara, H., Okamoto, H., Wakizono, T. and Hashimoto, H.: Performance Improvement of Pulsed Plasma Thruster for Micro Satellite, 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC Paper 01-152, 2001.
- 8) Jahn, R.: Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 269-272.