

8J 級電磁加速型同軸パルスプラズマスラスタの中心軸陽極の影響

Effects of Central Anode of 8J-Class Electromagnetic Coaxial Pulsed Plasma Thruster

○野々村 健吾・中山 絢斗 (梨大・院)・村野 聡 (梨大・学)・青柳 潤一郎 (梨大)

○Kengo Nonomura・Kento Nakayama・Akira Murano・Junichiroh Aoyagi (The University of Yamanashi)

Abstract (概要)

In the University of Yamanashi, we began to study 8 J-class electromagnetic pulsed plasma thruster (PPT). Typical configuration of electromagnetic PPT is parallel plate. It has potential of loss of performance from leak of plume toward sides. Then we designed electromagnetic PPT which is consisted of cylindrical outer cathode and columnar central anode. In basic experiment, we confirmed that ablation surface was not charred when energy density was $0.23\text{J}/\text{mm}^2$. Moreover we evaluated effects of material and diameter of anode. In $\phi 2$ mm-brass and $\phi 1$ mm-tungsten, mass shot and mass of consumed anode, impulse bit, specific impulse and thrust efficiency are $12 \sim 19 \mu\text{g}/\text{shot}$ and $0.04 \sim 0.06$ g, $90 \sim 130 \mu\text{Ns}$, 500 s and $3 \sim 4\%$, respectively. And these performances were constant through 10,000 shots operation. On the other hand, $\phi 1$ mm-brass showed performance like electrothermal PPT. Its performances were $74 \mu\text{g}/\text{shot}$ and 0.13 g, $330 \mu\text{Ns}$, 380 s and 7.5% , respectively. And these performances kept increasing during the experiment. And we observed spontaneous discharges in each condition.

1. 導入

近年、大学や民間企業による小型人工衛星の打上げ数が増加している。小型人工衛星を運用していく中で、軌道修正や姿勢制御が必要となり、推進機を搭載する必要性がある。しかし、小型人工衛星は質量や体積、電力などの制約が厳しく、従来の液体およびガスを利用する推進機では、燃料を貯蔵するタンクや配管類を必要とし、部品点数や質量、体積の負荷が比較的大きくなる。そこで、これらの制約を低減することができる固体推進剤を利用したパルスプラズマスラスタ (以下、PPT) が注目を集めている。

PPTは、電磁加速型と電熱加速型に大別される。山梨大学では、2014年に研究室が発足して以来、主に電熱加速型PPTについて研究してきたが、2016年度から電磁加速型PPTの研究にも着手し始めた。電磁加速型PPTとしては、背面供給機構を備えた平行平板型の構造が主流である。しかし、平行平板型では構造上側面からのプルームの漏れによる推進性能の損失が考えられる。絶縁材などで側面に壁を設けることも可能だが、推進剤として主に用いられているPTFEの昇華時に生じる炭素が壁面に付着することで電極間の短絡に繋がる可能性が高い。また、スラスタヘッドの周囲をハウジングで囲うことが推力に与える影響が評価されたが、ハウジングにプルームが衝突することにより推進性能が下がることが報告されている¹⁾。中には、両側面

から推進剤を供給する方式もあるが²⁾、背面供給型と比較して質量および体積の増加は避けられない。そこで、従来の平行平板型PPT同様に、推進剤の背面供給を維持し、同軸状に電極を配置することでプルームの漏れる要素を取り除いた電磁加速型PPTを検討することとした。同軸状の電極配置では、固体推進剤を用いたMPDスラスタを代表に、外円筒電極をアノード、中心軸電極をカソードとし、中心軸電極からイグナイタなどの点火機構を挿入するものがあるが²⁾、中心軸電極の寸法は制限される。また、本研究室において同様の電極配置で外円筒電極にイグナイタを挿入する方法を試みたが、トリガ放電がアノードに落ちることで、主放電用キャパシタの故障を誘発し得ることを確認している。一方で、同電極配置でイグナイタを用いずに、電極間が短絡する電圧を印加することでトリガ放電および主放電を誘起するものもあるが、非常に高い電圧が必要であることが報告されている³⁾。電極を三層構造にすることで、低電圧でのトリガ放電および主放電の誘起をすることも可能だが、構造が複雑になるという課題もある³⁾。以上の経緯から、外円筒電極をカソード、中心軸電極をアノードとし、カソードからイグナイタを挿入した電磁加速型同軸PPTについて研究することとした。

本報告では、投入エネルギーを8Jとした電磁加速型同軸PPTについての基礎的な研究と、その結果に基づいて製作したPPTのアノード径および材質を変更することが各種性

能に与える影響について述べる。

2. 電磁加速型同軸 PPT の概要

電磁加速型同軸 PPT の概略図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 に示すように外円筒電極をカソード、中心軸電極をアノードとし、推進剤として円筒形状の PTFE を挿入した構造である。初期ジオメトリにおける推進剤の昇華面は、アノードの端面と同一平面上とした。これは、先行研究でアノードの先端とカソードの先端（ブルームの排出口）を同一平面上に配置した場合、推進剤の昇華が妨げられ、かつ、インパルスビットの低下が見られるなど、アノードの露出が推進性能の低下につながることを確認したためである⁴⁾。また、イグナイタをカソードから挿入し、動作試験中の任意のタイミングでデータ取得をするために、任意のタイミングで点火を行えるようにした。さらに、電磁加速を促進させることと、ブルームの排出角度をある程度制限するために一定長の初期チャンネルを設けた。

動作原理は、従来の電磁加速型 PPT と同様にイグナイタによるトリガ点火により推進剤の一部を昇華させ、電極間を導通させることで主放電を誘起する。主放電電流により、さらなる推進剤の昇華が起こり、同時に誘起される自己誘起磁場によりプラズマにローレンツ力が働く。このプラズマが外部へ排出されることにより推力が形成される。

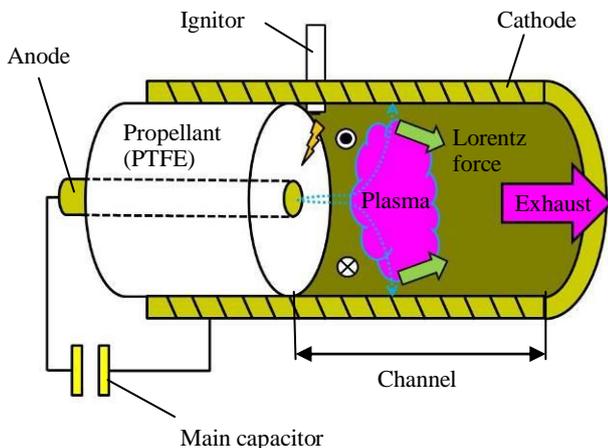


Fig. 1 Schematic of electromagnetic coaxial PPT

3. エネルギー密度の調査

3.1 概要 基礎的な実験として、投入エネルギーに対して昇華面が炭化しないエネルギー密度を調査した。Table 1 に実験および初期評価条件を示す。ここで、初期チャンネル長を 20 mm と設定したが、同軸状の電極配置を有した PPT で推進剤昇華面が排出口から 20 mm の位置においてプラズマと中性子の排出角度が 60° 程度で、おおよそ一致するという結果に基づいて決定した³⁾。Table 1 には示していないが推進剤の長さは 10 mm とし、カソード後部端面から 5 mm 挿入している。また、上限ショット数を 10,000 ショットとして各実験を行った。

Table 1 Conditions for evaluation of energy density

Condition	No. 1	No. 2	No. 3
Input energy, J		8	
Channel length, mm		20	
Max. shot number, shot		10,000	
Degree of vacuum, Pa		$10^{-2} \sim 10^{-3}$	
Propellant	inner diam., mm	5	2
	outer diam., mm	15	10
Aria of ablation surface, mm ²	157	75	35
Energy density, J/mm ²	0.05	0.11	0.23

3.2 実験機器 Fig. 2 と Fig. 3 にそれぞれ、実験系の概略図と実際に真空チャンバ内に設置した際の様子を示す。インパルスビットの測定は、PPT ヘッドから排出されたブルームを振り子式スラストターゲットで捕え、スラストターゲットの振れ幅をレーザ変位計で検出し、オシロスコープにより観測する。インパルスビットと振り子式スラストターゲットの振れ幅の関係は較正済みである。また、主放電電流波形の計測にはログウスキーコイルを用いた。ログウスキーコイルで検出した信号は積分回路を介してオシロスコープに表示することで観測する。ログウスキーコイルによる検出電圧と主放電電流の関係についても較正済みである⁵⁾。

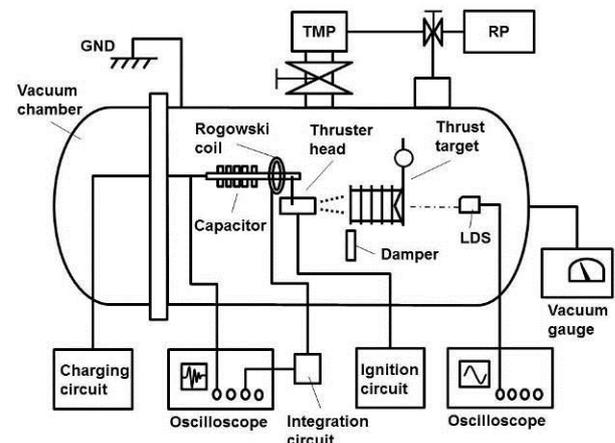


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

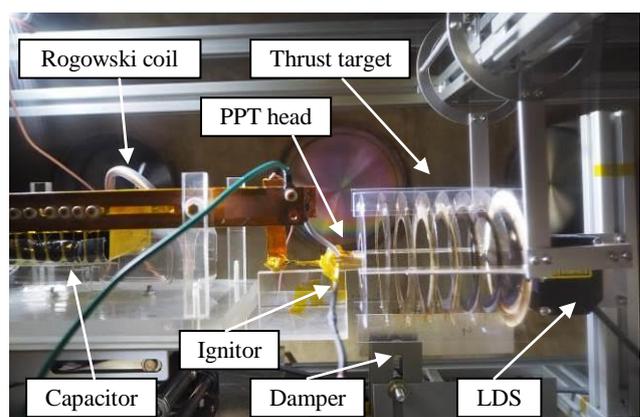


Fig. 3 Experimental apparatus in vacuum chamber

3.3 エネルギー密度 10,000 ショット後の昇華面の様子を Fig. 4 (a)から(c)に示す。エネルギー密度が 0.05 J/mm^2 の場合、昇華面の半分以上に炭化が見られた。また、エネルギー密度を 0.11 J/mm^2 とした場合は、昇華面の半径 4 mm から 5 mm の領域の炭化が確認された。一方で、エネルギー密度が 0.23 J/mm^2 の場合は、昇華面の炭化は確認されなかった。ただし、エネルギー密度を $0.11, 0.23 \text{ J/mm}^2$ とした実験では、推進剤が主放電により後退していないか確認するために、 5 mm オフセットした位置から後方は推進剤の外径を 1 mm 大きくし、この張り出した面をカソード後部端面に抑え付けている。同様の形状を有した PPT (推進剤外径: 6.35 mm , 内径: 約 1.8 mm) では、エネルギー密度が約 0.20 J/mm^2 (投入エネルギー: 6 J) において昇華面に炭化が発生しないことが報告されており^{3,6)}、本研究で製作した PPT と概ね一致する。一方、小型の平行平板型 PPT において昇華面が炭化しないためのエネルギー密度として報告されていた 0.0093 J/mm^2 を 0.22 J/mm^2 も上回った⁷⁾。これらのことから、電磁加速型同軸 PPT は平行平板型 PPT より大きなエネルギー密度を必要とすると考えられる。

Fig. 5 に、エネルギー密度を 0.23 J/mm^2 とした実験の 10,000 ショット後の推進剤断面を示す。Fig. 5 より、推進剤とカソードが接している推進剤外縁付近での昇華が著しく悪いことが確認された。また、アノードの損耗も見られた。Table 2 にエネルギー密度を 0.23 J/mm^2 とした実験の推進剤とアノードの消費量を示す。ただし、この実験では、アノードの質量測定は行わなかった。



(a) 0.05 J/mm^2 (b) 0.11 J/mm^2 (c) 0.23 J/mm^2
Fig.4 Ablation surfaces after 10,000-shot operation



Fig. 5 Cross section of propellant and anode after 10,000-shot operation (Energy density: 0.23 J/mm^2)

Mass shot of propellant, $\mu\text{g}/\text{shot}$	Consumed anode	
	mass, g	length, mm
13.3	-	0.5

Note: condition No.3: energy density was 0.23 J/mm^2

4. 中心軸陽極の影響評価

4.1 概要 3.3 項で示した不均一昇華は、推進剤の供給機構を考慮する際に支障となり得る。同様に 3.3 項で示したアノード形状の変化は、放電や推進剤の昇華に影響を及ぼすことが考えられる。以上の 2 点を評価および改善することで、推進剤の昇華と電極の損耗の進行度を均一にし、その上で供給機構を設けることにより初期ジオメトリを維持し、推進性能を安定させることを目標とした。

4.2 評価条件および方法 アノードの材質および径が推進剤の昇華と推進性能に与える影響を評価するために、 $\phi 2 \text{ mm}$ と $\phi 1 \text{ mm}$ の真鍮および $\phi 1 \text{ mm}$ のタングステンを用いて比較を行った。Table 3 に各実験条件を示す。また、製作した PPT ヘッドを Fig. 6 に示す。ここで、Table 3 には示していないが推進剤の長さは 10 mm から 35 mm に変更し、カソード後方から 20 mm 挿入している。ただし、その他の条件は Table 1 に示したものと同様である。

インパルスビットは 1 から 5 ショットおよび 98 から 102, 498 から 502, 998 から 1,002, 以降 $1,000$ ショット毎に前後 2 ショットを含め計 5 ショット、最後に 9,996 から 10,000 ショットの計測を行った。また、インパルスビットの測定と同時に、主放電電流波形をログウスキーコイルにより検出し、プルームの放出の様子の撮影も行った。同様に、推進剤昇華面および断面とアノードの撮影も行った。推進剤およびアノードの質量は、実験前後に測定した。使用した実験機器は、3.2 項に示したものと同様である。



Fig. 6 Exterior of PPT head

Table 3 Conditions for evaluation of effects of anode

Condition	No. 4	No. 5	No. 6
Propellant	outer diam., mm	7	
	inner diam., mm	2	1
Material of anode	Brass	Brass	Tungsten 2% ceriated

Note: Parameters of condition No.4 is the same as those of condition No.3 except for length of propellant

4.3 推進剤の昇華およびアノードの損耗 Fig. 7 (a)から(c)に 10,000 ショット後の推進剤の下流側および断面の様子を示す。また、Fig. 8 にアノードの実験前後の様子を示す。さらに、Table 4 にマッシュットとアノードの質量および長さの減少量の平均値を示す。ここで、マッシュットは推進剤の昇華量を示し、アノードの損耗は含めていない。Fig. 7 (a)および Fig. 8 (a)を見ると、Fig. 5 で見られた断面とほとんど一致している。また、Table 2 と Table 4 を比較す

ると推進剤とアノードの消費量も同様の傾向を示していることが分かる。これらのことから、推進剤の長さおよび挿入深さによる影響はほとんどないと考えられる。Fig. 7 (b) および Fig. 8 (b) を見ると、 $\phi 1$ mm の真鍮を用いた場合は、陽極および推進剤の消費が大きいことが確認できる。これは、アノード径が小さくなったことで、アノードへの熱流束が大きくなり、陽極が激しく損耗したことで電熱加速型同軸 PPT の電極配置に近づいたためである。Fig. 7 (a), (c) および Fig. 8 (a), (c) をそれぞれ比較すると、 $\phi 1$ mm のタングステンを用いた場合は $\phi 2$ mm の真鍮を用いた場合より推進剤を多く消費しているが、アノードの損耗は同様の傾向を示していることが分かる。また、Fig. 7 (b), (c) および Fig. 8 (b), (c) をそれぞれ比較すると、融点が高いタングステンを用いることでアノードの損耗を抑えることができることが分かる。以上より、アノードの材質と径を調整することで推進剤の昇華およびアノードの損耗の進行度を調整できることを確認した。しかし、本研究で実施した3条件では、推進剤外縁付近の昇華は改善されなかったため、今後更なる調査が必要である。

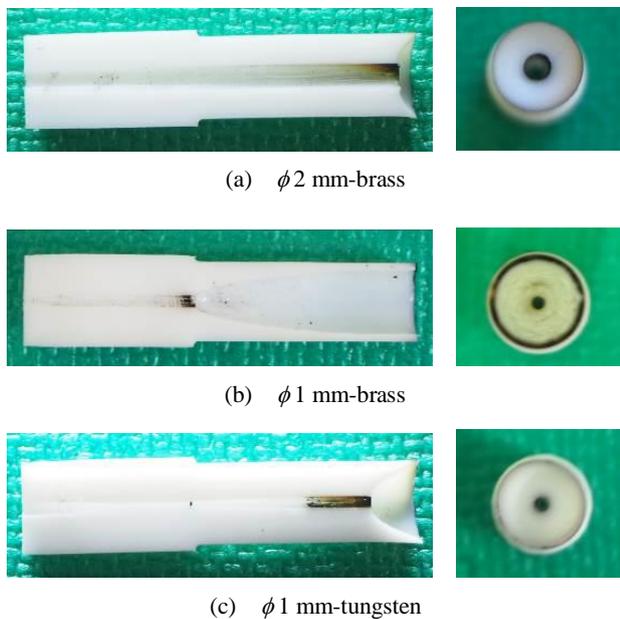


Fig. 7 Propellants after 10,000-shot operation
(Left: Cross section, Right: View from downstream)

4.4 ブルーム Fig. 9 (a)から(c)に各条件での典型的なブルームの排出の様子を示す。Fig. 9 (b)を見ると、 $\phi 1$ mm の真鍮を用いた場合は、緑色に発光したブルームが観測された。これは、アノードが激しく損耗したことが影響したと考えられる。また、ショット数が増加するに連れて緑の濃さが減少し、赤色に発光した領域がブルーム内に見られた。これは、電極が激しく損耗し、推進剤の昇華面積が増加したことでアノードの損耗がブルームの発光色に与える影響が小さくなったことと、真空度が実験前後で 1.0×10^{-2} Pa から 5.0×10^{-3} Pa へ変化したことの二つに起因すると考えられる。一方で、 $\phi 1$ mm のタングステンを用いた場合は、

少し赤紫色に発光したブルームであったが、 $\phi 2$ mm の真鍮と大きな違いは見られず、10,000 ショット間での発光色の変化はなかった。ただし、時折タングステンあるいは含有するセリア（酸化セリウム）だと考えられる発光体の排出現象が見られた。そこで、この排出現象が確認された場合とその前後の排出現象が確認されなかった場合のインパルスビットを比較したが、 $10 \mu\text{Ns}$ 程度の増減で、大きな変化は見られなかった。

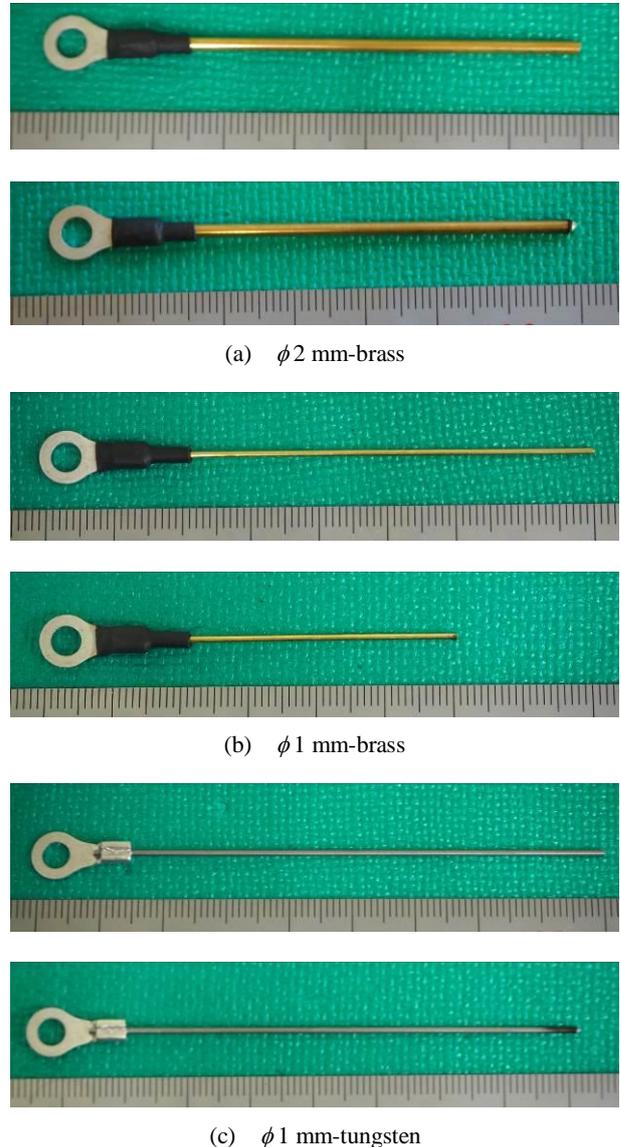
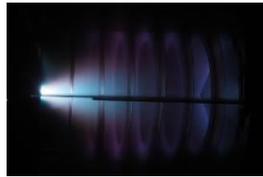


Fig. 8 Anodes before and after experiment
(Upper: Before expt., Bottom: After expt.)

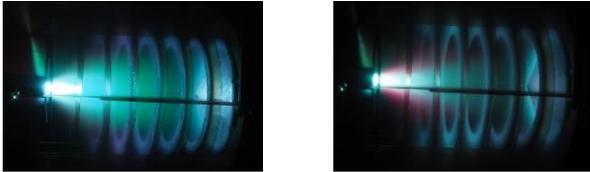
Table 4 Consumption of propellant and anode

Condition	No. 4	No. 5	No. 6
Mass shot of propellant, $\mu\text{g}/\text{shot}$	14	74	17
Consumed anode	length, mm	0.5	20
	mass, g	0.04	0.13

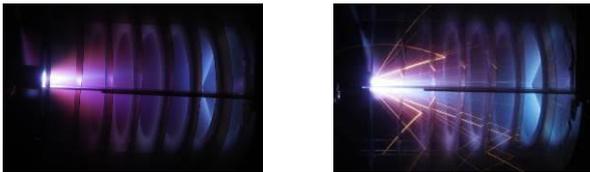
Note: condition No. 4: $\phi 2$ mm-brass, condition No. 5: $\phi 1$ mm-brass, condition No. 6: $\phi 1$ mm-tungsten



(a) ϕ 2 mm-brass (5,000th shot)



(b) ϕ 1 mm-brass (Left: 100th shot, Right: 5,000th shot)



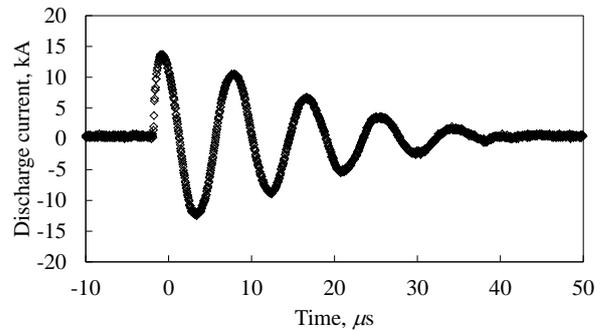
(c) ϕ 1 mm-tungsten

(Left: 5,000th shot, Right: Emission of Luminous bodies)

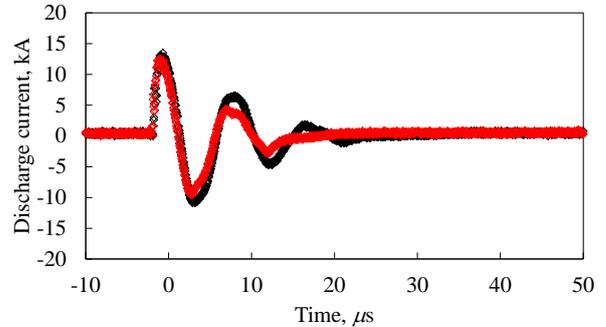
Fig. 9 Typical plume of each expt. (SS 1.6, F 10, ISO 200)

4.5 主放電電流波形 Fig. 10 (a)から(c)に各条件における典型的な主放電電流波形を示す。 ϕ 2 mm の真鍮を用いた場合は、正に 5 回のピーク数を持つダンピングが確認され、放電時間は約 40 μ s であった。これらの値は 10,000 ショット間で大きな変化は見られなかった。一方、 ϕ 2 mm の真鍮を用いた場合は、初期段階では 3 回の正のピーク数を持つ波形であったが、ショット数の増加につれて 2 回の正のピーク数を持つ放電波形へと推移した。また、放電時間は約 25 μ s から 15 μ s へと推移した。これらのことから、電熱加速型 PPT に近い性質を有することが分かる。 ϕ 1 mm のタングステンをを用いた場合は、正のピーク数が 4 回と 5 回の場合が見られたが、概ね ϕ 2 mm の真鍮を用いた場合の放電波形と同様の傾向を示した。一般的に、電磁加速型 PPT では電熱加速型 PPT と比較してダンピング数が多いことから、本研究で製作した PPT の推力形成機構は電磁的な依存度が高いと思われる。また、各条件ともに最大電流は 15 kA 前後であった。

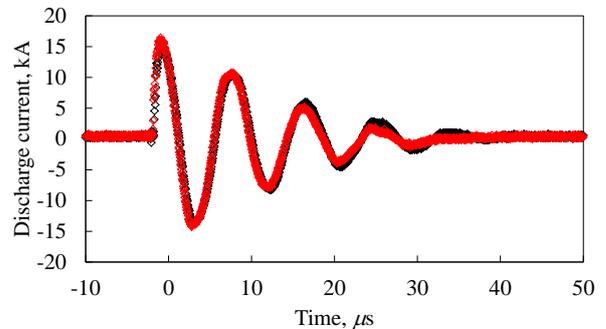
4.6 推進性能 Fig. 11 に各条件および本研究室で製作した同投入エネルギー、同昇華面積の平行平板型 PPT⁵⁾ のインパルスビットの推移を示す。ただし、 ϕ 2 mm の真鍮を用いた実験では一度だけ、その他の実験で用いたものと異なる振り子式スラストターゲットを使用してインパルスビットの計測を行っている。Fig. 11 を見ると、 ϕ 1 mm の真鍮を用いた場合は、1 から 1,000 ショットの間で約 100 μ Ns の増加し、その後 10,000 ショットまでにさらに 50 μ Ns 程徐々に増加する傾向が確認できる。これは、アノードの損耗が激しかったために昇華面が増加したことによる影響だ



(a) ϕ 2 mm-brass (5,000th shot)



(b) ϕ 1 mm-brass (Black: 20th shot, Red: 500th shot)



(c) ϕ 1 mm-tungsten (Black: 5th shot, Red: 500th shot)

Fig. 10 Wave forms of main discharge current

と考えられる。また、アノードの損耗に伴い電熱加速型同軸 PPT に近い電極配置に位置関係が変化していくために、電磁的な加速より気体力学的な加速の影響が大きくなったと考えられる。 ϕ 2 mm の真鍮と ϕ 1 mm のタングステンをを用いた場合は、インパルスビットの推移およびその他の性能に関して同様の傾向を示した。ただし、 ϕ 1 mm のタングステンをを用いた場合では、4,000 ショット以降から 10,000 ショットまでに 10 μ Ns 程のインパルスビットの増加が見られた。このことから、ショット数の増加に伴いアノードの損耗が進行すると ϕ 1 mm の真鍮を用いた場合と同様の傾向を示す可能性がある。 ϕ 2 mm の真鍮を用いた場合も、10,000 ショット間でのインパルスビットの顕著な増加は見られなかったが、数万から数十万ショットの試験を行った際に同様の傾向を示す可能性は十分考えられる。また、 ϕ 2 mm の真鍮を用いた場合は他の条件より標準偏差が大きい

ことが見てとれるが、これは、異なる振り子式スラストターゲットを使用したことが影響していると考えられる。 $\phi 2$ mmの真鍮と $\phi 1$ mmのタングステンをを用いた場合は、平行平板型 PPT のインパルスビットに比べて 1.5 から 2.0 倍程度高く、 $\phi 1$ mmの真鍮を用いた場合は5倍程度高い値を示した。

次に、各条件および本研究室で製作した平行平板型 PPT⁵⁾ (PP-PPT と表記) のインパルスビットおよび比推力、推進効率を Table 5 に示す。Table 5 に示す各値は、10,000 ショット間の平均で、標準偏差の大きい最初の 5 ショットの計測値を除いて算出した。また、比推力および推進効率を算出する際にはアノードの損耗も考慮している。Table 4 から分かるように、 $\phi 2$ mmの真鍮と $\phi 1$ mmのタングステンをを用いた場合は、平行平板型 PPT と比べて比推力は3分の1程度と低く、推進効率も2から3%程劣る傾向が見られた。以上から、本研究で製作した PPT は電磁加速型と電熱加速型のおおよそ中間の性質を有すると考えられる。

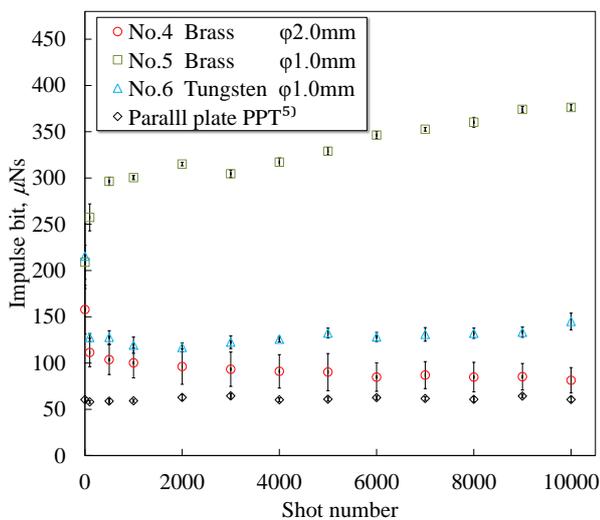


Fig. 11 Transition of impulse bit

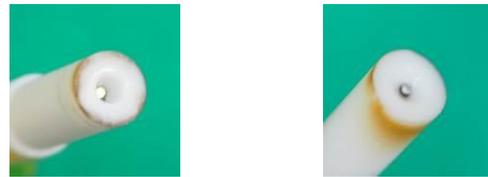
Table 5 Thrust performances

Condition	No. 4	No. 5	No. 6	PP-PPT ⁵⁾
Impulse bit, μNs	90	330	130	60
Specific impulse, s	550	380	500	1700
Thrust efficiency, %	3.0	7.5	4.0	6.0

Note: condition No. 4: $\phi 2$ mm-brass, condition No. 5: $\phi 1$ mm-brass, condition No. 6: $\phi 1$ mm-tungsten

4.7 動作安定性 $\phi 2$ mmの真鍮を用い場合において、200 から 300 ショットで数十回、6,400 から 7,100 ショット間で数回の自走放電が確認された場合があった。数回の自走放電後は安定したために実験を継続したが、これは、自走放電により電極の形状が変化することで自走放電が収まったと考えられる。一方で、 $\phi 1$ mmの真鍮を用いた場合は520 ショット以降に、 $\phi 1$ mmのタングステンをを用いた場合においても965 ショット以降に自走放電が連発し止まらなくなったために実験を終了した場合があった。実験を終了した上記の2条件においては、その後推進剤の昇華面を確

認したが (Fig. 12 (a), (b)), 特筆するような目立った炭化は確認できなかった。このことから、自走放電はアノードの損耗による形状変化に起因するものと考えられる。しかし、10,000 ショット間に1度も自走放電が見られなかった場合もあり、詳しい原因は調査中である。



(a) $\phi 1$ mm-brass (b) $\phi 1$ mm-tungsten
Fig. 12 Ablation surfaces after spontaneous discharge

5. 結論

本研究では、8 J級電磁加速型同軸パルスプラズマスラストについて、昇華面に炭化が発生しないエネルギー密度の調査およびアノードが推進剤の昇華と推進性能に与える影響の評価を行った。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- エネルギー密度を 0.23 J/mm^2 とした場合、推進剤の昇華面に炭化が見られなくなった。
- $\phi 1$ mmの真鍮をアノードに用いた場合、アノードの損耗が激しく、電熱加速型同軸 PPT と類似した推進性能を示した。
- $\phi 2$ mmの真鍮と $\phi 1$ mmのタングステンをアノードに用いた場合は、同様な推進性能を示し、従来の平行平板型 PPT と比べてインパルスビットが数十 μNs 程度高く、比推力は3分の1程度で、推進効率も数%程度劣る傾向を示した。
- アノードの損耗による形状変化によって、自走放電を誘発する可能性があることを確認した。

今後、長期作動における推進剤の昇華およびアノードの損耗傾向を把握するために、数十万から数百万ショットの長期試験を行う予定である。また、推進剤が均一に消費される条件を調査し、改善され次第、供給機構を導入する予定である。

参考文献

- 1) K. Kawahara, N. Kumagi, K. Sato, K. Tamura, T. Koide, K. Harima, T. Fukushima, H. Takegahara, "STUDY ON PLUME CHARACTERISTICS OF PULSED PLASMA THRUSTER", 28th International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France, IEPC-03-0160, 17-21 March, 2003.
- 2) R. L. Burton, P. J. Turchi, "Pulsed Plasma Thruster", Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, September - October, 1998
- 3) Gregory G. Spanjers, Daron R. Bromaghim, Capt. James Lake, Michael Dulligan, David White, John H. Schilling, Stewart Bushman, Erik L. Antonsen, Rodney L. Burton, Michael Keidar, Iain D. Boyd, "ARRL MicroPPT Development for Small Spacecraft Propulsion", 38th

AIAA/ASME/SAE/ASEE joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, Indiana, AIAA 2002-3974, 7-10 July, 2002

- 4) 野々村健吾, 「電磁加速型パルスプラズマスラスタの同軸状電極配置による影響評価」, 山梨大学工学部機械工学科平成 28 年度卒業論文, 2017
- 5) 村野聡, 「パルスプラズマスラスタの主放電測定装置の設計・評価と作動実証」, 山梨大学工学部機械工学科平成 29 年度卒業論文, 2018
- 6) Michael Keidar, Iain D. Boyd, Erik L. Antonsen, Frank S.

Gulczinski III, Gregory G. Spanjers, “Propellant Charring in Pulsed Plasma Thrusters”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 6, November - December, 2004, pp. 978-984

- 7) 三村大樹, 「平行平板型パルスプラズマスラスタのスケーリング則および磁場印加における性能評価」, 首都大学東京大学院システムデザイン研究科システムデザイン専攻博士前期課程航空宇宙システム工学域平成 23 年度学位論文 (修士), 2012