一 論 文

パルス型テフロン・プラズマ・スラスタの性能向上に関する研究^{*1}

(その1) 外部磁場の効果

Performance Improvement Study of Pulsed Teflon Plasma Thruster

(Part I) Effects of Applied Magnetic Field on Performance

竹ヶ原 春 貴^{*2}・大 塚 健 功^{*3}

Haruki TAKEGAHARA and Takenori OHTSUKA

Key Words: Electric Propulsion, Plasma Thruster, Teflon

Abstract

The effects of DC applied magnetic fields and the configuration of the discharge-channel on the performance of teflon PPTs which input energy is 15 J, 30 J and 125 J, respectively, were studied. The results of the experiments showed that, when the accelerating magnetic field was applied, high specific impulse (~ 4000 s) and high thrust efficiency ($\sim 34\%$) can be achieved and also, both impulse bit and mass shot were decreased. When the electrode length was elongated than the propellant channel length, impulse bit and mass shot were decreased and specific impulse and thrust efficiency were increased. The results of the measurements of propellant vaporization distribution along streamwise direction suggested that the cause of improvement of specific impulse and thrust efficiency by the elongation of electrode is the suppression of excessive propellant sublimation at the propellant-channel end.

1. 結 言

一般に電気推進は、推進剤に電気エネルギーを加えて推進剤を電離・プラズマ化し、電磁氣的・空気力学的な力または静電的な力によってこれを加速し、反力としての推力を得ることにより、その推進性能の向上を図ろうとするものである。

電気推進は、従来の液体・固体等の化学推進に比較し、高比推力・低推力を特徴としており、そのため搭載推進剤重量が寿命に対する大きな要因となる衛星等の二次推進系、宇宙機が必要速度増分を獲得するのに要する時間的制約が少ない輸送ミッションまた、より

大きなペイロード比または最終到達速度を必要とするような輸送ミッションにおいては有望な推進方式である。このため、大型衛星・構造物の長期間にわたる軌道上での位置制御、ドラッグ・フリー、軌道変換(OTV) また、惑星間航行等の長距離ミッション用主推進機を目標として、これまでに各国で静電加速型のイオン・スラスタ、電磁加速型のMPDスラスタや電熱加速型のアーク・ジェットなどの電気推進機の研究開発が進められている。

パルス型テフロン・プラズマ・スラスタ(テフロンPPT)は、固体のP.T.F.E.(ポリテトラフルオロエチレン:商品名テフロン®)を推進剤とする電磁加速型の電気推進機である。1968年にアメリカのW. J. GumanとP. E. Pekoによってその原理が発表され¹⁾、以後LES-6(米国)²⁾、ETS-IV(日)³⁾等に搭載され、研究開発が進められてきた。推進剤としては開発初期より各種のワックスやプラスチック、テフロンに金属粒子を混入したもの等も研究されてきたが、宇宙空間での取り扱い易さ、スラスタとして得られる比推力や推進効率の点で、現在テフロンが最良とされている。テフロンは単量体で分子量100程度、重合体で分子量が数万にもなる巨大分子性のポリマーであり、化学的に極めて安定であるうえにイオン化ポテンシャルが10.3 eVと希ガスに比べて低く、昇華性を備えている(327°Cでゲル化、640°Cでガス化する)ため、宇宙空間における用途に適している。テフロンPPTは、化学的に安定な固体のテフロンを推進剤とすることで、以下のような特長を有している。

- (1) 宇宙機器での使用実績があり、構造が簡単で小型、軽量化が図れる。
- (2) 作動までの所要時間が短く、デューティ・サイクルが短い。
- (3) 任意の時間間隔で微小推力を発生するため、

^{*1} 平成4年12月8日、第36回宇宙科学技術連合講演会で発表。平成4年11月12日原稿受理

^{*2} 東京都立科学技術大学航空宇宙システム工学科

^{*3} 石川島播磨重工業(株)技術研究所航空宇宙開発部

第1図 テフロンPPT 概略

第2図 テフロンPPT 開発状況

要求に応じた合計推力を正確に発生できる。

- (4) 推進剤の貯蔵場所が必要なく、燃料供給系の配管、あるいは高速作動弁、およびそれらのシールが不要である。
- (5) 過酷な宇宙環境下で推進剤が安定であり、反応性、腐食性がない。

第1図に平行平板型テフロンPPTの原理および本研究において使用した実験機の概略図を示す^{4,5)}。陰極・陽極間にはさまれたテフロンが押しばねにより、後方より押し出されて電極上のストッパーによって定位置に供給される。キャパシタが初期2000~3000 Vに充電され、電極に接続している。次に陰極面に設置されたイグナイタに高電圧パルスを加え、陰極との間に放電を起こし、陰陽極間の主放電を誘起する。テフロンはこの放電によりジュール加熱を受け昇華し、また一部は電離してプラズマとなり、電磁氣的ならびに空気力学的に加速され、放電チャネルより噴出し、推力を発生する。

すなわち、テフロンPPTにおいてはその加速機構は主放電電流とその自己誘起磁場が作るローレンツ力による電磁氣的加速と高温気体の膨張による空気力学

第1表 テフロンPPTの性能

	LES-6	SMS	LES-9	ETS-IV	AFRPL
主放電エネルギー, E , J	1.85	8.4	20	2.25	744
インパルスビット, I_b , $\mu\text{N}\cdot\text{s}$	26.7	111	307	~30	26600
マシヨット, m , μg	~14	~23	~28	~10	~1510
比推力, I_{sp} , s	200	500	1100	~300	1790
推進効率, η , %	0.7	3.1	6.6	—	~25

的加速から成り立つ。

また、これまでに地上および宇宙実験がおこなわれたテフロンPPTの主放電エネルギーとインパルスビット(放電一回ごとに発生する力積)の関係を第2図⁶⁾に示す。図に示すように、両者はほぼ比例関係にあるが、これまでのスラスタは主放電エネルギーが20 J程度までの試験的なもので、その性能を第1表⁷⁾に示すが、実用には今後の性能向上が必要であり、また外部磁場印加の性能に与える影響評価はおこなわれていない。本研究のスラスタは将来的な実用性を考慮し、電気推進機としての特性も充分表れる100 Jクラスとしている。

本研究はスラスタ性能の向上を図ることを目的に、以下の項目に関し、実験をおこない、考察したものである^{8,9)}。

(1) スラスタ主放電エネルギーの大型化をおこない、放電チャネルを形成するテフロンおよび電極形状の推進性能に対する影響を把握・評価する。

(2) 外部から永久磁石によって定常磁場を印加し、主放電電流と外部磁場が作るローレンツ力による電磁氣的加速をその加速機構に加え、外部磁場印加方向およびその強さの推進性能に与える影響を把握・評価する。

2. 実験装置

2.1 スラスタ 実験に使用したテフロンPPTの概略を第1図に併せて示す(但し、キャパシタ・バンク、配線等を省略した)。図は外部磁場を印加しない状態であり、永久磁石により外部磁場を印加する場合は同図下部に示す永久磁石が仮想線の位置に設置される。

推進剤であるテフロンはコの字型のブロックで供給される。その内面はそのまま放電領域に接して、放電に際しプラズマの供給をおこなうと同時に放電チャネルの一部を形成する。このテフロン・ブロックを上下から挟むようにモリブデン製厚さ2 mmの平行平板電極が取り付けられている。幅: de はテフロン・ブロックの外形に合わせて15 mmと一定であるが、長さ: Le は実験により15 mm, 45 mmあるいは60

mmとした。陰極と陽極の間隔： h は40 mmまたは50 mmであり、主放電は陰極板から放電チャンネルに挿入されたイグナイタの高電圧放電により誘起される。陰極および陽極は40 μF のキャパシタに接続され、2500 V(125 J)に充電される。キャパシタおよび電極から成る回路のインダクタンスは120 nHである。なお、3.1節において後述する15 Jスラスト、30 Jスラストは別途4.7 μF および10 μF のキャパシタ・バンクを製作し、所定エネルギーに充電し実験を実施した。

第3図はテフロンの流れ方向の昇華レート（1パルス放電における流れ方向単位長さあたりのテフロン昇華量）を計測するための分割型テフロンである。

以下に本スラストの動作概略を示す。

- (1) イグナイタによるトリガ放電によって少量のテフロンを昇華、プラズマ化し初期プラズマをつくる。トリガ放電のエネルギーは0.84 Jで主放電エネルギー(125 J)の0.7%にすぎない。
- (2) それが電極間に広がり、高電導性のプラズマ領域をつくる。
- (3) これによって両電極間が短絡され、キャパシタ・バンクに蓄えられていた電荷が一斉に流れ始める（主放電の形成）。
- (4) この主放電電流成分は自己誘起磁場を形成し、それが主放電電流成分と干渉してローレンツ力を及ぼす（電磁加速）。
- (5) 同時に、この電流はジュール加熱によりテフロンにエネルギーを与える（空気力学的加速）。それによって新たなテフロンの昇華が起こり、さらにプラズマ化されて放電・加速領域に供給される。
- (6) 電磁気的および空気力学的な加速を受けたプラズマは、下流に加速されてその放電領域を広げながらスラスト外に排出される。

以上の要領で消費されるテフロンは一放電あたり、

第3図 昇華レート測定用分割型テフロン

サブミリグラムの微小量であるが、放電ごとに新しいテフロン面が押しばねによって放電チャンネルに供給され、次の放電に備えるという仕組みになっている。

2.2 放電回路 放電回路の概略を第4図中に示す。キャパシタ・バンクの容量を C 、プラズマ領域を含まない回路のインダクタンスを L_0 、抵抗を R_0 とする。また、プラズマの位置による単位長さあたりの回路インダクタンスを L_1 、抵抗を R_p としている。ここで、 $(L_1 \times l_p)/L_0 \ll 1$ (l_p はチャンネル内での電流の位置に相当し、本実験では不等号は $l_p < 1\text{ m}$ で成立する)、 $R_p = \text{一定}$ 、つまり $R_0 + R_p = R$ （一定）と仮定している。第4図にキャパシタ・バンクの端子電圧 V 、放電電流 J 、キャパシタ・バンクのなす仕事 W を、各々充電電圧 V_0 、代表的な電流値 $V_0\sqrt{C/L_0}$ 、主放電エネルギー E で正規化し、時間軸（放電時間）を $\sqrt{C \cdot L_0}$ で

第4図 放電回路概略および放電電流・電圧・仕事

第5図 真空チェンバーおよびインパルスビット測定法

正規化した図を示す。同図に示すように放電電流と電圧は減衰振動波形を描き、充電したエネルギーは最初の半波長でその90%以上を放出する。

2.3 真空排気系 実験は、第5図に示す直径50 cm、長さ100 cmのステンレス製円筒チェンバ内で実施した。これを交換フランジを介し直径約91.4 cm、排気速度12000 l/sの油拡散ポンプおよび排気速度1500 l/minのロータリ・ポンプ3台と10000 l/minのメカニカル・ブースタで排気し、非動作時 1.33×10^{-3} Pa (1×10^{-5} torr)の真空環境(平均自由行程が10 m程度)において実験を実施した。

2.4 座標系 座標系は、前掲第1図に示すように、チャンネルの中心軸をX軸とし、下流方向を正とする。チャンネル底面上に原点をとり、陰極から陽極にむかってY軸をとる。外部磁場は0.15 Tおよび0.3 Tの磁束密度をもつ永久磁石(サマリウム・コバルト)により、減衰振動をおこなう主放電電流および流れ方向に対して垂直に印加された。外部磁場の放電領域に対する印加幅は、テフロン供給長さ:Lに等しい $X=15$ mmまでとした。外部磁場の方向は、主放電電流の最初の半サイクルに対し、外部磁場と主放電電流(-Y方向)とが作るローレンツ力が主放電電流自身を加速する方向(+X方向)に働く磁場を加速方向磁場(-Z方向)とし、逆に減速する方向のローレンツ力を作る磁場を遅延方向磁場(+Z方向)と定義している。

2.5 スラスタ性能 インパルスビット: Ib (1パルス放電により、スラスタが得る運動量増分)は第5図に併せて示したように、振り子式のスラスタスタンド法による直接測定¹⁰⁾をおこない、またマスショット: m (1パルス放電あたりのテフロン昇華量)は1500回程度の連続放電によるテフロンの質量変化の平均値として求めた。また、比推力、推進効率は以下に示す式により、算出した。

$$I_{sp} = \frac{m V_e}{mg} = \frac{Ib}{mg}$$

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} m V_e^2}{E} = \frac{Ib^2}{2mE}$$

なお、 V_e はプラズマ噴出速度、 E は主放電エネルギーである。

また、電極の摩耗に関しては予備実験においてステンレス製電極で $10 \sim 20 \mu\text{g}/\text{shot}$ 、モリブデン製電極で約 $3 \mu\text{g}/\text{shot}$ の電極摩耗率が得られており、性能評価に与える影響は本実験におけるマスショットの最低値 $55 \mu\text{g}/\text{shot}$ (加速方向外部磁場印加時)と比較しても十分小さいものと考えている。

3. 実験結果および考察

3.1 遅延方向外部磁場の効果 第6図および第7図は15 Jスラスタおよび30 Jスラスタを用いた遅延方向磁場を印加した場合の予備実験結果および性能である。この時、外部磁場と主放電電流が作るローレンツ力は、主放電電流の流れ方向への運動を妨げるため、テフロン昇華領域(放電チャンネル内で、主放電電流のジュール加熱により、テフロンが昇華する領域)の特にその上流域において主放電電流の滞在時間が増加し、テフロン昇華量が増加する。その結果マスショット: m が増加し、 m とテフロンプラズマの噴出速度: V_e の積であるインパルスビット: Ib および単位主放電エネルギーあたりの Ib である Ib/E も向上している。

しかし、遅延方向外部磁場印加の場合、 m の増加が Ib の増加を上回るため、比推力: I_{sp} および推進効率: η は磁場無しの場合に比べ、劣化している。すなわち、 m の増加によって、加速機構の中で、 m に依

第6図 15 Jスラスタ, 30 Jスラスタ性能
(その1) (遅延方向外部磁場印加)

第7図 15 Jスラスタ, 30 Jスラスタ性能
(その2) (遅延方向外部磁場印加)

存する空気力学的加速が増大するが、遅延方向磁場によるローレンツ力が及ぼす電磁氣的加速の減少を補完できず、プラズマの噴出速度 V_e が減少するために比推力および推進効率の劣化を起こしていると考えられる。

上述のように、遅延方向外部磁場の印加によるスラスタ性能 (比推力, 推進効率) の劣化が判明したので、3.3 節以降の実験での外部磁場印加方向は加速方向とし、スラスタ性能への影響を評価した。

3.2 放電チャネル形状と性能 前述のように、放電チャネルは左右の壁面と背面となるテフロンおよび

テフロンを上下よりはさみ込む電極から成る。電極間隔: h および放電チャネル長さ: L の性能に対する影響を調査し、高性能を示す放電チャネル形状を決定した後、以降の実験を実施した。

電極間隔: h は 40 mm および 50 mm のスラスタについて性能を測定し、高性能を示した $h=50$ mm に決定した。

第8図および第9図はテフロン長さ: L と電極長さ: Le を同時に変化させた場合の遅延方向磁場印加時、加速方向磁場印加時および磁場無しの場合の性能を示す。図に示すようにテフロン長さ: $L (= Le)$ を長くすると、テフロン昇華領域が増加し、 m が増加するが、 I_b はわずかな増加 (加速方向磁場) または増加後減少 (遅延方向磁場および磁場なし) する。そのため推進効率、比推力ともにテフロン長さ: $L (= Le)$ が短い 15~30 mm の場合に、優れた性能を示している。

3.3 主放電開始の安定化 加速方向外部磁場を印加した場合、イグナイタの高電圧放電による主放電の誘起が困難になり、主放電の不着火が増加するという現象が発生する。そこで安定な連続作動をおこなうために、イグナイタの位置: Li , 深さ Hi とイグナイタ放電後主放電が誘起される確率を調べた。第10図に示すようにイグナイタ電極をテフロン上流面に接近させ、かつ陰極からイグナイタ電極への電子の飛程を長くすることで強加速磁場印加時においても、安定な連続作動が達成できることを確認した。

3.4 電極長さ (Le) の延長 第11図および第12図に磁場無しの場合の電極長さ Le と性能の関係を示す。図においてテフロン長さは $L=15$ mm と一定であり、電極長さ: Le のみをパラメータとしている。電極が延長された場合、 I_b, m ともに減少するが両者

第8図 放電チャネル長さと性能 (その1)

第9図 放電チャネル長さと性能 (その2)

第10図 加速方向外部磁場印加時の主放電開始の安定化

の減少の割合の差より、比推力および推進効率には向上する。第13図は、流れ方向のテフロン昇華レートを示す。電極長さ Le およびテフロン長さ L が 15 mm の場合、下流領域 (セグメント D) でのテフロン昇華レートが他のセグメントに比べ、大きいことが明らかである。このチャンネル最下流でのテフロンの過大な昇華はテフロン先端部、すなわち電極先端部における滞留電流によってテフロンが昇華しているためであり、この時発生したプラズマは電磁気的および空気力学的に有効に加速されていないと考えられる。

第11図 電極長さ性能 (その1) (外部磁場なし)

第12図 電極長さ性能 (その2) (外部磁場なし)

第13図 流れ方向テフロン昇華レート

一方、前掲第11図および第12図に示されているようにテフロン長さ $L=15$ mm のまま、電極長さ Le を延長するに伴い、 m は減少するが Ib の減少はごくわずかであり、そのため比推力、推進効率は向上している。この m の減少は第13図に示すテフロン昇華レートの分布の測定により、テフロン先端部における昇華量の減少が大きく寄与していることが確かめられた。

これらの放電チャンネル形状と電極長さの性能を与える影響評価より、電極長さ: $Le=60$ mm、テフロン長さ: $L=15$ mm、テフロン両壁面間距離 (放電室幅): $d=5$ mm、テフロン高さ (電極間距離): $h=50$ mm をスラスタ基本形状とした。

従来、テフロン PPT のテフロン昇華量は、その昇華領域が狭いこと、作動時間が短いことから、時間に対して (主放電電流の運動に対して) 質量変化を伴わない、すなわち放電初期に全質量が与えられる [Slug Model] として考えられてきた¹¹⁾。しかし、本実験から、テフロン昇華量がチャンネル流れ方向に分布していること、および放電終期の滞留電流により発生した質量が性能に大きく影響することが明らかになり、時間 (主放電電流の運動) による質量増加を考慮した [Snow Plow Model] として考えるべきである。

3.5 加速方向外部磁場の効果 外部磁場を印加しない状態で最も高性能を示した、テフロン長さが短く ($L=15$ mm)、かつ電極を延長した ($Le=60$ mm) テフロン PPT に対し、加速方向外部磁場を印加し、その影響を測定した。第14図および第15図にその結果を示す。

外部磁場が強くなるに従い、 Ib , m とともに減少するが、 Ib が直線的に減少するのに対して m は 0.15 T で約 1/3 と大きく減少し、以降減少の割合は緩やかになる。そのため磁場の強さの増加に対し、比推力は直線的に向上し、一方推進効率は向上後やや飽和傾向を

第14図 加速方向外部磁場と性能 (その1)

第15図 加速方向外部磁場と性能（その2）

示す。実験において、外部磁場強さ 0.3 T で比推力 4000 s、推進効率 34% が得られた。

前掲の第13図に外部磁場印加の場合のテフロン昇華分布を併せて示す。電極延長により、先端部での過剰なテフロン昇華を抑制したテフロン PPT では加速方向磁場の印加により流れ方向に沿ってのテフロン昇華量の一様な減少が起きる。これは加速方向外部磁場と主放電電流が作る新たなローレンツ力が加わるため、主放電電流がより加速され、その結果各セグメント (A, B, C, D) での主放電電流の滞留時間が短縮し、テフロン昇華を引き起こすジュール加熱量が減少したためと考えられる。

本実験結果より、加速方向外部磁場印加のスラスタ性能に与える影響として I_{sp} , η の向上と m , I_b の減少が明らかになった。すなわち

- (1) I_{sp} の向上は、磁場なしの場合と比較し、減少した少量の昇華テフロンがより加速され、 V_e が増加していることを、
- (2) I_b の低下は m の減少と V_e の増加の割合から、その積である mV_e が低下していること（すなわち、 m の減少を完全に補完するまでには V_e の増加が達していないこと）を、
- (3) 一方、 η の向上は $(mV_e^2)/2/E$ で示されるように V_e の2次の項を含むため、運動エネルギーとしては m の減少を補うに足る V_e^2 の増加が達成されていることを、

示していると考えられる。

ここで m の減少に伴う I_b の低下は同一パルスレートでは推力の低下を意味するものであり、低推力である電気推進機としては、今後その向上が重要な課題である。

一般にテフロン PPT 以外の電気推進機では、推進剤流量は流量調整器等により、外部から制御されるのに対し、従来テフロン PPT では I_b および m はその

主放電エネルギーにより、ほぼ決定されるものと考えられてきた。しかし、本研究結果により、 m およびその昇華レートが放電チャネル形状、外部磁場印加方向・強さの影響を大きく受けることが判明した。

すなわち、本研究により明らかになった加速方向外部磁場による比推力・推進効率の向上および放電チャネル形状・外部磁場によるマシヨットの制御により、高比推力・高推進効率でのインパルスビットの向上という全体的性能の向上を図ることが今後必要と考えられる。

4. 結 論

本研究結果より、パルス型テフロン・プラズマ・スラスタ（テフロン PPT）の放電チャネル形状および外部磁場印加の性能に与える影響として以下のことが明らかになった。

- (1) 電極の延長により、テフロン昇華領域先端部での過剰な推進剤の昇華を抑制することができ、それは比推力および推進効率の向上に有効である。
- (2) 加速方向外部磁場印加の場合、イグナイタの適切な配置により、安定連続放電をおこなうことができる。
- (3) 流れ方向のテフロンの昇華レートの測定により、テフロン昇華量は放電初期に全質量が与えられる [Slug Model] としてではなく、時間（主放電電流の運動）による質量増加を考慮した [Snow Plow Model] として考えるべきである。
- (4) 加速方向外部磁場の印加により、その比推力および推進効率の向上を図ることができる。これは外部磁場の強さの増加に伴い、マシヨットが磁場なしの場合の 1/6 程度に大幅に減少し、その少量のプラズマが主放電電流と外部磁場および自己誘起磁場とが作るローレンツ力によって加速されるためである。

最良の場合、外部磁場なしの場合と比較し、比推力は 1400 s から 4000 s に、推進効率は 22% から 34% に向上した。

- (5) 従来、主放電エネルギーにより、ほぼ決定されたと考えられてきたマシヨットおよびその昇華分布は、放電チャネル形状および外部磁場の印加方向・強さの影響を大きく受ける。
- (6) 加速方向外部磁場印加時は、上述のマシヨットの減少により、インパルスビットが低下する。今後、結論(5)に述べた放電チャネル形状および外部磁場によるマシヨット制御

と結論(4)に述べた加速方向外部磁場による比推力・推進効率向上を組み合わせることにより、全体性能の向上を図ることが必要と考える。

本論文は、参考文献8)を基に、その後考察を加え、加筆修正をおこなったものである。

最後に本研究の遂行にあたり、ご指導頂いた東京大学名誉教授(現東海大学教授)木村逸郎先生、東京大学教授荒川義博先生に感謝致します

参考文献

- 1) Guman, W. J. and Peko, P. E.: Solid Propellant Pulsed Plasma Micro-Thruster Studies, AIAA Paper 68-85.
- 2) Guman, W. J. and Nathanson, D. M.: Pulsed Plasma Microthruster Propulsion System for Synchronous Orbit Satellite, J. Spacecraft Rockets, 7 (1970), pp. 409-419.
- 3) 平田正紘, 村上 寛, 遠藤 進, 中山勝矢: パルス型プラズマエンジンの開発(5), 第20回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1976, pp. 70-73.
- 4) Kimura, I., Yanagi, R. and Inoue, S.: Preliminary Experiments on Pulsed Plasma Thrusters with Applied Magnetic Fields, AIAA Paper 78-704.
- 5) Kimura, I., Ogiwara, K., Takegahara, H. and Suzuki, Y.: Effects of Applied Magnetic Fields on a Solid-Propellant Pulsed Plasma Thrusters, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 79, pp. 489-495.
- 6) Hirata, M. and Murakami, H.: Development of a Pulsed Plasma Engine, IEPC Paper, 84-48.
- 7) 日本航空宇宙学会: 航空宇宙工学便覧増補版, 丸善, 1983, p. A 139.
- 8) Takegahara, H., Ohtsuka, T. and Kimura, I.: Effect of Applied Magnetic Fields on a Solid Propellant Pulsed Plasma Thruster, IEPC Paper, 84-50.
- 9) 竹ヶ原春貴: 外部磁場による固体プロペラント・パルス型・プラズマスラスターの性能向上に関する研究, 東京大学大学院工学系研究科航空学専門課程学位論文, 1985.
- 10) Yanagi, R. and Kimura I.: A New Type Target for the Measurement of Impulse Bits of Pulsed Plasma Thrusters, AIAA Paper, 81-0712.
- 11) Jahn, R. G.: Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, New York, 1968, chap. 9.