

# 昇華性推進剤を用いたマイクロ波放電式小型プラズマスラスタの推力測定

濱崎, 渉

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻プラズマ・量子理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7357525>

---

出版情報 : Kyushu University, 2024, 修士, 修士  
バージョン :  
権利関係 :



令和6年度

九州大学大学院 総合理工学府

総合理工学専攻

プラズマ・量子理工学メジャー

# 修士論文

論文名

昇華性推進剤を用いたマイクロ波放電式小型プラズマスラストの  
推力測定

---

氏名

濱崎 渉

---

指導教員名

山本 直嗣

---

# 目次

第1章 序論	1
1-1 研究背景および目的	1
第2章 マイクロ波放電式小型プラズマスラスタの概要	3
2-1 電気推進の種類	3
2-2 マイクロ波放電式小型プラズマスラスタの動作原理	4
2-3 性能の評価	5
第3章 スラストスタンド	7
3-1 スラストスタンドの概要	7
3-2 スラストターゲット	7
3-2-1 原理	7
3-2-2 製作したターゲット	8
3-3 水平振り子式スラストスタンド	9
3-3-1 原理	9
3-3-2 製作したスラストスタンド	10
3-4 較正方法	13
3-5 較正結果	14
第4章 推進剤について	16
4-1 推進剤の概要	16
4-2 推進剤タンク	17
4-2-1 タンク的设计	17
4-2-2 温度調節機構	18
4-3 タンクの温度調節実験	19
4-3-1 実験目的	19
4-3-2 実験方法	19
4-2-3 結果および考察	20
第5章 アルゴンでの推力測定	24
5-1 実験目的	24
5-2 実験体系	24
5-2-1 真空排気系	24
5-2-2 マイクロ波送電系	25
5-2-3 スラスタ本体	26
5-3 実験方法	29
5-4 結果および考察	29

5-4-1 プラズマが点火する構成 .....	29
5-4-2 推力測定の結果 .....	30
第6章 昇華性推進剤でのプラズマ点火および推力測定 .....	34
6-1 実験目的 .....	34
6-2 実験方法 .....	34
6-3 L-メントールの結果および考察 .....	34
6-3-1 再結晶化 .....	34
6-3-2 配管とスラストの加熱 .....	35
6-3-3 温度と流量の測定結果 .....	37
6-3-4 推力測定の結果 .....	38
6-3-5 タンク内の様子 .....	40
6-4 樟腦の結果および考察 .....	41
6-4-1 温度と流量の測定結果 .....	41
6-4-2 推力測定の結果 .....	41
6-4-3 タンク内の様子 .....	43
6-5 昇華性推進剤とアルゴンの性能比較 .....	44
第7章 水推進剤による堆積物除去 .....	46
7-1 実験目的 .....	46
7-2 実験方法 .....	46
7-3 実験結果および考察 .....	46
7-3-1 水プラズマ点火実験 .....	46
7-3-2 堆積物の比較結果 .....	47
7-3-3 推力測定の結果 .....	49
第8章 結論 .....	52
参考文献 .....	53
謝辞 .....	55

# 第 1 章 序論

## 1-1 研究背景および目的

現在、企業によるビジネスとして、小型人工衛星もしくは超小型人工衛星を活用した宇宙利用が広がっている<sup>(1)</sup>。小型人工衛星の活用方法も多岐にわたり、SpaceX 社が運用する Starlink<sup>(2)</sup>では 衛星インターネットアクセスサービスを、Planet labs 社では衛星画像を基にした分析ツールの提供<sup>(3)</sup>など、生活に直接関連するようなサービスが運用されている。一方、我が国の研究機関や大学等では超小型衛星打ち上げのための企画、設計、製作、運用などを通して、教育に人工衛星を使用する事例も増えている<sup>(4)</sup>。研究機関や民間企業問わず宇宙利用が活発になった背景として、超小型衛星の研究が進み、柔軟な打ち上げ体制が整備されつつあることが挙げられる。超小型人工衛星は、重量が 50 kg 以下の衛星であり、コストは数百万円から、開発期間は 2 年程度と短いスパンでの打ち上げが可能である。そのため打ち上げ失敗のリスクが許されない大型衛星と異なり、新規参入の敷居が下がることで衛星打ち上げ数は右肩上がり推移している。これに伴って軌道運用を行う衛星が増加したため、運用終了人工衛星によるスペースデブリの増加も課題となっている。そこで各国政府機関が主導し、運用終了から 25 年以内に大気圏に突入する構造が必要となるガイドラインが定められ始めている。人工衛星を大気圏に突入させるために平均高度や重量によっては、推進器の搭載等が必要である。

超小型人工衛星において、以前は大半の衛星に推進器を搭載していなかった。理由として推進システムを搭載するスペースが小さい、発電能力が低いといったことが挙げられる。しかし近年、機動制御を行える、多種多様なミッションを行えるという点で、超小型人工衛星向けの推進装置の開発が非常に活発化している。我が国においては、Pale Blue 社のように超小型人工衛星向けの推進器を販売する<sup>(5)</sup>民間企業も登場した。搭載機器のコストを低下させる上で、軌道高度として 300 km より低軌道である超低高度軌道での人工衛星運用が期待されている。これには高い推力電力比と比推力を持った推進器が必要であるため、電気推進が適していると考えられる。

電気推進システムを採用する場合、主に使用されている推進剤はキセノンであり、非常に高価かつ貯蔵に高圧タンクが必要でシステムが大型化しやすいという欠点をもつ。多くの超小型人工衛星で採用されるためにはこれらの課題を解消した新しい推進剤が求められる。代替推進剤については、アルゴン<sup>(6)</sup>などの希ガスやヨウ素などが検討されてきたが、高圧での貯蔵や毒性のため搭載が

難しいといった欠点があった。そこで本研究室では昇華性のある有機分子化合物を使用した推進剤の実現可能性について研究が進められている。

本研究で使用するスラスタは超小型衛星向けであり、静電加速型でありながらグリッドシステムを使用しないため推進システムのサイズを小さくできるメリットがある。本研究においては、このスラスタに昇華性推進剤を適用し、推進剤流量制御、推力、比推力においてアルゴンと比較を行った。さらに昇華性物質適用時のプラズマによって、放電室に堆積物が付着することによる推力への影響や、水プラズマを使用した堆積物の除去も検討していく。最終的に昇華性物質の実用可能性について評価を行うことが目的である。

## 第2章 マイクロ波放電式小型プラズマスラスタの概要

### 2-1 電気推進の種類

電気推進ロケットは、推進剤に電力を与えて推進剤の内部エネルギーを増加させる、さらに推進剤を電離させた上でイオンを加速することで反力を得る、ロケットエンジンシステムの一つである。電気推進の推力は化学推進と比較すると著しく小さい。しかしロケット推進器の燃費の指標である比推力が非常に大きいため、推進剤の質量を低減できる。よって深宇宙探査など長期間の運用が必要なミッションにおいて採用されてきた。以下に電気推進の種類<sup>(7)</sup>を示す。

#### 1. 電熱加速型

電氣的加熱を利用して高温のガスを作成し、空気力学的加速を行う。しかし比推力が短いことや長時間の連続運転にも向かない。レジストジェットやDCアークジェットなどがこの方式に当てはまる。

#### 2. 静電加速型

中性粒子を電離させた上で静電力を作用させることで、イオンを加速する。電熱加速より推力や比推力を増加させることが可能となるが、イオンエンジンにおいては宇宙機が帯電しないよう、中和器を設置する必要がある。しかし比推力やトータルインパルスに優れている。

#### 3. 電磁加速型<sup>(8)</sup>

電場と、系の加速の方向が異なる推進系であり、中和器が必要ないものも存在する。MPD スラスタなどがこの方式として挙げられるが、強い電磁力を生み出すために大電力が必要である。ホールスラスタは電磁加速と静電加速の両方を使用している。

これらを踏まえた小型および超小型衛星向けに搭載する推進システムの問題点として、まず静電加速型や電磁加速で用いられる電源系が挙げられる。衛星の電力や設置スペースを消費し、さらに高圧ガスシステムによるタンク質量の増加などから小型化に際して課題が多い。また電熱加速型は比推力が低く動作時間が短いことから、長期のミッションにおける主推進器としての使用は難し

い。これらの問題点は、後述するマイクロ波放電式小型プラズマスラスタと昇華性推進剤による組み合わせによって解決できる可能性がある。

## 2-2 マイクロ波放電式小型プラズマスラスタの動作

### 原理

本実験において使用するスラスタはマイクロ波放電を用いてプラズマを生成する。マイクロ波放電によるプラズマ生成は、「はやぶさ」にも用いられ<sup>(9)</sup>、無電極による高信頼性かつ長寿命が特徴である。さらに予備加熱が不要であり、迅速なプラズマ点火が行える。マイクロ波の交流電界によって電子を加速し、中性粒子と衝突することで電離させる仕組みとなっている。マイクロ波は周波数が高いため高密度プラズマの中でも伝搬できるが、慣性の影響によって電子の移動速度の位相が電界の位相より遅れる。そのため電子密度が低い場合、電子は電界からエネルギーを受け取れなくなることで、プラズマ点火や維持に必要なマイクロ波投入電力が増大する。ここで外部磁場を用いて電子を放電空間にトラップすることでマイクロ波のエネルギーを効率よく吸収させることができる<sup>(10)</sup>。そこで本推進器では磁気チューブと呼ばれる磁束管を利用した。

使用するスラスタにおける磁気チューブの形成を図 2-1 に示す。この磁場形状はヨークの透磁率と真空中の透磁率の違いによって磁束密度が変化することにより形成されている。この磁気チューブ内を荷電粒子が動く際、荷電粒子はローレンツ力の影響によって磁場に対してサイクロトロン運動と呼ばれる螺旋状の運動をとる。磁場強度が増加する領域において、荷電粒子は磁場の弱い方向へ反射する運動をとる。このような磁場による荷電粒子の反射を磁気ミラー効果と呼ぶ。磁気ミラー効果によって、形成された磁気チューブ内に電子がトラップされ、電子はマイクロ波アンテナに接触しやすくなっている。よってマイクロ波からのエネルギーを吸収しやすくなり、電子のエネルギーを効率的に高められる。

次に推進器のプラズマ排出原理について説明する。加速によって高いエネルギーを持った、もしくは中性粒子との衝突によって磁気チューブにトラップされなくなった電子が発生する。ここで電子とイオンの速度差が非常に大きいことから電子が先にスラスタ外に排出、もしくは放電室壁面に移動する。これにより放電室内はイオン過多の状態となり、電子過多のスラスタ外部との間に電場が形成される。この電場の効果によってイオンは加速されてスラスタ外に排出される。この一連の連続した動作によって電子とイオンは等量がスラスタ外

へ排出されることから、スラスト排気は中性に保たれる．この排気による反作用としてスラストは推力を得ている．

この推進器の利点はイオンエンジンで必要とされるグリッドや中和器を必要としないことである．これらの部品を省略できることで、小型かつ低電力の推進システムを構築可能である．

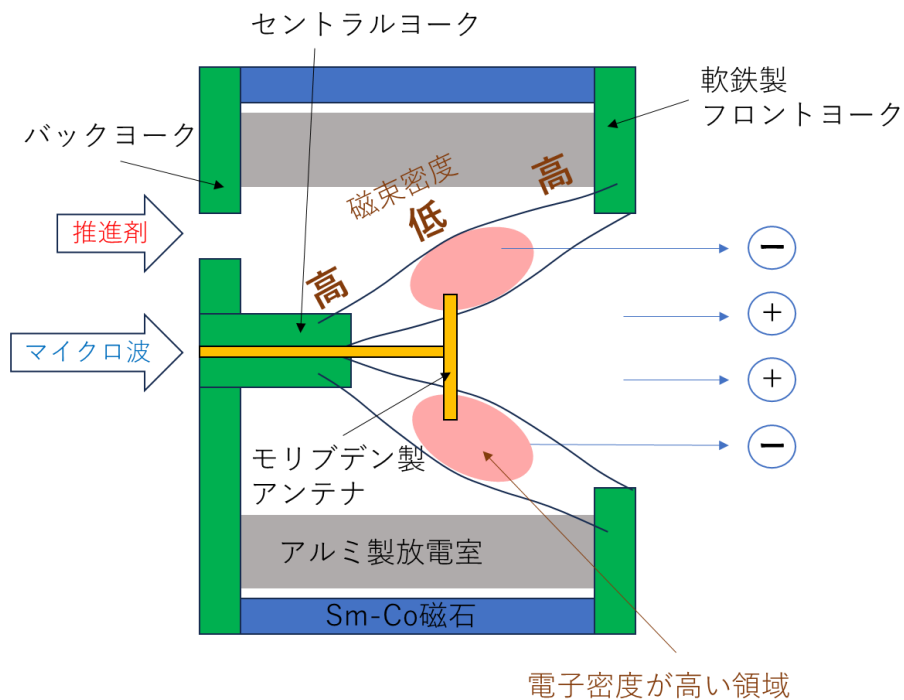


図 2-1 推進器の概略図

### 2-3 性能の評価

推進器の性能は、推力、マイクロ波投入電力、推進剤流量などによって評価できる．以下に性能評価において重要なパラメータを示す．ここで $F$ は推力、 $m$ は推進剤の質量流量、 $g$ は重力加速度、 $P$ はマイクロ波投入電力、 $m_i$ は排出イオンの質量流量、 $I_b$ はイオンビーム電流、 $e$ は電気素量、 $m_i$ は排出イオンの質量を表す．

### 1. 比推力 $I_{sp}$

単位時間あたりの推進剤流量に対する推力を示す。推進器の燃費に相当し、慣例的に重力加速度で割り単位を秒とする。

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} [\text{sec}] \quad (2.1)$$

### 2. 推進効率 $\eta$

推力から換算された運動エネルギーと投入電力を比較し、どれだけの効率で変換されたかを表す。

$$\eta = \frac{F^2}{2\dot{m}P} \quad (2.2)$$

### 3. 推力電力比 F/P

単位比推力において、投入電力を与えることでどれだけの推力を得ることができるかを見積もることができる。

$$\frac{F}{P} = \frac{2\eta}{gI_{sp}} \quad (2.3)$$

### 4. 推進剤利用効率 $\eta_u$

推進器に供給した推進剤流量のうち、イオンとして排出された質量流量が有効に利用される。これは排出される中性粒子の速度とイオンの速度差がきわめて大きく、中性粒子が発生する推力の影響が小さいからである。よってこの比率を調べることにより推進剤の性能を評価できる。今回の実験においてはイオンビーム電流の計測を行っていないため、先行研究によって計測された値を適用した。

$$\eta_u = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} = \frac{I_b}{\frac{e}{m_i} \dot{m}} \quad (2.4)$$

## 第3章 スラストスタンド

### 3-1 スラストスタンドの概要

本研究では、推進剤による性能を評価するためスラストスタンドを用いる。先行研究より使用する推進器は推力が  $0.1\sim 1$  mN 程度と非常に小さい<sup>(11)</sup>。推進剤による微細な性能差を評価するため、測定可能推力範囲を  $0.001\sim 2$  mN、推力分解能  $1\ \mu\text{N}$  を目標として設計を進めた。スラストスタンドは重力の影響を受けにくく、高感度での測定が可能な水平振り子式<sup>(12)</sup>およびターゲット方式を採用した。

### 3-2 スラストターゲット

#### 3-2-1 原理

推進器からの推力を測定する際には、推進器をスラストスタンド上に設置する直接計測が主に使用されている<sup>(13)</sup>。一方国内においては微小推力の測定として、推進器からの排気をスラストスタンドに取り付けたターゲットに吹き付ける間接計測も盛んに使用されてきた。ターゲット方式は定常推力測定において、直接計測で問題となるマイクロ波伝送ケーブルや推進剤投入チューブの弾性による影響を無視できる点で優れている。しかし推進器からのプルームが板状のターゲットに衝突することを考えると、プルームの弾性衝突によって測定誤差が発生する<sup>(14)</sup>。この誤差を防ぐためターゲット形状は様々な形状について研究が行われてきた歴史がある<sup>(15)</sup>。本研究では図 3-1 で示すような円筒形ターゲットを使用した。このターゲットは中央部の円錐とその手前に置かれた、中心に穴の開いたスリットによって構成されている。質量  $m$  の粒子が速度  $v$  で飛来する場合、平板の場合では弾性衝突によって力積による誤差が最大 2 倍となるが、円筒形ターゲットは軸方向のプルームを半径方向に散らすことによって弾性衝突による誤差の影響を小さくできる<sup>(16)(17)(18)</sup>。

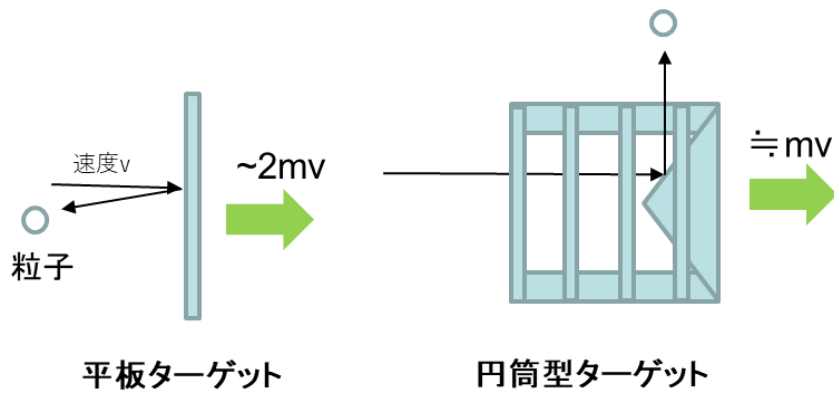


図 3-1 平板および円筒形ターゲットの比較

### 3-2-2 製作したターゲット

設計した円筒形ターゲットを図 3-2 に示す．スラスタからターゲット前面までは 35 mm 離して配置される．スラスタの推進剤出口直径を 12 mm，スラスタからのプルームの発散角度を 90°と仮定すると，ターゲット開口部直径は 82 mm となる．またその他のパラメータは経験的に用いられてきた値をもとに決定された．スラスタターゲットの諸元を表 3-1 に示す．スラスタから排出されたプルームはターゲットへ向かうが，ターゲットとスラスタが同電位でなければ電位差が生まれずイオンが加速・排出されにくい．そこでターゲットはすべて電気伝導性がある素材で構成した．中でも炭素はスパッタに強く<sup>(7)(19)</sup>，軽量であることからターゲットの大部分に使用している．スリットの肉厚は薄いほど重量が抑えられるが，応力計算および加工精度の問題により 0.5 mm とした．円錐部はステンレス板を切り出し，スポット溶接にて形状を作成した．フレームは，ステンレス板と炭素板を挟み込んだものによってそれぞれ固定される．

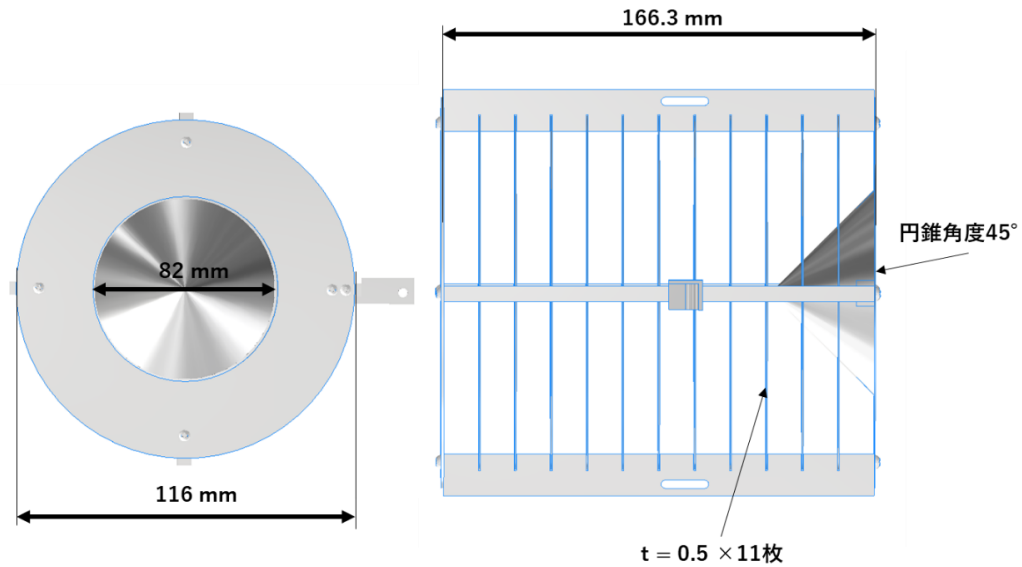


図 3-3 設計した円筒形ターゲット

表 3-1 スラストターゲットの諸元

側面開口部面積/正面開口部面積	16.0
スリット幅	27 mm
スリット間隔	13.25 mm
円錐部材質	ステンレス t=0.3
スリット, フレーム材質	等方性黒鉛(CIP)
ネジ材質	チタン合金
総重量	250 g

### 3-3 水平振り子式スラストスタンド

#### 3-3-1 原理

図 3-4 に設計したスラストスタンドを示す。水平振り子式を選択した理由として、ナイフエッジ等を使用せず、軸方向に摩擦のないねじりばねを使用するため高感度な系を比較的単純な構造で実現できるからである<sup>(20)</sup>。

スラストスタンドの動作について説明する。まずスラストからターゲットへプルームが放出されると、ねじりばねである Flex Pivots をスタンドの回転中心としてアームが回転運動を発生する。このときプルーム衝突によってターゲットに加わる力と、Flex Pivots のばね定数により回転角が決定される。これらの値はフックの法則より比例関係となるため、回転角を求めることでターゲッ

トが受ける力を求められる. 設計したスラストスタンドでは回転角が微小であるため距離で近似した. 最終的にターゲット反射板からレーザー変位計までの距離を計測し, 較正で求めた計算式をもとに推力に変換する.

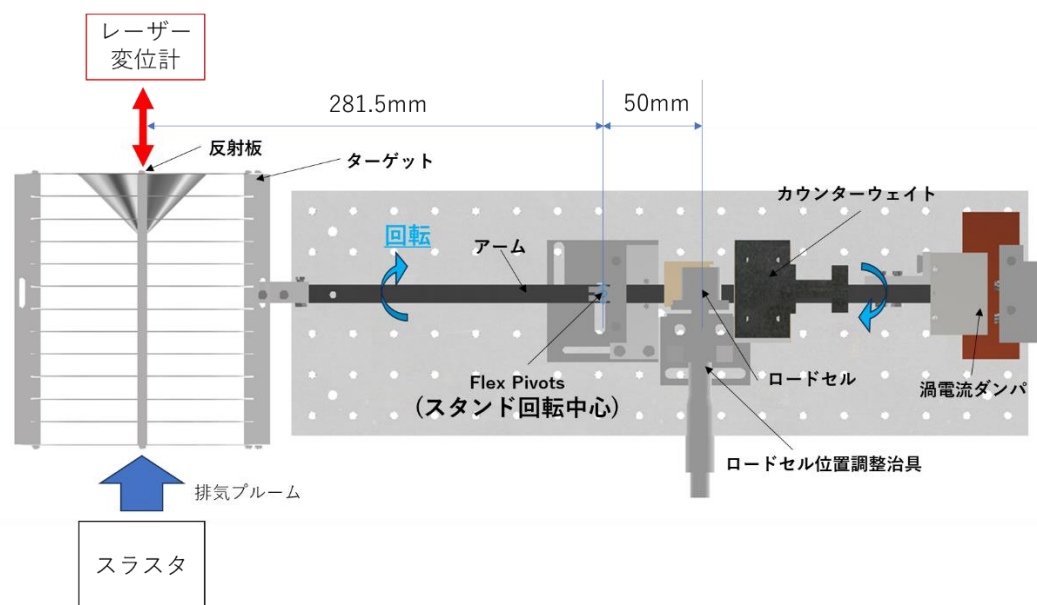


図 3-4 設計したスラストスタンド

### 3-3-2 製作したスラストスタンド

実際に製作したスラストスタンドを図 3-5 に, スラストスタンドの諸元を表 3-2 に示す. Flex Pivot は円管を板ばねで結合したような構造を取り, 摩擦やヒステリシスの発生を抑えつつ復元力を得られる. しかしねじりばねの軸方向の耐荷重が 11 kgf であることから, 安全率を考慮するとアームの重量を 1100 g 以内に抑えることで破損を防げると考えられる. そのため各パーツは軽量化を優先した. ターゲットはアームの端に取り付け, アーム中心からの重量バランスを保つためカウンターウェイトを設置した. アームの重量バランスが狂うと, ねじりばねが半径方向に変形してばね定数の変化や破損を引き起こす. そのため位置調整機構を追加しアーム重心位置の調整が行えるようにしている. さらに反対側の端には渦電流ダンパ<sup>(21)(22)</sup>を取り付けた. 渦電流ダンパの詳細を図 3-6 に示す. 渦電流ダンパは, コの字型のヨーク内部に磁石が向かい合っており取り付けられ, さらにその中心には振動系に影響されていない銅板が入り込む構造となっている. 磁石が振動した際には銅板に渦電流が発生し, 熱として消費されることによって振動の逆方向に向かう見かけ上の力が働く. これによ

り振動を素早く収束させ、実験時間の短縮が望める。ロードセルでの較正<sup>(23)</sup>に磁石を使用する関係上、ダンパのヨークからの磁束漏れを最小限にしなければならないが、ヨーク厚さを増やすことで重量増加につながる。そのため磁場解析ソフト AMAZE を使用して磁場シミュレーションを行い、磁束漏れが発生しない最低限の厚さとして 4 mm を得た。変位計には Keyence 社製のレーザー変位センサを使用し、変位を電圧へ変換してデータ取得を行っている。

最小推力分解能は、ねじりばね定数を  $k$ 、アーム回転中心からターゲット中心すなわち距離センサ測定点までの距離を  $L_t$ 、距離センサ最小分解能を  $\Delta d$  とすると、

$$\Delta F = \frac{k}{L_t} \sin^{-1} \left( \frac{\Delta d}{L_t} \right) \quad (3.1)$$

となる。またスラストスタンドの固有振動数は

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{k}}{J} \quad (3.2)$$

と表すことができる。ここで  $J$  は振り子の回転軸周りの慣性モーメントである。各要素の値によって、誤差を含まない理論分解能は 0.586  $\mu\text{N}$ 、固有振動数は 0.22 Hz となった。固有振動数の理論値と実測値に開きがある原因として、アーム上の微細な重量バランスのずれや Flex Pivots 固定治具の同心度のずれによって、ねじりばねに微小な摩擦が発生している可能性がある。しかし固有振動数を完全に一致させることは難しいため、理論値と近い値となるよう調整を行っている。

スラストスタンドをチャンバに収めた際のスラストとの位置関係について図 3-7 に示す。

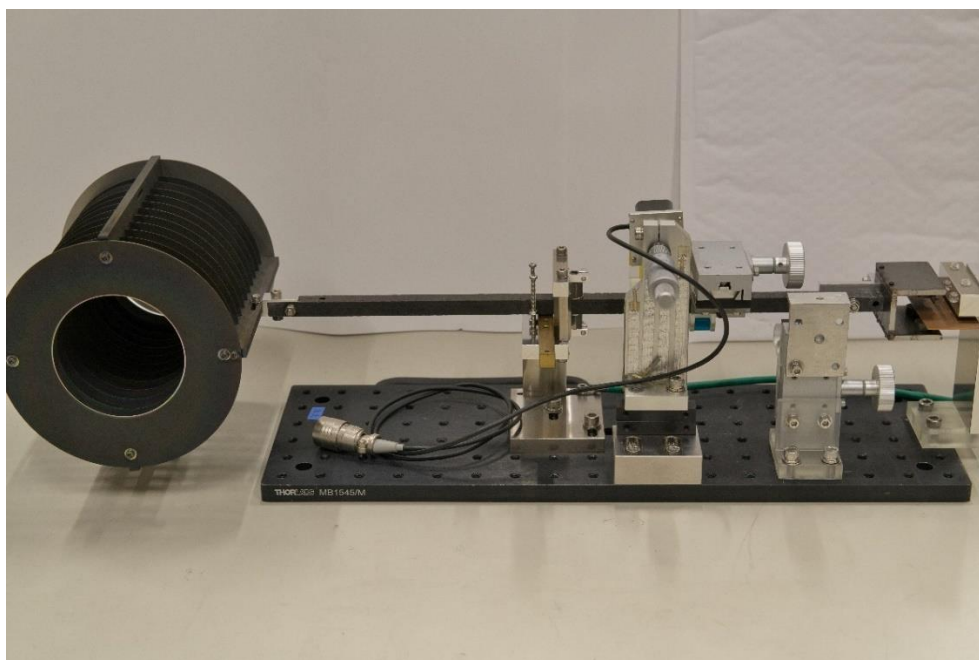


図 3-5 製作したスラストスタンド

表 3-2 スラストスタンドの諸元

部品名	材質, 型番, 性能詳細
アーム	C/C コンポジット(10.0 mm×11.5 mm×400.0 mm 角棒)
ねじりばね	RiverHawk 社製 Flex Pivots 5008-800 2 個
Flex Pivots ばね定数	$2.33 \times 10^{-2}$ Nm/rad
変位センサ	Keyence 社製 IL-S100 最小分解能 2 $\mu$ m
ダンパ	渦電流方式, ヨーク材質:SS400
カウンターウェイト	光学ステージ, 樹脂の組合せ(Formlabs Clear レジン)
アーム上の総重量	950 g
治具・台座等	SUS304 製, ねじりばね固定部のみ A2014 製
推力分解能	0.586 $\mu$ N(理論値) $\pm$ 11.0%(誤差)
固有振動数	0.22 Hz(理論値) 0.15 Hz(実測値)

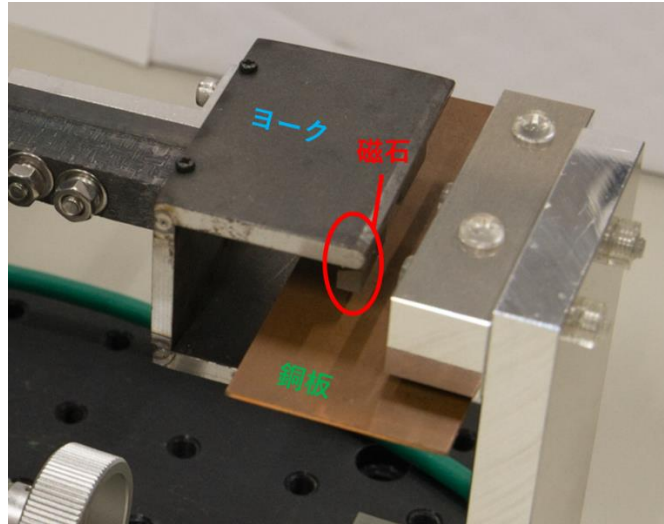


図 3-6 渦電流ダンパ

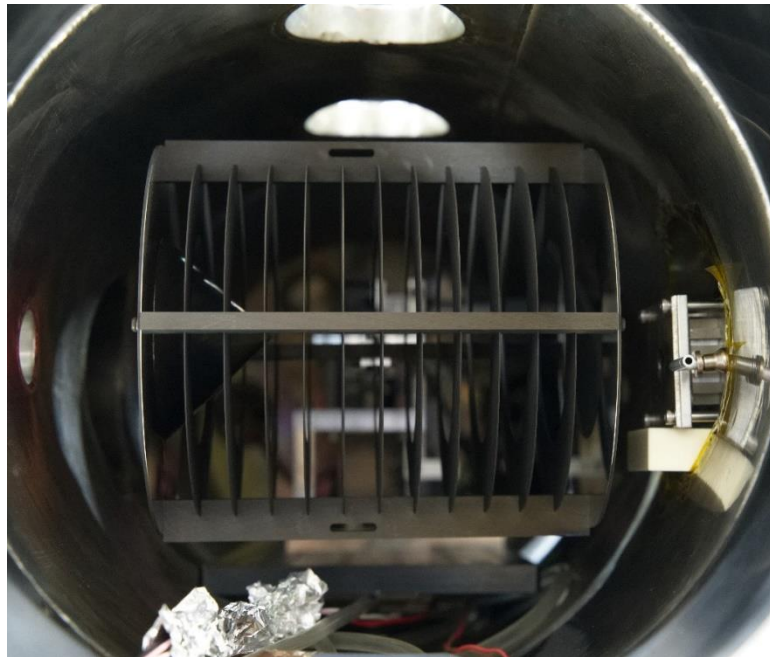


図 3-7 スラストスタンドとスラストの位置関係

### 3-4 較正方法

推力と変位センサ電圧の関係を較正するために、ロードセル共和電業製 LVS-5GA を使用した。このロードセルは定格容量 50 mN，定格出力 1354  $\mu\text{V}/\text{V}$  である。図 3-8 にロードセルでアームへ疑似推力を発生させるための方法を示す。ロードセルとアームにはそれぞれ磁石が取り付けられており、ロードセル位置の変更によってスタンドを振り、掛かった力がロードセルに記録される。

この値と変位計電圧を記録したものを一つの点として複数プロットすることで力と変位の関係を求める。しかしこの値はロードセルの位置による値であるため、ターゲット中央部すなわちスラスト位置の推力に換算する。図3-4より、回転中心からターゲットの測定点までを 281.5 mm，ロードセルまでを 50 mm としている。

較正はロードセルの位置を 5 回変え、さらに 3 回繰り返し計 15 回測定を行う。それぞれ 10 回/秒のデータレートで 10 秒以上測定し平均することで、固有振動数の影響を相殺して測定している。

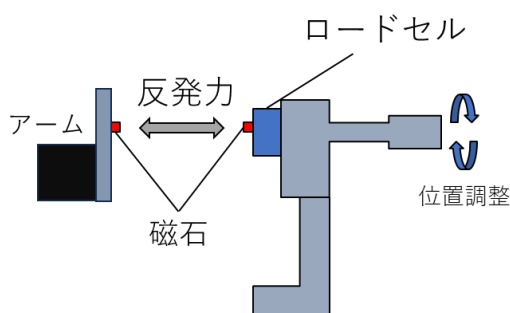


図 3-8 ロードセルによるアームへの疑似推力の発生

### 3-5 較正結果

図 3-9 にスラストスタンドの較正結果を示す。回帰直線の  $R^2$  は 0.997 となった。しかし  $50 \mu\text{N}$  付近に大きな非直線性が見られ、回帰直線からの誤差は最大  $6.35 \mu\text{N}$  となった。アームの重心バランスの非対称性によるねじりばねへの影響や、ロードセルの容量に対する負荷が微小すぎるため誤差が大きいことが原因として挙げられる。推力の変化方向を変えながら実験を行ったが、ヒステリシスによる影響は見られなかった。複数回の測定によって、この非直線性が必ず確認でき、この最大値を求めた。推力計測時はこの非直線性の傾きも反転することが予想されるため、非直線性による誤差を  $\pm 11.0\%$  とした。

図 3-10 に、真空中での推力を与えていない状態の測定点ごとの変位計電圧を示す。このばらつきは電圧幅の規則性よりスラストスタンド由来ではなく、変位計の電圧変換による量子誤差だと考えられる。ばらつきの最大と最小の差は  $0.416 \mu\text{N}$  であり、平均値からの対称性から  $\pm 0.208 \mu\text{N}$  が誤差となりうる。しかしこの誤差は変位計の最小分解能に含まれ、かつ誤差の範囲内であり較正結果には考慮していない。また実験時間 3 時間程度であればドリフトは変位計の誤差内に収まっていた。

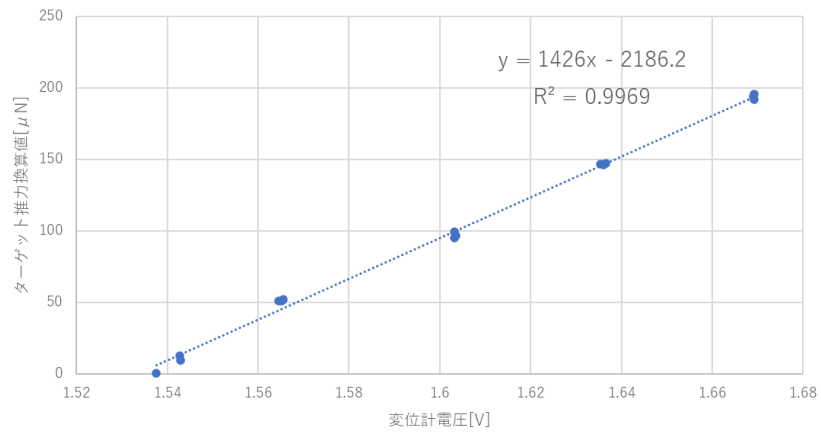


図 3-9 スラストスタンド較正結果

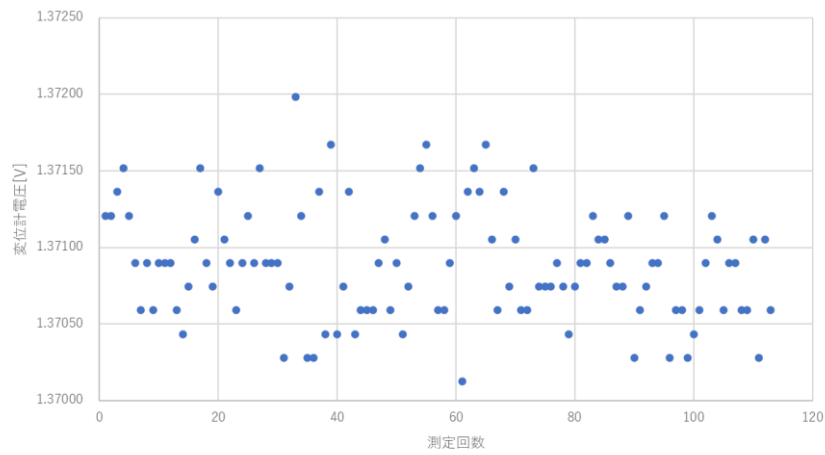


図 3-10 真空中での推力を与えない状態の変位計電圧の一例

## 第4章 推進剤について

### 4-1 推進剤の概要

本研究で主に使用する推進剤は、昇華性を持つ固体の物質である。キセノンやアルゴンと比較して、常温常圧で固体であることから高压タンクが必要なく、推進剤タンクの小型化が容易に行える。これによって、超小型人工衛星への搭載や推進器自体の長寿命化につながる。ほかにも、入手性がよく低価格である、有毒でないため扱いやすいといった利点もある。

本実験で使用した推進剤について、概要を以下の表 4-1 に示す。参考のためキセノンの値もあわせて掲載した。なお L-メントールと樟脳は 20℃大気圧でのかさ密度を、水は 20℃大気圧での液体密度、アルゴンとキセノンは 20℃14.7 MPa での液体密度としている。

表 4-1 使用した推進剤の概要

物質	分子量	価格 [100g/円]	昇華点 [°C]	蒸気圧[Pa]	(かさ)密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
アルゴン	39.95	5.6	—	—	1.4
L-メントール	156.27	5,450	42~44	8.5(25°C)	0.45
樟脳	152.33	1,320	—	533(70°C)	0.80
水(純水)	18.02	11.5	—	3,166(25°C)	0.99
(キセノン)	131.29	81,037	—	—	3.1

昇華性推進剤の中でも L-メントール(C<sub>10</sub>H<sub>20</sub>O)と樟脳(C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>O)を選択した理由として、蒸気圧が低く昇華しやすい、昇華点温度が低く再結晶化しにくいことが挙げられる。

昇華性推進剤のデメリットとしてプラズマ化した際に解離が起こり<sup>(24)</sup>、解離物質が付着し堆積することで長時間の作動が阻害される<sup>(25)</sup>。これらについて、マイクロ波放電式小型プラズマスラストで生成が確認できるかという点にも注目する。しかし解離が発生することによって、排気の平均分子量を下げることで、比推力の向上につながるプラスの効果も考えられる。

先行研究より、昇華性物質を安定した流量で供給することが難しいことが問題点として挙げられており、推力測定実験を行うために一定の流量を確保できる推進剤タンクが求められる。

## 4-2 推進剤タンク

### 4-2-1 タンクの設計

推進剤タンクは、温度調整とバルブによる開閉<sup>(26)</sup>によって流量調整を行うこととした。ここでバルブは流路の遮断にしか使用されず、タンクの質量の測定によって流量を測定する。質量流量は以下の式で求められる。

$$\dot{m} = \frac{m_1 - m_2}{t} \quad (4.1)$$

ここで $\dot{m}$ は質量流量、 $m_1$ は実験前のタンク質量、 $m_2$ は実験後のタンク質量、 $t$ はバルブが開いていた時間である。タンクの質量を測定する必要があるため、バルブと推進剤を含めた総重量が電子天秤の測定限界重量未満かつ、容易に脱着が可能な設計であると望ましい。熱伝導率が比較的高く、比重が小さい、加えて脱着の際に傷つきにくい物質として、ジュラルミンを素材として選定した。

図 4-1 に実際に製作した CAD によるモデルとタンクの画像を、表 4-2 にタンクの諸元を示す。昇華性推進剤は粉末状もしくは結晶粒子で構成されていると仮定し、表面積を増加し熱伝導を促進させるためタンクに放熱用ピンを配置した。タンクとフタの接合部はフッ素ゴム製の O リングによって封止されており、バルブ操作を行わない限り真空引き後は真空が維持される。フタには直接バルブが取り付けられ、バルブから推進器まではシリコンチューブによって配管される。なおバルブ配管ねじ部はシールテープによって封止されている。

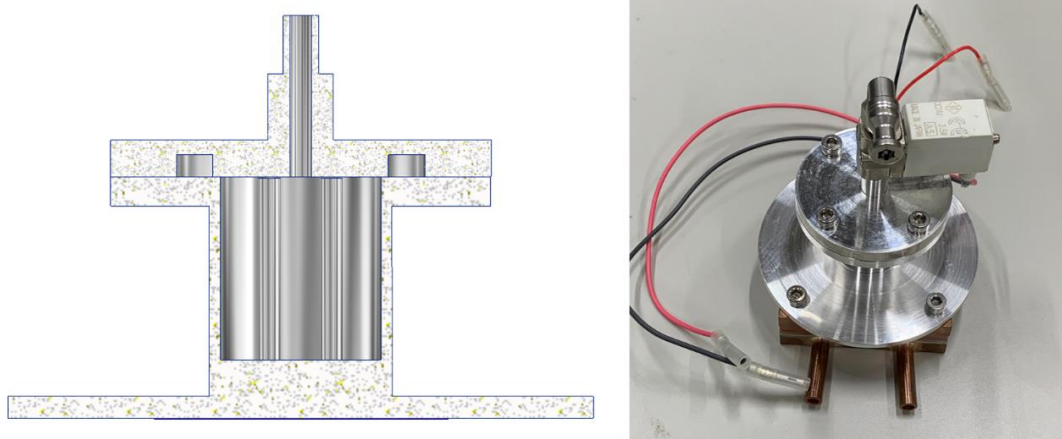


図 4-1 製作した推進剤タンク

表 4-2 推進剤タンクの諸元

材質	アルミニウム合金 (A2017)
容積	10.1 mL
重量	181.04 g (O リング, バルブ, ネジ等含む)
寸法	φ80 mm × 全高 95 mm (バルブ, ジョイント含む)
バルブ	SMC VDW14KA (オリフィス径 1.6 mm, 耐熱 60°C)

## 4-2-2 温度調節機構

タンクの温度管理について、室温程度から昇華温度までの加熱と、スラスタからの熱の流入を相殺するための冷却が必要だと考えた。そこでペルチェ素子を使用した温度調節機構を構築した。図 4-2 に温度調節機構の概要を、表 4-3 に諸元を示す。

推進剤タンクの温度調節は Raspberry Pi を使用した PID 制御によって行う仕組みとなっている。熱衝撃による素子の破損を防ぐため、加熱と冷却が短期間で切り替わらないようにしている。ペルチェ素子への電源供給として安定化電源を使用し、入力された電圧によって電流制限値を変更する機能を利用することで電力調整を行っている。ここで入力電圧は、Raspberry Pi から I2C 接続された DAC を使用して調整される。温度センサについても I2C で接続されている。なお温度センサはタンクへカプトンテープによって固定されており、センサ表面に熱伝導グリスを塗布している。またペルチェ素子とタンク間にも熱伝導シートを挟み込んでいる。

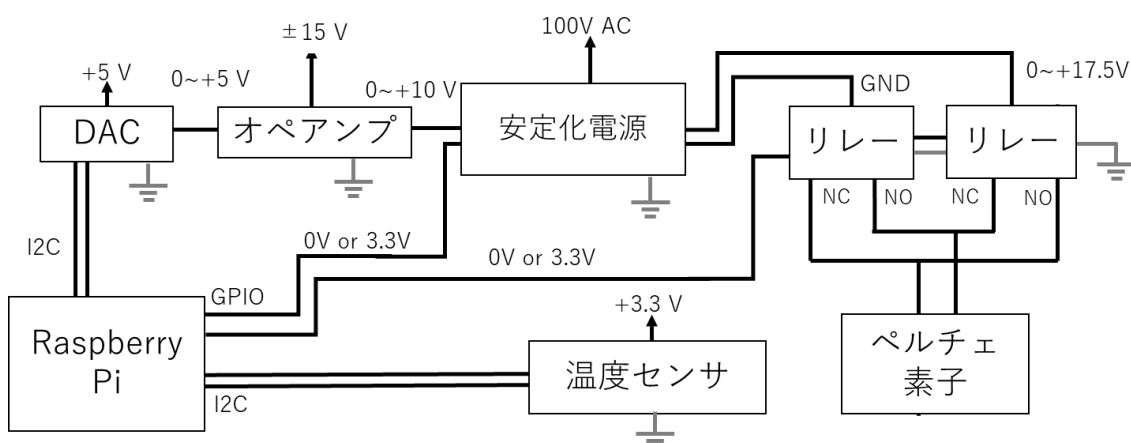


図 4-2 温度調整機構の概要

表 4-3 温度調整機構における主要部品の諸元

ペルチェ素子	高木製作所 PU-50W 8.5 A 17.5 V 強制水冷
温度センサ	ANALOG DEVICES ADT7410 温度分解能 0.0625°C
安定化電源	菊水電子工業 PAS40-9
マイコン	Raspberry pi 3 model B+

## 4-3 タンクの温度調節実験

### 4-3-1 実験目的

推進器へタンクを取り付ける前に、予備実験としてタンクの温度調節がうまく動作するかを調べた。主な目的として、

1. PID 値の調整
2. 設定温度とセンサ温度，実温度との解離を調べる
3. 時間変化に伴う温度変化
4. チラーによる外乱が発生した場合の温度変化
5. 異なる設定温度での実温度

の 5 つを確認することとする。

### 4-3-2 実験方法

本実験においては、まず大気中で PID 値を調整した後、L-メントール 2.96 g をタンクへ投入して温度測定を進める。図 4-3 に L-メントールをタンクに投入した際の画像を示す。真空中でペルチェ素子を使用するため、チラー SIBATA 社製 COOLMAN C-760 と水路を構成し、水温を 15°C 程度とした。タンクの実温度測定として、サーモグラフィカメラ FLIR 社製 C-3X を使用する。真空チャンバ外部からの測定のため、赤外線透過率に優れる臭化カリウム製のウィンドウを使用した。タンクはジュラルミン製であり、熱放射が小さく正確な温度測定が期待できなかったため図 4-4 のように、壁面に熱放射に優れるカプトンテープを貼り付けている。

タンクの設定温度を変化させた際のセンサ温度、サーモグラフィによる温度差を記録し確認を行う。



図 4-3 L-メントールを投入した推進剤タンク内部

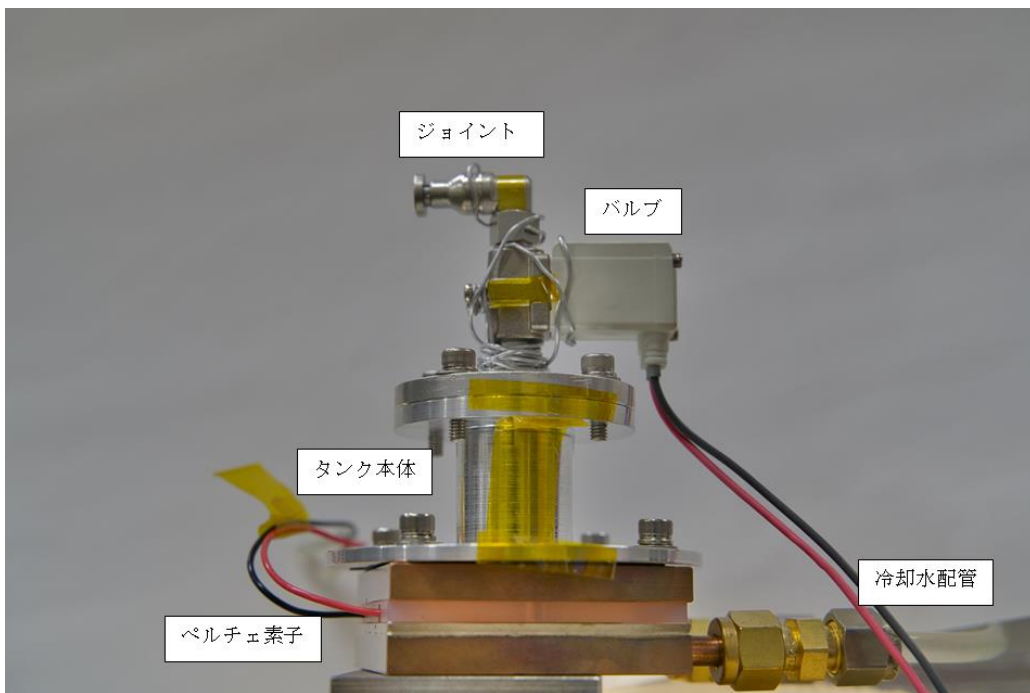


図 4-4 カプトンテープを貼り付けた推進剤タンク

### 4-2-3 結果および考察

真空中と大気中では PID 値の最適値が若干異なることから、修正を行なっている。調整は、ハンティングがほぼ見られず、オーバーシュートが最も小さくなるように手動で行なった。

まずタンク温度が定常になる時間を調べた。図 4-5 にセンサの時間による温度変化を示す。設定温度到達後から 60 秒後には設定温度との差が  $0.1^{\circ}\text{C}$  以下に留まったままであり、標準偏差は  $0.035^{\circ}\text{C}$  であることからセンサ部分は定常状態に達したと考えられる。なお定常状態からの平均温度は  $44.95^{\circ}\text{C}$  であった。温度安定後、チラーの冷凍機動作が入り水温が  $3^{\circ}\text{C}$  ほど低くなった場合には、センサ温度の振動が増加している。しかし最小測定温度分解能以上の温度差とはならなかった。

図 4-6 に  $45^{\circ}\text{C}$  設定時のタンク温度の時間経過によるサーモグラフィ画像の結果を示す。時間経過で温度が低下している結果もあるが、これは使用した機材のキャリブレーションの際に多少表示温度が変化してしまうことに由来している。360~1200 秒において、タンクの温度は大きく変わらないと考えられ、さらに 600~1200 秒ではバルブのコイル部への熱の流入が増えているのみであり、流路の温度上昇は微小であった。

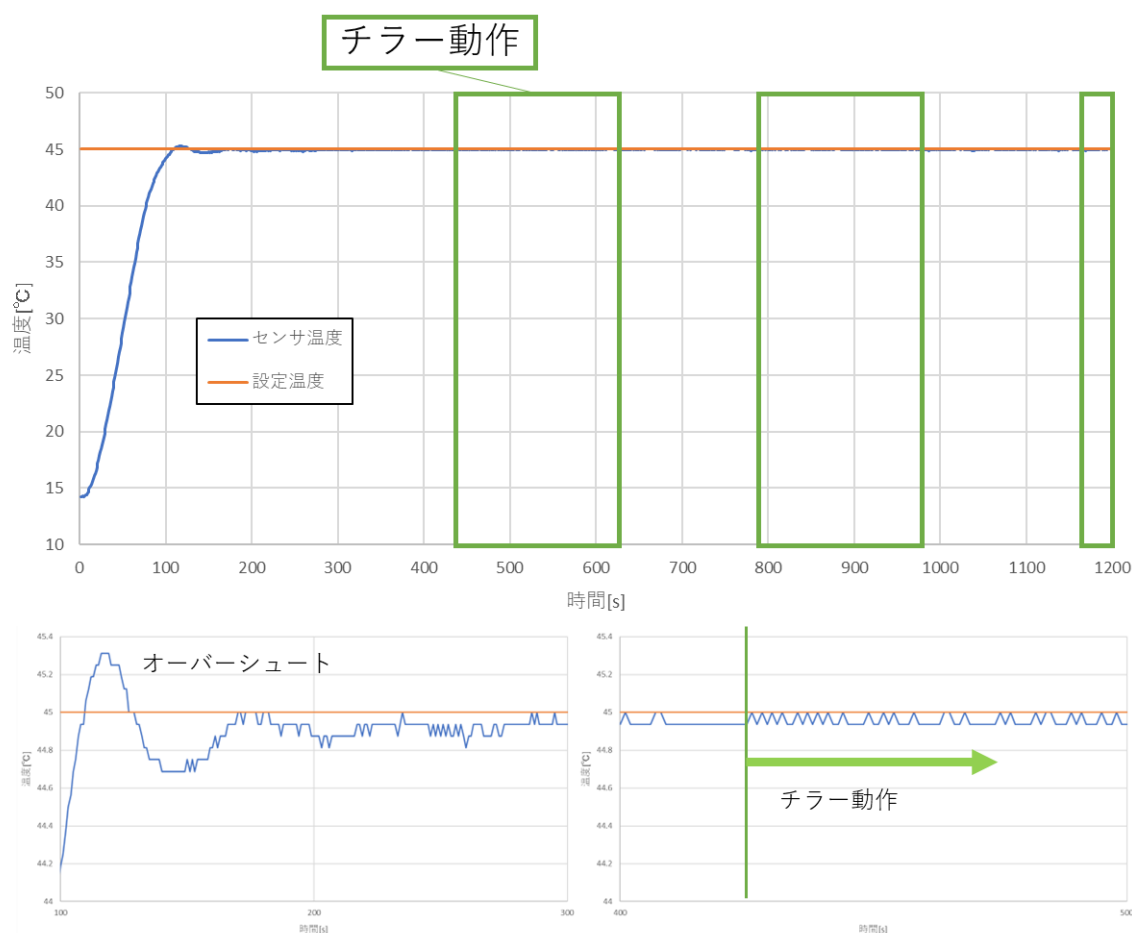


図 4-5 設定温度とセンサ温度の時間変化，またその一部を拡大したもの

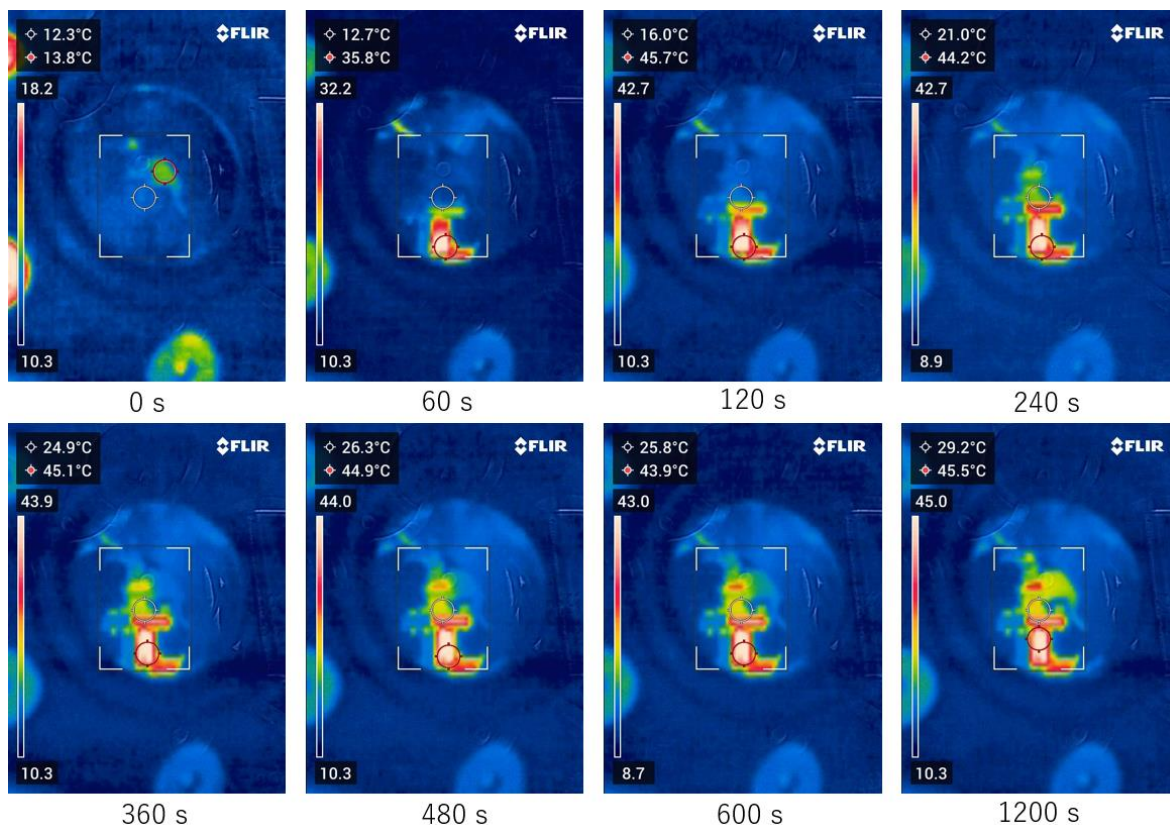


図 4-6 設定温度 45°C時のタンク温度の時間経過

図 4-7 に設定温度とセンサ温度グラフおよび 600 秒経過時点のサーモグラフィ画像の 20°C から 40°C まで 5°C 刻みでの実験結果を示す。なお 20°C, 25°C, 30°C の結果は流路の加熱のため実験前にあらかじめ 45°C 程度に加熱している。そのため温度減少によるアンダーシュートの影響も調べた。またペルチェはタンク加熱側のみでしか動作させていない。平均温度の解離も小さく、温度オフセットも必要ないと考えられる。アンダーシュートも最大で約 1.0°C ほどのものが確認できたが、20°C などの低温ではアンダーシュートが 0.25°C と小さく流量低下も大きくないことや、タンクやバルブの熱容量も考慮し、実験で使用するにあたって問題ないと判断した。

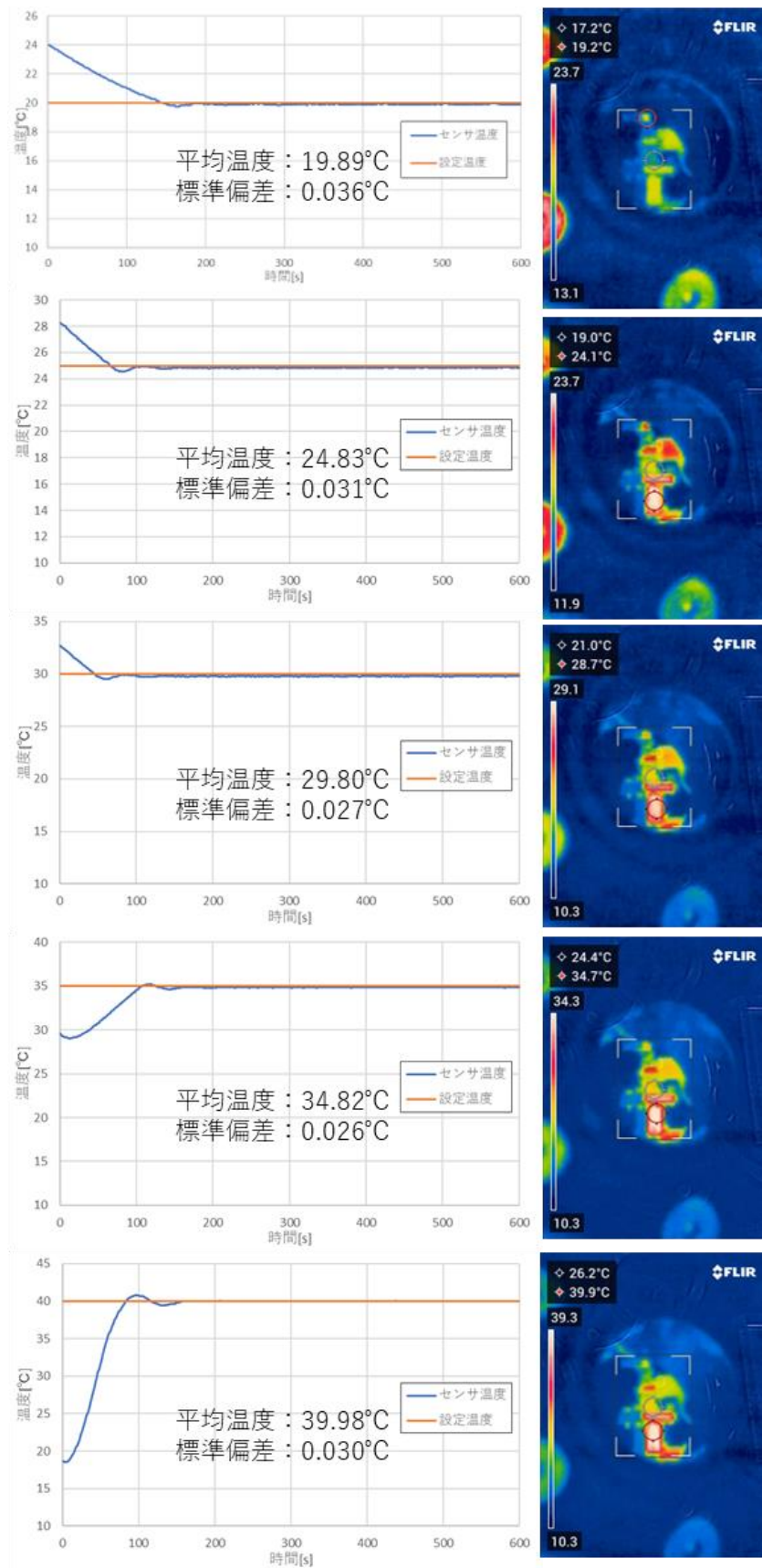


図 4-7 設定温度とセンサ温度グラフおよびサーモグラフィ画像

## 第5章 アルゴンでの推力測定

### 5-1 実験目的

今回使用するスラスタは本研究室の牛尾氏によって開発されたスラスタ<sup>(1)</sup>を使用する。このスラスタはアルゴンに対して最適化されている。先行研究よりイオンビーム電流計測による推力の計測が行われていた。イオンビーム電流計測はスラスタから排出されたビームのうち、イオンのみを捕集しコレクタに流れる電流を計測している。しかし推進剤のみの推力測定ができないことや、高いエネルギーの電子が放出された場合コレクタ電圧が飽和せず、正味の推力を計測することが出来ないという問題があった。今回は昇華性物質での推力測定での比較としてアルゴンを用いるため、製作したスラストスタンドによって推力を測定することとした。推力測定にあたって本実験においては、まずマイクロ波周波数変更によるプラズマ点火の確認を行っていく。次にスラスタのパラメータ変更による点火確認および推力の変化を確認し昇華性推進剤や水推進剤において、はじめにどのスラスタパラメータで実験を進めていくべきか指針を得る。

### 5-2 実験体系

#### 5-2-1 真空排気系

実験は以下の図 5-1 に示す小型真空容器を用いて行う。この真空容器は SUS304 製で直径 70 cm、長さ 83 cm の円筒形のものを使用した。この真空容器は電氣的にアースされており、基準電位となっている。排気系は、排気速度 4.5 L/s の Alcatel 社製ロータリーポンプと排気速度 190 L/s(N<sub>2</sub>)の ULVAC 社製ターボ分子ポンプによって構成されている。真空度の測定には ANELVA 社製のミニチュアゲージ MG-2F と MIG-430 を使用している。最高到達圧力は  $8.22 \times 10^{-4}$  Pa, アルゴン使用時の背圧は最大  $1.35 \times 10^{-1}$  Pa であった。



図 5-1 小型真空容器

### 5-2-2 マイクロ波送電系

スラスタへのマイクロ波送電系の概要図を図 5-2 に示す。本実験では周波数 2.45 GHz のマイクロ波を使用した。2.45 GHz の大電力発振では一般的にマグネトロン管を用いられることもあるが、低電力領域での発振が不安定である。そのため図 5-3 に示すようなマイクロ波ジェネレータとアンプの組み合わせによってマイクロ波を生成している。マイクロ波はスラスタに到達するまでケーブルやコネクタを通過することで電力を消費もしくはマイクロ波を反射する。よってアンプ読みの投入電力値と異なる場合があるため、パワーメータを使用しスラスタ直前までのマイクロ波の正味投入電力とアンプの出力値を較正して使用している。またスラスタ直前にはセラミック製の誘電体を使用したコネクタを挟むことで、スラスタの排熱による SMA コネクタの汚損やセミリジッドケーブルの誘電体の破損を防いでいる。チャンバ内をセミリジッドケーブルで結線している理由としては、ターゲット方式推力測定による誤差の低減が挙げられる。セミリジッドケーブルでスラスタの位置を固定することによって、スラスタの推進力による軸方向の移動を防ぎターゲットへ推力を集中させる。

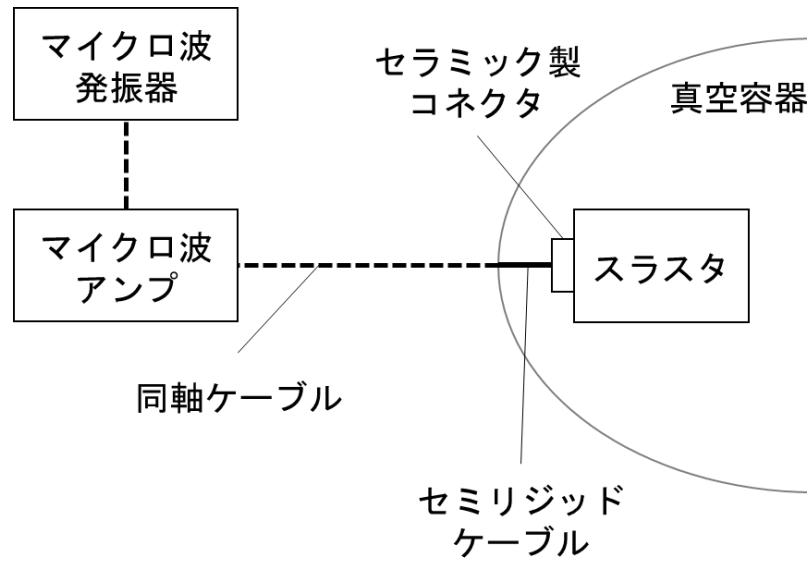


図 5-2 マイクロ波送電系概要図

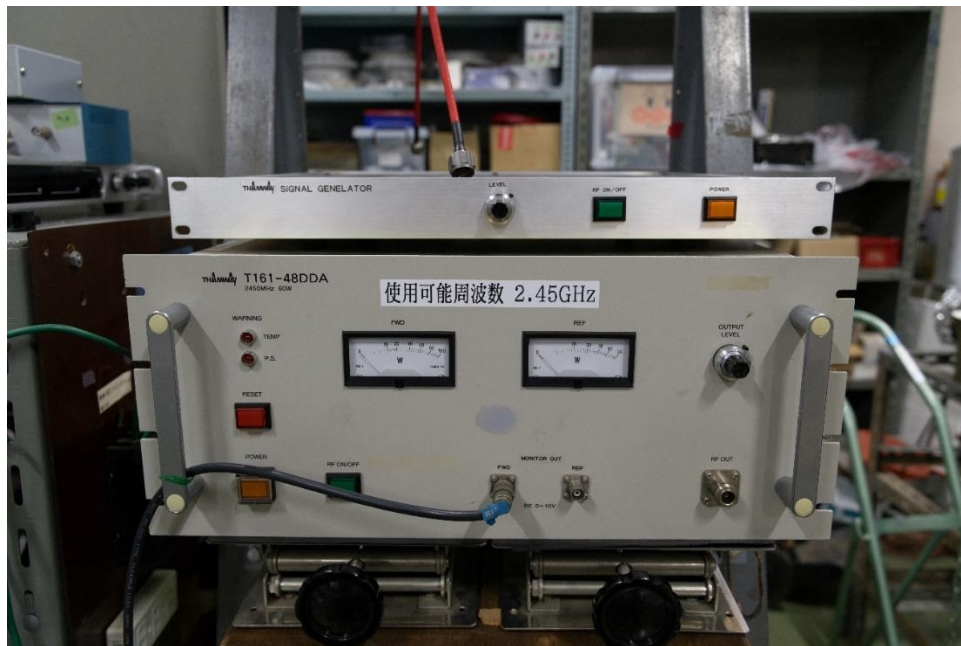


図 5-3 マイクロ波ジェネレータとアンプ

### 5-2-3 スラスタ本体

本研究で使用したマイクロ波放電式小型プラズマスラスタを図 5-4 に示す。放電室は内径 22 mm 高さ 12 mm の円筒形で，アルミニウム合金製である。放電室外部には 4.0×4.0×12 mm のサマリウムコバルト(Sm-Co)磁石を配置する構造となっており，個数を変更できる。なお磁石は高さ方向に磁化している。Sm-

Co 磁石はキュリー温度が高く、磁気特性も優れていることから採用している。

セントラルヨークと呼んでいる円柱状の軟鉄製部品は、マイクロ波投入口の反対側に取り付けられており、直径 6 mm で中心にアンテナと絶縁体を通すための直径 2 mm の穴が開いている。アンテナ側の中央がすり鉢状になっており、磁場を集中させ磁気チューブの特性を良くしている。今回は比較のため、バックヨークと呼んでいる軟鉄製部品からの長さが、それぞれ 3.0 mm, 5.0 mm, 7.0 mm の 3 種類を用意した。セントラルヨーク長を変更することで、磁気チューブ間の距離を変更できる。セントラルヨークを長くすると、磁気チューブが短くなり磁気チューブ中の電子が中性粒子を電離させるのに十分なエネルギーを持ちやすくなる。逆に電子が十分なエネルギーを持っており中性粒子の平均自由行程が長い場合、磁気チューブを長くすることで中性粒子との衝突確率を増やすことが出来るため推力増加が期待できる。

磁石個数とセントラルヨーク長の変更にあたって、表 5-1 に磁石個数とセントラルヨーク長による磁束密度の実測値を示す。プラズマ点火にあたっては、電子サイクロトロン共鳴（以下 ECR）の影響も考えられる。磁束密度は ECR プラズマの発生や磁気チューブの強度において重要なパラメータであり、マイクロ波周波数、アンテナ位置とセットで最適値を探る必要がある。

アンテナは鋭角が 8 か所あり、直径 9 mm の星形のモリブデン製のものを使用した。モリブデンはスパッタに強く、特にプラズマ密度が高いと考えられるアンテナ付近で安定した使用が可能である。アンテナ長はセントラルヨーク長によって決定し、セントラルヨークから 2.0 mm 離れた場所にアンテナが位置する。またアンテナは SMA コネクタに挿入することで固定している。アンテナとセントラルヨークの絶縁のためにセラミック製の管を挿入している。

放電室内の中性粒子密度を調整するために、オリフィスプレートと呼んでいる中心に穴が開いたアルミニウム合金製の板を放電室前方に設置している。実験では、10 mm と先行研究<sup>(27)</sup>より優れていた 12 mm の 2 種類を使用した。オリフィスプレートは開放径が大きいほど推力が大きくなる傾向があるが、中性粒子密度の減少によってプラズマが点火しにくくなる。

フロントヨークとオリフィスプレートの間にはスペーサーと呼んでいる、フロントヨークの直径と同径の穴が開いたアルミニウム合金製の板を挟み込んでいる。これにより、オリフィスプレートに衝突する電子によるロスを減らしている。なおスペーサーの厚みは 4mm のものを使用した。

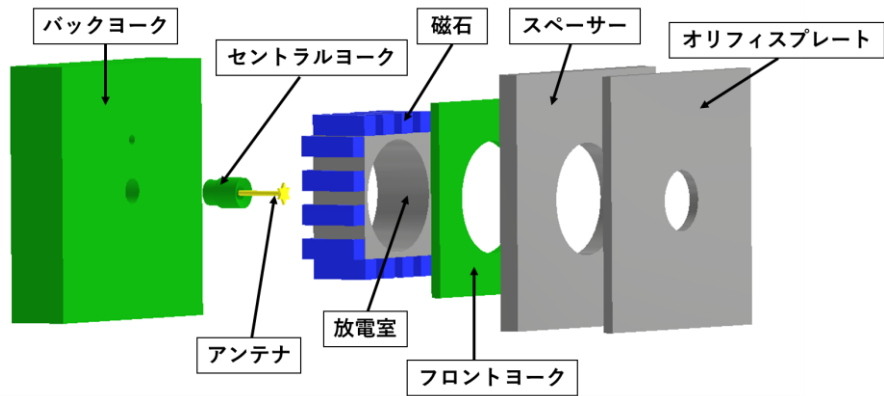


図 5-4 実験で使したマイクロ波放電式小型プラズマスラスタ

表 5-1 磁石個数とセントラルヨーク長による磁束密度の変化

磁石個数[個]	セントラルヨーク長[mm]	磁束密度[mT]
8	3	58.5
	5	74.2
	7	89.3
10	3	81.6
	5	91.2
	7	107.3
12	3	85.9
	5	125.0
	7	147.3
14	3	117.3
	5	138.8
	7	169.1
16	3	126.4
	5	150.2
	7	208.7

## 5-3 実験方法

アルゴンガスの供給において、KOFLOC 社製のマスフローコントローラー 3660 を使用した。はじめにスラスタの各パラメータ変更による点火有無について実験を行い、必要なマイクロ波投入電力と流量も計測する。次にアルゴンガスのみの場合での推力測定を行い、さらに各々のパラメータを変更した場合について推力を確認した。

## 5-4 結果および考察

### 5-4-1 プラズマが点火する構成

実験結果として、スラスタのパラメータを変更した場合のプラズマ点火有無等について表 5-2 に示す。アルゴンによるプラズマ点火は可能であったが、先行研究と比較すると点火に要する流量が増加している。まずオリフィスプレート径の変更によって点火に必要な流量が変化した。磁石個数 16 個の 10 mm ではマスフローコントローラーのバルブを全開にする必要があったが、12 mm では 297  $\mu\text{g/s}$  の流量で点火している。全開にすることで 297  $\mu\text{g/s}$  の数倍から数十倍の流量が流入していると考えられる。またセントラルヨーク長 3 mm の場合に点火しなかった点について、磁束密度の不足によって電子の閉じ込めができず、電子の十分な加速ができなかったことから安定点火が行えなかったと考えられる。セントラルヨーク長 5 mm の場合では磁石個数を減らしても点火が確認できた。セントラルヨーク長 7 mm と比較し約半分ほどの流量で点火が行える。そのため、セントラルヨーク長 7 mm の場合は ECR 層とアンテナの位置関係が悪い、磁束密度が大きく ECR 加熱が期待できない、もしくは電子のエネルギーが増加しすぎること磁気チューブに閉じ込められなくなり、中性粒子との衝突回数が減ることに起因すると考えられる。

表 5-2 プラズマ点火実験の結果

磁石個数	オリフィスプレート径	セントラルヨーク長	プラズマの状態
8	10 mm	7 mm	—
9			—
12			—
14			点滅し不安定
16			バルブ全開 20W で点火
9	12 mm	7 mm	—
12			—
16			297 $\mu$ g/s 20W で点火
9	12 mm	3 mm	—
12			—
16			点滅し不安定
10	12 mm	5 mm	点滅し不安定
14			297 $\mu$ g/s 20W で点火
16			178 $\mu$ g/s 20W で点火

### 5-4-2 推力測定の結果

プラズマを点火せず、アルゴンのみの推力測定を行った結果を図 5-5 に示す。推力は流量に対して引いた回帰直線について、 $R^2=0.999$  であり比例していることが確認できた。これに伴って比推力は約 30 秒で流量に対してほぼ一定の値をとった。バルブ全開時の流量は、ターボ分子ポンプの回転数低下とスラストスタンドの振動が収束せず、推力から計算できなかった。

次にスラストのパラメータのうち、磁石とセントラルヨークの推力への寄与を確認するため、磁石を 14 個と 16 個、セントラルヨークを 5 mm と 7 mm に変更して推力測定を行った結果を図 5-6 に示す。今回の実験ではスラスト動作中に異常放電を認めたため、マイクロ波投入電力を異常放電回数が増加した値までに制限している。なお磁石 14 個、セントラルヨーク長 5 mm の場合 59.4  $\mu$ g/s 5 W にてプラズマが消えたためデータが取得できなかった。マイクロ波投入電力を増加させることで、推力と比推力の上昇が確認できた。しかし流量増加によって推力は上昇しているものの比推力は低下している。流量増加によって中性粒子密度が増加し平均自由行程が短くなるが、中性粒子と電子との衝突回数が増えることで電子のエネルギーが吸収されやすくなり、電子のエネルギーが上がりにくくなっていることが考えられる。よってオリフィスプレート径

を拡大することによって推力が増加する可能性があるが、プラズマ点火の難化が問題となる。

今回の実験で最も推力が大きい組み合わせは、磁石 16 個、セントラルヨーク長 7 mm、オリフィスプレート 12 mm であった。セントラルヨークを長くするもしくは磁石個数を多くすることで推力が増加した原因として、磁束密度が増加することで磁気チューブへより高いエネルギーの電子をトラップ出来るようになり、より多くの中性粒子をプラズマ化することによるものだと考えられる。

推力の面でみるとセントラルヨーク長を 7 mm、磁石を 16 個とした場合が最も優れていたが、プラズマ点火の面ではセントラルヨーク長 5 mm、磁石 16 個が最も優れていたと考えられる。このスラスタは点火時に ECR による電子加熱による影響もあることが先行研究より判明している。セントラルヨークの位置と磁石個数によって ECR 層の位置も変化するが、中性粒子密度とともに最適値に近づくことで点火しやすくなっていると考えられる。さらに異なる推進剤を試行していく上で、点火のしやすさが最も重要であることから、今後の実験はすべて磁石個数 16 個、セントラルヨーク長 5 mm、オリフィス径 12 mm で行なうこととした。

先行研究によると、推進剤流量 82  $\mu\text{g/s}$  マイクロ波投入電力 32 W によるイオンビーム電流計測にて 478  $\mu\text{N}$  を発生させているが、今回の実験では同等の数値が得られなかった。原因としてはまずマイクロ波周波数が異なることが挙げられる。先行研究では 1.6 GHz のマイクロ波を使用しており、今回実験したスラスタも磁場形状からのアンテナ位置と ECR 層の関係などが 1.6 GHz に最適化されている。そのため性能が低下してしまった可能性が濃厚である。加えてアンテナの形状や推力計測方法の違い、実験体系の差などが積み重なり誤差となってしまったと考えられる。

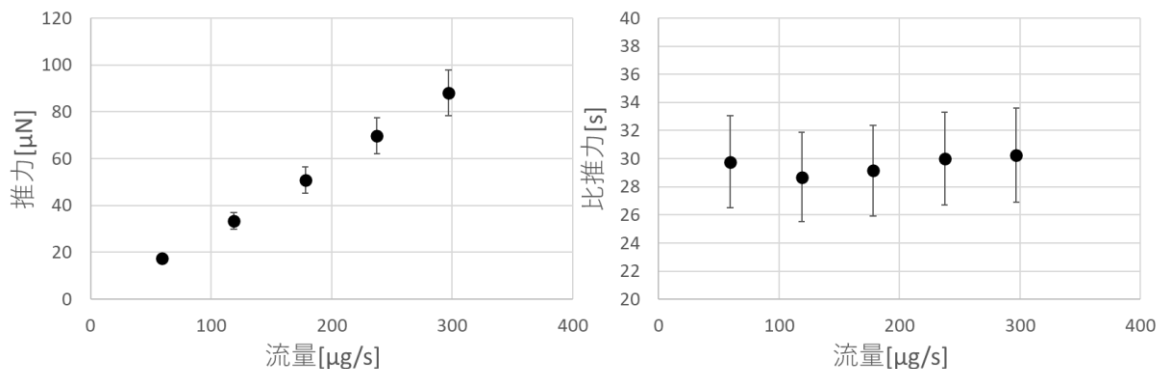


図 5-5 アルゴンガスのみ推力測定

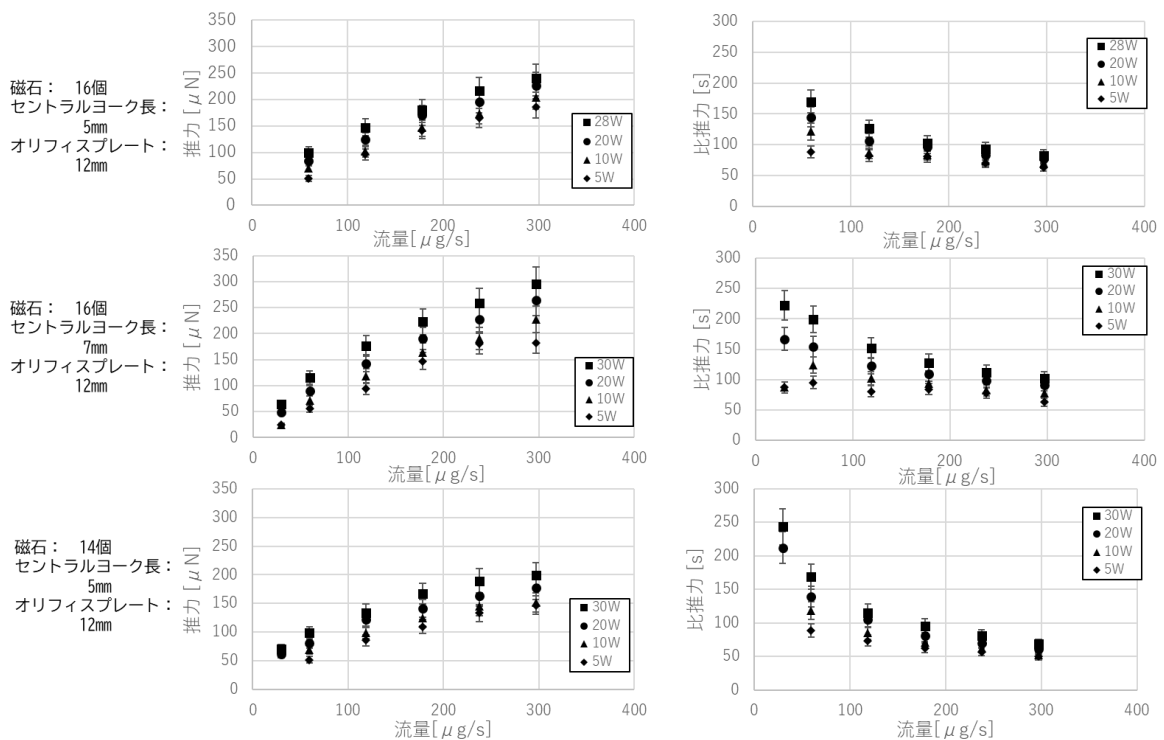


図 5-6 スラスタパラメータ変更による推力と比推力の投入電力ごとの比較

今回プラズマを 1 時間ほど点火し続けた結果、マイクロ波送電系の中でもセミリジッドケーブルと SMA コネクタ接合部の半田が溶け、送電系でのマイクロ波の反射が大きくなることでプラズマが消える現象を確認した。放電室内でのプラズマの発生位置が悪く反射が大きかったことやセラミックへのアルミ等のスパッタ付着によって絶縁部が導通してしまったことが考えられる。しかしこれらの問題の解決はスラスタ自体の変更が必要となるため、コネクタ接合部からの放熱と熱抵抗を増やすことで対策を行った。セミリジッドケーブルとスラスタ間に半田を使用していない既製品の SMA コネクタを追加した。今回この操作によって、スラスタの性能が変化したため再測定を行った。図 5-7 にオリフィス径 12 mm、セントラルヨーク長 5 mm、磁石 16 個の推力測定結果を、図 5-8 にプラズマ点火時の画像を示す。流量が  $53.5 \mu\text{g/s}$  のときの推進剤利用効率は先行研究と今回の実験の質量流量において、10 W のとき 0.5%、20 W のとき 1.4%、30 W のとき 2.2%であった。

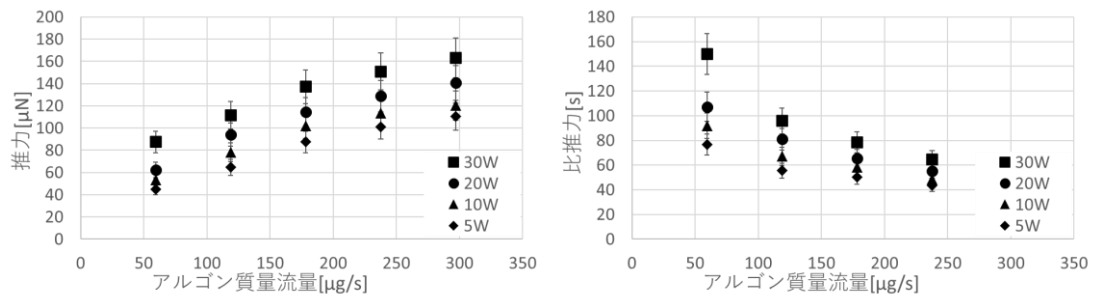


図 5-7 熱対策後のアルゴンでのマイクロ波投入電力ごとの推力測定結果

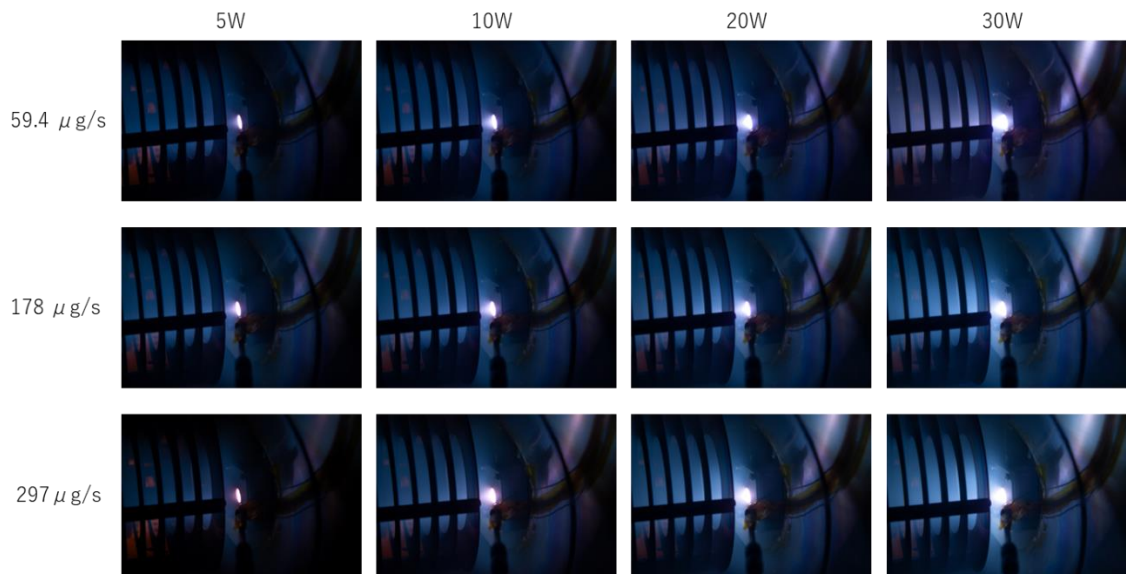


図 5-8 アルゴンプラズマ点火画像 (f/10 15s Iso100 WB 固定)

# 第6章 昇華性推進剤でのプラズマ点火および 推力測定

## 6-1 実験目的

本実験では、L-メントールおよび樟脳が推進剤としての実用性があるか、アルゴンと性能を比較しながら検討を行っていく。よって本実験では、

1. 推進剤を昇華させてスラスタに供給できるか
2. 温度と流量の関係は適切か
3. プラズマの点火が可能か
4. 推力と比推力，トータルインパルスと推進効率

の4つの点を確認していく。

## 6-2 実験方法

実験体系は前章と同じものを使用する。昇華性推進剤を投入した推進剤タンクをスラスタとシリコンチューブで接続し、スラスタ付近まで熱を流入させるため1200秒45°Cで加熱する。その後バルブを開放し電離真空計の真空度が変化しなくなった点からプラズマ点火を行う。実験中はマイクロ波投入電力を変化させ推力を測定する。実験後は、マイクロ波を停止した後バルブを閉じ、測定時間より流量を計算した。なおタンク質量の計測には島津社製電子天秤ATX224を使用した。

## 6-3 L-メントールの結果および考察

### 6-3-1 再結晶化

タンク温度45°Cで実験を行ったところ、バルブ開閉によって真空度が全く変化せず流路で再結晶化が起きていることが確認できた。図6-1に再結晶化した流路の画像を示す。バルブ直後の配管から再結晶化が確認できる。再結晶化を防止するため、流路にアルミホイルを巻き付けた。その結果プラズマを点火させることが出来た。しかし表6-1に示すように同温度の流量が一致せず、さらにバルブを閉じても流路で再結晶化したものがスラスタに流れ込むなどの問題が発生した。



図 6-1 再結晶化した流路

表 6-1 プラズマ点火時のタンク温度 45°Cの流量パラメータ

流量	加熱時間	実験時真空度
32.98 $\mu\text{g/s}$	4500 秒	$1.2 \times 10^{-1}$ Pa
24.19 $\mu\text{g/s}$	2900 秒	$1.6 \times 10^{-1}$ Pa

### 6-3-2 配管とスラスタの加熱

再結晶化改善のため、流路の金属での配管加工、およびヒータでの流路およびスラスタの加熱を行うこととした。図 6-2 にステンレス線を貼り付けたスラスタと流路の画像を示す。流路はアルミパイプとシリコンチューブによって構成されており、シリコンチューブはスラスタ動作時にタンクおよびバルブへの高熱の流入を防ぐために熱絶縁として組み込んでいる。アルミパイプとスラスタにはまずカプトンテープが巻かれており、その上から  $\phi 0.10$  mm,  $70.0 \Omega$  のステンレス線を取り付け、さらにカプトンテープで挟み込んで固定している。

このシステムの温度を測定した結果を図 6-3 に示す。なおアルミパイプは測定点付近にカプトンテープを貼り付けて熱放射を向上させている。ステンレス線への投入電力は 1.8W であった。13.9°C から 1500 秒でタンクの使用温度である 45°C 付近まで、流路を加熱可能であった。さらにスラスタは 62.8°C まで加

熱されているため、熱勾配によってスラスタ内部での再結晶化は発生しないと考えられる。

またタンクのみを設置しバルブを開放させ続けた場合の真空度が 1100 秒で変化しなくなることから、流路およびスラスタの加熱に必要な時間である 1500 秒を待ち時間とし、加熱開始からバルブ開放までの必要時間とした。最終的なスラスタとタンク間の配管について、図 6-4 に画像を示す。

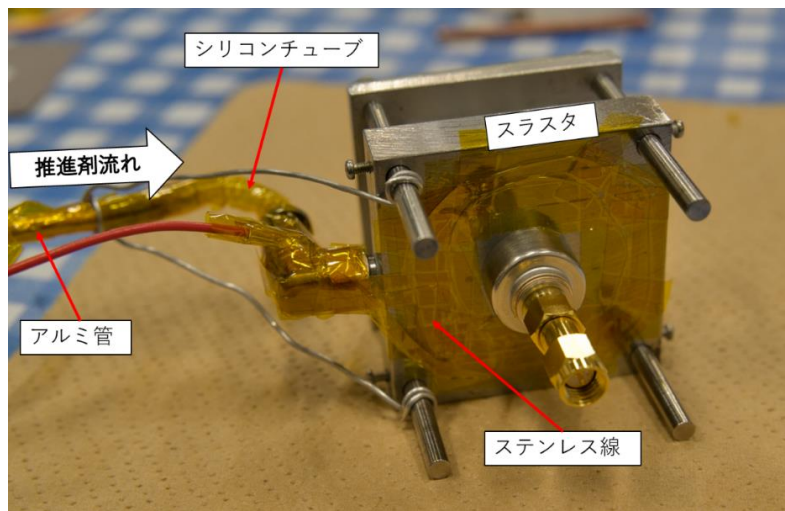


図 6-2 ステンレス線を貼り付けたスラスタと流路

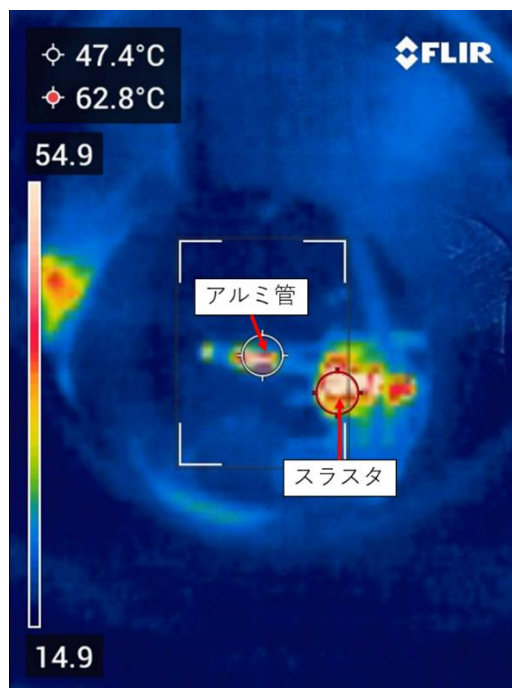


図 6-3 スラスタと流路の温度

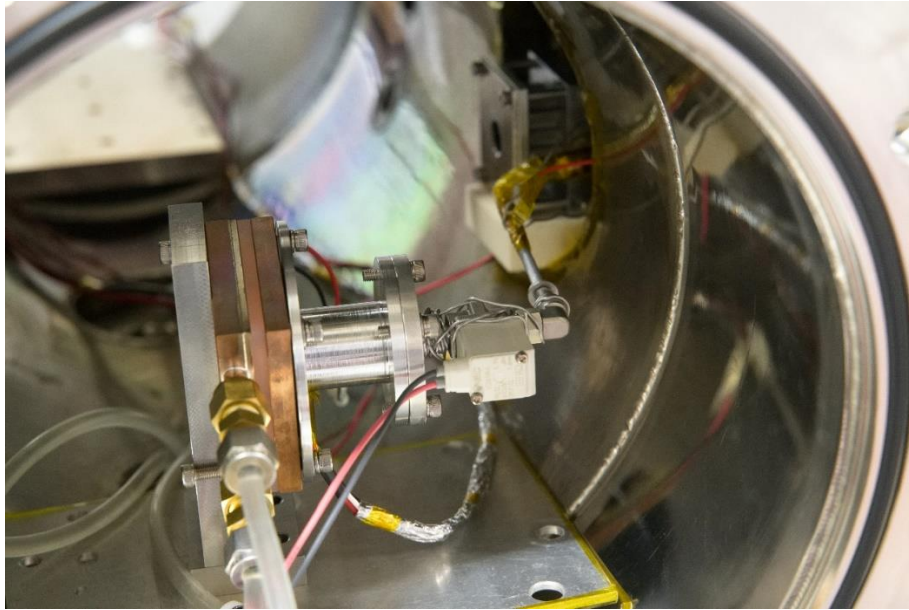


図 6-4 スラスタとタンクの配置

### 6-3-3 温度と流量の測定結果

実験中、バルブの開閉において真空度も連動して変化することを確認した。そのためタンクの温度制御と流路の加熱システムは正常に動作していると判断している。プラズマ未点火時の L-メントールを推進剤とした場合の背圧は最大  $7.0 \times 10^{-2}$  Pa であった。なお昇華性物質の再結晶化に伴いバルブが固着したため、CKD USB2-M5 2 (オリフィス径 1.5 mm) へ交換し再度測定を行った。

タンク温度と流量、およびメントール流量と推力の関係を図 6-5 に示す。比推力は 20 秒程度であった。タンク温度と流量の関係性について、L-メントールの蒸気圧曲線<sup>(28)</sup>と配管の合成コンダクタンスから理論値を求め、実験値と比較した。その結果 35°C から 40°C までは比較的近い値となっているが、温度が上昇するにつれて差が開いている。樟脳でもこの傾向は確認でき、流路も十分加熱されておりバルブ操作によって真空度も連動することから、バルブからの流路における再結晶化によるコンダクタンス上昇の影響ではないと考えられる。ここでバルブ内の流量制御部分は熱伝導率が比較的小さいシリコンゴムで構成されていた。ここに再結晶化した昇華性物質が付着することでコンダクタンスの変化をもたらし、理論値よりも低い流量になるのではないかと考えた。温度が上昇するにつれて流量の増加が大きく、細かな流量調整において精密な温度制御の重要性が確認できる。さらに推力も誤差は大きいポイントがあるが、比例しているポイントも多い。しかしアルゴンの結果と比較すると  $R^2=0.837$  と小さく、スラスタ位置のずれによる、推力誤差や流路のコンダクタンスのず

れが考えられる．特に流路のコンダクタンスによって推進剤流量も変化しうる．

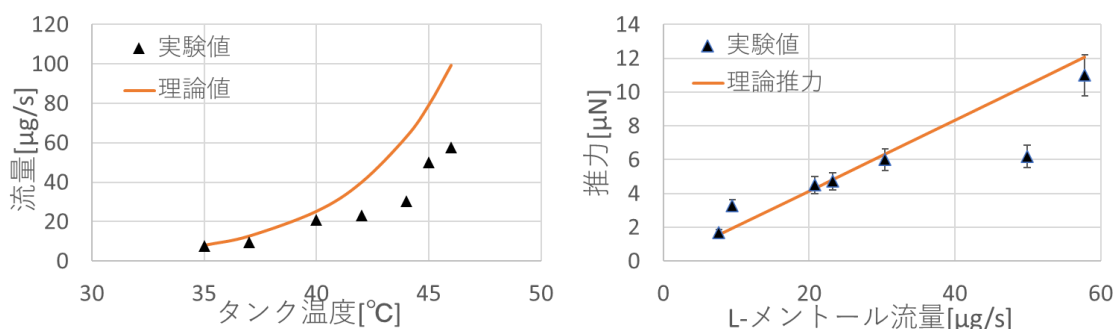


図 6-5 L-メントールのタンク温度と流量および流量と推力

### 6-3-4 推力測定の結果

流量が 20  $\mu\text{g/s}$  以上のとき，マイクロ波投入電力が 10 W でプラズマが点火した．また流量 20.79  $\mu\text{g/s}$  未満では点火しないか点滅を繰り返し，推力もガスのみの場合と比較してほぼ横ばいであった．低流量時はマイクロ波投入電力を 20 W にしなければ点火しなかった．プラズマ点火後は真空度が良くなり， $7.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$  となった．これは以後の章で詳細を示すが，プラズマによって堆積物が発生するためだと考えられる．

プラズマ点火から 30 分後の推力を測定し，流量と推力，比推力の関係を図 6-6 に，点火時の画像を図 6-7 に示す．流量およびマイクロ波投入電力の増加によって推力が増加していることが確認できた．特にマイクロ波投入電力を 20~30 W としたところ，推力の増加割合が高いポイントが多い．また，流量 57.80  $\mu\text{g/s}$  のときの推進剤利用効率は 5 W のとき 0.06%，10 W のとき 0.18%，20 W のとき 0.29%となっている．推進効率はアルゴンとほぼ同等であることから，イオン質量が解離によって小さくなったことで推進剤利用効率が低下している可能性がある．さらに，30.41  $\mu\text{g/s}$  と 57.80  $\mu\text{g/s}$  の場合，撮影画像から 5 W，10 W と比較して 20 W，30 W のプラズマの色強度分布が変化していたことから，解離が行われている可能性が高い．

また 20.79  $\mu\text{g/s}$ ，20 W と 30 W の点において，推力とプラズマ明度がほぼ同じであることから，同程度の L-メントールがプラズマ化している可能性がある．スラスタの性能上限を探るうえで重要な情報であるため，より細かな流量での実験を行い，同様の傾向が見られるか検証を進める必要がある．さらに異常放電の原因を探るもしくは対症的な解決を行うことによってマイクロ波投入電力を増加させ，推力の上昇値を確認することが求められる．

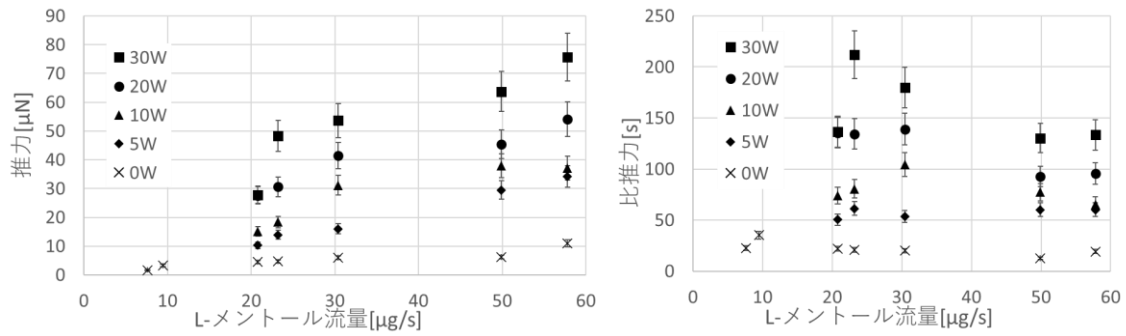


図 6-6 流量と推力および比推力のマイクロ波投入電力ごとの関係



図 6-7 L-メントールにおけるプラズマ点火画像 (f/10 15s Iso100 WB 固定)

スラスト点火からの時間経過による推力の違いについても実験を行った。図 6-8 は流量  $57.8 \mu\text{g/s}$  における点火直後から 15 分後と 30 分後の推力の推移を示している。なおコネクタの融解を防ぐため実験は 30 分までとした。点火直後は投入電力の変化に対する推力変化が乏しい。この傾向は L-メントールの別流量での実験でも確認された。電離真空計の値はほぼ同じ値を維持しているが、実験開始直後は流路において再結晶化の可能性や、推進剤の漏れも考えられ、推進剤流量が時間経過でわずかに変化している可能性がある。点火直後 30 W から 5 W に落とす操作を行っているが、プラズマの発生位置が良い状態のまま推移したことから 5 W の点が飛んでいる可能性が考えられる。加えて堆積物などの原因によってプラズマ点火位置が変更し、推力が改善している可能性もある。点火直後から一貫して推力が上がり続けているが、測定時間を延ばして頭打ちになる点を探り、堆積物による推力低下が起こるか注目すべきである。

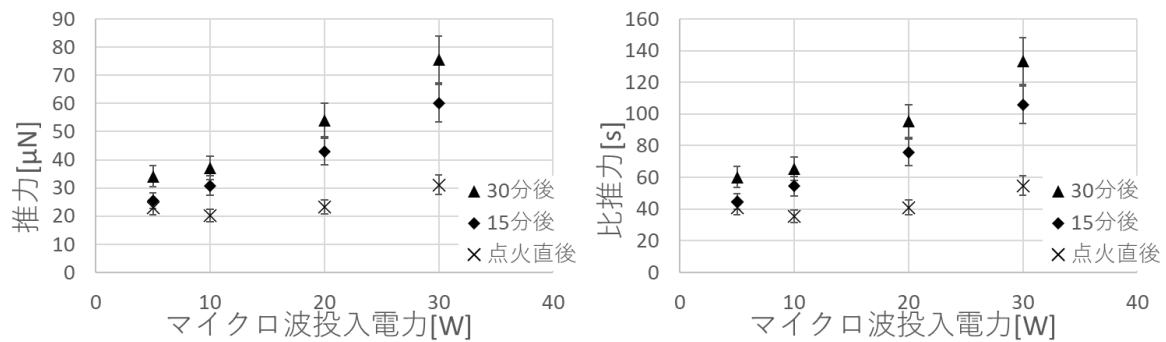


図 6-8 L-メントールの時間経過による推力と比推力の推移

アルゴンとの比較として、同質量流量でマイクロ波投入電力を 30 W 程度で同等もしくは上回る推力を発生させる可能性があるが、投入電力が小さいほど推力の伸びが少ない。さらに推進器の動作中は排熱で昇華のための加熱が行えると考えるが、始動時にはヒータでの加熱に電力を使用する。よって低電力のシステムでの使用には向かないが、ある程度の発電能力を備える人工衛星にとっては推力と推進剤の特性の面から実用性があるのではないかと考えた。

### 6-3-5 タンク内の様子

タンク温度 45°Cでの実験後のタンク内部の様子について図 6-9 に示す。L-メントールは融点が 44°Cであることからタンク内部で液体となっていたことが分かる。しかし柱状結晶状態、タンク内部で液化し再度固化した状態、乳鉢で粉末状にした状態での流量についても検証を行なったが、融点より低温もしくは高温であっても流量の有意な差は確認できなかった。



図 6-9 L-メントールの実験後のタンク内画像

## 6-4 樟腦の結果および考察

### 6-4-1 温度と流量の測定結果

プラズマ未点火時の、樟腦を推進剤とした場合の背圧は最大で  $1.35 \times 10^{-1}$  Pa であった。図 6-10 に樟腦での温度と流量，加えて流量と推力の結果を示す。流量は蒸気圧曲線<sup>(29)</sup>と配管コンダクタンスから求めた理論値と比較して，傾きがあまり一致しておらず，さらにタンク温度の上昇につれて乖離が大きくなっていった。また推力も流量に対して相関性が見られるが，L-メントールやアルゴンと比較するとばらつきが大きい。これはスラストスタンドの流量ゼロ点を測定する際の真空度に一桁 Pa 未満のばらつきが発生してしまったことが原因として考えられる。しかしタンクからの流量のばらつきによるものが原因か判別ができない。よって同じ温度，異なるバルブ開放時間にて複数回測定し，タンク流量の時間分布におけるばらつきを調べる必要がある。

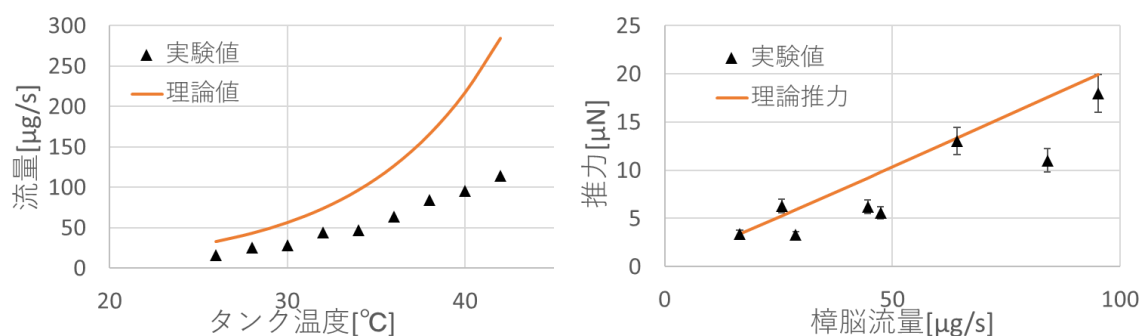


図 6-10 樟腦のタンク温度と流量および流量と推力

### 6-4-2 推力測定の結果

点火が確認できたすべての流量において，マイクロ波投入電力が 10 W でプラズマが点火した。また流量  $25.70 \mu\text{g/s}$  未満では点火しないか点滅を繰り返していた。プラズマ点火後は L-メントールと同様真空度が良くなり， $8.3 \times 10^{-2}$  Pa となった。

プラズマ点火から 15 分後の推力を測定し，流量と推力，比推力の関係を図 6-11 に，点火時の画像を図 6-12 に示す。流量およびマイクロ波投入電力の増加によって推力が増加している。樟腦も L-メントールと同じく投入電力が増加することで大きく推力が向上するため，マイクロ波投入電力によっては同質量流量のアルゴンを超える推力が期待できる。推進剤利用効率は，流量  $47.4$

$\mu\text{g/s}$  で 5 W のとき 0.008%, 10 W のとき 0.021%, 20 W のとき 0.035%であり, 実イオンビーム電流を測定していないことから L-メントールとほぼ同じ結果となった. そのため同様に解離が起こっている可能性がある. 比推力は L-メントールのほうが大きい結果となったが流量  $114.2 \mu\text{g/s}$  では 30 W の投入電力時に大きく比推力が向上している. そのため樟脳流量増加やオリフィスプレート径の縮小によってさらに比推力が増加する可能性がある.

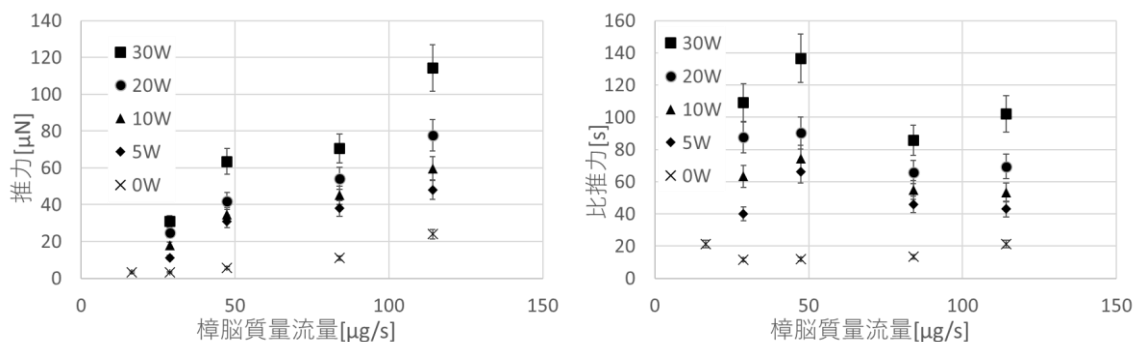


図 6-11 樟脳での流量と推力および流量と比推力の関係

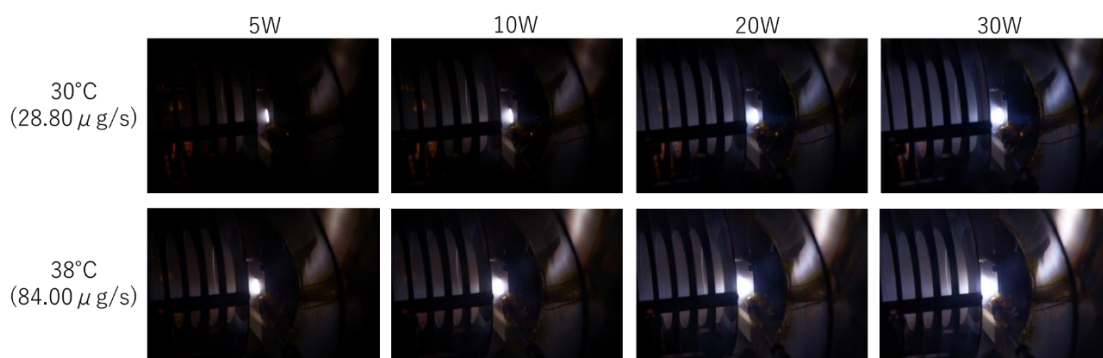


図 6-12 樟脳におけるプラズマ点火画像 (f/10 15s Iso100 WB 固定)

流量が  $114.2 \mu\text{g/s}$  の時間経過による推力と比推力の推移を図 6-13 に示す. 結果より点火直後から 15 分までは推力の変化はほぼないが, 30 分経過後の計測では大幅に推力が低下した. 同様に流量  $47.4 \mu\text{g/s}$  においても 30 分の時間経過によって  $2\sim 3 \mu\text{N}$  の推力の減少が見られた. スラスタを停止し内部を目視で確認すると, 流量が増加することで堆積する物質の量も増加しているように感じられる. 堆積物質が増加することでプラズマの点火位置が変化し, 推力減少に繋がっている可能性がある. よって推進剤流量を増やすことで一時的に推力を増加させるものの, 連続使用することで逆に性能を大幅に低下させる要因となりうる.

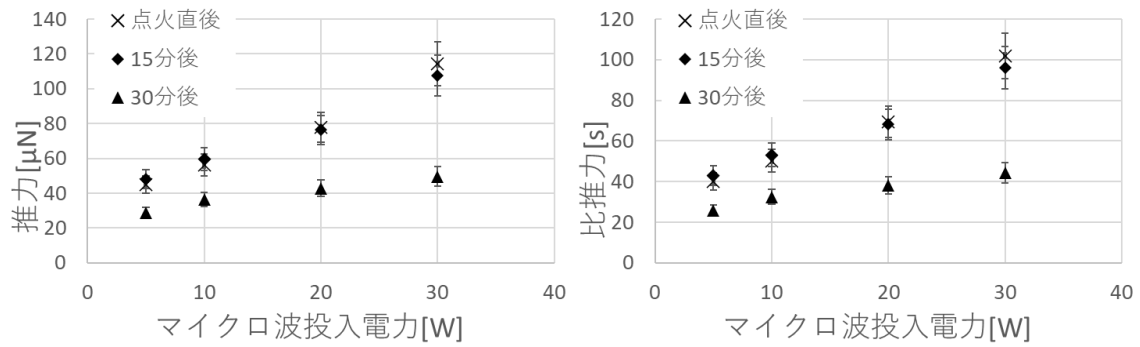


図 6-13 樟脳の時間経過による推力と比推力の推移

これらの結果より、昇華性推進剤はアルゴンと比較してマイクロ波電力を一定以上投入し、解離が効率よく行われる電力とすることにより質量流量比で推力、比推力ともに上回る可能性を秘めていることが確認できた。推進剤に合わせた推進器の開発を行うことによってさらなる性能向上が期待できる<sup>(30)</sup>。しかし時間経過による推進力の低下が特に問題となってくる。そこで次章では堆積物の除去について述べる。

### 6-4-3 タンク内の様子

タンク温度 42°Cでの実験後の樟脳タンク内部の画像を図 6-14 に示す。実験後もタンク上部には粉末状のままの樟脳が存在していた。しかし粉末を取り除くと、壁面に結晶化した樟脳が付着していた。一度気化したものがタンクの冷却によって再び再結晶化したと考えられ、この状態でも流量に有意な差はみられなかったことから、問題なく使用できると判断した。

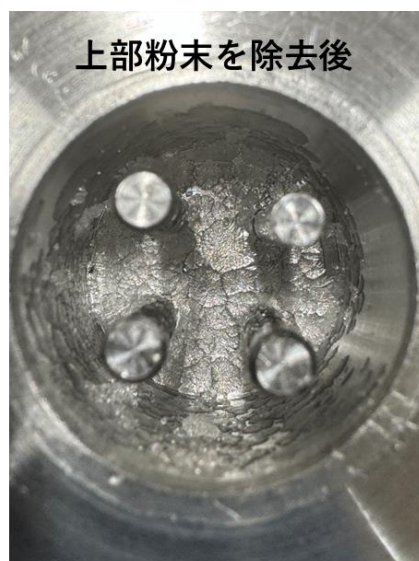


図 6-14 樟脳の実験後のタンク内画像

## 6-5 昇華性推進剤とアルゴンの性能比較

昇華性推進剤とアルゴンの性能について、トータルインパルスと推進効率の比較を行った。

図 6-15 に、推進剤によるトータルインパルスの違いを示す。なおこの結果において寿命等は考慮せず、タンク内の推進剤を全て消費した際に発生できる推力を示している。昇華性推進剤はかさ密度を計算に使用した。アルゴンは製作した推進剤タンクを使用した場合を考え、10 気圧の推進剤質量とした。この結果より昇華性推進剤は、推進システムの小型化や長期間運用において優位性があることが分かった。

図 6-16 に推進剤ごとの推進効率について示す。各々の推進剤の流量は、実験において流量が近いものを選択している。結果より、推進剤利用効率の高いアルゴンが最も優れていた。また全体の傾向として、30 W の結果は推進効率が高くなっていることが分かる。これはマイクロ波投入電力を増やすことで推進剤利用効率が改善されたからだと考えられる。しかしマイクロ波投入電力の増加に伴い、昇華性推進剤とアルゴンの差が小さくなっている。これは昇華性推進剤の解離が促進されることに起因すると考えられ、投入電力の増加によって推進効率の更なる増加が期待できる。

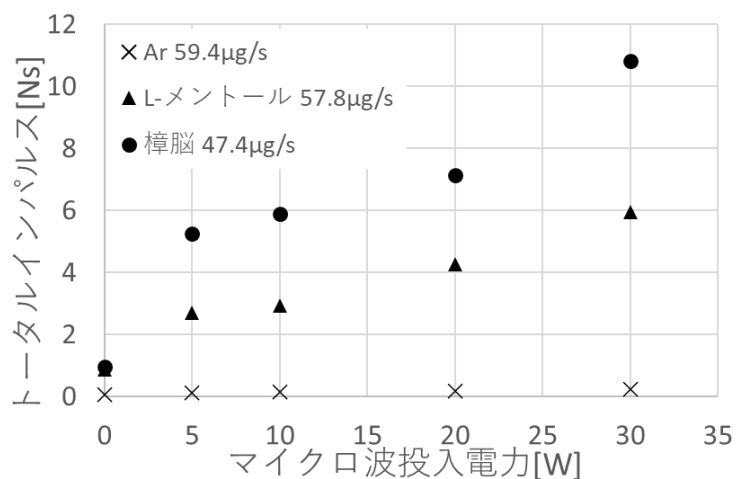


図 6-15 トータルインパルス

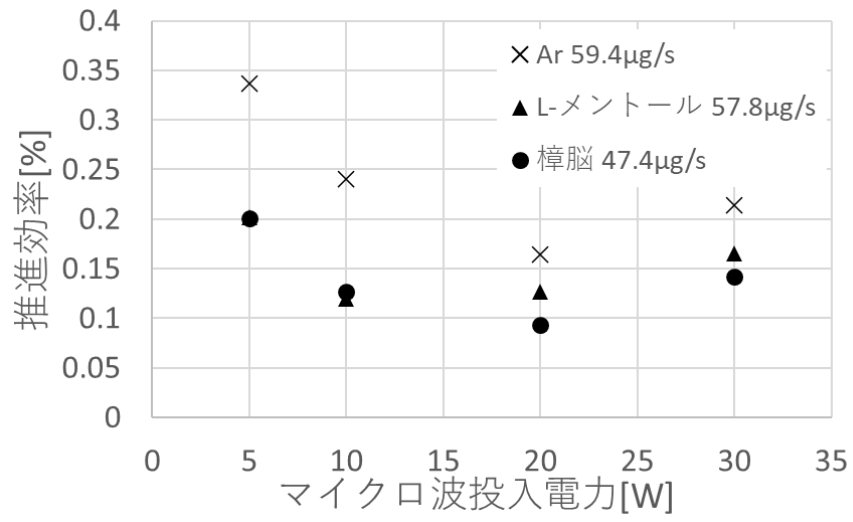


図 6-16 推進効率

## 第7章 水推進剤による堆積物除去

### 7-1 実験目的

昇華性推進剤を用いる上で、堆積物の蓄積による性能低下が前章でも問題となっていた。ここで水を推進剤としてイオンスラスタを動作させることで、昇華性推進剤の堆積物を除去が可能であることが先行研究<sup>(31)(32)</sup>より明らかとなっている。そのため本スラスタでも同様の効果が確認できるか検証を行った。さらに水推進剤を用いた際の推力についても測定を行う。よって本実験では、

1. 水プラズマを点火可能か
2. 堆積物の減少が確認できるか
3. 水推進剤の推力計測および時間経過による推移

の3点を確認していく。

### 7-2 実験方法

今回の実験では温度制御および接手のオリフィス直径によって流量調整を行う。水供給系によって水推進剤を供給する。この水供給系とスラスタをシリコンチューブで配管している。実験体系は5章で述べたものを使用している。

初めに水推進剤でプラズマが点火する流量およびマイクロ波投入電力を探る。その後L-メントールまたは樟脳にて30分スラスタ動作後、各々水プラズマでの時間経過に伴った推力測定を行い、実験終了後スラスタ内部の堆積物の比較を目視で行う。なお昇華性推進剤の質量流量は同程度となるよう調整した。

### 7-3 実験結果および考察

#### 7-3-1 水プラズマ点火実験

推進剤流量を200  $\mu\text{g/s}$ 、マイクロ波投入電力を10 Wとしたときにプラズマが点火した。図7-1に上記条件での水プラズマ点火時の画像を示す。流量170  $\mu\text{g/s}$ 、130  $\mu\text{g/s}$ と変更したが点火しなかった。プラズマが消える投入電力は1 Wであった。

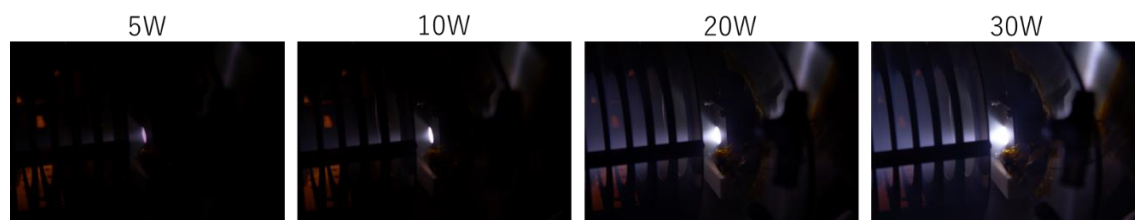


図 7-1 水プラズマ点火時の画像 (f/10 15s Iso100 WB 固定)

### 7-3-2 堆積物の比較結果

まず L-メントール流量  $57.8 \mu\text{g/s}$  でのプラズマ点火実験を 30 分行い、その後水プラズマ点火 30 分を 2 回、計 1 時間行った。なお 30 分の点火時間のうち、マイクロ波投入電力を変更し推力を測定しない間は、投入電力を 15W で一定としている。マイクロ波の投入エネルギーによって堆積する物質が変化<sup>(33)</sup>する可能性があるためである。さらに、15W はマイクロ波の反射がほぼ 0W である限界の値であり、反射によるマイクロ波送電系の破損を避けるためでもある。スラスタ内部の堆積物の状態を図 7-2 に示す。上の画像は主に放電室およびアンテナを示し、下の画像はスペーサーおよびオリフィスプレートを示している。1 度目の水の洗浄では推進剤流量  $170 \mu\text{g/s}$  で点火した。昇華性物質使用後は水プラズマが点火しやすい状態となっている可能性がある。しかし 2 度目は  $220 \mu\text{g/s}$  まで流量を増やすことで点火が可能となった。目視での確認では、水プラズマ点火によって堆積物が減少しているように見える。2 度目の洗浄後は放電室壁面が露出するほどの除去効果が見られた。今後定量的な評価のためスラスタ重量を減らし、重量計測による比較が必要だと考える。またこの付着物に電気伝導性はなかった。

図 7-3 に水で 1 時間洗浄後の別角度からのスラスタ内部の画像を示す。この画像より、水プラズマによって剥がれ落ちた堆積物がスラスタ下部に蓄積している、もしくはスラスタの特性および剥がれ落ちた堆積物の蓄積の偏りによってプラズマ位置が非対称になっている可能性がある。一度堆積物が剥がれ落ちているのであれば、推進剤ガスの流入口の位置や流量の調整によって堆積物を均等に除去させることで、迅速かつ満遍なく取り除けるシステムの構築が可能となりうる。また最も電子加熱が行われていると考えられるセントラルヨークのアンテナ近傍では、別の箇所より大きな除去効果が確認できた。これはプラズマ密度の濃さに影響されていると考えられる。

次に樟脳流量  $47.4 \mu\text{g/s}$  で上記と同様の実験を行った。結果を図 7-4 に示す。樟脳の場合では、プラズマ点火時に 1,2 回目ともに  $170 \mu\text{g/s}$  での点火が確認で

きた。水プラズマによって堆積物の除去が確認できるが、L-メントールと比較するとあまり除去されていないように見える。推進剤の違いによって堆積物質の組成が変化することで除去に影響を及ぼしているのではないかと考える。

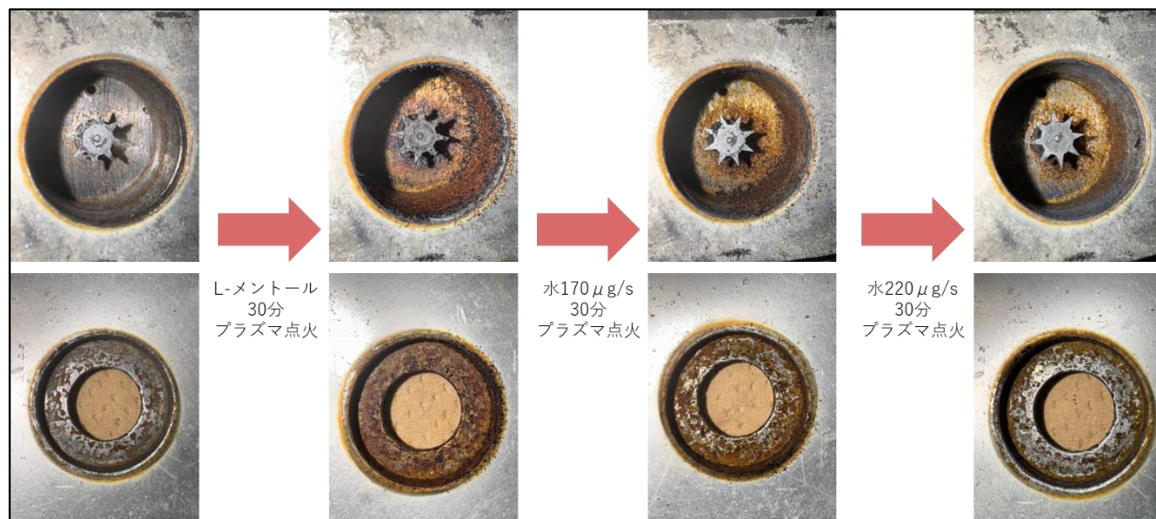


図 7-2 L-メントール動作後の水プラズマによる堆積物除去結果



図 7-3 L-メントールでの堆積物除去結果での別角度からの画像

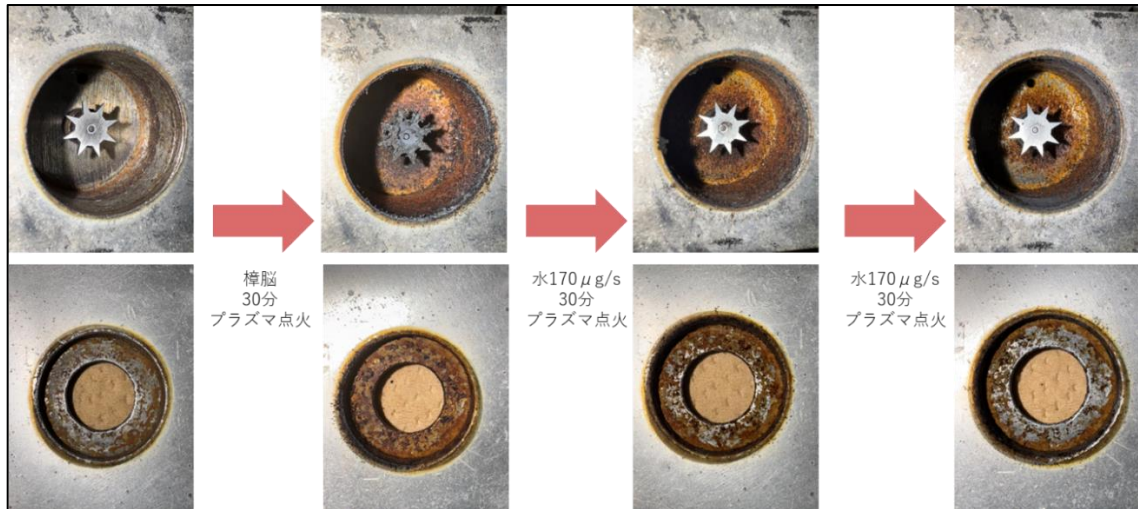


図 7-4 樟脳動作後の水プラズマによる堆積物除去結果

### 7-3-3 推力測定の結果

水推進剤を用いた場合，プラズマ点火終了後の推力と推進剤流量の関係は，流量  $170 \mu\text{g/s}$  において推力  $70 \mu\text{N}$ ，比推力 42 秒を得た． $200 \mu\text{g/s}$  では  $81.6 \mu\text{N}$ ，41.6 秒だった．図 7-5 にプラズマを点火させた場合の  $200 \mu\text{g/s}$  の結果を示す．30 分動作時の推力が大きくなっている原因として，水供給系の温度上昇による流量増加が考えられる．プラズマ点火直後と比較しても，プラズマを点火しない 30 分後の推力が上回っているため，推進剤流量が増大している可能性は濃厚である．スラスタと水供給系の位置が近いこと，熱放射の影響を受けやすい位置である．

L-メントールでの動作後水プラズマで除去を行なった際の推力を図 7-6 に示す．水プラズマによって堆積物が除去されている，すなわちスラスタの排気に堆積物だったものが加わることで，そのため水推進剤単体と比較すると推力が増加するはずであり，実験結果から確認できた．実験時間 30 分では，推進剤流量が  $170 \mu\text{g/s}$  にも関わらず  $200 \mu\text{g/s}$  とほぼ同等の推力となっており，比推力も最大 10 秒の増加がみられる．

樟脳動作後の水での除去の結果を図 7-7 に示す．同様に推力の増加が確認できたが，L-メントールと比較すると投入電力が  $5 \text{ W}$ - $20 \text{ W}$  にて推力が低い．よって，投入電力が  $30 \text{ W}$  でなければ十分な堆積物除去効果が得られない可能性がある．30 分から 45 分において推力が落ち込んでいる点は，スラスタ内部の確認のため実験を中断した際にタンクの温度が下がってしまったことが原因として挙げられる．しかし 60 分経過後の推力も 30 分の時点から下がってお

り、動作時間が長くなり堆積物が減少することで推力も減少傾向に転じることが予想される。堆積物の除去結果と推力には相関があると考えられ、より効率よく堆積物を除去できるようにすることで推力の増加も期待できる。

これらの結果より、昇華性推進剤と水推進剤を組み合わせたシステムでは、双方の推進剤の利点を生かしつつ優れた特性を引き出した運用が可能である。今回の実験においては、単位質量流量あたりの推力や比推力、水プラズマでの除去しやすさと推力の観点から L-メントールが優れていた。実際の運用においては、昇華性推進剤と水推進剤の運転時間と推力の関係性を把握したうえで、交互に運転することが求められる。

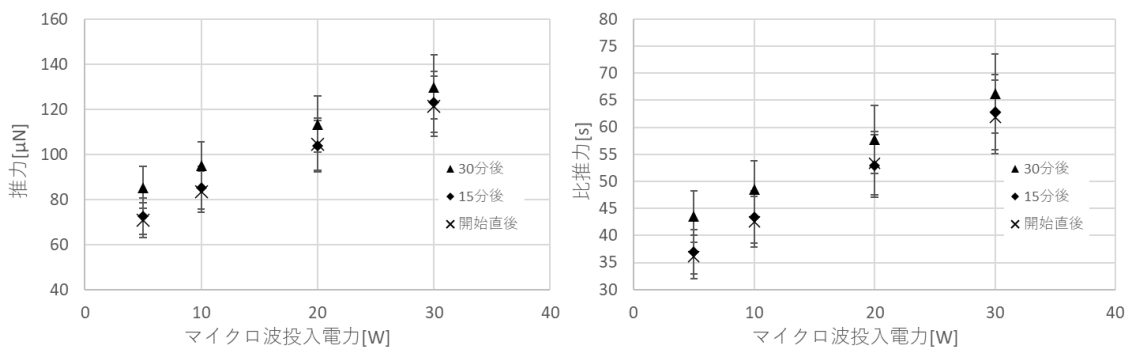


図 7-5 流量 200  $\mu\text{g/s}$  のマイクロ波投入電力に対する推力と比推力

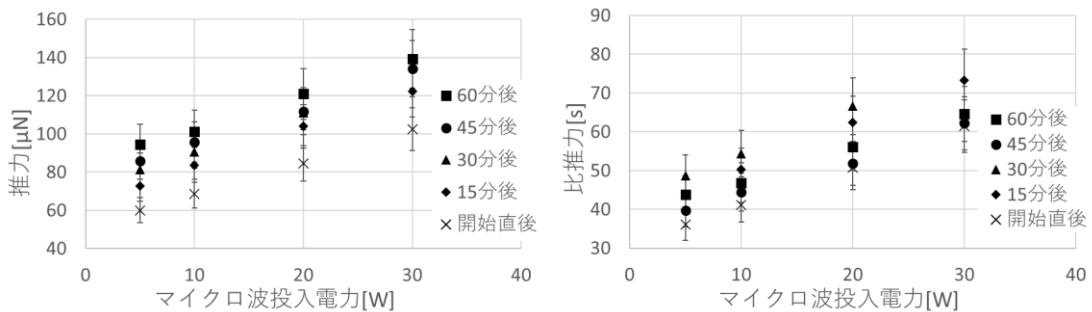


図 7-6 L-メントール堆積物除去中の推力と比推力の時間推移  
170  $\mu\text{g/s}$  (0, 15, 30min), 220  $\mu\text{g/s}$  (45, 60min)

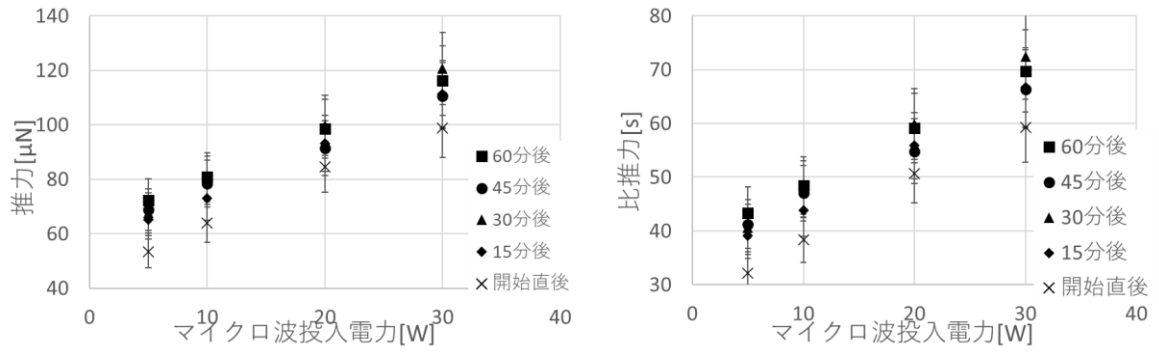


図 7-7 樟脳堆積物除去中の推力と比推力の時間推移  
170 μg/s (0-60min)

## 第8章 結論

マイクロ波放電式小型プラズマスラスタを用いた昇華性推進剤の実用性について検証を行った。以下にその結論について示す。

1. スラスタの微小推力を計測するため、水平振り子式とターゲット方式を採用したスラストスタンドの製作を行った。その結果最小分解能  $0.586 \mu\text{N}$ 、誤差  $\pm 11.0\%$ を得た。
2. 昇華性推進剤を投入するタンクと温度調整システムの製作を行った。結果として、定常状態のタンク温度の誤差が温度センサ分解能の限界である  $0.0625^\circ\text{C}$ になるようなシステムを構築できた。タンクは均等に加熱されていることが温度分布より確認できた。これらの結果より昇華性推進剤の流量制御に耐えうると判断した。
3. アルゴンを推進剤とした点火実験と推力測定を行った。セントラルヨーク長と磁石個数、オリフィスプレート径による点火と推力依存性が見られた。実験において最も低流量で点火する条件であったセントラルヨーク長  $5 \text{ mm}$ 、磁石個数  $16$  個、オリフィスプレート径  $12 \text{ mm}$  のパラメータにて比較していくことを決定した。
4. 昇華性物質である L-メントールと樟脳を使用してタンク温度と質量流量の関係性を求めた。再結晶化が発生したため流路に温度勾配を設けた。蒸気圧曲線に近い結果となっているため、流路内での再結晶化や推進剤温度のずれはほとんど発生していないと考えられる。
5. L-メントールと樟脳について点火実験と推力測定を行った。アルゴンと比較すると、同質量流量では投入電力を増加させることで推力、比推力ともに上回る可能性が確認できた。また解離が発生している可能性が高いことも確認したが、放電室内部に堆積物の付着を認めた。
6. 水プラズマによる堆積物の除去についての実験を行った。樟脳より L-メントールの堆積物の除去効果が高い可能性がある。さらに水推進剤単体での動作の推力と比較すると、除去中は推力の増加が見られることから昇華性推進剤と交互に運転することで、優れた性能が得られる可能性がある。

## 参考文献

- (1) Bryce Tech, Smallsats by the Numbers 2024:[https://brycetek.com/reports/report-documents/Bryce\\_Smallsats\\_2024.pdf](https://brycetek.com/reports/report-documents/Bryce_Smallsats_2024.pdf), 2025/01/30 閲覧
- (2) SpaceX Starlink : <https://www.starlink.com/>, 2025/01/30 閲覧
- (3) Planet Labs Inc.: <https://www.planet.com/>, 2025/01/30 閲覧
- (4) 松永三郎, 超小型衛星の挑戦 :  
<https://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2011/matsunaga/index.shtml>, 2025/1/30 閲覧
- (5) Pale Blue Inc.: <https://pale-blue.co.jp/jpn/>, 2025/01/30 閲覧
- (6) N. Yamamoto et al., Development of a Microwave Discharge Ion Thruster using Argon, Trans. of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, 7, pb\_119, 2009
- (7) 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和孝 : イオンエンジンによる動力飛行, コロナ社
- (8) 渡辺裕樹, 和田明哲, 月崎竜童, 池田知行 : 宇宙探査に向けた小電力ホールスラスタの研究, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-20-008, 2020
- (9) 國中均 : はやぶさ小惑星探査機に用いられたマイクロ波放電式イオンエンジン, 表面化学 Vol.33, No.12, pp.669-674, 2012
- (10) 岡本幸雄 : プロセスプラズマの基礎, Journal of Vacuum Society of Japan 59(7), 161-170, 2016
- (11) 牛尾康一 : マイクロ波放電式小型プラズマスラスタに関する研究, 九州大学博士論文, 2019
- (12) James E. Polk et al., Recommended Practice for Thrust Measurement in Electric Propulsion Testing, Journal of Propulsion and Power, Vol33, No.3, 2017
- (13) 小泉宏之, 各務聡, 小柴公也, 荒川義博 : 低電力電気推進用の微小推力測定スタンド, 日本航空宇宙学会論文集 Vol.51, No.593, pp.270-275, 2003
- (14) 各務聡 : 4. 宇宙機用電気推進機のための推力測定, J. Plasma Fusion Res Vol97, No.1 pp.20-27, 2021
- (15) R. Goldstein, F.N. Mastrup, Performance Measurements on a Pulsed Ablating Thruster, AIAA Journal, VOL.4, NO.1, 1966
- (16) Ryoji Yanagi, Itsuro Kimura, New Type of Target for the Measurement of Impulse Bits of Pulsed Plasma Thrusters, J. Spacecraft, Vol.19, NO.3, 1982
- (17) R. Yanagi, I. Kimura, S. Inoue, Preliminary Experiments on Pulsed Plasma Thrusters with Applied Magnetic Fields, AIAA/DGLR 13th International Electric

Propulsion Conference 78-655, 1978

(18) Paolo Gessini et al., A Pendulum Target Balance for Ion Engine Thrust Measurement, IEPC-2007-149, 2007

(19) 佐鳥新, 國中均: カーボングリッドを用いたイオンエンジン放電室内汚染 (コンタミネーション), 日本航空宇宙学会 Vol.46, No.538, pp.648-650, 1998

(20) 木場健斗: パルスプラズマスラスタの固体推進剤に関する研究, 九州大学学士論文, 2022

(21) 竹末一平: 可変推力イオンエンジン用スラストスタンドの開発, 九州大学学士論文, 2016

(22) 背戸一登: 磁気減衰を活用した振動制御法, 日本機械学会論文集(C編)56巻 52号, 1990

(23) 川戸大誠: 小型プラズマアシストガスジェットの開発, 九州大学修士論文, 2022

(24) 長田義仁, 本田克典: プラズマを用いた有機反応, 有機合成化学 第44巻 5号 pp.443-458, 1986

(25) 中野正勝, 山本直嗣, 大川恭志, 船木一幸: イオンエンジンの代替推進剤となる昇華性物質の探索, 2021年度 宇宙輸送シンポジウム, 2022

(26) 安達美咲: イオンエンジンの推進剤としての昇華性物質の検討, 九州大学修士論文, 2019

(27) 豊田裕司: 小型マイクロ波プラズマ推進器の開発, 九州大学大学院修士論文, 2013

(28) Vojtech Stejfa et al., Polymorphism and thermophysical properties of L- and DL-menthol, The Journal of Chemical Thermodynamics, Vol.131, pp.524-543, 2019

(29) 疋田晴夫, 前田道宏, 梅村実: 充填物-ガス流間の物質移動, 化学工学 28, 214-220, 1964

(30) 江崎徹: 推進剤にアルゴンを用いた小型イオンスラスタの性能向上に関する研究, 九州大学卒業論文, 2009

(31) 中野正勝, 山本直嗣, 白木僚: 代替推進剤としての昇華性推進剤の評価, 宇宙科学技術連合講演会, 2022

(32) Masakatsu Nakano et al., A Comparative Study of Water, Carbon Dioxide, and Adamantane as Alternative Propellants for Ion Engines, ISTS, 2023

(33) Patrick Dietz et al., Molecular propellants for ion thrusters, Plasma Sources Sci. Technol. 28 084001, 2019

## 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の執筆にあたって、多くのご指導、ご教鞭を頂いた山本直嗣教授に深く感謝申し上げます。興味だけで電気推進の世界に飛び込み、実験や機器製作を行うにあたって不足していた知識や経験を、様々な視点から根気強く指導していただきました。

ミーティングで毎回鋭い質問を頂いた森田太智准教授に深く感謝申し上げます。自分の研究への理解をより深めるだけでなく、ほかのメンバーの研究への理解も進めることができました。

様々な事務手続きを行って頂いた宮本朋子秘書に深く感謝申し上げます。手続きで分からないことがあっても優しく教えていただき、スムーズに研究を進めることができました。

スタンドや推進剤タンクなど様々な加工を行っていただいた九州大学工学部技術部の山口恭平様に深く感謝申し上げます。ターゲットのスポット溶接加工を体験するという無茶を引き受けて頂き、面白い経験になりました。

水推進剤での実験を行うにあたって、株式会社 Pale Blue 様から貸与された水供給系を使用させていただきました。深くお礼申し上げます。

本研究を行うにあたって、先進宇宙ロケット工学研究室に在籍された全ての方々にお世話になりました。尾川知也氏には、ロードセルを使いまわすという異例の事態にも快く対応し、面白い冗談で場を和ませて頂きました。松本遼太郎氏には、入学直後に実験のやり方を優しく教えて頂いたことで、スムーズに研究を進められました。桂直幹氏には、息抜きの雑談がためになるのに面白く、就活でもお世話になりました。肥田愛蘭氏には、出身地が近いという偶然もあり地元民しかわからない話に付き合ってくださいました。他にもソフトウェアの使い方などを教えて頂いた胡泽丰氏、スラストスタンドの詳細を教えて頂いた古場健斗氏、バットの振り方を教えてくれた緒方裕也氏、実験を手伝ってくれた多鹿友哉氏達に心より感謝申し上げます。またオープンキャンパスをともに戦った B4 の方々にも心より感謝申し上げます。

修士まで学ばせて頂いた家族に心より感謝申し上げます。どのようなときにも見守って頂き、また支えて頂いたことで今の自分があると思います。

最後に本研究および論文が少しでもこれからの先進宇宙ロケット工学研究室の手助けになることを願い、謝辞とさせていただきます。