令和3年度地球観測技術等調查研究委託事業

「超小型探査機の大電力化時代に向けた統合「水」推進系の発展」

委託業務成果報告書

令和4年5月

国立大学法人 東京大学

本報告書は,文部科学省の地球観測技術等調査研 究委託事業による委託業務として,国立大学法人 東京大学が実施した令和3年度「超小型探査機の大 電力化時代に向けた統合「水」推進系の発展」の成 果を取りまとめたものです.

委託業務の目的	3
実施内容	4
【1A. アノード Rev1】	4
【1B. アノード Rev2】	11
【2A. カソード Rev1】	14
【2B. カソード Rev2】	23
【3. 水スラスタベース開発】	24
【4. 水イオン実証機】	29
【5. 水ホール実証機】	31
まとめ	32

本業務では、超小型宇宙探査機に静止軌道圏から月以遠へ航行するための技術として、150-W 級と 60-W 級という 2 つの「水」統合推進系を開発し、両者の宇宙実証の見通しを立てる.まず、月以遠への航行に伴う高 ΔV の獲得には、近年の大電力化の流れに乗り電気推進を活用する.大電力用として「水ホールスラスタ」を開発、小電力用としては並行して研究開発が進んだ「水イオンスラスタ」を適用する.そして、両者に使用できる「水スラスタベース」を改良することで、上記 2 つの統合推進系を実現し、超小型探査機の活用幅を大きく増大させる.

【1A. アノード Rev1】

<Rev1の性能評価試験>

● 従来推進剤であるキセノンでの安定作動実現とその放電特性

前年度に製作したアノード Rev1 の 12 通りの推進機形状(表 1-1)のうち, No.1 を用いて初期作動を実施した.推進剤には,従来推進剤であるキセノンを使用した.実験の結果,製作したアノードは正常に動作することが確認された.作動時のプルームの様子を図 1-1 (a)に示す.次に,作動電圧 200 V において,流量およびチャネル内の磁場強度を変化させた際の平均放電電流および放電振動の挙動を計測した.ホールスラスタでは,最適な磁場強度近傍において平均放電電流は極小値を取ることが知られている.また,搭載電源の余剰や他機器への影響を鑑みると,放電振動は抑えることが好ましい.横軸を磁場形成用電磁コイルの電流値として,平均放電電流および放電振動強度をプロットした結果を図 1-2 に示す.いずれの流量でも設計で想定した範囲内の磁場条件で平均放電電流が極小値を示し,特に 0.6 mg/s では 0.5 A (約 100 W)となった.また,放電電流が極小となる磁場近傍では放電振動が比較的抑えられている.これより, 「Xe 等の推進剤で確実に作動できるアノード」という指針の通りの Rev1 の設計がなされたことが確かめられた.

● 提案推進剤である水蒸気による作動実証とその放電特性

アノード Rev1 No.1 を用いて,水蒸気を推進剤に使用した作動試験を実施した.なお,アノードへの電子の供給およびビームの中和を担うカソードの作動流体にはキセノンを用いた.カソードに流すキセノンの流量はアノードに供給する水蒸気の流量に対して十分に小さくし,アノードへ与える影響を最小限に抑えた.実験の結果,水蒸気で安定に作動させることに成功した.水蒸気によるホールスラスタの作動実証は,世界的にも類を見ない成果である.作動時のプルームの様子を図 1-1 (b)に示す.次に,キセノンと同様に作動電圧 200 V において,流量および磁場をパラメータとして平均放電電流および放電振動の計測を試みた.しかしながら,磁場強度と平均放電電流の関係の定量的な計測には至らなかった.なぜなら,流量および磁場条件を固定した場合でも,時間とともに放電電流が減少方向に大きくドリフトしたためである(図 1-3).この考え得る要因については次節で後述する.また,ドリフトした放電電流が約 1A を下回ると作動が停止してしまうことが判明した.一方で,放電電流がドリフトしても放電振動の挙動は大きく変わらなかったため,磁場強度と放電振動強度の関係性は取得できた.この結果を図 1-4 に示す.これより,水蒸気を用いた場合にはキセノンに比べて低い磁場強度で放電振動が抑えられることが確かめられた.

No.	平均直径(D) [mm]	幅(W) [mm]	No.	平均直径(D) [mm]	幅(W) [mm]
1(基準)	20	6	7	30	4
2	20	7.5	8	30	5
3	20	4.5	9	30	3
4	24	5	10	40	3
5	24	6.2	11	40	3.8
6	24	3.8	12	40	2.2

表 1-1 チャネル形状 12 通りの設計値.



図 1-1 アノード作動中のプルームの様子. (a) キセノンを用いた場合, (b) 水蒸気を用いた場合.



図 1-2 キセノン作動における (a) 平均放電電流および (b) 放電振動強度の磁場強度(磁場形成コイルの電流値)の依存性.

水蒸気作動における放電電流の減少要因解析

水蒸気作動時に放電電流が減少方向にドリフトした要因として,流量が減少した可能性が挙げられる. キセノンと水蒸気の供給方法に着目すると,前者が市販のマスフローコントローラを使用しているのに対 し,後者は自作した流量調整装置を用いている.この水蒸気の流量調整装置は,調圧室と真空背圧の差圧 から流量を制御する方式を採用しており,水イオンスラスタでも実績がある.この方式の場合,流量の安 定化には圧損を稼ぐ箇所の温度管理が非常に重要になる.しかし,現在の供給配管では圧損の最大箇所が アノード近傍となっており,作動中に温度が大きく上昇する.コンダクタンスの式に基づき,温度と流量 の関係を整理したところ,流量は温度上昇に伴い減少することが確かめられた.また,真空背圧から流量 を推定したところ,実験中に想定される流量の減少速度は理論解析の結果とよく整合することがわかった. この課題に対する対策については、<Rev2の設計および作動試験の目途>の節に記載する.なお,以降に 登場する水蒸気の流量は、すべて真空背圧から推定したものであり、参考程度であることに留意されたい.





図 1-3 水蒸気作動時の平均放電電流の時間履 歴. 電圧 200 V, 規格化コイル電流 0.56, 調圧 室圧力一定としているにもかかわらず放電電 流が減少し,約1Aで作動が停止した.

図 1-4 水蒸気作動における放電振動強度の計 測結果.キセノンよりも低いコイル電流で振 動が抑制されており,高磁場側ではむしろ振 動が増大している.

推力測定に基づく推進性能の評価

従来推進剤であるキセノン,提案推進剤である水蒸気の両者を用いて,推力スタンドを用いた推力測定 を実施した.放電電圧 200V における推力の測定結果を図 1-5(a) に示す.なお,エラーバーの大きさはス タンドの熱ドリフトに起因するものである.さらに,測定した推力に基づいて算出した推力電力比,比推 力,アノード効率を図 1-5(b)-(d) にそれぞれ示す.ただし,比推力およびアノード効率の算出に用いた水 蒸気の流量は,真空背圧から推定したものである.これより,アノード Rev1 No.1 単体の水蒸気での代表性 能として,200W の電力で,推力電力比 20 mN/kW,比推力 600 s,アノード効率 7%を得た.アノード Rev1 の当初の目標であるアノード効率 2 %の達成と比較しても十分な性能を発揮している.一方で,作動電力 は目標である 100 W まで絞ることができなかった.これは,前述の通り放電電流が 1 A 程度を割ったとこ ろで作動が停止してしまったためである. Rev2 に向けて,効率を保持したまま低電力化を図ることが課題 となる.

<Rev1 のプラズマ測定>

● ファラデープローブ(FP)の実験系構築とキセノンおよび水蒸気でのビーム計測

FPとは、空間の局所的なビーム電流密度を計測する静電プローブである.FPの外観を図1-6に示す.こ れを、スラスタから放たれるイオンビームに向けて、推力軸に対し±90 degの掃引を行うことにより、ビー ムの空間プロファイルを取得することができる.ここから、アノード効率に寄与する電流利用効率、推進 剤利用効率、ビーム発散角を求めることができ、これらの積からアノード効率を大まかに見積もることが できる.構築したプローブ計測系全体の外観を図1-7に示す.まず、推力計測を行ったアノード Rev1 No.1 に対し、FPを用いてキセノン、水蒸気の場合のビームプロファイルを取得した.それぞれのプロファイル を図1-8に示す.取得したプロファイルからアノード効率を推定したところ、キセノンでは100 W の放電



図 1-5 従来推進剤であるキセノンおよび提案推進剤である水蒸気を用いて推力測定を行った結果.200 V での(a) 推力,(b) 推力電力比,(c) 比推力,(d) アノード効率をそれぞれ電力の関数として示す.



図 1-6 ビーム測定に用いた FP の外観. これは 共同研究者からの借用品である.

図 1-7 FP 計測系の外観. モータにより FP を ±90 deg で掃引することができる.



図 1-8 放電電圧 200 V で, (a) キセノンおよび(b) 水蒸気を用いたときの FP 計測によるビームプロファ イル.水蒸気では定常ドリフトがあるため,同調圧室圧力で複数回測定したものを個別に掲載している.

電力で~32%,水蒸気では200Wの放電電力で~6%という結果を得た.これは,前述の推力測定の結果と も整合しており,FPの計測によるアノード効率推定の妥当性が確かめられた.

● FPを用いたチャネル形状別のプラズマ測定

Rev2 への設計指針を獲得するために,アノード Rev1 で製作した異なるチャネル形状(表 1)の試作 品を用いて FP によるプラズマ計測を実施した.本来的には水蒸気で比較検討を行うべきだが,前述したよ うに水蒸気では固定条件下でも放電電流がドリフトする課題があり,定量的に妥当な評価を行うことが難 しいと判断した.そこで,ここでは従来推進剤であるキセノンを用いて実験を実施した.Rev1No.1 でキセ ノンと水蒸気の比較がなされているため,この類推から水蒸気の場合の指針を大まかに見積もることがで きる.

まず、チャネルの平均直径(D)を一定としてチャネル幅(W)を変えた場合の特性を確認した.図1-9に、Dが24mmでチャネル幅が異なる3通り(3.8mm, 5.0mm, 6.2mm)の計測結果から推測したアノード効率を示す.放電電圧は200V、250Vで計測した.なお、特に幅の最も狭いW3.8のものでは、着火や放電維持が他に比べて難しく、また作動可能な磁場領域も狭かった.図1-9より、効率自体にはチャネル 形状間の有意な差が表れなかった.ただし、磁場については各形状で網羅的な計測が行えておらず、形状ごとに磁場強度が最適化されていない可能性がある.先行研究では、チャネル幅を狭めると推進剤利用効率やビーム発散の効率が低下することが報告されており¹⁾、今後のより詳細な計測が必要である.実際のオペレーションを考えると、安定着火や放電維持も重要で、この観点ではチャネル幅を極端に狭くするのは作動域が縮小したり作動に困難を伴ったりする恐れがある.

次に、チャネル断面積 (DとHの積)を一定として、DおよびHをともに変化させた場合の特性を確認 した. 断面積が 120 π mm2 の 3 通りについて、アノード効率を比較した結果を図 1-10 に示す. なお、放電 電圧は 200 – 300 V とした. これより、<u>最も幅の広い D20W6 で特に高い効率を示していることがわかる.</u>



図 1-9 チャネル平均直径を一定(24 mm)として,幅を変更したときの FP 計測による推定アノード効率. 放電電圧は 200,250 V.

図 1-10 チャネル断面積を一定(D,H の積が 120 mm)としてチャネル形状を変えた時の FP 計測による推定アノード効率. 放電電圧は 200, 250,300 V.

一方で, D24W5 は D30W4 よりも効率が低く見積もられており,一概に幅を広げるほど高効率が得られ ると結論付けることはできなかった.しかし, D24W5 の計測は放電電流が十分に収束していない低磁場側 で行われたものが多かった.こちらについても,特に磁場強度との相関について更なる詳細計測が求めら れる.プラズマ物理の観点からすると,幅を広げる方が体積面積比は改善され,チャネル壁面への損失が 低減される.これは,D20W6 で最大効率を示した事実に整合する.このことから,特に損失の低減が求め られる水ホールスラスタの効率改善には,幅を広げる方向性が適していると言える.

ExB プローブの製作と初期試験

ExB プローブとは、ビーム中に含まれるイオン粒子を質量電荷比ごとに分離する装置で、これによっ てビームのイオン種組成を知ることができる.従来推進剤であるキセノン等の希ガスでは、価数の異なる イオンが生成されるが、その95%以上が1価イオンであることが知られている.しかし、水蒸気の場合に は反応がより多岐にわたり、H₂O⁺の他に乖離反応で生じた OH⁺や H⁺が存在する.マイクロ波放電式イオン 源を用いて計測された先行研究によれば、OH⁺等も無視できない割合で生成されている²⁾.多種イオンの存 在は、ビーム計測による効率の推定精度を下げるだけでなく、余計な反応に費やすエネルギーが増加する という観点でも望ましくない.このため、ExB プローブによるビーム組成の解明が必要である.

製作した ExB プローブの外観を図 1-11 に示す. ExB プローブの初期試験として、プローブ内の静磁場 を発生させずに極板間に電圧を掃引する実験を実施した. 最終的には、プローブ内に静磁場を発生させ、 その磁気方向と直行させるように極板管電圧を印加することで、特定の質量電荷比のイオン粒子のみが最 下流で捕集されるようにする. それに対し、電場のみを印加する場合には、すべてのイオンが捕集部から 逸れるように曲げられるため、電圧を掃引するほど捕集電流は減少するはずである. 横軸を極板管電圧、 縦軸を捕集電流として表示した結果を図 1-12 に示す. グラフから明らかなように、<u>当初の想定通り極板間</u> 電圧を掃引することで捕集電流は減少しており、確かにイオンビームがプローブを通り抜けて捕集部まで





図 1-11 製作した ExB プローブをスラスタ正面 に配置した様子.

図 1-12 ExB プローブの磁場を発生させずに極 板間電圧を掃引したときの, 捕集電流の変化.

<u>到達していることが確認できた</u>.一方で、イオンがほとんど弾かれたとみなせる 10V以上の領域でも約 15 nA の電流が残存している.これは、空間に存在するプラズマによるオフセットと考えられる.すなわち、本来の計測対象であるビーム成分以外のプラズマがプローブに流入し、電流として常に検知されている. 今後、ExB プローブとして静磁場も印加し、捕集されるビーム成分を特定の質量電荷比のイオンに絞る場合、捕集電流は1オーダー下がることが見込まれる.その場合、nA 級のオフセットがあると、本来の信号が埋もれてしまう恐れがある.これを防止するために、さらにプローブの静電遮蔽を高め、捕集電流のオフセットを低減する必要がある.

<Rev2の設計および作動の目途>

 水蒸気を用いた際の放電特性ドリフトへの 対策

前述の通り,水蒸気でホールスラスタを作動させる と出力が絶えず低下し,長くとも2-3分の作動しか行 うことができなかった.作動特性および性能を定量的 に評価するためには,より長時間の安定した作動が必 要であり,それには放電電流のドリフトを抑制する必 要がある.放電電流ドリフトの要因として,アノード 温度の上昇に伴う流量の低下が考えられることは既 に述べた.これを検証するために,水蒸気の給装置や アノード周辺の熱環境について改良を施した.



図 1-13 水冷装置を取り付けたアノードの外

まず,そもそもアノード温度が放電電流に相関を持つとしたら,温度の上昇を抑制できれば放電電流は 安定化するはずである.これを確かめるために,アノード背面を直接水冷する装置を製作した.製作した 水冷装置を取り付けた状態のアノードの外観を図1-13に示す.水冷装置を取り付けた状態で,以前と同様 のアノード Rev 1 No.1 の作動試験を実施した.すると,アノードの温度上昇が抑制されるとともに,放電 電流のドリフトが大きく低減され,<u>10分以上にわたる定常作動を行うことに成功した</u>.以前の作動時間履 歴と今回の作動時間履歴を比較したものを図1-14に示す.この結果より,<u>供給系の調圧室圧力を一定とし,</u> <u>かつアノード温度の上昇を抑えることで,放電特性は定常に至ることが明らかとなった</u>.

アノード温度と放電電流が確かに相関を持つとわかったので、「温度上昇が流量を低下させ、放電電流の 減少につながったのではないか」という仮説の検証を進めた.温度変化が流量に影響すると考えたのは, 流路の圧損最大箇所がアノード近傍になっていると見積もられたためであった.そこで、アノードの温度 変化の影響を受けにくい調圧室出口に圧損を十分に稼げるオリフィスを設け、流量の安定化を試みた、作 成したオリフィスを装着した様子を図 1-15 に示す.この状態で以前と同様の流量をアノードに供給するた めには、調圧室圧力を高める必要がある.しかしながら、水蒸気の常温における蒸気圧は約 3000 Pa のた め、常温程度の水温のまま調圧室圧力を高めることは難しい. そこで、水蒸気の供給装置全体および推進 剤流路を温めることができるように改善を行った.具体的には,水タンクや調圧室周りにラバーヒータを 取り付け、さらにあらゆる配管にテープヒータを巻き付けた.改善後の供給装置の外観を図 1-16 に示す. 改善した供給装置を用いて、水蒸気での作動実験を行った。本実験についても、オリフィスなしの場合と 比較するために、アノード Rev1 No.1 を使用した.調圧室圧力を2通りに変化させて作動させた時の、ア ノード温度と放電電流の関係を図 1-17 に示す.なお、いずれの作動も放電電圧は 200V で行い、磁場生成 用のコイル電流も揃えた.図中には、過去にオリフィスなしで作動させたときの関係も併せて示している. グラフから,オリフィスをつけた場合の結果の方が,温度に対する放電電流の感度が鈍くなっていること がわかる.これより、やはり温度上昇によってアノードに供給される流量が減少しており、オリフィスの <u>設置によって改善されている</u>ことが分かった.しかしながら,放電電流の減少を十分に抑制するには至ら なかった.この要因として、オリフィス径が十分に小さくなかった可能性に加え、流量以外に熱の影響を 受ける要素(熱速度など)が影響している可能性がある.この点については、今後より詳細に検証を重ね る必要がある.



図 1-14 水冷装置を用いて水蒸気作動を行った際の放電電流およびアノード温度の時間履歴を,過去に 水冷装置を用いずに作動させた結果と比較したグラフ.アノード温度上昇の抑制と放電電流の長時間安 定化に成功した.



図 1-15 流量安定化を目的として調圧室出口に 取り付けたオリフィス.

図 1-16 蒸気圧を高めるために、ヒーターを取 り付けた水蒸気供給装置の外観.

以上の取り組みにより,水蒸気で定常安定な作動を行うことができるようになった.今後, Rev1 および Rev2 について,定量的な計測が可能な作動状態を実現することができる.

● アノード形状の設計指針

特に水蒸気作動する場合において,低電力化が大きな課題となっている.先に述べたように,アノード Revl No.1 では,最低電力でも 200 W 程度が限界であり,アノード単体で 100 W という目標を達成でき ていない.この課題の解決には,アノード断面積を小さくすることが有用であると考えられる.アノード 断面積を小さくすると,電流密度を維持したまま出力を下げることができるためである.アノード電力が 断面積に比例的であるとするならば,200 W から 100 W へ低電力化を図る場合,断面積を現在のものの半 分程度にするのがよいと考えられる.すなわち,D と H の積が 60 mm² 程度となるようなホールスラスタ を設計すればよいという指針が立つ.断面積を減少させる際の平均直径と幅の比であるが,これはキセノンでの実験結果から幅を狭くしすぎない方がよいと考えられる.一方で,幅を広げるとそのぶんチャネル 内の磁場強度が低くなる.D20 かつ W6 の場合には,規格化コイル電流が 0.56 で安定的に動作した.この

時の磁場強度を参考に,おおよそ同程度の強度範囲を 実現できる選択肢からなるべく広い幅を選定するの がよい.また,Revl ではチャネルの平均直径と幅に 着目したが、Rev2 ではチャネル長にも着目する.水 同様に電離断面積の小さいアルゴンを推進剤とした ホールスラスタでは、チャネル長を延長した場合に推 進剤利用効率が改善したという報告がなされている 3). 水蒸気を推進剤とした場合にも, FP の計測結果か ら特に推進剤利用効率が低いことがわかっており,同 様な方策によって効率を改善できると見込める.具体 的には,チャネルのセラミック部分を下流方向に延長 し, 主放電部での中性粒子密度を高める. さらに, 中 性粒子密度を高める別の方法として,下流のヨーク部 分の形状変更も試みる. 下流ヨーク部の形状変更次第 では,イオン化せずに放出される中性粒子を推力に還 元できる可能性もある.以上の方針踏まえて、アノー ドRev2の設計を進める目途が立った.



図 1-17 水蒸気作動における,アノード温度 と放電電流の相関.オリフィスを設けた場合 と設けていない場合を併せて表示した.

参考文献・出典

- Mazouffre, Stéphane, and Lou Grimaud. 2018. "Characteristics and Performances of a 100-W Hall Thruster for Microspacecraft." *IEEE Transactions on Plasma Science. IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society* 46 (2): 330– 37.
- Nakagawa, Yuichi, Hiroyuki Koizumi, Yuki Naito, and Kimiya Komurasaki. 2020. "Water and Xenon ECR Ion Thruster—comparison in Global Model and Experiment." *Plasma Sources Science and Technology* 29 (10): 105003.
- Yamasaki, Junko, Shigeru Yokota, and Kohei Shimamura. 2019. "Performance Enhancement of an Argon-Based Propellant in a Hall Thruster." *Vacuum* 167 (September): 520–23.

<カソード Rev1 作動実験系の構築>

● 真空系の構築

昨年度に引き続き,カソード作動用の実験系を構築し,完了した.具体的には,メインの真空槽として 使用する6方クロスに対して,ターボ分子ポンプ(TMP),真空配管,ガラス窓を取り付け,昨年度構築し た6方向クロス固定フレームに固定した.構築した実験機器の外観を図2-1に示す.

ガラス窓および TMP については 6 方クロスと配管規格の違いがあったが,専用の接続ジグを 3D プリン タで自作することにより問題なく締結した. TMP の後段には NW25 フレキホースを介してロータリーポン プ(RP)が接続されている.

本実験系は RP により粗引きしたのち, TMP によりさらに真空引きすることで 10^4 Pa オーダーの高真空 を実現できる.カソード作動中の真空度は LaB₆の電子放出性能劣化に影響するが, LaB₆は酸素分圧が 10^3 Pa 以下であれば酸化せず電子放出性能が劣化しないことが知られており¹⁾,本実験系の真空度は今後の 実験において十分であることが確認できた.

ガラス窓は合計 3 つが接続されている.ガラス窓を導入することにより内部の状態が可視化されより安 全な実験実施が可能となるとともに、カソードの対面に設置したガラス窓を通して LaB₆の発光を取得する ことで発光分光測定の実施が可能となる.なお、実験系構築の直後に実施した実験において、カソードか らの熱放射を受けて対面に設置したガラス窓の温度が大きく上昇した.ガラス窓の製品としての耐熱温度 を超えそうになったところで、作動可能なカソード温度が律速されてしまった.したがって、これを解決 するために対面のガラス窓とフランジの間には真空配管 NW100 ティーを噛ませた.これによりガラス窓 の受ける熱放射量が減少し、より高温でカソードを作動させることが可能となった.図 2-1 では、NW100 ティーを接続した後の実験系外観を示している.



図 2-1 カソード作動実験系の外観.

● カソード締結フランジの構築

カソードは真空フランジに直接固定して一体化させ,カソードが一体となったフランジを6方クロスに 接続することで固定する.昨年度はカソードとフランジの接続部分をCADソフト上で設計しており,本年 度は引き続いて接続部分を実際に構築し,実験系へのカソード締結を行った.カソードと真空フランジが 締結された様子を図2-2に示す.

カソードとフランジの機械固定は SUS 製のパンチングメタルで行った. 穴あき部材を採用することにより,作動中高温のカソードから低温のフランジへと損失してしまう熱伝導量を低下させる狙いである.

カソード加熱電力の投入には、フランジに設けた電流導入端子を用いる.電流導入端子とカソード本体 は専用の接続ジグを設計し、電気的接続を行った.また、電流投入部分には SUS ホイルを複数層重ねて巻 きつけることで断熱し、熱放射による損失量低下を狙った.SUS ホイルは、各層同士の接触面積を少なく して断熱効果を高めるために、微細な凹凸加工を施した.凹凸の加工には、3D プリンタにより自作した型 を用いた.さらに、カソード締結フランジには熱電対を導入するポートを設けた.これにより、作動中も カソードや実験系複数箇所の温度をリアルタイムで監視することができ、安全な実験が実施可能になると ともにカソードの熱特性取得に寄与した.

<カソード Rev1 の熱特性取得>

● 発光分光測定による LaB₆ 温度の取得

発光分光測定を実施し、カソード作動中の LaB₆温度を取得した.LaB₆からの発光は、光ファイバおよび 集光レンズを用いて集光し、分光器へと入力した.こうして得られた分光放射輝度をプランクの法則で表 される理論式にフィッティングすることで、LaB₆温度を求めた.カソードが加熱され、LaB6が発光してい る様子を図 2-3 に示す.これを複数の投入電力で繰り返すことにより、カソード加熱電力に対する LaB₆温 度の関係を得た.さらに、リチャードソンダッシュマンの式を用いて、LaB₆温度をもとに熱電子電流の理 論値を求める事ができる¹⁾.カソード加熱電力に対する、LaB₆温度および放出熱電子電流の理論値を図 2-4 に示す.カソード加熱電力およそ 100 W において、最大で LaB₆温度 1800 K を達成した.このとき、理 論的な電子電流値は 920 mA と計算される.



図 2-2 カソードを締結した真空フランジの外観.



図 2-3 カソードに電力を投入し、高温になった LaB6 が発光している様子.



図 2-4 発光分光測定により得られた,カソード加熱電力とLaB6温度(黒丸,左縦軸)およびそこから 計算される熱電子電流値(赤四角,右縦軸)の関係.

● 熱計算モデルによるカソード熱特性の解析

カソードにおける熱の移動をモデル化し、加熱電力に対する LaB₆ 温度の計算を行った.目的は、実験で は再現しきれない条件や設計においても LaB₆ 温度を予測し、熱特性の向上に向けた設計指針を得ることで ある.計算結果の妥当性は、実験結果と比較することにより検証した.

熱計算モデルの概念図を図 2-5 に示す. このモデルでは、まず任意の LaB₆ 温度を設定する. そこからカ ソードから損失される各種熱量を計算する. 具体的には、LaB₆表面から熱放射と熱電子放出により損失す る熱量、MLI 最外層から熱放射により損失する熱量、フランジとの機械固定部分から熱伝導および熱放射 により損失する熱量、そして電流投入部分で熱伝導およびジュール発熱により損失する熱量、の4 種類を 定式化した. これら4 種類の合計がカソード加熱電力であるとして、最終的に任意の LaB₆ 温度を実現する ために必要な加熱電力が計算される. 熱計算モデルでの計算結果として、加熱電力と LaB₆ 温度の関係を図 2-6 に示す. 熱計算モデルでは、実際の実験条件を再現したときの計算結果と、MLI を搭載しなかったと仮 定したときの計算結果を併記した. また、発光分光測定の実験結果も記載している. まず、発光分光測定 による実験結果とそれを再現した熱計算モデルの結果を比較すると、あらゆる作動点において LaB₆ 温度の



図 2-5 カソード熱計算モデルの概念図. 高温の LaB6 から損失する熱放射,熱伝導,ジュール発熱による熱の移動を簡易モデル化した.



図 2-6 実験で取得した LaB₆ 温度と熱計算モデルの結果の比較.

差異は5%以下であった.したがって,この熱計算モデルはLaB₆温度5%の範囲で妥当であると示された. また,MLIなしを仮定した計算結果と比較すると,実験を再現した計算結果は加熱電力が最大で75%以上 削減されている.以上から,MLIを搭載することによりカソード加熱電力を削減する手法は有効であると 示された.

この熱計算モデルにおいて、加熱電力の内訳を確認する.加熱電力の構成要素として、上述した4種類 の熱損失をそれぞれプロットしたグラフを図2-7(a)に示す.横軸をLaB6温度とし、縦軸をその時損失する 熱量としている.図2-7(a)より、カソード加熱電力の構成要素として一番大きいのはMLI最外層から熱放 射により損失する熱量であるとわかる.ここで、MLI最外層からの熱放射量は、高温のカソード中心部か ら熱放射によってMLI各層の間を伝わる熱量、そしてMLI同士の締結部を熱伝導によって伝わる熱量、の



図 2-7 熱計算モデルにおけるカソード加熱電力の内訳. (a)4 種類の熱損失量の比較. (b) MLI 最外層からの熱放射損失を決定する,各層間の熱伝導量と熱放射量の内訳.

2 種類によって求まる. これら MLI 間の熱放射および熱伝導の内訳を図 2-7(b)に示す. 熱放射量と熱伝導 量の大小関係はある LaB₆ 温度を境に入れ替わっている.本カソードの目指す作動点は高温側であるため, 熱放射量が高い作動点となる.以上から,現状の設計のカソードにおける熱損失量は, MLI 間を伝わる熱 放射が一番大きく,次いで MLI 間を伝わる熱伝導量が大きいと示された.

<カソード Rev1 の電子放出特性取得>

● コレクタを用いた熱電子の捕集

電子捕集コレクタをカソードの下流に配置して電流を測定した. コレクタをカソード下流に設置したと きの外観を図 2-8 に示す.電子捕集コレクタには耐熱性が高く,かつ二次電子を放出しにくいグラファイ トを用いた. コレクタはカソードとともに真空フランジに接続した. コレクタとフランジの接続には,SUS 製の支柱を設計しており,コレクタの受ける熱がフランジに伝わりにくいようにした.

電子の捕集実験は、各カソード加熱電力について、コレクタに印加する電圧を変化させて行った. コレ クタ電圧と捕集された電子電流の関係を図 2-9 に示す. 捕集された電流は最大で 0.55 mA だった.



図 2-8 コレクタを設置したカソードフランジ外観.



図 2-9 コレクタ電圧と捕集された熱電子電流の関係.黒実線は、LaB₆およびコレクタのみを考慮して1次 元を仮定して計算した空間電荷制限電流を示している.

また、カソード加熱電力が 33 W および 39 W のときにはコレクタ電圧をある値以上にしても捕集される 電流値は一定で、飽和傾向にある.一方で、57 W から 79 W の作動にかけては、コレクタ電流の上昇に伴 って捕集される電子電流も上昇し続けており、LaB₆表面から放出された熱電子の全ては捕集できていない とわかる.これは、放出された電子の持つ負電荷同士が反発して、一部の電子を逆流させてしまう、いわ ゆる空間電荷制限に律速されていると推測される.ただしその制限電流の値は、LaB₆表面とコレクタ間の 電位を 1 次元で模擬した理論計算値とは異なっている.これは、LaB₆とコレクタ間に存在する浮遊電位の MLI が影響していると考えられる.

カソード加熱電力と熱電子電流の関係を図 2-10 に示す.ここで,発光分光測定の結果から計算できる理 論上の熱電子電流値と比較すると,コレクタを用いた実験で得られた電流値は 2 桁オーダーで小さい.特 に,全ての熱電子が捕集されたと考えられる 33 W,39 W の作動においてもその値はずれており,実験で LaB₆から放出されている熱電子電流が小さいとわかる.この原因は,使用した LaB₆の仕事関数が想定より 高かったためと考えられる.LaB₆の仕事関数は表面の結晶構造に依存して固有の値を取る²⁾.実験で使用 した LaB₆は表面の結晶構造がランダムな多結晶体であったため,正確な仕事関数が不明である.今後は仕 事関数が低い結晶構造を指定した単結晶 LaB₆を用いて実験をしていく必要がある.

● MLIへの電圧印加による熱電子電流値の変化

MLI 電圧が捕集される電子電流値に与える影響を調べるため, MLI に電圧を印加しながら熱電子を測定 する実験を行った. MLI 電圧と, 捕集された熱電子電流の関係を図 2-11 に示す. MLI 電圧を適切な値にす ることで, コレクタで捕集される熱電子電流値を最大化することができるとわかった. 一方で, MLI への 電圧印加により MLI で損失する電流も増加するため, MLI での損失電流を可能な限り減少させ, かつコレ クタまで引き出される電流を最大化するような MLI 形状や電圧の設計が必要となる.



図 2-10 カソード加熱電力と熱電子電流の関係.実験で捕集された電流値(黒丸)と LaB₆ 温度から計算で きる理論値(赤四角)を併記した.



図 2-11 MLI 印加電圧と各種電流値の関係. Collector はコレクタで捕集された電流, MLI は MLI で損失した熱電子電流, Cathode はそれらの合計を表す.

● PIC 法による電子軌道シミュレーション

現状のカソードの電子輸送物理を理解するとともに、熱電子を積極的に引き出せるような MLI 電圧・MLI 形状を調査するために、PIC 法を用いた電子軌道のシミュレーションを構築し、計算を行った.計算領域の 模式図を図 2-12 に示す.計算は簡単のため、2 次元軸対称を仮定し、LaB₆表面から電子捕集コレクタまで の一部の領域をモデル化して実装した. MLI の電位を 0 V で固定し、コレクタに電圧を 1300 V 印加したと きの空間電位構造および熱電子の数密度を図 2-13 に示す.図 2-13(a)より、等電位線が LaB₆表面付近で過 疎になっている、すなわち生成されている電場が弱いことがわかる.また、図 2-13(b)より、MLI の 1 層目 で電子軌道が絞られており、LaB₆表面の z = 0 付近の電子数密度と比較して、コレクタに到達する z = 28 mm の電子数密度が極端に小さい事がわかる.次に、MLI へ電圧を印加したときの効果を見る.MLI の電 圧を 2000 V と設定したときの計算結果を図 2-14 に示す.図 2-14(a)より、LaB₆表面付近に急な電位勾配が 形成され、それによって図 2-14(b)のように電子がコレクタに向かって引き出される結果が得られた.



図 2-12 (a)カソードの CAD 断面上における計算領域の図示.(b)実際に作成した計算領域.



図 2-13 実験を模擬した条件, コレクタ電圧 1300 V, MLI 電圧 0 V での電子軌道計算結果. (a)空間電位分 布および(b)電子数密度分布.



図 2-14 MLI 電圧を 2000 V としたときの電子軌道計算結果. (a)空間電位分布および(b)電子数密度分布.

一方で、この計算においてはコレクタ電圧が1300Vと非常に高く設定しており、実作動を考慮すると現 実的ではない.ホールスラスタ実作動でのアノード電位やビーム電位を模擬するコレクタ電圧は20V程度 が妥当であり、その条件で電子を引き出す必要がある. MLI電圧は2000Vのまま、コレクタ



図 2-15 コレクタ電圧 20 V, MLI 電圧 2000 V としたときの(a)電子密度分布および(b)電子軌道.

電圧を 20 V としたときの計算結果を図 2-15 に示す. 図 2-15(a)より,電子は弧を描くように分布しており,限られた電子しかコレクタまで到達しないことがわかる.また,図 2-15(b)より,電子軌道は放物線を描くようにカソードへと逆流している.コレクタ電圧に比べて MLI 電圧が極端に高いため,一度放出された電子がカソードまで引き寄せられていると考えられる.したがって,実用を考えた上でコレクタ電圧 20 V 程度でも電子を引き出すためには,6 層全ての MLI に同じ電圧を印加するだけでは難しく,各層ごとに適切な電圧を設定する,さらには MLI 形状についても工夫する必要がある.

参考文献・出典

- D. M. Goebel, R. M. Watkins and K. K. Jameson, "LaB₆ Hollow Cathodes for Ion and Hall Thrusters," Journal of Propulsion and Power, Vol.23, No.3(2007), pp.552-558.
- 2) 大島忠平, 青野正和, "LaB₆の電子放射特性と表面物性,"真空, 24, 5(1981), pp.287-295.

【2B. カソード Rev2】

<カソード Rev2 設計・作動実験の指針決定>

● カソード Rev1 における課題の洗い出し

本年度の活動により判明したカソード Rev1 における課題,およびそれに対する現状の解決策は以下の通り.

- カソード消費電力 50 W 級の性能を目指して、さらなる省電力化が必要.熱モデル計算による性能予測を活用し、MLI の層数や間隙距離、各層締結部寸法などを最適化することで解決可能と考えられる。
- LaB₆の結晶構造が異なることによる仕事関数の高さが原因で,放出電子電流値が想定よりも小 さくなっている.これは,現在使用している多結晶 LaB₆の代わりに表面結晶構造を指定した単 結晶 LaB₆を用いて実験することにより解決可能と考えられる.
- LaB₆表面からコレクタにかけての空間電位分布が原因で、LaB₆表面から放出された熱電子が逆流している.電子軌道計算を活用し、MLI 各層への適切な印加電圧値および電子引き出しに適した MLI 形状の探索を行うことで解決可能と考えられる.
- カソード Rev2 の設計指針決定

上述した課題のうち,LaB₆の結晶構造および熱電子の逆流が優先度の高い課題であると判断した.本年 度はこれらの課題に対して対応を進めた.

単結晶の LaB₆については,発注業者の目処をつけ,仕事関数が2番目に低い結晶構造100面を表面構造 とする LaB₆を手配中である.加工の都合上 LaB₆のサイズがこれまでと異なるため,周辺の炭素部品も含 めた設計変更を行っている.

熱電子の逆流については、電子軌道計算による適切な電圧値・MLI 形状の探索を行っている.特に、加 速器やクライストロンで実績のあるピアス型電子銃を模擬した電位構造の活用を試みている.同時に、開 口部直径を自由に変更し、かつ各層に個別に電圧が印加できるような MLI を新設計している.計算で有効 性が示唆された条件について、新設計の MLI を用いて来年度に実験を行う予定である.

<概要>

水ホールスラスタを作動させるための水スラスタベースとして、レジストジェット、高電圧電源、水供 給系の開発を実施した.また、それらの試験として作動試験と各種環境試験を実施した.レジストジェッ トスラスタに関しては、目標の比推力 100s に対して比推力 70-80s までの実測は達成した.その過程で各 種パラメータがレジストジェットスラスタの性能に与える影響を実験にて確認した.これらの知見を用い て、目標の達成を引き続き目指していく.高電圧電源に関しては、効率 75%はすでに達成し、現在は放電 に対する信頼性の向上に引き続き取り組んでいる.水供給系に関しては、3D プリンタ技術を用いることに より、大幅な小型化に成功、体積が従来よりも 30%少ないものの開発に成功した.また、試験用の小型タ ンクを開発した.これらの開発品に対して、組み合わせたうえでの作動試験、振動試験、温度試験を実施 し、各要素が正常に作動することを確認した.なお、これらの要素は、組み合わせてイオンスラスタを作 動させることに成功し、4.イオン実証機における FM 開発へと貢献している.

水スラスタベースの全体系統図を図 3-1 に示す.本項目では,全体系統図のうち,イオン源(IS: Ion Source) と中和器(ES: Electron Source (Neutralizer))を除いた部分について述べる.以下,本系統図に呼称を合わせ て,各コンポーネントである,レジストジェットスラスタ,高電圧電源,水供給系の3つについて詳述す る.

<レジストジェットスラスタの製造>

レジストジェットスラスタとして,供給部下流の流路,熱絶縁器,ノズルの設計を実施し,製造を実施 した.ノズルは製造の簡単さを重視してコニカルノズルとし,コストの低減に努めた.また,ノズル本体 および途中流路にヒーターを搭載し,温度を制御できるような設計とした.

<レジストジェットスラスタの作動試験>

製造したレジストジェットスラスタを用いて作動試験を実施した.作動試験の結果,種々のパラメータ に対する,性能の影響が明らかになった.以下,それぞれの影響について詳述し,現状のレジストジェッ トスラスタの性能,および今後の設計指針を示す.

● 気化室の温度変更による性能への影響

マイクロノズルを用いる推進機において、上流の圧力およびそれによって決定する流量がノズル本体の 性能に影響することはよく知られている.特に、本委託業務が対象とする水レジストジェットは上流が低 圧になり、ノズル部の圧力が低下する影響で、ノズルスロート部のレイノルズ数が低下し、ノズル効率が 低下する.これが性能低下の一因となるため、気化室(VC: Vaporization chamber)の圧力が性能に与える 影響は大きい.気化室には噴射バルブ(WIV: Water Injection Valve)から水が噴射され、気化室内で気液分 離が行われるが、その圧力は下流のコンダクタンスおよび気化室の温度により決定される.したがって、 気化室の温度は性能への影響が大きいパラメータである.

気化室の温度を 20 度から 40 度程度まで変化させることにより性能への影響を確認したところ,想定し ていた性能の向上は得られなかった.これは,小型化の影響から流路が複雑化し,気化部以外の温度が性 能に大きく影響する設計になっていたことに起因すると考えられる.この仮説の下で実験を実施し,気化 室以外の温度をコントロールすることで,想定していた性能の変化を観測することができた.





図 3-1 水スラスタベースの全体系統図.

● ノズルの変更による性能への影響

前述の通り,ノズルスロート部のレイノルズ数低下はノズル効率の低下に影響し,比推力の低下を招く. そこで,ノズルの直径を変更することにより,ノズルスロート部のレイノルズ数を上昇させ,ノズル効率 の低下を防ぐことを試みた. 直径を変化させたピンホール状のノズルを準備し,ノズルごとの性能の変化 を実測した. 結果,性能の変化は確認することができたが,他の影響に比べて相対的に小さく,大きな改 善には至らないことが明らかになった.また,実用性の観点で,特に直径を小さくした際の推力低下は著 しく,比推力が向上した場合でも実利用には至らないと考えられる.

● 流路の簡素化による性能への影響

小型化の影響から流路が複雑化して,結果として性能が下がっていたことは前述のとおりである.この 課題を解決するため,流路の簡素化,大口径化を行うことにより性能の変化がみられるかどうか,および 性能向上につながるかどうかに試験を実施した.特に,小型化のために用いている 3D プリンタ部品につい て,3D プリンタ部品であるがゆえに複雑になっていた流路を簡素化し,表面粗度を調整することにより, 流体の抵抗を抑えた設計を実施,性能の比較を行った.実験の結果,性能は明確に向上し,流路設計が性 能に与える影響が大きいことが明らかになった.

● 出口温度が性能に与える影響

ノズルスロート部でチョークが起こっている場合,一般に比推力はスロート部の気体温度と膨張率によ って決定する.したがって,ノズルやその手前のプレナムにおける気体温度は比推力に直接的に影響する と考えられ,該当部の壁面温度は重要なパラメータである.そこで,ノズル部およびプレナムに該当する 部分の温度を上昇させることで,比推力の上昇を試みた.結果,ノズル温度の上昇により比推力の上昇は 確認され,おおよそ絶対温度の根に比例する値をとることが明らかになった.これは理論値から想定され る値と近く,通常の圧縮性流体の範囲でノズル部の現象がおおよそ説明できることを示している.今後, 該当部の温度をさらに上げることができる設計をとることで,高い比推力を実現することができると考え られる.

● 現在の設計におけるレジストジェットスラスタの性能について

上記に示した4つの影響を総合的に考慮した設計を行うことで、比推力70-80sの性能を実現する作動 点を実現した.また、出口温度に対する性能の影響や気化室温度の上昇に対する性能のトレンドから、さ らに高温にすることにより、比推力100sを実現する目途が立っている.

<高電圧電源の製造>

高電圧電源のメインモジュールを選定,その周辺回路を設計することにより,高電圧電源の基板設計を 実施,その後基板製造,実装,検査を行った.周辺回路は,放電耐性を意識した構成としており,上流のコ ントローラーに影響を与えないような回路構成となっている.また,基板設計上は高電圧部の設計に留意 し,絶縁を重視した構成となっている.

<高電圧電源の作動試験>

製造した高電圧電源を用いて単体での作動試験を実施した.実際にスラスタによって発生すると考えら れる負荷を模擬する形で行われ,効率,発熱等の面で想定通りであることが確かめられた.一方,放電耐 性については問題があり,改修,再試験を実施して問題を解決した.さらに,実用に向けて放射線耐性を 確かめる試験を実施した.これらについて以下で詳述する.

効率の上昇とモニタ回路の開発

従来の高電圧電源回路は絶縁回路と高電圧電源モジュールそれぞれで、67%、75%程度の効率であり、全

体の効率は 50%程度であった.これらを克服するために,前年度には高電圧モジュールの選定および単体 での試験を実施した.本年度は,それに加えて絶縁回路およびモニタ回路を整備し,従来の高電圧電源と 同等の機能を実装したうえでの高効率化および小型化を実現した.絶縁回路の効率は 90%程度となり,高 電圧電源の効率を合わせての全体効率は 75%に達した.これにより,目標であった単体効率 75%を達成す るだけでなく,絶縁回路を含めたより広い範囲での効率 75%を達成することができた.高電圧電源部のサ イズは 45 mm * 90 mm * 35 mm 程度で従来の 1/5 程度となり,別基板の絶縁回路を含めても大幅な小型化 を達成している.これは十分 CubeSat クラスの衛星に搭載可能なサイズであり,実際水イオンの実証機(4. 水イオン実証機)にも採用されている.

● プラズマ源との統合試験および放電耐性の強化

前年度の時点では高電圧電源の単体試験およびプラズマ源との統合試験を行い,数時間クラスの作動試 験を実施していた.今年度はさらに長時間の試験を行い,放電耐性およびプラズマとのかみ合わせによる 不具合の検証を実施した.結果として,放電によって高電圧電源のモニタ系および通信系が破損するトラ ブルが発生し,長時間の使用には耐えないことが明らかになった.

水ホールスラスタの電源として考えるうえでも、モニタ部の放電耐性は非常に重要なポイントであり、 数千時間の作動が求められる電気推進機において、該当部の信頼性は十分に高いものである必要がある. こういった背景から、放電による故障部の特定および原因の究明を行い、該当部の改修・再実験を行った. 具体的には、モニタ部および通信部のグランド経路の変更およびインピーダンスの調整が行われている. 結果として、2000時間以上の断続的な運転においてトラブルは再発せず、対策の方向がおおむね正しいこ



図 3-2 統合試験時の写真.

とが明らかになった.この対策を施したうえで実際の実証機にも搭載されている.

放射線耐性の検証と強化

別プロジェクトで共通で使用されている部品の放射線耐性に問題があることが明らかになり、本プロジェクトでも該当部の設計改修およびフィードバックをかけることを実施した.また、特に放電耐性の強化 を行う上で、放射線耐性に不安がある部品をいくつか採用しているため、該当部品について放射線試験を 実施して耐性の確認を行っている.

<水供給系の製造>

昨年度の実施内容として、小型化設計を実施し、製造に着手できる状態となっていた.本年度は、実際の製造、およびその不具合を加味した再製造、改修を実施した.金属 3D プリンタを用いて、流路や空間に自由度のある設計を実現し、AQT-D(2019年に開発された水レジストジェットスラスタを搭載した衛星)における水供給系に比して 30%の体積削減を実現した. AQT-Dに比べて、調圧部(IA-N: Ion thruster Accumulator for Neutralizer および IA-I: Ion thruster Accumulator for Ion source)が加わっており、実際にはこれ以上の体積の削減が実現されている.

また,試験用のタンクとして,60 cc 程度の水を保持することができるタンクを設計・製造し,試験を実施した.水(WP:Water Propellant)及び押しガス(TPG:Tank Pressurizing Gas)の適切な保持を実現し,水の導入部(WFT:Water Feed Through)を搭載した,必要十分な機能を持つ小型タンクを開発することができた.振動試験等についてはのちに述べる.

<水供給系の作動試験>

小型化設計を実施した供給系と小型タンクを組み合わせて、水蒸気を定常的に供給する系の実作動を実施した.実際に供給系およびタンクを真空中に導入した電子天秤の上で作動させ、30 µg/s 程度を目標値として設定して数時間作動を実施、電子天秤の値の変化から目標の流量が流れていることを確認する実験を行った.実験の結果、目標流量とはややずれるものの、一定の流量を流し続けることに成功した.その際の流量のブレは10%以下で、十分にイオンスラスタおよびホールスラスタを作動させることができるレンジであった.また、実験の結果を計算にフィードバックすることにより、目標流量をさらに正確に定めることができるようになり、10%誤差程度での比推力推定が行える環境を実現することができた.

<各コンポーネントの統合試験・環境試験の目途立て>

これまで述べてきたように、各コンポーネントの製造、作動試験はすべて完了した.さらに、これらの 統合試験(4.水イオン実証機における嚙み合わせ試験)を行う準備として、統合が可能な形状、電力での 設計・製造を完了した.環境試験については、各種条件の洗い出しや設備の使用交渉などを実施し、試験 が速やかに行える状態にした.

これら各コンポーネントの統合試験・環境試験は、本年度中にすでに 4.水イオン実証機のプロジェクト の一部として実施されており、各コンポーネントの統合試験・環境試験の準備が適切に行われていたこと が示されている.

<概要>

JAXA の革新的衛星技術実証プログラムに, Pale Blue 社の提案した「水を推進剤とした超小型統合推進 システムの軌道上実証」が選定されており、本委託業務の水スラスタベースと共通した要素が使用されて いる. 2021 年 11 月に JAXA に引き渡しを完了,現在衛星本体システムとの調整を行い,打ち上げに向けた 準備を進めている.水スラスタベースにおける各種試験(作動試験,環境試験)の結果が反映されており, 水ホールスラスタの宇宙実証に向けた重要なマイルストーンとなる.

<スラスタベースとの噛み合わせ試験実施>

3. 水スラスタベースで述べた、水レジストジェット、高電圧電源、水供給系を組み合わせることにより、 水ホールスラスタを作動させるためのスラスタベース部をおおむね実現することができる. 実際に作動が 行えることを検証するために、水ホールスラスタ部を水イオンスラスタに置き換えた形での作動試験を実 施した.水ホールスラスタを動かす場合に比して、流量が小さくなるため、流量の制御はより難しくなり、 水イオンスラスタを動かせることが実証できれば、十分にホールスラスタを動かすことができるといえる. また、高電圧電源に関しては、電流量に大きな差があるため、単純な流用はできないが、モニタ部、通信部 の健全性の確認をとることに関しては、参考になるデータを取得できる. 水レジストジェット部について は完全に同一であるため、そのまま流用することができる. 作動試験の結果、継続して数時間、延べ 200 時 間を超えるモジュールでの作動を達成した. これにより、要素技術が要件を満たしていることが一部確認 されたことになる.

<実証機に向けた統合試験(環境試験)および FM 開発の完了>

● FM 開発

本委託研究で開発した水スラスタベースの要素に加え,水イオンスラスタ本体や DC ブロック,制御装置などの開発を行い,それらをインテグレーションすることにより,フライトモデル (FM)を開発した. 2021年11月までに,作動試験および下記環境試験(振動試験,温度試験)を実施してフライトモデルの開発を完了,革新的衛星技術実証プログラムへと引き渡した.

● 振動試験

統合してモジュールとなったものに対して,振動試験を実施し,振動耐性の評価を行った.振動試験の 条件は,革新的衛星技術実証プログラムのインターフェース条件に準ずるものを採用した.当該プログラ ムは,固体ロケットであるイプシロンロケットによる打ち上げを前提としており,一般的な液体ロケット に比して厳しい振動条件が課されることになる.本条件をクリアすることで,一般的な振動条件へ対応で きることを示すことを目指した.

振動試験の結果,水レジストジェット部,高電圧電源に関しては,特に問題がなく,十分に耐性がある 設計であることが確認された.一方,水供給系に関しては,バルブ部および小型化した 3D プリンタ部品部 で,強度不足によるトラブルと流路狭窄が発生した.それぞれ原因を究明したうえで,部品の再製造を実 施し,再度振動試験を行って,問題がないことを確認した.



図 4-1 振動試験実施時の写真.

● 温度試験

温度環境を模擬した状態での作動試験も併せて実施した.低温条件としてインターフェース温度0度, 高温条件としてインターフェース温度40度における作動を実施した.作動試験の結果,新規開発した水供 給系において,温度への性能依存性が想定よりも大きく,特に流量制御に対して影響が大きいことが分か った.本委託事業で目標としている性能は通常のインターフェース条件においては満足されているが,高 温側に厳しい条件だと満足されていない.温度条件を規定していないため,事業の目標は達成されている が,実用化および今後の展開のために,高温時の性能安定に関しては引き続き取り組んでいくものとして いる.

● 低温作動試験

機器の作動時インターフェース温度は、水を使っている限り下限が0度を下回ることはなく、その温度 範囲での作動健全性は上記の温度試験で確認されている.しかし、一部の素子に関してはさらに低い温度 (-20度)で通電する可能性があるため、該当部のみ低温での作動試験を行い、その健全性を確認した.結 果として、-20度における健全性は確認され、低温における通電が問題ないことを確認した.

<搭載に向けた調整実施>

機械,熱,電気などの項目に関して、インターフェースの調整を実施し、諸条件に従って、寸法検査、機 械、熱の環境試験などを実施し、条件を満足することを示した.また、求められる解析等も並行して実施 し、条件のすり合わせを進めている.試験としては、振動試験、衝撃試験、真空中動作試験などに加え、 EMC 試験なども行った.



図 4-2 FM 写真.

【5. 水ホール実証機】

国内外の企業とのコミュニケーションを継続的に行い,水ホールスラスタの需要に関する調査や,実証 機会の模索を行ってきた.その中で最も有力な実証機会は,JAXAの革新的衛星技術実証プログラムであ ると考えている.同3号機には水イオン実証機が搭載されており,インターフェースの調整や諸条件を把 握していることが大きな理由である.一方,通常の機器としての搭載を検討する場合,リソースが限られ ており,水ホールスラスタに必要なスペースやリソース(主に電力)を確保することは難しい.そのため, 衛星バスの設計段階から情報提供を行うことで,リソースの調整を実施,実証機会の確保を模索していく. また,部分的な実証(例えばカソードのみ)などを組み合わせた形での実施も一つの検討事項である. まとめ

本年度における成果目標及びそれに対する結果を示す.

[1A. $\mathcal{T} / - \mathcal{F} \operatorname{Rev} 1 / 1B. \mathcal{T} / - \mathcal{F} \operatorname{Rev} 2$]

目標:「本年度は, Rev1の性能評価試験およびプラズマ測定を実施し, この結果を受けて Rev2 の設計および作動試験の目途をたてるまでを目標とする.」

- ✓ アノード Rev1 の各モデルに対して性能評価試験を行った. 代表例としての No.1 について, 投入 電力 200 W において推力電力比 20 mN/kW, 比推力 600 s, アノード効率 7 %を得た.
- ✓ ファラデープローブ, ExB プローブによるプラズマ測定を行い,詳細な性能評価と物理的知見の 取得を進めた.その結果,従来の推進剤に比した水作動での性能低下は,中性ガス密度低下が主 要因であることが明らかになった.
- ✓ Rev2 では、「セラミックチャネルの延長」や「下流ヨーク部の形状変更」などによるプラズマ生成 領域における中性ガス密度上昇策を検討中である.

【2A. カソード Rev1/2B. カソード Rev2】

目標:「本年度は Rev1 の性能評価試験を実施し,その結果をフィードバックして Rev2 の設計・作動試験の目途を立てることを目標とする.」

- ✓ カソード Rev1 の性能評価試験を実施した. コレクタ電位 1500 V, LaB6 加熱電力約 60 W において~0.5 mA の電子電流引き出しに成功した.
- ✓ また電子軌道シミュレーションによって物理的知見の取得を同時並行して進めた.その結果、さらなる電子電流量増加には「LaB6の仕事関数低下」および「空間電荷制限則の緩和」が必須であることが示唆された.
- ✓ Rev2 では、Rev1 で用いていた LaB6 多結晶から LaB6 単結晶に切り替えて仕事関数を低下させる こと、および MLI による電場形状の最適化によって電子電流量を増加させる策を検討中である。

【3. 水スラスタベース開発】

目標:「各コンポーネントの製造と作動試験を完了し,全コンポーネントの統合試験および環境試験の目 途を立てるまでを目標とする.」

- ✓ 全コンポーネントの製造と作動試験を完了した.
- ✓ 全コンポーネントの統合試験および環境試験を行う準備を完了した.
- ✓ 一部コンポーネントについて目標性能が未達のものがあり、それらに関して目標を達成する目途 を立てた.

【4. 水イオン実証機】

目標:「前年度に開発された水イオンスラスタを,上記スラスタベースと噛み合わせる試験を開始し,実 証機に向けた統合試験の目途を立てる.並行して実証機に向けた FM 開発を始める.」

- ✓ スラスタベースと嚙み合わせる試験を実施した.
- ✓ 実証機に向けた統合試験・環境試験を実施,実証機を開発した.
- ✓ FM 開発をすでに完了し,実証機を JAXA の革新的衛星技術実証プログラムの3号機に提供した.

【5. 水ホール実証機】

目標:「計画している水ホールスラスタに対して, 国内外の機関・企業と宇宙実証あるいは実利用についての交渉を行う.」

✓ 国内外の機関・企業と実利用に関して需要の調査を実施した.

✓ 宇宙実証に関する調査を実施した.