

「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」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関	国立大学法人 東京大学	実施期間	令和2年度～令和5年度 (4年間)	実施規模	予算総額（契約額） 74百万円			
	研究代表者名	准教授 小泉宏之				1年目	2年目	3年目	4年目
	共同参画機関	(株)Pale Blue				24百万円	25百万円	22百万円	3百万円

背景・全体目標

本プログラムの目標は、超小型探査機が静止軌道圏から月以遠へ到達できる方法を提供することであり、この実現に立ちはだかる問題への解決案には、

- 1) 大電力化の流れを利用し小型大電力電気推進により ΔV 1 km/sを達成
- 2) 小型大電力電気と同じ推進剤を用いた姿勢制御推進系を統合
- 3) 小型探査機の利点を損なわせない環境親和性の高い「水」の適用
- 4) 大小2つの電力の電気推進により広範なサイズ／電力範囲に適合である。

このためには、150W級水ホールスラスタ（比推力1000 sおよび推力電力比10 mN/kWが目安）を達成すること、および、水スラスタベースに対して小型化と効率化を図ることが必要である。

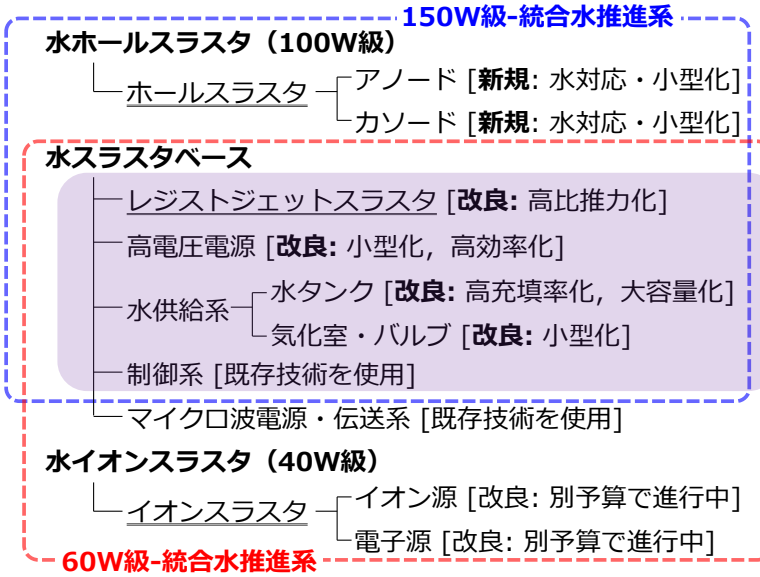
全体概要・主な成果

【主な成果】

- 水ホールスラスタアノードは、代表作動点として放電電圧300 Vおよび推進剤（水）流量0.5 m/gにおいて、推力4.7 mN、推力電力比15 mN/kW、比推力900 s、推進効率6.4%を達成した。
- 同カソードは、多層熱絶縁方式により熱電子放出能力500 mAの目標温度までの加熱を実現させた。また、引出電極の設置による電子放出効果を数値計算と実験により確認した。
- 上記水ホールスラスタの研究開発は、電気推進の学術業界において着実に新しい分野を築いた。
- 水レジストジェットは軌道上における比推力100 sの到達見込を得た。
- 水イオンエンジン用電源／供給系の小型化に成功し環境試験をクリアした。
- 水ホールスラスタ作動に必要な電源について基本的な回路構成の実証が完了した。
- 水イオンスラスタの宇宙実証機会を得た（ただし、イプシロンロケット打上失敗により宇宙作動は未達成）。同スラスタを利用する顧客との商談／交渉を実施した。

【主なアウトカム】

- 本プログラムの水イオンベースは、Pale BlueにおいてPBR-10/20/50・PBIとして社会実装され宇宙実績・販売実績を得た。イオンエンジンは、その後の研究開発も合わせより小型化されPBIとして製品ラインナップに乗り顧客引き合いも強い。
- 本プログラムにより開発されたスラスタを用いた後続の学術研究により、分子性ガスプラズマの衝突反応解明（Accept）、小型ホールのスケール則確立（執筆中）、電子引出の特許出願（2024.5）、水冷システムの特許出願（2024.10）を実施。
- 水ホールスラスタの研究開発をうけて、JST二国間交流事業（仏国CNRS）を2024年度に開始。スタンフォード大学（数値計算）との研究交換を実施しており論文を執筆中である。



①「アノード」

実施内容・成果

アノード開発は、Rev1およびRev2の2段階方式とし、Rev1の知見を元にRev2の設計を実施した。

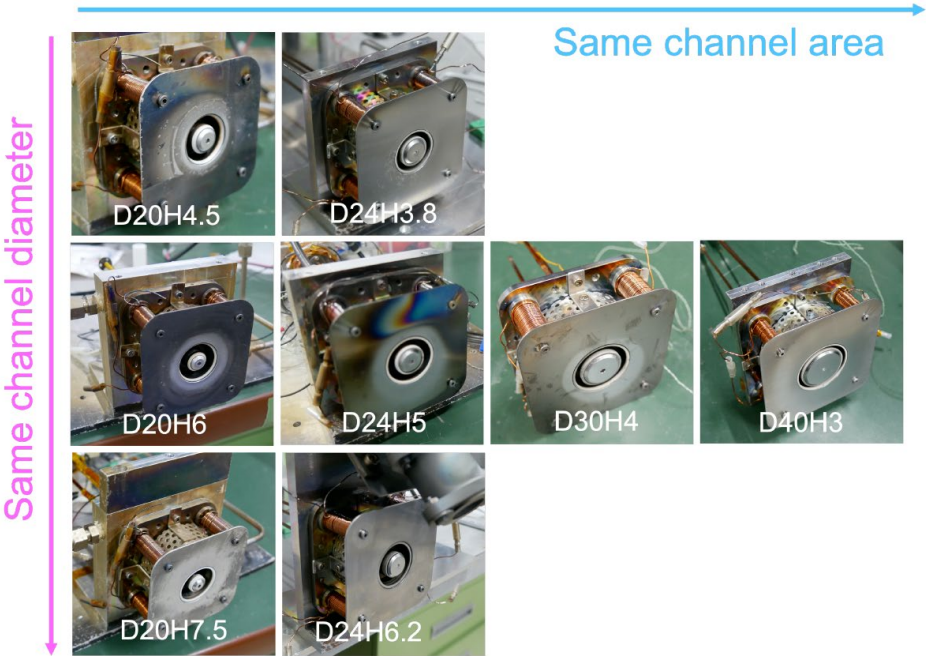
アノードRev1での試験により得られた知見は、まず作動特性として次を得た：

- ・ 水蒸気作動では磁場に対して極小値を持つ傾向
- ・ 磁場側ではプラズマを維持できていないこと
- ・ キセノンの同程度の流量の際と比べて、放電電流の絶対値も大きいこと
- ・ 電圧感度について、水蒸気はキセノンと比べて、電圧上昇に対する電流上昇が大きいこと
- ・ 水蒸気作動においてはキセノン作動時と比べて顕著な振動は確認されなかったこと

また、プラズマ計測による性能評価により

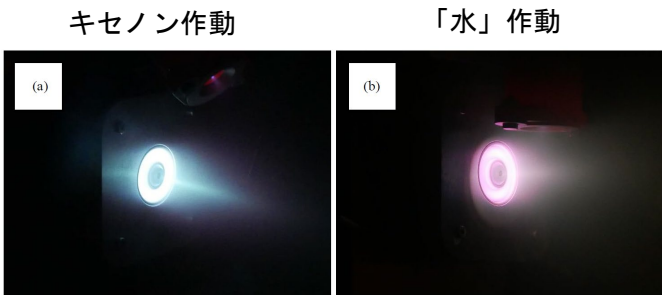
- ・ 水蒸気作動においては、放電電力がキセノン作動と比べて大きくなっており、これに伴って推進機の温度が高温になっていること
- ・ 水蒸気とキセノンを比較すると、推進剤利用効率が著しく低下していること
- ・ 電圧に対する依存性では、水蒸気では作動電圧の増加が推進剤利用効率の向上に効果的であることが
- ・ ビーム効率や電流利用効率については若干減少し、電圧効率についてはキセノンの場合とほとんど変化がないこと

以上より、100 W級のスラスト実現のためには、より小型なモデルの作成が必要となることがわかった。



Rev1スラストにおける典型的なキセノンと水蒸気作動それぞれの性能

Propellant	$\dot{m}_a, \text{mg/s}$	V_a, V	I_d, A	P_a, W	T, mN	$T/P_a, \text{mN/kW}$	I_{spa}, s	$\eta_a, \%$
Water	0.81 ± 0.06	200 ± 0.7	1.16 ± 0.06	233 ± 11	4.4 ± 0.7	19 ± 3	550 ± 100	5 ± 2
Water	0.81 ± 0.06	240 ± 0.7	1.49 ± 0.07	358 ± 17	6.8 ± 1.0	19 ± 3	860 ± 140	8 ± 3
Xenon	0.78 ± 0.02	200 ± 0.7	0.76 ± 0.03	153 ± 6	10.3 ± 1.3	67 ± 9	1340 ± 170	44 ± 12
Xenon	0.78 ± 0.02	240 ± 0.7	0.75 ± 0.03	180 ± 6	11.8 ± 1.4	66 ± 8	1540 ± 190	50 ± 13



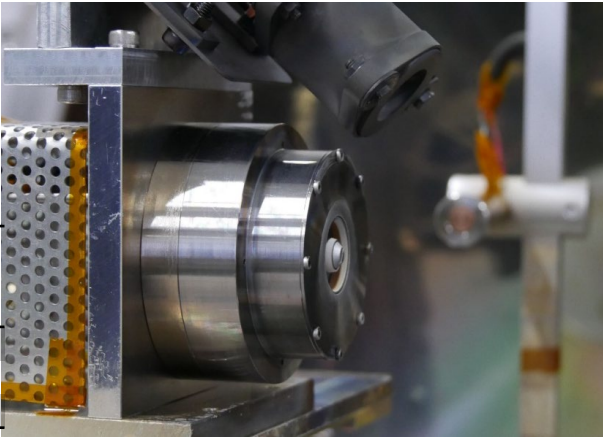
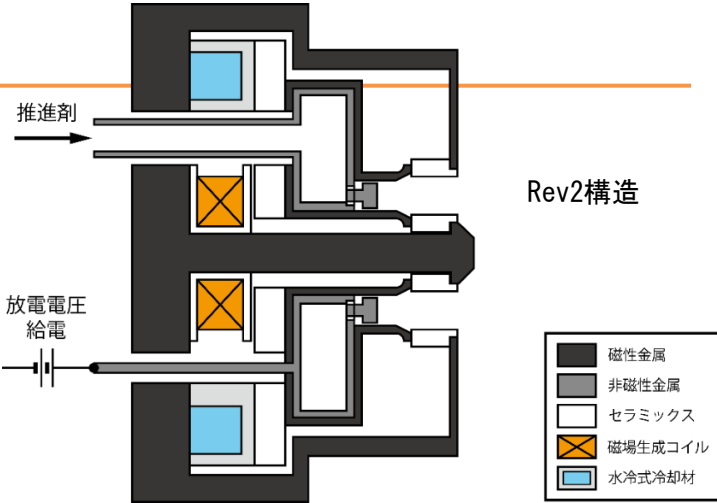
①「アノード」

実施内容・成果

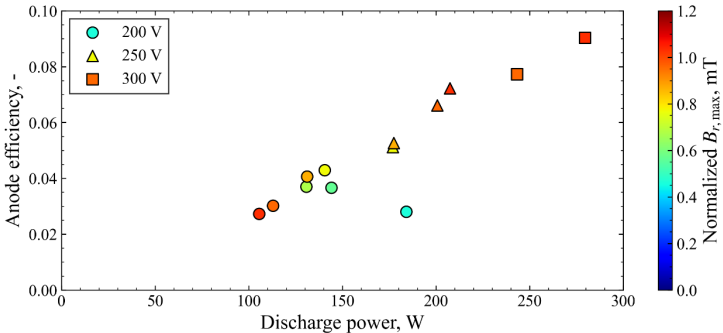
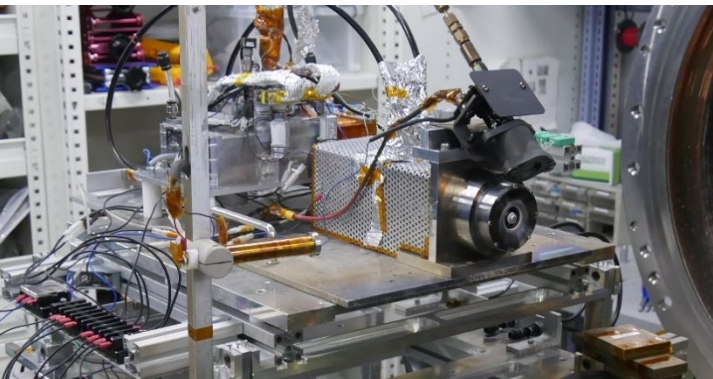
アノード単体で100 Wという作動電力目標の達成に向けて、アノードRev1試験から得られた以下の知見に基づいてアノードRev2の設計および製作を実施した。

- D20W6型の最小作動電力が約200 Wであったことから、チャンネル断面積はその半分程度が指針となる。
- 作動時の熱負荷を効果的に取り除くことで作動領域の拡大が見込める。
- Rev1と同程度の磁場強度が達成され、かつバランスの取れたチャンネル直径・幅の設計が必要とされる。

選定された最適作動点において、推進性能の評価を実施した。これまで推進性能の評価はプルーム診断からの推定で行ってきたが、信頼性の高いデータを取得するためにスラストスタンドを用いた推力の直接計測を併せて実施した。また、カソードの位置についても検討を重ね、これまでのようなチャンネル出口の近傍ではなく、ビームが直撃せずかつカソードからのガス流入の影響を受けにくい位置に変更して作動を実施した。さらに、より軌道上での実力に近づけるために、放電回路のコモンをグランドに落とさずにフローティングさせた状態で計測を実施した。作動時のプルームの様子を下図に示す。推力計測により得られたアノードRev2の最適作動点における推進性能を表1-2にまとめた。結果として、アノードRev2ではアノードRev1から小型化されたものの推進性能は大きく落ちることなく、作動電力の100 W近傍への低減と作動領域の拡大に成功したと言える。



推進剤流量 [mg/s]	放電 電圧 [V]	Norm $B_{r,max}$	放電電流 [A]	放電電力 [W]	推力 [mN]	推力電力比 [mN/kW]	比推力 [s]	アノード効率 [%]
0.5	200	0.86	0.53	107	1.8	17	350	3.0
0.5	250	1.0	0.90	227	3.6	16	670	5.5
0.5	300	1.0	1.07	321	4.7	15	900	6.4



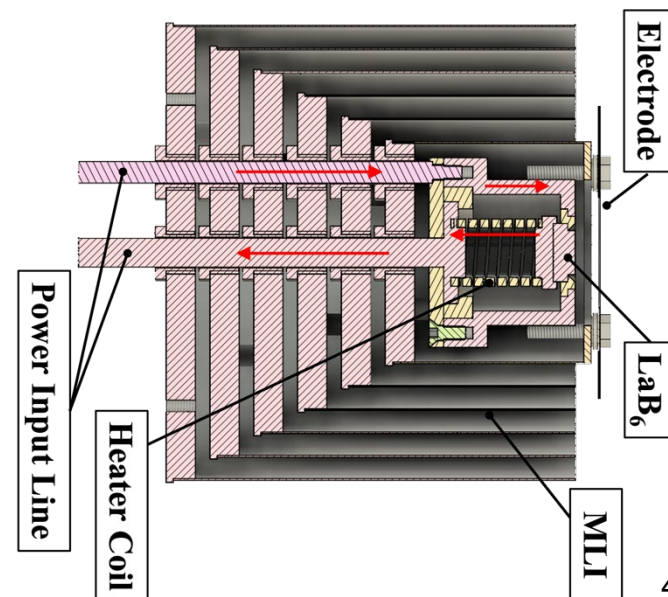
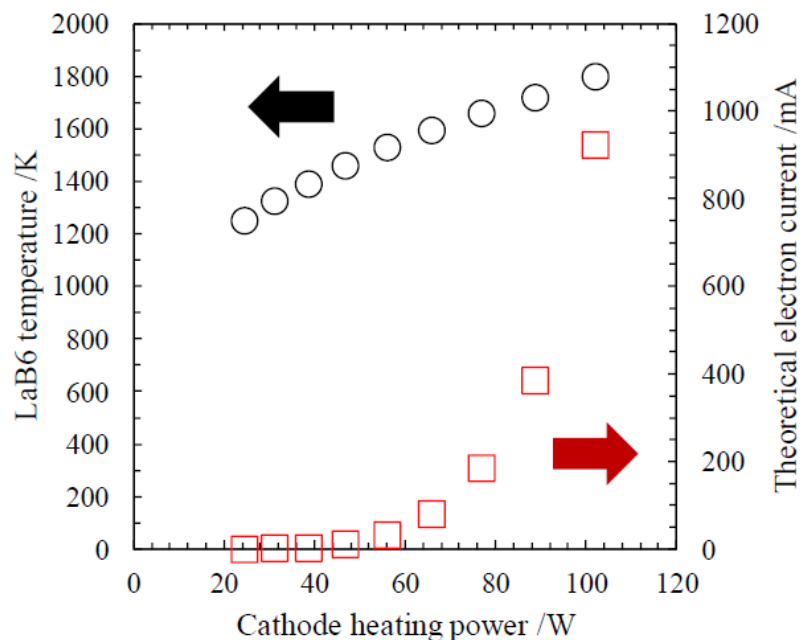
②「カソード」

実施内容・成果

カソード開発は、Rev1とRev2の二段階方式とし、Rev1で得られた空間電荷制限の課題をRev2で明らかにした。

Rev1では、電子放出性能を評価するために単体作動試験を実施した。単体作動試験では、カソードへの投入電力、電子捕集用コレクタへの印加電圧を作動パラメータとして実験を実施し、電流-温度特性（下図左）および電流-電圧特性を取得した。本実験により、多層断熱構造の熱モデルの構築が完了するとともに、電子放出量を制限する要因が空間電荷制限であると特定した。

空間電荷制限の緩和のため、電流引き出し電極を備えたカソードRev2を設計・製造した。加速電極（Electrode）を新たに設け、任意の電圧を印加できるようにすることで電子電流量の向上を狙った。加速電極はMLI第1層によって支持され、セラミック製ボルトとスペーサによって電氣的に絶縁されている。加速電極の設計にあたっては、電子粒子計算を用いて電極位置や電極の穴径、印加電圧に対するパラメトリックスタディを実施し、加速電極の効果を確認するとともに電極形状の最適化を実施した。なお、電子源の多結晶LaB₆や、電子源の加熱機構、MLIの支持機構をカソードRev1から流用することで、開発期間の短縮やコスト低減を図った。



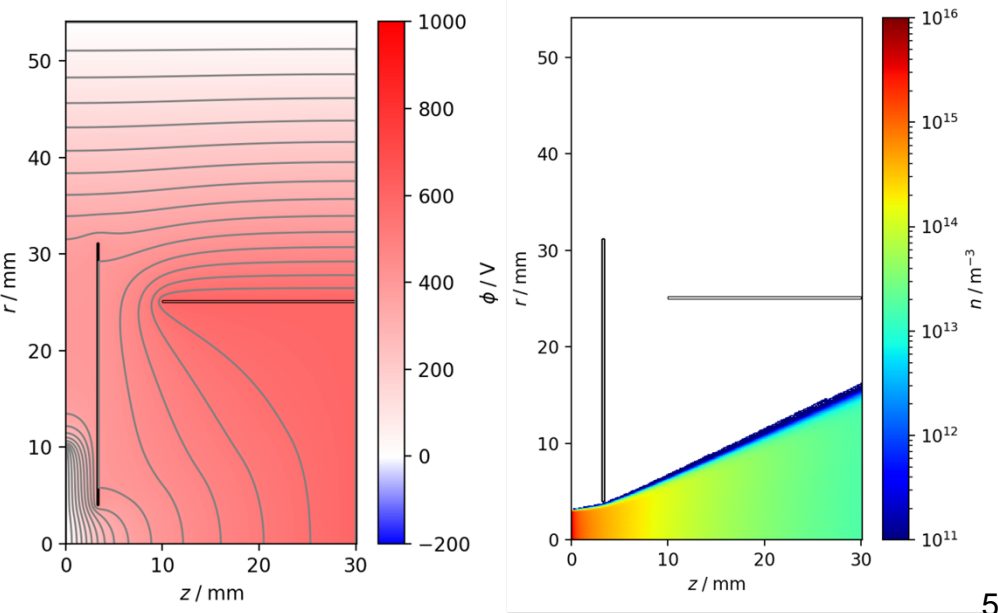
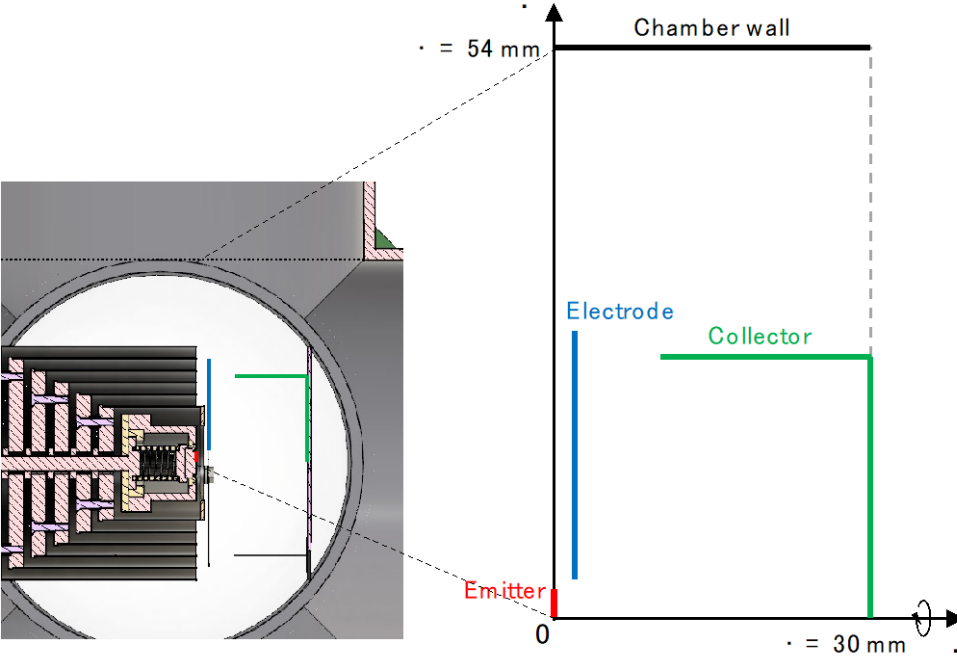
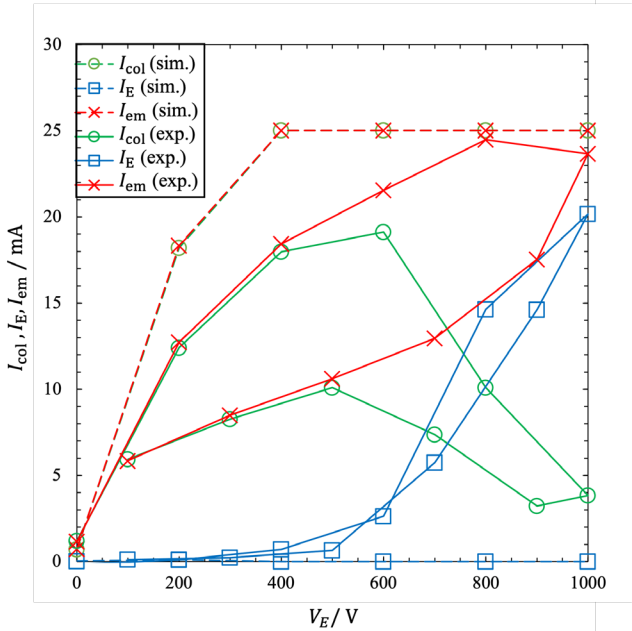
②「カソード」

実施内容・成果

粒子計算における計算領域の模式図を右上図に示す。境界条件として、計算領域の端およびEmitter（図中赤）、Electrode（図中青）、Collector（図中緑）の電位を固定した。電子はEmitterの領域から計算領域内に流入させ、流入する電子電流量は想定するLaB6表面温度に応じてRichardson-Dushmanの式から決定した。本計算では計算条件としてEmitter温度、Electrode電圧、Collector電圧を与え、各値は単体作動試験に準拠した。

下図に加速電極電圧に対する各種電流値のトレンドを示す。実線で単体作動実験の結果を表し、波線で電子粒子計算の結果を表している。単体作動実験の結果、最大で23 mAの電子電流の引き出しに成功した。これは、カソードRev1の単体作動試験で得られた電子電流量の約10倍であり、電圧印加による空間電荷制限の緩和が電流量の向上に効果的であることが実験的に確かめられた。また、実験結果と計算結果は定性的に良く一致し、多くの作動点で定量的に一致が見られた。右下図には、電子粒子計算で得られた電位分布（左）ならびに電子数密度分布（右）を示す。

これらより、本作動点は温度制限領域にあり、カソードRev2の電子放出量は、電子放出材LaB6からの熱電子放出量によって制限されていると推察される。以上の結果より、さらなる電子放出性能の向上にあたっては、より低仕事関数の電子放出材を使う、電子放出材の面積を広くする、作動温度を上げる等対策が有効であるとの知見が得られた。



③「水イオン実証機」

実施内容・成果

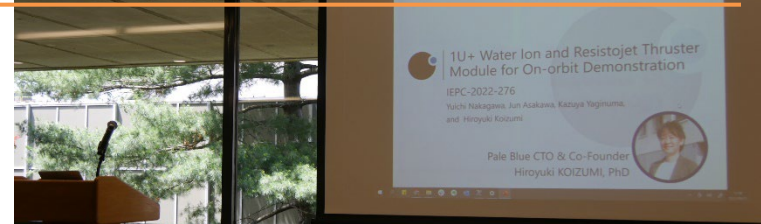
JAXA の革新的衛星技術実証プログラムに、Pale Blue 社の提案した「水を推進剤とした超小型統合推進システムの軌道上実証」が選定されており、本委託業務の水スラスタベースと共通した要素が使用されている。統合試験及び環境試験を完了し、2021年11月にJAXAに引き渡しを完了し、2022年10月12日に鹿児島県のJAXA内之浦宇宙空間観測所（鹿児島県肝付町）から打ち上げられた。しかし、ロケット第2段燃焼終了後、3段分離と点火前の姿勢制御がうまくいかなかったために、打ち上げは失敗し、当初予定していた宇宙実証はできなかった。

2023年2月に革新的衛星技術実証3号機の再チャレンジとして、「水を推進剤とした小型ホールスラスタシステムの軌道上実証」の実証テーマで応募し選定され、搭載に必要なインターフェース情報を入手した。その後、国際動向の調査結果等を踏まえ、証テーマを水ホールスラスタから水イオンスラスタに変更した。

水イオン実証機の開発成果について、以下のような国内外で影響力のある会議にてプレゼンテーション発表を行った。また以下に限らず、国内外の多くの展示会に参加し、情報発信及び国際動向の把握を行った。

- International Electric Propulsion Conference
 - ・ 開催地：アメリカ
 - ・ 開催時期：2022年6月
 - ・ 発表題目：1U+ Water Ion and Resistojet Thruster Module for On-orbit Demonstration
- Small Satellite Conference
 - ・ 開催地：アメリカ
 - ・ 開催時期：2022年8月
 - ・ 発表題目：Pre-Flight Testing Results of Multiple Water Propulsion Systems - Resistojet and Ion Thruster for SmallSats
- 宇宙科学技術連合講演会
 - ・ 開催地：日本
 - ・ 開催時期：2022年11月
 - ・ 発表題目：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と開発状況

International Electric Propulsion Conferenceでの発表



Small Satellite Conferenceでの発表



Small Satellite Conferenceでの企業展示



④「水ホール実証機」

実施内容・成果

本委託事業への申請時から宇宙実証機会の候補として挙げていた革新的衛星技術実証4号機について、2022年4月に公募に関する情報が公開された。実証テーマ「水を推進剤とした小型ホールスラストシステムの軌道上実証」で応募した。その後、2022年10月に、水イオン実証機を搭載した革新的衛星技術実証3号機は、ロケット側不具合により打上げ失敗となり、予定していた宇宙実証が出来なかった。革新的衛星技術実証3号機の実証テーマのうち、再チャレンジを希望する11件について、「革新的衛星技術実証4号機」及び「革新的衛星技術実証5号機」にて再チャレンジの機会を提供することがJAXAによって決定された。設計変更を行った上での再チャレンジ希望を提案した結果、変更希望内容を踏まえて実証の意義価値が評価され、再チャレンジテーマとして「水を推進剤とした小型ホールスラストシステムの軌道上実証」が選定され、水ホールの宇宙実証機会を獲得し、搭載に必要なインターフェース情報を入手した。その後、【4. 水イオン実証機】における国際動向の把握において、イオンスラストの実証意義価値の維持・向上等が見られたため、事業状況を鑑み、実証テーマを水ホールスラストから水イオンスラストに変更した。

上記とは別に、国内外の機関・企業と軌道上実証および実利用機会について継続的に交渉を実施し、搭載に必要なインターフェースなどの条件を入手した。

Pale Blue

[Top](#)[About](#)[Products](#)[News](#)[Careers](#)[Contact](#)



[JP](#)[EN](#)

TOP > PRODUCT > Water Hall-effect Th . . .

Water Hall-effect Thruster

Key benefits

→ Optimal for up to 700kg smallsats

→ Flexible envelope

→ Up to 10mN thrust

REQUEST DETAILS



2024年11月11日時点での株式会社Pale BlueのHP
本プログラム後に、JAXAとの共同研究等（マイクロ波放電カソードなど）
を進め実機開発を進めている。

7

⑤「水ホールスラスト開発」

実施内容・成果

アノードとカソードを組み合わせる性能評価試験の実施した。本プログラムにて製造したアノードRev1とアノード実験用のプラズマブリッジカソードを用いてキセノンプラズマを放電させ、その近傍でLaB6熱電子カソードRev1を作動させた。組み合わせ作動は、これまでアノード実験で用いてきた真空チャンバ内で行った。実験の基本条件は、LaB6熱電子カソードの電位は0 V - 40 Vの範囲でチャンバ壁面に対して負にバイアス、熱絶縁多層カバーをバイアス電位と同電位および+20 Vの2通りとした。また、カソードとアノードの位置影響を調べるため、複数の位置での実験を実施した。

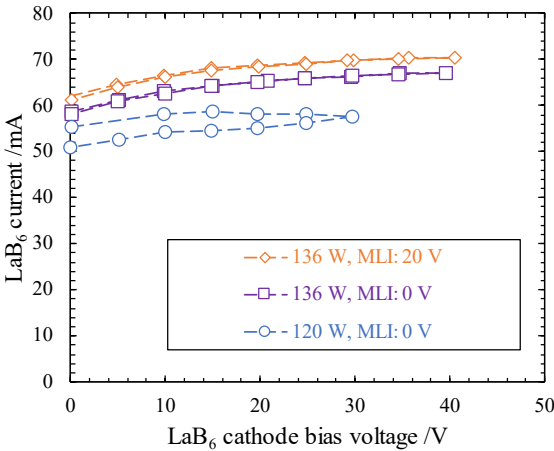
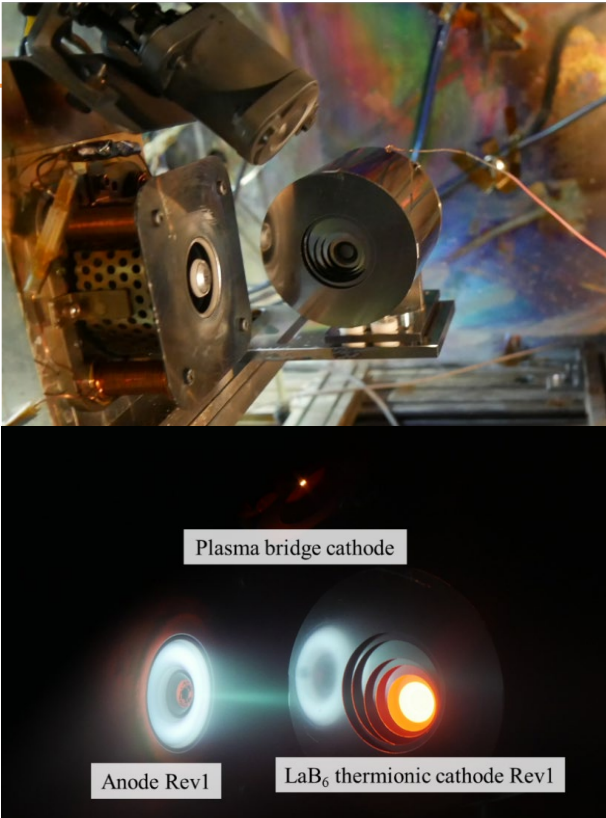
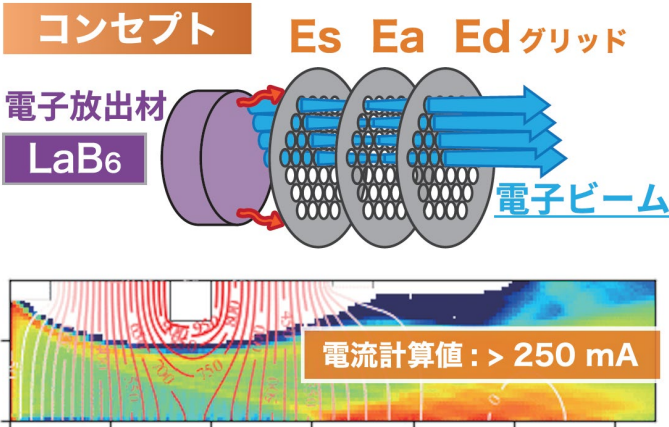
結果として、角度90度、加熱電力136 W、バイアス電圧40 V、MLI電圧20 Vの作動においてLaB6電流の最大値69 mAを得た。この値は、カソードRev1単体作動実験において観測された電子電流値の10倍以上であり、空間電荷制限の大幅な緩和を示唆している。一方で、本作動点が未だに空間電荷による電流制限に律速されている作動領域にあることも確認された。本実験よりアノードとカソードの位置関係がカソード性能に大きく影響することがわかり、イオン密度の高い場所にカソードを配置することで、空間電荷制限のさらなる緩和が見込まれた。以上より、本性能評価試験において統合試験・環境試験の目処が立ったといえる。

【本プログラム後】

東京大学におけるカソードの研究開発は、民間助成金を利用して継続された（2023年度、2024年度）。
この中で、空間電荷制限則を大幅に緩和する方法として、三層グリッド構造の電子引き出しが提案され、特許出願を行った。同構造を用いることで500 mA級の引き出しが可能であることが数値計算により示された（現在、実験により検証を進めている）。

また、同研究の中では、本プログラム構成のカソードのまま、LaB6ディスク面積の拡大とプラズマブリッジ効果により作動点を模索する研究も進められ、現在、雑誌投稿および博士論文の準備中である。

Pale Blueにおけるカソードの研究開発は、JAXAとの共同研究の形で継続している。これは、「JAXA宇宙イノベーションパートナーシップ」の枠組みのもと、超小型電気推進機事業を創造する「事業コンセプト共創活動」として進められている。この研究の中では、別種類のカソードの可能性として、「はやぶさ」を通じて宇宙実証された電子源であるマイクロ波カソードを、「水」により作動させてカップリングさせる試みが進められている。



その他の成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他 研究発表	実用化事業	プレスリリース・取材対応	展示会出展
	国内：2 国際：0	国内：1 国際：2	国内：15 国際：14	国内：3 国際：0	国内：0 国際：0	国内：0 国際：2
	受賞・表彰リスト					

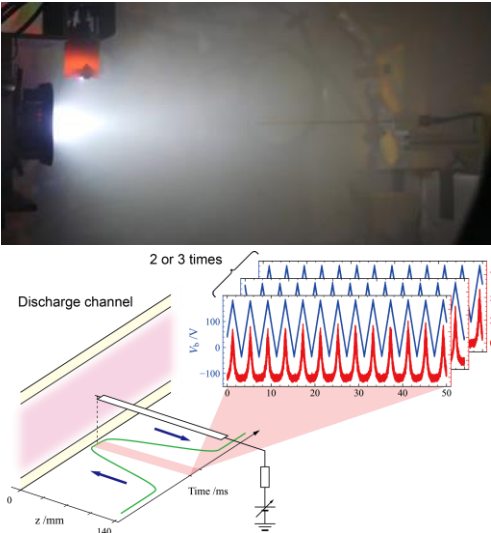
成果展開の状況・期待される効果

本プログラムは主に2つの成果：1 ホールスラストにおける水推進剤の新展開（学術&産業）と2：水スラスト技術の向上 を産んでいる。

【1：水推進剤の新展開】電気推進業界において代替推進剤としての「水」が大きく注目され、学術・産業の両面で活動が進んでいる。実際、現在、東京大学およびPale Blueの他にも英国インペリアルカレッジや、AlienaおよびURA thrusterが水ホールスラスタ開発を進めている。東京大学では後続の研究により、分子性ガスプラズマの衝突反応解明（JAP出版済）、小型ホールのスケール則確立、電子引出の特許出願（2024.5）、水冷システムの特許出願（2024.10）を実施した。また、JST二国間交流事業（仏国CNRS）を2024年度に開始し水ホールの測定を開始、スタンフォード大学（数値計算）との研究交換を実施している。

【2：水スラスト技術の向上】

本プログラムの水イオンベースを用いたレジストジェットは、Pale BlueにおいてPBR-10/20/50シリーズとして社会実装され既に宇宙実績・販売実績を得た。また、イオンエンジンは、同社におけるその後の研究開発も合わせてより小型化されPBIとして製品ラインナップに乗り顧客引き合いも強い。



今後の研究開発計画

【東京大学】

本プログラム後に実施した継続学術研究の成果（論文、特許）をベースとして、学術研究を引き続き進める予定である。アノードは、水プラズマ内の複雑な衝突化学反応の解明と熱問題を解決するための冷却手法を中心にして進める。特に、前者に対しては、仏国CNRSとの連携によるLIF測定による展開を進めている。カソードについては、比推力を低減させることのない熱電子カソード技術に引き続き焦点をあて、特に特許出願のグリッド引出技術の研究を進める。また、Pale Blueにおける水スラスト技術が大きく進展したため、イオン／ホール／レジストいずれについても、深宇宙探査への利用プロジェクトを適用するための進展研究（熱対策、自律制御）および実探査機利用を進める。

【Pale Blue】

本プログラム後、レジストジェットおよびイオンエンジンは着実に社会実装が完了し、電気推進による深宇宙アクセスの基盤を築かれた。特に、PBI（同社の水イオンエンジン）を利用した「GE0から月近傍へのアクセス」は速度増分の点に関しては既に実用Readyの状態にある。今後は、JAXA共同研究を利用して水ホールスラストの完成度を高め、2026年前後には同社主力製品としての実用を狙っている。



[Home](#)
[About Us](#)
[Products](#)
[News](#)
[Contact Us](#)
[Language](#)






Water-based Propulsion Systems

Pale Blue offers advanced electric propulsion systems suited for a wide variety of missions for spacecraft ranging from 3U CubeSats to 700 kg satellites. The systems use water as propellant and do not require high pressure storage, which leads to a safe, cost-effective and sustainable solution for in-space propulsion.



PBR-10

Optimal for 3U-6U CubeSats
6.5W
Nominal thrust at 6W

VIEW SPECS



PBR-20

Optimal for 6U-8U CubeSats
13.5W
Nominal thrust at 10W

VIEW SPECS



PBR-50

Optimal for 10U-300kg microsat
Orb. 200m/s x 2000m/s envelope
10mN thrust at 50W

VIEW SPECS



PBI

Optimal for nanosats and microsats
N/A envelope
Up to 1500m/s total impulse

VIEW SPECS



Water Hall-effect Thruster

Optimal for up to 700kg smallsats
Flexible envelope
Up to 10mN thrust

VIEW SPECS



[Home](#)
[About Us](#)
[Products](#)
[News](#)
[Contact Us](#)
[Language](#)






9

事後評価票

令和 6 年 3 月末時点

1. プログラム名	地球観測技術等調査研究委託事業
2. 課題名	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
3. 主管実施機関・研究代表者	国立大学法人 東京大学 准教授 小泉宏之
4. 共同参画機関	株式会社 Pale Blue
5. 事業期間	令和 2 年度～令和 5 年度
6. 総経費	7 4 百万円
7. 自己点検結果	
(1) 課題の達成状況	
「所期の目標に対する達成度」 ◆ 所期の目標 本業務の目的は、電気推進を将来の超小型探査機に搭載可能な地球静止軌道から月以遠に航行するための技術として基盤技術開発をおこなうことであり、この実現に立ちはだかる問題への解決案には、1) 昨今の小型衛星の大電力化の流れを利用し小型かつ大電力電気推進により ΔV 1 km/s を達成、2) 大推力電気推進に加え同じ推進剤を用いた小推力姿勢制御推進系を統合、3) 小型探査機の利点（手軽に安全に扱える）を損なわせない環境親和性の高い「水」の適用、4) 大小 2 つの電力の電気推進により広範なサイズ／電力範囲に適合である。このために、必要な具体的目標は次の 2 つである：目標 1：水ホールスラスタに対して、150 W 級での作動と推進効率 5%（比推力 1000 s および推力電力比 10 mN/kW が目安）を達成；目標 2：水スラスタベースに対して、0.8U-CubeSat 以内という小型化、レジストジェットスラスタの比推力 100 s 以上、そして水タンクのスケーラビリティを 8 kg まで上げる。 ◆ 達成度	

1. 水ホールスラストアノード：推力 4.7 mN、推力電力比 15 mN/kW、比推力 900 s、推進効率 6.4%を得たため、当初目的を達成した。
2. 水ホールスラストカソード：熱電子放出能力 500 mA の目標温度までの加熱および水アノードとのカップリング作動試験の目標は達成した。
3. 水スラストベース：タンク以外の要素の体積が 0.8U 以下、レジストジェット比推力は、92s まで向上し、軌道上での動作を参考文献から鑑みると 100 s 以上など当初目的を達成したと結論つけた。
4. 水イオン実証機：水スラストベースの要素技術を含んだモジュールとして完成し軌道上実証に向けた試験をすべて達成した。革新的衛星技術実証 3 号機に搭載し打上にのぞんだがロケットの打上が失敗し実施できなかった。なお、代わりに革新的衛星技術実証 4 号機にて宇宙実証を行う機会を得ている。。
5. 水ホール実証機：プログラム期間内で実証機会は得られていないが、Pale Blue の製品ラインナップに並び実証機会探索 4 号機での実証機会を得た、および顧客商談を実施中である。
6. 水ホールスラスト：比推力 900 s を達成した。目標値の 1000 s には届いていない。ただし、トータルインパルスが重視されるため影響は少ないと評価されているがエビデンスの提示はない。。

「必要性」

〔社会的・経済的意義〕

スターリンクに代表されるように地球近傍のメガコンステレーションの重要性の認識は高まっており、同宙域で利用される推進機としてホールスラストはもっとも利用されている。特に、メガコンステ衛星は 300 kg 超への上方シフトが高まっており、本研究における水ホールスラストは適用性が高いといえる。

〔挑戦的な研究や学際・融合領域・領域間連携研究の促進〕

水ホールスラストという分野は、電気推進の学術研究業界においても新しいものであり、注目を集めている（英国でも同様の研究とスタートアップ；仏国 CNRS との国際共同研究を開始）。代替推進剤としての分子性ガスの研究は広まっており、その先駆となっている。

「有効性」

〔新しい知の創出〕水ホールスラストの研究開発は、電気推進研究における新しい分野として認知されている。アノードにおける分子性ガスの衝突反応、カソードにおける LaB6 の挙動はともに、博士論文（2024 年度提出）にまとめられる予定である。後続の学術研究において 2 件の特許出願。

〔実用化・事業化や社会実装に至る全段階を通じた取組〕株式会社 Pale Blue においては、水推進系の社会実装が予定通り進んでおり、イオンエンジンおよび水蒸気エンジンに関しては既に社会実装が完了していると言える。ホールスラストに関して、特にカソードの難易度から実装までは至っていないが、後続の JAXA との共同研究等を通じて、実用化の目処はついており、プロダクトとして HP への掲載および顧客への商談は進められている。

「効率性」

〔研究開発の手段やアプローチの妥当性〕

大学（研究サイド）および企業（開発／実証サイド）が連携して、新しい推進機の研究開発に取り組めた点は非常に効率性が高かった。既存の体制では、研究と、社会実装に必要な周辺コンポーネントの開発／実証方法／顧客ニーズ調査が直列で進められていたため、研究から実装まで 10 年以上を要するものであったが（実際、小型イオンエンジンは 2007 年の研究開始から Pale Blue による実装まで 15 年を要した）、水ホールスラストではそれが 5 年以下に短縮されている。一方で、本プログラムが有する「計画したことを確実に実効する」という特性は、学術研究の本質とは乖離しているため、目標設定や研究の進め方に非効率性が生まれた（当初設定の目標を遵守するため、研究という観点では必ずしもベストでない方向への舵取りとなる；例えば特許などは生じにくい）のも事実である。ただし、この研究色が少ないという点は、プログラム後の学術研究において補完できたものと考えている（民間助成金 3 件、JST 二国間交流事業により実施）。

（２）成果

「アウトプット」

〔成果（アウトプット）／意義〕

- ・水ホールスラストアノードは、代表作動点として放電電圧 300 V および推進剤（水）流量 0.5 m/g において、推力 4.7 mN、推力電力比 15 mN/kW、比推力 900 s、アノード効率 6.4% を達成した。
- ・同カソードは、多層熱絶縁方式により熱電子放出能力 500 mA の目標温度までの加熱を実現させた。また、引出電極の設置による電子放出効果を数値計算と実験により確認した。
- ・上記水ホールスラストの研究開発は、電気推進の学術業界において着実に新しい分野を築いた。
- ・水レジストジェットは軌道上における比推力 100 s の到達見込を得た。
- ・水イオンエンジン用電源／供給系の小型化に成功し環境試験をクリアした。
- ・水ホールスラスト作動に必要な電源について基本的な回路構成の実証が完了した。
- ・水イオンスラストの宇宙実証機会を得た（ただし、イプシロンロケット打上失敗により宇宙作動は未達成）。同スラストを利用する顧客との商談／交渉を実施した。

〔国内外の同種の研究開発動向 等〕

- ・英国インペリアルカレッジにおいて水蒸気ホールスラストの研究、Aliena および URA thruster による水ホールスラストの商用開発が始まった。
- ・小型宇宙機マーケットにおいて、主力衛星が 200 kg からより上方にシフトしている。

「アウトカム」 （令和 6 年 10 月末時点）

- ・本プログラムの水イオンベースを用いたレジストジェットは、Pale Blue において PBR-10/20/50 シリーズとして社会実装され既に宇宙実績・販売実績を得た。また、イオンエンジンは、同社におけるその後の研究開発も合わせてより小型化され PBI として製品ラインナップに乗り顧客引き合いも強い。
- ・本プログラムにより開発されたスラストを用いた後続の学術研究により、分子性ガスプラズマの衝突反応解明（Accept）、小型ホールのスケール則確立（執筆中）、電子引出の特許出願（2024. 5）、水冷システムの特許出願（2024. 10）を実施した。
- ・水ホールスラストの研究開発をうけて、JST 二国間交流事業（仏国 CNRS）を 2024 年度に開始した。また、スタンフォード大学（数値計算）との研究交換を実施しており論文を執筆中である。
- ・小型深宇宙探査機の飛翔機会の少なさから、具体的な深宇宙エンジン実用には至っていないが、本研

究プログラムの水イオンスラスタベースを活用した Pale Blue 社の PBR および PBI は、シスルナ圏における地球磁気圏 X 線撮像衛星のエンジンとしての利用検討が行われている。また、地球近傍での衛星利用では、主要な衛星サイズが 300 kg 程度にシフトしており（メガコンステ利用のため）、本研究開発の水ホールスラスタは同サイズにジャストフィットするエンジンとして、Pale Blue における販売ロードマップにおいては 2020 年代後半の主力となる計画である

（３）今後の展望

・継続のための組織的、資金的、人的体制の方向性 等

水ホールスラスタは、現在大きな高まりを見せている代替推進剤の適用性研究の最先鋒として、電気推進学術界および産業界において大きな注目を集めている。

学術界では、ホールスラスタの優れた測定技術あるいは数値計算技術を有する海外研究室との連携を実施中あるいは予定しており（CNRS、スタンフォード、ジョージアテック）、研究領域の拡大ならびに国際的な牽引を見込んでいる。また、これらとは独立して英国インペリアルカレッジにおいて水ホールスラスタ研究が開始された。

産業界では、Pale Blue は本プログラム後に JAXA 共同研究や大学共同研究を進め社会実装を大きく進めている。海外では、Aliena および URA thruster が水ホールスラスタ開発を進めている。Pale Blue が進めている顧客交渉においても水ホールスラスタへの関心は大きい。これは、近年低軌道の小型衛星サイズが 300kg 超へとシフトし、水ホールスラスタがフィットするレンジに入ってきたことが大きい。

８．評価点

A

評価を以下の５段階評価とする。

S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。

A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。

B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。

C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。

D) 成果はほとんど得られていない。

９．評価理由

電気推進を超小型探査機に搭載し地球静止軌道から月以遠に航行するための基盤技術を確立することを目的に、水ホールスラスタの高比推力化、及び水スラスタベースの小型化と効率化を実現する挑戦的な取り組みである。

アノードは比推力 900s に対応できる見込み、カソードは 23 mA の電子電流の引き出しに成功し大推力化の目途が得られた。水スラスタベースはタンク以外の要素の体積が 0.8U 以下と小型化に成功し、これを利用したレジストジェット比推力は 92s を達成した。スタラスタ実証機としては、イオンスラスタが革新 3 号に、ホールスラスタが革新 4 号にそれぞれ実証採択された。水イオン実証機、水ホール実証機の開発は着実に積み重ねている。本人の問題ではないが、ロケット打ち上げ失敗等もあり革新的衛星技術実証まで至らなかった点は残念であるが、計画された新規性、独創性に富む水推進系の技術開発と性能検証は、ほぼ予定通りきっちりと実施されており、水ホールスラスタ開発にも挑戦して知見を蓄

積したといえる。

外部への成果の展開については、スタートアップ企業の PaleBlue において製品化への取り組みが進められ、一部については衛星搭載がなされるなど、具体ミッションでのへの展開も進められており、社会実装の面でも成果が出ている。また、JAXA との共同研究も行われ、所期の開発成果を達成していると言える。

人材育成についても、博士論文一件を含め特許出願 2 件や査読付き投稿論文 3 本などの成果もあり、学生の成長に結びついていると考えられ、相応の成果を挙げている。

一方、得られた成果はそれぞれ要素技術に関しての進展であり、トータル/システム全体での実証と製品化は十分報告されておらず、目標とするホールスラストのシステムとしての 150 W 級での作動と比推力 1000s や水タンクのスケラビリティを 8 kg、そして主目的である月以遠に航行するための ΔV 1 km/s すべてで目途が立っているとは言い難い。水を推進としたスラストとして成果を得ていると判断するが、イオン中和が完全でなく、スケーリングによって中和の見通しが得られるとしている部分が残念である。水スラストのメリットに対する魅力やスタートアップにおける社会実装は依然有効であるが、本事業そのものの成果とは言えない。また、他方法に比べてどれだけ開発費用の効率化が図れたのかなど費用対効果を示す定量的な指標や、社会への裾野拡大を目指した普及・還元の活動がなかった。

以上を踏まえ、要素技術の進展に留まっておりシステムとしての目標には到達していないことから、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- さらなる性能向上を目指した開発や、開発成果のトータルでの宇宙空間実証に取組み、成果の完成度を世界で比類なきものに育てることを期待する。
- Pale Blue 社とも連携した製品化や具体ミッションへの展開に関してもさらに積極的に進め、産業振興の面での貢献と世界で比類なき製品化にも務めることを期待する。
- 成果は常に社会に発信して、我が国の惑星・月探査での世界でのポジション獲得や社会への普及啓発に務めることを期待する。
- 水ホールスラストについては、本格的な市場参入に向けて、様々な飛翔機会利用により実証を早期に実施して頂くよう期待する。
- できるだけ早く宇宙実証機会が確保され、社会実装されていくことを期待する。