

# 電気推進ロケットエンジンの推進性能と内部プラズマ物理現象 に関する調査専門委員会

## プラズマ技術委員会

### 1. 目的

電気推進ロケットエンジンは、主に太陽電池により太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換し、これを推進エネルギーに利用するロケットエンジンである。化学ロケットエンジンに比べて、推進剤噴出速度が格段に大きいので、推進剤の使用量を節約でき荷重量を増やすことができる。すなわち、高比推力（比推力：推進剤単位重量当たりを得られる推力（推進剤噴出速度を標準重力加速度（ $9.8\text{m/s}^2$ ）で割った値）、低加速度であるという特徴を持つ。そのため、重力の影響の弱い宇宙空間での長期ミッションに適しており、宇宙飛行体の軌道保持、姿勢制御への利用、深宇宙探査の主推進エンジンとして活躍中である。日本では、小惑星探査機「はやぶさ」がマイクロ波放電式イオンエンジンを駆り地球帰還を果たして、世界的な偉業を達成したのは記憶に新しい。

電気推進ロケットエンジンでは放電を利用して電力を推進剤に投入しその放電プラズマを加速するので、それら過程の十分な理解が推進性能の高いロケットの開発のためには必要である。すなわち、広範な電気工学、プラズマ物理・技術を駆使し、如何に効率良くプラズマを生成・加速するかが鍵となる。さらに宇宙機器特有の軽量化、長寿命化も開発上の大きな問題である。

本調査研究では、航空宇宙分野独特の考え方を十分理解した上で、あくまで一般的な電気工学の中の電気機器システムとして電気ロケットエンジンシステムを捉え調査研究を行う。問題点の洗い出し検討を加えていく。さらに、電気推進ロケットエンジンをプラズマ発生・加速装置の1つと捉え、多くの地上のプラズマ装置と比較検討を行いながら、プラズマ特性、その物理現象の調査研究を行う。より効率良くプラズマを発生させ加速させる方法の検討も加える。さらに、電気推進ロケットエンジンの地上応用を目指した研究の調査を行い、それら分野の地上の機器と比較し、長短所を検討する。

こうして、本調査専門委員会は、航空宇宙工学分野の電気推進ロケットエンジンの開発研究者と電気工学分野の電気機器システム、プラズマ工学分野の研究者が集まり、お互いの立場を認識・理解すると共に、十分なコミュニケーションを取り協力し合い、精力的に調査研究を行う環境下で運営される。我国における当該分野の研究をさらに広く展開させる可能性を大いに秘めている。

### 2. 内外の趨勢

近年、人工衛星の高機能化と共に、その規模は大型化と小型化に2分化する傾向にあ

る。3ton 以上の大型静止衛星（電力 5kW 以上）から数 kg 以下の小型衛星（数 W から数百 W）までその需要は幅広い。小型衛星と言っても電力は小さいが、要求される推力は必ずしも小さいわけではなく、そのミッションに必要な性能を備えた推進機が要求される。低コストであり、要求性能を満たす電気推進システム、先端宇宙推進システムの開発が強く望まれている。また、宇宙ステーションの建造により宇宙利用計画も活発になり、高度技術を駆使した惑星・深宇宙探査機の開発も進められている。これらの宇宙機に望ましい大電力、もしくは微小電力の電気推進、これらのミッションを達成するために必要不可欠な電気推進エンジンの開発研究が世界的に盛んになってきた。

大電力電気推進は次世代の高度高機能ミッションである、超低高度衛星、全電化静止衛星、ハイブリッド静止軌道投入、軌道間輸送、超遠距離深宇宙動力飛行などを可能にする。さらにこれらの先進技術は、宇宙大量物資輸送を担い、月有人ミッション実現や宇宙太陽発電衛星建造を支えるものと期待される。

超低高度軌道とは高度 200km 程度の軌道であり、その利用方法が検討されてきた。現在、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA）では超低高度衛星技術試験機（Super Low Altitude Test Satellite: SLATS）を計画しており、大気抵抗補償のための電気推進として、低電力推力比（27W/mN 以下）と長寿命の観点から、JAXA の 35cm 級リングカスプ型イオンエンジンが有望視されている。

ポスト国際宇宙ステーション（ISS）プログラムとして世界中で国際有人月拠点計画が胎動し始めた。国際有人月拠点計画においても ISS と同様にロバストで効率的な搭乗員・物資輸送が要求されると考えられる。電気推進の適用を考えた場合、地球低軌道から月低軌道（Low Lunar Orbit: LLO）への軌道遷移が対象となる。有人月着陸船と貨物月着陸船の電気推進による LLO への輸送を検討した場合、前者はその規模（アポロ月着陸船クラス 20 トン）から現状の電気推進技術では不可能であり、後者は化学推進に比べて優位性があると共に、現状の電気推進技術で克服可能（30kW クラス電気推進の開発）である。

マイクロ波放電式イオンエンジン（推力 8mN、比推力 3000 秒）を搭載した「はやぶさ」探査機の飛翔は世界中を驚かせた（2003 年 5 月打ち上げ、2010 年 6 月地球帰還）。イオンエンジンは完成度の高いエンジンであるが、低推力である。また、1 万時間を超える地上耐久試験が望まれ莫大な時間と費用を要するため、数値シミュレーションによる正確な耐久性の評価が要求されている。日本は木星探査用エンジンとして 5000 秒以上の高比推力と数万時間オーダーの耐久性を併せ持つ推進システムの研究に着手している。10000 秒の比推力と 20000 時間以上の耐久性もつマイクロ波放電式イオンエンジン「 $\mu$ 10HIsp」の開発を目指し、イオン加速電圧の増大による高比推力化を実現するために、基礎となるエンジン各部の高電圧絶縁技術の向上を図っている。

これまで日本では JAXA を中心にイオンエンジンの開発研究が盛んに行われてきたが、欧米ではホール型プラズマエンジンの商業化が大きく進み、大型衛星搭載用の電気推進は

ホール型エンジンが席卷している状況にある。ホール型プラズマエンジンではイオンがプラズマ中で静電加速されるために空間電荷制限則によるイオン電流密度の制限を受けないので、推力密度が通常のグリッド型イオンエンジンに比べて 1 桁大きい。2003 年に SMART-1 ミッションの主推進用、2004 年に静止衛星 3 機 (MBSAT、Intelsat10-2、Inmarsat-4F1) の南北位置制御用に PPS1350、SPT エンジンがそれぞれ用いられている。

近年、コスト削減とリスク低減の観点から、ロケットの余剰ペイロードを活用して打ち上げられる超小型衛星が注目され、その軌道上におけるフォーメーションフライト等の計画が世界的に増加している。こうした超小型衛星の研究開発の活性化、需要の増大により、小型・軽量・低電力の衛星推進系としてパルスプラズマエンジン (Pulsed Plasma Thruster: PPT) が注目されている。PPT では、繰り返しパルス放電により固体推進剤テフロンを昇華、高温・高圧状態のガスにし噴出させるので、推進剤タンク・バルブが不要でシステムの簡素化、軽量化が可能であり、超小型衛星に最適である。大阪工業大学では電熱加速型 PPT を搭載した超小型人工衛星「プロイテレス」を 2011 年にインド・固体燃料ロケット (Polar Satellite Launch Vehicle: PSLV) によって打ち上げる予定である。

### 3. 調査検討事項

- 1) 電気推進ロケットエンジンの使用状況、今後のミッション計画
- 2) 大電力電気推進と微小電力電気推進の研究状況と将来展望
- 3) 各種の電気ロケットエンジンシステムの開発状況と基本性能特性
  - ・イオンエンジン
  - ・ホール型エンジン
  - ・直流アークジェットエンジン
  - ・電磁プラズマ加速型エンジン
  - ・パルスプラズマエンジン
- 4) 各種の電気推進ロケットエンジンのプラズマ特性と関連する物理現象
- 5) 各種の電気推進ロケットエンジンの地上応用

### 4. 予想される効果

- 1) これまで主に航空宇宙工学分野の技術研究者のみで電気推進ロケットの開発研究が進められてきたが、広範な電気工学、プラズマ工学の技術研究者を交え、プラズマ発生・加速という基本に立ち返り総合的に調査研究を行うことにより、電気ロケットエンジンシステムを横断的かつ大局的に見ることができ、技術的課題、将来展望がより明瞭になる。また、問題点に関する解決方法の糸口が見つかり、新たな応用分野が見いだされる可能性がある。
- 2) 「はやぶさ」探査機に代表されるように、電気推進は来るべき「宇宙大航海時代」

にはなくてはならない技術であり、世界規模で研究開発活動が拡大しているが、我国の研究人口はまだ少ない。本委員会を核に新たに研究グループを組織することによって、当該分野における我国の研究を活性化することができる。

## 5. 調査期間

電気学会 A 部門研究調査運営委員会での承認から 3 年間

## 6. 委員会の構成（18名）

職名	氏名	(所属)	プラズマ技術委員会委員	会員・非会員区分
委員長	田原弘一	(大阪工業大学)	委員	会員
幹事	木村高志	(名古屋工業大学)	委員	会員
幹事	鷹尾良行	(西日本工業大学)		会員
委員	赤塚 洋	(東京工業大学)	委員	会員
同	行村 建	((独) 産業技術総合研究所)	委員	会員
同	安藤 晃	(東北大学)		会員
同	安藤康高	(足利工業大学)		申請予定
同	臼井英之	(神戸大学)		非会員
同	大須賀弘行	(三菱電機 (株))		会員
同	黒川不二雄	(長崎大学)		会員
同	上坂裕之	(名古屋大学)		非会員
同	小紫公也	(東京大学)		申請予定
同	篠原俊二郎	(東京農工大学)		非会員
同	鷹尾祥典	(京都大学)		申請予定
同	豊田和弘	(九州工業大学)		会員
同	西山和孝	(JAXA宇宙科学研究所)		非会員
同	宮坂武志	(岐阜大学)		申請予定
同	脇園たかし	((有) ハイサーブ)		非会員

## 7. 活動予定

委員会 4回/年

幹事会 2回/年

## 8. 調査結果

本委員会での調査によって得られた結果は、電気学会技術報告書としてまとめる予定である。