

氏 名 久本 泰慶

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1662 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 ECR 放電とイオン壁面中性化を用いた超熱原子状酸素源の定
常ビーム特性

論文審査委員 主 査 准教授 田川 雅人 神戸大学
准教授 西山 和孝
准教授 船木 一幸
准教授 阿部 琢美
准教授 小泉 宏之 東京大学

論文内容の要旨

ECR 放電とイオン壁面中性化を用いた超熱原子状酸素源の定常ビーム特性

地上から 150~250km の超低軌道と呼ばれる高度領域は、高高度気球では到達できず、大気抵抗補償を行わない従来の人工衛星では長期間のミッションを行うことが出来ないため、観測ロケットによる離散的かつ散発的な観測に限られてきた。近年の宇宙利用の拡大とともにこれまで避けてきた超低軌道を、電気推進機により大気抵抗補償を行いながら長期間飛行する人工衛星の注目が高まっている。こうした超低軌道衛星は比推力に優れた電気推進機を利用することで数年に渡り運用することが可能となる。ESA の GOCE (Gravity field & steady-state Ocean Circulation Explorer)はそのパイオニアであり、日本、イギリス、ドイツ、中国等でも超低軌道衛星の検討が進められている。超低軌道衛星の寿命は衛星に搭載された推進剤重量によって決まる。そこで推進剤を高層大気とし現地調達することで、衛星寿命が推進剤重量に依存しないという構想の電気推進機が提案されている。その中のひとつである大気吸込式イオンエンジンは、希薄な高層大気を放電室に取り込んでプラズマ生成に適した圧力へ高めた後、従来のイオンエンジンと同様に推進剤をプラズマ化させグリッドで加速を行う電気推進機である。推進剤を軌道上で調達し続けるため衛星自体は推進剤を必要としないプロペラントレス推進機であるため、衛星寿命を飛躍的に延ばすことが最大の特長となる。

大気吸込式イオンエンジンのコンセプトを地上実証するためには、超低軌道環境の高層大気を模擬する風洞（原子状酸素源）が必要不可欠となる。レーザーデトネーション型原子状酸素源は、宇宙材料劣化の研究分野において最も有効な環境模擬装置として利用されているが、パルス駆動であるため様な高層大気流の模擬が困難である。そのため大気吸込式イオンエンジンの環境模擬装置としては定常(CW)駆動の原子状酸素源が切望されている。

本研究は大気吸込式イオンエンジン実証における地上環境模擬装置の構築という位置づけである。本研究では高層大気環境模擬のための超熱原子状酸素定常ビームの生成を目的に、ECR 放電プラズマ源および壁面中性化グリッドを用いた原子状酸素の開発を行い、超熱原子状酸素ビームのエネルギーとフラックスの評価を実施した。

得られた実験結果より、円軌道環境より 7 eV 程高エネルギーではあるが大気吸込式イオンエンジンの地上試験に適応可能なビームエネルギー ~12 eV であることを決定づけた。加えて本装置における原子状酸素イオンの中性化が主に中性化グリッド表面で行われていることを明らかにし、理想である 5 eV へのエネルギー調整がグリッド印加電圧により行える可能性を示した。フラックス値は $1.45 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ で目標となる軌道高度環境を達成した。これは軌道高度に換算すると高度 230 km に匹敵する。

第 1 章では、超低軌道を利用したりモートセンシングへの期待や大気吸込式電気推進機の関心の高まりを受け、現行の技術的課題について述べる。これらは本研究の動機となっており、これらを踏まえて研究目的を示す。

第 2 章では、軌道環境模擬を目的として開発されてきた代表的な原子状酸素源について述べる。その後、軌道環境模擬に限定せず本研究と類似した先行研究について総論し、相

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

違点を明らかにする。これにより本研究の妥当性を示したうえで、設計指針および目標性能を定める。

第 3 章では、本原子状酸素源の概要について説明する。原子状酸素源は ECR 放電により生成した酸素プラズマを中性化グリッドによってイオン壁面中性化を行わせることで超熱原子状酸素を生成する。アンテナとそれを取り囲むように配置された磁気回路 (2-17 系 SmCo 磁石と SUY-1 製) で放電室 (内径 64 mm) は構成され、高アスペクト比の多孔 ($\Phi 1$ L10 P0.8) が開いた中性化グリッドが下流側に接続されている。動作パラメータは、周波数 4.25 GHz のマイクロ波電力、酸素ガス流量、中性化グリッド印加電圧である。

第 4 章では、原子状酸素ビームの平均並進エネルギーの計測について述べる。エネルギーは、機械式チョップと四重極質量フィルタを用いた Time of Flight によって計測を行った。マイクロ波電力 48 W、放電室圧力 125 mPa、グリッド印加電圧 0 V において、原子状酸素ビームのエネルギーは ~ 12 eV であった。また、グリッドに負電圧を印加するとエネルギーが増加するという結果を得た。これにより原子状酸素エネルギーはグリッド電圧で調整可能である。

これらの実験結果より、中性粒子エネルギーが中性化グリッドに印加した電圧により変化することから、壁面中性化は中性化グリッドで生じていると結論付けた。また原子状酸素エネルギーはグリッド近傍のシース域における静電加速によって得られていると考察した。このときに得られるエネルギーはグリッドに印加された電圧とプラズマ電位の電位差によって決定される。

第 5 章では、原子状酸素ビームのフラックス決定について述べる。フラックスは、ポリイミド損耗質量を水晶振動子微小天秤により計測することで評価した。マイクロ波電力 48 W、放電室圧力 128 mPa、グリッド印加電圧 0 V において、原子状酸素フラックスは $\sim 1.45 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ であった。外圏温度 $K = 736$ とした場合、軌道高度に換算すると 230 km に匹敵する原子状酸素環境である。原子状酸素源の作動パラメータを変化させると、マイクロ波投入電力の増加に比例してフラックスも増加する傾向を示した。放電室圧力とフラックスの関係にはプラズマのモードに伴う敷居値が確認され、敷居値を超えた放電室圧力での動作が利用効率がよいという結果を得た。

フラックス空間分布計測の結果より、放電室内で生成したイオンの移送は弓型磁場内で生成されたイオンが弓型磁場と近接した中性化グリッド方向に向かう磁力線に沿って運動することで中性化グリッドへ移送されていると考察した。

第 6 章では、4-5 章の実験結果を用いてビーム組成について決定し、グリッド孔近傍に形成されるシース形状について仮説を立て、利用効率改善のための改良指針について検討する。仮説を基にグリッド孔アスペクト比をパラメータとして変更させ超熱中性粒子の生成量の変化を実験で比較した。得られた結果よりシース形状はグリッド孔内部まで張り出した形状をしていると考察し、酸素ガスの利用効率高めるための最適なグリッド孔について検討を行った。

第 7 章では本論文の結論を纏めた。本論文では超熱原子状酸素の定常ビーム生成とそのエネルギーおよびフラックス計測を行い、ビーム性能を評価した。得られた結果からは本装置における中性化プロセスを明らかにし、ビーム環境は想定される宇宙機の軌道環境に調整可能であるという結論を得た。

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

ECR 放電とイオン壁面中性化を用いた超熱原子状酸素源の定常ビーム特性

本博士論文は、高層大気環境を地上模擬する超熱原子状酸素源の実験的研究成果報告である。200km 付近の超低軌道を周回する人工衛星の大気抵抗補償のため、8km/s 以上の軌道速度で流入する希薄大気を推進剤とする「大気吸込式電気推進」の新構想がある。この基礎研究において、飛翔環境を地上で模擬する風洞としての超熱原子状酸素源の実現と活用が強く望まれる。現行利用できる選択肢がパルス作動・発散ビームに限られており、本研究では定常作動かつ平行度の高いビーム生成を可能とする電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 放電を利用した独自の小型の原子状酸素源を開発した。出願者は、荷電粒子と比べ生成および計測の難しい原子状酸素のエネルギーとフラックス、発散角を評価し、本装置における原子状酸素イオンの中性化が主に下流グリッドの表面で行われ、要求精度内で超低軌道環境を模擬できることを示した。本研究で得られた超熱原子状酸素源の設計とビーム特性に関する知見は、より大型で本格的な高層大気風洞を今後実現する上で重要な役割を果たすであろう。

本論文では、第 1 章にて、超低軌道利用や大気吸込式電気推進機への関心の高まりを受けた現行の技術的課題について述べた上で、本研究の動機と研究目的を述べている。第 2 章では、軌道環境模擬を目的として開発されてきた原子状酸素源について述べ、その後、軌道環境模擬に限定せず本研究と類似した先行研究について総論し、相違点を明らかにすることで本研究の意義を示している。第 3 章では、今回開発した原子状酸素源の概要とプラズマ生成原理および壁面中性化現象の基本原則について解説し、使用した実験機器等について述べている。原子状酸素源は周波数 4.25GHz のマイクロ波による ECR 放電により生成した酸素プラズマを、中性化グリッドによってイオン壁面中性化を行わせることで超熱原子状酸素を生成する。アンテナとその周囲の磁気回路 (SmCo 磁石と軟鉄) で放電室 (内径 64 mm) は構成され、多数の細長い孔 ($\Phi 1 \times 10$) が開いた中性化グリッドが下流側に接続されている。可変の作動条件は、マイクロ波電力、酸素ガス流量、中性化グリッド印加電圧である。

第 4 章では、機械式チョップと四重極質量フィルタを用いた Time of Flight 法により原子状酸素の並進エネルギーを決定している。代表的作動条件であるマイクロ波電力 48 W、放電室圧力 125 mPa、グリッド印加電圧 0 V において、原子状酸素ビームのエネルギーは約 13 eV であり、さらにグリッド印加電圧によりエネルギーを制御可能であることを実験により示している。実験結果より中性化箇所の特長とエネルギー決定メカニズムについて考察している。また、これに関連して行ったラングミュアプローブによるプラズマ電位計測から考察の裏付けを行っている。第 5 章では、超熱原子状酸素によるポリイミドの質量損耗を、水晶振動子微小天秤 QCM を用いて測定することにより、原子状酸素のフラックスを前述の作動条件において $1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (軌道高度 220km 相当) と決定し、この実験結果よりイオンの中性化箇所への移送について考察している。第 6 章では、第 4 - 5 章の実

(Separate Form 3)

験結果を用いてビーム粒子組成を導出している。また、グリッド孔近傍に形成されるシース形状について考察し、本装置の残る課題である酸素ガスの利用効率改善と背景圧力低減のための今後の改良指針について検討している。最後の第7章には、本論文の結論が記されている。

以上の成果は、ECR 放電とイオン壁面中性化を用いた超熱原子状酸素源の定常ビーム特性に関する初の実験的な研究であり、将来の高層大気風洞の実現に向けて工学的に有益な知見が得られている。また、本論文の主要な部分は、査読付き学術雑誌1篇を投稿し査読が完了して掲載待ちであり、さらに査読付き学術雑誌1篇を投稿準備中である。以上の結果を踏まえ、本論文は、博士（工学）を授与するに十分な学術水準に達していると判定した。