

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630392

研究課題名(和文) 固体反応大気吸入イオンエンジンの超低軌道運用に関するフィージビリティスタディー

研究課題名(英文) A feasibility study on the operation of reactive air breathing ion engine in sub-LEO

研究代表者

田川 雅人 (Tagawa, Masahito)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10216806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：超低軌道の大気を推進剤とする大気吸入イオンエンジン(ABIE)について、ABIEへの分子流入速度を地上で再現できるレーザーデトネーション法を用いた実験的研究方法を確立することを目標とした研究である。ABIE試作機と原子状酸素ビーム装置を用いた実験の結果、リフレクターで反射された原子状酸素により放電室内の瞬間的な圧力上昇とプラズマ点火が確認され、世界初となる高速原子状酸素流によるマイクロ波プラズマ点火実証が行われた。一方、プラズマシミュレーション結果からは最適化されたメッシュ電極の配置、RABIEモードを実現するリフレクター形状と放電室内分子分布の最適化等が重要であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Air breathing ion engine (ABIE) was experimentally investigated by the laser-detonation atomic beam source which enables to reproduce 8 km/s atomic oxygen (AO) flow in low earth orbit. Electron cyclotron resonance (ECR) microwave plasma was successfully generated by 8 km/s AO and N₂ flow. This is the world's first demonstration of ABIE operation in a simulated space environment by a ground-based facility. The maximum thrust of 0.12 mN was measured. On the other hand, computational simulation of microwave discharge in ABIE suggested the importance of the mesh locations in the discharge chamber which reflects the microwave power while incoming neutrals are transmitted. It was also suggested that the design of the reflectors in the air-inlet of ABIE is essential to increase the molecular density near the microwave antenna where many ions are generated. A physics of the hyperthermal molecular scattering at the solid surface needs to be considered in a future ABIE/RABIE work.

研究分野：宇宙環境工学

キーワード：大気吸入型電気推進 超低軌道衛星 宇宙環境利用 低地球軌道 イオンエンジン

1. 研究開始当初の背景

宇宙機が慣性のみで地球周回軌道を維持できる最低高度は約150 kmであるが、それ以下の低軌道で長期間運用できる宇宙機があれば、航空機と宇宙機の間高度領域での新たな宇宙利用の道が開ける。このような高度域を周回する宇宙機には大気抵抗を補償するための推進器が必須であるが、衛星が小型化すれば寸法の2乗に比例して減少する大気抵抗に対し、燃料携行量は寸法の3乗に比例して減少するため、その動作時間は極めて短いものになると試算される。したがって、将来の超低軌道ナノサテライトには燃料の携行を必要としないエンジンの開発が不可欠である。

上記の要求を満たしうる新しい概念のイオンエンジンとして、ISAS/JAXAの西山によって大気吸入イオンエンジン(Air Breathing Ion Engine; ABIE)のコンセプトが提案されている。ABIEは地球高層大気の主成分である原子状酸素を吸入してECRプラズマが維持できる圧力まで圧縮し、ECR励起酸素プラズマから酸素イオンを引き出して推力を得るイオンエンジンである。本方式では作動ガスの携行が不要であるという大きな特徴を有し、またABIEの推力は大気密度に比例するため、大気抵抗を補償するシステムとしては理想的である。

ABIEは現在そのコンセプトが示されているのみであり、その実現可能性を評価するにはコンポーネントレベルでの地上実験による性能見積りが必要である。しかし、低軌道における中性ガス環境を地上で再現することは困難で、ABIE実現の足かせとなっている。申請者は長年にわたり、低軌道における材料劣化現象を研究しており、そのための実験装置として高出力レーザーを用いて中性ガス分子を宇宙機の軌道速度と同じ8km/sまで加速する技術を有している。本手法は地上においてABIEへの分子流入を模擬できる可能性のある唯一の方法であるが、軌道上中性ガス環境を完全に再現できるわけではないので、その利点と限界を明らかにすることが必要である。

2. 研究の目的

超低軌道の大気を推進剤とする日本オリジナルのアイデアであるABIEについて、ABIEへの分子流入速度を地上で再現できるレーザーデトネーション法を用いた実験的研究方法を確立する。あわせて、排気イオンの質量数増加による推力増強法として、反応室内で原子状酸素の化学反応を積極的に利用する反応型大気吸入イオンエンジン(Reactive Air Breathing Ion Engine, RABIE)コンセプト等について、その実現可能性を探ることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では神戸大学に設置されているレー



Fig. 1 Photograph of the prototype of ABIE used in this experiment.

ザーデトネーション型原子状酸素発生装置を用いて、マイクロ波プラズマ型 ABIE 試作機の実験的評価を行う方法論を確立するため、ABIE 試作機的设计・製作とパルスビームに対応したプラズマ過渡特性計測系の整備を行ない ABIE システムの成立条件や性能見積りに対する不確定性等についての実験的検討を行なう。さらに、実験と並行して数値計算によりプラズマ形成に関する最適条件の探索を行ない、ABIE 反応室内部の電極配置等、プラズマ形成効率化への指針を得る。

4. 研究成果

(1) ABIE試作機的设计と製作

ABIE内に組み込むイオンエンジンとしては、ISAS/JAXAの國中・西山研究室で開発された6 cm級イオンエンジンで、はやぶさに搭載された $\mu 10$ のプロトタイプとなった $\mu 6$ を用いた。本研究では長時間の耐久性は必要ないので、グリッドとしては金属メッシュによる3枚グリッドを用いた。また、反射板の設計はhyperthermal領域の分子がリフレクターで反射され、エネルギーを失ってマイクロ波アンテナ付近に収束されるように、Hard-Cube Modelによる散乱計算コードを用いた設計を行った。本研究で使用したABIEの外観をFig.1に示す。

(2) ABIE計測系の整備

本実験に用いる原子状酸素発生装置 (Fig.2) は8 km/sという軌道上におけるABIEへの原子

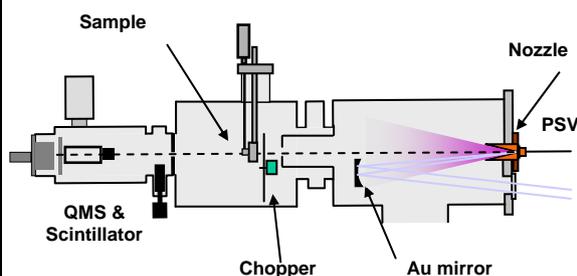


Fig. 2 Schematics of the laser-detonation atomic beam source.

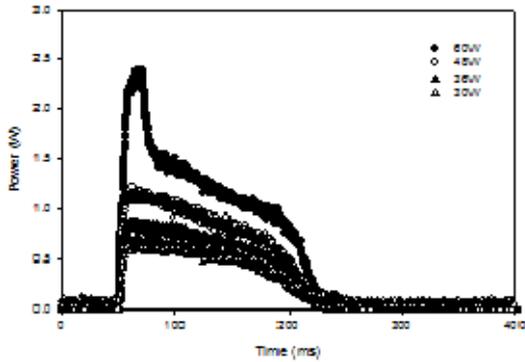


Fig. 3 Change in reflection power of 4.2 GHz microwave in an N_2 beam pulse.

状酸素の流入速度を再現できる反面、パルス動作でありABIE内部で圧力変動が生じる。マイクロ波型ABIEではプラズマ状態が変動すればマッチングがずれエネルギーロス（加熱）が発生する。この点からはパルスビームではなく連続ビームが適しているが、現在の技術では8 km/sの流速の原子状酸素連続流を形成することができないという問題がある。そこで本研究では単発の原子状酸素パルスでの計測を可能とする計測系を構成した。具体的にはパルスアンプとデジタルオシロの組み合わせによる高応答微小電流計測システムである。これによりマイクロ秒の時間オーダーで流入する原子状酸素パルスで発生するプラズマ過渡特性を測定し、ABIEの放電特性を評価できるシステムを構築した。

(3) ABIE 実験結果と考察

$\mu 6$ マイクロ波イオン源と $L=20$ mmのコリメーターをABIEに取り付け、プラズマ発生を確認を行った。 N_2 ガス背圧0.2 MPa、PSV電圧1 kV、レーザー出力7.0 J/pulseの条件において、約5.8 km/s N_2 ビーム（パルス幅約0.5 ms）を発生させ、マイクロ波出力を増加させたところ、マイクロ波入力30~60 Wにおいて N_2 プラズマの生成を確認した。マイクロ波反射波の時

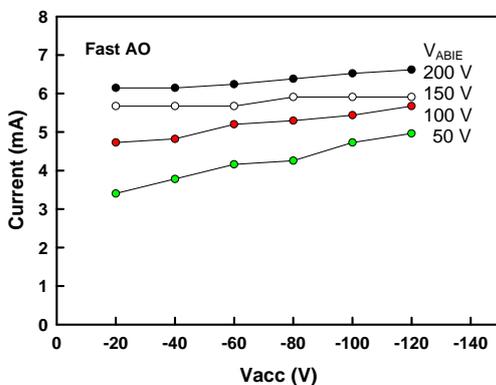


Fig. 4 Discharge current as a function of acceleration voltage. V_{ABIE} : bias voltage, Power: 12W.

間変化よりプラズマ持続時間を推定した。入力パワーによる反射波の変化をFig.3に示す。Fig.3よりプラズマが安定して持続する時間は入力マイクロ波電力には大きく依存せず、125~150 ms程度と推定された。これを圧力測定結果と比較すると、プラズマの持続時間はエンジン内部圧力が 10^{-4} Torr以上を維持している時間とほぼ対応していることが明らかとなり、通常のXe推進剤を使用した場合とほぼ同じであることが示された。このことは、大気吸入口から流入した原子状酸素や N_2 分子は、ABIE後部のリフレクターで反射された際にほぼ並進エネルギーを失い、放電室内で電子と衝突する際には相対流入速度の効果を失った状態であると推定される。このことは、5 km/sの二酸化炭素が固体表面での1回のバウンドで90%程度の並進エネルギーを失うとするMintonらの実験結果とも一致する。

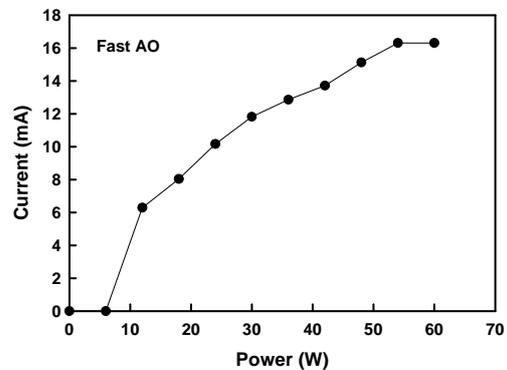


Fig. 5 Change in ion current as a function of microwave power. $V_{ABIE}=200V$, $V_{ACC}=-100V$.

ABIEでの推力特性を把握するため、試作ABIEの排気口に3枚グリッドシステム（Al製メッシュ $\phi 3$ mm、開口率33%）を取り付け、イオン電流を計測した。 O_2 ガスの背圧0.2 MPa、PSV電圧1kV、レーザー出力6.9 J/pulseで約6 km/sの原子状酸素ビームを生成し、ABIEへ36 Wのマイクロ波を入力することで酸素プラズマを発生させた。ABIE本体へ印加したバイアス電圧(V_{ABIE})を変化させた場合のイオン電流値(I_{ABIE})を加速電圧(V_{ACC})の関数としてFig.4に示す。約6 km/sの原子状酸素ビームの場合でも0.8 km/sの酸素分子の場合でも（データ非掲載）、加速電圧 V_{ACC} が大きくなるとイオン電流 I_{ABIE} も増大する傾向が観察された。バイアス電圧 V_{ABIE} が大きい場合(+200 V)では加速電圧依存性は小さくなる。バイアス電圧 V_{ABIE} を+200 V、加速電圧 V_{ACC} を-100 Vに設定した場合の、放電電流 I_{ABIE} のマイクロ波パワー依存性をFig.5に示す。これらのデータからABIE推力は120 μN と計算された。

以上のように、ABIE 試作機と原子状酸素ビームパルスを用いた実験を行った結果、リフレクターで反射された原子状酸素により放電室内の瞬間的な圧力上昇が確認され、プラズマ点火も確認された。これは世界初となる高速原子状酸素流によるマイクロ波プラズマ点火実証である。しかしながら、反射マイクロ波によるコネクタの焼損を抑制することが困難であることから、実験上、DCプラズマ適用の必要性、さらに ABIE の実用化にはエアインレットの設計が極めて重要であること等が示唆された。さらにプラズマ形成におけるガス組成の影響は ABIE の運用が期待される超低高度域での複雑な高層大気組成の観点からも、今後、考察が必要であること示唆された。

(4) シミュレーション結果と考察

前述の ABIE 試作機モデル (Fig.1) を元に EMSES を用いたプラズマシミュレーションを行った。本計算では放電室内部でのプラズマ生成効率を向上させることを目的に、金属メッシュを導入した場合のシミュレーション解析を実施した。シミュレーション空間は 1 辺 108 グリッド(108 mm)の立方体として定義した。アンテナはシミュレーション空間の $(x, y, z) = (54, 32, 54)$ において y 方向に定義し、波長 $\lambda=70$ mm、周波数 $f=4.25$ GHz のマイクロ波を発振する。磁場配置は、1.7 T の磁束密度を持つ 24 個の磁石をシミュレーション空間の $(x, y, z) = (54, 32, 54)$ を中心として xz 平面に半径 $r = 7, 15$ mm を持つ円の円周上に等間隔に配置した。金属メッシュの円筒は、電子・イオンは反射せずにマイクロ波のみを反射する境界として、高さ 20 mm ($y=17\sim 27$)、 $(x, z)=(54, 54)$ を中心とする半径 R の位置に定義した。金属メッシュの効果を検証するため、金属メッシュ無し、金属メッシュ有り ($R=10, 20$ mm) の 3 通りのシミュレーションを行った。Fig.6 に 3 つの条件での累積イオン生成数の時間変化を示す。R=20 mm の金属メッシュを導入した場合にはメッシュ無しに比べて

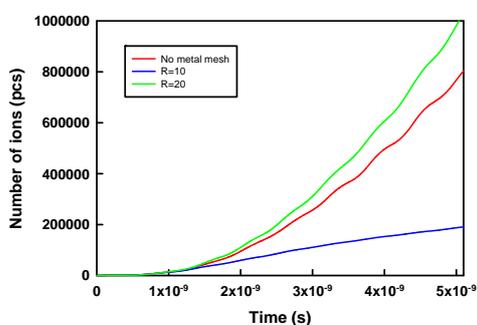


Fig. 6 Number of generated ions with time. Red: without metal mesh, Blue: with metal mesh reflector at R=10 mm and Green: with metal mesh reflector at 20 mm

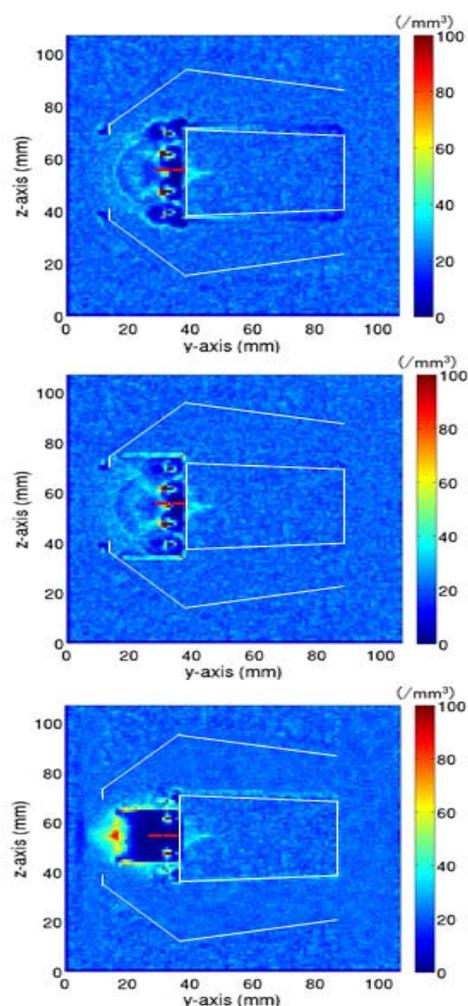


Fig. 7 Electron density distributions in the discharge chamber with various mesh configurations. Top panel: without mesh, middle panel: mesh with R= 20 mm, and bottom panel: mesh with R= 10 mm.

イオン生成効率の改善を確認することができたが、R=10 mm の場合においてはイオン生成効率が逆に低下する傾向が示された。その原因を明らかにするため、各条件で $t=1.2 \times 10^{-9}$ s、 $x=54$ mm の yz 平面上における電子密度分布を可視化した。その結果を Fig.7 に示す。R=10 mm の金属メッシュを導入した場合には、金属メッシュの内側領域では電子がほとんど存在していない。これはアンテナから放出されるマイクロ波がアンテナ近傍の電子をメッシュ外へと移動させてしまったためと考えられ、この低い電子密度がイオン生成量抑制の原因であると推定された。一方、R=20 mm の場合には放電室に設置したメッシュ内のアンテナから離れた ECR 層において電子が集積している様子が示されている。R=20 mm の場合ではマイクロ波がメッシュ境界で反射し、金属メッシュ内側の放電室内においてマイクロ波の干渉により電磁場エネルギーが高くなり、メッシュ無しの場合に

比べてイオン生成数が増大したものと考えられる。

実際のイオンエンジンとして採用実績のあるマイクロ波の周波数帯は、2.45~4.5 GHzであり波長は約 12~6.7 cm である。本研究室で ABIE 試作機に用いたイオンエンジンは 6 cm 級のサイズであり、放電室内においてマイクロ波を十分に利用するためには、放電室内にメッシュ反射板を導入し、マイクロ波を効率的に利用する最適条件を設定することが必要である。また流入分子を放電室へ導くリフレクター形状を最適化することにより、放電室内における中性ガス分子密度を ECR 領域で最大化することも重要である。この場合、中性ガス分子の固体表面での反射・散乱現象は複雑であることから、リフレクター表面へのエネルギー移動効果、拡散効果、多重衝突効果等を考慮した物理モデルによる放電室内中性ガス分子密度分布の最適化・最大化が高効率 ABIE 設計には重要であると示唆された。また RABIE を実現するには高エネルギーで原子状酸素が衝突・反応するリフレクター表面を炭素材料とすることが肝要であるが、その場合の反応生成物である CO, CO₂ の脱離プロセスとしては Langmuir-Hinshelwood と Eley-Rideal mechanism の両方を加味することが必要になる。これらの数値計算による知見を合わせて ABIE/RABIE のリフレクター設計を継続的に改良する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① Kumiko Yokota, Daiki Watanabe, Junki Ohira, Masahito Tagawa, Multiple-composition hyperthermal atomic beams formed by a laser-induced plasma for planetary environmental studies, *Physica Scripta*, 査読有, Vol.T161 (2014) 013035.
DOI: 10.1088/0031-8949/2014/T161/014035
- ② Masahito Tagawa, Kazutaka Nishiyama, Kumiko Yokota, Yasuo Yoshizawa, Daisaku Yamamoto, Takaho Tsuboi, Hitoshi Kuninaka, Experimental Study on Air Breathing Ion Engine using Laser Detonation Beam Source, 査読有, *J. Propulsion and Power*, Vol.29 (2013) 501-506.

〔学会発表〕(計 17 件)

- ① 川口伸一郎, 臼井英之, 三宅洋平, 安河内翼, 横田久美子, 田川雅人, 3次元PICシミュレーションを用いた大気吸入型イオンエンジン放電室内におけるプラズマ生成解析, 第11回宇宙環境シンポジウム, 2014年12月10日-12月11日、大阪府立大学(大阪)

- ② 大平淳貴, 横田久美子, 田川雅人, 超低地球軌道環境シミュレーションのための Ar・O₂ 混合プラズマの分光評価、真空に関する連合講演会、2014年11月18日-11月20日、大阪府立大学(大阪)

- ③ 川口伸一郎, 臼井英之, 三宅洋平, 安河内翼, 横田久美子, 田川雅人, 3次元粒子シミュレーションを用いた大気吸入型イオンエンジン開発のための ECR プラズマ解析, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014年11月12日-11月14日、ブリックホール(長崎)

- ④ 久本泰慶, 西山和孝, 田川雅人, 國中均, 定常動作型原子状酸素源の開発とビーム性能評価、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014.03.17、青山学院大学(神奈川)

- ⑤ 川口伸一郎, 臼井英之, 三宅洋平, 本山貴仁, 横田久美子, 田川雅人, 大気吸入型イオンエンジン内のプラズマ生成に関する粒子シミュレーション、平成 25 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 2014年3月12-13日、京都大学(宇治)

- ⑥ 久本泰慶, 西山和孝, 田川雅人, 國中均, ECR プラズマ源を用いた中性粒子ビームのエネルギー特性、平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 2014年1月16日、宇宙科学研究所(神奈川)

- ⑦ 本山貴仁, 臼井英之, 三宅洋平, 川口伸一郎, 横田久美子, 田川雅人, 大気吸入型イオンエンジン放電室内におけるプラズマ生成シミュレーション、第 10 回宇宙環境シンポジウム, 2013年12月2-3日、科学技術館(東京)

- ⑧ Takahito Motoyama, Hideyuki Usui, Yohei Miyake, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, Microwave plasma simulation for the development of air breathing ion engine, The 29th International Space Technology and Sciences, Nagoya International Convention Center (Nagoya), June 2-9, 2013

〔図書〕(計 2 件)

- ① M. Tagawa et al., Springer, Protection of Materials and Structures in a Space Environment, Springer, 2013, 617 (159-164, 531-540, 547-556, 577-596).

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

<http://www.space-environmental-effect.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田川 雅人 (TAGAWA Masahito)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10216806

(2)研究分担者

横田 久美子 (YOKOTA Kumiko)
神戸大学・大学院工学研究科・助手
研究者番号：20252794

(3)連携研究者

西山 和孝 (NISHIYAMA Kazutaka)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
准教授
研究者番号：60342622

臼井 英之 (USUI Hideyuki)
神戸大学・大学院システム情報学研究科・
教授
研究者番号：10243081