

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14252

研究課題名(和文) 計算機援用による大気吸入型イオンエンジン用エアインテイクの試作と実験的評価

研究課題名(英文) Computer-aided evaluation of air-intake systems on air breathing ion engine and its experimental verifications

研究代表者

田川 雅人 (TAGAWA, Masahito)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10216806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は超低軌道における高層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、その最重要技術であるインテイクの設計指針について数値計算を援用して明らかにするとともに、地上試験装置で実験的評価を行う方法を確立し、大気吸入型スラスターシステム全般のインテイク設計に対する指針を得ることを目的とするものである。モンテカルロ法による粒子追跡とプラズマシミュレーションの結果、放電室内の中性ガス分布を考慮した放電室設計を行うことでイオン生成を大幅に効率化できることが明らかになった。また、地上実験装置のパルスビームを用いてABIE軌道上性能の推定を行う方法を確立することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to establish the design guideline of the air intake system for air breathing ion engine (ABIE) both by numerical simulations and experiments. The results of DSMC simulations show that the density of the reflected molecules are concentrated near the center axis of the ABIE. Plasma simulation performed by computational code (EMSES) indicated that the production of the ions in the ABIE increased 5 times by tuning the ABIE design. The experiments using 25% scale ABIE model was carried out. The pressure in the ABIE was measured by the fast ionization gauge. An evaluation method of air intake of ABIE in the orbit (continuous atomic oxygen flow) was successfully established based on the ground-based experiment using beam pulses formed in the laser-detonation beam source.

研究分野：宇宙環境工学

キーワード：電気推進 超低軌道宇宙環境 原子状酸素 大気吸入イオンエンジン

### 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、それ以下の高度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。さらに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型イオンエンジン(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・圧縮し、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。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。しかしながら、低軌道における中性ガス環境を地上で正確に再現することは極めて困難で、ABIE実現の足かせとなっている。

### 2. 研究の目的

超低軌道における高層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、その最重要技術と目されるインテイク技術に的を絞り、その設計指針について数値計算(プラズマおよび分子流)を援用して明らかにする。さらに実際に試作したインテイクを、地上試験装置で利用可能なパルスビームを用いて実験的評価を行う方法を確認し、ABIEをはじめとする大気吸入型スターシステム全般の実現に向けての技術的最難関であるインテイク設計に指針を得ることを目的としている。

### 3. 研究の方法

数値計算については、高効率ABIEインテイクシステムを構築するため、hypersonic領域の分子をプラズマ発生領域に収束するために拡散反射モデルを仮定したモンテカルロシミュレーション(DSMC)を実施し、



図1 レーザードットネーション装置

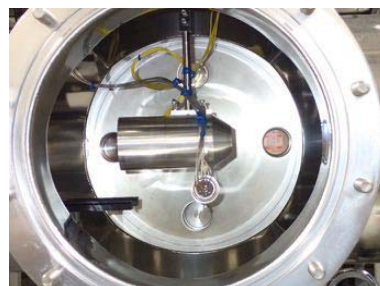


図2 1/4 ABIE モデル

分子の粒子追跡・放電室内の分子密度計算を行った。さらに放電室内の分子密度分布を考慮して数値シミュレーションコードEMSESを用いたプラズマ計算を行い、放電室内部でのイオン生成効率の増大を目指した。

計算結果を実験的に証明するために、神戸大学に現有のレーザードットネーション装置(図1)と1/4 ABIEモデル(図2)を用いた実験を試みた。分子密度の計測は自作の高速電離真空計システムにより行った。本実験に用いるレーザードットネーション装置は8 km/sという軌道上におけるABIEへの原子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。現在の技術では8 km/sの連続原子状酸素ビームを形成することができないため、単発の原子状酸素パルスを用いて、軌道上でのインテイク性能を評価する手法の開発を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 数値計算とその検証

図3にDSMCで用いた2つのモデル形状を示す。図3(a)は西山によるABIE形状で、(b)は拡散反射を有効利用するためにインレット部にコーンを追加したモデルである。DSMC計算の結果からは電離真空計付近での粒子数はグリッドあたり(a)では7104個、(b)では6249個となり、(b)よりも(a)の形状の

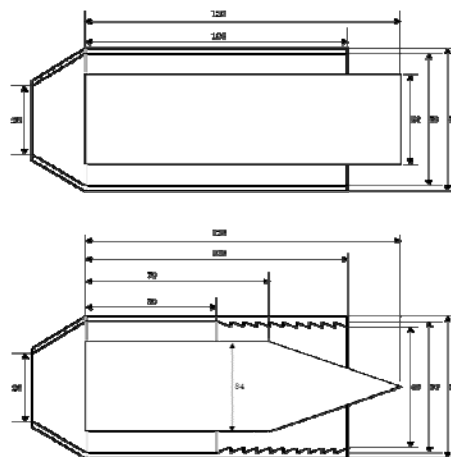


図3 ABIE計算モデル (a): フラットインレット (b): コーンインレット

方が有利であるという結果になった。

これらの計算結果を実験的に検証するために、神戸大学に現有のレーザーデトネーション装置を用いた実験を試みた。1/4 縮小モデルを設計・作製し、小型電離真空計を組み込んだ実験システムを構築し、700m/s の Ar 分子パルスを用いた実験を行った。その結果、電離真空計で測定された圧力はモデル(a)で 0.0143 Pa、モデル(b)では 0.00915 Pa となりモデル(a)で分子密度が高くなるという結果が得られた。すなわち分子流領域ではコーンの効果は認められないという結果が得られた。また、放電室内の分子の密度分布に関しては図4に示すように中心軸付近の分子密度が高くなることが確認されたことから、中心軸付近での電子密度を大きくする電極・磁石配置が重要であることが確認された。計算結果と実験結果が定性的に一致することから、本研究で開発した DSMC コードの妥当性が示された。

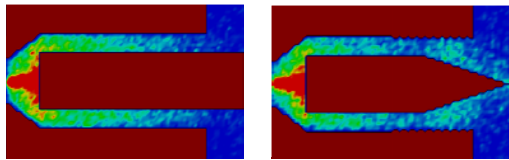


図4 放電室内の相対分子密度分布

本計算で得られた放電室内分子密度分布をベースに EMSES を用いたマイクロ波計算を行った。その結果を図5に示す。右図がモンテカルロ計算に準拠した非一様分布を使用した場合のイオン密度分布である。左図の一様分布ではイオン生成位置が広く分布しているのに対し、右図では中性粒子密度が高い場所においてイオン分布が非常に高くなっていることが判る。シミュレーション空間全体ではイオン数に約5倍の差があることから、放電室内の分子密度分布を考慮して放電室の電極配置を決定することが極めて重要であることが示された。

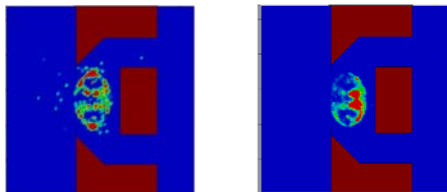


図5 放電室内のイオン密度分布  
左：一様分布、右：非一様分布

## (2) パルスビーム実験結果の解析法

本研究における実験は全てパルスビームで行っているが、軌道上では連続流となる。パルスビームによる地上実験結果から連続流での ABIE 圧縮性能を推定する手法を確立



図6 ビーム実験時の電離真空計の圧力変動  
緑：ABIE 外、青：ABIE 放電室内

する必要がある。図6は地上でビーム実験を行った際の電離真空計の圧力変動を示したデータである。緑が ABIE 外、青が ABIE 内の圧力変動である。ABIE 内部ではインテイクの効果で最大圧力、持続時間の両方が増大しているが、ビームパルスが OFF になると徐々に圧力が低下していく。軌道上では連続的に原子状酸素の流入が生じるので、このような圧力低下は生じない。このような実験条件の差異を考慮してインテイクによる圧縮効果を評価する必要がある。そこで、分子流領域でのコンダクタンスを仮定するとともに、ビームパルスを半値幅の矩形波と近似し、たし合わせることで、擬似的な連続流とした。解析の結果、ABIE の排気口を全閉した場合の圧縮率は約 14.8 と算出された。この値は JAXA の空力グループによる完全鏡面反射モデルによる解析結果とほぼ一致するものであった。これにより、ABIE の軌道上での圧縮性能をパルスビームの地上試験装置で評価する技術にある程度が目処が得られたとともに、DSMC 計算における表面反射モデルの設定について、今後十分な考慮が必要であることが示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

“Hyperthermal atomic oxygen beam irradiation effect on the hydrogenated Si-doped DLC film,” Kengo Kidena, Minami Endo, Hiroki Takamatsu, Ryo Imai, Masahito Niibe, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, Yuichi Furuyama, Keiji Komatsu, Hidetoshi Saitoh, Kazuhiko Kanda, Trans. Mat. Res. Soc. Japan, Vol40, No.4, (2015) pp.353-358.

“Resistance of hydrogenated Ti-containing DLC film to hyperthermal atomic oxygen”, Kengo Kidena, Minami Endo, Hiroki Takamatsu, Masahito Niibe, Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Yuichi Furuyama, Keiji Komatsu, Hidetoshi Saitoh, Kazuhiro Kanda, Metals, Vol.5, (2015) pp. 1957-1970.  
doi:10.3390/met5041957

“Soft X-ray irradiation effect on the fluorinated DLC film,” Hiroki Takamatsu, Makoto Okada,

Masahito Niibe, XiaoLong Zhou, Kenji Komatsu, Hidetoshi Saito, Hiroki Akasaka, Akihiko Saiga, Koji Tamada, Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Yuichi Furuyama, Kazuhiro Kanda, Diamond and Related Materials, Vol.79 (2017) 14-20.

[学会発表] (計 28 件)

"A pulsed supersonic valve aimed for Martian atmospheric simulation," Ryota Okura, Minoru Iwata, Chee Sze Keat, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

"A fast piezoelectric-driven pulsed supersonic valve using displacement enlargement mechanism for molecular beam applications," Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Chee Sze Keat, 16th Joint Vacuum Conference, 14th European Vacuum Conference, 2016.

"A pulsed supersonic valve system for researches on collision-induced reactive thin film etching phenomena," Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Tsubasa Yasukochi, Chee Sze Keat, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings and Interfaces, 2016.

"Effect of high-energy inert gas collisions on the atomic oxygen-induced polymer erosion", Masahito Tagawa, Kenta Ide, Yuki Yamasaki, Daiki Watanabe, Kumiko Yokota, 13th International Symposium on Materials in the Space Environment, 2015.

"Property of hyperthermal CO<sub>2</sub> beam formed by a laser-detonation facility for space environmental effect studies in upper Martian atmosphere," Masahito Tagawa, Akimine Hatsuda, Kumiko Yokota, 13<sup>th</sup> International Conference on Laser Ablation, 2015.

"Laser-detonation facility for acceleration of gaseous materials: Etching and deposition of solid materials," Kumiko Yokota, Kenta Ide, Junki Ohira, Yuki Yamazaki, Kaoru Morimoto, Hidetoshi Asada, Masahito Tagawa, 13<sup>th</sup> International Conference on Laser Ablation, 2015.

"Hyperthermal multiple component molecular/atomic beams: Formation and application to surface science on future space explorations," Tsubasa Yasukochi, Kaoru Morimoto, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, Symposium on Surface Science & Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kansai-, 2017.

"A pulsed supersonic valve aimed for Martian atmospheric simulation," Ryota Okura, Minoru Iwata, Chee Sze Keat, Kumiko Yokota, Masahito

Tagawa, 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

"Mass-loss of FEP/Ag films in sub-low Earth orbit space environment," Yusuke Fujimoto, Kazuki Kita, Yasuko Koshiba, Kenji Ishida, Minoru Iwata, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

"Accelerating effect of atomic oxygen-induced polyimide degradation due to simultaneous collision of chemically inert molecules", Kazuki Kita, Yusuke Fujimoto, Yuki Yamasaki, Minoru Iwata, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

"A consideration on surface corrosion mechanism of fluoroethylenepropylene (FEP) films in sub-low earth orbit (LEO) environment," Kumiko Yokota, Yusuke Fujimoto, Ryota Okura, Kazuki Kita, Masahito Tagawa, 33rd European Conference on Surface Science, 2017.

"Collision-induced enhancement of polyimide corrosion in sub-low Earth orbit (LEO) space environment," Masahito Tagawa, Ryota Okura, Yusuke Fujimoto, Kazuki Kita, Kumiko Yokota, 33rd European Conference on Surface Science, 2017.

"Molecular beam source for degradation studies of polyimide-based thermal blanket in very low altitude space environment," Kumiko Yokota, Ryota Okura, Chee Sze Keat, Masahito Tagawa, 21<sup>st</sup> European Thermophysical Properties Conference, 2017.

"A consideration on degradation of FEP-based radiator equipped to low altitude spacecraft," Masahito Tagawa, Yusuke Fujimoto, Kazuki Kita, Kumiko Yokota, European 21<sup>st</sup> Thermophysical Properties Conference, 2017.

"原子状酸素誘起材料劣化地上試験に関わる複合効果について"  
田川雅人, 横田久美子  
第 60 回宇宙科学技術連合講演会、2016.

"変位拡大機構を用いた高速超音速分子線バルブ"  
横田久美子, 徐世傑, 田川雅人  
第 77 回応用物理学学会秋季学術講演会, 2016.

"火星高層大気環境シミュレーションを目指した超熱混合分子ビーム形成の試み"  
横田久美子, 初田光嶺, 田川雅人  
第 37 回日本熱物性シンポジウム、2016.

"原子状酸素ビーム誘起エッチングにおける高質量原子混合効果"  
田川雅人, 山崎勇希, 横田久美子

[その他]

神戸大学大学院工学研究科における宇宙環境研究のページ <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

三宅 洋平 (MIYAKE, Yohei)  
神戸大学・大学院システム情報学研究科・准教授  
研究者番号：50547396

寺岡 有殿 (TERAOKA, Yuden)  
日本原子力研究開発機構・表面反応ダイナミクスグループ・グループリーダー  
研究者番号：10343922