

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：32511

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289302

研究課題名(和文) 地球超低軌道環境模擬のための高速原子状酸素風洞の開発

研究課題名(英文) Development of a High-Speed Atomic Oxygen Flow Tunnel for Low Earth Orbit Environment Simulation

研究代表者

荒川 義博 (ARAKAWA, Yoshihiro)

帝京平成大学・現代ライフ学部・教授

研究者番号：50134490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地球低軌道上の高速原子状酸素流を模擬するためにレーザー駆動プラズマ風洞を開発した。レーザー分光による気流診断の結果、純酸素で作動させた場合、流速と並進温度はそれぞれ6.1 km/s、1216 Kであり、流束は 1.3×10^{25} atom/m²sであった。流速を向上させるためにヘリウムをモル分率で0.23混合したところ6.6 km/sまで増加した。これよりヘリウムのモル分率を0.58で作動させれば軌道速度である7.8 km/sを得られる可能性がわかった。

研究成果の概要(英文)：A laser-driven plasma wind tunnel was developed in this study as a simulator of high-speed continuous atomic oxygen flows in the low earth orbit environment. Laser diagnostics of the plume revealed the time-averaged flow velocity and translational temperature of the flows to be 6.1 km/s and 1216 K, respectively. The flux density for pure oxygen flows was estimated as 1.3×10^{25} atom/m²s. The flow velocity could be increased to 6.6 km/s by mixing oxygen with helium at a mole fraction of 0.23. An orbital velocity of 7.8 km/s could be achieved by increasing the helium mole fraction to 0.58.

研究分野：工学

キーワード：航空宇宙流体力学 レーザー プラズマ計測

1. 研究開始当初の背景

地球低軌道環境を模擬する原子状酸素発生装置として米国 PSI で開発されたレーザーパルスデトネーション方式が ASTM での標準化の下、表面劣化の研究に広く使われている。しかしながらこの方式は原子状酸素以外の化学種の生成、広い流速分布(エネルギー幅)、真空紫外光の発生による影響があり、実際の宇宙実験との差異が報告されている。また本方式はパルス作動(作動時間<1ms)であるため、連続作動が必要な研究には不向きである。例えば超低軌道では大気抵抗が大きく、比推力の高いイオンエンジンを用いてもミッション時間が限られるため、大気吸い込み式推進機が提案されているが、これらの実証実験には連続作動できる高速原子状酸素気流が必要である。そこで ISAS/JAXA では定常イオンビームを電荷交換反応させることで高速原子状酸素を生成することを試みているが、現状では軌道速度(-5 eV)に対し 7-22 eV と速度分布が非常に大きい。また空間電荷制限則から高度 200 km 以下での流束密度(>10¹⁶ atoms/cm²s)を達成させることは原理的に困難である。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3項目である。

- (1)酸素を作動ガスとしたレーザー維持プラズマの生成と作動条件の検証
- (2)高速原子状酸素流の生成と高時間分解能レーザー吸収分光法による気流特性評価
- (3)ヘリウム混合による気流速度の向上と軌道速度達成可能性の検証

以上により、レーザー駆動プラズマ風洞を用いて地球低軌道上における高速原子状酸素気流環境を模擬できるかを検証する。

3. 研究の方法

(1)レーザー駆動プラズマ風洞作動条件

本研究で開発したレーザー駆動プラズマ風洞の概略図を図1に示す。プラズマ生成部はレーザー導入窓、作動気体導入部、圧力測定ポート、点火ロッドポート、超音速ノズル、そして真空チャンバで構成される。レーザー光は ZnSe 製のレンズによって集光され、レーザー導入窓を通される。集光されたレーザー光はまず SUS 製の点火ロッドに当てられ、初期電子を発生させプラズマを生成する。点火後はロッドを抜き出し、ステップモータでレンズを前後に動かすことでプラズマをスロートの近くまで動かす。作動ガスはこのプラズマ及びその周囲を流れることで加熱され、超音速ノズルを通して加速され高速となる。作動条件の検証はプラズマを生成した後、レーザー出力を下げていることでプラズマ消失時のレーザー出力を必要最小レーザー出力とした。またチャンバ圧力は作動ガスの流量を変えることで調整し、比較のため酸素とアルゴンの二種類の気体で実験を行った。

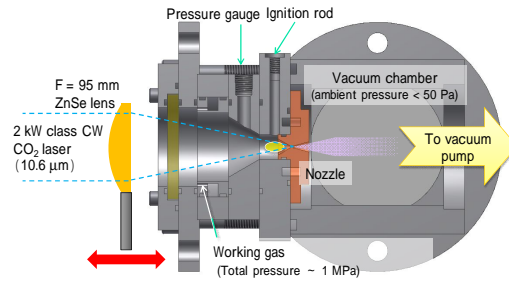


図1. レーザー駆動プラズマ風洞

(2)レーザー吸収分光法による気流評価

本研究で用いたレーザー吸収分光法の測定系の概略図を図2に示す。本システムではプローブレーザーとして最大 10 kHz での変調が可能である電流変調型 DFB 半導体レーザーを用いた。吸収ラインは酸素原子の準安定準位の吸収ライン 0I 777.19 nm を用いた。図中のアイソレーターは反射光がレーザーヘッドに戻るのを防ぐために、エタロンは相対波長計として用いた。エタロンの FSR は 0.75 GHz である。また、流速 0 の基準としてマイクロ波放電管により生成した酸素プラズマの吸収ラインを用いて絶対波長較正を行った。

プローブ光は光ファイバーとコリメートレンズを経て石英窓を通り真空チャンバ内に導入され、流速計測のために超音速プラズマ流の流れ方向に対して 5° の角度を持って通過し、真空チャンバ反対側の石英窓を出た後フォトディテクター(PD)によって検知される。過去の研究からレーザープラズマは振動していることがわかっており、プラズマからの発光振動を PD により検出することで吸収信号取得のトリガー時間を決定した。

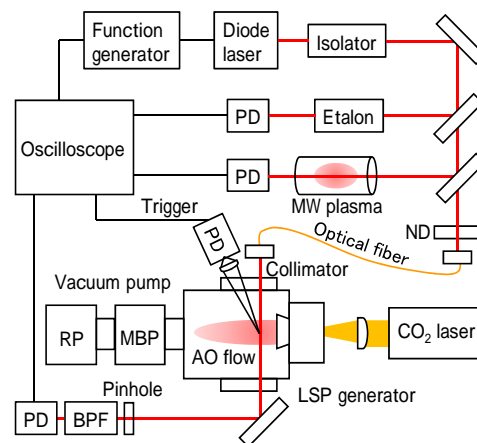


図2. レーザー吸収分光システム概略図

(3)ヘリウム混合による流速の向上

純酸素で作動させることが地球低軌道環境模擬には理想的ではあるが、軌道速度が得られなかった場合、分子量の軽いヘリウムを混合することで平均分子量を下げ、流速を向上させることを試みる。

4. 研究成果

(1) レーザー駆動プラズマ風洞作動条件

図3に純酸素および比較のためアルゴンを作動ガスとした場合のチャンバ圧力とプラズマ生成に必要な最小レーザー出力の関係を示す。図が示すとおりチャンバ圧力が高くなるにつれプラズマ維持に必要なレーザー出力は下がっている。過去の研究からレーザープラズマは電子の逆制動放射過程を用いてレーザー光を吸収すると考えられている。この結果は圧力とともに電子密度が増加するため吸収係数が増加し、より低出力でのプラズマ生成が可能になったためだと考えられる。またアルゴンの方が低いレーザー出力でプラズマを維持できるが、これはアルゴンの電離電圧が酸素より低いためだと考えられる。

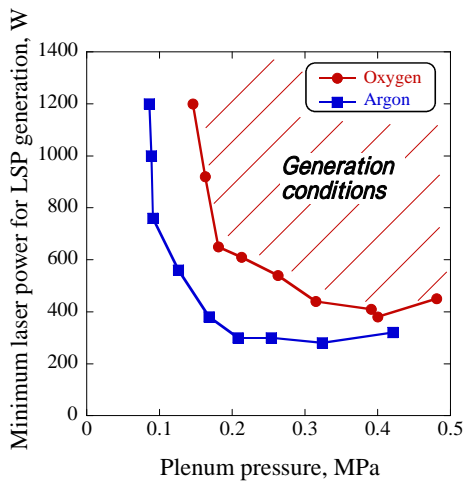


図3. 酸素及びアルゴンに対するプラズマ維持に必要な最小レーザー出力と圧力の関係

(2) レーザー吸収分光法による気流評価

図4に純酸素で作動時の気流写真を示す。気流の発光領域はプラズマをスロートに近づけるほど大きくなり、スロートに入ると消失する。本研究では移動ステージにより0.2 mmの精度で発光領域が最大になるようにプラズマ位置を決定した。

プラズマ振動の気流特性への影響

気流の発光強度は電源振動に起因し約200 Hzで振動しているため、振動の気流特性への影響を評価するために5 kHzの掃引速度で気流特性の時間履歴を測定した。測定点はノズル出口から15 mm後方の軸上である。図5に典型的な吸収信号を示す。図より風洞気流における吸収中心はマイクロ波放電管に比べシフトしていることがわかり、このシフト量から流速を推定した。

図6に発光強度と流速の時間履歴を示す。図が示すように発光強度は47%変動しているが流速の変動は数%以下である。従ってプラズマ振動の気流特性への影響は小さく、以下ではSN比が高い時間平均値を用いて気流特性を評価する。

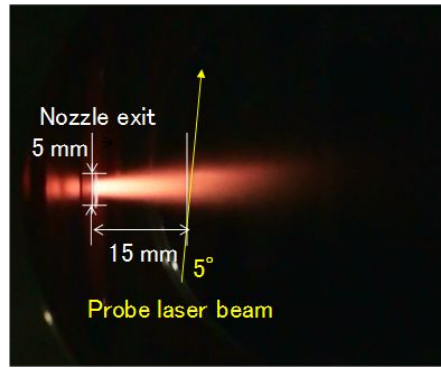


図4. 酸素作動時の気流写真

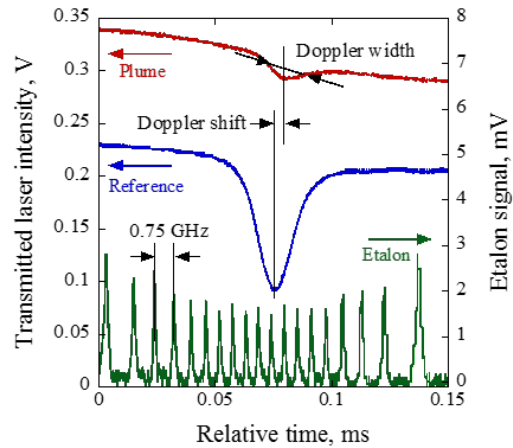


図5. 典型的な吸収信号

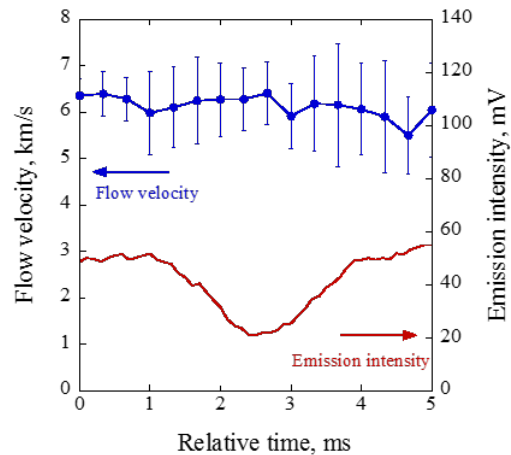


図6. 流速の時間履歴

時間平均測定による気流特性

図7にスロート直径に対する時間平均流速を示す。ここでレーザー出力は1300 Wで固定し、各スロート直径に対しレーザープラズマを維持できる最小の流量で作動させ、比エンタルピーを最大化することで流速の最大化を試みた。その結果、流速はスロート径が小さくなるに従い増加し、最大で6.1 km/sとなる。この時の並進温度は1216 Kであり、これは0.1 eVの熱エネルギーに相当し、流速に比べ十分小さい。ただし、軌道速度は7.8 km/sであり、これに達するにはこれ以上のスロート径の小型化は困難であるため、より高出力のレーザー装置が必要となる。

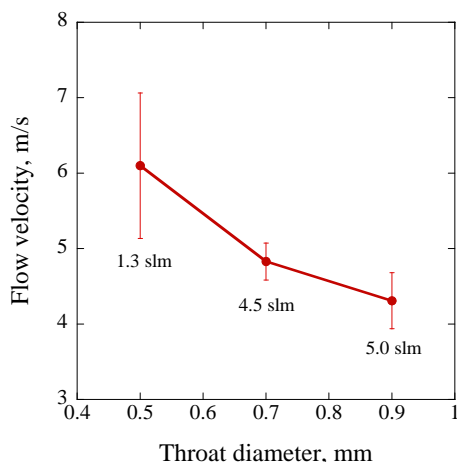


図7．流速とスロート径の関係

流束の推定

以下の手法により酸素原子流束を見積もった．プラズマ生成部は224 kPaに達しており熱化学平衡状態と考えられ，ノズル膨張時は凍結流れであると仮定するとスロート出口での温度と酸素原子のモル分率はそれぞれ11,460 K, 0.98となる．それ以外の化学組成は酸素原子イオンと電子であり，気流はほぼ完全解離状態であると考えられる．膨張後の気流中の酸素原子流束は状態方程式を用いて流速，並進温度，背圧，モル分率から推定でき， 1.0×10^{25} atoms/m²sとなった．この値は低軌道上の値より4桁以上大きい．従って軌道上で1日分の暴露環境を12 sで模擬できることが可能となる．流束を軌道上に合わせるにはより高い出力のレーザーにより作動流量を下げるかポンプの排気量を上げる必要がある．

(3)ヘリウム混合による流速の向上

現状のノズルは最適膨張ではないが，今回のノズル出口温度1216 Kを常温になるように開口比を最適化しても流速の向上は0.1 km/s程度である．従って，軌道速度に達するにはスロート出口の温度を17,000 Kまで増加させる必要がある．そこで現状の装置ではレーザー出力を上げることが困難であるので平均分子量を下げることで流速の向上を試みた．スロート出口での温度を一定と仮定すると流速は平均分子量の平方根の逆数に比例する．従って分子量が低いヘリウムを混合することで流速増加させることを実験的に検証した．

図8にヘリウムモル分率に対する流速及び理論値を示す．図が示すように流速はヘリウムのモル分率を上げるとともに増加し，モル分率0.23で流速6.6 km/sであった．この結果は理論予測とよく一致する．ヘリウムは電離電圧が高く，現状のレーザー出力ではこれ以上のモル分率でレーザープラズマを維持できることができなかったが，混合率を0.58まで上げられると軌道速度に達することができると考えられる．

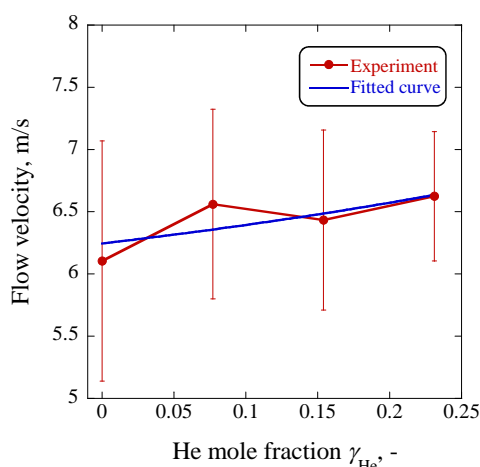


図8．ヘリウム混合率と流速の関係

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

Sano, S., Soga, R., Maximilian, F., Komurasaki, K., Koizumi, H., and Kobayashi, T., "Alumina Reduction by Laser Ablation and Laser Plasma," Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Vol.25, 2016, pp.57. (査読有)

アクセスサイトなし

Matsui, M., Yoneda, S., Komurasaki, K., Yamagiwa, Y., and Arakawa, Y., "Atomic-oxygen-flow Generation by Laser-driven Plasma Wind Tunnel as Low-earth-orbit Environment Simulator," *AIAA Journal*, Vol.52, No.8, 2014, pp.1806-1810. (査読有)
<http://dx.doi.org/10.2514/1.J052991>

[学会発表](計17件)

Komurasaki, K., "Alumina Reduction by Laser Ablation and Laser Plasma," 23rd IAPS International Workshop, バンコク(タイ), Mar. 11-14, 2016.

Matsui, M., and Nakajima, D., "Spatial Resolution of Combined Wavelength Modulation Spectroscopy with Integrated Cavity Output Spectroscopy for Atomic Oxygen Detection," 9th International Conference on Reactive Plasma, ホノルル(米国), Oct. 12-15, 2015.

Matsui, M., and Morita, R., "High Sensitive Laser Absorption Spectroscopy for Number Density Measurement of Atomic Oxygen in Atmospheric Pressure Plasma," 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe Convention Center (兵庫県・神戸市),

Jul. 4-10, 2015.

Sato, Y., Matsui, M., Nakano, M., Komurasaki, K., Arakawa, Y., Goto, T. and Shirakata, H., "Collection Efficiency Measurement of Reduced Aluminum Using Laser Sustained Plasma," 8th International Workshop on Hybrid Functionally Materials, ホノルル(米国), March 6-9, 2015.

Morita, R., and Matsui, M., "The Number Density of Ground State Atomic Oxygen Measurement by High Sensitive Laser Absorption Spectroscopy using Forbidden Line OI 630nm," 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, フロリダ(米国), Jan.5-9, 2015.

佐藤裕亮, 松井信, 中野正勝, 小紫公也, 荒川義博, 後藤徹也, 白形弘文, "レーザー維持プラズマを利用したレゴリス還元における粉体供給量と還元量の評価," 日本航空宇宙学会第 51 回中部・関西支部合同秋期大会, 名城大学(愛知県・名古屋市), 2014 年 11 月 21 日.

Fukuji, N., Matsui, M., Nakano, M., Yamagiwa, Y., Komurasaki, K., Arakawa, Y., Goto, T., and Shirakata, H., "Influence of Plasma Position on Reduction Efficiency of Alumina," 7th International Workshop on Hybrid Functionally Materials, 香港(中国), March 7-11, 2014.

福路直大, 松井信, 中野正勝, 山極芳樹, 小紫公也, 荒川義博, 白形弘文, 後藤徹也, "レーザープラズマによるアルミナ還元法における二焦点レンズを用いたプラズマ領域拡大による還元効率向上の検討", 応用物理学会 SC 東海地区学術講演会 2013, 名古屋大学(愛知県・名古屋市), 2013 年 11 月 16 日.
福路直大, 松井信, 中野正勝, 山極芳樹, 小紫公也, 荒川義博, 白形弘文, 後藤徹也, "レーザープラズマを用いたアルミナ還元におけるプラズマ振動及び F 値の影響", 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 米子コンベンションセンター(鳥取県・米子市), 2013 年 10 月 9-11 日.

Fukuji, N., Matsui, M., Nakano, M., Yamagiwa, Y., Komurasaki, K., Arakawa, Y., Goto, T., Shirakata, H., "Influence of Laser Sustained Plasma Oscillation on Reduction Efficiency of Alumina," 9th International Symposium on Applied Plasma Science, イスタンブール(トルコ), July 22-26, 2013.

福路直大, 松井信, 中野正勝, 山極芳樹, 小紫公也, 荒川義博, 白形弘文, 後藤徹也, "プラズマ風洞を用いた還元法の酸化物供給法による還元効率への影響", 第 45 回流体力学講演会, "プラズマ風洞を用いた還元法の酸化物供給法による還元効率への影響", 第 45 回流体力学講演会, タワーホール船堀

(東京都・江戸川区), 2013 年 7 月 4-5 日.

[その他]

ホームページ等

<http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/index.htm>

|

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tmatui/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒川 義博 (ARAKAWA, Yoshihiro)

帝京平成大学・現代ライフ学部・教授

研究者番号: 50134490

(2) 研究分担者

小紫 公也 (KOMURASAKI, Kimiya)

東京大学・工学系研究科・教授

研究者番号: 90242825

(3) 研究分担者

松井 信 (MATSUI, Makoto)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 90547100