

補助事業番号 28-134
補助事業名 平成28年度 レーザーを利用した次世代宇宙ロケットの基礎技術研究
補助事業
補助事業者名 筑波大学システム情報系 嶋村耕平

1 研究の概要

本研究では、レーザーを用いた次世代宇宙ロケットのエンジンサイクル最適化を目標に、エネルギー変換過程の解明やその圧力依存性を明らかにする。本研究を通じレーザー推進器の新たな設計指針を提唱したい。

2 研究の目的と背景

昨今の地球温暖化対策や脱化石燃料に向けて電気自動車の普及や電車の再評価などが進んでいるが、航空機や宇宙機は高エネルギー密度を要するため電気駆動への移行が困難で、多量の燃料を携帯せざるを得ない。移動距離とペイロード比（初期重量に対する貨物重量）はトレードオフの関係にあり、この制約は打ち上げロケットにおいて最も顕著で、静止衛星軌道への打ち上げには1%程度のペイロード比しか実現できない。レーザー推進は、地上または宇宙からレーザーで推進エネルギーを外部から供給するシステムである。特に地上打上げでは、燃料や電源を搭載する必要がないことがこのシステムの特徴である。推進器作動は、レーザーパルスの繰返発振周波数と同期され、単位時間当に発生する力積、その時間平均が推力となる。推進器はレーザーを圧力波に変換することで推力を得る。このため空気を燃料として利用することが可能となる。大気中で空気を推進剤として利用し、推進剤の必要な量を、従来の化学ロケットに比べて大幅に減らせるため、高ペイロード比が見込める。

2000年に米陸軍の高出力炭酸ガスレーザーを利用し行われた打上実験が先駆けとなり、その後世界各国で打上デモが競われる一方で、推進器設計指針に関する基礎研究は乏しいのが現状である。そこで申請者は、推力生成の物理的構造とその維持条件について詳細な実験的研究を行い、その内部構造を明らかにしつつ、推進器内の衝撃波の伝播特性や、エネルギー変換構造を調べ、レーザー推進器の設計指針となりうる検証を行ってきた。本研究では、従来申請者が取り組んできたプラズマ診断技術をレーザー推進器に適用し、推進器内での推力生成メカニズムを明らかにしたい。

3 研究内容

レーザーを利用した次世代宇宙ロケットの基礎技術研究

(<http://wpp.kz.tsukuba.ac.jp/JKA2016.html>)

(1) プラズマ診断による推力解明

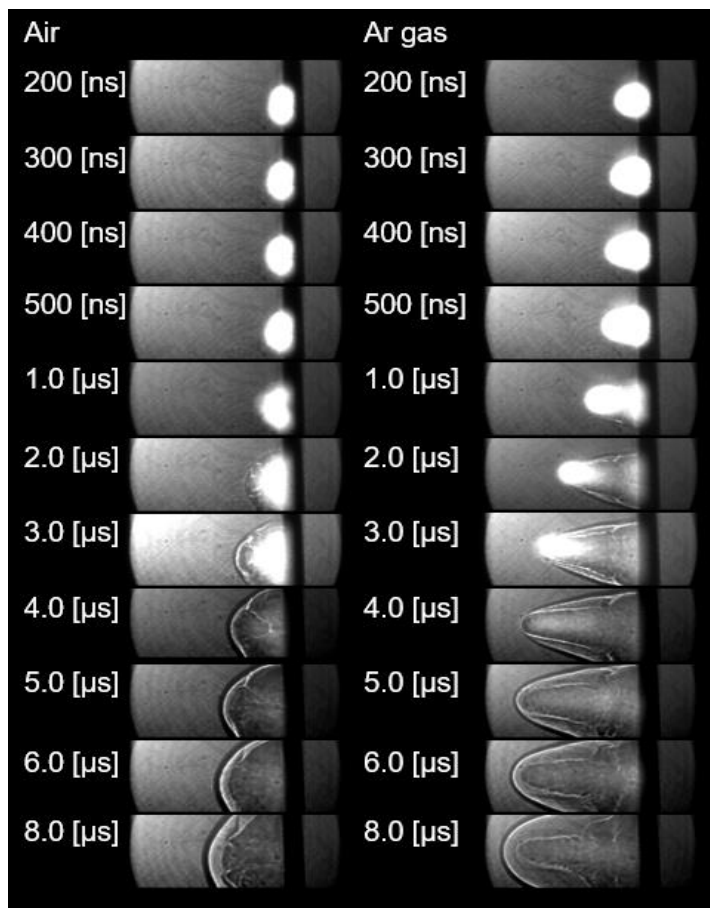


図 1

推進器におけるプラズマから衝撃波へのエネルギー変換という観点では絶縁破壊からLSDWに至るまでの物理過程が重要である。レーザー誘起プラズマと衝撃波の伝播は燃焼デトネーション波と同じChapman-Jouguet (CJ) 条件に一致することが知られている。弾丸など燃焼波に外力が与えられることで、Overdriven detonationと呼ばれるエネルギー的に安定なCJ条件よりも伝播速度が速いモードで伝播する。レーザープラズマでは、プラズマ輻射による光電離が起因となり電子雪崩を誘起することでCJ条件よりも速い速度で伝播することができる。レイリー線とユゴニオ曲線の交点として得られるデトネーション状態は、燃焼波では強い解が、レーザープラズマでは弱い解にそれぞれ一致する。状態遷移の研究についてOverdriven detonation からCJ状態への遷移、LSDWからLSCWについてそれぞれ報告されている。LSDWからLSCWへの遷移はレーザー照射径とレーザー強度の積がある一定の値になること

が知られている。一方でOverdriven状態からCJ状態への遷移は研究例が乏しい。Fisherは平衡状態の電子密度のレート方程式からレーザー強度から見積もりを与えている。ここで用いられているプラズマの温度や密度は現在プラズマ分光計測によって知られている条件とかけ離れている。またWeak-overdriven detonation (WOD) 状態でのレーザープラズマの伝播について様々な実験条件での研究がなされているが、一次元のストリーク発光など限定的な情報しか得られていない。OverdrivenやCJ状態での実験結果はそれぞれあるものの絶縁破壊からLSCWまでの状態遷移の観点での可視化実験は行われていない。

本研究ではOverdriven状態からCJ状態への遷移を高速度カメラ（図1）、プラズマ発光分光計測、および数値計算シミュレーションで詳細に観察した。この結果と過去の異なる波長、雰囲気ガスでの結果と比較して状態遷移の閾値を実験的に求めた。電子のレート方程式の観点から閾値における物理条件を明らかにした。W0状態からCJ状態への遷移はLSDWの閾値同様に照射径と照射強度の積を利用して評価できる。空気においてこの値はおおよそ1となりアルゴンでは1/10となり、レーザー波長によらず、ガス種の違いに依存する。またW0からCJへの遷移時は光電離と電子拡散によって生成される電離の増加率はおおよそ1となり、W0状態とCJ状態でプラズマの状態や輻射メカニズムが異なるが、プラズマ輻射による光電離によって電離波面の進展速度は決定される。このように原子分子の電離メカニズムがW0状態の構造やモード遷移に寄与していることが明らかになった。本研究成果は米国物理学協会(AIP)「Applied Physics Letter」に論文として公開された。

(2) 高高度を模擬した推力の検証

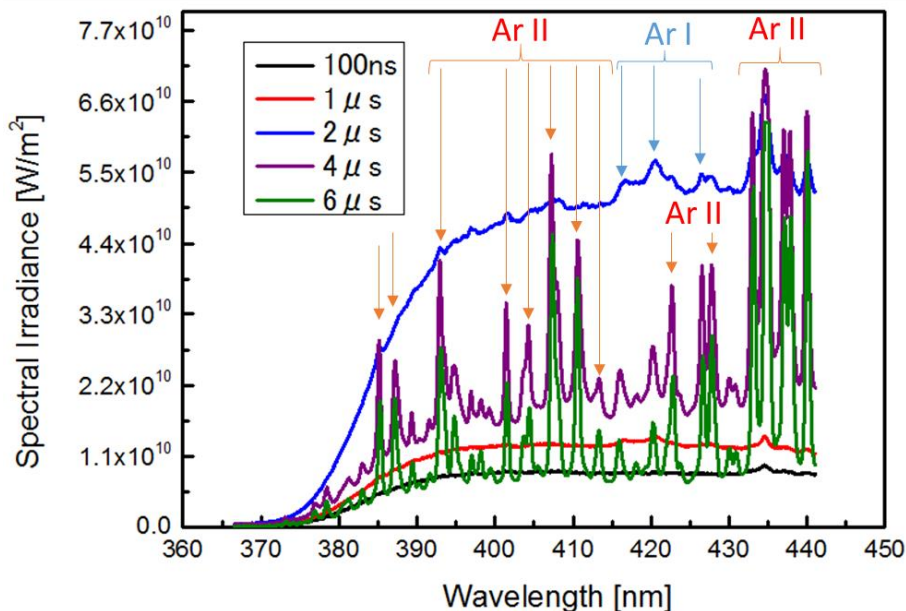


図 2

高高度のレーザーロケットでは大気吸込み分の密度不足を補うために、ガスの推進剤を利用することが提唱されている。本研究では、推進器におけるプラズマから衝撃波へのエネルギー変換という観点では絶縁破壊からLSDWに至るまでの物理過程を解明するために、様々なガス種を用いて広い波長領域を高分解能で計測可能な分光器で発光分光解析を行った(図2)。解離した原子のイオン線スペクトルが出始めるまでの時間もガス種や組成によって異なっている。一般的な強い衝撃波では重粒子から電子へと平衡過程が進むが、レーザーの大気放電では逆制動放射によって自由電子が加速され、電子のエネルギーが雪崩的に重粒子と衝突し、完全電離にまで達する。従って、電子から重粒子へのエネルギーの流れが非平衡状態から局所熱平衡状態までの物理現象を支配していると考え、電子-重粒子間の緩和時間を用いて分光計測の結果を整理した。結果より線スペクトル時間と緩和時間の比がおおよそ $0.5\sim 0.8 \times 10^3$ 程度であることがわかり、おむねガス種によらず一致することがわかる。今回はレーザープラズマの非平衡から平衡にいたる過程を特徴づける時間として解離した原子のイオン線スペクトルを用いたが、分光計測の時間間隔や緩和時間の評価方法を検討しなおすことでレーザープラズマの輻射伝播モードを説明できる可能性があり、今後希ガスなどの構造のことなるガス種を用いて平衡に至るプロセスを解明する。本研究成果は国際衝撃波学会(International Symposium on Shock Waves)にて発表を行った。

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

レーザー推進は、高ペイロード比・シンプルなロケット構造・ビーム源が地上にありメンテナンスが容易で信頼性が高い。高出力レーザー開発に伴い15-20年以内には数十トンのペイロードが輸送可能で、輸送コストを従来の1/100に抑えられる。また本研究は超音速航空機の抗力低減、宇宙デブリ除去技術の開発に応用でき、将来の宇宙関連技術の発展に寄与できる。このような知見は、航空宇宙分野にとどまらず、星の中で起こる核燃焼デトネーションと星間物質による星の形成、工学的な分野では高利得慣性核融合研究に対して、またレーザープラズマを利用した医療応用研究への活用が期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで宇宙プラズマ推進器におけるエネルギー変換効率やエンジン診断など実験研究を中心に進めてきた。プラズマ推進器は、化学燃焼を伴う推進器に比べて比推力効率(燃料効率)が極めて高く、レーザー推進器など近年の宇宙開発において重要な位置を占めている。これら推進器の基礎研究においては、エネルギー輸送と変換の理解とその診断技術が重要である。根本的な推力の改善や、新たな宇宙開発におけるプラズマの利用を創成するうえでも、筑波大学においてより電気工学の基礎や物理化学に根差した研究を進めてきた。特にエネルギー変換分野では、宇宙工学分野に留まらず、様々な分野に貢献するためには電気工学のより一層の深い理解を目指している。本研究はその一環であり工学を支える根幹分野の研究についても研究者としての視野を広めるために積極的に参加している。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

発表論文

- K. Shimamura, K. Matsui, J.A.Oforu, I. Yokota, K. Komurasaki, Mode Transition of Plasma Expansion for Laser Induced Breakdown in Air, Appl. Phys. Lett. 110, 134104 (2017)
(<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4979646>)

研究発表

- K. Shimamura et al., Mode transition from fast-gas ionization wave to laser-supported detonation wave, The 31st International Symposium on Shock Waves, Nagoya University July 2017(現在印刷中)
- 横田一平;嶋村, 耕平;横田 茂, レーザー誘起プラズマ中の発光分光計測, 平成28年度宇宙輸送シンポジウム, ISAS相模原 2017年1月
(<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/617571>)
- 嶋村耕平他, LSDWのモード遷移に関する研究, 平成28年度宇宙輸送シンポジウム, ISAS相模原 2017年1月
(<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/617599>)
- 清野祈;横田一平;嶋村, 耕平;横田, 茂, 高Z材を用いたレーザーアブレーション推進器の推力測定, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 2016年9月
(CD-ROM配布のみ)

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

- *Proceedings of 31st International Symposium on Shock Wave*, (現在印刷中)
- *Applied Physics Letter published by the American Institute of Physics*
(<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4979646>)
- 平成28年度宇宙輸送シンポジウム講演論文集 (2件)
(<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/617599>)
(<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/617571>)
- 第60回宇宙科学技術連合講演会講演論文集 (CD-ROM配布のみ)

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

特に無し

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 筑波大学システム情報系
(ツクバダイガクシステムジョウホウケイ)

住 所： 〒305-8573
茨城県つくば市天王台1-1-1

申 請 者： 助教 嶋村耕平 (シマムラコウヘイ)

担 当 部 署： 同上

E - m a i l : shimamura@kz.tsukuba.ac.jp

U R L : <http://wpp.kz.tsukuba.ac.jp/index.html>