

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 10 月 29 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656523

研究課題名(和文)液体金属を推進剤としたバルブレス・レーザーアブレーションスラスタの研究

研究課題名(英文)Laser Micro Thruster using Metallic Propellants

研究代表者

船木 一幸 (Funaki, Ikkoh)

独立行政法人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：50311171

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)：本研究では、推力可変型の小型レーザー推進機の実験研究を実施した。推進機は金属や液体金属にレーザーを照射するだけの単純な構成であり、小型レーザー・スラスタ実験システムとして、小型レーザー推進機を搭載した振り子式推力測定スタンドを真空チャンバ内に設置し、レーザーは真空チャンバ外から導入した。レーザーパワー等を変更することで10 μ N付近において線形性の良い推力特性が得られ、宇宙機のための精密姿勢制御用スラスタとしての可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Experimental study of laser micro-thruster was conducted. Targeting at laser thruster without any valve to supply propellant, metal as well as liquid metal propellants were employed and it was tested by a system consisting of a propellant target and a thrust stand mounting the propellant target, both of which were installed inside a vacuum chamber. When infrared laser beam was irradiated from outside the vacuum chamber, the propellant was found to be released as a jet. From the result, the concept of laser micro-thruster with variable thrust level was demonstrated.

研究分野：工学

キーワード：推進・エンジン レーザーマイクロスラスタ 宇宙機の高精度姿勢制御

1. 研究開始当初の背景

レーザー推進では、ロケットや宇宙機を推進させるために、レーザーのエネルギーを推進剤に与えて高速ジェットを生成・噴射し、ジェットの反力として推力を得る。過去のレーザー推進研究では、レーザーで推進剤を加熱しながら飛翔するレーザーロケットなど、大規模な推進システムを目指した研究が多かった。その一方、近年は、小型高出力レーザーの出現により、オンボードレーザーを利用した小型の衛星用推進機を実現しようという気運が高まっている。大推力が求められる主推進とは異なり、宇宙機の精密姿勢制御のためには、用途にもよるが、1N 以下の小推力で、線形性に優れかつ応答性の良いスラストが必要である。本研究では、宇宙機用の精密姿勢制御用レーザースラストに着目する。

精密姿勢制御用スラストを必要としている宇宙ミッションとしては、重力波観測を目的に欧州宇宙機関 (ESA) が計画している LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 計画や、我が国の DECIGO (DeCi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) 計画が代表例である。これらのミッションでは、複数機の衛星群を編隊飛行 (フォーメーション・フライト) させ、かつ、それぞれの宇宙機に作用する重力以外の外力を取り除く「ドラッグ・フリー制御」を行う必要がある。LISA や DECIGO などの宇宙機にかかる大気抵抗や太陽光圧等の外乱力は、最大で $100 \mu\text{N}$ (マイクロ・ニュートン) 程度と言われており、時間的に変動していることが知られている。こうした用途に対して、従来のスラスト (3~10N クラス) を間欠的に動作させるだけでは対応が困難である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、衛星のドラッグフリー制御に必要なスラストへの要求を明らかにし、その上で、推進剤に定常または繰返しパルスレーザーを照射して推力を得る「レーザーマイクロスラスト (図1)」の推力評価実験を行う。

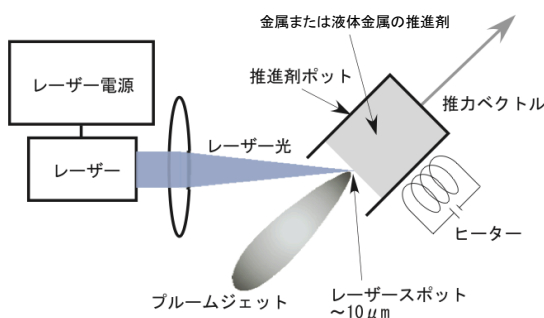


図1 レーザーマイクロスラストの概念

その上で、衛星精密姿勢制御用スラストとしての可能性を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

小型レーザースラストとレーザースラストの推力測定に必要な推力測定スタンドの設計製作を行った。図2のように、主な装置は、レーザー、推進剤ターゲット、推進剤ターゲットを搭載した振り子式推力測定スタンド、ならびに、振り子の変位を測定するレーザー変位計 (キーエンス LK-G400) から構成される。ねじり振り子式推力測定スタンドは、直径 60cm の真空チャンバ内に設置され、推進剤ターゲットにレーザー光が照射されると、振り子のねじれ量に変化することから、その際の振れ量 (変位) と推力との関係を校正することで、推力が評価可能となる。ねじり式振り子は直径 0.1mm ほどの極細ワイヤーとターゲットを両端に搭載したアームとから構成される。なお、今回の試験では、汎用品の近赤外レーザー (SPI Lasers, SP-25C-0001 ファイバーレーザー) を使用するため、レーザーは真空チャンバ外部に設置することにした。

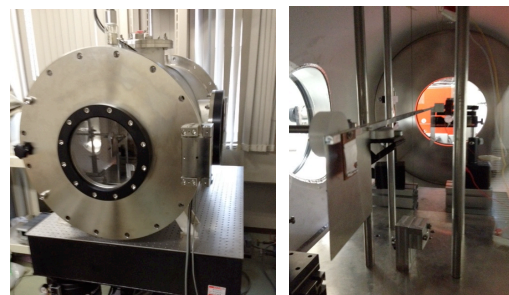
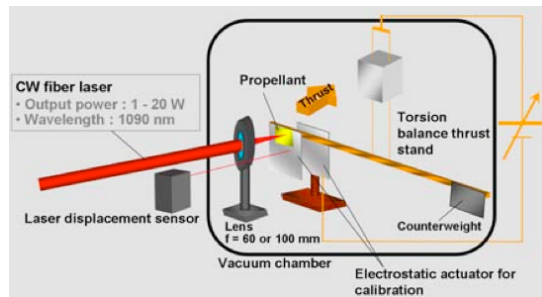


図2 レーザーマイクロスラスト実験システム

上記のシステムに加えて、レーザープラズマをパルス・プラズマ放電により加速する「レーザーならびに放電によるマイクロスラスト」の実験についても実施した。

4. 研究成果

(1) LISA/DECIGO 等の重力波観測衛星にて太陽光圧による姿勢外乱を補償するためには、 $5\sim 100 \mu\text{N}$ で推力値可変のスラストが必要となる。これらの衛星では、試験

質量と宇宙機との相対変動を長距離計（レーザー干渉計）および短距離計（静電型のローカルセンサー）を用いて計測し、スラスタへ連続的にフィードバック制御することによってドラッグフリー飛行を実現する。しかし、スラスタの雑音が大きいと、スラスタ雑音によって制御精度が悪化する。このため、スラスタの雑音（推力ノイズ）は $0.1 \mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下が要求される。

- (2) スラスタスタンドのキャリブレーションは、アームの片端および真空チャンバのステージに固定された静電アクチュエータまたはコイルアクチュエータを用い、それらの間に電圧を印加（または電流を流す）ことで既知の力を与えて実施した。キャリブレーションの結果、 μN レベルで良好な線形性を保つ推力計測が可能となった。
- (3) CW レーザー推進機の推力特性を調査するため、推進剤として厚さ約 $10 \mu\text{m}$ のアルミニウムならびにインジウム液体金属を用い、出力 $1\sim 20\text{W}$ の範囲でファイバーレーザーを焦点距離 100mm の集光レンズで集光の上照射した。ファイバーレーザーの出力に対する推力の大きさを図3に示す。この図よりレーザー出力に対し、発生する推力は線形的に増加しているのがわかる。実際の宇宙機用推進機として用いた場合を想定すると、レーザー出力に対して線形的に推力が増加するので、推力の電氣的制御が可能であることが示唆された。

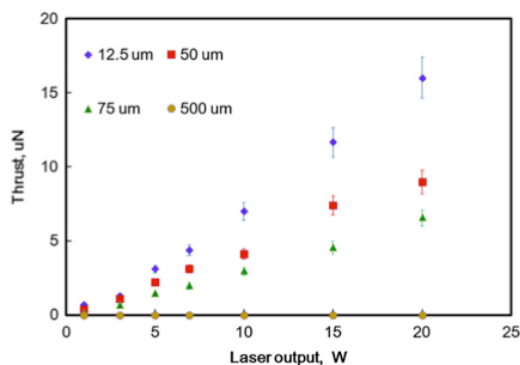


図3 レーザーマイクロスラスタの推力特性評価結果の例

- (4) レーザーの違いによる推力特性を調査するため、半導体レーザーを用いて推力計測を行ったところ、ファイバーレーザーの推力特性と半導体レーザーの推力特性は、ほぼ同一の傾向を示した。半導体レーザーは高出力・小型・高効率化が達成されており、従って、宇宙機搭載用レーザーと本研究で用いた推進剤の組み合わせが有望であることが示唆された。

- (5) レーザー照射に加えて放電によるプラズ

マ生成と加速を行うパルスプラズマスラスタでは、インパルスビットの測定が実施され、 $12\sim 88 \mu\text{Ns}$ のように充電エネルギーの増加に伴いインパルスビットが増加することが確認された。このレーザーアシストプラズマスラスタのパルス周期と充電エネルギーを変えることでも、可変推力方のマイクロスラスタが実現できることが明らかになった。

- (6) 推力ノイズを評価するために必要な、ねじり振り子式スラスタスタンドの感度特性を取得した。周波数毎の感度特性は、 1Hz にて約 $1 \mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、本実験においてはスラスタ由来の推力ノイズよりも、地面の微小振動による計測ノイズの方が大きかった。このため、推力ノイズの計測のためには、更なる感度の向上が必要であることが解った。
- (7) 本研究で評価したレーザースラスタの適用先として、高度 500km の太陽同期軌道を飛行中のドラッグフリー衛星に作用する太陽輻射圧ならびに空気力（大気圧）の補償を行うためのシステムを検討した。図4に示すように、本衛星に定常的に作用する外乱力は、衛星が飛行する方向と逆向き（Z方向）の空気力（ $20 \mu\text{N}$ ）と、太陽電池パネルが受ける-X方向の太陽輻射圧（ $\sim 35 \mu\text{N}$ ）の2つに限られる。本衛星では、2機の $100 \mu\text{N}$ スラスタによりこれら2方向の外乱力を補償すれば良い。こうしたシステムは、重力波観測のための技術実証衛星DECIGOパスファインダミッション（DPF）として検討され、イプシロンロケットを用いた小型科学衛星ミッションの1つとして検討を継続している。

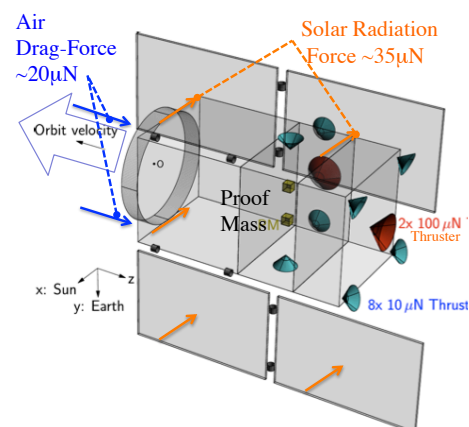


図4 高度 500km を飛行するドラッグフリー宇宙機の概念図とミッションスラスタ搭載位置、ならびに、必要な推力レベル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. H. Horisawa, S. Sumida, H. Yonamine and I. Funaki, Thrust Generation through Low-Power Laser-Metal Interaction for Space Propulsion Applications, Vacuum, Vol.88, No.1, 2013, pp.75-78.

〔学会発表〕(計9件)

1. 船木一幸, 小泉宏之, 大川恭志, 中山宜典, 安東正樹, DPF WG, DPF ミッションスラストの研究開発状況, 第14回宇宙科学シンポジウム, P2-83, 2014年1月9-10日, 相模原.
2. 東浦孝典, 船木一幸, 大塩裕哉, 外岡学志, 佐藤修一, DPF のための μN 級スラストスタンドの開発, 第14回宇宙科学シンポジウム, P2-84, 2014年1月9-10日, 相模原.
3. 船木一幸, Micro-Thruster System Development for the DECIGO/DPF Missions, 第12回DECIGOワークショップ, 2013年10月, 東京.
4. 東浦孝典, 船木一幸, 東浦孝典, 佐藤修一, DECIGO ワーキンググループ, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(49):DPF に向けた超低推力ノイズ計測スタンドの開発, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 23aSR-13, 2013年9月, 高知.
5. H. Hosokawa, O. Yamada, H. Kobayashi and H. Horisawa, Characterization and Improvement of a Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster, 29th ISTS, 2013-b-032, June 2-9, 2013, Nagoya.
6. 大井川佑治, 小林治貴, 山田修, 刈間瑞樹, 堀澤秀之, 船木一幸, レーザアシスト・パルスプラズマスラストの推進性能評価, 日本航空宇宙学会第44期年会講演会, D07, 2013年4月18-19日, 東京.
7. 刈間瑞樹, 堀澤秀之, 船木一幸, レーザアシスト型PPTの高繰り返し作動, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 3J08, 2012年11月, 別府.
8. 安東正樹, 佐藤修一, 船木一幸, 河野功, 坂井真一郎, 阿久津智忠, 麻生洋一, 川村静児, 武者満, 上田暁俊, 小型重力波観測衛星DPFによる精密計測・ドラッグフリー制御実証, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 1S18, 2012年11月, 別府.
9. H. Kobayashi, H. Horisawa, I. Funaki, A High-peak-power Laser Assisted Pulsed Plasma Thruster,

AIAA-2012-4281, 48th
AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion
Conference & Exhibit, July 2012,
Atlanta.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
船木 一幸 (FUNAKI, Ikkoh)
独立行政法人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: 50311171
- (2) 研究分担者
堀澤 秀之 (HORISAWA, Hideyuki)
東海大学・工学部・教授
研究者番号: 30256169
- (3) 研究協力者
大塩 裕哉 (OSHIO, Yuya)
総合研究大学院・大学物理科学研究科・大学院生
東浦 孝典 (HIGASHIURA, Kohsuke)
法政大学大学院・理工学研究科・大学院生