

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630441

研究課題名(和文) 航空宇宙機用ビーム電磁流体力学発電の新展開

研究課題名(英文) New approach of a magnetohydrodynamic electrical power generation harnessing beam energy in aerospace vehicle

研究代表者

奥野 喜裕 (Okuno, Yoshihiro)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：10194507

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、航空宇宙機搭載用高出力密度電力発生システムの構築に向けての基盤を確立することを目的とし、ビーム(レーザー)支援детネーションによる高温高圧作動気体を利用する電磁流体力学(MHD)発電に関する原理実証試験に成功するとともに、2次元、3次元非定常数値シミュレーションによりプラズマ電磁流体現象を把握し、高性能化に向けた指針ならびに発電システムを検討し、革新的・独創的成果とともに、所期の目的を達成した。

研究成果の概要(英文)：The aim of the research is to establish the basic grounds of a magnetohydrodynamic electrical power generation harnessing beam energy in aerospace vehicle. The electrical power generation with high temperature and pressure plasma flow originating from a laser supported detonation by an irradiation of CO<sub>2</sub> laser has been experimentally demonstrated in small scale MHD generators, and the performance and its improvement have been examined by 2d and 3d time-dependent numerical simulations. The results obtained in the present research are quite innovative and originitive, and the objective in the research has been successfully achieved.

研究分野：エネルギー学

キーワード：MHD発電 航空宇宙機 電力発生 ビームエネルギー エネルギー変換

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙機の開発において、推力と電力の高効率発生は最重要課題であり、その用途に応じて、これまで様々な高性能かつ高信頼の機器が研究・開発されている。中でもレーザー光やマイクロ波を外部からのエネルギー供給キャリアとして利用することで、推進剤（あるいは燃料）を搭載することなく航空宇宙機の推進を行い、ペイロード比の向上とコストの削減を狙う「ビーム推進技術」が注目され、大きな期待と同時に多くの困難を合わせ持つ、極めてチャレンジングなテーマとなっている。一方、研究代表者が長年にわたり研究開発を進めてきた MHD（電流体力学）発電は、地上での次世代高効率発電技術として有望視され、多くの実績と知見が蓄積されているが、一方でブレークスルーとなるような新展開が要望されているのも事実である。MHD 発電機では、通常回転形の発電機とは異なり、高速プラズマ流体を磁界中に流して高効率エネルギー変換（電力発生）を行う。回転形発電機がジェットエンジンとすれば、MHD 発電機はロケットエンジンに対応し、過去から学術的にも技術的にも航空宇宙分野との関連・交流は深い。本研究では、「ビームエネルギー」と「MHD 発電」を融合し、新たな航空宇宙機用電力発生システムへの展開を図ることとした。

2. 研究の目的

本研究では、上述のビーム推進技術と趣旨を同じくする一方で、ビーム駆動による電力発生技術「ビーム発電技術」の新たな展開を狙う。具体的には、航空宇宙機搭載用高出力密度電力発生システムへの展開を最終目標として、レーザー支援デトネーション(LSD)による高温・高圧作動気体を利用する電磁流体力学(MHD)発電に関する原理実証試験、数値シミュレーションによる現象の把握と高性能化指針を、研究代表者の MHD 発電技術に関する最新の革新的な成果を集結して精力的に推進し、当該研究開発分野に新たな展開を投じることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、「航空宇宙機用ビーム電磁流体力学発電の新展開」を狙うもので、下記の原理実証試験、数値解析による理論的裏付けと性能向上指針、実用化に向けたシステム検討の3本柱で研究を包括的に遂行し、新たな航空宇宙機用電力発生システム構築向けの基盤を確立する。

(1)レーザー支援デトネーション駆動 MHD 発電の原理実証試験（パルスレーザーによるレーザー支援デトネーションの発生と発電特性の実験的解明）

(2)数値シミュレーションによる現象の把握と高性能化に向けての指針（デトネーションならびにプラズマ電磁流体挙動の解明と高性能発電機的设计指針の確立）

(3)航空宇宙機用電力発生システムの検討（クローズドサイクル（作動気体の循環サイクル、熱の放出）のシステム検討）

4. 研究成果

(1)レーザー支援デトネーション(LSD)駆動 MHD 発電の原理実証試験

図1に実験装置の概略図を示す。アルゴンガスを300K, 25kPaで充填したチャンバー内に永久磁石により0.68Tの磁界が印加されたMHD発電機を設置し、そこに焦点距離95.3mmのZeSe製凸レンズにより集光されたTEACO<sub>2</sub>レーザーを1μs入射した。レーザーによる入力エネルギーは約1.0Jである。

図2に発電機の概略図を示す。MHD発電機には、プラズマ流体を吹き出す側（発電機下流側）からレーザーを入射しLSDを直接利用する発電機(図2(a))、ならびにレーザーを上流側から入射しLSDによる加熱気体を下流側に吹き出す発電機(図2(b))の2種類を制作し、それぞれの発電特性を調べた。いずれも1対の電極が壁面に設置されており、この電極対に負荷抵抗を接続し、電極間電圧と電流を計測することにより発電出力を評価した。

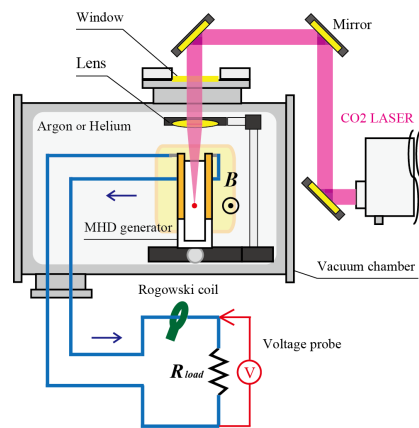
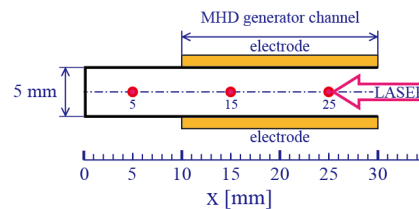
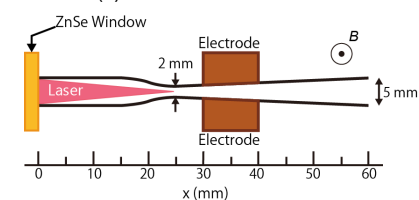


図1 実験装置



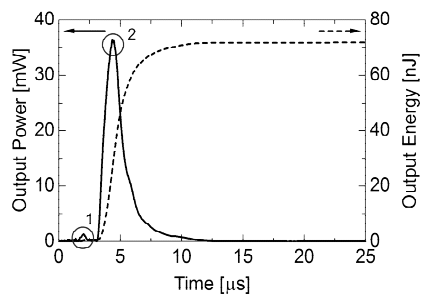
(a) LSD 直接利用発電機



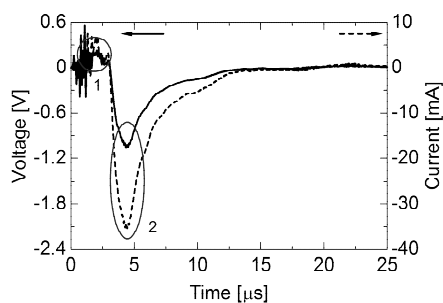
(b) LSD 加熱利用発電機

図2 MHD 発電機

まず、LSD 直接利用発電機（図 2(a)）での結果について述べる。図 3(a)に発電出力と出力エネルギーの時間変化を、図 3(b)に電圧と電流の時間変化を示す。約  $1 \mu\text{s}$  間のレーザー入力に対し、約  $15 \mu\text{s}$  の間発電が持続し、発電出力には 2 つのピークが見られる。最初のピークでは電流、電圧がともに正の値を持ち、 $2.0 \mu\text{s}$  で  $1.3 \text{ mW}$ （電圧  $0.2 \text{ V}$ ・電流  $6.5 \text{ mA}$ ）となり約  $3 \mu\text{s}$  まで持続する。2 つ目のピークでは電流、電圧がともに負の値を持ち、 $4.4 \mu\text{s}$  で  $36 \text{ mW}$ （電圧  $-1.1 \text{ V}$ ・電流  $-34 \text{ mA}$ ）となり約  $15 \mu\text{s}$  まで持続する。発電出力の電流、電圧の符号から、発電出力の 1 つ目のピーク付近（レーザー入射開始後  $\sim 3 \mu\text{s}$ ）では発電機下流へ向かうプラズマ流が、2 つ目のピーク付近（ $3 \mu\text{s} \sim 15 \mu\text{s}$ ）では発電機上流へ向かうプラズマ流が、発電出力に対してそれぞれ支配的であることを示している。すなわち、連続電極を有する LSD 直接利用発電機では、上流に向かうプラズマ流れが支配的なのか、下流に向かうプラズマ流れが支配的なのかにより、電圧電流値の正負が決まるが、基本的には電流を打ち消し合っているため、電流の打消しを回避できる分割電極の利用が望まれる。



(a) 発電出力、出力エネルギー



(b) 電圧、電流

図 3 発電出力等の時間変化

図 4 に LSD 加熱利用発電機（図 2(b)）における開放電圧の経時変化を示す。同図から  $10 \mu\text{s}$  付近に 1 つ目のピーク、 $60 \mu\text{s}$  付近に 2 つ目のピークが確認でき、レーザー入射後約  $400 \mu\text{s}$  の間、正の電圧が発生し続け、発電領域内で下流方向の流れが支配的となることがわかる。このプラズマ流れの一方向性は、上述の LSD 直接利用発電機とは異なり、レーザー

を上流側から入射し LSD による加熱気体を下流側に吹き出す方式にしたことによる。

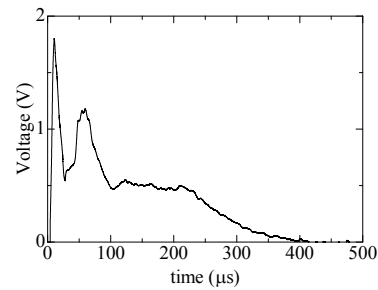
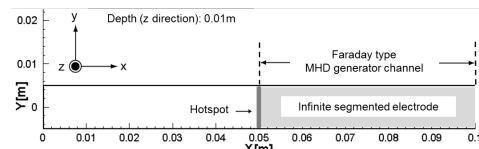


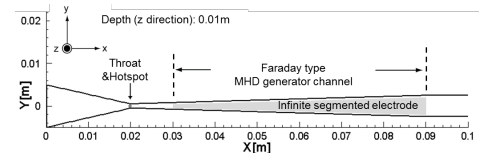
図 4 開放電圧の時間変化

(2) 数値シミュレーションによる現象の把握と高性能化に向けての指針

パルスレーザー駆動 MHD 発電機内の電磁流体挙動ならびに発電特性を明らかにするために、レーザー入射方向および発電機形状を変化させて非定常 2 次元数値シミュレーションを行い、以下のことを明らかにした。



(a) Generator with a constant-height duct



(b) Generator with a throat duct

図 5 解析対象とした MHD 発電機

・下流部（開放側）に発電領域を設置した高さ一定の発電機（図 5(a)）において、下流側からの入射によりレーザー支持デトネーションを直接発電領域に生成する方式（下流入射）と上流側からの入射により発電領域外でレーザー支持デトネーションにより高温高压の気体を生成し、それを発電領域に流す方式（上流入射）を比較した。前者でレーザー支持デトネーションが下流端まで、後者で上流端まで到達するまでレーザー入射を行う場合、後者の方がレーザー支持デトネーションにより生成された高温高压の気体を有効に発電に利用でき、より高いエンタルピー抽出率が期待できる。

・レーザー入射時間を調節することにより、上流入射においても下流入射においても同等のエンタルピー抽出率の最大値を得ることが可能である。ただし、上流入射の方がレーザー入射時間の自由度は高い。

・スロート付ダクト上流入射発電機（図 5(b)）

におけるエンタルピー抽出率は、高さ一定ダクトの最適値よりも高い。これはスロートを設けることにより発電領域で超音速流れが実現することによる。

本計算ではレーザー駆動 MHD 発電機の基礎的特性を把握するため、理想的な発電機を想定し、かつ輻射による熱損失等を無視して様々な検討を行った。レーザー吸収過程においては輻射による損失が無視できないため、より精度の高い定量的な議論を行うにはこれらの損失を考慮に入れた計算を行う必要がある。また、より厳密な発電内電磁流体现象の取扱いや発電機形状、加熱領域、レーザーのスポット径や強度分布のモデリング、モデルレーザー入射時の最適化などより詳細に検討する必要があるなど、性能把握に向けて多くの課題が残されている。

また本研究での実験において、生成されるプラズマの高速度観測から、その挙動は3次元であることが判明し、3次元非定常プラズマ流体数値シミュレーションを行った結果、図6に示すように、レーザー加熱流体における流体力学的不安定性により、複雑な構造を持ち得るが、電極間にプラズマが広がる構造となるので、MHD 発電にとって有益に作用する可能性があることが示唆された。

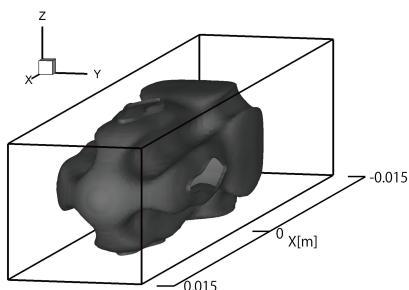


図6 レーザー生成プラズマの3次元構造

### (3)航空宇宙機用電力発生システムの検討

レーザー駆動 MHD 発電システムはいくつか提案されているが、航空宇宙機搭載用高出力密度電力発生システムとしては、引用文献で提案されている希ガスを循環させるクロードサイクルシステムが適していることを確認した。

本研究で使用したレーザー装置は他からの流用品で、必ずしもレーザー駆動 MHD 発電に適した仕様を有するものではないので、更なる高性能な実験的検証を進めるには限界があったが、本研究では、所期の研究目的である航空宇宙機搭載用高出力密度電力発生システムの構築に向けての基盤を確立することに資する独創的かつ斬新な成果が得られた。

#### <引用文献>

C. D. Maxwell, and L. N. Myrabo,

“Feasibility of Laser-Driven Repetitively Pulsed MHD Generators”, Proc. AIAA 18th Thermophysics Conference, AIAA-83-1442, 1983, Montreal (Canada)

#### 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 2 件)

松本正晴, 奥野喜裕, パルスレーザー駆動 MHD 発電の実証基礎研究、日本航空宇宙学会論文誌, 査読有、Vol.64, No.2, 2016, PP.91-96,

[https://www.jsass.jp/journal/paper64\\_2.php](https://www.jsass.jp/journal/paper64_2.php)

松本正晴, 高木成郎, 奥野喜裕, パルスレーザー駆動 MHD 発電機の電磁流体シミュレーション、電気学会論文誌 A、査読有、135 巻、6 号、2015、pp.379-384、DOI:10.1541/ieejfms.135.379

[学会発表](計 5 件)

田中学, 奥野喜裕, レーザ駆動 MHD 発電におけるダクト形状がプラズマ流体挙動に与える影響、電気学会全国大会、7-009、2016.3.18、東北大学(仙台)

関口寛敏, 田中学, 奥野喜裕, 絞り付きパルスレーザー駆動 MHD 発電機における基礎実験、電気学会全国大会、7-008、2016.3.18、東北大学(仙台)

田中学, 関口寛敏, 奥野喜裕, レーザー支持デトネーション駆動 MHD 発電の基礎研究、平成 27 年度衝撃波シンポジウム、1B4-3、2016.3.7、熊本大学(熊本)

田中学, 関口寛敏, 奥野喜裕, ダクト内レーザー加熱プラズマの3次元数値解析、電気学会 新エネルギー・環境研究会、FTE-15-38、2015.9.29、東京工業大学(横浜)

半田恭平, 黄磊, 松本正晴, 奥野喜裕, パルスレーザー駆動 MHD 発電機の発電特性、電気学会全国大会、7-006、2015.3.26、東京都市大学(東京)

[その他]

ホームページ等

<http://www2.es.titech.ac.jp/okuno/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

奥野 喜裕 (OKUNO, Yoshihiro)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：10194507