

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24561054

研究課題名(和文) 太陽光エネルギー変換の高度化に向けたレーザー駆動MHD発電機の開発

研究課題名(英文) Development of a laser-driven MHD electrical power generator for advanced solar-energy conversion

研究代表者

村上 朝之 (MURAKAMI, TOMOYUKI)

成蹊大学・理工学部・准教授

研究者番号：20323818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：先進的なレーザー電気エネルギー変換を可能とする電磁流体力学(MHD)発電機の開発を目的とした。衝撃波管装置、パルスパワー電源、CO₂レーザー装置を利用した実験研究および多次元数値シミュレーション研究により、高温希ガスプラズマMHD発電の性能を明らかにした。特に、ファラデー型MHD発電機の電磁流体挙動の詳細を明らかにした。また、研究当初の目的である、レーザー駆動MHD発電を実証した。このことは、次世代の太陽光高度利用エネルギー変換の実現に大きく寄与する。

研究成果の概要(英文)：The aim of the present study is development of an advanced laser-electricity conversion device, i.e. a laser-driven magnetohydrodynamic (MHD) electrical power generator. Power generation experiments using a shock-tube facility, a pulse-power device and a CO₂ laser device and multi-dimensional numerical simulations have been carried out to clarify the performance of the high-temperature inert-gas plasma MHD electrical power generation. In particular, the MHD behaviour in a Faraday-type MHD generator has been investigated in detail. In conclusion, we have successfully demonstrated the MHD electrical power generation using laser, which is crucial for the development of advanced solar-energy conversion.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：電磁流体力学発電 大気圧プラズマ

1. 研究開始当初の背景

クリーンかつ無尽蔵な太陽光エネルギーの高度利用に向け、レーザー駆動電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) 発電方式を提案した。

太陽光励起レーザーは 1960 年代から原理実証がなされた技術である。現在、太陽光レーザーの発振効率は着実に向上しており、その関連技術は将来のエネルギーシステム基盤の一翼を担うものとして期待されている。エネルギーキャリアとしてのレーザーは極めて利用価値が高く、エネルギーを局所的かつ瞬間的に集中させることで非常な高温状態(10000 K レベル)を実現可能である。

MHD 発電機は、高温に晒される回転部を持たず、磁場印加空間への導電性流体通過により引き起こされる起電力(ファラデーの電磁誘導)を利用し、熱流体(プラズマ)のエンタルピーを直接電気エネルギーへと変換・抽出する。このため、熱源温度に上限がなく、極短時間パルス現象に追従可能であるという特徴を持つ。

ここでは、太陽光励起レーザー・MHD 発電 両要素技術の特長を有機的に結び付けることで、燃焼ガスから作動媒体ガスへの損失の大きな熱交換プロセスを省き、総合的なエネルギー変換効率を大幅に向上させる革新的なクリーン発電の実現に向けた研究を行った。

2. 研究の目的

次世代のクリーンエネルギー源としての太陽光エネルギーの高度利用を念頭に置いた[太陽光/太陽光励起レーザー/電気]エネルギー変換コンセプトを提言し、これを可能とする革新的な MHD 発電機の開発を目的とした。特に、

超高温プラズマの生成と特性解明

超高温パルス熱源に適合する MHD 発電機的设计開発

革新的レーザー駆動 MHD 発電の実証を達成目標として掲げた。

3. 研究の方法

- 衝撃波により生成する超高温パルス熱源を使用する MHD 発電機的设计・製作を行い、衝撃波管駆動装置を利用した MHD 発電高性能化研究を行う。
- パルス電源により生成する非平衡プラズマを利用する MHD 発電機的设计・製作を行い、パルス電源駆動 MHD 発電の実証研究を行う。
- CO₂ レーザーにより生成する非平衡プラズマを利用する MHD 発電機的设计・製作を行い、レーザー駆動 MHD 発電の実証研究を行う。
- 実験研究を行うとともに詳細なプラズマダイナミクスを記述するシミュレーションモデルを開発する。

4. 研究成果

【衝撃波管駆動 MHD 発電実験】

図 1 に衝撃波管を利用した超高温パルス熱源駆動用 MHD 発電装置を示す。ここでは、直線形状ファラデー型発電機を利用した。希ガスを作動気体とし、衝撃波加熱高エンタルピー流(全温度 7000~10000 K, 全圧力 0.1~0.2 MPa、エンタルピー数 MJ/kg)を利用した発電実験を行った。発電機内部では、高電気伝導度プラズマ(500 S/m 以上)と高磁束密度との極めて強い MHD 相互作用が働き、その物理現象はマイクロ~ミリ秒オーダーで変化する。

図 2 に示す可視化実験を行い、詳細なプラズマ挙動を把握した。ここでは、作動気体(アルゴン)入口全温度 10000 K、全圧力 0.105 MPa、負荷抵抗値(ダイアゴナル接続)1 の条件において、発電出力 11.4 kW、エンタルピー抽出率(発電出力/入力)9.0% を得た。これは研究当初達成目標としたエンタルピー抽出率 10% に迫る値である。

また、多次元数値シミュレーションを用い、実験では計測困難な流体挙動(境界層剥離)、電気特性(局所的ポテンシャル分布)、プラズマ挙動(温度・放電構造)を明らかにした。図 3 は、2 次元電流流線分布を示す。ここでは、スロット付近においてはプラズマが加速され速度勾配を持つことに起因して渦電流が発生すること、各電極のアノード上流端とカソード下流端にはホール効果による電流集中が生じることが示された。

以上示すように、超高温パルス熱源に適合する MHD 発電機的设计、運転を行うことが出来、極めて高い発電性能レベルにおいて、その特性を把握することが出来た。



図 1 衝撃波管駆動 MHD 発電装置

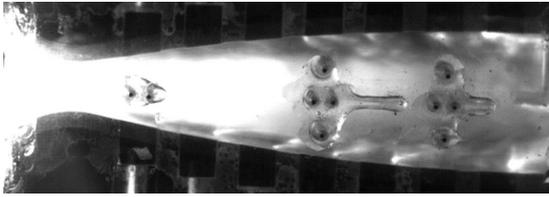


図2 直線形状ファラデー型MHD発電機内のプラズマ放電構造(実験)

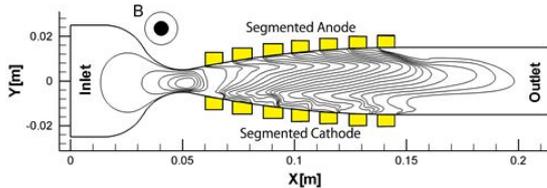


図3 直線形状ファラデー型MHD発電機内の電流流線分布(数値計算)

【パルス電源駆動MHD発電実験】

図4にパルス電源を利用したMHD発電装置を示す。ステンレス製ベッセル(容積 10 L)を用い、関連する電氣的耐圧性、ケーブル導入管・光学計測窓等の機械的強度の向上を図っている。ここでも直線形状ファラデー型発電機を利用した(図5)。主なパルス電源の特性値は、入力電圧 $10\text{--}20\text{ kV}$ 、パルス幅 10 ns 、入力エネルギー $50\text{--}100\text{ J}$ とした。電力注入(放電開始)から数 μs の間に、作動気体アルゴンは[温度 300 K ・圧力 10 kPa]から[20000 K ・ 1000 kPa]の状態に加熱圧縮される。ついで、遷音速状態(マッハ数 $0.5\text{--}1.5$)にまで加速される。このとき $200\text{--}300\text{ }\mu\text{s}$ 間磁場とMHD相互作用を行う。高速度カメラを用いて、発電機内(プラズマ生成部および電力抽出部)における放電構造を可視化した(図6)。

以上示すように、パルス電源に適合するMHD発電機的设计、運転を行うことが出来、その特性を把握することが出来た。

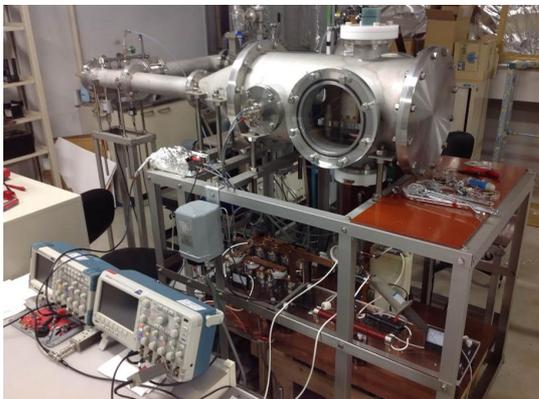


図4 パルス電源駆動MHD発電装置

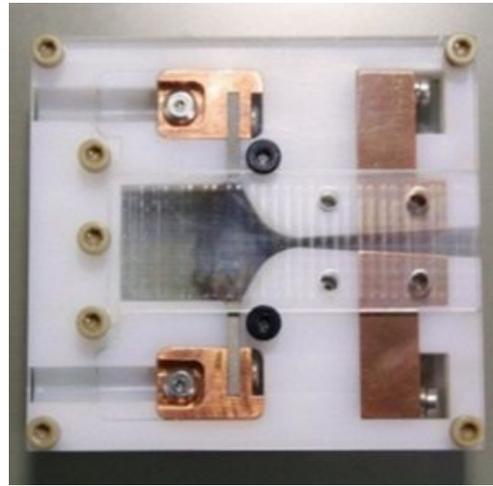


図5 直線形状ファラデー型発電機

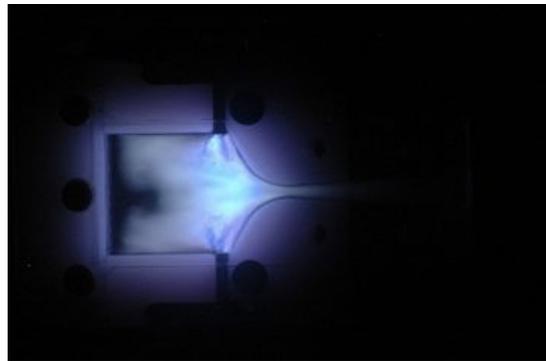


図6 発電機内プラズマ放電構造

【レーザー駆動MHD発電実験】

図7にレーザー(CO_2 レーザー、充電電圧 40 kV 、エネルギー 2.6 J 、レーザーパルス幅 $1\text{ }\mu\text{s}$ 、集光径 1 mm^2)を利用したMHD発電装置を示す(上 Schematic、下 写真)。レーザーはミラーにより反射され、焦点レンズを介し、真空チャンバーの中に入射する。アクリル製の発電機に銅板の電極を設置し、電極の面と垂直になるように磁石を配置した。発電機MHD流路内へのレーザー入射により、プラズマ生成およびプラズマ流体駆動をする。ここで永久磁石強度は、 0.17 T とした。また初期アルゴン封入圧力は 10 kPa である。

図8に発電出力と出力エネルギーの経時変化を示す。発電出力の最大値は 36 mW に達することがわかる。また、レーザー入力 $1\text{ }\mu\text{s}$ 間に対し、十分に長い約 $15\text{ }\mu\text{s}$ 間発電が持続していることがわかる。さらに、発電出力には2つのピークがみられる。これは、最初の発電出力ピーク時間付近においては発電機下流へ向かうプラズマ流れが支配的であり、一方、2つ目のピーク時間付近では発電機上流へ向かうプラズマ流れが支配的であることを示唆する。

以上示すように、パルスレーザー誘起高温プラズマを熱源としたレーザー駆動MHD発電の実証を達成することが出来た。

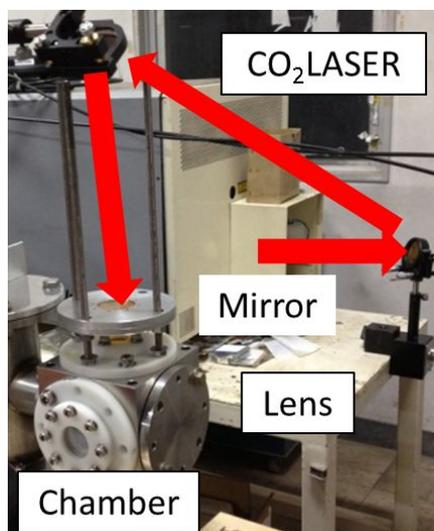
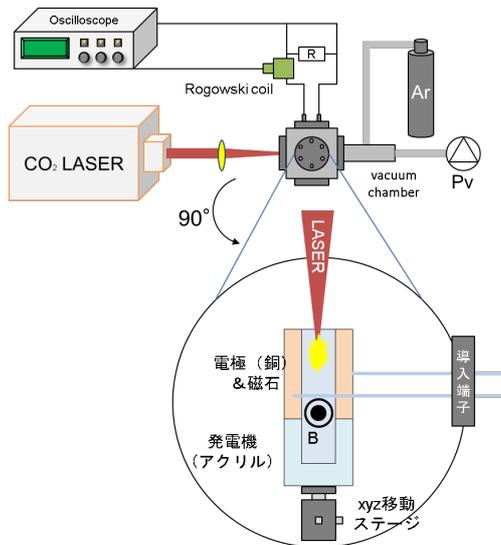


図7 パルスレーザー駆動MHD発電装置

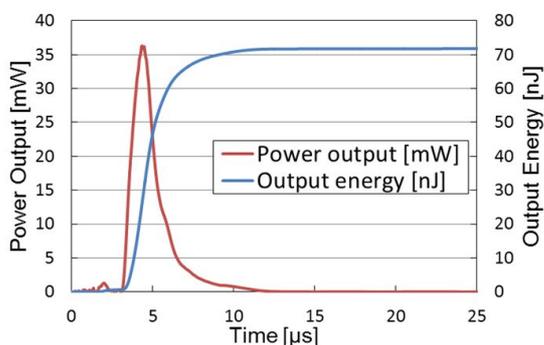


図8 パルスレーザー駆動MHD発電実験における発電出力および出力エネルギー

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計 15 件)

【全て原著学術論文・査読有】

- RF-powered atmospheric pressure plasma jet in surface treatment of high-impact polystyrene, J. Pawlat, J. Diatczyk, R. Samoń and T. Murakami, IEEE Trans. Plasma Sci. 44, 314-320 (2015). DOI:10.1109/TPS.2015.2436061
- Investigating the dynamics of laser induced sparks in atmospheric helium using Rayleigh and Thomson scattering, E. Nedanovska, T. J. Morgan, T. Murakami (他 8 名, 5 番目), J. Appl. Phys. 117, 013302 (2015). DOI:10/1063/1.4905190
- On the contribution of electrons, Ar(3P0,2), H2O+, and H3O+ to production of OH(A2 +) in a micro dielectric barrier discharge of Ar/H2O, T. Shirafuji and T. Murakami, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 01AC03 (2015). DOI:10.7567/JJAP.54.01AC03
- Numerical simulation of performance of a high temperature inert gas plasma Faraday-type MHD generator, M. Tanaka, T. Murakami and Y. Okuno, Journal of Propulsion and Power. 31, 1362-1369 (2015). DOI: 10.2514/1.B35519
- Experiments on high-temperature inert gas plasma MHD electrical power generation with Hall and diagonal connection, F. Komatsu, M. Tanaka, T. Murakami and Y. Okuno, Electrical Engineering in Japan, 193, 17-23 (2015). DOI: 10.1002/eej.22761
- Power generation experiments with a high temperature inert gas plasma Faraday type MHD generator, M. Tanaka, T. Murakami and Y. Okuno, Electrical Engineering in Japan, 193, 58-65 (2015). DOI: 10.1002/eej.22768
- Plasma fluid flow behavior and power generation characteristics in a high-temperature inert gas plasma Faraday MHD generator, M. Tanaka, T. Murakami and Y. Okuno, Electrical Engineering in Japan, 194, 46-53 (2015). DOI: 10.1002/eej.22783
- Afterglow chemistry of atmospheric pressure helium-oxygen plasmas with humid air impurity, T. Murakami, K. Niemi, T. Gans, D. O'Connell and W. G. Graham, Plasma Sources Sci. and Technol. 23, 025005 (2014). DOI:10.1088/0963-0252/23/2/025005
- Plasma characteristics and performance of MHD generator with high-temperature inert gas plasma, M. Tanaka, T. Murakami and Y. Okuno,

IEEE Trans. Plasma Sci. 42, 4020-4025 (2014). DOI:10.1109/TPS.2014.2365591
Interacting kinetics of neutral and ionic species in an atmospheric pressure helium-oxygen plasma with humid air impurities, T. Murakami, K. Niemi, T. Gans, D. O'Connell and W. G. Graham, Plasma Sources Sci. and Technol. 22, 045010 (2013). DOI:10.1088/0963-0252/22/4/045010
High-temperature inert gas plasma MHD energy conversion by using a linear-shaped Faraday-type channel, T. Murakami, Y. Zhuang, Y. Okuno, J. Appl. Phys. 113, 63303 (2013). DOI:10.1063/1.4792056
Chemical kinetics and reactive species in atmospheric pressure He-O₂ plasmas with humid air impurities, T. Murakami, K. Niemi, T. Gans, D. O'Connell and W. G. Graham, Plasma Sources Sci. and Technol. 22, 015003 (2012). DOI:10.1088/0963-0252/22/1/015003
Transient behavior of magnetohydrodynamic power-generation plasma, T. Murakami and Y. Okuno, IEEE Trans. Plasma Sci. 39, 2940 (2011). DOI:10.1109/TPS.2011.2158858
MHD electrical power generation using convexly divergent channel, I. Experimental demonstration, T. Murakami and Y. Okuno, J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 185201 (2011). DOI:10.1088/0022-3727/44/18/185201
MHD electrical power generation using convexly divergent channel, II. Numerical simulation, T. Murakami and Y. Okuno, J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 185202 (2011). DOI:10.1088/0022-3727/44/18/185202

【学会発表】(計 15 件)

【招待講演(国際会議)】
Key insights into the chemical reaction kinetics of atmospheric-pressure non-thermal plasmas, T. Murakami, 7th Int. Symp. PLASMA / 8th ICPLANTS, Nagoya (2015).
【招待講演(国際会議)】
Key pathways and networks in the reaction kinetics of atmospheric-pressure plasmas, T. Murakami, German Japanese Collaboration on Cold Plasma medicine, INP, Germany (2015).
【基調講演(国際会議)】
Non-equilibrium chemical network in atmospheric-pressure non-thermal plasmas, T. Murakami, 24th Materials

Research Society, Yokohama (2014).
【基調講演(国際会議)】
Cross sections and rates: an overview. W.G. Graham and T. Murakami, Gas/plasma Liquid Interface, Netherland (2014).
【招待講演(国際会議)】
Reactive species in atmospheric pressure plasmas operated in ambient humid air, T. Murakami, 9th EU-Japan JSPP / eCOST-MP1101, Slovenia (2014).
【招待講演(国際会議)】
Kinetic chemistry modelling for plasma medicine, T. Murakami, Int. Workshop on Diagnostic Modeling Plasma Medicine, Nara (2014).
【招待講演(国際会議)】
Chemical kinetics of atmospheric pressure plasmas in ambient air, T. Murakami, 8th Int. Conf. Reactive Plasma / 31st SPPP, Fujioka (2014).
【招待講演(国内会議)】
Global modelling of chemical kinetics and reactive species in atmospheric-pressure helium-oxygen plasmas with humid-air impurities, T. Murakami, PLASMA2014, Niigata (2014).
【招待講演(国内会議)】
大気圧プラズマのモデリング: 化学反応ネットワークの理解, 村上朝之, 東京工業大学イノベーション研究推進体「多機能革新プラズマ技術」東京 (2014).
【招待講演(国際会議)】
Modeling of chemical kinetics in atmospheric pressure plasmas, T. Murakami, Workshop on laser plasmas, Wesleyan University, USA, (2013).
【招待講演(国際会議)】
Global plasma chemistry model, T. Murakami, Workshop on Numerical study on plasma sci, Queen's University Belfast, UK (2013).
【招待講演(国際会議)】
Plasma chemistry in He-O₂ plasmas at atmospheric pressure with varying air and humidity, T. Murakami, European Collaboration on Science and Technology (eCOST), MP1101, Italy (2012).
【招待講演(国際会議)】
Global plasma chemistry model, T. Murakami, 10th Technological Plasma Workshop, Milton Keynes, UK (2012).
【招待講演(国際会議)】
Chemical kinetics of radio-frequency driven atmospheric-pressure helium-oxygen plasmas in humid air, T. Murakami, 8th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing, Nara (2012).

【招待講演(国際会議)】

Plasma chemistry in
atmospheric-pressure plasma-jets, T.
Murakami, YPI workshop, York
University, UK (2012).

【その他】

ホームページ等

<http://www.sd.seikei.ac.jp/lab/pedl/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

村上 朝之 (MURAKAMI, Tomoyuki)

成蹊大学・理工学部・准教授

研究者番号：20323818