

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 1日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360418

研究課題名（和文） レーザー核融合ロケット推進の原理実証実験

研究課題名（英文） Experimental Demonstration of Magnetic Thrust Chamber for a Laser Fusion Rocket

研究代表者

中島 秀紀（NAKASHIMA HIDEKI）

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授

研究者番号：60112306

研究成果の概要（和文）：

パルス的に生成される高温のプラズマと磁場との相互作用を明らかにし、レーザー核融合ロケットの原理を実証するために、コイルによって生成した磁場中の核融合プラズマを模擬したレーザー生成プラズマの振る舞いを観察した。これと並行し、生成されたイオンの速度分布や価数を測定し、これまで開発してきたプラズマと磁気ノズルの相互作用解明のための数値解析コードの検証した。得られた成果として、性能向上には、磁場と干渉しないイオンを減らすために、コイルの角度の変更や磁場強度の増加もしくはコイルのサイズの変更が必要であることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

In order to validate the concept of a magnetic thrust chamber for laser fusion rockets, the interaction between laser-produced plasma and the magnetic field produced by a permanent magnet/coil is investigated. The behavior of the laser-produced plasma was observed by means of interferometer and ion velocity was measured by means of Thomson parabola spectrometer for the validation of numerical simulation using a three dimensional hybrid code. The obtained results suggest that the increase in the magnetic field strength/the coil size is required for the improvement of the thrust performance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2010年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：宇宙インフラ，航空宇宙工学，ロケット

## 1. 研究開始当初の背景

核融合反応では、他の化学反応や核分裂反応に比較して、単位質量あたりに発生するエネルギーが非常に大きいため高温・高速のプラズマが容易に得られる。また、このプラズマは、磁気ノズルにおいて磁場との相互作用を利用し（固体壁との相互作用無く）運動方向を変えて推力を得ることが出来る。従って、他の宇宙推進システムと比較して、高い排出速度（即ち高い比推力）と大きな比出力を同時に達成可能であり、核融合プラズマを利用した宇宙推進システム（ロケット）は、高速推進システムとして非常に有望である。レーザー核融合ロケットの研究においては、最近では、Livermore 国立研究所のグループが、概念設計例「VISTA (図1参照)」に関するレポートを公開している。

我々のグループは、磁気ノズル中のプラズマ挙動について模擬実験（レーザー生成プラズマを使用）とシミュレーションの比較検討を世界に先駆けて行い、推力を間接的に評価した。また、高速点火方式によるロケットのコンパクト化等に、精力的に研究に取り組み、この分野では現在は世界をリードしている。これらの成果は将来のレーザー核融合ロケットの実用化に直接つながるものであり、しかも、世界的にも見てほとんど行われていない。従って、核融合ロケットの分野で世界を更にリードしていると自負している。

しかしながら、推進効率を高い精度で予測可能とするためには、図2に示すような磁気ノズル中でのプラズマ挙動の解明、すなわち、推進メカニズムの解明が必要である。プラズマ挙動が解明できたならば、その成果は、設計の基盤をなすデータとして汎用性があり、今後設計への指針を与えるという意味で工学的な意義も大きい。

本研究の発展として、米国で現在建設中の核融合点火実験装置 [National Ignition Facility: 核融合出力 20MJ] での実験研究も視野に入れている。



図1 VISTA 概観図

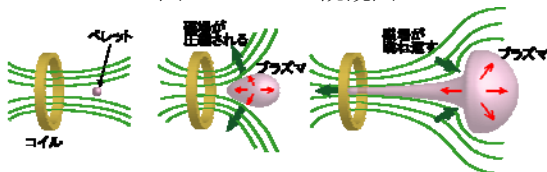


図2 磁気ノズルでの推力発生メカニズム

## 2. 研究の目的

我々の先駆的な研究が有るものの、磁気ノズルでの推進メカニズムの解明が十分になされたとは言いがたい。磁場下での膨張プラズマの各種不安定性（レーリー・テラー不安定性など）、温度低下による電気伝導度の低下、それによる磁場の浸透等、解明されていないものも多く、これらは、推進効率の低下を招くと予想され、実験的検証が待たれている。

一方、磁場発生用コイルに対する中性子の遮蔽効果を大きくする目的で、図3に示すように燃料ペレット/推進材を整形することが提案されている。コイル方向に推進材 [水素] を集め、コーン形状にする。これにより、コーン方向への中性子が約1桁減衰すると評価されている。しかしながら、このコーンが、磁気ノズル中でどのような挙動を示し、かつ推進効率にいかなる影響を与えるのかは、全く検討されていない。コーンがプラズマ化しなければ、デブリとなり磁場と相互作用すること無く（すなわち、磁場に防御されること無く）、コイルへ直接衝突する可能性がある。これは、最近レーザー核融合研究で提案されている、高速点火用コーン付きターゲットの挙動にも関連する現象である。このようにターゲット形状によってプラズマのエネルギーや密度がどのように変化するかを調査する必要がある。

そこで大阪大学レーザーエネルギー学研究センター（レーザー研）の装置を用いてプラズマの観察を行うとともに、その結果を数値解析シミュレーションと比較検討を行い、磁気ノズル中でのプラズマ挙動を解明する。まずは、小型（EUV）の装置で実験の経験を積み、それをもとに、大型装置（激光 XII 号）での実験を計画し、実行する。レーザー研は、平成18年度より、全国共同利用施設となり、今ようやく外部の研究者がこれらの装置を使用出来ることになった。

本実験は、核融合爆縮プラズマを用いるための原理実証実験として、世界で最初の本格的な核融合ロケットの実験である。世界で有数の大型レーザー装置を用い、核融合ロケットの原理実証を目指す。

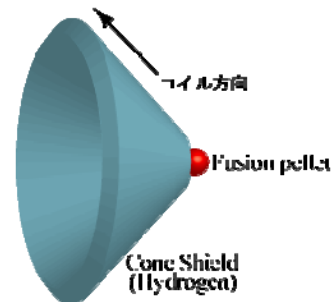


図3 コーン（遮蔽材）付きペレット  
（コイルの方向に水素コーンが付いている）

### 3. 研究の方法

大阪大学のレーザーXII号ターゲットチャンバー1を用いて実験を行った。レーザーの条件を表1に示す。波長はガラスレーザーの基本波の2倍波である527 nmで行い、レーザーの投入エネルギーは一本あたり約300 Jを6本（ただし一本は不調により80 J，合計は1500 J）に固定して測定した。

磁場を生成するために、内径5 cm，外径6 cm，ターン数10のコイルに50 μs程度パルス電流を流して印可した。コイルに流す電流を変更することにより印可磁場強度は変更可能である。コイルに流す電流はパルスフォーミングネットワークを用いて、数kAの電流を流した。図4にコイルに流した電流波形の一例を、図5にコイルに4 kA流したときの磁束密度分布を示す。ターゲットは、コイル前面から25 mmレーザー入射方向に設置した。このときターゲットでは0.24 Tの磁束密度の磁場が印可されている。

ターゲットは図6に示したような半球シェル（厚さ7 μm，直径500 μm，CH）と薄膜（厚さ0.5 μmもしくは2 μm，パレリン）を組み合わせたターゲットと半球シェルのみ合計3種類のターゲットを用いて実験を行った。半球シェルはアルミ薄膜に取り付けられており、これにより基本波の薄膜への照射を防いでいる。

イオンの価数と速度分布を測定するためのトムソンパラボラスペクトルメーターをレーザー入射方向のコイル中心軸から45度離れた方向に設置し、それと対称的な位置にチャージコレクタも設置し、time of flight法により速度を算出し、クロスチェックとした。

プラズマの振る舞いの計測には、図7に示すような不等光路マイケルソン干渉法を用いて行った。用いたプローブ光の波長はNd:YAGの2倍波である532 nm，投入パワーは800 mW投入し、画像の取得はICCDカメラによって行った。また、これと並行してH $\alpha$ のシュタルク拡がりから、プラズマ密度の測定も併せて行った。

表1 実験条件

パラメータ	値
波長	527 nm
パルス幅	1.3 ns
ビーム数	6本
エネルギー	1.6 kJ (300弱 J×5+80 J)
真空度	$1.0 \times 10^{-3}$ Pa

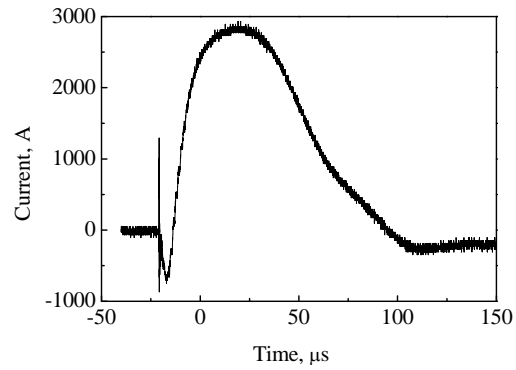


図4 コイルに流れる電流の時間履歴

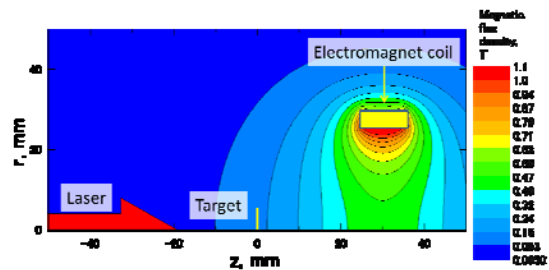


図5 磁場形状分布（コイル電流4 kA）

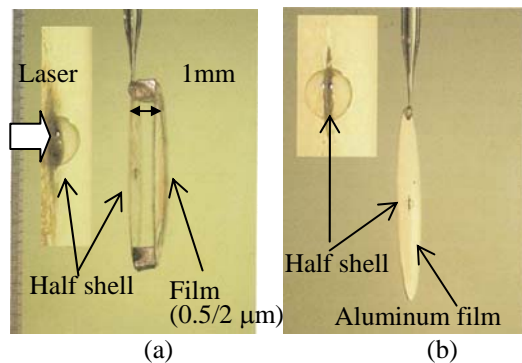


図6 ターゲット形状(a)半球シェルと薄膜ターゲット，(b)半球シェルターゲット

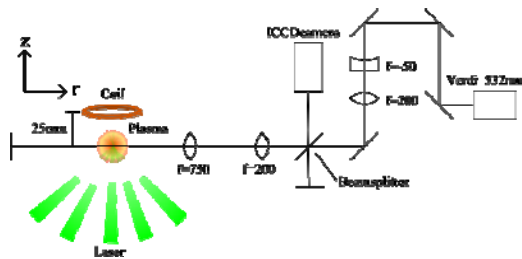


図7 不等光路 Michelson 干渉計

### 4. 研究成果

図8に不等光路マイケルソン干渉法により計測したレーザー照射後150 ns後のプラズマ密度分布を示す。(a)が磁場なしであり、(b)が磁場ありである。中心部の領域はプローブレザーが透過していないためカットオフ密度として算出した。レーザー強度からほぼすべて電離しているとして計算している。H $\alpha$ のシュタルク拡がりから算出した

プラズマ密度も同程度であるために、この仮定は問題ないと考えられる。コイル側に関して、若干ではあるが磁場によりプラズマが押さえられていることがわかる。ここに見られるプラズマは 50 km/s 程度の比較的遅いプラズマのみであるため、干渉しているが、プラズマのメインは数 KeV の早い手段であるため、結果的に相互作用が小さくなったと考えられる。

図 9 に磁場 0.12 T 前後を印可した時のターゲットの違いによるプラズマ密度分布を示す。半球シェルではすでに高速の粒子が飛び出しており、150 ns では中心部に取り残された粒子が観測されるのみである。これは同時に撮像したレーザーショット後 100 ns の画

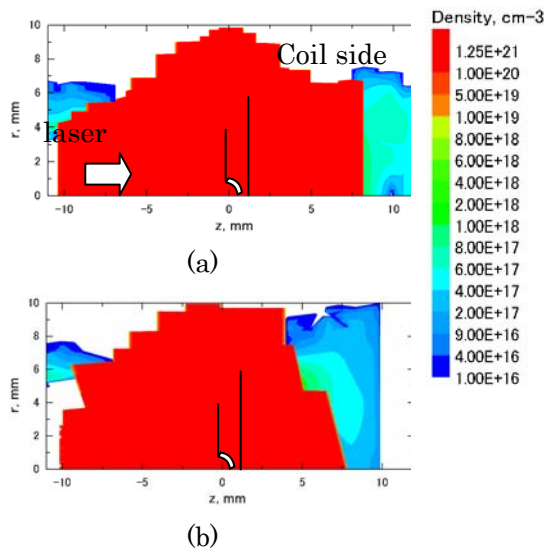


図 8 プラズマ密度分布,  $t=150$  ns, half shell +film( $0.5\mu\text{m}$ )(a)0 T, (b)0.24 T

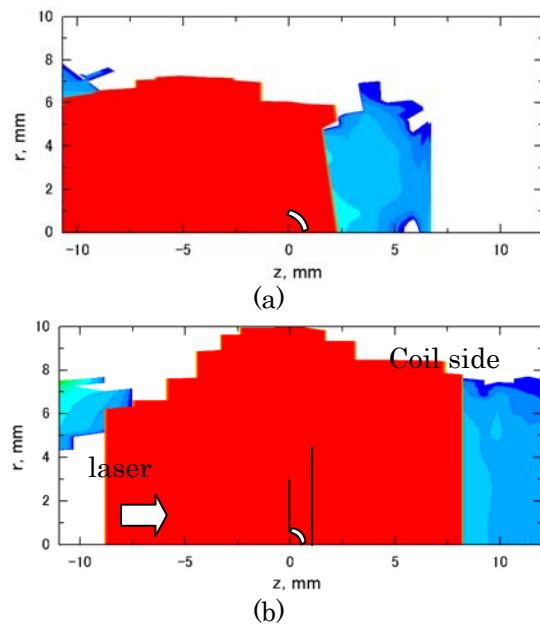


図 9 プラズマ密度分布,  $t=150$  ns,  $B=0.12$  T(a) half shell (b) half shell +film( $0.5\mu\text{m}$ )

像です。すでに、測定領域の端でプラズマが観測されていることから明らかである。図 9(b)の画像からもわかるように、薄膜によって比較的遅い粒子が生成されていることが示唆された。この粒子がイオンではなく、中性粒子の可能性もある。

一次元放射流体コードおよび 3 次元ハイブリッドコードを用いて、半球シェルを薄膜に置き換えて、薄膜 2 枚として図 9(b)とほぼ同条件での解析した結果を図 11 に示す。密度の値およびコイル側で急峻な密度変化が見られる等の傾向の一致がしており、数値解析の妥当性が示せたといえる。

ここで見られる速度数十 km/s のイオンに関しては磁場との相互作用を見せていたが、図 10 に示したように 150 km/s を超えるイオンはほとんど相互作用せず磁場が印可されている領域外に出ている。

図 12 にトムソンパラボラスペクトロメータによるイオンの速度分布関数を示す。

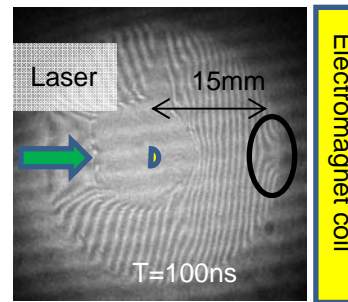


図 10 100 ns 後の干渉縞の様子

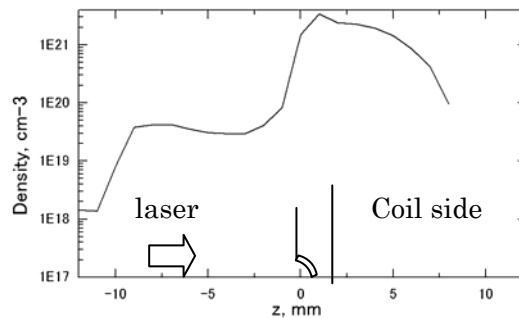


図 11 数値解析による軸上のプラズマ密度分布

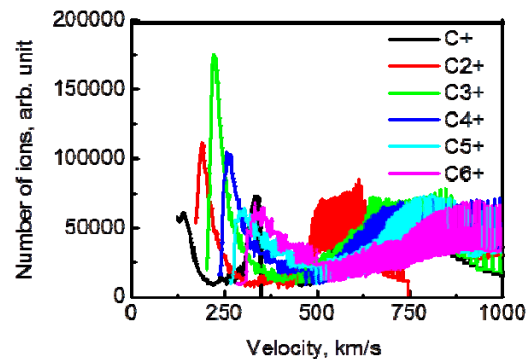


図 12 イオンの速度分布関数と価数

主たるイオンは C3+, C2+, C4+であり, C+や C6+まで観察されている. 速度の平均値は価数の 1/2 乗に比例して大きくなっているが, これは電子がレーザーによって加速された後, 取り残されたイオン自身が作り出す強電界により加速されたためであり, そのポテンシャルは約 4 keV である. 図 12 に示す通り, 主なイオンの速度は 200 km/s 以上であり, このため大部分のイオンはほぼ磁場とは相互作用せずに飛んでいると考えられる.

またターゲットの種類, 薄膜の厚さ, 磁場強度によらずこの速度はほぼ一定であったことから, ターゲット形状によってイオンの速度を抑制することは困難であることがわかった.

この結果より, 磁場強度の増加もしくはコイルのサイズアップが必要であることが示唆された.

## 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 7 件)

- ① A. Maeno, N. Yamamoto, H. Nakashima, S. Fujioka, A. Sunahara, T. Johzaki, Y. Mori, Experimental Demonstration of Magnetic Thrust Chamber for a Laser Fusion Rocket, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN (ISTS Special Issue: Selected papers from the 28th International Symposium on Space Technology and Science), 査読有, Vol. 9(2012) No. ists28, 掲載決定
- ② 梶村 好宏, 中島 秀紀, 磁気ノズルを用いた先端推進機の推力評価に向けたハイブリッド粒子シミュレーション, 日本航空宇宙学会誌, 査読有, Vol.60, No. 1, 2012, pp.22-28.
- ③ A. Maeno, N. Yamamoto, H. Nakashima, S. Fujioka, A. Sunahara, T. Johzaki, Y. Mori, Direct Measurement of the Impulse in a Magnetic Thrust Chamber System for Laser Fusion Rocket, Applied Physics Letters, 査読有 99,7, 071501, 2011.08.
- ④ Y. Kajimura, H. Nakashima, Verification of Hybrid Particle-in-Cell Simulation Model for Advanced Plasma Propulsions: Magento Plasma Sail and Magnetic Nozzle for Laser Fusion Rocket, J. Space Technology and Science, 査読有, Vol.25, 2011, pp34-54.
- ⑤ 前野旭弘, 山本直嗣, 中島秀紀, レーザー核融合プラズマ推進の研究, Journal of Plasma and Fusion Research, 査読有, 86, 2011, pp.594-597.
- ⑥ A. Maeno, T. Hanaya, N. Yamamoto, H.

Nakashima, S. Fujioka, A. Sunahara, T. Johzaki, Y. Mori, Magnetic Thrust Chamber Propulsion System for Controlling Laser-Produced Plasma by Magnetic Fields, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN (ISTS Special Issue: Selected papers from the 27th International Symposium on Space Technology and Science), 査読有, Vol. 8, No. ists27, 2010, pp.Tb\_1-Tb\_4

⑦ N. Matsuda, A. Maeno, Y. Kajimura, H. Nakashima, A Magnetic Thrust Chamber Design For A Laser Fusion Rocket Based on Impact Fast Ignition Scheme, Journal of Plasma and Fusion Research Series, 査読有, Vol.8, 2009, pp.1602-1605.

[学会発表] (計 16 件)

- ① 三輪祐大他, コイル磁場とレーザー生成プラズマの相互作用によりインパルス生成に関する数値解析, H23 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原市, 2012.01.19
- ② Masato Yasunaga, Demonstration Experiment of Magnetic Thrust Chamber in a Laser Fusion Rocket, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, Ginowan city, Okinawa, Japan, 2011.06.06
- ③ Tomoyuki Hinaga, etc., Demonstration of a Magnetic Thrust Chamber for Laser Fusion Rocket, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, Ginowan city, Okinawa, Japan, 2011.06.06
- ④ Akihiro Maeno, etc., Numerical Analysis of Plasma Behavior in Magnetic Thrust Chamber System and Comparison with Experiment Results, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, Ginowan city, Okinawa, Japan, 2011.06.06
- ⑤ 中島秀紀, 前野 旭弘, レーザー核融合炉ロケット推進の基礎実験, レーザー研シンポジウム 2011, 2011.05.10
- ⑥ 中島秀紀, 前野 旭弘, レーザー核融合炉ロケット推進の原理実証実験, レーザー研シンポジウム 2011, 2011.05.10
- ⑦ 前野旭弘, 山本直嗣, 中島秀紀, レーザー生成プラズマの宇宙推進システムへの応用実証実験, プラズマ核融合学会第 27 回年回, 2010.12.01
- ⑧ 前野旭弘, 山本直嗣, 中島秀紀, インパルスビット測定による磁気スラストチャンバーの実証, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 2010.11.17
- ⑨ 山本直嗣, 次世代ロケットエンジンの現状と課題, 2010 年度プラズマ夏の学校,

2010.08.09

⑩山本直嗣, レーザー核融合ロケットの実現可能性の検討, レーザー研シンポジウム 2010 - 平成 21 年度共同研究成果報告会 - 2010.04.27

⑪前野旭弘, 花屋倫生, 安永将人, 山本直嗣, 中島秀紀, 藤岡慎介, 砂原淳, 城崎知至, 森芳孝, レーザー生成プラズマの磁場制御による宇宙推進システムへの応用, プラズマ核融合学会 第 26 回年会, 2009.12.01

⑫H. Nakashima, N. Matsuda, A. Maeno, T. Hanaya, N. Yamamoto, S. Fujioka, A. Sunahara, T. Johzaki, Y. Mori, A Magnetic Thrust Chamber Design For A Laser Fusion Rocket, 6th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2009.09.08.

⑬Akihiro Maeno, Hanaya Tomonari, Naoji Yamamoto, Hideki Nakashima, Shinsuke Fujioka, Atsushi Sunahara, Tomoyuki Johzaki, Yoshitaka Mori, Preliminary Experiments for Demonstrating Magnetic Nozzle Concept in Laser Fusion Rocket, 31st International Electric Propulsion Conference, 2009.09.21

⑭花屋倫生, 前野旭弘, 中島秀紀, 藤岡慎介, 砂原淳, 城崎知至, 森芳孝, レーザー核融合推進における磁気ノズルの検証に関する実験とシミュレーション, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2009.09.09

⑮Akihiro Maeno, Hanaya Tomonari, Hideki Nakashima, Shinsuke Fujioka, Atsushi Sunahara, Tomoyuki Johzaki, Yoshitaka Mori, Magnetic Thrust Chamber Propulsion System for Controlling Laser-Produced Plasma by Magnetic Fields, 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009.07.08

⑯中島秀紀, 山本直嗣, レーザープラズマ駆動・原子力電気推進システムの提案, レーザー研シンポジウム 2009, 2009.04.23

[その他]

ホームページ:

[http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/LFR/laser\\_fusion.html](http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/LFR/laser_fusion.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 秀紀 (NAKASHIMA HIDEKI)

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授

研究者番号: 60112306

### (2) 研究分担者

山本直嗣 (YAMAMOTO NAOJI)

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号: 40380711

### (3) 連携研究者

藤岡 慎介 (FUJIOKA SHINSUKE)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号: 40372635

森 芳孝 (MORI YOSHITAKA)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・助教

研究者番号: 60440616

砂原 淳 (SUNAHARA ATSUSHI)

(財) レーザー技術総合研究所・理論・シミュレーションチーム・研究員

研究者番号: 00370213

城崎 知至 (JOHZAKI TOMOYUKI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号: 10397680

梶村 好宏 (SUNAHARA ATSUSHI)

明石工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号: 20403941