

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (A)
研究期間：2006～2008
課題番号：18204054
研究課題名 (和文) ベクトルレーザー超短パルスの局在伝搬及びプラズマとの相互作用
研究課題名 (英文) Localized propagation of ultra-short vector laser pulse and its interaction with plasmas
研究代表者 宮永 憲明 (MIYANAGA NORIAKI) 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授 80135756

研究成果の概要：電場(偏光)分布が放射状や同心円状であるベクトルレーザーでは、その集光スポットに光軸方向を向いた縦電場や縦磁場が発生する。一方、空間的位相分布の制御により微少集光スポットを長距離にわたって維持(局在伝搬)できる。10 フェムト秒(100 兆分の1秒)以下の超短パルスベクトルビームを局在伝搬させることによって媒質中に特異な現象を生起できる可能性について、3次元粒子シミュレーションによりその予測を始めている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2007 年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2008 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	29,200,000	8,760,000	37,960,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：超短パルスレーザー、ベクトルビーム、フェムト秒、非回折ビーム、光パラメトリック増幅

## 1. 研究開始当初の背景

ベクトルレーザーとは、通常の直線偏光や円偏光とは異なり、空間的に偏光分布制御されたビームである。代表的なものは軸対称偏光であり、電場ベクトルは同期して半径方向あるいは方位角方向を向く。電磁場のベクトル合成により、radial 偏光の集光スポットでは縦電場(光軸方向を向いた電場で磁場はゼロ)が発生し、azimuthal 偏光では縦磁場(電場はゼロ)が発生する。また、局在伝搬とは、レーザー光の空間的位相分布を制御す

ることにより非回折ビームを発生させることに対応し、レーリー長に比べてはるかに長い距離にわたって、超短パルスの長距離局在伝搬が可能である。また、群速度分散の大きな媒質では、位相素子の群速度分散で伝搬媒質の分散をキャンセルすることも可能である。

ベクトルレーザーと物質の相互作用の研究は極めて新しく、これと局在パルス伝搬とを組み合わせた研究例は未だ無い。

## 2. 研究の目的

本研究では、ベクトルレーザーと非回折ビームを組み合わせて、超短パルスベクトルレーザーの局在伝搬を行い、これを利用してプラズマの制御と相互作用長の拡張を行い、レーザー・プラズマ相互作用に関する新しいツールの開発を目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) レーザーの超短パルス化

#### ① 数フェムト秒パルスの発生

時空間にわたる局在伝搬を際立たせるためには、集光ビームのレーリ長に対応する時間幅に比べて十分に狭いパルス幅にする必要がある。そのために、100fs程度のTiサファイアレーザーを種光として、自己位相変調によってその帯域幅を拡大し、スペクトル位相を揃えることによって数フェムト秒パルスを得る。さらに、非同軸型の光パラメトリック増幅 (NOPA: Noncollinear Optical Parametric Amplification) を行って、増幅帯域幅を確保しつつ高出力化を図る。

#### ② 搬送波包絡線位相の安定化

パルス幅が数フェムト秒となると、電場振動の特性は搬送波包絡線の位相 (CEP) に強く依存するために、CEPの安定化が必要である。そのために、3次の非線形効果に起因する自己位相変調による白色光を信号光として2次の非線形効果である光パラメトリック増幅する際に発生するアイドラー光の位相が自動的に安定化する機構を利用する。この手法には、CEP安定化と増幅を同時に行えることや広帯域レーザーの波長を比較的任意に選択できる利点がある。

### (2) ビーム波面と偏光分布制御

#### ① 波面分布制御

レーザービーム断面での空間的位相分布を制御することによって、光軸方向の集光強度分布を制御し、レーリ長よりも格段に長い長尺集光を得る。さらに、集光スポット近傍において光軸方向の電場勾配を発生させるラゲール・ガウシアンビームの発生についても検討する。研究の方法(1)で記載の光パラメトリック過程を用いると、空間的位相分布制御されたビームを信号光として高強度に増幅することが可能となる。

#### ② 偏光分布制御

レーザービーム断面において旋光性を制御し、軸対称偏光 (radial偏光及びazimuthal偏光) ベクトルビームを発生させる。

### (3) ベクトルレーザーパルスと物質の相互作用

フェムト秒のベクトルレーザーパルスを発生させ、物質との相互作用における直線偏光レーザーパルスとの違いについて検討する。

### (4) プラズマ相互作用に関する粒子コード

レーザー・プラズマ相互作用をシミュレーションするために、相対論的3次元粒子シミュレーションコード (3D-PIC) を開発した。レーザー等の外的な電磁場と各荷電粒子から誘起される内的な電磁場を記述するマクスウェル方程式と各荷電粒子の相対論的運動方程式をカップリングして計算し、全体を時間発展させ、各時刻における個々の粒子の位置、電磁場の分布を求める。

荷電粒子を多体系として取り扱うと膨大な数の粒子間に働く全てのクーロン力を二体問題として計算しなければならず現実的でないのに対し、デバイ遮蔽の効果を考慮し、フィールドはデバイ長程度の空間メッシュ上で離散化して扱い、粒子は有限の大きさを持つ超粒子として扱う。

また、本研究の特徴である位相・偏光制御されたレーザー光を扱うために、位相・偏光を独立に空間的に計算することで、任意のベクトルビーム (radial偏光、azimuthal偏光) のシミュレーションを実現した。

## 4. 研究成果

### (1) レーザーの超短パルス化

#### ① 数フェムト秒パルスの発生

Ti サファイアレーザー光 (400  $\mu$  J/パルス、パルス幅 120fs (半値全幅)、繰り返し 1kHz、中心波長 795nm) をサファイアに集光し光カー効果によって自己位相変調をが起こして広帯域化し、2倍高調波励起のNOPAを用いて広帯域増幅した。さらに、この広帯域増幅光をプリズム対や回折格子を用いて分散を補償し位相を同期させた。

パラメトリック増幅における位相不整合は信号光とアイドラー光の群速度の差の関数となり、一方、励起光と信号光を角度 $\alpha$ だけずらして非同軸とすると、信号光とアイドラー光のなす角度 $\psi$ は信号光の角周波数と $\alpha$ の関数として変化する。従って、 $\alpha$ を最適化することによって位相不整合の原因である信号光

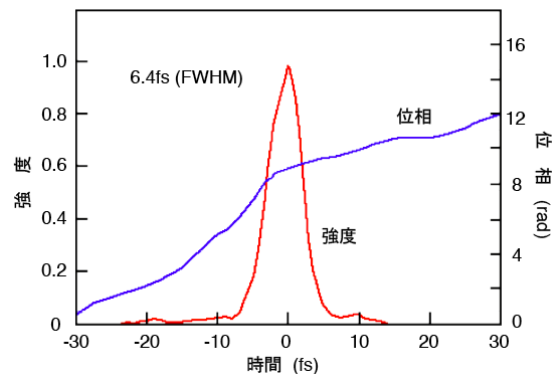


図1 数フェムト秒パルスの実時間強度と位相分布。

とアイドラー光の群速度の差 ( $v_s - v_i \cos \psi$ ) を広い帯域にわたって小さく抑えることができ、広帯域の信号光増幅が可能となる。本研究ではNOPA用非線形光学結晶には type I 型  $\beta\text{Ba}_2\text{O}_4$  (BBO) を用い、位相整合角  $\theta = 31.5^\circ$ 、励起光と信号光の非同軸角度  $\alpha = 3.9^\circ$  とした。この場合、信号光波長域として 520~710nm の範囲でほぼ位相整合条件が満たされる。発生した数 fs パルスの時間波形と位相特性は SHG-FROG により測定し、図1の結果を得た。

## ②搬送波包絡線位相の安定化

図2に示すように、Ti サファイアレーザーの基本波を分岐し、一方を種光、他方を励起光とする。種光に半波長板を入れ、偏光を  $90^\circ$  回転させた後、3mm 厚のサファイア結晶に集光して広帯域白色光を発生させた。ローパスフィルターを通過させ、950nm 以下の波長を除去したものを信号光とし、Ti サファイアレーザーの基本波を励起光として BBO 結晶で NOPA を行った。得られるアイドラー光 (エネルギー: 約  $0.3 \mu\text{J}$ ) は、BBO 結晶の位相整合角を変えることにより、1400~1630nm の帯域で波長可変である。この時、信号光と励起光の非同軸角度を  $0.6^\circ$  と設定することによって、アイドラー光のスペクトル角度分散を低減できる。

次に、得られたアイドラー光を平行光に戻した後に、再度白色光発生を行った。YAG 結晶に集光して白色変換により広帯域化を行った。その際に、ネガティブチャープとなっているアイドラー光を厚さ 2mm のガラス板 (正の群速度分散媒質) を通過させることによって、パルス幅を狭めた。図3に示すようにスペクトル半値幅は 270nm であり、ガウス型と仮定するとフーリエ変換限界パルス幅は 2.9fs である。

図2に示すように、アイドラー光を BBO 結晶に集光して2倍高調波 (SH) を発生させた。SH 光の光路には  $1/2$  波長板をセットし、白色光と同期させて合波し、分光器に導いた。その時に観測されたスペクトル干渉の結果を波長域 690~740nm の範囲で拡大したものを図4に示す。アイドラーの SH 光の強度が弱いために

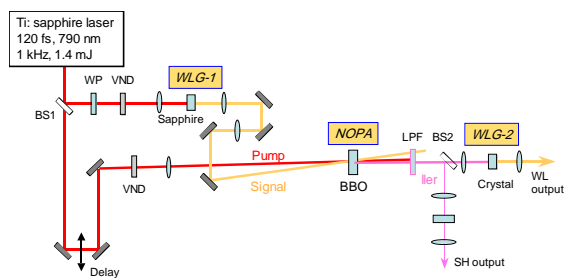


図2 CEP安定化超広帯域光発生の実験配置。

可視度は低いものの、1000パルス加算及び4000パルス加算でも干渉縞の可視度の低下は見られず、また縞の位置も固定している。このことから、図2の実験配置における白色光の CEP が安定化していることを確認した。

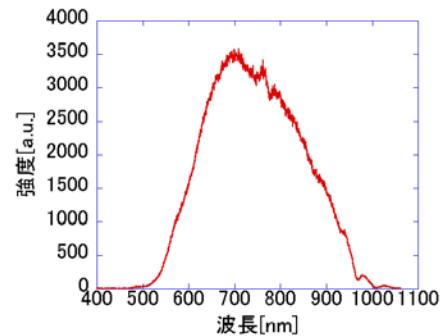


図3 CEP安定化光のスペクトル。

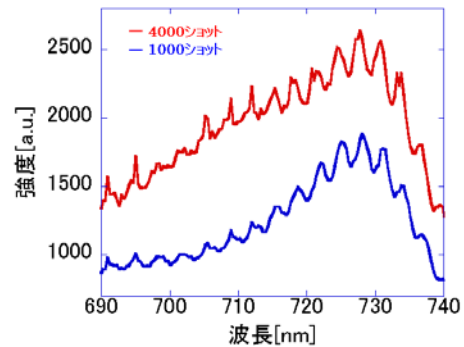


図4 アイドラーで発生させた白色光と2倍高調波光の干渉スペクトル。

## (2) ビーム波面と偏光分布制御

### ①波面分布制御

先ず、媒質中での長距離局在伝搬を実現する簡便な方法として、非線形屈折率に起因する自己収束と回折による発散をバランスさせる方法について検討した。図5は左側の空気層から石英ガラスへ入射するレーザー光 (波長 800nm、パルス幅 100fs、集光 NA0.09) をビーム伝搬法 (スラブ近似) で計算した結果である。レーザー集光位置 (図5では境界面か

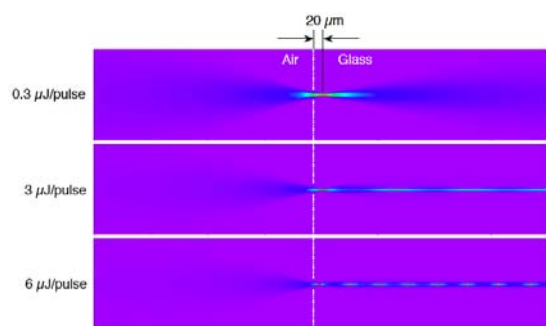


図5 フェムト秒レーザーパルスの媒質中での自己収束を利用した長距離局在伝搬。

ら $20\mu\text{m}$ )とパルスエネルギーを最適化することによって数 $100\mu\text{m}$ の長距離にわたって局在伝搬させることが可能であることが分かる。

次に、可変形鏡を用いた空間的位相分布制御を想定し、能動的な長距離局在伝搬に関する波面分布設計を高精度で行うために、FDTD (Finite Differential Time Domain) コードを用いてビーム伝搬の計算を行った。図6では、波長 $1000\text{nm}$ のレーザー光(最小スポットサイズ $20\mu\text{m}$ )に空間的位相分布を付加することによって $800\mu\text{m}$ にわたって長尺集光を可能としている。なお、この計算では、ビームは下から入射し、入射側の空気層(厚さ数 $\text{mm}$ )まではビーム伝搬法で計算し、途中からFDTDコードで引き継ぐことによって計算速度と精度の両立を図っている。

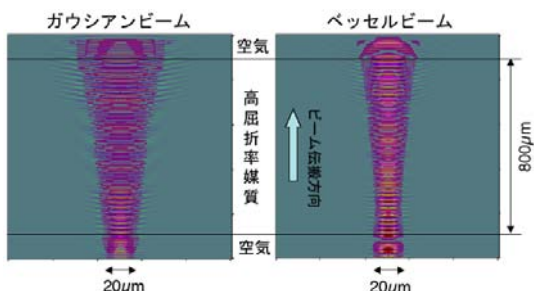


図6 入射ビームの空間的波面制御による長距離局在伝搬の設計例。

FDTDコードを用いて設計した空間的位相分布を実現するために液晶空間変調器を用いる。また、フェムト秒Tiサファイアレーザーパルス(波長 $800\text{nm}$ )に対する液晶空間変調器のレーザー損傷閾値は低いために、空間位相変調したレーザー光を増幅するには、信号光の位相が保存される光パラメトリック増幅を用いる。図7に、液晶空間変調器を制御するための計算機ツールの入力(入射複素振幅分布、位相分布)出力(伝搬途中及び遠視野パターン)画面の表示例を示す。

図8には、パルス幅 $100\text{fs}$ のTiサファイアレーザーにこの手法を適用し、光軸方向に $50\mu\text{m}$

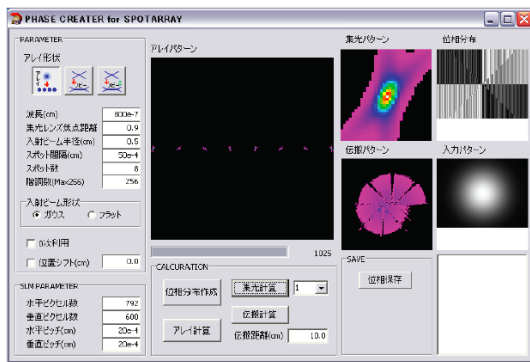


図7 集光制御用の位相分布設計コードの入出力画面。

間隔で4つの集光スポットを形成した場合の観測結果であり、個々のスポットパターン画面は $10\mu\text{m}$ 間隔に対応する。



図8 光軸方向に $50\mu\text{m}$ 間隔で4点集光させた場合の集光パターンの観測結果。レーザーパルスは左から右へ伝搬している。

## ②偏光分布制御

軸対称偏光ベクトルレーザー光を発生させるために、これまでは液晶旋光素子を用い、旋光性を方位角方向に連続変化させる手法をとってきた。これに対して今回は、複屈折性フォトニック結晶(フォトニックラティス社製)の常光線軸方向を方位角方向に12分割する方法を採用した。図9に示すように、素子透過直後では旋光の境界線に起因する散乱成分が発生するが、その空間周波数は高いために遠視野パターンは良好なドーナツ分布が得られた。なお、このフォトニック結晶を $90^\circ$ 回転することによって、radial偏光とazimuthal偏光を切り替えることができる。

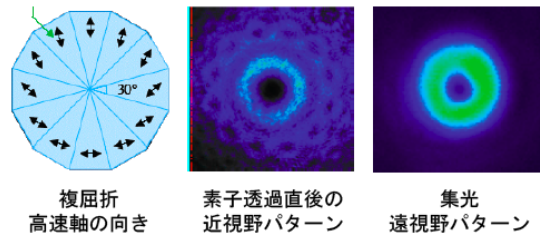


図9 軸対称偏光のTiサファイアフェムト秒ベクトルビームの発生結果。

## (3)ベクトルレーザーパルスと物質の相互作用

物質のアブレーション閾値近傍では、プラズモン生成等に起因する微細周期構造が形成され、その周期構造の方向がレーザー偏光に依存すること(微細構造の縞の方向は、一般的に吸収体では偏光方向と直交、非吸収体では平行)が知られている。そこで、 $100\text{fs}$  Tiサファイアベクトルレーザーパルスを用いて、p型Si(100)面に対して、微細周期構造の形成を試みた。レーザーパルスエネルギー $4\mu\text{J}$ であり、図10、11は各々radial偏光、azimuthal偏光の場合である。ドーナツパターンに対応して、各々同心状、放射状の微細周期構造が形成されている。図12は、この微細周期構造の形成を、さらに短パルスの可視域レーザー(パルス幅 $8\text{fs}$ 、中心波長 $650\text{nm}$ 、直線偏光)に適用した場合である。図12では集光スポット



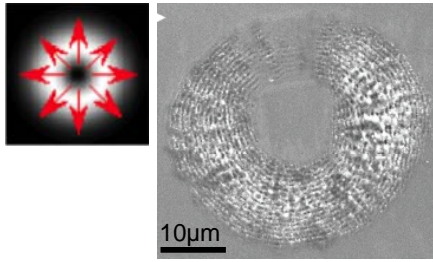


図10 100fsベクトルレーザーの集光によるナ期構(radial偏光, 4μJ, 30ショット).

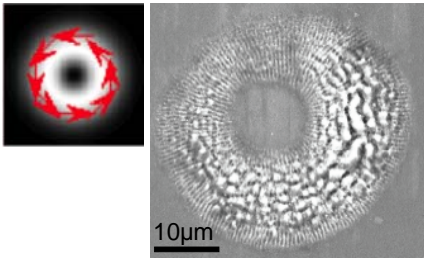


図11 100fsベクトルレーザーの集光によるナ期構(azimuthal偏光, 4μJ, 40ショット).

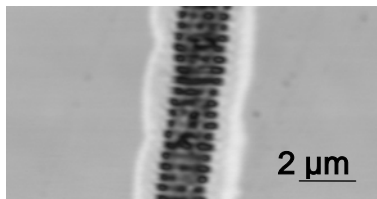


図12 8fsパルスレーザー掃引によるSi結晶表面のナノ周期構造の形成.

トを上下方向に掃引している。

図13にサブ10fsポンププローブ光学系のシステム構成を示す。反射型対物光学系を用い、3軸調整ステージ上の資料にポンプ光と遅延させたプローブ光を同軸入射し、反射光画像をCCDカメラで観測することができる。今後、このシステムを用いて、超短パルスベクトルレーザー光と物質との相互作用を時系列観察する計画である。

#### (4) プラズマ相互作用に関する粒子コード解析

高強度の超短パルスレーザーを低密度ガス中に入射した時、パルス幅が狭くなると、レーザーパルスの背後にプラズマ密度が希薄な領域(バブル)が発生し、単色の電子ビームが生成されることが理論的に予測されていた。本研究では、この現象を3D-PICを用いて詳細に検討し、その発現状態のレーザー・プラズマパラメーターを明らかにした。

図14に10fsレーザーパルス(中心波長800nm、照射強度 $10^{18}W/cm^2$ )の希薄プラズマ(電子

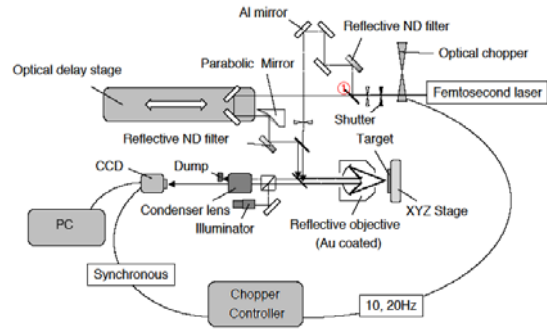


図13 フェムト秒ポンププローブ実験装置. 構成図(上)と写真(下).

密度  $n_0$ (=遮断密度/100) 中伝搬の計算結果を示す。図中の濃淡は電子密度を表し、白いほど密度が高いことを示す。伝搬するレーザーはプラズマ電子を前方に押しつける結果としてバブルが生じ、半径方向に逃れた電子は回り込んでバブルの根元で合流させられる。一部の電子がバブルの中に捕獲されて加速される。その結果として、図15のエネルギースペクトルに示すように、バブルに捕獲された電子の成分が高エネルギー側に準単色ビームとして現れていることが分かる。

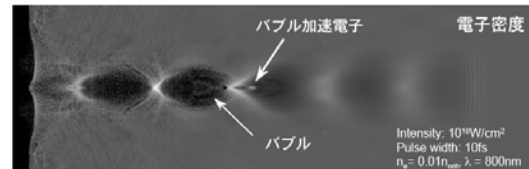


図14 10fsレーザーパルスの希薄プラズマ中伝搬の粒子コードによる計算.

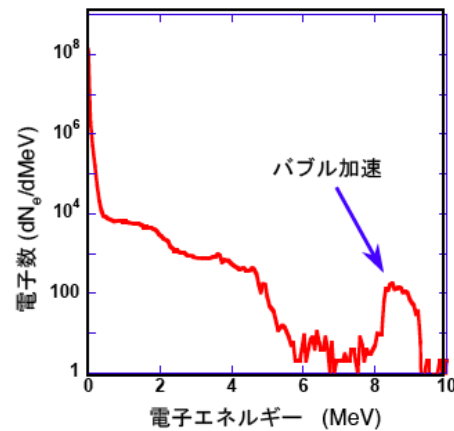


図15 10fsレーザーパルスによるバブル形成に伴う電子加速.

今後、開発した数 fs 超短パルスレーザー技術、位相・偏光分布制御技術と 3D-PIC コードを用いて、ベクトルレーザー・プラズマ相互作用の詳細な実験を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① K. Sueda, R. Nakajima, B. Zhao, T. Kawashima, M. Fujita, K. Yamakawa, N. Miyanaga, “Generation of self-phase-stabilized pulses for intense few-cycle laser system”, Laser Phys. Lett. (査読有り, 採択済み).
- ② 栗田隆史, 末田敬一, 関根尊史, 松本 修, 川嶋利幸, 河仲準二, 宮永憲明, “半導体レーザー励起Nd: ガラスCPAレーザーシステムによる非同軸光OPCPA励起光源の開発”, レーザー学会第 375 回研究会資料集, RTM-08-19, pp. 35-39 (2008) (査読無し).

[学会発表] (計 4 件)

- ① 本谷匡, 末田敬一, 栗田隆史, 関根尊史, 川嶋利幸, 山川考一, 藤田雅之, 河中準二, 小林孝嘉, 宮永憲明, “高出力数サイクルレーザー励起光源の開発”, レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会, 2009 年 1 月 10 日, 徳島大学.
- ② 鶴見洋輔, 井澤友策, 本越伸二, 末田敬一, 宮永憲明, 藤田雅之, “軸対称偏光フェムト秒レーザーによる Si のアブレーション”, 2008 年春季 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 29 日, 日本大学.
- ③ K. Sueda, N. Miyanaga, 他, “Generation of self-phase-stabilized pulses for intense few-cycle laser system”, Asian Pacific Laser Symposium 2008, 2007 年 12 月 17 日, 名古屋国際会議場.
- ④ 末田敬一, 宮永憲明, 他, “高出力数サイクルレーザーの開発”, レーザー学会第 369 回研究会, 2008 年 1 月 31 日, 徳島大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮永 憲明 (MIYANAGA NORIAKI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号: 80135756

### (2) 研究分担者

中田 芳樹 (NAKATA YOSHIKI)  
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: 70291523

椿本 孝治 (TSUBAKIMOTO KOUJI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教

研究者番号: 90270579

近藤 公伯 (KONDO KIMINORI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80225614

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

末田 敬一 (SUEDA KEIICHI)

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

井澤 友策 (IZAWA YUSAKU)

大阪大学・大学院工学研究科・博士後期課程学生

本谷 匡 (HONTANI TADASHI)

大阪大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生

鶴見 洋輔 (TSURUMI YOSUKE)

大阪大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生