

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287152

研究課題名(和文) 光渦による光励起素過程と新奇プラズマ分光・制御法の研究

研究課題名(英文) Study on photoexcitation, novel plasma spectroscopy, and plasma control method using optical vortex

研究代表者

荒巻 光利 (ARAMAKI, Mitsutoshi)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：50335072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円

研究成果の概要(和文)：光渦は近軸ヘルムホルツ方程式の円筒座標系の解であり、らせん状の等位相面を持つ。光渦が3次元のらせん状の等位相面を持つため、光渦中の観測者は3次元のドップラー効果を感じる。本研究では、光渦の特異なドップラー効果を利用して、ビームを横切る方向の流れに感度がある分光法を開発した。この光渦分光法により、ビームを横切るガス流を、光渦のドップラー吸収スペクトルおよび飽和吸収分光のLamb dipの横ドップラーシフトとして検出することに成功した。横ドップラーシフトの位相特異点からの距離に対する依存性は定性的に理論と一致したが、定量的な評価には、横ドップラーシフト検出の更なる精度向上が必要となる。

研究成果の概要(英文)：Optical vortex (OV) beams are a set of solutions of the paraxial Helmholtz equation in the cylindrical coordinates, and its wave front has a spiral shape. The observer in the OV beam feels the three-dimensional Doppler effect, since the OV beam has the three-dimensional spiral wave front. In this study, spectroscopy methods which have the sensitivity to the beam crossing gas flow have been developed. Using the optical vortex spectroscopy methods, the beam-crossing gas flow was successfully detected as the transverse Doppler shift of the Doppler absorption spectrum and the Lamb dip shift of the saturated absorption spectrum, respectively. The dependence of the transverse Doppler shift on the distance from the phase singularity qualitatively agrees with the theory, however, the further improvement in accuracy of the transverse Doppler shift detection is required for the quantitative evaluation.

研究分野：プラズマ工学，プラズマ分光

キーワード：光渦 プラズマ分光 ラゲールガウスビーム 横ドップラーシフト

1. 研究開始当初の背景

光渦とは、図 1(a)に示すように進行方向にらせん状の等位相面とポインティングベクトルを持つ伝搬モードの光のことで、進行方向に垂直な断面ではドーナツ型の強度分布と周囲方向に光の位相分布を持つ (図 1(b)). 回転方向の位相変化は $2\ell\pi$ で表され、光渦のねじれの程度を表すパラメータ ℓ をトポロジカルチャージと呼ぶ。

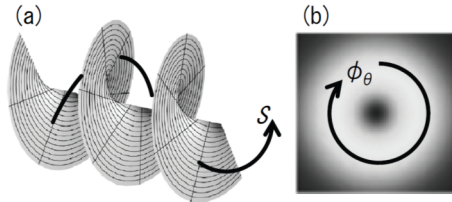


図 1 (a)光渦の等位相面とポインティングベクトル \mathbf{S} , (b)断面内の光強度分布と位相変化 ϕ_θ .

L. Allen 等は、光渦と原子の相互作用において、光の進行方向を軸とする円筒座標系で視線方向 z 、径方向 r 、方位角方向 θ の原子の速度 (V_z, V_r, V_θ) に対応したドップラーシフト ($\delta z \propto -kV_z, \delta r \propto -kr/z V_r, \delta \theta \propto -l/r V_\theta$) が生じることを理論的に示した [Optics Comm. **112**, 141-144 (1994)].

これまでに申請者等は、ドップラーレーザー誘起蛍光 (LIF) 法を用いた原子・イオンの流れ計測、レーザートムソン散乱による電子のドップラー分光計測等、ドップラー効果を利用した粒子輸送の研究を行ってきた。速度分布計測を可能にするドップラー分光法は、プラズマのダイナミクス理解のために大変有効な手段であるが、光源が平面波であるため、速度に対する感度が励起光の伝搬方向に依存した 1 自由度に限られるという強い制約があった。これに対して、本研究で開発する光渦分光法は、従来のレーザー分光法の特徴に加え、速度の 3 自由度に対する感度を取り入れることで、時間・位置空間・速度空間に分解能が得られるため、測定対象のダイナミクスに対する完全な情報が得られる分光計測法へと展開することが出来る。

2. 研究の目的

本研究では、光渦レーザーの特異な空間位相特性をプラズマ分光に利用することで、従来のドップラー分光法の常識を覆す、速度の 3 自由度に感度をもつ分光法を確立することを目的とする。近年、光科学の分野で開発された光渦レーザーは、らせん状の等位相面を持つ特殊な伝搬モードの光で、原子との相互作用において速度の 3 自由度にドップラー効果が働くという特徴がある。この新たな光源をドップラーレーザー分光に導入することで、従来は不可能とされていた光の伝搬方向を横切る流れの計測法を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、光渦をプローブ光に用いた光渦吸収分光法および光渦飽和吸収分光法を開発する。これらの光渦を用いた分光法では、原子スペクトルに現れる横ドップラーシフトを検出することで光の伝搬方向を横切る方向の流速が得られる。横ドップラーシフトの大きさは位相特異点からの距離に反比例するため、特異点近傍でスペクトルを観測することで、横ドップラーシフトの検出精度の向上が期待できる。従って、波長掃引しながらプローブビームの強度分布をカメラで記録し、位相特異点近傍のピクセルの強度データからスペクトルを構成し、横ドップラーシフトの特異点からの距離依存性を求めることで、本測定法の原理検証を行う。

光渦分光法を確立するため、以下の 4 項目について研究・開発を行った。

- (1) 波長可変光渦光源の開発
- (2) 2次元 FFT による光渦の位相構造解析
- (3) ドップラー分光測定系の開発
- (4) 横ドップラーシフトの評価

4. 研究成果

- (1) 波長可変光渦光源の開発

原子・分子のドップラーレーザー分光に適用するための波長可変光渦光源を開発した。光源には Ar 準安定原子励起用の 697 nm の外部共振器型半導体レーザー (ECDL: TOPTICA 社製 DL-100) を用いた。また、トポロジカルチャージを可変にするため、コンピュータに接続された空間光位相変調器 (SLM: 浜松ホトニクス社製 X10478-01) に表示した計算機生成ホログラム (CGH) によってガウスビームを光渦に変換する方式の光渦光源を構築した。

図 2 に開発した光渦光源とそのビームパラメータ測定系を示す。図 3(a)は、参照光としてガウス光、物体光として光渦を仮定して計算した CGH である。この位相変調パターンを SLM に表示してホログラム回折格子として用いる。CGH の中心に見られる枝分かれ部分が位相特異点を表現している。図 3(a)のホログラムにガウス光を入射することで、図 3(b)の光渦が 1 次回折光として得られる。コンピュータで所望のホログラムを生成し、SLM に表

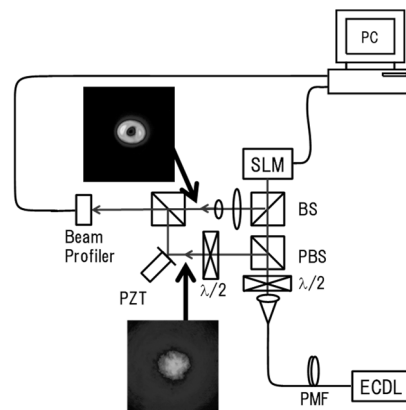


図 2 光渦分光実験系。

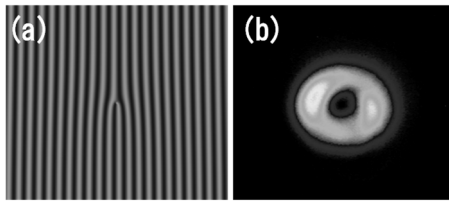


図3 (a) 光渦生成に用いるCGH, (b) 生成された光渦.

示することで容易にトポロジカルチャージが異なる光渦を生成することができる. ホログラムを変更し, 試験的にトポロジカルチャージが1から10までの光渦を発生させた. 光渦と平面波を干渉させ, ビーム断面での強度分布を観測することで, ビーム断面内の位相変化を確認することができる. 図4に, ビームプロファイラで観測した干渉縞を示す. 光強度の強い部分と弱い部分の1組が 2π の位相変化を示している. この図では, トポロジカルチャージに対応した数の干渉縞が得られており, 所望の次数の光渦が生成されていることが確認できる. また, 平面波との干渉計測で平面波の位相を掃引し, 光渦の位相回転方向(トポロジカルチャージの符号)を同定した.

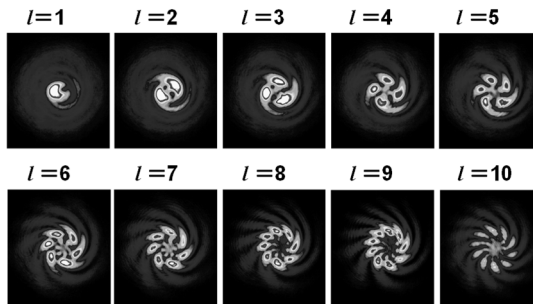


図4 光渦と平面波の干渉.
トポロジカルチャージ $l=1\sim 10$.

(2) 2次元FFTによる光渦の位相構造解析

方位角方向のドップラーシフトは特異点からの距離 r に反比例しているため, その評価には特異点の位置を特定する必要がある. 図5(a)に, 光渦とガウス光を斜めに重ねあわせることで得られた干渉縞の像を示す. 図3(a)のCGHと同様の枝分かれ構造が見られる. 図5(a)の干渉縞を2次元フーリエ変換し, 位相

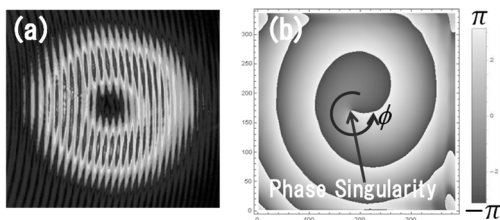


図5(a) 光渦とガウス光の干渉縞, (b) 2次元フーリエ変換によって得られる光渦の位相分布.

の空間分布を求めたのが図5(b)である. 方位角方向の位相分布の中心が, 位相特異点である. これにより, 位相特異点の位置を求め, 方位角方向のドップラーシフトを評価する際の基準とすることが出来る.

(3) ドップラー分光測定系の開発

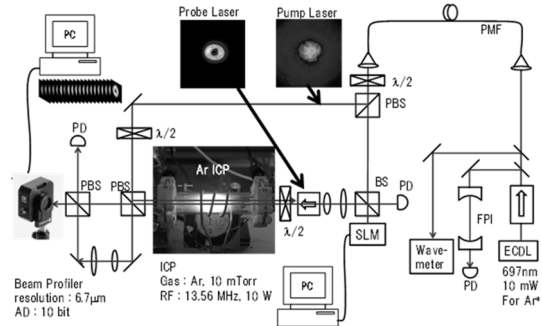


図6 光渦分光実験系.

図6に光渦吸収分光法および光渦飽和吸収分光法による横ドップラーシフト検出の原理実証を目的として開発した光渦分光実験系を示す. テストプラズマとして, ループアンテナに供給した高周波電力(13.56MHz, 10~80W)によって生成されたアルゴンの誘導結合プラズマを用いた. プラズマ中で生成された準安定状態のアルゴン原子を, 697nmの光渦を用いて計測する. ECDLの出力を偏光保持ファイバにカップルして光渦変換部に伝送する. 偏光ビームスプリッターでポンプ光とプローブ光に分離し, プローブ光はSLMでトポロジカルチャージが1の光渦に変換されてプラズマに入射される. 一方, 飽和吸収分光を行う場合は, 平面波のポンプ光を, プローブ光に対向する向きからプラズマに入射する. ECDLの波長掃引に伴うプローブ光の透過光強度変化は, ビームプロファイラによって2次元画像として記録される. 各ピクセルの光強度の変化からスペクトルを得る.

(4) 横ドップラーシフトの評価

図7に計算で求めた光渦吸収スペクトルの特異点からの距離依存性を示す. ガス流速は200 m/sを仮定しており, 特異点から1波長から10波長の距離での計算結果である. 10波長の距離では, 横ドップラーシフトは約30 MHzとなる. このことから, 位相特異点から数十波長程度の距離であれば, ドップラーспекトルにおける横ドップラーシフトの検出が

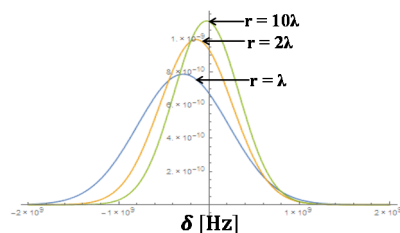


図7 光渦吸収分光におけるスペクトルの特異点からの距離依存性.

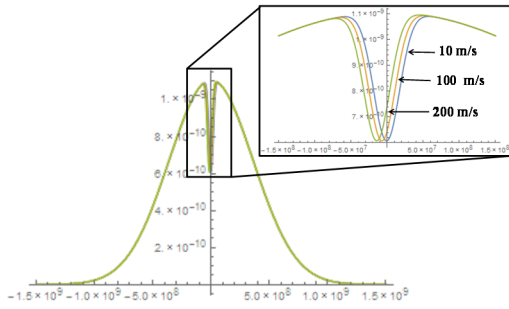


図 8 光渦飽和吸収分光における Lamb dip の周波数シフト.

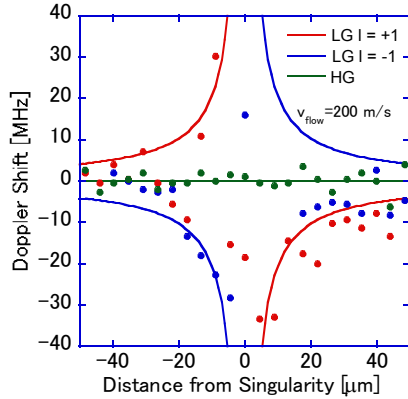


図 9 光渦吸収分光における、ドップラースペクトルの横ドップラーシフト.

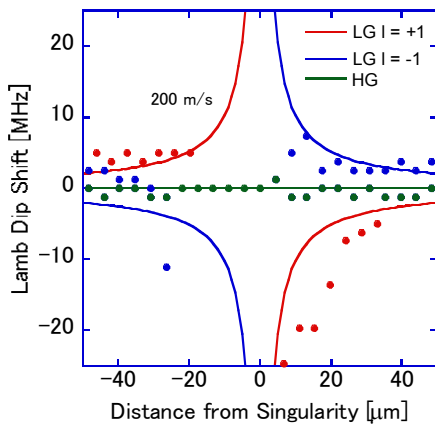


図 10 光渦飽和吸収分光における、Lamb dip の横ドップラーシフト.

可能であると考えられる. 一方, 図 8 に計算で求めた光渦飽和吸収スペクトルの横方向流速依存性を示す. 特異点からの距離は 10 波長とし, 10 ~ 200 m/s のガス流速における計算結果である. 光渦飽和吸収分光の特徴は, 通常の飽和吸収分光ではドップラー効果の影響を受けない Lamb dip の位置が横ドップラー効果により周波数シフトする点にある. ドップラーシフト量に対して, Lamb dip のシフト量は半分程度となるが, Lamb dip の線幅はドップラー広がり程度の 10 分の 1 程度のため, 光渦吸収分光よりも光渦飽和吸収分光の Lamb dip シフトを利用する方が, より高精度に横ドップラーシフトを評価

できる可能性がある. この二つの分光法で横ドップラーシフトを観測し, 理論と比較した.

実験では, 放電管に 280 cm の流量で Ar ガスを導入し, 200 m/s のガス流を生成した. ガス流に対して垂直方向よりトポロジカルチャージ ± 1 の光渦と平面波の 3 種類を導入し, スペクトルシフトの特異点からの距離依存性を実験的に観測した.

図 9 に光渦吸収分光で観測されたドップラーシフトの横ドップラーシフトを, 理論値とともに示す. 平面波のドップラーシフトがビーム中の位置に依存せず一定なのに対して, 光渦のドップラーシフトが特異点からの距離に依存して変化することが確認された.

Lamb dip の周波数シフトの特異点からの距離依存性を図 10 に示す. Lamb dip の周波数についても, 平面波による測定では位置によらずほぼ一定で, 光渦を用いた場合には特異点からの距離に依存して変化することが確認された. 本研究により, 光渦を用いた吸収分光および飽和吸収分光の双方において, 定性的に理論と一致する横ドップラーシフトを実験的に検出することに成功した. しかし, 流速の絶対値を評価するには, シフト量のより高精度な検出が必要であることが明らかになった.

(5) まとめ

本研究では, 光渦の特異なドップラー効果を利用して, ビームを横切る方向の流れに感度がある分光法を開発した. この光渦分光法により, ビームを横切るガス流を, 光渦のドップラー吸収スペクトルおよび飽和吸収分光の Lamb dip の横ドップラーシフトとして検出することに成功した. 横ドップラーシフトの位相特異点からの距離に対する依存性は定性的に理論と一致したが, 定量的な評価には, 横ドップラーシフト検出の更なる精度向上が必要であることが明らかになった.

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)

[学会発表] (計 25 件)

- (1) (招待講演決定) M. Aramaki, Detection of Transverse Doppler Shift using Optical Vortex, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, September 18-23, Chengdu, China, September, 2017.
- (2) 吉村信次, 小澤直也, 荒巻光利, 寺坂健一郎, 永岡賢一, 田中雅慶, 液晶ポリマー偏光素子を用いた光渦生成と吸収分光への適用, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日, 大阪大学 (豊中キャンパス)
- (3) 荒巻光利, 吉村信次, 森崎友宏, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 戸田泰則, 光渦飽和吸収分光における Lamb dip の周波数シフト, 日本物理学会 第 72 回年次大会,

- 2017年3月19日, 大阪大学(豊中キャンパス)
- (4) 小澤直也, 吉村信次, 荒巻光利, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 森崎友宏, 永岡賢一, 周方向ドップラーシフトに対するラゲールガウスビームの拡がりの効果, 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3月19日, 大阪大学(豊中キャンパス)
 - (5) S. YOSHIMURA, M. ARAMAKI, N. OZAWA, K. TERASAKA, M. TANAKA, K. NAGAOKA, T. MORISAKI, Azimuthal Doppler shift of absorption spectrum in optical vortex laser absorption spectroscopy, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, October 31 - November 4, 2016, San Jose, California, USA.
 - (6) S. YOSHIMURA, M. ARAMAKI, N. OZAWA, K. TERASAKA, M. TANAKA, T. MORISAKI, Laser absorption velocimetry using an optical vortex beam, 69th Annual Gaseous Electronics Conference, October 10th - 14th, 2016, Bochum, Germany.
 - (7) M. ARAMAKI, S. YOSHIMURA, Y. TODA, T. MORISAKI, K. TERASAKA, M. TANAKA, Detection of beam-crossing Doppler shift using an optical vortex beam, 69th Annual Gaseous Electronics Conference, October 10th - 14th, 2016, Bochum, Germany.
 - (8) 荒巻光利, 戸田泰則, 吉村信次, 森崎友宏, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 光渦レーザーを用いた飽和吸収分光におけるスペクトル形状の空間変化, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月15日, 金沢大学(角間キャンパス)
 - (9) 吉村信次, 荒巻光利, 小澤直也, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 永岡賢一, 森崎友宏, ラゲールガウスビームを用いた周方向ドップラー効果の観測 II, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月15日, 金沢大学(角間キャンパス)
 - (10) S. Yoshimura, M. Aramaki, N. Ozawa, K. Terasaka, M. Y. Tanaka, T. Morisaki, Proof-of Principle of Laser Absorption Velocimetry Using an Optical Vortex, 7th International Workshop on Plasma Spectroscopy, Jun. 26-29, 2016, Inuyama, Japan.
 - (11) 荒巻光利, 光渦レーザーを用いたドップラー分光 - 光の位相構造の利用 -, 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年3月21日, 東北学院大学(泉キャンパス).
 - (12) 小澤直也, 浅井翔馬, 吉村信次, 荒巻光利, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 森崎友宏, ラゲールガウスビームを用いた周方向ドップラー効果の観測, 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年3月20日, 東北学院大学(泉キャンパス)
 - (13) 吉村信次, 浅井翔馬, 荒巻光利, 小澤直也, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 森崎友宏, HYPER-I 装置における光渦を用いたレーザー吸収分光, 第32回プラズマ・核融合学会 年会, 2015年11月24日, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂.
 - (14) M. Aramaki, S. Yoshimura, Y. Toda, T. Morisaki, K. Terasaka, M. Y. Tanaka, Azimuthal Doppler Effect in Optical Vortex Spectroscopy, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 16, 2015, Savannah, Georgia.
 - (15) S. Asai, S. Yoshimura, M. Aramaki, N. Ozawa, K. Terasaka, M. Tanaka, T. Morisaki, Development of Experimental System for Optical Vortex Laser Absorption Spectroscopy, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 16, 2015, Savannah, Georgia.
 - (16) S. Yoshimura, S. Asai, M. Aramaki, K. Terasaka, N. Ozawa, M. Tanaka, T. Morisaki, Initial Results of Optical Vortex Laser Absorption Spectroscopy in the HYPER-I Device, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 16, 2015, Savannah, Georgia.
 - (17) 荒巻光利, 戸田泰則, 吉村信次, 森崎友宏, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 光渦レーザーを用いた飽和吸収分光における方位角方向ドップラー効果 II, 日本物理学会 2015年秋季大会, 2015年9月19日, 関西大学(千里山キャンパス).
 - (18) 浅井翔馬, 小澤直也, 吉村信次, 荒巻光利, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 森崎友宏, 光渦レーザーを用いた中性粒子流速計測法の開発, 日本物理学会 2015年秋季大会, 2015年9月19日, 関西大学(千里山キャンパス)
 - (19) M. Aramaki, Detection of azimuthal doppler shift using saturated absorption spectroscopy with optical vortex, the International Conference on Quantum, Atomic, Molecular and Plasma Physics, 4 Sep 2015, University of Sussex, Brighton, UK.
 - (20) (invited) M. Aramaki, Multi-dimensional Doppler Spectroscopy using an Optical Vortex Laser, 11th Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics, 28 May 2015, IGESA, Porquerolles Island, Hyères, France.
 - (21) 吉村信次, 荒巻光利, 寺坂健一郎, 浅井翔馬, 田部井翔太, 森崎友宏, 鹿野豊, 光渦レーザーを用いた中性粒子流速計測法の検討, 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月22日, 早稲田大学
 - (22) 荒巻光利, 吉村信次, 森崎友宏, 寺坂健

一郎, 戸田泰則, 田中雅慶, 光渦レーザーを用いた飽和吸収分光における周方向ドップラー効果, 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月22日, 早稲田大学.

- (23) 荒巻光利, 光渦レーザーを用いた2次元ドップラー分光, 「プラズマ分光と素過程研究の深化と展開」研究会, 2015年1月29日、核融合科学研究所.
- (24) (招待講演) 荒巻光利, 光科学を融合した新しいプラズマ物理研究, Plasma Conference 2014, 2014年11月18日～21日, 朱鷺メッセ, 新潟.
- (25) (invited) M. Aramaki, Precise plasma spectroscopy using a tunable diode laser, International Scientific Spring, March 10-14, 2014, Islamabad, Pakistan.

[その他]

ホームページ等

<http://aramaki-lab.ee.cit.nihon-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒巻 光利 (ARAMAKI, Mitsutoshi)
日本大学・生産工学部・准教授
研究者番号: 50335072

(2) 研究分担者

吉村 信次 (YOSHIMURA, Shinji)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 50311204

(3) 研究分担者

寺坂 健一郎 (TERASAKA, Kenichiro)
九州大学・総合理工学研究科(研究院)・助教
研究者番号: 50597127

(4) 研究分担者

戸田 泰則 (TODA, Yasunori)
北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 00313106

(5) 連携研究者

伊藤 清一 (ITO, Kiyokazu)
広島大学・先端物質科学研究科・助教
研究者番号: 70335719