

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006 年 ～ 2008 年  
 課題番号：18560791  
 研究課題名 (和文) レーザー爆縮における流体不安定性の非線形発展 - 渦の生成・消滅を伴うダイナミクス  
 研究課題名 (英文) Nonlinear evolution of hydrodynamic instability in laser implosion -vortex dynamics with creation and annihilation of vorticity  
 研究代表者  
 西原 功修 (NISHIHARA KATSUNOBU)  
 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：40107131

研究成果の概要： レーザー核融合における燃料の高密度圧縮に関連して、圧縮過程で生じる様々な流体不安定性の非線形発展を渦のダイナミクスの観点から明らかにしてきた。特に本研究では凹凸のある物質界面を衝撃波が通過することによって生じる不安定性を中心に、渦度の生成・消滅を伴う界面での非一様渦のダイナミクスを記述する非線形理論モデルの構築、分子動力学シミュレーションなどを行い、爆縮に伴う非線形成長の加速の存在などを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	570,000	3,870,000

研究分野：プラズマ物理、核融合、非線形物理、計算物理

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ、核融合、流体不安定性、非線形、渦、分子動力学シミュレーション、リヒトマイヤー・メシュコフ不安定性

## 1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合の燃料圧縮過程では、レーザーアブレーション面でのレーリー・テラー不安定性 (RTI) など、種々の不安定性の存在が知られている。その一つにリヒトマイヤー・メシュコフ不安定性 (RMI) がある。RMI は凹凸のある異なる流体間の界面 (接触面) を衝撃波が通過するとき生じる不安定性である。我々は、近年特にこの RMI を中心に取上げた研究を進めてきた。なぜなら、この不安定性は、加速時あるいは減速時に生じる RTI の種になる擾乱を生じさせることからレ

ーザー核融合において重要であるだけでなく、古くから知られている不安定性にもかかわらず、その線形成長率すら理論的に求められていなかったからである。RMI についてはいわゆるインパルスモデルが一般的に用いられていたが、このモデルは現象論的に提唱されたものであり多くの実験結果を説明できるものではない。厳密な理論計算を行い、解析解 (ただし数値的にしか計算できない) を求め、またその厳密解と一致する理論モデルを提唱してきた。その結果を Wouchuk-Nishihara 公式と呼ぶ人もいるが、まだ必ず

しも一般的には知られているわけではない。しかしながら、この理論結果の示すところはレーザー核融合研究にとどまらず、渦の新しい非線形問題を提起していること、すなわち界面での密度の跳びの存在による渦度の消滅・生成を伴う界面に局在した非一様な渦の非線形相互作用の問題として捉えられることが明らかになった。また我々のその後の研究結果から今日 RM-like 不安定性と言われるようになった広い範囲の問題に一般化できることが明らかになった。研究開始当時には、平面についての弱い非線形解が求まっていた。

## 2. 研究の目的

渦の相互作用は非局所的であり、RMI では接触面上に非一様に渦度が分布しているため界面のダイナミクスは非常に複雑な構造を生み出す。それだけでなく RMI では密度の跳びが存在するため渦度の生成・消滅を伴い、そのダイナミクスはさらに複雑になる。まず、平面の理論を、完全な非線形モデルに拡張する。さらにレーザー核融合の燃料圧縮の様に収縮系（球あるいは円筒系）に適用できるような非線形理論モデルを構築する。渦の3次元問題を理論的に扱うことは困難であるから円筒座標系に拡張する。また、弱い非線形だけでなく完全な非線形発展を解く理論に拡張する。非線形モデルに粘性や圧縮性を導入することは困難であるため、分子動力学コードを開発し、粘性・圧縮性の存在する円筒系の非線形発展を調べる。また、近年産業応用などにも広く用いられるようになったレーザーアブレーションやレーザー加速などに重要なレーザー生成プラズマの膨張過程などについて流体力学的な観点からそれらの理論モデルの構築、あるいは分子動力学シミュレーションを行いそれらの物理を解明する。前者の問題は近年 warm dense matter (WDM) と呼ばれる固体・液体・プラズマそれぞれの物理では扱うことが困難である状態として着目される様になってきた。

## 3. 研究の方法

### (1) 理論モデルの構築

① RMI の非線形発展を明らかにするために、不安定界面での密度の跳びに伴う渦度の生成・消滅を考慮した非線形理論モデルを導出した。特に摂動理論だけでなく、渦の非局所相互作用を記述する非線形積分方程式を導出した。その数値解法について特異点を取り除く近似などの高精度化を図った。

② レーザーアブレーション面での RTI を明らかにするため、アブレーションに伴うターゲットの質量変化を考慮した非定常なレ

ーザーアブレーションダイナミクスを記述する、自己相似解を導出した。また、レーザー生成プラズマの等温膨張ダイナミクス自己相似解を導出した。

### (2) 分子動力学シミュレーションコードの開発

レーザー燃料圧縮のような収縮系における流体不安定性の非線形ダイナミクスを明らかにするために分子動力学シミュレーションコードを開発した。また、レーザーアブレーションを記述できる分子動力学モデルを開発した。

## 4. 研究成果

(1) RMI の非線形発展 — 平面 — 接触面を挟んで存在する流体については非圧縮性を仮定し、摂動展開ではなく、完全な非線形理論モデルを構築した。この系では、渦の相互作用が非局所的であることから特異点を含む非線形微分積分方程式となる。したがって数値計算上の工夫が必要となる。米国物理学会のカレンダーにも掲載されたスパイラル形状を持つ接触面構造について、その物理的要因は先に述べた RM-like 不安定性であることを明らかにし、構築した線形理論の初期値・非線形理論を用いてその再現を試みたのが図1に示す結果である。そのプロファイルは個々の時間経緯を含め実験結果とよく一致する。

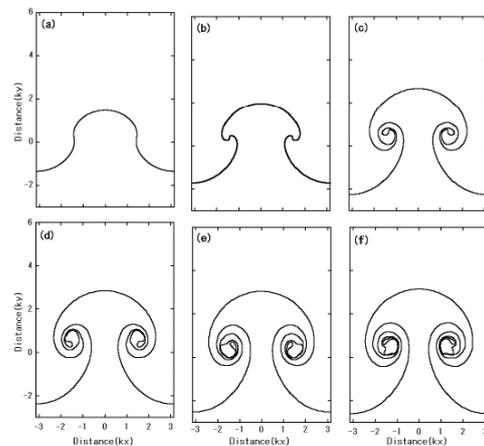


図1. Jacobs 達(Jacobs & Sheely, PF(96)) の実験に対応したスパイラル構造の理論解

また初期に複数のモードが存在する場合の結果を図2に示す。渦の相互作用は非局所的であるため非線形発展では各モードの位相によって現われる構造は異なってくるが、同様な形状は実験的にも観測されている。

### (2) 円筒座標系での RMI

#### ① 弱い非線形発展

実際の収縮座標系では、中心で衝撃波が反射

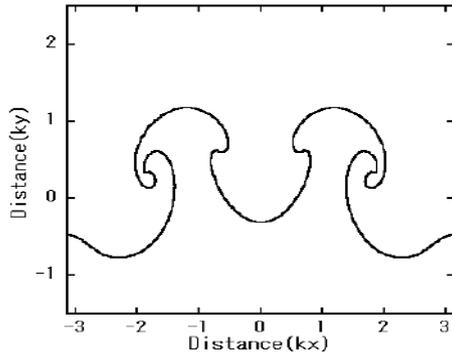


図2. 2つのモードが存在する場合のRMIの非線形発展

するため、非圧縮流体近似には限界があるが、円筒座標系の幾つかなの特長、例えば波長だけでなく初期半径という2つの異なる空間スケールが存在すること、あるいはスパイク・バブル構造だけでなく内向き・外向きへの成長の差異などが存在することなどが記述できる。

図3にいろいろな Atwood 数 ( $A = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_1 + \rho_2)$ )、およびモード数についてスパイクとバブルの非線形成長率を示す。ここで  $\rho_1, \rho_2$  はそれぞれ内側、外側の流体質量である。平面ではスパイクの非線形成長率がバブルの非線形成長率より大きい(図1, 2では下部の流体)、円筒座標系ではさらに内側に向

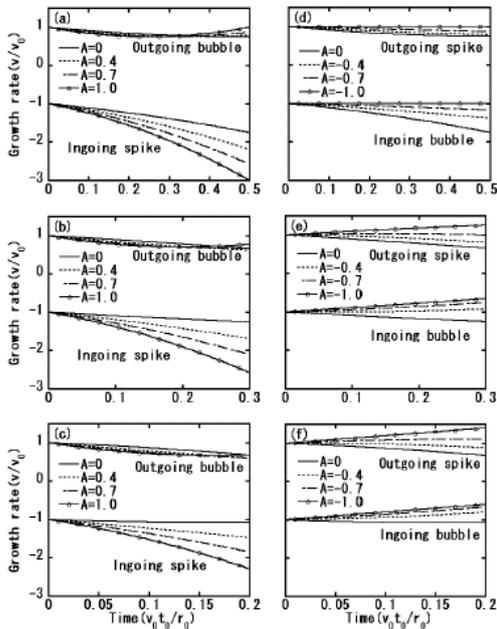


図3. 円筒座標系のスパイク・バブルの非線形成長率の時間変化。成長率、時間はそれぞれ線形成長率  $v_0$ 、および初期半径で規格化  $v_0 t / r_0$ 。上からモード数  $n = 1, 2, 3$ , 左図は、内側は軽い流体、右図は内側が重い流体。

かって成長するか、外側に向かって成長するスパイク・バブルによって非線形成長率が影響を受けることが明らかになった。さらに線形成長率で規格化しているにもかかわらず、非線形成長率はモード数によっても非常に異なった性質を示す。これは先に述べたように円筒座標系では半径と波長という2つの空間スケールが存在することに起因する。また内側に向かうスパイクの非線形成長率は、平面の場合と異なり、非線形成長率は線形成長率より大きくなる。これらの性質は Atwood 数の絶対値が大きいほど顕著である。これらのことからレーザー核融合の燃料とプッシュャーの質量差はなるべく小さくする必要があることが示唆される。

## ② 完全な非線形発展

円筒座標系についても摂動展開ではなく完全な非線形発展を記述できる理論モデルを構築し、数値計算を行った。

図4にいろいろなモード数ならびに2つの

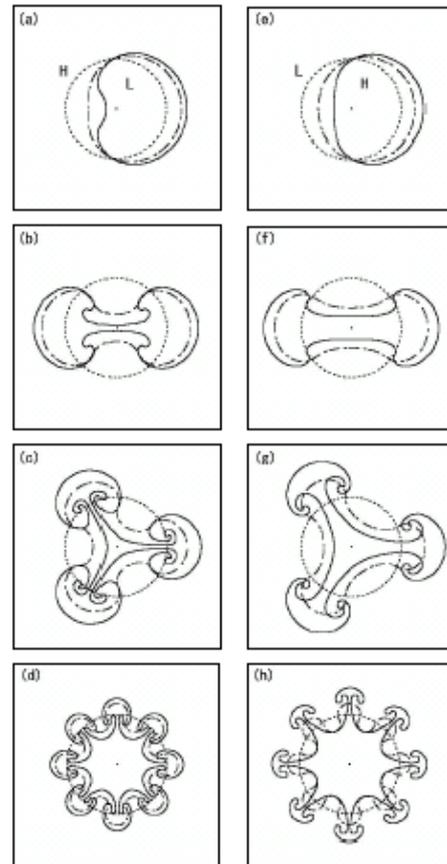


図4. 円筒座標系での接触面の非線形時間発展。上からモード数  $n = 1, 2, 3, 8$ 。左図は  $A = 0.2$ , 右は  $A = -0.2$ 。破線は初期形状、一転破線は(a), (e)は、線形成長率と半径で規格化した時間  $t = 0.3$ , 他は  $0.8$ 。実線は(a), (e)  $0.52$ , (b), (f)は  $t = 1.25$ , その他は  $t = 2.0$ 。

異なる Atwood 数について接触面の空間構造の時間変化を示す。この範囲の Atwood 数では、スパイクもバブルも同じような非線形成長を示し、内向き・外向き成長の差異が本質的となる。またモード数によって非常に異なる成長を示す。

(3) 分子動力学シミュレーション  
レナード・ジョーンズポテンシャルを用いた液体状態の物質（アルミニウムを想定）について円筒座標系での RMI の非線形発展を調べた。外側が重い流体。レイノルズ数は 40 程度と見積もることが出来る。図 5 に数密度と

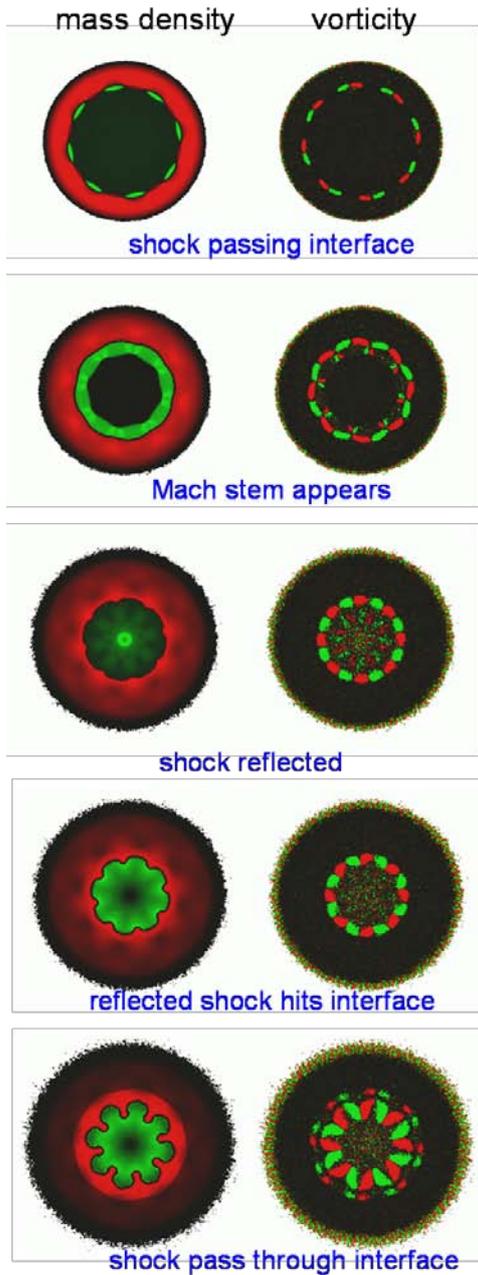


図 5. 分子動力学シミュレーションで求めた円筒系の RMI の非線形発展。左は数密度、右は渦度。

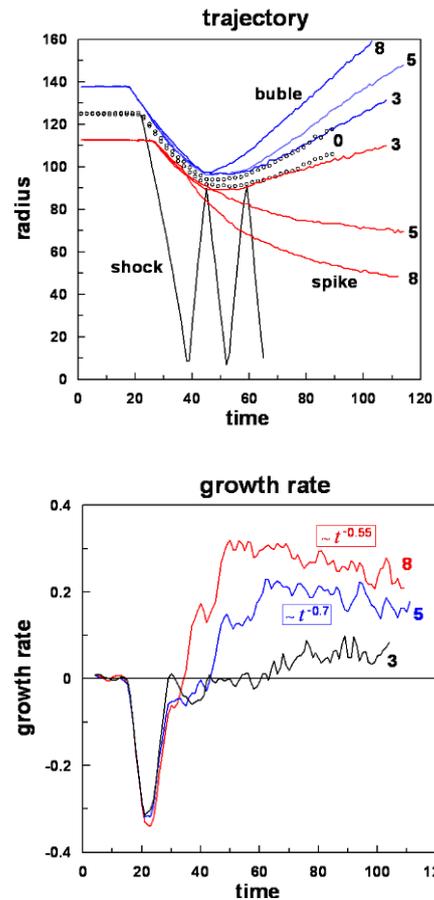


図 6. 衝撃波の軌跡、及び各モード  $n=3, 5, 8$  のスパイク・バブルの頂点の時間発展(上図)。各モードの非線形成長率の時間変化(下図)。負の成長率は振幅反転に対応している。

渦度の空間プロファイルの時間発展を示す。また、図 6 に衝撃波の軌跡、異なるモードのスパイク・バブルの頂点の軌跡(上図)と各モードの非線形成長率の時間変化を示す。衝撃波が重い流体から軽い流体に通過するため位相の反転が生じるが下図の負の成長率は移送反転に対応している。図から明らかなように、このような粘性流体においても衝撃波が接触面を通過することによって非一様な渦度の成長が生じる。また衝撃波は中心で反射し、この時衝撃波波面のリップルは消滅す

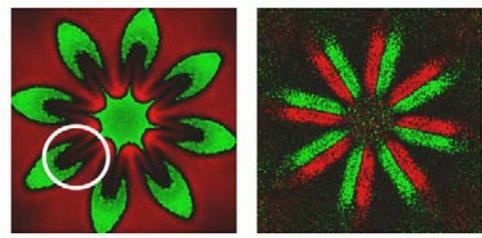


図 7. 渦度が大きい領域に見られる分子的なスケールでの異常拡散。左図は数密度、右図は渦度。

るが、再び接触面を通過する時に、接触面では強い渦度の成長が見られ、非線形成長率はさらに増加する。図6の上図の衝撃波の軌跡と下図の非線形成長率の時間変化とを比較すると、少なくとも中心で反射した衝撃波が2回通過し非線形成長の増加が観測されている。なお時空間の単位は分子動力学単位であり、モード数の大きいほど、つまり波長の短いほど成長率が大きい。

図7は、図5と同様に数密度(左図)と渦度を示すが、スパイクの根元の渦度の集中した領域で分子レベルの異常拡散が大きいことを示している(丸で囲んだ領域)。

図8には、質量の重い流体が軽い流体に挟まれている場合のRMI不安定性の成長を示したものであるが、間にある流体の幅が波長程度かそれ以下の場合には、二つの接触面での渦が相互作用を行い、高次モードが急激に成長することが観測された。

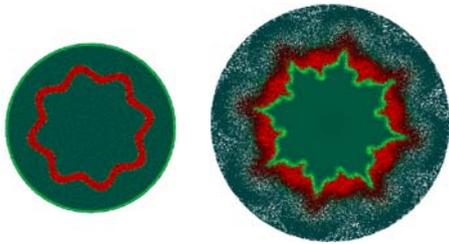


図8. 波長より短い幅を持った領域がサンドウィッチされた場合の数密度プロファイルの非線形発展。左図は初期状態。

(4) レーザー生成プラズマダイナミクスに関するその他の研究

① フェムト秒レーザーパルスによって生じるWDMに関する流体力学的性質について、主に分子動力学シミュレーションを用いた研究を行い、固体の表面ならびに裏面で生じる破壊現象は、表面での圧縮波の反射、あるいは衝撃波と膨張波との衝突に起因する負圧力によって新たに生じる衝撃波が重要であることなどを示した。破壊された物質の飛翔速度などを評価した(その詳細は発表論文①、⑧、⑨にゆずる)

② レーザー生成プラズマの等温膨張について、膨張プラズマの先端での自己生成電場を考慮した自己相似解を求め、電場によって加速されるイオンのエネルギー Spektrum を求めた。その結果を用いて高エネルギーイオン生成の新しい提案を行った。(その詳細は発表論文②、⑥にゆずる)

③ レーザー核融合の燃料ターゲット加速時に生じるレーザーアブレーション面

でのRTI不安定性の理論解析に重要なアブレーション面の構造を、アブレーションに伴うターゲットの質量変化を考慮した自己相似解モデルを構築した。RTI実験結果の評価などに適用した(その詳細は発表論文⑦にゆずる)

④ レーザー生成プラズマから放射される波長13.5ナノメートルの極短紫外光は、次世代半導体製造に必要なリソグラフィ光源として期待されているが、このレーザー生成プラズマの等温膨張について放射損失などを考慮した理論モデルを構築し、光源プラズマの最適化条件などを明らかにした。(その詳細は発表論文③にゆずる)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

- ① N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovskii, S. I. Ashitkov, Yu. V. Petrov, M. B. Agranat, S. I. Anisimov, K. Nishihara, and V. E. Fortov, “Nanospallation induced by an ultrashort laser pulse”, JETP **107**, 1-109 (2008). (査読有)
- ② M. Murakami and M. Tanaka, “Nanostructure explosion and quasi-monoenergetic spectra by homogeneously distributed impurities”, Phys. Plasmas **15**, 082702 (2008). (有)
- ③ K. Nishihara, A. Sunahara, A. Sasaki, M. Nunami, H. Tanuma, S. Fujioka, Y. Shimada, K. Fujima, H. Furukawa, T. Kato, F. Koike, R. More, M. Murakami, T. Nishikawa, V. Zhakhovskii, K. Gamata, A. Tanaka, H. Ueda, H. Nishimura, Y. Izawa, N. Miyanaga and K. Mima, “Plasma physics and radiation hydrodynamics in developing an extreme ultraviolet light source for lithography”, Phys. Plasmas **15**, 056708 (2008). (有)
- ④ V. V. Zhakhovskii, N. A. Inogamov, K. Nishihara, “New mechanism of the formation of the nanorelief on a surface irradiated by a femtosecond laser pulse”, JETP Lett. **87**, 423-427 (2008). (有)
- ⑤ C. Matsuoka and K. Nishihara, “Multi-mode character of the nonlinear dynamics of a vortex sheet in Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities”, J. Phys. Conf. Ser. **112**, 022020 (2008). (有)
- ⑥ PY Ye, A. Tanaka, M. Nunami, M.

- Murakami and K. Nishihara,  
 “Multi-species ion acceleration in  
 expansion of finite-size plasma  
 targets”, Plasma Fusion Res. **3**, 035  
 (2008). (有)
- ⑦ M. Murakami, T. Sakaiya and J. Sanz,  
 “Self-similar ablative flow of  
 nonstationary accelerating foil due to  
 nonlinear heat conduction”, Phys.  
 Plasmas **14**, 022707 (2007). (有)
- ⑧ M. B. Agranat, S. I. Anisimov, S. I.  
 Ashitkov, V. V. Zhakhovskii, N. A.  
 Inogamov, K. Nishihara, V. V. Petrov,  
 V. E. Fortov, V. A. Khokhov, “Dynamics  
 of plume and crater formation after  
 action of femtosecond laser pulse”,  
 Appl. Surface Sci. **253**, 6276-6282  
 (2007). (有)
- ⑨ S. I. Anisimov, V. V. Zhakhovskii, N. A.  
 Inogamov, K. Nishihara and Y. V. Petrov,  
 “Simulation of the expansion of a  
 crystal heated by an ultrashort laser  
 pulse”, Appl. Surface Sci. **253**,  
 6390-6393 (2007). (有)
- ⑩ C. Matsuoka and K. Nishihara,  
 Analytical and numerical study of a  
 vortex sheet in incompressible  
 Richtmyer-Meshkov instability in  
 cylindrical geometry, Phys. Rev. E **74**,  
 066303 (2006) (有)
- ⑪ S. I. Abatzhi, K. Nishihara and R.  
 Rosner, “Multiscale character of the  
 nonlinear coherent dynamics in the  
 Rayleigh-Taylor instability”, Phys.  
 Rev. E **73**, 036310 (2006). (有)
- ⑫ C. Matsuoka and K. Nishihara, “Fully  
 nonlinear evolution of a cylindrical  
 vortex sheet in incompressible  
 Richtmyer-Meshkov instability”, Phys.  
 Rev. E **73**, 055304 (2006). (有)

[学会発表] (計 13 件)

- ① K. Nishihara, “Generation of  
 nonuniform vorticity at interface and its  
 linear and nonlinear growth”,  
 International Conference on Turbulent  
 Mixing and Beyond, Trieste, Italy, Aug.  
 18-20, 2007.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西原 功修 (NISHIHARA KATSUNOBU)  
 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：40107131

### (2) 研究分担者

村上 匡且 (MURAKAMI MASAKATSU)

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：80192772

### (3) 連携研究者

松岡 千博 (MATSUOKA CHIHIRO)

愛媛大学・理学部・助教

研究者番号：10270266

### (4) 研究協力者

Zhakhovskii Vasilii, V.

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