

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740307

研究課題名（和文） ボース凝縮体を用いた複雑形状量子渦エンジニアリングとそのダイナミクスの実時間観測

研究課題名（英文） Towards complex-shaped vortex engineering and its real-time imaging

研究代表者

岸本 哲夫（KISHIMOTO TETSUO）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：+\$(\&amp;\&amp;' -`

研究成果の概要（和文）：

斥力型や引力型の光双極子ポテンシャルを用いた量子渦の生成や制御に関する新たな手法の提案を行った。また、その実現に向けて、基底状態のエネルギー準位の光シフトと比べて励起状態の光シフトが非対称となるような光双極子ポテンシャルを用いることで量子気体中の局所的なエンジニアリングが可能となると考え、飽和吸収分光法を用いてその光双極子ポテンシャルに最適な波長を実験的に探した。さらに、光シフトの局所操作で必要となる長作動距離かつ高分解能な結像系の技術構築も進めた。

研究成果の概要（英文）：

We proposed methods to generate and manipulate quantum vortices using optical dipole potentials produced by red- or blue-detuned lasers. To experimentally realize such methods, we think that local engineering of an asymmetric AC-Stark shift between the excited state and the ground state of an atomic Bose-Einstein condensate will be important. Differential AC-Stark shifts for such states were measured by monitoring the shift in a saturated absorption spectroscopy signal and the optimal wavelength for the optical dipole potential was determined from them. Further, to obtain high enough resolution that enables local light-shift engineering, we developed an optical system that provides both a large numerical aperture and a long working distance that fits outside our vacuum system.

交付決定額

（金額単位：円）

|       | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 交付決定額 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮、極低温量子ダイナミクス

## 1. 研究開始当初の背景

量子渦はボース凝縮系に特有である安定な位相欠陥があり、特に超流動ヘリウムを舞台とした低温物理学の研究において、盛んに研究が行われてきた。近年では、希薄な原子気体ボース・アインシュタイン凝縮気体(BEC)でも量子渦が観測され、スピン

自由度を持った BEC へ量子渦を拡張することで、さらに大きな発展を遂げている。この原子気体 BEC は低密度で原子間相互作用が弱いため、渦芯の大きさが  $\mu\text{m}$  オーダーとなり、量子渦を可視化できる利点を持っている。また、原子気体 BEC は制御性が高く、非共鳴光や磁場などを用いた種々の方法で量子渦を発生させることが可

能となっている。これまでに、高速回転させた BEC による三角格子、四角格子のような渦糸格子構造の観測や高次量子渦なども観測され、原子気体 BEC の少量量子渦や 2 次元配向量子渦のダイナミクスも解明されてきた。

一方、3 次元的な構造を持つ量子渦に関するダイナミクスとして乱流などに見られる量子渦の運動や渦糸間の相互作用に関する研究は、ヘリウムによる実験や理論が先行している。ごく最近になって、量子気体を用いた実験的研究においても 2 軸歳差回転によってランダム配向した量子渦群を生成させてできる乱流を飛行時間法により観測するような実験が報告されている。今後、量子気体を用いて量子乱流を始めとした量子渦の 3 次元動的ダイナミクスの研究やさらにこれらに内部自由度を持った系を拡張することによって、新奇現象の発現が期待される。

## 2. 研究の目的

3 次元量子渦構造が量子渦の研究における新しいプラットフォームとなる中で、複雑な現象の時間発展を観測できることが、ダイナミクスの解明にとって不可欠となる。複雑な形状をした量子渦の場合、位置、形状、渦度といった初期値の設定が一般に難しいため、実験でそのダイナミクスを再現することが難しくなる。そこで、もし理論計算の場合と同様に、乱数でない任意の初期値を設定し、トラップ中の系の時間発展を観測可能になれば、詳細な系のダイナミクスに関して理論との比較が容易となる。そのために、比較的単純な再現性のある 3 次元量子渦構造の生成・制御方法を確認し、そのダイナミクスの観測を行うことで、より複雑な量子渦構造の理解への橋渡しとなると考えている。

これらの実現に向けて、初期値が設定可能な量子渦の生成方法や制御の新たな方法を提案し、そのための技術を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 位置、形状、速度、方向などの初期値を設定可能な量子渦の生成や制御方法を確認するため、これらの制御性が良い新たな手法の提案を行う。

(2) 3 次元の量子渦構造の生成には、トラップされた量子気体中の局所操作が不可欠である。そのためには、局所的に大きな AC シュタルクシフトを非共鳴光によって生じさせ、最大シュタルクシフト量近傍に離調

した光を照射することで、局所操作を行うことが可能となる。よって、このシュタルクシフト量を知ることが重要となるため、分光法を用いてそのシフト量の測定を行う。

(3) 量子気体中への光双極子ポテンシャルを用いた渦の描き込みやその渦の時間発展の実時間観測に向けて、空間分解能数  $\mu\text{m}$  程度の結像系の構築を行う。

4) 量子渦を描き込み可能な大きい BEC の生成に向け、冷却原子の光双極子トラップ (ODT) へのより効率的なロード方法を確立する。

## 4. 研究成果

(1) 初期値を設定可能な量子渦の生成や制御方法の提案

斎藤弘樹氏のグループとの共同研究で、赤方あるいは青方離調した非共鳴光双極子ポテンシャルを振動させることで、量子渦対を周期的に指向性を持って放出させる方法を見出した。さらに、出射速度の制御も可能であることを示し、また出射方向前方に新たな光双極子ポテンシャルを用意しておくことで、屈折方向も制御可能であることを見出した。

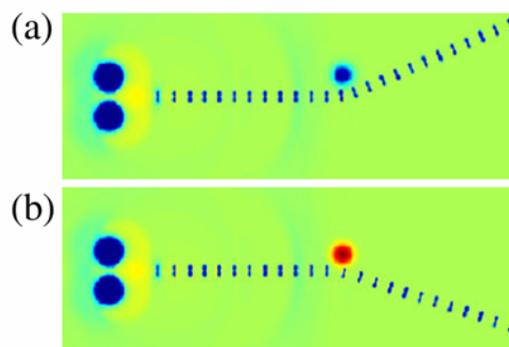


図 1: 量子渦対列の生成とその進行方向の屈折制御

(2) トラップされた量子気体中の局所操作に向けた光シュタルクシフトの観測  
基底状態のエネルギー準位の光シフトと比べて大きく非対称に励起状態の光シフトを生じさせることでトラップ中の量子気体への局所アクセスを実現したい。ここでは光双極子ポテンシャルの波長は、基底状態との間と比べて、冷却遷移の励起状態とそれより高い励起状態の間の方が波長が近いように選ぶ。これにより、トラップポテンシャルの形状はほとんど乱されずに、トラップ中の局所部分へのアクセスが可能になると考えた。そのためには AC シュタルクシフト量の見積もりが必要なので、実験的に飽和吸収分光法を利用して、常温原子集団を使って分光信号のシフト量からその見積もりを行った。

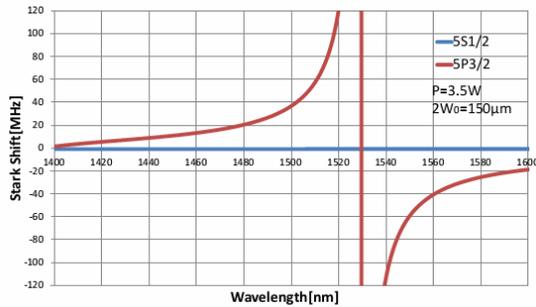


図2：<sup>87</sup>Rb 冷却遷移の各準位の光シュタルクシフト量の波長依存性（計算値）

<sup>87</sup>Rb 原子は、1529nm 近傍に 5P3/2-4D3/2, 5/2 遷移が存在するため、図2のように、5P3/2 のエネルギー準位が 5S1/2 基底状態に比べて大きくシュタルクシフトされる。

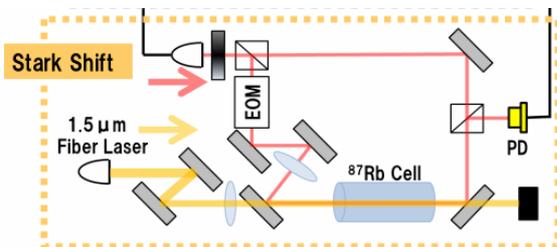


図3：飽和吸収分光法の配置にACシュタルクシフトを生じさせる 1.5 μm レーザーを重ね合わせた実験配置図

1.5 μm レーザーのビーム径は約 140 μm として、5S1/2 と 5P3/2 準位のシュタルクシフト量の差を観測した結果が図4のようになる。今回使用した光源が出力可能な波長範囲の制約から、1540nm 近傍までの分光となっている。

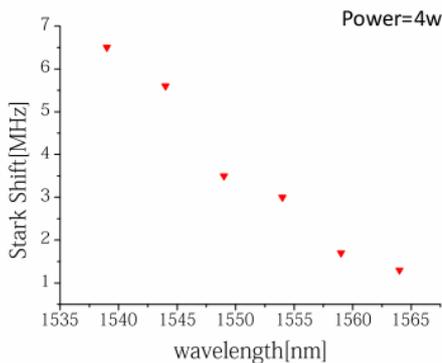


図4：5S1/2 と 5P3/2 準位のシュタルクシフト量の差の波長依存性を観測した実験結果

1540nm レーザーによる光シフト量が、図4のように観測できたことで、今後ビーム径を数 μm 以下でパワーを数百 mW 程度にしても GHz 程度のシュタルクシフトが実現できることが見積られる。このシフト量は、シュタルクシフト光の焦点周辺のみ共鳴近傍にしつ

つ、その周りは非共鳴に感じさせるに十分な離調となると考えられ、この手法でトラップされた量子気体中の局所操作ができることになる。

### (3) 高分解能結像系の構築

希薄量子気体中の渦芯のサイズである空間分解能数 μm 程度の結像系の構築を行った。

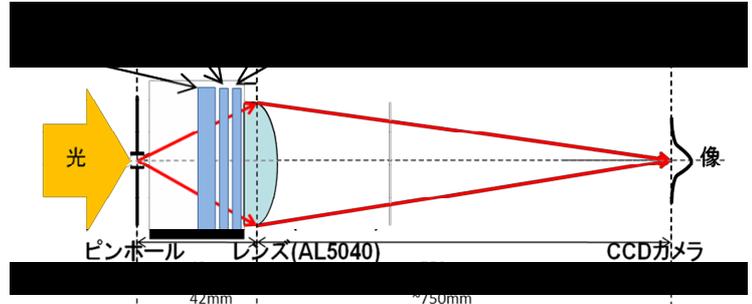


図5：量子気体中の量子渦のダイナミクス観測の実験系を模した光学系による長作動距離高分解能結像系

真空装置の大きさの制約から、長作動距離（40mm 程度）で分解能数 μm 程度の結像系が必要となるが、今回、いくつかの市販の高分解能レンズの評価実験を行い、結果として NA=0.554、焦点距離=40.0mm のレンズを選定した。このレンズでは、波長 780nm の光を用い、直径 1 μm (渦芯の大きさのオーダー) のピンホールを 17 倍程度に拡大結像し、光軸に波長板やガラスセル真空装置を模した 5mm 厚ガラス板が入った状態で分解能 2.2 μm を得た。これにより、量子渦の生成や操作に必要な緩くトラップされる BEC 中への局所アクセスができるようになる。また、それらの量子渦の渦芯のトラップ中における時間発展の実時間観測が可能となる。

### (4) 冷却原子の光双極子トラップ (ODT) へのより効率的なロード方法の開発

通常の nS-nP 遷移を用いた場合と比べ、nS-(n+1) 遷移による冷却は、線幅が狭くなる利点がある。具体的には、<sup>87</sup>Rb 原子において、(5S<sub>1/2</sub>)F=2 → (6P<sub>3/2</sub>)F'=3 [420nm] の冷却遷移は自然線幅が 780nm 遷移の 1/5 程度なため、ドップラー冷却の限界温度 (∝ 自然線幅) が下がる大きなメリットがある。また、波長が短くなるため、吸収断面積 (∝ λ<sup>2</sup>) が小さくなり、冷却過程で生じる自然放出光の再吸収による限界密度を向上されることが可能となる。これらのことから、蒸発冷却を始める際の初期位相空間密度 (∝ 密度/温度<sup>3/2</sup>) が 2 桁以上上がるため、格段の improvement が期待される。

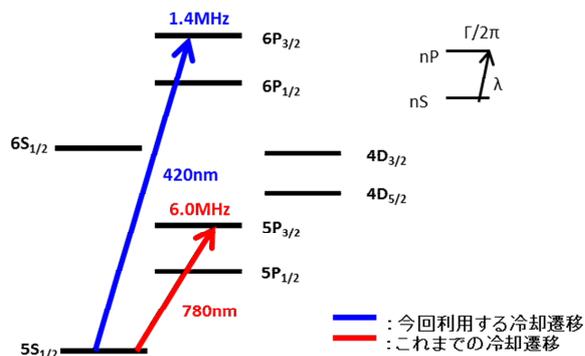


図6：<sup>87</sup>Rb 原子のエネルギー準位図

そこで、まず線幅狭窄化光源の作成を行った。具体的には、NICHIA の 420nm 半導体レーザーを用いて、Littrow 配置の外部共振器型半導体レーザーを組み、飽和吸収分光法によって原子の遷移に周波数ロックし、波長の安定化を行った。

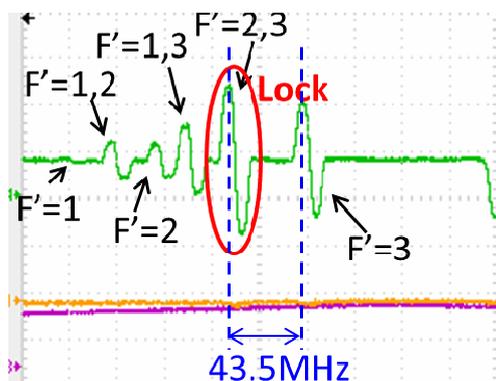


図7：5S<sub>1/2</sub>-6P<sub>3/2</sub> 遷移近傍で周波数掃引した時の飽和吸収分光信号(～420.3nm)

また、光双極子トラップを行う際には、各エネルギー準位に対して、シュタルクシフト量が 1.5 μm 近辺で波長にとっても敏感となるため、次に 1.53-1.55nm の間で波長を変えて、420nm に対する各準位でのシュタルクシフト量の差の波長依存性も実験的に観測した。この分光実験の結果から、現在 420nm 遷移に対するマジック波長を同定中である。これらのことにより、MOT 外側(780nm に近共鳴)で室温原子を集めてきて、MOT 中心近傍(420nm に近共鳴かつ 780nm に非共鳴)で 50 μK 前後の温度まで冷却されることが期待され、今後 420nm と 780nm の MOT が共存させることで、より効率的な光双極子トラップへのロード方法となると考えている。

#### (5) その他の進展

##### ① 3nm 干渉フィルタを用いた外部共振器型半導体レーザー(ECDL)の試作

反射型回折格子を用いた ECDL には、Littrow 配置や Littman 配置があるが、これらは回折格子を用いることで外部共振器を形成し狭線幅を得る。その時、発振波長の安定化が重要となるが、これらの構造は振動に弱い。また、広い波長掃引を必要とする実験の場合、反射型回折格子を用いた外部共振器型レーザーは出射方向がずれていくので後段のファイバー等の光学素子へのアライメントがずれてしまう。一方で、干渉フィルタを用いた ECDL は、図8の非球面レンズ①と部分反射ミラーによってキャッツアイ反射配置をとることができるので振動に強く長期安定性がある。また、インラインの透過型の構造のため、波長掃引してもアライメントが動かない利点がある。そこで、今回 3nm 帯域幅の干渉フィルタを用いたインライン型外部共振器半導体レーザーを試作した。

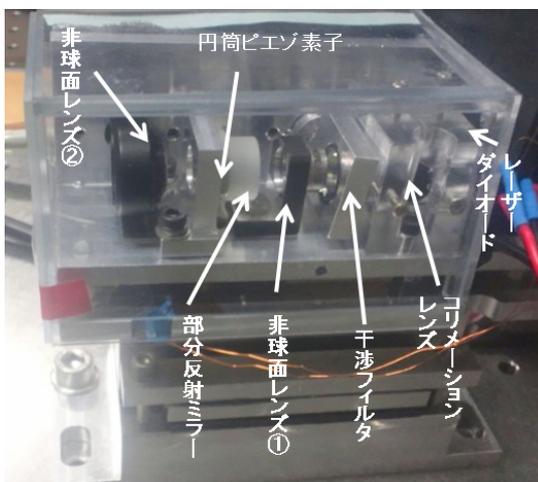


図8：3nm 帯域幅干渉フィルタを用いた ECDL

反射防止膜なしの半導体レーザーを用いて、1-2GHz 程度のモードホップフリーレンジを得た。また、PZT 素子へ戻す信号の定数倍の信号を半導体レーザーの電流に戻すことで、10GHz を超えるモードホップフリーレンジを達成させ、非常に安定なインライン型 ECDL となった。

##### ② 体積型ホログラフィック回折格子(VHG)を用いた外部共振器型半導体レーザー

近年、市販で高出力半導体レーザーが手に入るようになったため、今後これらを用いた外部共振器型レーザーにより、比較的安価に高出力な狭窄化安定化光源の開発が可能と考える。そこで、体積型ホログラフィック回折格子(VHG)を用いた外部共振器型半導体レーザーの技術開発も行った。

VHG はブラッグ角で設計波長の光のみを回折させ、残りは透過する。この VHG を ECDL に組み込むと、LD Gain カーブが VHG のバンド幅により切り取られ、さらに外部共振条

件によって切り取られる。尚、VHG のバンド幅はその厚みを  $L$  とすると、以下のような式で表せる。

$$\text{VHG のバンド幅 } \Delta\lambda_{\text{VHG}} = \frac{\lambda^2}{\pi \cdot L}$$

また、VHG は一般にガラスでできているため、吸収が少なく、数十 W のハイパワーでも損傷せず、さらに偏光依存がない利点がある。この VHG は、垂直入射で使用する設計でバンド幅と回折効率（反射率）が正しく製作されていれば、図 9 のような極めてシンプルな光学系でインライン型の外部共振器型レーザーが実現可能となる。

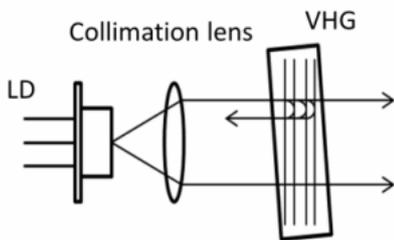


図 9 : VHG を用いた ECDL の原理概略図

実際には、VHG の厚みや屈折率が温度に依存するためブラッグ条件が変化し、最適回折角や、回折効率が変化する。狭線幅安定化光源として用いる場合、この変化が許容範囲かどうか調べる必要がある。

そこで、図 10、図 11 のように VHG への入射角（垂直入射）に対する回折角（反射角）と回折効率の温度依存性を測定した。尚、今回用意できた VHG は、入射角と回折角が重なる角度  $\theta'$ （上記の  $\theta=0^\circ$ ）において設計波長 780.25nm (Actual ~780.32nm)、バンド幅は 0.13nm (64GHz)、回折効率 14%、サイズ 6.5×3.0×1.5mm (ONDAX 社製)であった。しかし、今回目指す波長は 780.25nm であったので、設計波長から 0.07nm ずれていた。

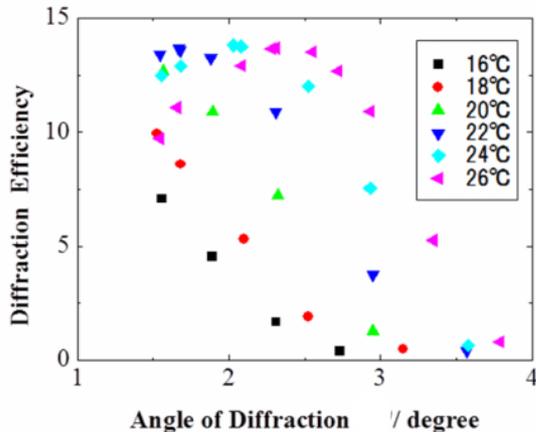


図 10 : 回折効率の角度・温度依存性

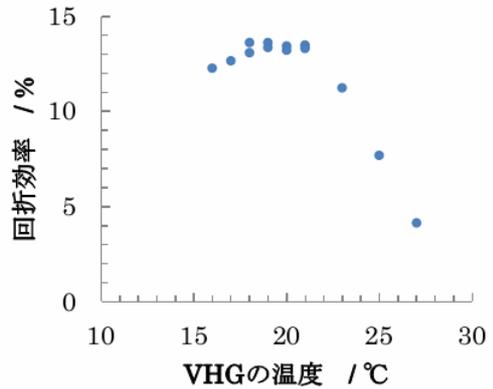


図 11 : 入射角=回折角での温度依存性

結果として、室温 16~22°C では回折効率の大きな変化はなく、また、回折角の変化による外部共振の条件も大きく変化しなかった。この VHG を用いて、780nm の外部共振器型半導体レーザーを実際に組み、モードホップフリーレンジは 6GHz 以上を得た。

これらの結果から、VHG を用いることで高出力半導体レーザーに対応可能なインライン型の外部共振器型レーザーが製作可能と考える。

#### 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 3 件)

- ① Tsuyoshi Kadokura, Tomohiko Aioi, Kazuki Sasaki, Tetsuo Kishimoto, and Hiroki Saito, "Rayleigh-Taylor instability in a two-component Bose-Einstein condensate with rotational symmetry" *Phys. Rev. A* 85, 013602 (2012)[4 pages] [10.1103/PhysRevA.85.013602](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.85.013602) <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.85.013602> 査読あり
- ② Tomohiko Aioi, Tsuyoshi Kadokura, Tetsuo Kishimoto, and H. Saito, "Controlled generation and manipulation of vortex dipoles in a Bose-Einstein condensate" *Phys. Rev. X*, 1, 021003 (2011)[10 pages] [10.1103/PhysRevX.1.021003](https://doi.org/10.1103/PhysRevX.1.021003) <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.1.021003> 査読あり
- ③ Kiyotaka Aikawa, Jun Kobayashi, Kohei Oasa, Tetsuo Kishimoto, Masahito Ueda, and Shin Inouye, "Narrow-linewidth light source for a coherent Raman transfer of ultracold molecules" *Opt. Express*, 19, 14479 (2011)[8 pages]

10.1364/OE.19.014479

<http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.014479>

査読あり

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① Tetsuo Kishimoto, “Towards Continuous Loading of Dense and Cold Rubidium Atoms into an Optical Dipole Trap”, 10<sup>th</sup> Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Taipei, TAIWAN (2012). (Invited talk)
- ② Rui Kouno, Yuta Yoshino, and Tetsuo Kishimoto, “Laser Cooling of Rubidium Atoms Using the 5S-6P Transition”, 10<sup>th</sup> Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Taipei, TAIWAN (2012).
- ③ 門倉強, 相生智彦, 佐々木一樹, 岸本哲夫, 斎藤弘樹, “2 成分 BEC における回転対称性を破るレイリー・テイラー不安定性” 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月, 関西学院大学
- ④ 相生智彦, 門倉強, 岸本哲夫, 斎藤弘樹, “レーザー光を用いたボース凝縮体における量子渦対の生成と制御” レーザー学会第 32 回大会, 2012 年 1 月, TKP 仙台カンファレンスセンター
- ⑤ 岸本哲夫, 稲田博之, 三浦拓朗, 下平崇之, 斎藤弘樹, “2 成分 BEC による回転位相整合性のブロッキングとダイナミクス観測に向けて” レーザー学会第 32 回年次大会, 2012 年 1 月, TKP 仙台カンファレンスセンター
- ⑥ 相生智彦, 門倉強, 相生智彦, 岸本哲夫, 斎藤弘樹, “様々なポテンシャルによる量子渦対の生成と制御” 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月, 富山大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://klab.pc.uec.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岸本 哲夫 (KISHIMOTO TETSUO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・  
准教授

研究者番号：70420239