

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用
を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」

研究課題
「ポケットサイズレーザー冷却システムの開発」

研究終了報告書

研究期間 平成28年10月～平成30年3月

研究代表者：上妻 幹旺
(東京工業大学理学院、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究は、元々平成 28 年 10 月から平成 34 年 3 月までの 5 年半に渡って遂行する計画であったが、研究代表者が平成 29 年 11 月 1 日より JST 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型を開始した関係で、研究費の過度な集中を避けるために今年度をもって終了することとなった。5 年半の計画には届かないが、プロジェクトの基盤となる複数の重要な成果を得るに至ったので以下にまとめる。

本研究の目的は、電源駆動の真空ポンプを使用せずに、数年にわたって超高真空状態を維持できる新たな機構を開発し、原子、ナノ粒子の双方に対してポケットサイズのレーザー冷却システムを実現することにあった。原子レーザー冷却システムについては、 $10^{-8}g$ の精度を有する絶対重力計を、ナノ粒子のレーザー冷却システムについては、 10^{-10}rad の感度を有する傾斜計を実装することを目指した。これらのシステムは、「重力異常測定による海底資源探索」、「火山活動の長期観測」、「大規模地震の前兆現象である地盤傾斜の評価」など、持続可能な社会や国民の安全・安心に向けた様々な応用を実現できると期待される。

本研究をはじめるにあたり、我々は電源を要しない非蒸発型ゲッター材 (Non-evaporable getter: 以下 NEG) のみで磁気光学トラップ (Magneto-optical trapping: 以下 MOT) に必要な $10^{-7} \sim 10^{-6}\text{Pa}$ の超高真空を維持出来るか否かを検証した。NEG は真空装置から脱ガスする水素、窒素、酸素、一酸化炭素といった各種の気体を吸蔵・吸着する力を有するが、大気中からガラスを通して真空内部に侵入するヘリウムについては排気する力をもたない (大気中のヘリウム分圧は 0.5Pa)。石英やパイレックス等に比べてヘリウム透過性が低いコバルトを用いて真空セルを構築し実験を行ったところ、約 1 ヶ月間、アルカリ原子である Rb の MOT を維持することに成功した。

本研究の最終目的を達成し、小型レーザー冷却装置を製品化するには、上記した超高真空状態を数年にわたって維持する必要がある、それを可能にする具体的なアイデアとして我々は二重構造を有する真空装置 (機能性セル) を提案した (特願 2016-146639)。アイデアの妥当性を定量的に評価するため、基礎研究用の大型二重構造真空装置を作成した。ガラスセル内で Rb の MOT を生成し原子のローディング時間を測定することで、ガラスセル内部への総気体流入量を実時間で評価するシステムを構築した。大気中の He は、衝突、吸着、溶解、拡散、脱離の 5 過程を通してガラスセル内部に侵入する。ガラスセル内部への He 流入量が定常化するのにかかる時間を理論的に見積もったところ 20 日程度を要することがわかったため、測定を加速するために真空中でガラスセルを 100°C 程度まで加熱するシステムを構築した。この状態で、ガラスセル外部を「真空」、「窒素 1 気圧」、「大気 1 気圧」の 3 つの状況にし、セル内部への総気体流入量を評価したところ、大気を印加したときのみ流入量が桁で増大することが明らかとなった。真空の場合と窒素を印加した場合とで大きな差が見られなかったことから、上記した流入量の変化は真空装置のリークによるものではなく、He の流入によるものであると結論付けた。今後、ガラスセルを常温にした状態であらためてデータを取得することで (～数か月)、小型・携帯可能な二重構造真空装置を設計する明確な指針がたつと考えている。

本研究では最初に述べたように、原子だけでなくナノ粒子に対するレーザー冷却システムを構築し、高感度の傾斜計を実現することも目的としている。高感度の傾斜計は、ドーナツ型の強度分布をもつレーザーで単一のシリカナノ粒子をトラップし、重力による角度方向の振り子運動を観測することで達成される (特願 2017-028232)。我々は、 100nm 程度の粒径を有する単一のシリカナノ粒子をリング型の強度分布をもつレーザーで大気中にて捕捉することに世界で初めて成功した。

さらに捕捉後、系を真空中に引くことで、光トラップ内に捕捉された単一ナノ粒子が運動する様子を
実時間観測することにも同じく世界で初めて成功をした。ナノ粒子がレーザートラップ中で振動する
周波数は、振り子運動、動径方向振動など運動の形態に応じて3種類をとると期待され、実験でも3
種の周波数ピークが確認された。但し、重力とドーナツ形強度分布から予想される振り子運動の周波数と、
実際に観測された周波数とは桁でずれており、我々はリング型強度分布が十分に滑らかでないために
こうした現象が生じているものと推察している。現在、レーザー強度分布の改善を試みており、うまくい
けば今年度中に重力の観測が可能になるであろう。

一連の計画した研究以外にも、新たな学術的な発見があった。レーザーによる単一ナノ粒子の捕捉、
及びナノ粒子の運動観測を行う中で、ナノ粒子の振る舞いが従来の理論では説明できないことが判明した。
従来の単純化されたモデルではなく、粒子の3次元的な運動を考慮した新しい理論を構築した結果、
理論と実験結果とが一致することが確認された。この成果により、光との相互作用の大きさからナノ
粒子の大きさを推定する全く新しい手法を確立することができた(原著論文発表3)。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

概要:

単一のシリカナノ粒子を、リング型強度分布(ラゲールガウスモード)をもつ波長 $1.5\mu\text{m}$ のレーザー
を使って大気中でトラップすることに成功した。さらに大気中から真空中へと移行することで、ナノ
粒子がトラップ中で運動する様子を実時間観測することにも成功した。これらの成果は、「ナノ粒子
を用いた超高感度計測」という全く新しい学問領域を開く礎となる。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

概要:

磁気光学トラップを用いることで、ガラス内部に侵入する総気体流入量を実時間で評価するシステ
ムを開発した。当該システムを利用することで、大気中にわずかに含まれるHe(大気中の5ppm)が
ガラスセルを透過する様子を実時間でとらえることに成功した。今後、ポケットサイズのレーザー冷
却システムを開発する上で必要な各種基礎データを取得する基本ツールとして機能することが期
待される。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 研究代表者グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
上妻 幹旺	東京工業大学 理学院 物理学系	教授	H28.10～H30.3
相川 清隆	東京工業大学 理学院 物理学系	准教授	H28.10～H30.3
井上 遼太郎	東京工業大学 理学院 物理学系	助教	H28.10～H30.3
細谷 俊之	東京工業大学 理学院 物理学系	CREST 専任研究員 (博士課程学生)	H29.4～H30.3

研究項目(本研究開始時の項目について記載する)

本プロジェクトの骨子となる研究項目は

1. 原子レーザー冷却システムのポケットサイズ化
2. ポケットサイズに適した重力測定技術の確立
3. ナノ粒子を用いた高感度傾斜計の開発
4. 実用性を有するポケットサイズレーザー冷却システムの構築

の4つとなる。これら全ての研究項目について、研究代表者グループは主要な貢献を行い、研究基盤となる機能性セルの開発から、最終的な出口である原子・ナノ粒子ポケットサイズレーザー冷却システムの構築までを手掛ける。具体的な機能としての重力測定、傾斜測定の実現も研究代表者グループが担う。

② 共同研究グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
福原 武	理化学研究所 創発物性 科学研究センター 量子多体ダイナミクス 研究ユニット	ユニットリーダー	H28.10～H30.3
上田 正仁	理化学研究所 創発物性 科学研究センター 量子凝縮体研究チーム	チームリーダー	H28.10～H30.3
中村 一平	理化学研究所 創発物性 科学研究センター 量子多体ダイナミクス 研究ユニット	特別研究員	H28.3～H30.3

湯川 英美	理化学研究所 創発物性 科学研究センター 量子凝縮体研究チーム	特別研究員	H28.3～H30.3
-------	---------------------------------------	-------	-------------

研究項目(本研究開始時の項目について記載する)

本プロジェクトの骨子となる4つの研究項目中、

2. ポケットサイズに適した重力測定技術の確立
4. 実用性を有するポケットサイズレーザー冷却システムの構築

について重要な貢献を行う。研究代表者グループが機能性セルを開発し、さらにポケットサイズのレーザー冷却システムを構築しても、そこに「実用的な機能」が搭載されていなければ意味はない。ポケットサイズ化されたレーザー冷却システムは、大型の装置を用いた従来の基礎実験系に比べ、

- 「集められる冷却原子の数が1桁以上少なくなる」
- 「原子干渉の精度を向上させるために必要な自由落下距離が1桁程度短くなる」

といった短所を有する。これらの短所を克服し、目的とする高い精度での重力測定を実現するには、システムのミニチュア化とは全く異質の「実験条件の最適化作業」が必須となる。さらに、プロジェクト終了後、3 年を目処に行う企業化が軌道にのるためには、重力測定の先を見越した目的型基礎研究が必要である。共同研究グループはこれらについて主要な研究を行う。

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

§ 3 研究実施内容及び成果

【研究のねらい】

本研究は、電源駆動の真空ポンプを使用せずに、年のオーダーにわたって超高真空状態を維持することが可能な「機能性セル」を開発し、原子、ナノ粒子に対するポケットサイズのレーザー冷却システムを構築することを目的としている(図1左)。原子のレーザー冷却システムについては、 10^7 個程度の冷却 Rb 原子気体に対し、鉛直方向より光定在波を3回照射することでマッハツェンダー型の原子波干渉計を構成し、 $10^{-8}g$ の精度を有する絶対重力計を実装する(図1右)。パリ天文台からスピノフした μ QUANS 社が、精度 $\sim 10^{-9}g$ の絶対重力計を製品化することに成功しているが、センサーヘッドは高さ 70cm、直径 38cm、コントロールユニットは 100cm × 50cm × 70cm とかなりの大きさになっている。これに対し我々は、適度な精度を保ちつつ装置の容量を極限まで圧縮することで、新たな産業応用を開拓できると考えている。その最たる例として「自律型深海探査艇に搭載したポケットサイズ重力計による海底資源探索」が挙げられるだろう。

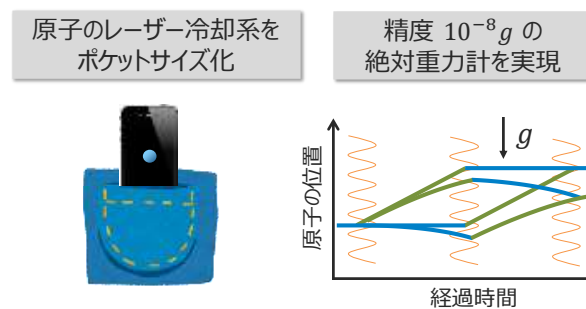


図1 ポケットサイズ原子レーザー冷却システム

一方、ナノ粒子のレーザー冷却システムについては、単一 SiO_2 ナノ粒子を1次のLG(ラゲールガウス)ビームでトラップ・冷却した後、外力によって誘起された振動を実時間計測することで、 10^{-10}rad の感度を有する傾斜計を実装する。現存する最高感度の傾斜計に比べ、2桁高い感度を与えるナノ粒子傾斜計は、大規模地震の前兆現象として生じる地盤傾斜の評価、火山活動のモニタリング、あるいは建設現場でのゆるみ岩盤の挙動把握など、様々な産業応用が期待できる。以上、ポケットサイズレーザー冷却システムを原子、ナノ粒子に対して構築することで、持続可能な社会や国民の安全・安心に向けた産業応用を実現することが本研究の最終的な狙いである。



図2 ポケットサイズナノ粒子レーザー冷却システム

3. 1 原子レーザー冷却システムのポケットサイズ化(東京工業大学 研究代表者 G)

(1)研究実施内容及び成果

本 CREST 研究を円滑に遂行するため、我々はまず 50m^2 の専用実験室を 2 部屋準備し、暗室処理とともに弱磁性光学除振台 2 台を設置した(図 3)。



図 3 新たに準備した実験室の一つ (50m^2)

電源駆動の真空ポンプを使わずに超高真空を維持するにあたり、我々は非蒸発型ゲッター材 (NEG) を利用することを考えた(図 4)。NEG は真空中で脱ガスした N_2 、 CO 、 CO_2 といった気体を表面に吸着し、 H_2 については内部に吸蔵する性質をもち、電源駆動の真空ポンプを使わずに装置内部を超高真空に維持する力をもつ。但し大気中に 0.5Pa 存在し、ガラスを徐々に透過する



図 4 非蒸発型ゲッター材 (NEG)

He については吸着も吸蔵もできないため、適切な処置を施さなければ、超高真空を年のオーダーにわたって維持することは出来ない。真空材料として使用されている石英、パイレックス、コバールといったガラス材は He の透過性が比較的高いが、ソーダライム、アルミノシリケートといった不純物を多く含む材料は He 透過性が著しく小さい(図 5)。これらの材料でガラスセルを構築すれば原理的には問題が解決するが、こうした不純物の多いガラス材料は高温に弱く、NEG の活性化温度 ($\sim 700\text{K}$) に耐えることが出来ない。

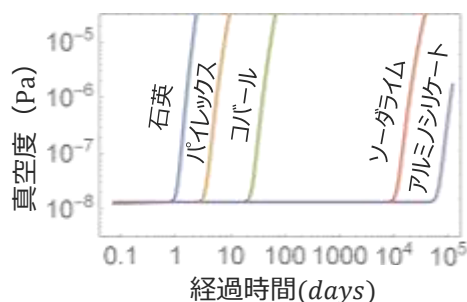


図 5 He の透過によるセル内圧の上昇

3. 2 ポケットサイズに適した重力測定技術の確立(理化学研究所 共同研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究をはじめると、共同研究者グループもまた、 36m^2 の実験室を1部屋準備するとともに光学除振台1台を設置した(図 22)。ポケットサイズのレーザー冷却システムは系の容積が限ら



図 22 新たに準備した実験室 (36m^2)

れることもあり、集められる原子数が従来の実験に比べ1桁ないし2桁減少すると予想される。従来の実験は、集めた冷却原子気体の中から十分に冷えた集団を選択し、原子干渉実験に利用していた。ポケットサイズ系の場合、集められる原子数が制限されるため、初期温度を十分に下げ、集めた原子を無駄なく利用することが干渉計の感度を維持する上で肝要となる。

主たる共同研究者グループは、ポケットサイズ系に適した形で原子集団を極限まで冷却する技術を開発することを目的として研究を行っており、まず必要な真空槽、ならびに光源の準備を行った。本グループの場合、光源のミニチュア化は要求されないため、従来手法を用いて Rb 共鳴周波数に安定化された出力 $> 100\text{mW}$ の光源を得た。真空槽は $5.0 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 未満と十分な真空度に達しており、真空槽内において Rb の MOT を達成している(図 23)。得られた原子数は 5×10^7 個であり、平成 29 年度の目標であった 10^7 個以上の原子が確保できている。また偏光勾配

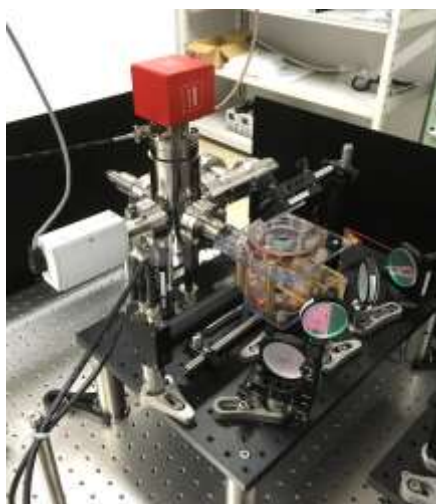


図 23 Rb-MOT 系

冷却、Raman sideband 冷却に必要な光源系も完成しており、当初の計画通りに研究が進行した。

§ 4 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際 (欧文) 誌 4 件)

1. E. Yukawa, G. J. Milburn, and K. Nemoto, “Fast macroscopic-superposition-state generation by coherent driving”, *Physical Review A* **97**, 013820 (2018).
2. M. Miranda, R. Inoue, N. Tambo, and M. Kozuma, “Site-resolved imaging of a bosonic Mott insulator using ytterbium atoms”, *Physical Review A* **96**, 043626 (2017)
3. M. Yoneda, K. Aikawa, “Thermal broadening of the power spectra of laser-trapped particles in vacuum”, *J. Phys. B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **50**, 245501 (2017).
4. Y. Miyazawa, R. Inoue, K. Nishida, T. Hosoya, and M. Kozuma, *Optics Communications* **392**, 171 (2017).

(2) その他の著作物(総説、書籍など)

1. 詳細情報(著者名、タイトル、掲載誌もしくは書籍(誌名、巻、号、発表年)などを発行日順に記載して下さい。)

特に無し。

(3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 7 件、国際会議 2 件)

1. 上妻幹旺(東工大)、冷却原子を用いた量子シミュレーションと量子慣性センサー、公益社団法人応用物理学会第 147 回微小光学研究会「光と××の相互作用」、2018 年 3 月 1 日、上智大学、2018 年 3 月 1 日
2. K. Aikawa (Tokyo Institute of Technology)、TBA、13th Japan-US joint seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Kanazawa, 25-28 September 2018
3. 上妻幹旺(東工大)、原子を用いた量子慣性センサー、先端ナノデバイス・材料テクノロジー第 151 委員会「量子計測・センシングの最前線と今後の展開」、理化学研究所、2018 年 1 月 24 日
4. 相川 清隆(東工大)、レーザー捕捉された粒子におけるパワースペクトルの熱的広がり、量子エレクトロニクス研究会「光操作の最前線」、軽井沢、2017 年 12 月 14 日
5. 上妻幹旺(東工大)、レーザー冷却の基礎と応用、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 先端基礎研究センター 第 691 回 ASRC Seminar、東海村、2017 年 7 月 21 日
6. E. Yukawa, Fast generation of Macroscopic Superposition States by Coherent Driving, JSAP Workshop on Quantum information and Related Fields, Tokyo, 3 March, 2017.
7. 上妻幹旺(東工大)、量子計算と量子シミュレーション、スペシャルサイエンスセミナー、

群馬県立高崎高等学校、2016 年 12 月 15 日

8. 福原武(理研)、光格子で挑む量子多体ダイナミクス、北海道大学工学部物理工学系コロキウム、北海道大学、2016 年 12 月 22 日
9. 福原武、光格子で探る量子多体ダイナミクス、応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「光-物質相互制御 ～制御技術の進展と新しい物理の探求～」、上智大学軽井沢セミナーハウス、2016 年 12 月 9 日

② 口頭発表 (国内会議 12 件、国際会議 1 件)

1. 岩崎睦、米田光慶、相川清隆、光格子中におけるナノ粒子の重心運動の 1K 以下への冷却、日本物理学会 第 73 回年次大会、東京、2018 年 3 月 25 日
2. 小田拓実、細谷俊之、井上遼太郎、上妻幹旺、非蒸発型ゲッターポンプによって作られた真空中における磁気光学トラップの評価、日本物理学会 第 73 回年次大会、東京、2018 年 3 月 24 日
3. 中村一平、兼村厚範、中曽拓、山本隆太、福原武、ベイズ最適化に基づく冷却原子実験におけるパラメータ探索の効率化、日本物理学会 第 73 回年次大会(2018 年)、東京理科大学、2018 年 3 月 24 日
4. 山本隆太、中村一平、福原武、三角光格子にトラップされたボース凝縮体の実現、日本物理学会 第 73 回年次大会(2018 年)、東京理科大学、2018 年 3 月 24 日
5. 井口賢人、高木將登、ミランダ・マルティン、井上遼太郎、上妻幹旺、 ^{173}Yb 原子系における Mott 絶縁体相の実空間観測、日本物理学会 第 73 回年次大会、東京、2018 年 3 月 24 日
6. 竹添慎司、成木翼、相川清隆(東工大理)、リング型ポテンシャルへのナノ粒子の捕捉、日本物理学会 第 73 回年次大会、東京、2018 年 3 月 25 日
7. 米田光慶、相川清隆、レーザー捕捉された粒子におけるパワースペクトルの熱的広がり、日本物理学会 第 73 回年次大会、東京、2018 年 3 月 25 日
8. T. Fukuhara, Quantum simulation of ultrafast dynamics with ultracold atoms, JST-TU Delft Quantum Technology workshop, TU Delft, Delft, Netherlands, October 17, 2017
9. 中村一平、福原武、フラストレーションのあるスピン系のダイナミクス観測に向けた量子気体顕微鏡の開発、日本物理学会 第 72 回年次大会(2017 年)、大阪大学、2017 年 3 月 19 日
10. 宮澤裕貴、多賀俊祐、井上遼太郎、上妻幹旺、准安定状態にあるユウロピウム原子の磁気光学トラップ、日本物理学会 第 72 回年次大会、大阪、2017 年 3 月 18 日
11. 湯川英美、コヒーレントドライブによる巨視的重ね合わせ状態生成の高速化、日本物理学会 第 72 回年次大会、大阪、2017 年 3 月 18 日
12. 反保尚基、ミランダ・マルティン、井上遼太郎、上妻幹旺、量子気体顕微鏡を用いた

Mott 絶縁体相における Yb 原子気体の温度評価、日本物理学会 第 72 回年次大会、大阪、2017 年 3 月 19 日

13. 上妻幹旺、原子のドブroy波を利用した高性能自己位置推定機器の開発にむけて、JAMSTEC-東工大研究交流会、追浜、2017 年 11 月 24 日
14. 上妻幹旺(東工大)、光の正体、大学出張講義、鷗友学園女子中学高等学校、2016 年 12 月 19 日

③ ポスター発表 (国内会議 2 件、国際会議 6 件)

1. R. Yamamoto, I. Nakamura, and T. Fukuhara, Towards quantum simulation of frustrated spin systems with single-site-resolved imaging, The 2nd CEMS International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2018), Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, January 16, 2018.
2. R. Inoue, M. Miranda, N. Tambo, and M. Kozuma, Noncooled site-resolved imaging of a Mott-insulator, Bose-Einstein Condensation 2017, Sant Feliu de Guixols, Spain, September 6, 2017
3. M. Miranda, R. Inoue, N. Tambo, K. Iguchi, M. Takagi and M. Kozuma, Noncooled site-resolved imaging of a Mott insulator, International Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy (ICOLS 2017), Arcachon, France September 2, 2017
4. E. Yukawa, Hydrodynamic Gauge Theory of Spinor Bose-Einstein Condensates, Aspen Center for Physics, Quantum Dynamics: From Models to Matter, Aspen Center for Physics, Aspen, CO, USA, 17 Jan., 2017
5. E. Yukawa, Fast generation of Macroscopic Superposition States by Coherent Driving, Interdisciplinary Workshop on Quantum Device 2017, National Institute of Informatics, Tokyo, Japan, 7 March, 2017
6. 湯川英美、スピノル Bose-Einstein 凝縮体の流体力学描像の第 2 量子化形式、新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」第 2 回領域研究会、東北大学片平キャンパス、2016 年 12 月 16 日
7. E. Yukawa, Fast Generation of Macroscopic Superposition States by Coherent Driving, Joint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress, Brisbane Convention and Exhibition Centre, Brisbane, QLD, Australia, 7 December, 2016
8. 中村一平、フラストレーションのあるスピン系のダイナミクス観測に向けた量子気体顕微鏡の開発、ImPACT 未来開拓研究会 2016、国立京都国際会館、2016 年 11 月 20 日

(4)知財出願

① 国内出願 (6 件)

1. 《超高真空セル、井上遼太郎、上妻幹旺、国立大学法人東京工業大学、2016 年 7 月 26 日、特願 2016-146639》

(5)受賞・報道等

① 受賞 (顕著な受賞の前に*を付記してください)

上妻幹旺	平成 29 年度 科学研究費審査委員表彰
井上遼太郎	平成 29 年度 東京工業大学 理学院若手研究奨励賞
福原武	平成 29 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞
ミランダ・マルティン	平成 29 年度 第 34 回井上研究奨励賞
相川清隆	平成 29 年度 第二回末松賞
相川清隆	平成 29 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

②社会還元的な展開活動

現時点では特にありません。

§ 5 研究期間中の活動

5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

《チーム主催のワークショップ、シンポジウム、小中高での特別授業、地域での講演、研究機関の一般公開での講演、その他チーム内ミーティング（主なもの）を行った場合、月日、名称、場所、参加人数、目的や内容などを記入してください。なお、チーム内ミーティング等、一般公開でないものは、名称のあとに（非公開）と記載して下さい。》

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2018 年 3 月 5 日	出張授業	名古屋市立 向陽高等学校	38	「量子の世界によろこそ」という 題目で講演
2017 年 2 月 28 日	出張授業	名古屋市立 向陽高等学校	数 10 名	「量子の世界によろこそ」という 題目で講演
2016 年 12 月 15 日	スペシャルサイエンスセ ミナー	群馬県立高 崎高等学校	数 10 名	「量子計算と量子シミュレー ション」という題目で講演
2016 年 12 月 19 日	大学出張講義	鷗友学園女 子中学高等 学校	数 10 名	「光の正体」という題目で講 演