

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22241025

研究課題名（和文）超伝導人工原子を用いた量子メモリーの研究

研究課題名（英文）Research on Quantum Memory using Superconducting Artificial Atoms

研究代表者 仙場 浩一（SEMBA KOICHI）

国立情報学研究所 量子情報国際研究センター 特任教授

研究者番号：50393773

研究成果の概要（和文）：超伝導人工原子（超伝導磁束量子ビット）とダイヤモンド結晶中のスピン集団（隣接した窒素不純物（N）と空孔（V）から成る複合欠陥 NV 中心）とが強結合したハイブリッド系を実現し、エネルギー量子 1 個を交換する量子もつれ振動をコヒーレントに制御することに世界で初めて成功しました。これは、超伝導人工原子の重ね合わせ状態をダイヤモンド結晶中の NV スピン集団へ保存した後に再び読み出せることを意味しており、量子通信や量子コンピューターに代表される量子情報処理に欠くことのできない、任意の量子状態を保存可能な量子メモリや、更には、マイクロ波と可視光域を繋ぐ量子インターフェイスの実現に、ダイヤモンドが極めて有望な候補であることを実証したものです。今回の成果は、ダイヤモンド結晶中の数千万個（数十アトモル）の NV スピン集団とマイクロメートルサイズの電気回路（超伝導人工原子）を流れる永久電流という異なる 2 種類の巨視的物質を用いて量子もつれ状態を生成することに世界で初めて成功したという側面も持っています。

超伝導人工原子と NV スピン集団の強結合系を数理的・数値的に解析し、そのダイナミクスを理解しました。この物理系を量子情報処理へ応用するための数理的な道具立てを準備し、また他の系とも比較しながら量子計算は通信システムでのスケーラビリティと性能について議論し、新しい可能性を提案しました。

研究成果の概要（英文）： We have demonstrated strong coupling between a solid-state quantum processing unit (a superconducting artificial atom : a flux-qubit) and a dedicated quantum memory (nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond). These results indicate that quantum information manipulated in flux qubits can be stored to and retrieved from an ensemble of NV centers. A quantum memory is an essential component for quantum communication and information processing. Our work demonstrated that diamond is a promising candidate for a future quantum memory. This is a significant step forward in the development of a quantum computer and additionally to an interface between the microwave and optical worlds. This result also demonstrated generation of entanglement between two distinct macroscopic matter i.e., the spin state of a few tens of million (attomol) NV centers and the persistent current circulating in a micro-meter sized electronic circuit, a flux-qubit.

We have analysed the dynamics of the NV center ensemble and a single NV center strongly coupled with the superconducting qubit. We also investigated mathematical tools to represent these quantum states with a generalization of Wigner function as well as other quasi-distribution functions. This physical system can be applied to construct novel quantum information devices, such as memory and interface. We investigated several possibilities and showed advantages of such devices in quantum information network.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2011年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2012年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
総計	33,700,000	10,110,000	43,810,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ構造科学

キーワード：人工原子、量子メモリー、ダイヤモンド、微小共振器、超精密計測、メソスコピック系

1. 研究開始当初の背景

巨視的な量子系である超伝導キュービット（量子ビット）が人工原子の一種だと広く認識されるようになってから、10年近くになる。超伝導人工原子とマイクロ波光子の相互作用は、原子と光の相互作用に比べ何桁も強く設計できるため、原子を用いた研究では従来到達不可能であった新たな研究のフロンティアを拓く研究が数多く始められている。微小ジョセフソン接合を含む超伝導回路の電子状態が離散スペクトルを示し、準位間のエネルギー差に共鳴したマイクロ波（パルス）によって量子遷移させられること（量子状態の操作）は、大きな驚きで迎えられた。核磁気共鳴などで観測されるようなきれいなラビ振動やラムゼー縞が、目に見える大きさの回路中の電子状態のダイナミクスとして観測されるようになったのだ。超伝導人工原子が量子コヒーレンスを保てる時間は、当初はナノ秒にも満たなかったが、この10年ほどの間に5桁以上も改良された。しかし、これまでのキュービットの研究に欠けていたのは、1種類以上の量子系を組み合わせ、複合（ハイブリッド）量子系として機能させるという視点であった。現在のコンピューターでは、演算、記憶、通信を担っているのは、それぞれ半導体、磁性体、光というように、それぞれの目的に合った優れた特性をもつ異なる物理系である。量子コンピューターに代表される量子力学的マシンを実現するためにも、やはり量子レベルでの情報処理の分業、つまり1種類以上の量子系を組み合わせた量子系を全体としてコヒーレントに動作させることの必要性が認識され始めた。

2. 研究の目的

本研究では、これまで推進してきた単一量子状態および量子系のエンタングルメントをコヒーレントに操作する技術や、量子非破壊測定を可能とするジョセフソン分岐増幅技術を応用し、超伝導人工原子・マイクロ波超伝導共振器結合系試料を用いて量子メモリの原理実証実験および、そのデバイス化の開発指針を得ることを目指す。

実験グループの具体的なマイルストーン【A-1, -2, -3】は次の3つである：

【A-1】：共振器中の光子寿命(JBA 測定回路の超伝導人工原子寿命)>マイクロ秒 の達成

【A-2】：超伝導人工原子 \leftrightarrow 光子, 人工原子 \leftrightarrow TLS 間での量子もつれ制御技術の最適化

【A-3】：2体の量子メモリ間状態の生成と読み出しの実証。デバイス化の指針を得る。

理論グループの具体的なマイルストーン

【T-1, -2, -3】は次の3つに変更・拡張した：

【T-1】マイクロ波との相互作用による状態生成と検証は、マイクロ波のみに焦点を当てずに、ダイヤモンドNVセンターとの相互作用による状態生成と検証方法へ変更・拡張した。【T-2】原子集団にも拡張して量子非破壊測定の方法を提案する。

【T-3】数量子ビットのエンタングルメントの生成方法の検討についてはほぼ計画通りとなった。特に光への情報転写の可能性が見えてきたので、量子通信への応用について検討した。

3. 研究の方法

実験グループの「量子メモリーデバイス」の研究では、発想を転換し、超伝導人工原子をエンタングルメント生成スイッチとして使い、高Q超伝導共振回路中の光子あるいは、超伝導微小回路中の緩和時間の長い量子状態を用いて量子メモリー動作の原理確認実験を行なった。量子メモリー候補として、アルミ酸化過程等で偶発的に発生する量子二準位系ではなく、ダイヤモンドの窒素(N)空孔(V)複合欠陥(NV中心)にトラップされた電子スピンの適していることが判明してからは、連携研究者である大阪大学の水落准教授に光学測定を担当していただき、イオン注入および真空アニール法を用いて、結晶表面から1ミクロン以内に、高濃度なNV中心が層状に存在するNVダイヤモンド試料を準備し、NTT-NII共同研究チームのもつキャップ可変磁束量子ビットと組み合わせ、二者の間に強結合を実現する方法を採用した。

理論研究は、以下のように研究の進展によりマイルストーンのターゲットを変更、拡張し、適宜、最適な研究方法を採用した。

【T-1】マイクロ波との相互作用による状態生成と検証：ダイヤモンドNVセンター集団は、集団が十分大きいときには調和振動子として振る舞い、また、小さな集団になると離散性も示すことから、より拡張した理論解析が可能となり、実験上もより新規性、拡張性のある系となる。【T-2】量子非破壊測定の方法提案：超伝導素子とともに、NVダイヤモンド集団を用いたゲート実装方法を検討した。これらの状態を検証するための数理的な道具立てとして、SU(N)を用いた状態表現と状態の量子性の特徴づけについて議論した。また、これらの量子ビットは高精度測定に用いることが注目されていることから、原子集団にも拡張して可能性を検討した。【T-3】数量子ビットのエンタングルメントの生成方法の検討については、特に光への情報転写の可能性が有望と考えられるので、量子通信への応用について検討した。

4. 研究成果

(1) 実験グループ：超伝導人工原子（超伝導量子ビット）とダイヤモンド結晶中のスピン集団（窒素不純物と空孔とからなる NV 中心）を組み合わせたハイブリッド系をつくり、エネルギー量子 1 個を交換する量子もつれ振動をコヒーレントに制御することに世界で初めて成功した。これは、超伝導量子ビットの重ね合わせ状態をダイヤモンド結晶中の NV スピン集団へ保存した後に再び読み出せることを意味しており、量子通信や量子情報処理に欠くことのできない、任意の量子状態が保存可能となる量子メモリーの実現にとって、ダイヤモンドが極めて有望な候補であることを実証したものである。今回の成果は、ダイヤモンド結晶中の窒素不純物と空孔が作る NV 中心の数千万個のスピン集団（数十アトモル）とミクロンサイズの超伝導量子ビットという 2 つの異なる種類の巨視的な物質間に量子もつれ状態を生成することに世界で初めて成功したという側面も持っている。この他にも、超伝導人工原子（超伝導磁束量子ビット）と強結合した超伝導共振回路へマイクロ波光子を 1 個ずつ送り込み、共振器中にマイクロ波の光子数 (Fock) 状態を生成することに成功した。また、被測定量子系への反作用が小さいジョセフソン分岐増幅測定回路を用いて、被測定量子系と測定装置間の相互作用まで量子力学的に考察しつつ測定過程のダイナミクスに関する知見を得た。

(2) マイルストーンの達成状況：
マイルストーン[A1]（共振器中光子寿命）>（マイクロ秒）：達成済み。
[A2] 超伝導人工原子⇔ 光子量子二準位系間での量子もつれ制御技術の獲得：達成済み。
[A3] Bell 状態の生成と量子メモリーへの書き込み読み出しの実証へ向けて、Nature 478, 221 (2011) での成果を改良発展させ、超伝導量子ビットとダイヤモンド NV センター集団スピン (1 励起 Dick 状態) 間でもつれ状態を生成することに成功した。分光データに現れた狭線幅共鳴状態はダイヤモンド NV 中心集団スピンの dark state が主成分であると判明した。この成果は長寿命の量子メモリー実現へ発展する可能性を秘めている。共に、論文発表準備中である。他にも測定強度閾値に依存した JBA 量子非破壊測定に関して貴重な知見が得られた (New J. Phys. 15, 043028 (2013))。一方、量子メモリー時間の改良および 2 体以上のもつれ状態のメモリー動作に関しては、今後の課題である。

(3) 理論グループ：理論研究では、実験で実現された多数の NV 中心と超伝導磁束量子ビットの強結合の相互作用を理論的に解明するために、多数の NV 中心集団の場合と、単一 NV 中心の場合を解析した。多数の NV 中心集団の場合は調和振動子近似が良く実験を再現し、マイクロ波との相互作用と類似のゲートが可能であることが示された。一方、サンプルの改善が進めば、ごく少数の NV 中心が超伝導磁束量子ビットと結合している系が、近い将来実現されると考えられる。単一の NV の場合についても数理的・数値的に解析し、これら強結合系の量子ダイナミクスの解明に寄与した。

この相互作用を利用して、NV センター集団の状態の生成、測定が可能となることに注目し、チューナブルな超伝導量子ビットを用いて、非破壊測定をならんでメモリーやインタフェース、センサーとしての利用も検討した。またこの議論を原子 BEC 系でも検討した。

新しい離散系のための状態表示として、Wigner 関数の拡張を SU(N) 系について検討した。SU(N) のコヒーレント状態を用いて、Wigner 関数を定義し、それを元に具体的な表現を求めた。また、特に多数の 2 準位系からなる系の解析に有用な状態表現となるよう、これまでのスピンの Wigner 関数を拡張し、複合系のための異なるスピンの大きさを融合した Wigner 関数の表現方法を提案した。

超伝導素子と NV ダイヤモンドの相互作用を実現できたことで、数量子ビットへの拡張、やゲート処理の高速化、集積化の観点から検討を行い、量子計算・通信でスケールアップに新しい大きな可能性が拓けた。

(4) マイルストーンの達成状況：
マイルストーン[T1]ダイヤモンド NV センターとの相互作用についての理論解析。大きなアンサンブルを用いた場合の近似的な方法と、単一 NV を用いた場合の数理的・数値的解析を行った。この研究結果については現在論文投稿準備中である。

[T2] 前年度の状態表示を発展させ新しい数理的方法を提案した。(J. Phys. A45, 015302 (2012), Phys. Rev. A86, 062117 (2012))。本研究で用いている量子ビットは高精度測定に用いることが注目されていることから、これを原子集団にも拡張して可能性を検討し、その結果を Phys. Rev. A に投稿中。

[T3] 数量子ビットのエンタングルメントの生成方法やスケールアップについて検討した。特に光への情報転写を含めた素子の可能性とその量子通信への応用について検討した (Phys. Rev. A (2013) 掲載決定 arXiv: 1209.3851v1)。

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 13 件）査読有 11, 招待 2

①X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, and K. Semba: “Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond”, *Nature*, 査読有 Volume 478, 221-224 (2011).

②A. M. Stephens, J. Huang, K. Nemoto, and W. J. Munro, Hybrid-systems approach to fault-tolerant quantum communication, *Phys. Rev.* 査読有 A87 052333 (2013).

③K Kakuyanagi, S Kagei, R Koibuchi, S Saito, A Lupascu, K Semba and H Nakano, “Experimental analysis of the measurement strength dependence of superconducting qubit readout using a Josephson bifurcation readout method”, *New J. Phys.* 査読有 15 043028 (2013).

④ Y. Krockenberger, S. Karimoto, H. Yamamoto, and K. Semba, Coherent growth of superconducting TiN thin films by plasma enhanced molecular beam epitaxy, *J. Appl. Phys.* 査読有 112, 83920-1, -4 (2012).

⑤D. Harland, M. J. Everitt, K. Nemoto, T. Tilma, and T. P. Spiller: Towards a complete and continuous Wigner function for an ensemble of spins or qubits, *Physical Review A*, 査読有 Volume 86, Issue 6, 062117 (2012).

⑥T. Tilma and K. Nemoto, SU(N)-symmetric quasi-probability distribution functions, *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*, 査読有 Volume 45, Number 1, 015302 (2012).

⑦齊藤 志郎, X. Zhu, W. J. Munro, 仙場 浩一: 超伝導量子ビットとスピン集団のコヒーレント結合 (招待執筆).

NTT 技術ジャーナル 2012 年 6 月号 pp.13-17
<http://www.ntt.co.jp/journal/1206/files/jn201206013.pdf>

⑧仙場 浩一 「注目されるハイブリッド量子系

— 超伝導キュービットとダイヤモンドの NV 中心—」 *パリティ* Vol.28, No.1, pp11-13, (2012). 特集：物理科学この 1 年 原子・分子物理, 量子エレクトロニクス (招待執筆).

⑨A. Kemp, S. Saito, W. J. Munro, K. Nemoto, and K. Semba: Superconducting qubit as a quantum transformer routing entanglement between a microscopic quantum memory and a macroscopic resonator, *Physical Review* 査読有 B84, Issue 10, 104505 (2011).

⑩Ying-Dan Wang, X. Zhu, and C. Bruder, Ideal quantum nondemolition measurement of a flux qubit at variable bias, *Phys. Rev.* 査読有 B83, 134504 (2011).

⑪Y. Matsuzaki, S. Saito, K. Kakuyanagi, and K. Semba, Quantum Zeno effect with a superconducting qubit, *Physical Review* 査読有 B82, 180518(R) (2010).

⑫K. Kakuyanagi, S. Kagei, S. Saito, H. Nakano, and K. Semba, Generation of Non-Classical Microwave Photon States in an Inductor-Capacitor Resonator Coupled to a Superconducting Flux Qubit, *Appl. Phys. Express* 査読有 3 103101 (2010).

⑬X. Zhu, A. Kemp, S. Saito, and K. Semba, Coherent operation of a gap-tunable flux qubit, *Appl. Phys. Lett.* 査読有 97, 102503 (2010).

〔学会発表〕（計 55 件）招待講演 31 件

①Kouichi Semba, Coherent Coupling of a Superconducting Flux Qubit to an Electron Spin Ensemble in Diamond, Gordon Research Conference : Quantum Science, Stonehill College, Easton, MA, USA, 2012/8/13 (Invited talk)

② Kouichi Semba, Superconducting flux qubit NV-diamond hybrid quantum system, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy “Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications” , 2013/4/12 (Invited talk)

③仙場浩一: 超伝導キュービット・ダイヤモンド NV センタハイブリッド量子系、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、薄膜・表面分科内招待講演 神奈川工科大学 2013/3/27 (招待講演)

④ Kae Nemoto: “Integrated quantum information technology,” JFLI meeting on quantum information and computation, 4-5 March 2013, Paris, France, 2013.3.4

⑤Kouichi Semba, Josephson circuit QED and hybrid quantum systems : Interdisciplinary Workshop on Quantum Device ~through Mathematical Structure, National Institute of Informatics Chiyoda-ku Tokyo, Japan, 2013/1/15 (Invited talk)

⑥Kouichi Semba, Josephson circuit QED and hybrid quantum systems, International Workshop on Spectral analysis of noncommutative harmonic oscillators and quantum devices, Institute of Mathematics for Industry, Faculty of Mathematics, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 2012/11/26-27 (Invited talk)

⑦Kouichi Semba, “1. Superconductivity and Josephson circuit QED”, “2. Hybrid Quantum Systems”, The 25th Workshop on Nanoscale and Mesoscopic Systems : Exotic Quantum States in Circuit QED Systems, Hogil Kim Memorial Building, POSTECH, Pohang, Korea, 2012/11/1-2 (Invited talk)

⑧Kae Nemoto, Ashley Stephens, Jingjing Huang, and William Munro: “Quantum communication using a resonator-ensemble interaction [ID:96] AQIS’12, 12th Asian Quantum Information Science Conference, 2012 Suzhou, China, 2012. 8. 24

⑨ W. J. Munro, S. Saito, X. Zhu, Y. Matsuzaki, Kae Nemoto, T. Shimooka, N. Mizuochi, and K. Semba: “Coupling a superconducting flux qubit to an NV ensemble: A hybrid system’s approach for quantum media conversion,” QCMC2012, 11th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, Vienna, Austria, (Hot Topic Talk), 2012. 7. 30

⑩Mark Everitt: “Hybrid Quantum Devices,” NII Shonan Meeting on Hybrid Quantum Devices, Shonan Village, Japan, (NII 湘南会議, 湘南国際村センター), , 2011/11/8, invited talk

⑪Simon Devitt: “A scalable NV-Diamond quantum computer,” NII Shonan Meeting on Hybrid Quantum Devices, Shonan Village, Japan, (NII 湘南会議, 湘南国際村センター), 2011, 2011/11/7 (invited talk)

⑫根本 香絵: “量子情報・量子計算,” 情

報計算化学生物学会 年会 (CBI Annual meeting2010), 一橋記念講堂, 2010/9/15 (invited talk)

[産業財産権]

○出願状況 (計 5 件), 取得状況 (計 0 件)

名称: 量子状態制御方法
発明者: 角柳孝輔, アレクサンダーケンプ, 仙場浩一
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2010-205245
出願年月日: 2010 年 9 月 14 日
国内外の別: 国内

名称: 超伝導磁束量子ビット回路
発明者: ズーシャオボ, 齊藤志郎, ケンプアレクサンダー, 仙場浩一
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2010-151720
出願年月日: 2010 年 7 月 2 日
国内外の別: 国内

[その他]

受賞: 応用物理学会論文賞 2011. 7. 8.
K. Kakuyanagi, S. Kagei, S. Saito, H. Nakano, and K. Semba, Generation of Non-Classical Microwave Photon States in an Inductor-Capacitor Resonator Coupled to a Superconducting Flux Qubit, Appl. Phys. Express 査読有 3 103101 (2010).

ホームページ等:

「量子メモリーの原理実験に成功 ~ ダイヤモンドと超伝導ハイブリッド系の量子状態制御に初めて成功 ~」

<http://www.ntt.co.jp/news2011/1110/111012a.html>

http://www.brl.ntt.co.jp/J/2011/10/late_st_topics_201110130201.html

「ダイヤモンドと超伝導量子ビットを直接組み合わせたハイブリッド系の量子状態制御に 世界で初めて成功」

<http://www.ntt.co.jp/journal/1201/files/jn201201063.pdf>

量子情報の最先端をつたえる Interview #001 仙場浩一 特任教授 国立情報学研究所
<http://www.ryosi.com/qis/201207/01/>

記事：

X. Zhu, et al. Nature 478, 221-224 (2011) :
Spins coupled to a persistent current,
Nature, News & Views 478, 195-196 (2011).

仙場 浩一, 3000 万個で量子もつれ
日経サイエンス 2012 年 1 月号 p. 25

根本 香絵, NII, U Osaka Observe SC Qubit
in Diamond, Observations may further
Quantum Memory Technology, Superconductor
Week Vol. 26 No. 1, pp. 5-6, 2012/2/13

「NTT など、量子メモリーの原理実験に成
功-「量子もつれ」振動を制御」asahi.com (朝
日新聞社) : 2011 年 10 月 13 日

「量子メモリー実証成功, NTT など」日経産
業新聞 2011 年 10 月 13 日 朝刊(11 面)掲載

NTT など、量子メモリーの原理実験に成功-
「量子もつれ」振動を制御 日刊工業新聞
2011 年 10 月 13 日 朝刊(21 面)掲載
[http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0720111013
eaag.html](http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0720111013eaag.html)

「NTT/阪大/NII 量子メモリーの原理実験に
成功」, Laser Focus World: 2011/10/14 東
[http://www.lfw-japan.jp/news2011/news_2
0111014_03.html](http://www.lfw-japan.jp/news2011/news_20111014_03.html)

「ダイヤモンドと超伝導量子ビットを直接組み合
わせたハイブリッド系の量子状態制御に世界で
初めて成功」 NTT 技術ジャーナル FOCUS
ON THE NEWS 2012 年 1 月号 p.63

仙場 浩一, 研究者紹介 NTT 技術ジャーナル
2012 年 1 月号 p.64
[http://www.ntt.co.jp/journal/1201/files/jn2012
01063.pdf](http://www.ntt.co.jp/journal/1201/files/jn201201063.pdf)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仙場 浩一 (SEMBA KOUICHI)
国立情報学研究所
量子情報国際研究センター 特任教授
研究者番号 : 50393773

(2) 研究分担者

根本 香絵 (NEMOTO KAE)
国立情報学研究所
情報学プリンシプル研究系 教授
研究者番号 : 80370104
齋藤 志郎 (SAITO SHIRO)
日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 主任研究員

研究者番号 : 90393777
角柳 孝輔 (KAKUYANAGI KOUSUKE)
日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 研究主任
研究者番号 : 40417093

中ノ 勇人 (NAKANO HAYATO)
日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 主任研究員
研究者番号 : 60393774

Zhu Xiaobo
日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 リサーチアソシエイト
研究者番号 : 70536226

(平成 22, 23 年度 : 研究分担者)
狩元 慎一 (KARIMOTO SHINICHI)
日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 研究主任
研究者番号 : 80393734

(平成 22, 23 年度 : 研究分担者)
嘉数 誠 (KASU MAKOTO)
佐賀大学
工学 (系) 研究科 (研究院) 教授
研究者番号 : 50393731
(平成 23 年度 : 研究分担者)

(3) 連携研究者

水落 憲和 (MIZUOCHI NORIKAZU)
大阪大学 基礎工学研究科 准教授
研究者番号 : 00323311
(平成 24 年度 : 連携研究者)