

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02201

研究課題名(和文) ナノ粒子ランダム配列での単一電子帯電効果を利用したリザーバー計算ノードの機能実証

研究課題名(英文) Reservoir computing nodes utilizing single-electron effects in random arrays of nanoparticles

研究代表者

水柿 義直 (Mizugaki, Yoshinao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30280887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、ナノ粒子集合体内に形成される微小トンネル接合ランダムネットワークが物理リザーバーとして機能することを実証した。6端子ないし12端子を備えたナノ粒子集合体を誘電泳動法や多段階液浸法で作製した。液体ヘリウムや液体窒素温度にて、波形生成や短期記憶などのタスクを通して性能評価を行った。クーロン閉塞に基づく非線形応答を利用した超小型の物理リザーバーであり、リザーバーコンピューティング応用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工知能や機械学習による情報処理システム構築において、リザーバーコンピューティングが注目されている。そのリザーバー部を物理システムで実現するのが物理リザーバーであり、これまでにソフトマテリアル系、光系、スピン系など種々の実装方式が報告されている。本研究課題では、金ナノ粒子集合体が物理リザーバーとして機能することを実証した。これはクーロン閉塞を動作原理とする物理リザーバーであり、新たな実装方式の提案となる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we demonstrated that a random network of gold nanoparticles functioned as a physical reservoir. Nanoparticle aggregates with 6 or 12 electrodes were fabricated using dielectrophoresis or multi-step immersion methods. The device properties at liquid helium and liquid nitrogen temperatures were evaluated through typical reservoir computing tasks such as waveform reconstruction and short-term memory. Our devices worked as ultra-small physical reservoirs that utilized nonlinearities due to the Coulomb blockade, and are expected to be applied to reservoir computing.

研究分野：電子工学

キーワード：ナノテクノロジー 単一電子トランジスタ ナノ粒子 実験 非線形応答 リザーバー計算 波形生成タスク 短期記憶容量

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

人工知能や機械学習による情報処理システム構築において、リザーバーコンピューティングが注目を集めている。これは再帰的ニューラルネットワークを基本として、複数の入力を高次元空間に非線形変換し、入力信号の線形分離を可能にするものである。また、再帰的ニューラルネットワークのすべての結合荷重を学習で更新するのではなく、学習は一部の結合荷重にとどめ、残りの結合荷重は固定し、「リザーバー」として用いることも特徴の一つである。

リザーバーコンピューティングの提案からしばらくすると、リザーバーは必ずしも再帰的ニューラルネットワークである必要はなく、「複数入力を高次元空間にマッピングする非線形変換を実行できる物理系」であればリザーバーとして機能することが示された。スピン系、光系、ソフトマテリアル系などをリザーバーとして利用した様々な実装方式が報告されている。それらは物理リザーバーと呼ばれる。

本研究課題開始当初において、さらには現在においても、種々の物理リザーバーが提案され続けている状況である。すなわち、リザーバーに最適な材料や構築方法は明確ではなく、また、未検討な系が残されている状況である。本研究課題では、未検討な系の一つである「ナノ粒子集合体内に形成された微小トンネル接合ランダムネットワーク」の利用に取り組んだ。なお、我々は、2015年頃よりナノ粒子集合体からなる単一電子デバイスの実現に取り組んできた。ナノ粒子集合体内には微小トンネル接合がランダムに形成されており、クーロン閉塞によって電流-電圧特性に非線形性が現れる。本研究課題は、それまでに培った技術を物理リザーバーに応用する試みでもあった。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、ナノ粒子集合体に複数の電極を配置し、その非線形な入出力特性が物理リザーバーとして機能することの実証を目的とした。試料の作製プロセスについては、過去の研究において2端子もしくは3端子の電極を配置していたが、これを6端子以上に拡張する必要があった。また、従来の単一電子デバイス特性評価に用いていた電流-電圧特性に加えて、多チャンネルの入力電圧-出力電流特性もしくは入力電圧-出力電圧特性を測定する必要もあった。これらの課題を解決し、リザーバーコンピューティングにおける典型的なタスクである波形生成タスクや短期記憶タスクなどを通して、ナノ粒子集合体の物理リザーバーとしての性能評価を行った。

## 3. 研究の方法

試料の作製プロセスにおいては、まず酸化膜付きシリコン基板上に、直径約 $1\mu\text{m}$ の円周上に端部が並ぶように6端子ないし12端子の金電極群を作製した。作製においては電子ビームリソグラフィと蒸着法を用いた。電極群の中央にナノ粒子集合体を作製した。作製方法としては、誘電泳動法や液浸法を用いた。本研究課題では、誘電泳動中の電極間インピーダンスを計測し、その減少を検知した際に誘電泳動を停止する誘電泳動自動停止装置を自作した。また、液浸法では、試料をナノ粒子コロイド溶液に2回もしくは3回浸す多段階液浸法を採用した。ナノ粒子としては主として金ナノ粒子を使用した。一部の試料では炭素被膜コバルトナノ粒子も使用した。

試料の評価としては、まず走査型電子顕微鏡（SEM）による表面形状観察、および室温での電極間抵抗測定を行い、低温測定に進むか否かの判断をした。低温での電気的特性の測定では、液体ヘリウム浴中もしくは液体窒素浴中で試料を冷却した。端子間の電流-電圧特性および入出力特性（入力電圧-出力電流特性もしくは入力電圧-出力電圧特性）を測定した後、正弦波などの周期的入力や、乱数的な high-low 信号（パルス幅がランダムな矩形波）入力に対する各端子からの出力波形を取得した。出力電流は電流-電圧変換アンプを用いることで、出力電圧はオシロスコープに出力端子からの同軸を直結することで測定した。なお、出力端子数が4を超えた際は複数のオシロスコープを同期させて波形を取得した。その後、測定結果とリッジ回帰を用いて波形生成タスクや短期記憶タスクを実行し、物理リザーバーとしての性能評価を行った。

## 4. 研究成果

主たる研究成果としては、次の3つが挙げられる。(1) 電極間インピーダンスをモニタして誘電泳動を制御する誘電泳動自動停止装置の開発。(2) 誘電泳動法で作製した6端子付き金ナノ粒子集合体の物理リザーバー特性評価。(3) 多段階液浸法で作製した12端子付き金ナノ粒子集合体の物理リザーバー特性評価。以下、それぞれについて順に記述する。

(1) 電極間インピーダンスをモニタして誘電泳動を制御する誘電泳動自動停止装置の開発

コロイド溶液中のナノ粒子を電極端周辺に集める方法として誘電泳動法がある。これは古くから用いられている方法であり、我々の過去の研究においても採用してきた。我々の過去の研究において、誘電泳動時の制御パラメータの最適化を行っていたが、ナノ粒子の集合は確率的事象であるため、特に誘電泳動時間については運まかせに近い状況であった。端子数が2端子の試料であれば完成に至る条件でも、6端子の試料の完成には至らず、条件の最適化による状況打開が難しかったため、誘電泳動中の電極間インピーダンスをマイコンでモニタし、さらに、ナノ粒子集合体が形成された瞬間のインピーダンス減少を検知して誘電泳動を停止する装置を構築した。その全体構成の模式図と装置写真を図1(a)に示す。30nm径の金ナノ粒子コロイドを使用した試料作製時のインピーダンスの変化の一例を図1(b)に示す。ここでは、誘電泳動停止直前のインピーダンスの変化を示しており、初期インピーダンスから3%低下した時点で誘電泳動を停止している。このときに作製された金ナノ粒子集合体のSEM写真を図1(c)に示す。電極に破損がみられるものの、電極間をナノ粒子集合体で橋渡しできていることが分かる。この装置完成以降、本研究課題で誘電泳動を実施する際は、この装置を用いた。

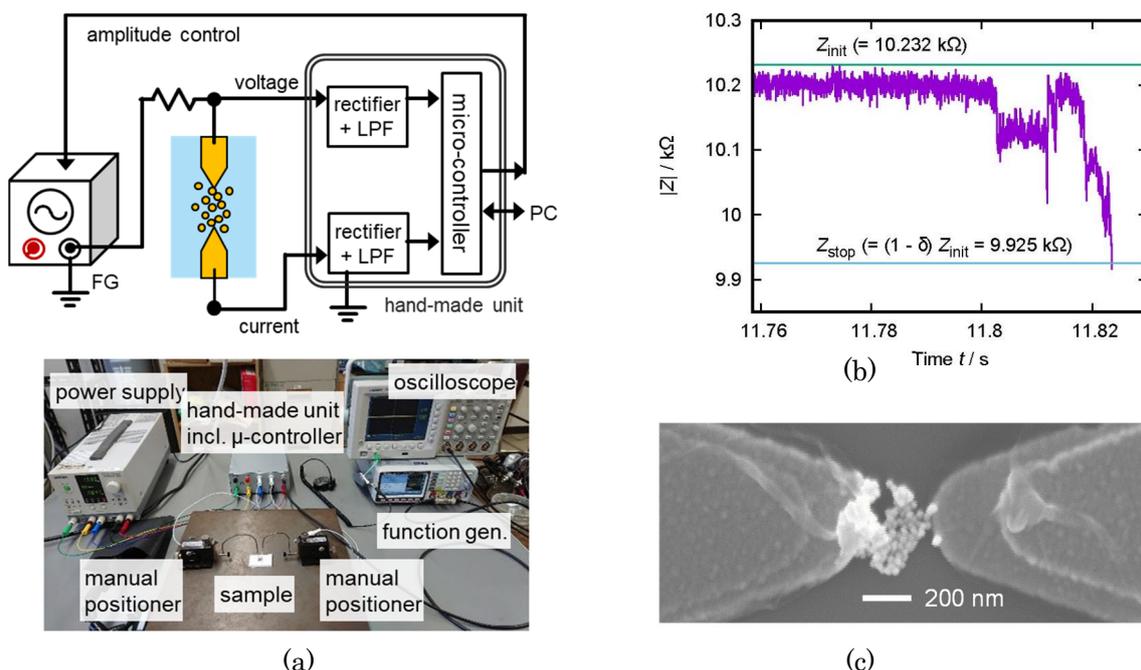


図1: 誘電泳動自動停止装置。(a) 全体構成の模式図と装置の写真。(b) 誘電泳動中のインピーダンス変化の一例。(c) 作製された金ナノ粒子集合体のSEM写真。

(2) 誘電泳動法で作製した6端子付き金ナノ粒子集合体の物理リザバー特性評価

50nm径の金ナノ粒子コロイドと誘電泳動自動停止装置を利用して6端子を有する金ナノ粒子集合体を作製した。そのSEM写真を図2(a)に示す。この試料を液体ヘリウム温度に冷却し、1番端子に正弦波電圧を印加した際の実出力電圧波形を図2(b)に示す。ここでは出力端子からの信号を同軸ケーブルでオシロスコープ直接接続して出力電圧波形を取得した。出力端子によって、波形の歪み方や位相のずれ方が異なっていることが分かる。この出力電圧波形とリッジ回帰を利用したリザバーコンピューティングによる波形生成タスクの結果を図2(c)に示す。ここでNMSE (Normalized Mean Square Error) の値が小さいほどエラーが小さい。なお、 $(1 - \text{NMSE}) \times 100\%$  がいわゆる精度となる。ターゲット波形が余弦波や三角波の場合はNMSEが0.01あるいはそれ以下となり、99%以上の精度が得られている。一方、ターゲット波形が矩形波や鋸歯状波の場合はNMSEが大きめとなっている。

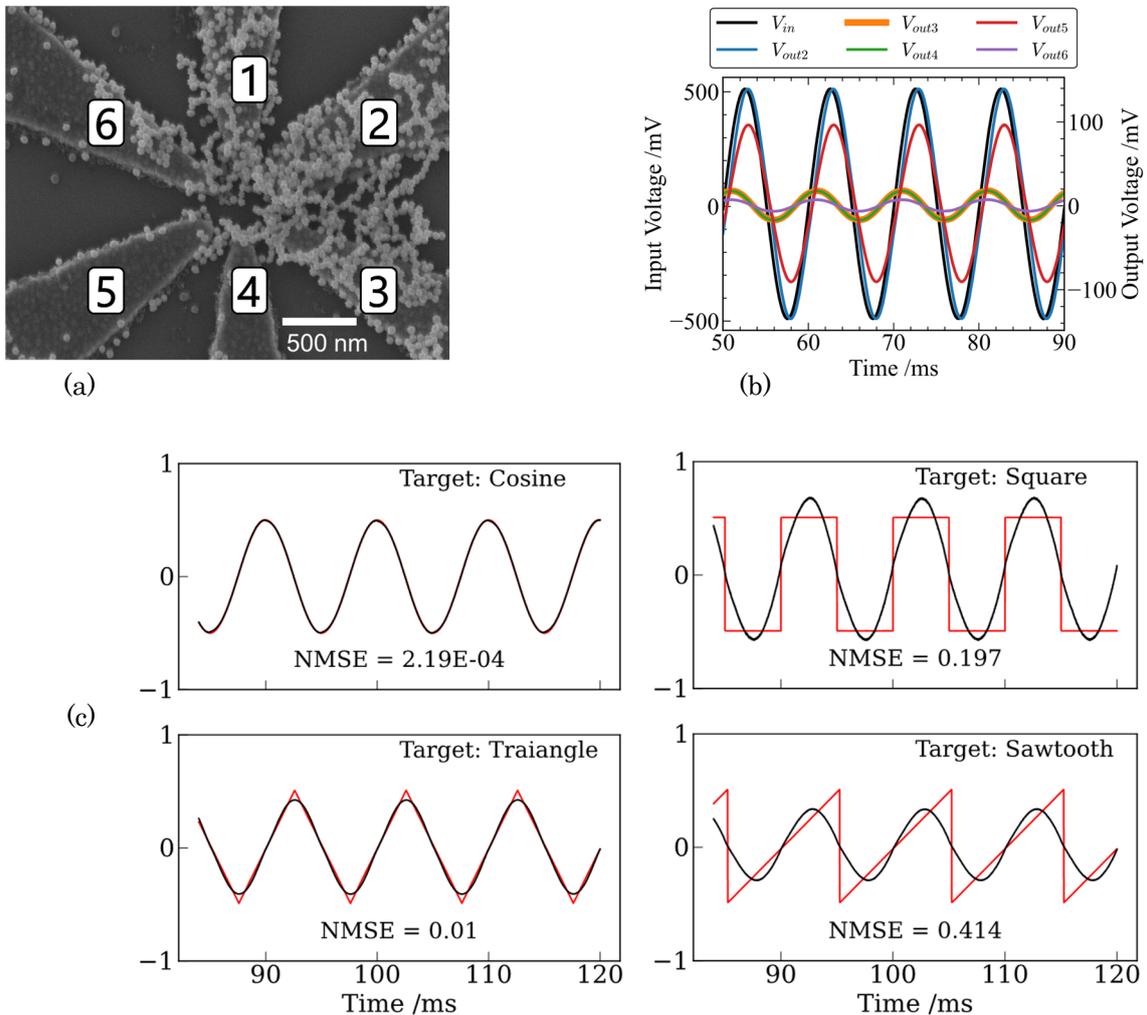


図 2: 誘電泳動自動停止装置を使用して作製した 6 端子付き金ナノ粒子集合体。(a) SEM 写真。(b) 1 番端子に正弦波電圧を印加した際のお端子の出力電圧波形。測定は液体ヘリウム温度で行った。(c) 5 出力電圧波形とリッジ回帰を利用したリザーコンピューティングによる波形生成タスクの結果。NMSE (Normalized Mean Square Error) の値が小さいほどエラーが小さい。

### (3) 多段階液浸法で作製した 12 端子付き金ナノ粒子集合体の物理リザー特性評価。

誘電泳動法では、金ナノ粒子の径によって最適条件が異なり、特に粒径が小さいナノ粒子を集合させることが難しい。そこで、同時に集合させるナノ粒子の径の範囲を拡大することを狙って、多段階液浸法による金ナノ粒子集合体の作製を行った。あわせて、電子ビームリソグラフィの条件を整えることで、端子数を 6 から 12 に増やした。3 段階液浸法によって作製した 12 端子を有する金ナノ粒子集合体の SEM 写真を図 3(a) に示す。金ナノ粒子は、直径 50nm, 30nm, 15nm のものを混合している。この試料では直径が 15nm の小さな金ナノ粒子を含むため、単一電子帯電エネルギーが大きくなり、液体窒素温度でもクーロン閉塞が確認された。図 3(b) に液体窒素温度での電流-電圧特性を示す。4 番端子と 5 番端子が不良であったが、2 番端子とその他 9 つの端子間の特性が示されている。ナノ粒子の径をばらつかせた影響か、非線形性が強くなっている。非線形性の様子は、図 3(c) と図 3(d) に示した正弦波電圧を入力した際の出力電圧波形とそのスペクトルにも良く表れている。図 3(e) に短期記憶タスクへの応答例を示す。これは、high-low のランダム波形を入力した際の出力波形から、遅延を入れたターゲット波形を再現するタスクである。遅延時間が 1 や 2 の場合はターゲット波形を再現できている。一方、遅延時間が 5 になると再現できていない。図 3(f) に遅延時間と相関係数の関係 (忘却曲線) を示す。この結果から短期記憶容量は約 3.0 と求まる。

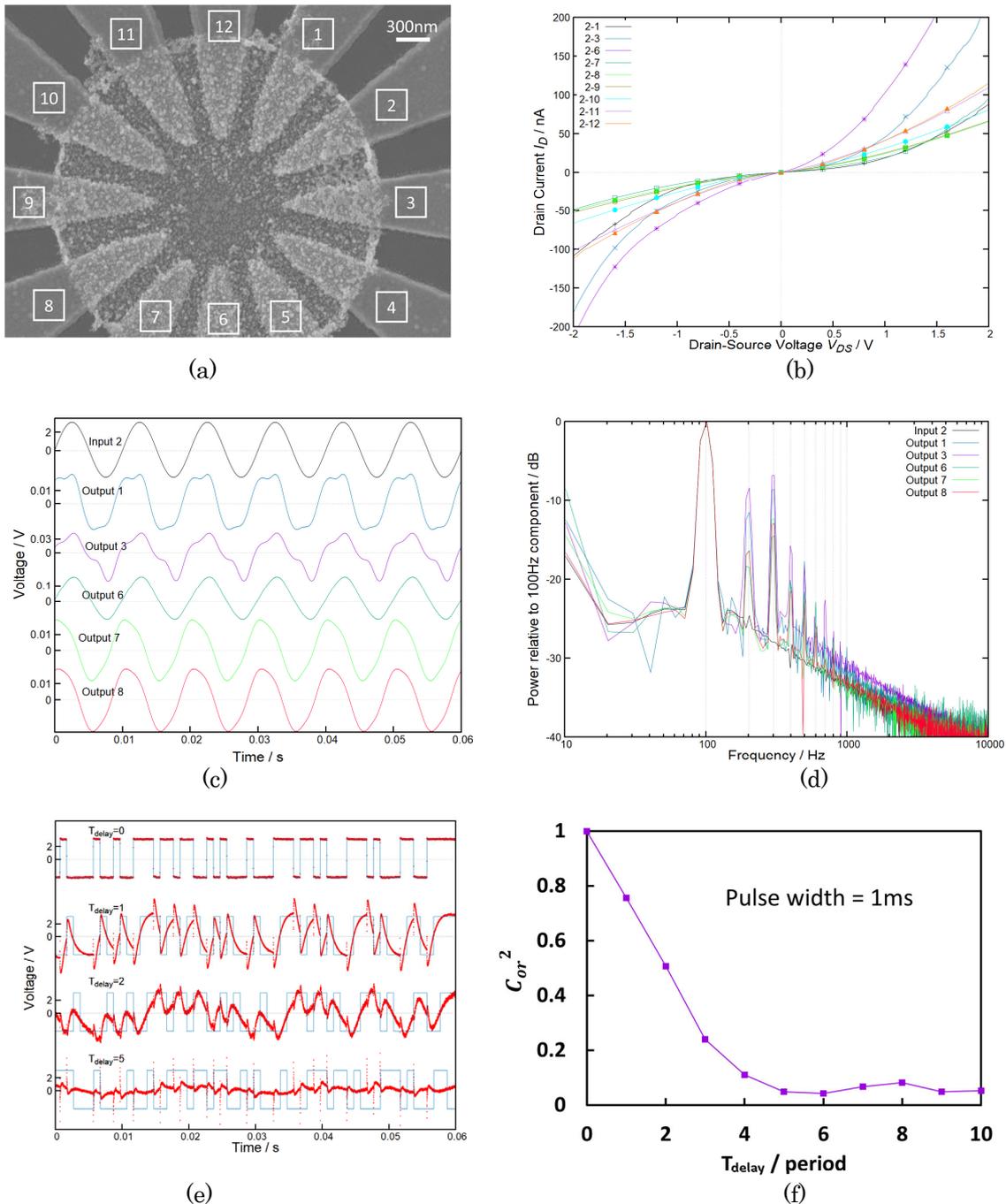


図 3: 3 段階液浸法により作製した 12 端子付き金ナノ粒子集合体。(a) SEM 写真。(b) 2 番端子と他端子との間で測定した電流-電圧特性。測定は液体窒素温度で行った。(c) 正弦波電圧を入力した際の出力電圧の様子。(d) 出力電圧波形のスペクトル。偶数次を含めた高調波成分が確認できる。(e) 短期記憶タスクの応答例。high-low のランダム波形を入力した際の出力波形から、遅延を入れたターゲット波形を再現するタスクである。遅延時間が 1 や 2 の場合はターゲット波形を再現できている。一方、遅延時間が 5 になると再現できていない。(f) 遅延時間と相関係数の関係 (忘却曲線)。この結果から短期記憶容量は約 3.0 と求まる。

以上の研究成果により、「ナノ粒子集合体が物理リザーバーとして機能することの実証」という当初の研究目的をおおよそ達成することができた。今後の研究の一つの方針としては、他技術との優劣を比較しつつ、ナノ粒子集合体の物理リザーバー応用のメリットを実証していくことが挙げられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Mizugaki Yoshinao, Fujikura Kenta, Shimada Hiroshi   | 4. 巻<br>63                 |
| 2. 論文標題<br>Nonlinear signal conversion in gold nanoparticle random array for physical reservoir applications | 5. 発行年<br>2024年            |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>01SP35 (1~4) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/acfe  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                  |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Mizugaki Yoshinao, Sato Kenta, Shimada Hiroshi, Onomi Takeshi                         | 4. 巻<br>-                 |
| 2. 論文標題<br>Random Number Generation Utilizing Timing Jitters of Single-Flux-Quantum Propagation | 5. 発行年<br>2023年           |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS2023)       | 6. 最初と最後の頁<br>1744 ~ 1748 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/PIERS59004.2023.10221525                                    | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                 |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Sato Kenta, Sega Naonori, Shimada Hiroshi, Mizugaki Yoshinao   | 4. 巻<br>2545               |
| 2. 論文標題<br>Evaluation of True Random Number Sequences Generated by Utilizing Timing Jitters in Superconducting Integrated Circuits | 5. 発行年<br>2023年            |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physics: Conference Series  | 6. 最初と最後の頁<br>012022 (1~8) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1742-6596/2545/1/012022  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-                  |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>SATO Kenta, SEGA Naonori, SOMEI Yuta, SHIMADA Hiroshi, ONOMI Takeshi, MIZUGAKI Yoshinao       | 4. 巻<br>E105.C          |
| 2. 論文標題<br>Evaluation of a True Random Number Generator Utilizing Timing Jitters in RSFQ Logic Circuits | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>IEICE Transactions on Electronics   | 6. 最初と最後の頁<br>296 ~ 299 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1587/transele.2021SES0001  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-               |

|  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. 著者名<br>Mizugaki Yoshinao, Sega Naonori, Shimada Hiroshi   | 4. 巻<br>19                   |
| 2. 論文標題<br>100GHz operation of a 4-bit single-flux-quantum pulse-frequency modulator designed for bipolar D/A conversion | 5. 発行年<br>2022年              |
| 3. 雑誌名<br>IEICE Electronics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>20220194 (1~4) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1587/elex.19.20220194   | 査読の有無<br>有                   |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-                    |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Sega Naonori, Somei Yuta, Shimada Hiroshi, Mizugaki Yoshinao  | 4. 巻<br>2323               |
| 2. 論文標題<br>Operation of a 4-bit RSFQ digital-to-analog converter based on a binary split-confluence configuration | 5. 発行年<br>2022年            |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physics: Conference Series   | 6. 最初と最後の頁<br>012033 (1~7) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1742-6596/2323/1/012033   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-                  |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>浦江 哲也, 島田 宏, 水柿 義直                               | 4. 巻<br>J105-C        |
| 2. 論文標題<br>マイクロコントローラを利用した金ナノ粒子誘電泳動の自動停止機構                 | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>電子情報通信学会和文論文誌C                                   | 6. 最初と最後の頁<br>339~341 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.14923/transelej.2022JCF6001 | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                     | 国際共著<br>-             |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Somei Yuta, Shimada Hiroshi, Mizugaki Yoshinao   | 4. 巻<br>60                 |
| 2. 論文標題<br>Enhanced operation frequencies of bipolar double-flux-quantum amplifiers fabricated using 10-kA/cm <sup>2</sup> Nb/AlO <sub>x</sub> /Nb integration process | 5. 発行年<br>2021年            |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>073001 (1~7) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac0450  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                  |

[学会発表] 計45件(うち招待講演 2件/うち国際学会 19件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, K. Fujikura, and H. Shimada  |
| 2. 発表標題<br>Coulomb-Blockade-Based Nonlinear Signal Conversion in Gold-Nanoparticle Random Arrays |
| 3. 学会等名<br>14th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics (IWNN-14) (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Hayashi, K. Kobayashi, M. Moriya, H. Shimada, and Y. Mizugaki  |
| 2. 発表標題<br>Physical reservoir made of gold-nanoparticle random arrays exhibiting nonlinear characteristics due to the Coulomb blockade |
| 3. 学会等名<br>12th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (BFBC 2024) (国際学会)                                  |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Kobayashi, Y. Hayashi, K. Fujikura, M. Moriya, H. Shimada, and Y. Mizugaki  |
| 2. 発表標題<br>Physical Reservoir Application of Random Network of Gold Nanoparticles Fabricated by Multi-Step Immersion in Gold Colloidal Solution |
| 3. 学会等名<br>36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, K. Sato, and H. Shimada                                       |
| 2. 発表標題<br>RSFQ Hardware Random Number Generator Comprising Two Josephson Oscillators |
| 3. 学会等名<br>16th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2023) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, K. Sato, H. Shimada, and T. Onomi                                       |
| 2. 発表標題<br>Random Number Generation Utilizing Timing Jitters of Single-Flux-Quantum Propagation |
| 3. 学会等名<br>The 44th Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS2023) (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, K. Fujikura, and H. Shimada  |
| 2. 発表標題<br>Nonlinear Signal Conversion in Gold-Nanoparticle Random Array for Physical Reservoir Applications                               |
| 3. 学会等名<br>The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2023) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林 優生, 小林海斗, 守屋雅隆, 島田 宏, 水柿義直          |
| 2. 発表標題<br>クーロン閉塞を発現する金ナノ粒子集合体を物理リザーバーに用いた波形分類実験 |
| 3. 学会等名<br>第71回応用物理学会春季学術講演会                     |
| 4. 発表年<br>2024年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>福代大紀, 島田 宏, 水柿義直  |
| 2. 発表標題<br>Time-to-Digital Converterを備えたSFQ All-Digital Phase Locked Loopの設計 |
| 3. 学会等名<br>2024年電子情報通信学会総合大会   |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林 誠也, 島田 宏, 水柿義直                    |
| 2. 発表標題<br>単一磁束量子パルス周波数変調型D/A変換器のGHz信号生成回路への応用 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告 (超伝導エレクトロニクスSCE)     |
| 4. 発表年<br>2024年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>嶋田佳宏, 守屋雅隆, 島田 宏, 但木大介, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>Siチップのアーチャに形成した自立型脂質二分子膜の定電流経時測定   |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告 (電子部品・材料研究会CPM)     |
| 4. 発表年<br>2023年                               |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>林 誠也, 島田 宏, 水柿義直           |
| 2. 発表標題<br>単一磁束量子パルス周波数変調型マイクロ波発生器の設計 |
| 3. 学会等名<br>第84回応用物理学会秋季学術講演会          |
| 4. 発表年<br>2023年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>嶋田佳宏, 平松大樹, 守屋雅隆, 島田 宏, 但木大介, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>Si/Si3N4チップのアーチャに形成した自立型脂質二分子膜の定電流経時測定   |
| 3. 学会等名<br>第84回応用物理学会秋季学術講演会                        |
| 4. 発表年<br>2023年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小林海斗, 林 優生, 藤倉健太, 守屋雅隆, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>多段階液浸法で作製した金ナノ粒子ランダム配列の物理リザバー応用    |
| 3. 学会等名<br>第84回応用物理学会秋季学術講演会                  |
| 4. 発表年<br>2023年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, K. Sato, N. Sega, Y. Somei, H. Shimada, and T. Onomi                      |
| 2. 発表標題<br>Hardware Random Number Generator Utilizing Timing Jitters in RSFQ Logic Circuits       |
| 3. 学会等名<br>2022 JSPS 146th Committee International Symposium on Superconductor Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S. Hayashi, N. Sega, K. Sato, and Y. Mizugaki  |
| 2. 発表標題<br>Voltage-swing values of double-SQUID amplifiers having various McCumber parameters     |
| 3. 学会等名<br>2022 JSPS 146th Committee International Symposium on Superconductor Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>D. Hiramatsu, R. Sato, M. Moriya, H. Shimada, D. Tadaki, A. Hirano-Iwata, Y. Mizugaki   |
| 2. 発表標題<br>Equivalent circuit analysis of AC impedance fluctuation measured across free-standing bilayer lipid membranes mixed with carbon nanotubes |
| 3. 学会等名<br>35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, T. Urae, and H. Shimada   |
| 2. 発表標題<br>Microcontroller-Controlled Dielectrophoretic Assembly of Gold Nanoparticle Arrays toward Realization of Physical Reservoir Devices |
| 3. 学会等名<br>35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K. Sato, N. Sega, H. Shimada, Y. Mizugaki   |
| 2. 発表標題<br>Evaluation of True Random Number Sequences Generated by Utilizing Timing Jitters in Superconducting Integrated Circuits |
| 3. 学会等名<br>35th International Symposium on Superconductivity (ISS 2022) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S. Hayashi, N. Sega, K. Sato, and Y. Mizugaki                                    |
| 2. 発表標題<br>Voltage-Swing Improvement of Double-SQUID Amplifier by Tuning McCumber Parameter |
| 3. 学会等名<br>11th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2023 (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, K. Sato, and T. Onomi   |
| 2. 発表標題<br>Development of SFQ Oscillator-Based Hardware Random Number Generators            |
| 3. 学会等名<br>11th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2023 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, T. Urae, and H. Shimada   |
| 2. 発表標題<br>Nonlinear Responses Observed in Random Arrays of Gold Nanoparticles Assembled by Dielectrophoresis |
| 3. 学会等名<br>13th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics (国際学会)                             |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>富岡康貴, 守屋雅隆, 高島匠吾, 島田 宏, 廣瀬文彦, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>自立型平面脂質二分子膜の交流特性測定で観測された非線形応答            |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告 (電子デバイス)                  |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤健太, 瀬賀直功, 島田 宏, 水柿義直                   |
| 2. 発表標題<br>2つのオシレータのタイミングジッタを利用するRSFQ 真性乱数生成回路の動作実証 |
| 3. 学会等名<br>2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会                    |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>藤倉健太, 浦江哲也, 守屋雅隆, 島田 宏, 水柿義直      |
| 2. 発表標題<br>物理リザバーを目指した炭素被覆Coナノ粒子集合体での非線形信号変換 |
| 3. 学会等名<br>第83回応用物理学会秋季学術講演会                 |
| 4. 発表年<br>2022年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>浦江哲也, 島田 宏, 水柿 義直              |
| 2. 発表標題<br>誘電泳動による金ナノ粒子配列形成時の電極間インピーダンス測定 |
| 3. 学会等名<br>第83回応用物理学会秋季学術講演会              |
| 4. 発表年<br>2022年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>平松大樹, 佐藤 陸, 守屋雅隆, 島田 宏, 但木大介, 平野愛弓, 水柿義直      |
| 2. 発表標題<br>CNTを混合した自立型脂質二分子膜で観測される交流インピーダンス繰り返し増減の等価回路解析 |
| 3. 学会等名<br>第83回応用物理学会秋季学術講演会                             |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤健太, 瀬賀直功, 島田 宏, 水柿義直           |
| 2. 発表標題<br>タイミングジッタを利用して真性乱数を生成する超伝導集積回路の評価 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告(超伝導エレクトロニクス)      |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上田翔弥, 嶋田佳宏, 平松大樹, 守屋雅隆, 但木大介, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>自立型DPPC膜の繰り返しEIS測定から抽出した特性容量の温度依存性       |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告(電子部品・材料研究会)               |
| 4. 発表年<br>2023年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>林 優生, 小林海斗, 藤倉健太, 島田 宏, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>2種類の粒径の金ナノ粒子集合体での高周波誘起電流の観測  |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告 (電子部品・材料研究会)  |
| 4. 発表年<br>2023年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Urae, T. Yagai, K. Sekine, M. Moriya, H. Shimada, A. Hirano-Iwata, F. Hirose, and Y. Mizugaki                                   |
| 2. 発表標題<br>Electrical Characteristics of Single-Electron Transistors Made by Dielectrophoresis of Gold Nanoparticles with Different Diameters |
| 3. 学会等名<br>34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki   |
| 2. 発表標題<br>Superconducting Josephson digital-to-analog converters for quantum voltage generation |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Advanced Science and Technology (ISAST) (招待講演) (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Mizugaki, Y. Somei, and H. Shimada   |
| 2. 発表標題<br>Operation of Double-Flux-Quantum Amplifiers Fabricated Using a 10 kA/cm <sup>2</sup> Nb/AlO <sub>x</sub> /Nb Integration Process                              |
| 3. 学会等名<br>The 14th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2021) & the 3rd Workshop on Quantum and Classical Cryogenic Devices, Circuits, and Systems (QCCC 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>N. Sega, Y. Somei, H. Shimada, and Y. Mizugaki   |
| 2. 発表標題<br>Operation of a 4-bit RSFQ digital-to-analog converter based on a binary split-confluence configuration |
| 3. 学会等名<br>The 34th International Symposium on Superconductivity (ISS 2021) (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐藤健太, 瀬賀直功, 曾明裕太, 島田 宏, 小野美 武, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>タイミングジッタを利用するRSFQ真性乱数生成器の性能評価       |
| 3. 学会等名<br>2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会               |
| 4. 発表年<br>2021年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>瀬賀直功, 曾明裕太, 島田 宏, 水柿義直              |
| 2. 発表標題<br>バイナリ分割合成方式を用いた 4-bit RSFQ-DAC の動作実証 |
| 3. 学会等名<br>2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会               |
| 4. 発表年<br>2021年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>瀬賀直功, 曾明裕太, 島田 宏, 水柿義直       |
| 2. 発表標題<br>単一磁束量子の2進パルス列を用いたD/A変換器の動作実証 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告(超伝導エレクトロニクス)  |
| 4. 発表年<br>2022年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小林海斗, 藤倉健太, 浦江哲也, 守屋雅隆, 島田 宏, 水柿義直  |
| 2. 発表標題<br>金コロイド二段階液浸法を用いて作製した単一電子トランジスタの電気的特性 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告 (電子部品・材料研究会)         |
| 4. 発表年<br>2022年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>嶋田佳宏, 平松大樹, 佐藤 陸, 守屋雅隆, 但木大介, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>[70]PCBMを混合した自立型脂質二分子膜の電気的特性             |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告 (電子部品・材料研究会)              |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐藤 陸, 平田はるか, 守屋雅隆, 島田 宏, 但木大介, 平野愛弓, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>炭素系ナノ材料を混合した自立型脂質二分子膜の電気的特性               |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会                         |
| 4. 発表年<br>2022年                                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Somei, H. Shimada, and Y. Mizugaki  |
| 2. 発表標題<br>Enhanced Operation Frequencies of Superconducting Voltage Multiplier with Quantum Accuracy |
| 3. 学会等名<br>The Irago Conference 2020 (Interdisciplinary Research And Global Outlook) (国際学会)           |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>瀬賀直功, 山崎洸生, 曾明裕太, 島田 宏, 水柿義直                              |
| 2. 発表標題<br>10 kA/cm <sup>2</sup> プロセスを用いたDouble-SQUID分布型RSFQアンプの動作検証 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会ソサイエティ大会  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>曾明裕太, 島田 宏, 水柿義直  |
| 2. 発表標題<br>Nb 10-kA/cm <sup>2</sup> 集積プロセスにより作製した両極性DFQアンプの最大動作周波数向上 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告(超伝導エレクトロニクス)                               |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤倉健太, 浦江哲也, 関根一真, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>オンチップ電磁石を利用して作製したCoナノ粒子配列からなる強磁性単一電子素子         |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会技術研究報告(電子部品・材料研究会)                     |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>曾明裕太, 島田 宏, 水柿義直                                   |
| 2. 発表標題<br>Nb 10 kA/cm <sup>2</sup> プロセスで作製した磁気結合SFQ伝搬回路の特性評価 |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会                                  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>浦江哲也, 谷貝知起, 関根一真, 守屋雅隆, 島田 宏, 平野愛弓, 廣瀬文彦, 水柿義直 |
| 2. 発表標題<br>2種類の粒径の金ナノ粒子を誘電泳動させ作製した単一電子トランジスタの特性           |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会                              |
| 4. 発表年<br>2021年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 水柿研究室のホームページ<br><a href="http://www.mizugaki.es.uec.ac.jp/">http://www.mizugaki.es.uec.ac.jp/</a> |
|--|

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                | 備考 |
|-------|--------------------------------|--------------------------------------|----|
| 研究協力者 | 島田 宏<br><br>(Shimada Hiroshi)  | 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授<br><br>(12612) |    |
| 研究協力者 | 守屋 雅隆<br><br>(Moriya Masataka) | 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教<br><br>(12612) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|