

**II 人間の脳の演算処理メカニズムに倣った
脳型演算処理技術の研究開発**
(II Research and development on the neuromorphic computation technology,
emulating the computation mechanism in the human brain)

代表研究責任者 鈴木 義茂 大阪大学大学院基礎工学研究科

研究開発期間 平成 29 年度～令和元年度

【Abstract】

From ferromagnetic materials, which does not consume any energy to maintain the information, ultralow-power neuromorphic-operation basic-circuits have been constructed. The nanometer scale magnetic nano-dots system showed neuromorphic calculation power by means of reservoir computing. Realized skyrmion basic-circuits, i.e. hub, ratchet and c-join, make the Brownian computation with extreme low power consumption possible.

The modules composed from above mentioned basic-circuits show faster convergence and much lower energy consumption in learning process compared to the conventional deep learning network using semiconductor computers.

In addition, the developed neuromorphic system is adjustable to the required tasks by changing only the voltage application patterns on the magnetic nano-dots at the beginning of the task operation and during the operation.

1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 鈴木 義茂 † (大阪大学 †)
- **研究分担者** 鈴木 義茂 † (大阪大学 †)
久保田 均 † † (産業技術総合研究所 † †)
- **総合ビジネスプロデューサ** 新田 隆夫 † (大阪大学 †)
- **ビジネスプロデューサ** 新田 隆夫 (大阪大学 †)
久保田 均 † † (産業技術総合研究所 † †)

- **研究開発期間** 平成 29 年度～令和元年度
- **研究開発予算** 総額 207 百万円

(内訳)

平成 29 年度	平成 30 度	令和元年度
106 百万円	50 百万円	51 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

現在の人工知能技術、特に深層学習は、大量のデータを莫大な計算資源と電力を用いてコンピューターに学習させることで実現している。しかし、適用分野においては大量のデータや莫大な計算資源等を用意すること自体が困難であり、人工知能技術が十分に活用できていない分野も多い。他方、必ずしも大量のデータや莫大な計算資源等がなくても人工知能技術が有効に機能するためのヒントとなることが期待される人間の脳活動メカニズムが、脳活動計測技術の高度化に伴い次第に解明されつつある。

そこで、本研究では、次世代人工知能技術として、脳の演算処理メカニズムに倣い、超低電力かつスケラブルな演算処理を可能とする「脳型演算処理技術」を確立することにより、医療・介護、防災・インフラ、生活支援分野等の各分野・業種での人工知能技術の活用加速化や新産業・ビジネスの創出に貢献し、我が国の国際競争力の維持・向上に寄与することを目的とする。

3 研究開発成果（アウトプット）

3.1 超低消費電力演算処理技術

脳型演算基本回路において、従来のデジタル演算回路に比べて大幅な消費電力の削減が可能な超低消費電力演算処理技術を実現する。

本研究の目的を達成するために磁性体ナノドット配列を用いたスピングラス/アイスリザーバー演算回路及びスキルミオンブラウンニアン演算回路の研究開発を行った。

3.1.1 磁性体ナノドットリザーバー演算基本回路

ナノサイズの強磁性トンネル素子(MTJ)で構成される磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)の技術をベースとしたスピングラス/アイスリザーバー演算の基本回路を開発した。図1に(a)積層構造と(b)顕微鏡写真を示す。ドット間隔が小さく相互作用を発生するのに適した構造の作製に成功した。それぞれのナノドットはMTJとなっており磁化状態を電気抵抗として読み出すことができる。電圧磁気異方性変化の大きさは 120fJ/Vm であり素子動作に十分な大きさの効果を得ることに成功した。また、熱に起因するトルクも有効であることを発見した(Nature Nanotechnology 誌および新聞に発表)。抵抗値の外部磁場依存性の測定から動作パラメーターを得ることに成功した。

電圧印加による磁化制御においては電流を要しないために超低消費電力化が可能である。また、磁化制御が演算に対応するので、書き込みと演算のエネルギーは同程度である。このことから1ドットの書き込み動作と演算に要するエネルギーは 20nm 径の素子の場合、 $30,000\text{kBT}$ 程度となる。一方、CMOSデバイスでは1ゲート操作当たりのエネルギーは配線のチャージングのエネルギーを無視して

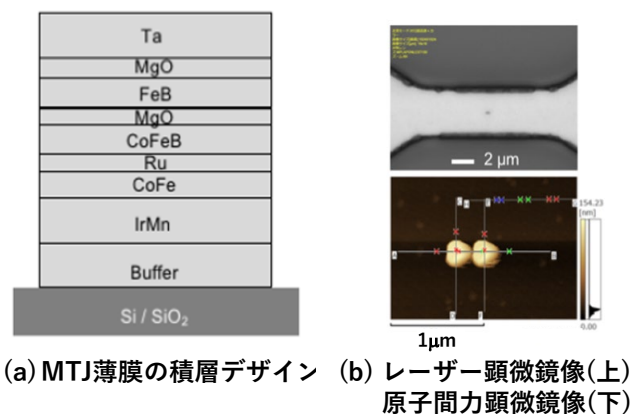


図1. 今回、開発した磁性体ナノドットリザーバー計算基本回路。(a) トンネル磁気抵抗素子(MTJ)用の薄膜の積層構造。(b) レーザー顕微鏡像(上)、原子間力顕微鏡像

も 220,000kBT 程度が限界 (Fan-out 4) となるとされている。即ち、素子レベルで従来のデジタル演算回路に比べて大幅な省エネ化を達成した。

1024×1024 ドットのリザーバーの磁化の運動の計算が可能なシミュレーターを開発した。GPU を用いることにより CPU のみを用いた場合の 100 倍以上の計算速度を達成した。図 2(a)、(b) にシミュレーションに用いた回路の形状を示す。回路は円形の磁性ナノドットを $2 \times N_y$ の格子状

に並べたアレイである。アレイの左下隅の一つのナノドットに 2 進数データを逐次入力し、他のドットには磁気異方性制御電圧を印加して演算を行った。この結果得られた短時間記憶能力 (STMC: Short term memory capacity) と非線形演算能力 (PCC: Parity check capacity) を図 2(c) に ●印で示した。 $N_y=14$ で PCC は約 4 となり 7 素子からなるスピン移行発振器を用いたリザーバー計算 (×印) の性能を超える。即ち、最小単位の脳型演算処理技術を実現した。

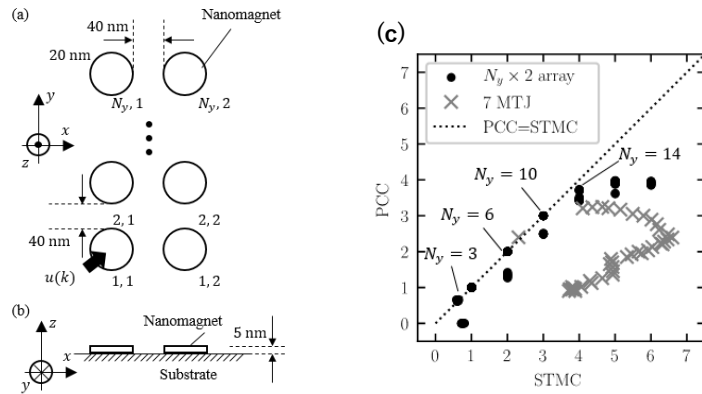


図 2 磁性体ナノドットリザーバー計算基本回路のシミュレーションによる動作実証。(a)磁性ナノドットリザーバーの設計例。上面図。(b) 同側面図、(c) リザーバーの計算能力。横軸は短期記憶能力 (STMC)、縦軸は非線形演算能力(PCC)を表している。●印は(a)の構造において N_y を変化したときの性能。×印は 7 個のスピン移行発振器を用いた場合の性能。

3.1.2 磁気スキルミオンブラウニアン演算基本回路

ブラウニアン計算回路は粒子の熱によるブラウン運動を利用して計算を行う超低消費エネルギー演算回路である。本研究では強磁性体薄膜中に発生する磁気ドメイン構造であり粒子のように振舞う磁気スキルミオンを用いてブラウニアン演算の基本回路であるハブ、ラチェット、C-join を実現した。

まず、最初にスキルミオン薄膜の作製、また、本素子の動作原理となるスキルミオンの拡散係数の電圧印加による制御に成功した。さらに、磁気異方性の局所制御によるスキルミオン回路を形成し、ゼロエネルギーで動作するハブの作製に成功した (図 3(a))。続いて、ラチェット、C-join として働く回路を作製し (図 3(b))、電流が作る磁界を用いる形で素子の動作を実証した。以上により、従来のデジタル演算回路に比べて大幅な消費電力の削減を可能とする回路の原理の実証に成功した。

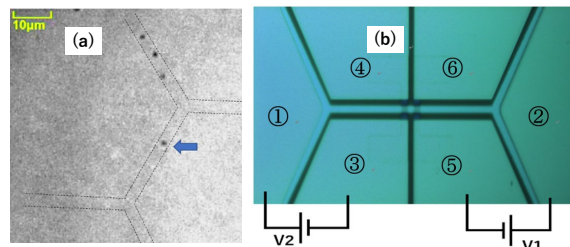


図 3. (a)ハブ、(b)ラチェットおよび C-join として働くスキルミオン基本回路。

3. 2 脳型演算モジュール化技術

- ・脳型演算モジュールにおいて、深層学習に比べて超低消費電力量で、次世代人工知能技術の学習を可能とする技術を実現する。
- ・DNN（特に CNN）、RNN などの機能を従来方式に比べて超低消費電力で実現できる脳型演算モジュール化技術を実現する。

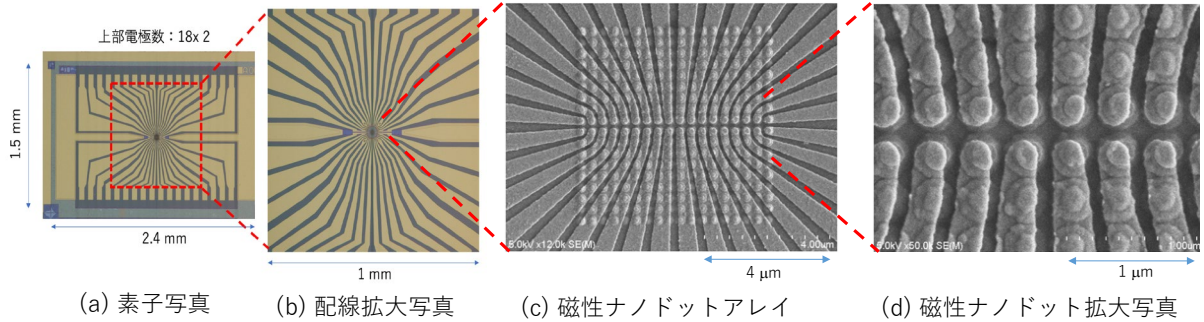


図 4. 脳型演算モジュールの作製。(a)素子写真、(b)配線拡大写真、(c)磁性ナノドットアレイ、(d)磁性ナノドットアレイ拡大写真。

3.2.1 磁性体ナノドットリザーバー演算モジュール化技術

磁性リザーバー演算基本回路のパターンをアレイ化することによりモジュールとなる回路を作製した。図 4 にあるように 18×18 ドットの素子の作製に成功した。しかし、プロジェクト 2 年目、および、3 年目の予算が半減したことから、提案時の計画を変更し、今回の素子では実動作は試みず素子パラメータを抽出するのみとした。抽出したパラメータを用いてシミュレーションによる動作実証を行った。

3bit データを入力可能な 12×4 ドットのナノドットリザーバーモジュールを遅延回路を使って多数接続することにより過去のデータとの間の非線形演算能力を持ちリザーバー演算回路を構成した(図 5(a))。この回路を用いて NARMA10 検定をシミュレーションにより行ったところ NAMRA10 予測を提案時の 3.6 倍の精度で行うことに成功した(図 5(b))。

次に、リザーバー演算回路と、通常の半導体を用いた回路との消費電力を比較した。リザーバー回路には、20 個のナノドットから構成されるリザーバーを用いた。また、通常の半導体を用いた回路として、ディープラーニングの一種である convolutional neural network (CNN)と、long short-term memory (LSTM)を用いたニューラルネットワークとをそれぞれ用いた。

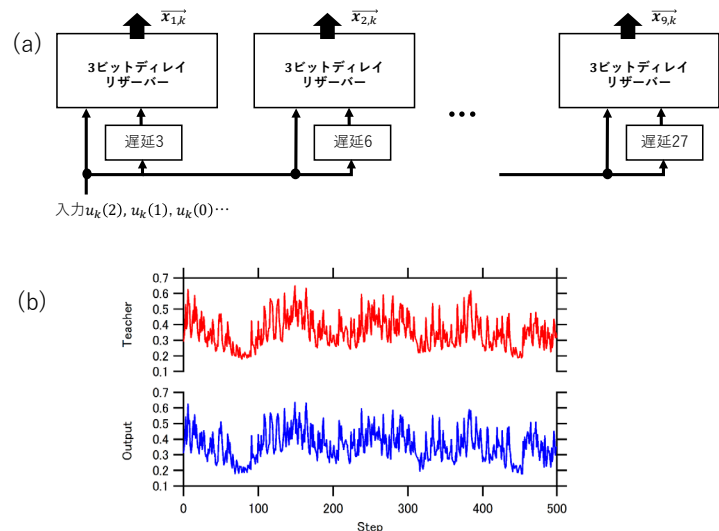


図 5. 脳型演算モジュールのシミュレーション。(a) 12×4 ドットのモジュールを遅延回路を使って多数接続した回路。(b) この回路を用いて NARMA10 検定を行った結果。赤：教師データ。青：磁性リザーバーの予測。

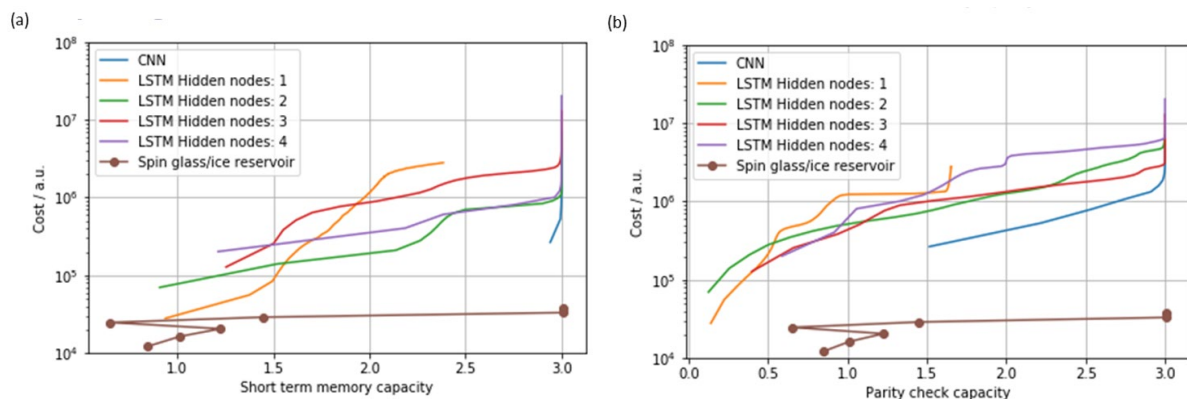


図6 磁性ナノドットリザーバー回路、CNN、LSTMを用いた際の(a)short term memory capacity ならびに(b) parity check capacity に依存した学習に必要な計算コスト

LSTMはRecurrent neural network(RNN)の一種とみることができる。具体的なタスクとして、short term memory (STM)タスクならびに parity check (PC)タスクを用い、**STMC \approx 3.0**、**PCC \approx 3.0**を得るための学習コストを比較した。その結果、磁性ナノドットリザーバー演算の学習コストは、CNNと比較して約1/64倍、LSTMと比較して約1/89倍となった。

即ち、脳型演算モジュールにおいて、深層学習に比べて超低消費電力量で、次世代人工知能技術の学習を可能とする技術を実現した。このことは当初目標であった通常の半導体を用いた回路と比較して**1/10の電力という目標を超えた先進的な成果である。**

3.2.2 磁気スキルミオンブラウン演算モジュール化技術

スキルミオンを粒子と見做してブラウン演算回路の動作を計算するスキルミオン粒子シミュレーターを開発した。これにより、スキルミオン基本演算回路の組み合わせで半加算器などのモジュールを構成しその動作を実証した。さらに、A/Dコンバーターを構成するモジュールの構成が可能であることを実証した。このことから、磁気スキルミオンブラウン演算モジュールはナノ磁性ドットリザーバーの出力をA/D変換してコンピューターに入力するために有用であることを明らかにした。理論上、1入力データあたりの変換エネルギーは約4fJのとなり**従来のデジタル回路の1/1000程度となることが示された。**

3.3 演算処理制御技術

演算回路の機能、構造などの初期設定が可能であり、重み計算などの演算処理結果をリアルタイムで演算処理過程等にフィードバックし、脳型演算回路構造や計算規模等の動的再構成を行うことのできる演算処理制御技術を実現する。

3.3.1 磁性体ナノドットリザーバー演算処理制御技術

$N \times M$ ドットの磁気ナノドットリザーバー演算回路から一部のみをモジュールとして動作させることが可能であることをシミュレーションを用いて実証した。図7にはアレイの一部を 2×12 の1bitタスクリザーバーおよび 6×4 の2bitタスクリザーバーとして再構成して利用した例を示した。どちらの場合も単体と同程度の性能を得ており、**本脳型演算モジュールを動的に構成・再構成可能であることが証明された。**また、**本脳型演算回路はモジュールの追加に関してスケラブルである。**さらに、**電圧の印加**

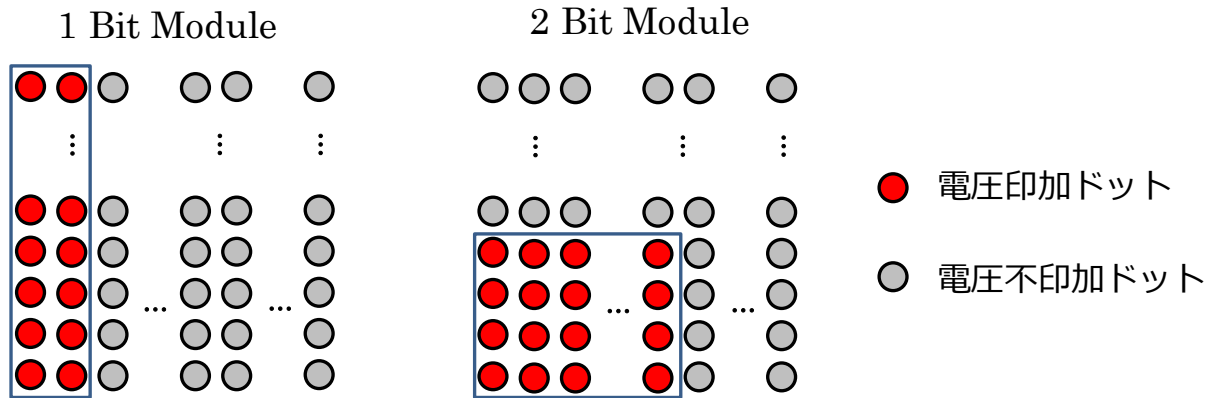


図 7 磁性ナノドットリザーバー演算回路のリコンフィギャラブル動作。

パターンのみで回路構成を変えることができることから、演算回路の機能、構造などの初期設定が可能であり、重み計算などの演算処理結果をリアルタイムで演算処理過程等にフィードバックし、脳型演算回路構造や計算規模等の動的再構成を行うことにより最適な演算処理を実現することができる。

3.3.1 磁気スキルミオンブラウン演算処理制御技術

スキルミオンブラウン演算回路においても磁気異方性により回路を構成できること、磁気異方性を電圧印加により変調できることから、電圧印加パターンにより回路を再構成することが可能である。このことを、実際にシミュレーションにより確認した。

また、スキルミオンを粒子として扱いその状態遷移をマスター方程式を用いてシミュレートするシミュレーターを構築することにより、スキルミオンブラウン演算の統計力学的な解析解を求めた。このことにより、多ビットの加算時間はビット数に対して線形に増加し、本演算回路のスケラビリティが証明された。即ち、磁気スキルミオンブラウン演算回路は動的に構成・再構成可能であり、かつスケラブルである。さらに、演算回路の機能、構造などの初期設定が可能であり、演算処理結果をリアルタイムで演算処理過程等にフィードバックし、脳型演算回路構造や計算規模等の動的再構成を行うことが可能である。

3. 4 課題 I との連携

課題 I との連携により課題 I のタスクを低消費電力で実行する脳型演算回路を提供する。

課題 I との連携により課題 I のタスクを低消費電力で実行する脳型演算回路を提供することを試みた。このために、「(課題 I) 人間の脳の認知メカニズムに倣った脳型認知分類技術の研究開発」から手の運動データ(ジャスチャー)を認識分類するタスクを例として抽出した。そして、データの前処理を本リザーバー演算回路によって置き換えるためのモジュールを設計しその動作を実証した。

図 8(a)に課題 I における脳型認知分類システムを用いた運動分類の模式図と、(b)に、それらとリザーバー演算回路とを併用した際の運動分類の模式図を示す。これまでに述べてきたように、リザーバー回路は半導体回路と比較して低消費電力での情報処理が可能である。また、リカレントニューラルネットワークの一種であることから、過去の入力データに依存した情報をも内包する。リカレントニューラルネットワークを用いずに脳型認知分類システムを用いた場合、過去の情報を含めたデータをベイジアンアトラクターモデル(BAM)による分類器へと入力する必要がある。一方で、リザーバー回路は過去の入

力データに依存した情報、すなわち運動の特徴を含むデータを生成可能である。そのため、リザーバー回路の出力を用いることにより、BAM による分類器へ入力するデータ量を削減することが可能となり低消費電力化が実現した。

このタスクでは運動データを縦に振動する運動(shaking)に、横に振動する運動(waving)、時計回りの運動(clockwise: CW)、反時計回りの運動(counter clockwise: CCW)に分類する。まず、 2×2 ピクセルの画像データに対してこのタスクを 3 ビットのバイナリ値の処理が可能な 6×7 個の磁性ドットからなるリザーバー演算モジュールで実行した。その結果、縦に振動する運動、横に振動する運動、時計回りの運動、反時計回りの運動の分類に対するエラーレートはそれぞれ、0.004、0.008、0.02、0.01 であり低いエラーレートにて二次元的な運動の分類を実行することに成功した。また、学習は小さなモジュールに対して行われるのでその消費エネルギーはとても小さくなる。モジュールの学習に必要な消費電力は前述したように CNN, LSTM などによる学習の約 1/50 以下となる。

次に、このタスクを現実的な分解能である 128×128 ピクセルの画像に対して実行するために、画像をその注目点を変えた 127×127 個の 2×2 ピクセルの画像データに分解し、上記のモジュールにより処理を実行した。処理は、 2×2 ピクセルに動点が見れたときのみ行われるのでイベントドリブンである省エネ化が実現する。図 9 に 1,258,062 個のナノ磁性体からなるリザーバー回路により時計回りに回転する手の運動を観察した場合の分類結果の注目点依存性の一例を示す。赤、緑、青、桃は、それぞれ縦に振動する運動(shaking)、横に振動する運動(waving)、時計回りの運動(clockwise: CW)、反時計回りの運動(counter clockwise: CCW)を示す。注目点によって運動は違った形に見えるが時計回り運動に見える結果が多数であることがわかる。この結果を課題 I が開発した BAM に入力することによりシステムとして省エネルギー化が可能となった。このことは基本計画の目標としては具体的には示されていなかったが、連携によって更なる省エネ効果を生んだことは先進的な成果と言える。

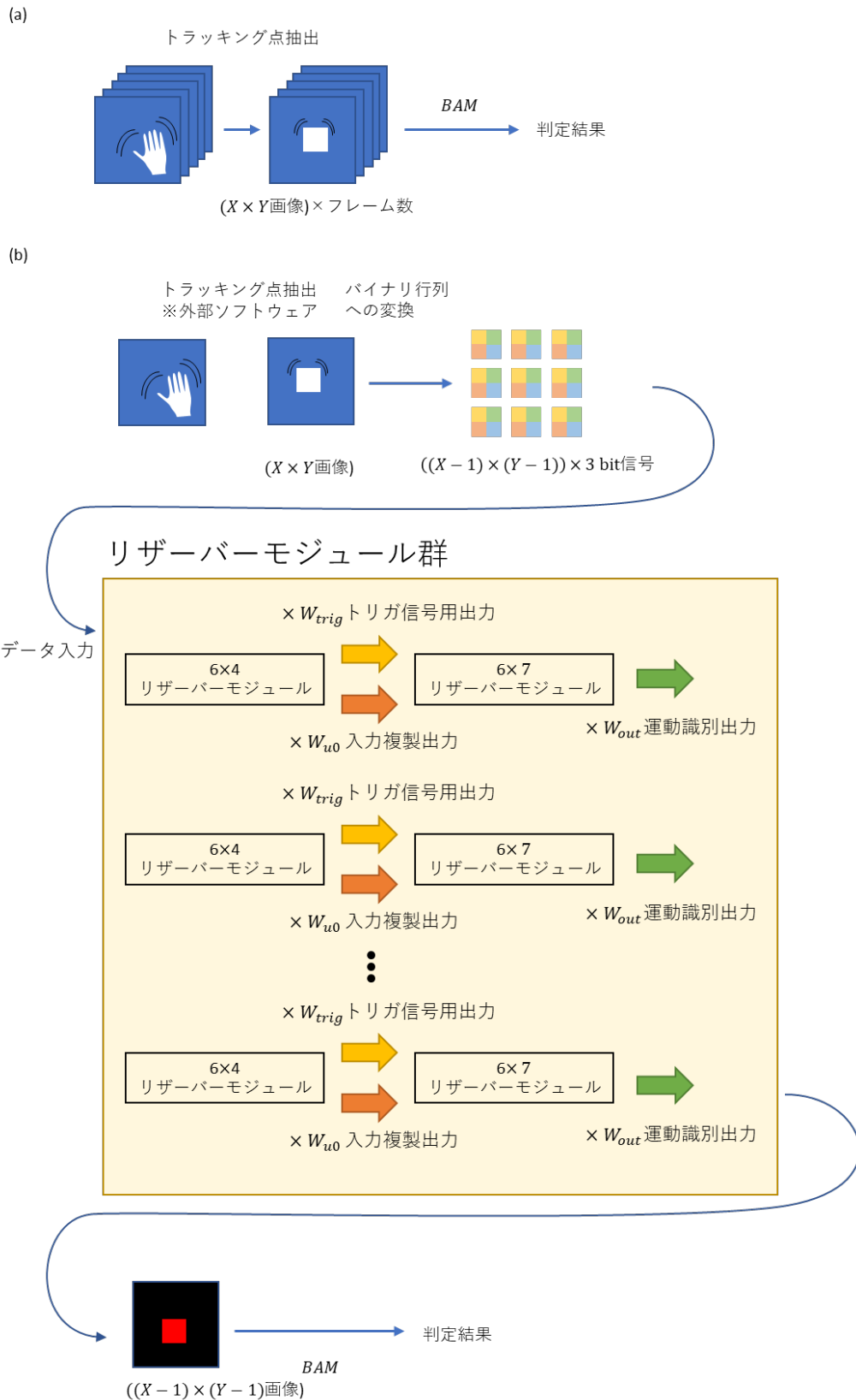


図 8 (a) 課題 I における運動分類手法の模式図と、(b)リザーバー回路を併用した際の運動分類手法の模式図。

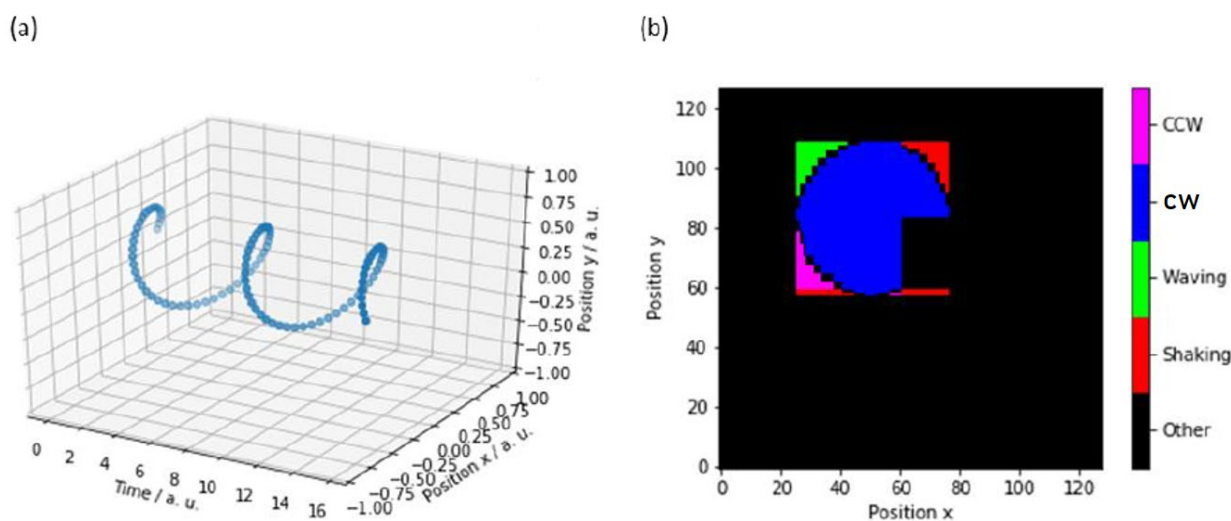


図9 (a)時計回りに運動する点と、(b)運動データの分類の一例

4 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

4.1 プロジェクト外での企業との共同研究

2017-2019.6 まで米国 I 社との共同研究を行った。

2019.7 からアルバック(株)とスキルミオンブラウニアン演算回路の製造プロセスに関する共同研究を開始した。

2019.10 から超低消費電力磁気スキルミオン検出技術について A 社との共同研究の下、研究を開始した。

4.2 特許の申請

研究開発の折り目、折り目に重要な技術について 7 件の特許の出願を行った。

4.3 磁気ナノドットリザーバー演算回路の室温動作に向けた取組み

スピングラス/スピンアイスリザーバー計算に関する本研究では、すべてのシミュレーションを絶対零度で行った。しかし、本回路の実用化のためには室温で動作することが望ましい。そこで、回路性能の温度特性を有限温度のシミュレーションによって調べた。その結果を図 10 に示す。その結果、短期記憶能力(STM)は比較的高温まで発現するが、非線形計算能力(PC)は温度上昇とともに急激に低下することを見出した。

そこで、室温動作のために素子間の相互作用を増強する研究を始めた。その一つの方法

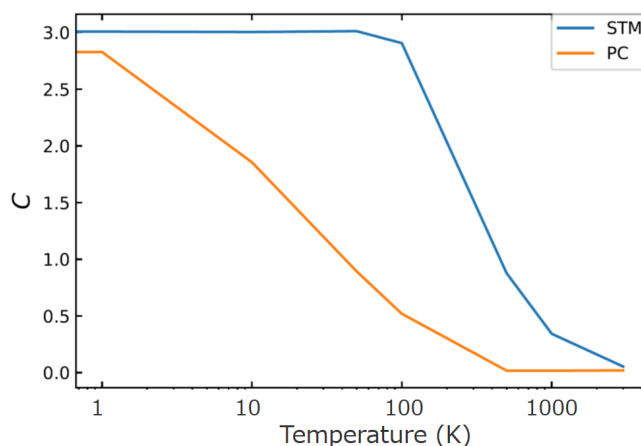


図 10 短期記憶能力(STM)と非線形計算能力(PC)の温度動作温度依存性のシミュレーション結果

はドットをわずかに接触させることにより電子の交換相互作用を発現させることである。交換相互作用は双極子相互作用の 1,000 倍程度大きいことが知られており、わずかでも素子が接触すれば相互作用の増大が期待できる。そこで実際に 3 角形の素子を作りその先端をわずかに接触させた。図 11 に室温で撮影した素子の磁気 Kerr 顕微鏡像を示す。単独の素子と接触した素子では全く違う磁気像を示しており大きな相互作用が働いていることが分かる。この他にもいくつかの方法を考案し特許を申請した。今後の実用化研究では、素子の接触などを利用した相互作用強度の最適化を行っていく。

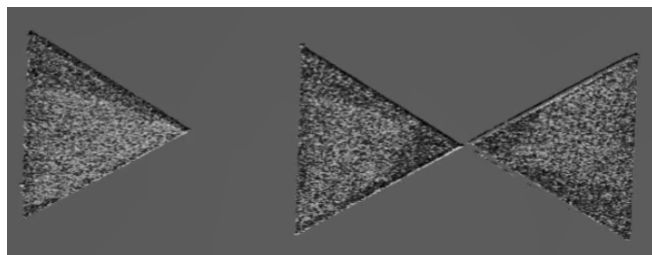


図 11 三角形の磁気ドットの室温における磁気 Kerr 顕微鏡像。僅かでも接触したドットは単独のものとは異なる磁気像を示し大きな相互作用が働いていることが分かる。

4. 4 運営委員会の開催および成果報告会・新聞発表などの広報・普及活動

広く有識者(大学 2 名、企業 2 名、国立研 1 名)の意見を聞くための運営委員会を毎年 1 度開催し、研究・運営に関する有益な意見を得た。また、本プロジェクトの成果を普及するための成果報告会を毎年開催した。但し、R1 年度の成果報告会については Covid-19 の影響で開催を見送った。新聞発表については磁化の低消費電力制御の成功に関するものを以下のタイトルが行い注目を集めた。

[1] “熱による高速・高効率な磁極制御～MRAM と AI ハードウェアの低消費電力化の実現へ向けて～”, 大阪大学,2018 年 12 月 5 日

この内容は Nature Nanotechnology 誌に掲載された研究内容に関するものである。

最終成果についても新聞発表を予定しているが、現在は Covid-19 の影響で先送りにしている。Covid-19 の影響について終息が見えてきた時点での発表を予定している。

5 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた計画

2020.4 以降もアルバック(株)とスキルミオンブラウニアン演算回路の製造プロセスに関する共同研究を継続する。

また、同社を含めた形で国の科学技術補助金の申請を行っていく。

これにより、3-5 年程度の最適化研究をしたのちに企業との共同による応用化研究、あるいは、企業への技術移転を行う。特に現時点では動作温度が低いので、室温で安定に動作する技術を実用レベルに持っていく必要がある。既に基礎実験には成功しているので、数年でこの技術は完成すると考えられる。

これらの研究を 3-5 年程度で行った後に、2-3 年程度でまずインテリジェントセンサーなどの素子レベルで動作可能な装置の実用化の可能性を明らかににする。さらに、その経験を踏まえて人工知能システムに必要な工場でのプロセス研究・信頼性研究などを開始する。

今回の研究ではスピン”アイス”リザーバーの研究はあまり進展しなかったが、スピンアイス中にはモノポールなどの準粒子が情報担体として出現する。しかも、モノポール対がストリングで結合するといった特異な性質があり、量子計算におけるエンタングルメントと同じように古典系において離れた二点に強い相関を持たせることができる可能性がある。これらの性質のリザーバー計算への利用について、スイスの ETH Zurich および学習院大学との共同研究を開始した。

現在、Si や R-RAM 技術を用いた脳型アクセレーターが順次実用化されつつある。磁気技術も MRAM

素子の演算回路内への取り込み(メモリ・イン・ロジック)などの方法から実用化されていくことが期待される。この段階では、MRAM や R-RAM の不揮発性はメモリとしてのみ利用され、その演算機能は Si にゆだねられたままである。本プロジェクトで開発したスピングラス/アイスリザバー演算技術ではメモリ自体が演算を行うところに特徴があり、前述のメモリ・イン・ロジック技術の先に位置するものである。演算そのものを非ノイマン型に変革するものであるため技術的な波及効果は非常に大きいと考えられる。コンピューターが行う演算のうち、脳型演算が占める割合は急速に増大しており、将来、本研究で開発したような超低消費エネルギー脳型演算回路の導入が必須となると考えられる。本技術は MRAM 技術を発展させたものであり、LSI の C-MOS 層の上部に作り付けることが可能であることからプロセス上の実用化障壁は比較的低いものと考えられる。

今回のブラウニアン演算素子ではスキルミオンの微視的な運動を外部から制御することにより熱的な運動を恣意的に変更することに成功した。これは、顕微鏡による観察と電気信号の印加によりなされた。即ち、装置を操っている実験者を介在して制御が行われている。今後、この素子を固体デバイスとして実現するには、このフィードバック系を素子内部に作り付ける必要がある。このような自律的な情報熱力学機関は既に単電子トランジスタにおいて数 mK という極低温で実現している(J. V. Koski, et al., "On-Chip Maxwell's Demon as an Information-Powered Refrigerator", Phys. Rev. Lett. 115, 260602 (2015))。単電子トランジスタにおいて極低温が必要だったのは電子がとても小さいからである。スキルミオンの特徴は数十から大きい場合は一千万個程度の電子が集まって一つの粒子のように振舞う点にある。このため、スキルミオンを利用すれば室温で動作するオンチップ型の情報熱力学機関の作製が可能と考えられる。この実現が未来の電子素子のためには非常に重要な課題と考えられる。具体的には現在すでに電力をほとんど消費しないスキルミオンの制御が電圧磁気異方性変化を用いることにより既に実現しているが、今後は電力をほとんど必要としないスキルミオンの検出法の開発が重要となる。このためにはいくつかの候補が既にありその研究が重要となる。本研究については A 社との共同研究として既に研究を開始している。

スピングラスもスピンアイスもスキルミオンも有限温度で相互作用する多体の物理系であるためボルツマンマシンとしての性質を有し、例えば、可逆論理素子の構築などが原理的に可能である。これらの性質の積極的な利用に関してはアルバックの共同研究として既に研究を開始した。

このような基礎研究にあと 5-7 年程度必要と考えられる。しかし、磁気スキルミオンブラウニアン演算は究極の省エネルギー回路を実現するものであるため、その波及効果は非常に大きいと考えられる。

6 査読付き誌上発表論文リスト

- [1] T. Furuta, K. Fujii, K. Nakajima, S. Tsunegi, H. Kubota, Y. Suzuki, and S. Miwa, "Macromagnetic Simulation for Reservoir Computing Utilizing Spin Dynamics in Magnetic Tunnel Junctions", Physical Review Applied 10, 034063 (2018)
- [2] M. Goto, Y. Wakatake, U.K. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, "Microwave amplification in a magnetic tunnel junction induced by heat-to-spin conversion at the nanoscale", Nature Nanotechnology, 14, 40-43 (2019)
- [3] T. Nozaki, Y. Jibiki, M. Goto, E. Tamura, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa and Y. Suzuki, "Brownian motion of skyrmion bubbles and its control by voltage applications", Applied Physics Letters 114, 012402 (2019)
- [4] H. Nomura, T. Furuta, K. Tsujimoto, Y. Kuwabiraki, F. Peper, E. Tamura, S. Miwa, M. Goto, R.

Nakatani, Y. Suzuki, "Reservoir computing with dipole-coupled nanomagnets", Japanese Journal of Applied Physics Rapid Communication, 58, 070901, (2019)

[5] T. Nozaki, M. Konoto, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, and S. Yuasa, "Voltage-induced coercivity change in Co film grown on Cr₂O₃ barrier", Japanese Journal of Applied Physics 58, 100911 (2019)

[6] H. Nomura, T. Furuta, K. Tsujimoto, Y. Kuwabiraki, N. Samura, E. Tamura, M. Goto, R. Nakatani, H. Kubota and Y. Suzuki, "Randomly generated node-state-update procedure for dipole-coupled magnetic reservoir computing with voltage control of the magnetism", Journal of Physics D: Applied Physics, 53, 094001, (2019)

[7] H. Nomura, K. Tsujimoto, M. Goto, N. Samura, R. Nakatani, Y. Suzuki, "Reservoir computing with two-bit input task using dipole-coupled nanomagnet array ", Japanese Journal of Applied Physics, 59, SEEG02, (2019)

[8] T. Nozaki, M. Konoto, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, and S. Yuasa, "Control of the magnetic domain of Pt/Co/Ru/MgO multilayer; Effect of Co thickness and Ru insertion", AIP Advances 10, 035130 (2020)

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

[1] H. Kubota, T. Taniguchi, A. Fukushima, K. Yakushi and S. Yuasa, "Magnetostatic interaction between closely located magnetic tunnel junction" , The 21st International Conference on Magnetism (ICM2018) ,San Francisco, CA, 2018/07/17

[2] T. Nozaki, M. Konoto, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima and S. Yuasa, "Control of magnetic domain in Pt/Co/MgO trilayer with Ru insertion layer", The 2019 Joint MMM-Intermag conference, Washington, DC., 2019/1/15

8 その他の誌上発表リスト

[1] H. Nomura, K. Tsujimoto, Y. Kuwabiraki, R. Nakatani, F. Peper, E. Tamura, T. Furuta, S. Miwa, M. Goto, Y. Suzuki, "Reservoir computing with dipole coupled nanomagnets array", arXiv:1810.13140v1 [cond-mat.mtrl-sci], arXiv:1810.1314, 2018/10/31

[2] H. Nomura, T. Furuta, K. Tsujimoto, Y. Kuwabiraki, F. Peper, E. Tamura, S. Miwa, M. Goto, R. Nakatani, Y. Suzuki, "Reservoir computing with dipole-coupled nanomagnets", arXiv:1810.13140v2 [cond-mat.mtrl-sci], arXiv:1810.1314, 2019/02/14

[3] 後藤 穰,若竹 陽介,Ugwumsinachi Kalu Oji,三輪 真嗣,鈴木 義茂,久保田 均,薬師寺 啓,福島 章雄,湯浅 新治,Nikita Strelkov,Bernard Dieny, "ナノ磁性体中の熱を利用したマイクロ波技術", 自動車技術 第73巻第6号, 2019/06/01

[4] E. Tamura, Y. Suzuki, "Theory of Skyrmionic Diffusion: Hidden Diffusion Coefficients and Breathing Diffusion", arXiv, 2019/7/16

[5] Y. Jibiki, M. Goto, E. Tamura, J. Cho, H. Nomura, T. Srivastava, W. Lim, S. Auffret, C. Baraduc, H. Bea, Y. Suzuki, "Skyrmion Brownian circuit implemented in a continuous ferromagnetic thin film",

arXiv:1909.10130, 2019/09/23

[6] 野村 光,鈴木 義茂,久保田 均,"強磁性トンネル接合を用いた集積型リザーバー計算モジュールの提案", 電気学会誌,一般社団法人電気学会,vol. 139, No. 10, pp674-678, 2019/10/1

9 口頭発表リスト

- [1] 野村 光, 中谷 亮一, Ferdinand Peper, 田村 英一, 三輪 真嗣, 後藤 穰, 鈴木 義茂, "磁性ドットアレイを用いた脳型計算器(Neuromorphic computing with nanomagnet array)", 日本磁気学会 第 216 回研究会/第 66 回スピントロニクス専門研究会, 東京大学 (東京都), 2018/01/25
- [2] 野村 光, 中谷 亮一, 田村 英一, 三輪 真嗣, 後藤 穰, ペパー フェルディナンド, 鈴木 義茂, "トンネル磁気抵抗素子を用いたリザーバー計算器の設計", 次世代人工知能シンポジウム 2018, 銀座フェニックスプラザ (東京都), 2018/02/28
- [3] 鈴木 義茂, "磁性体を使った人工知能の可能性", 次世代人工知能シンポジウム 2018, 銀座フェニックスプラザ (東京都), 2018/02/28
- [4] M. Goto, Y. Wakatake, U. K. Oji, N. Strelkov, B. Dieny, S. Miwa, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, "Simulation of microwave excitation in micro strip line induced by radio-frequency signal amplification using magnetic tunnel junctions ", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学 (東京都), 2018/03/17
- [5] T. Furuta, K. Fujii, K. Nakajima, S. Tsunegi, H. Kubota, M. Goto, Y. Suzuki, S. Miwa, "Macro-magnetic simulation of reservoir computing utilizing spin-dynamics in magnetic tunnel junctions", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学 (東京都), 2018/03/18
- [6] 野村 光, 中谷 亮一, ペパー フェルディナンド, 田村 英一, 三輪 真嗣, 後藤 穰, 鈴木 義茂, "磁性ドットアレイを用いたリザーバコンピューティング", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学 (東京都), 2018/03/18
- [7] 野村 光, "スピングラス/アイスリザーバー計算器のシミュレーション", 「スピントロニクスの新しい応用」シンポジウム・H29 度総務省 (課題 II) 成果報告会, 産業技術総合研究所臨海副都心センター (東京都), 2018/05/21
- [8] 久保田 均,他,"スピングラス/アイスリザーバー計算器のハードウェア作製", 「スピントロニクスの新しい応用」シンポジウム・H29 度総務省 (課題 II) 成果報告会 (東京都), 2018/05/21
- [9] 野崎 隆行,他,"ブラウニアン計算器に向けたスキルミオン生成・制御技術開発", 「スピントロニクスの新しい応用」シンポジウム・H29 度総務省 (課題 II) 成果報告会 (東京都), 2018/05/21
- [10] 田村 英一, "Magnetic Skyrmions:dynamics and characterization", 「スピントロニクスの新しい応用」シンポジウム・H29 度総務省 (課題 II) 成果報告会, 産業技術総合研究所臨海副都心センター (東京都), 2018/05/21
- [11] 後藤 穰, "トンネル磁気抵抗素子による高周波の増幅", 「スピントロニクスの新しい応用」シンポジウム・H29 度総務省 (課題 II) 成果報告会, 産業技術総合研究所臨海副都心センター (東京都), 2018/05/21
- [12] 古田 大志, "Evaluation of figure-of-merit of dynamics in magnetic tunnel junctions", 「スピントロニクスの新しい応用」シンポジウム・H29 度総務省 (課題 II) 成果報告会, 産業技術総合研究所臨海副都心センター (東京都), 2018/05/21
- [13] Y. Suzuki, "MRAM and AI Chip using Voltage Control of Magnetic Properties", DGIST, Center for

- Bio Convergence Spin System 2nd International Symposium, Daegu, Korea, 2018/06/01
- [14] Y. Suzuki, "Voltage Control of Magnetic Properties and its Application to the MRAM and AI Chips", IcAUMS2018, Jeju, Korea, 2018/6/5
- [15] H. Nomura, E. Tamura, S. Miwa, M. Goto, Y. Suzuki, R. Nakatani, "Macrospin simulation of recurrent neural network with nanomagnet array", APSMR Annual Meeting 2018, Sapporo Convention Center, Sapporo, 2018/07/21
- [16] H. Nomura, "Explorative Workshop: Spintronic Perspectives on Neuromorphic Computing", Explorative Workshop: Spintronic Perspectives on Neuromorphic Computing, Julich, Germany, 2018/8/15
- [17] 鎌開 雄規, 野村 光, 古田 大志, 鈴木 義茂, 中谷 亮一, "ナノマグネット・リカレントニューラルネットワークにおける短期記憶能力と非線形演算能力", 第 42 回日本磁気学会学術講演会, 日本大学 (東京都), 2018/9/11
- [18] H. Kubota, M. Goto, K. Takahashi, K. Yakushiji, T. Taniguchi, S. Tsunegi, A. Sugihara, A. Fukushima, Y. Suzuki, "Magnetic interaction in magnetic tunnel junction array", The 79th JSAP Autumn Meeting 2018, Nagoya Congress Center, 2018/09/18
- [19] T. Furuta, H. Nomura, M. Goto, S. Miwa, Y. Kuwabiraki, R. Nakatani, Y. Suzuki, "Non-linearity in reservoir computing with nanomagnet array", The 79th JSAP Autumn Meeting 2018, Nagoya Congress Center, Nagoya, 2018/09/19
- [20] Y. Jibiki, M. Goto, T. Srivastava, W. Lim, S. Auffret, C. Baraduc, H. Bea, J. Cho, E. Tamura, Y. Suzuki, "Brownian motion of skyrmions in Ta|Fe72Co8B20|TaOx", The 79th JSAP Autumn Meeting 2018, Nagoya Congress Center, Nagoya, 2018/9/20
- [21] T. Nozaki, Y. Jibiki, M. Goto, E. Tamura, H. Kubota, A. Fukushima, Y. Suzuki, S. Yuasa, "Observation of Brownian motion of magnetic skyrmion and its control by voltage", The 79th JSAP Autumn Meeting 2018, Nagoya Congress Center, 2018/09/20
- [22] H. Nomura, "Non-linearity in nanomagnets recurrent neural network", SPICE-Workshop on "Spintronics meets Neuromorphics", Mainz, Germany, 2018/10/10
- [23] 辻本知輝, 野村光, 古田大志, 鈴木義茂, 中谷亮一, "磁性ドットアレイによるリザーバーコンピューティングにおける非線形性", 磁気記録・情報ストレージ研究会, 吹田市, 大阪大学 (吹田市), 2018/10/18
- [24] 地引勇磨, 後藤 穰, Titiksha Srivastava, Willy Lim, Stephane Auffret, Claire Baraduc, Helene Bea, Jaehun Cho, 田村英一, 鈴木義茂, "一次元及び二次元におけるスキルミオンのブラウン運動", 磁気記録・情報ストレージ研究会, 大阪大学 (吹田市), 2018/10/18
- [25] 鈴木義茂, "磁性体を用いた AI ハードウェア開発の試み", CSRN 研究会 (スピン,ニューロモルフィック・コンピューティング), 東京大学 (東京都), 2018/10/27
- [26] 野村 光, "ナノ磁性ドットアレイを用いたリザーバーコンピューティング", CSRN 研究会 (スピン,ニューロモルフィック・コンピューティング), 東京大学 (東京都), 2018/10/27
- [27] M. Goto, Y. Wakatake, U. K. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, "Heat driven microwave amplification in magnetic tunnel junction with double MgO layer", CSRN-OSAKA Annual Workshop 2018, Osaka University, Toyonaka, 2018/12/14

- [28] H. Nomura, F. Peper, K. Tsujimoto, Y. Kuwabiraki, T. Furuta, E. Tamura, S. Miwa, M. Goto, Y. Suzuki, and R. Nakatani, "Reservoir computing with nanomagnets array", CSRN-OSAKA Annual Workshop 2018, Osaka University, Toyonaka, 2018/12/14
- [29] S. Miki, Y. Jibiki, J. Cho, E. Tamura, M. Goto, Y. Suzuki, "Brownian motion of skyrmions: their normal and gyro diffusion coefficients-", CSRN-OSAKA Annual Workshop 2018, Osaka University, Toyonaka, 2018/12/14
- [30] 野崎 友大, 甲野 藤真, 野崎 隆行, 久保田 均, 福島 章雄, 湯浅 新治, "Ru 挿入による Pt/Co/MgO 三層構造の磁区制御", 強的秩序とその操作に関わる研究グループ第 8 回研究会, 東京大学 (東京都), 2019/01/04
- [31] M. Goto, Y. Wakatake, U. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, "Negative Resistance and Amplification of Microwave in Heat-driven Magnetic Tunnel Junctions", 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington, DC, 2019/01/15
- [32] Y. Jibiki, M. Goto, T. Srivastava, W. Lim, S. Auffret, C. Baraduc, H. Bea, J. Cho, E. Tamura, Y. Suzuki, "Brownian motion of skyrmion bubbles on wire", 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington, DC, 2019/01/17
- [33] T. Furuta, "Inter-dot coupling of nanomagnets array reservoir computing", International School on Spintronics and Korea-Japan Spintronics Workshop -Topological Phenomena in Magnetism-, Nagoya University, Nagoya, 2019/01/21
- [34] Y. Suzuki, "Toward skyrmion Brownian computing", International School on Spintronics and Korea-Japan Spintronics Workshop -Topological Phenomena in Magnetism-, Nagoya University, Nagoya, 2019/01/21
- [35] 鉦開 雄規, "規則的に配置した 2×10 個の磁性ドットによるリザーバーコンピューティングにおける非線形演算", 平成 30 年度第 2 回材料物性工学談話会講演会・ポスター発表会, 大阪大学中之島センター (大阪市), 2019/01/21
- [36] 野村 光, "スピングラス・アイスリザーバーのモジュール化技術", 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題 II) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [37] 久保田 均, "スピングラス/アイスリザーバー計算機のハードウェア作製", 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題 II) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [38] 野崎 隆行, "磁気スキルミオンにおける電圧ブラウン運動制御", 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題 II) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [39] 後藤 穰, "スキルミオン素子の研究開発", 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題 II) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [40] 内海 裕洋, "固体素子の情報量揺らぎと通信の物理的限界", 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題 II) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [41] 野崎 友大, "ブラウンアン計算機への応用に向けたスキルミオンバブルの生成とその形状制御", 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題 II) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [42] 古田 大志, 野村 光, 田村 英一, 後藤 穰, 三輪 真嗣, 鉦開 雄規, 辻本 知輝, 中谷 亮一, 鈴木 義茂, "スピングラス・アイスリザーバーの磁性ドット配置に依存した非線形演算能力", 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題 II) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [43] 地引 勇磨, 後藤 穰, T. Srivastava, W. Lim, S. Auffret, C. Baraduc, H. Bea, J. Cho, 田村 英一, 野

- 村 光, 鈴木 義茂, “スキルミオンの拡散運動の観測及び評価”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [44] 鉦開 雄規,野村 光,中谷 亮一, “ハニカム形状を有するスピングラス・アイスリザーバー”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [45] 劉 超哲, 地引 勇磨, 三木 颯馬, CHO Jaehun, 田村 英一, 後藤 穰, 野村 光, 鈴木 義茂, 中谷 亮一, “スキルミオンを利用したプログラマブル素子の提案”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [46] 古市 菜都美, 後藤 穰, 久保田 均, 薬師寺 啓, 福島 章雄, 湯浅 新治, N.Strelkov, B. Dieny, 三輪 真嗣, 鈴木 義茂, “人工知能素子開発に向けた熱誘起トルク応答の高速性の評価”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [47] 辻本 知輝, 野村 光, 古田 大志, 鉦開 雄規, 中谷 亮一, 鈴木 義茂, “スピングラス・アイスリザーバーによるウェービングジェスチャーの検出”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [48] 城間 慧人, 野村 光, 鉦開 雄規, 中谷 亮一, “磁性シフトレジスタを利用したスピングラス・アイスリザーバー”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [49] 三木 颯馬, 地引 勇磨, C. Liu, J. Cho, 田村 英一, 後藤 穰, 野村 光, 鈴木 義茂, “スキルミオンの(熱)運動に関する理論”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [50] 田村 英一, 三木 颯馬, C. Liu, 地引 勇磨, C. Cho, 後藤 穰, 野村 光, 中谷 亮一, 鈴木 義茂, “スキルミオンダイナミクス”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [51] 後藤 穰, 若竹 陽介, U. K. Oji, 三輪 真嗣, N. Strelkov, B. Dieny, 久保田 均, 薬師寺 啓, 福島 章雄, 湯浅 新治, 鈴木 義茂, “磁気ドットリザーバーに向けた熱による磁気異方性制御”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [52] 野村 光, “スピングラス・アイスリザーバーの消費エネルギー”, 総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/02/08
- [53] 野崎 隆行,地引 勇磨,後藤 穰,田村 英一,野崎 友大,久保田 均,福島 章雄,鈴木 義茂,”ブラウニアン計算機に向けた電圧スキルミオン制御”,総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会,大阪大学 (豊中市),2019/02/08
- [54] 久保田 均,後藤 穰,高橋 一貴,薬師寺 啓,谷口 知大,常木 澄人,杉原 敦,福島 章雄,鈴木 義茂,”リザーバー計算のための強磁性トンネル接合素子アレイの作製”,総務省「次世代人工知能技術の研究開発」(課題Ⅱ) H30 度成果報告会,大阪大学 (豊中市),2019/02/08
- [55] 鈴木 義茂, “磁性体を用いた人工知能ハードウェアの開発”, 第 2 回スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワークシンポジウム, 東北大学 (仙台市), 2019/01/20
- [56] 地引 勇磨, 後藤 穰, Titiksha Srivastava, Willy. Lim, Stephane Auffret, Claire. Baraduc, Helene Bea, Jaehun. Cho, 田村 英一, 鈴木 義茂, “スキルミオンバブルのブラウン運動の評価”, 第 2 回スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワークシンポジウム, 東北大学 (仙台市), 2019/01/20
- [57] 野村 光, “人間の脳の演算処理メカニズムに倣った脳型演算処理技術の研究開発”, 次世代人工知能

- シンポジウム 2019 (総務省平成 30 年度委託研究「次世代人工知能技術の研究開発」 課題 I 「人間の脳の認知メカニズムに倣った脳型認知分類技術の研究開発・成果報告会」, 大阪大学 (吹田市), 2019/03/01
- [58] H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Tsunegi, T. Taniguchi, A. Sugihara, M. Goto, K. Takahashi, H. Nomura, Y. Suzuki, "Magnetic tunnel junction array for physical reservoir", The 66th JSAP Spring Meeting 2019, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2019/3/9
- [59] T. Watakabe, M. Goto, S. Miwa, and Y. Suzuki, "Voltage control of magnetic anisotropy in Mn inserted Magnetic tunnel junction", The 66th JSAP Spring Meeting 2019, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2019/3/9
- [60] C. Liu, Y. Jibiki, S. Miki, J. Cho, E. Tamura, M. Goto, H. Nomura, Y. Suzuki, R. Nakatani, "Static interaction of Skyrmions in magnetic thin-film circuits patterned by anisotropy undulations" The 66th JSAP Spring Meeting 2019, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2019/3/11
- [61] K. Tsujimoto, H. Nomura¹, T. Furuta, Y. Kuwabiraki, R. Nakatani, Y. Suzuki, "Two-bit input binary task with reservoir computing using nanomagnet array", The 66th JSAP Spring Meeting 2019, Tokyo Institute of Technology, 2019/3/12
- [62] 三木 颯馬, 地引 勇磨, 劉 超哲, 趙 在勲, 田村 英一, 後藤 穰, 野村 光, 鈴木 義茂, "スキルミオンの(熱)運動 -大きさ及び形状依存性-", 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (福岡市), 2019/3/17
- [63] 鈴木 義茂, "磁性ナノ構造を利用した人工知能とゼロエネルギー計算の試み", 第 6 回岩崎コンファレンス, 中央大学 (東京都), 2019/6/11
- [64] H. Nomura, K. Tsujimoto, M. Goto, N. Samura, R. Nakatani, Y. Suzuki, "DIPOLE COUPLED NANOMAGNET RESERVOIR WITH MULTIBIT INPUT DATA", Magnetism and Optics Research International Symposium 2019, Charles University, Prague, Czech Republic, 2019/6/25
- [65] Y. Suzuki, "Magnets-Array Reservoir Computer and Skyrmion Brownian Computer", Gordon Research Conference: Spin Transport and Dynamics in New Geometries, Materials and Nanostructures, Les Diablerets, CH, 2019/07/08
- [66] M. Goto, Y. Wakatake, U. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, "Heat controlled magnetic anisotropy effect", The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, Xi'an Qujiang International Conference Center, XI'AN, P.R. CHINA, 2019/08/20
- [67] 野村 光, 古田 大志, 鎌開 雄規, 辻本 知輝, 田村 英一, 後藤 穰, 中谷 亮一, 久保田 均, 鈴木 義茂, "磁気双極子結合した磁性ドットアレイによるリザーバーコンピューティング", 2019 年電気情報通信学会ソサイエティ大会, 大阪大学 (豊中市), 2019/09/13
- [68] T. Nozaki, M. Kotonno, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, "Voltage induced coercivity change of Co film grown on Cr₂O₃ barrier", 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (札幌市), 2019/09/18
- [69] H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Tamaru, S. Tsunegi, T. Taniguchi, A. Sugihara, T. Nozaki, T. Yamamoto, T. Nozaki, S. Yuasa, M. Goto, K. Takahashi, H. Nomura, Y. Suzuki, "Fabrication of closely packed magnetic arrays for physical reservoir computing", 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (札幌市), 2019/09/18
- [70] S. Miki, Y. Jibiki, J. Cho, E. Tamura, M. Goto, H. Nomura, Y. Suzuki, "The theory of skyrmionnic

diffusion: analysis in terms of the position-velocity correlation", 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (札幌市), 2019/09/20

[71] 鉄開 雄規,野村 光,鈴木 義茂,中谷 亮一,"スピンアイス・リザーバーコンピューティング", 第 43 回日本磁気学会学術講演会, 京都大学 (京都市), 2019/09/25

[72] Y. Suzuki, "Energy saving AI using (artificial) topological materials", 第 43 回日本磁気学会学術講演会, 京都大学 (京都市), 2019/09/26

[73] H. Nomura, R. Wakasa, N. Samura, Y. Jibiki, K. Takahashi, S. Miki, J. Yamaguchi, R. Nakatani, M. Goto, Y. Suzuki, K. Toyoki, S. Okamoto, Y. Kotani, T. Nakamura, "Development of synchrotron X-ray nano-beam dynamic force microscope", 第 43 回日本磁気学会学術講演会, 京都大学 (京都市), 2019/09/27

[74] M. Goto, T. Nozaki, H. Nomura, H. Kubota, Y. Suzuki, "Brownian computing using skyrmions and reservoir computing in magnetic dot-arrays", 第 43 回日本磁気学会学術講演会, 京都大学 (京都市), 2019/09/27

[75] H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Tamaru, S. Tsunegi, T. Taniguchi, A. Sugihara, T. Nozaki, T. Yamamoto, T. Nozaki, Shinji Yuasa, M. Goto, K. Takahashi, H. Nomura, Y. Suzuki, "Closely packed magnetic tunnel junction arrays for reservoir computing", Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2019, LAS VEGAS, NEVADA, USA, 2019/11/7

[76] M. Goto, Y. Wakatake, U. K. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, and Y. Suzuki, "Giant Spin-Torque induced by Heat-Controlled Magnetic Anisotropy", Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2019, LAS VEGAS, NEVADA, USA, 2019/11/7

[77] Y. Suzuki, "Unconventional computations using magnetic nano-dots and skyrmions", 17th RIEC International Workshop on Spintronics, Research Institute of Electrical Communication Tohoku University, 2019/12/03

[78] T. Watakabe, M. Goto, H. Nomura, Y. Suzuki, "Electric field modulation of magnetic anisotropy in Fe/Mn/MgO/Fe Magnetic tunnel junction", 17th RIEC International Workshop on Spintronics and 10th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices", Research Institute of Electrical Communication Tohoku University, 2019/12/05

[79] Y. Kuwabiraki, H. Nomura, M. Goto, R. Nakatani, and Y. Suzuki, "Performance of Spin-ice Reservoir Computer Depending on the External Magnetic Fields and the Nano-Magnet Shape", Spin Research Network of Japan CSRN-Osaka 2019, Toyonaka, Osaka, 2019/12/09

[80] 渡壁 翼, 後藤 穰, 野村 光, 鈴木 義茂, "Fe/Mn/MgO/Fe MTJにおける磁気異方性の電圧制御", スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点 2019 年度 (令和元年度) 年次報告会, 大阪大学 (豊中市), 2019/12/09

[81] H. Nomura, K. Tsujimoto, Y. Kuwabiraki, M. Goto, R. Nakatani, Y. Suzuki, "Linear and Non-linear operation with nanomagnet array reservoir", The 4th international symposium on "Elucidation of Property of Next Generation Functional Materials and Surface/Interface", Suita, Osaka, 2019/12/09

[82] 鈴木 義茂, "スキルミオンのブラウン運動", 応用物理学会応用電子物性分科会 研究例会 スピントロニクスの最前線, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス (東京都), 2019/12/16

- [83] 野崎友大,甲野藤真,野崎隆行,久保田均,福島章雄,湯浅新治,“六方晶 Cr₂O₃ バリア上の Co 薄膜の電圧誘起保磁力変化”,強的秩序とその操作に関わる第 10 回研究会,東京大学(東京都),2020/01/11.
- [84] 後藤 穰,地引 勇磨,野崎 隆行,三木 颯馬,田村 英一,Jaehun Cho,野村 光,Titiksha Srivastava,Willy Lim,Stephene Auffret,Claire Baraduc,Helene Bea,鈴木 義茂,"スキルミオンブラウニアンコンピューティング",第 41 回光機能磁性デバイス・材料専門研究会,長岡技術科学大学(長岡市),2020/01/31
- [85] 辻本 知輝,鎌開 雄規,野村 光,中谷 亮一,後藤 穰,鈴木 義茂,"スピングラス・アイスリザーバーに関する研究",大阪大学主催次世代人工知能シンポジウム 2020,大阪大学(吹田市),2020/02/04
- [86] 田中 裕士,後藤 穰,石川 諒,兼田 雄真,地引 勇磨,野村 光,鈴木 義茂,"スキルミオンブラウニアン素子(ハブ,ラチェット,C ジョイン)に関する研究",大阪大学主催次世代人工知能シンポジウム 2020,大阪大学(吹田市),2020/02/04
- [87] 野村 光,"ナノ磁性ドットアレイリザーバを用いたマルチビット・バイナリリザーバコンピューティング",東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「新規固体デバイス・回路を用いた脳型コンピューティングに関する研究」,東北大学(仙台市),2020/02/05
- [88] 三木 颯馬,Liu Chaozhe,田村 英一,Cho Jaehun,後藤 穰,野村 光,中谷 亮一,鈴木 義茂,"Interactions between a magnetic skyrmion and anisotropy walls",第 67 回応用物理学会春季学術講演会,上智大学(東京都),2020/03/13
- [89] M. Goto, H. Nomura, Y. Suzuki, "Diffusive motion of skyrmions enhanced by perpendicular alternating magnetic field",第 67 回応用物理学会春季学術講演会,上智大学(東京都),2020/03/14
- [90] 野村 光,辻本 知輝,鎌開 雄規,後藤 穰,中谷 亮一,鈴木 義茂,"磁性ドットアレイリザーバーのノード更新手順の検討",第 67 回応用物理学会春季学術講演会,上智大学(東京都),2020/03/14
- [91] K. Tsujimoto, H. Nomura, Y. Kuwabiraki, R. Nakatani, Y. Suzuki, "Simulation of reservoir computing using dipole-coupled nanomagnet array with different clocking frequency",第 67 回応用物理学会春季学術講演会,上智大学(東京都),2020/03/14

10 出願特許リスト

- [1]野村光,鈴木義茂,田村英一,三輪真嗣,後藤穰,ペーパーフェルディナンド,情報処理装置及び情報処理方法,日本(国内優先主張出願),2018年1月24日
- [2] 野村光,鈴木義茂,田村英一,三輪真嗣,後藤穰,ペーパーフェルディナンド,特許名称:情報処理装置及び情報処理方法,PCT国際出願,2018年5月15日
- [3] 後藤穰,地引勇磨,チョウ ジェフン,田村英一,スキルミオン回路及びスキルミオン回路の製造方法日本,2018年9月18日
- [4] 野村光,鈴木義茂,地引勇磨,後藤穰,演算装置,日本,2019年8月22日
- [5] 後藤穰,地引勇磨,CHO Jaehun,田村英一,スキルミオン回路及びスキルミオン回路の製造方法,PCT国際出願,2019年9月6日
- [6] 野村光,鈴木義茂,田村英一,三輪真嗣,後藤穰,ペーパーフェルディナンド,情報処理装置及び情報処理方法,日本(PCT日本移行),2019年10月24日
- [7] 久保田均,福島章雄,薬師寺啓,野崎隆行,野崎友大,常木澄人,谷口知大,田丸慎吾,杉原敦,磁気ドットアレイ計算素子,日本,2020年3月26日

1 1 取得特許リスト

無し

1 2 国際標準提案・獲得リスト

無し

1 3 参加国際標準会議リスト

無し

1 4 受賞リスト

[1]古田 大志,2018 年春季・応用物理学会・第 9 回英語講演奨励賞,"Macro-magnetic simulation of reservoir computing utilizing spin-dynamics in magnetic tunnel junctions",2018 年 09 月 19 日

[2]地引 勇磨,2018 年秋季・応用物理学会・第 10 回英語講演奨励賞,"Brownian motion of skyrmions in Ta|Fe72Co8B20|TaOx",2019 年 3 月 10 日

[3]後藤 穰,船井情報科学振興財団・第 19 回 FFIT 研究奨励賞,"磁気トンネル接合における高効率熱スピン制御とマイクロ波増幅効果の発見",2020 年 2 月 28 日 (受賞連絡日)

1 5 報道発表リスト

(1) 報道発表実績

[1] “熱による高速・高効率な磁極制御～MRAM と AI ハードウェアの低消費電力化の実現へ向けて～”, 大阪大学,2018 年 12 月 5 日

(2) 報道掲載実績

[1] “阪大・産総研・JST など,ナノサイズの磁石の磁極の向きを熱によって高速・高効率に制御することに成功”,日本経済新聞,2018 年 12 月 5 日

[2] “阪大ら,熱による高速・高効率な磁極制御に成功”,OPTRONICS ONLINE,2018 年 12 月 5 日

[3] “熱による高速,高効率な磁極制御に成功——MRAM や AI ハードウェアの低消費電力化に期待 阪大など”,Fobcross for エンジニア,2018 年 12 月 6 日

[4] “微小な磁石の磁極,熱で高精度制御 阪大”,日刊工業新聞,2018 年 12 月 7 日

研究開発による成果数

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	3 件 (3 件)	5 件 (5 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0 件 (0 件)	2 件 (2 件)	0 件 (0 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	2 件 (2 件)	4 件 (2 件)
口 頭 発 表 数	6 件 (0 件)	5 6 件 (9 件)	2 9 件 (7 件)
特 許 出 願 数	1 件 (0 件)	2 件 (1 件)	4 件 (1 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)	1 件 (0 件)
報 道 発 表 数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	0 件 (0 件)	4 件 (0 件)	0 件 (0 件)

	合計
査読付き誌上発表論文数	8 件 (8 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	2 件 (2 件)
その他の誌上発表数	6 件 (4 件)
口 頭 発 表 数	9 1 件 (1 6 件)
特 許 出 願 数	7 件 (2 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)
受 賞 数	3 件 (0 件)
報 道 発 表 数	1 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	4 件 (0 件)

注 1 : 各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注 2 : 「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読 (peer-review (論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの)) のある出版物に掲載され

た論文等（Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注5：PCT 国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。（何カ国への出願でも1件として計上）。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しないこと。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しないこと。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。