

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度  
課題番号：20H05655  
研究課題名：強磁性トンネル接合素子の人工知能応用

研究代表者氏名（ローマ字）：久保田 均（KUBOTA Hitoshi）  
所属研究機関・部局・職：産業技術総合研究所・新原理コンピューティング研究センター・総括研究主幹  
研究者番号：30261605

研究の概要：

人工スピナイスはサブミクロンの強磁性体セルを2次的に配列したものであり、磁気異方性と磁氣的相互作用に起因するフラストレーションが発生することで多彩な磁氣的性質を示す。本研究では、人工スピナイスが示す特異な磁気状態を利用して、高い計算性能と高集積化の両立が可能なナチュラルコンピューティングの実現を目指す。

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：人工スピナイス、強磁性トンネル接合、ナチュラルコンピューティング、リザーバ計算

1. 研究開始当初の背景

近年、脳機能をアルゴリズムに取り入れた人工知能の性能が飛躍的に向上している。しかし、現状のシステムは高性能の一方で消費電力が大きく、学習にも膨大な時間とエネルギーが必要という課題を抱えている。より低消費電力で動作する人工知能ハードウェアとして、自然現象を利用する「ナチュラルコンピューティング」が注目を集めている。ナチュラルコンピューティングに用いる物理系には自由度が高く非線形な時間発展を示す複雑系が適している。計算デバイスとして適用するためには、小型で高い計算性能を示し、かつ、低消費電力である物理系の開発が期待されている。

2. 研究の目的

人工スピナイスは、サブミクロンの強磁性体セルを正方格子、ハニカム格子などに配列したネットワークであり、磁気異方性と磁氣的相互作用に起因するフラストレーションが発生することで複雑な磁氣的性質を示す。我々は、人工スピナイスをナチュラルコンピューティングへ適用し、高効率に計算可能なハードウェアの開発を目指す。人工スピナイスの磁氣的性質はこれまで主に基礎物理の観点から研究され、磁性体セルの磁気状態は、磁気力顕微鏡や光電子顕微鏡などのイメージング技術を用いて観測されていた。本研究ではコンピューティングに適した電気的手法でセルの磁化状態を検出・制御するため、強磁性トンネル接合を用いた人工スピナイスを作製する。強磁性トンネル接合は半導体不揮発メモリ MRAM として実用化されており、高い集積度が実証されている。一方、人工スピナイスの計算性能を引き出す手法は未開拓である。本研究では、物理系の複雑なダイナミクスを用いて計算する物理リザーバコンピューティングに着目している。物理リザーバコンピューティングは、音声などの時系列信号の計算に適したりザーバ（ニューラルネットワーク）を物理実装したものであり、学習コストが低くデバイス応用に適している。人工スピナイスを物理リザーバとして機能させることができれば、高い計算性能と高集積化の両立が可能となる。そのためには、基本となる人工スピナイスの磁化の集団的運動の制御が必要であり、構成する強磁性体セルの磁気特性、ネットワーク構造や熱ノイズが磁化の集団運動に与える影響を理解することが重要となる。また、ネットワークの規模が拡大するにつれて計算性能が高くなると単純には予想されるが、実際に確かめる必要がある。さらに、デバイス化のためには、設計ツールの構築も必要である。以上の点をふまえて本研究では、次のように目的を定めた。

- ① 強磁性トンネル接合を用いて人工スピナイスネットワークを作製し、磁化の集団的運動と磁気特性、熱ノイズとの関係を明らかにする。
- ② 人工スピナイスネットワークの磁氣的性質や規模と計算能力の関係を明らかにする。
- ③ 上記の取り組みの結果えられた成果を取り入れたシミュレータを開発し、設計ツールを構築する。

3. 研究の方法

① 人工スピナイスネットワーク試料の作製

高い磁気抵抗変化率を示す MgO 系強磁性トンネル接合薄膜を微細加工プロセスを用いてサブミクロンセル配列に成形し、人工スピナイスネットワークを作製する。薄膜材料・作製条件、正方格子・ハニカム格子などのネットワーク構造、およびネットワークのサイズを種々変えた試料を作製し、磁化の集

团的運動との関係を調べる。

#### ② 人工スピンアイスネットワークを用いた物理リザーバ計算の実行と理論解析

シミュレーションにより人工スピンアイスネットワークを構築し、物理リザーバ計算を実行する。種々のネットワーク構造、サイズの人工スピンアイスネットワークを構築し、ベンチマークタスクを実行し計算性能を定量的に求める。実験は、入出力端子を持たない試料から始め、局所的磁界による入力を行い、磁化状態を磁気力顕微鏡、磁気光学効果により測定し出力とする。ついで、入出力端子付き試料を用いて、電気的な評価を行う。ネットワークサイズと計算性能の関係を調べる。

#### ③ 人工スピンアイスネットワークの設計ツール構築

シミュレーションと磁化状態の測定、リザーバ計算の結果を照らし合わせて、シミュレーションの精度をあげて、設計ツールを構築する。設計ツールは、関連分野の研究者、設計技術者に公開する。

### 4. これまでの成果

#### ① 人工スピンアイスネットワーク試料の作製

強磁性単層薄膜、および、強磁性トンネル接合薄膜を作製し、微細加工によりサブミクロンセル（長さ約 400 nm、幅約 150 nm）をハニカム格子、ピンホイール格子状に配列し、人工スピンアイスを作製した。電子線リソグラフィ、エッチング工程を組み合わせることで新規微細加工プロセスを開発し、強磁性トンネル接合セル形成のために高い重ね合わせ位置精度を実現した。ハニカム格子では、格子点の間隔を 500 nm~2 μm の間で変化させた。格子点間隔 2 μm の試料では、全 72 個のセルのうち 62 個のセルに測定用リード線を個別に取り付け、個別の磁気抵抗曲線の観測に成功した。複数セルの磁化状態を電気的に同時に読み出す事ができることを実験的に確認することができた。

#### ② 人工スピンアイスネットワークを用いた物理リザーバ計算の実行と理論解析

ハニカム格子状に強磁性単層膜セルを配置した人工スピンアイスのシミュレーションを行い、短期記憶容量(最大 3.5)、パリティチェック容量(最大 2.9)のいずれも高い値を見いだした。さらに、強磁性セルをナノワイヤ状に接続したリザーバを新規に考案し、シミュレーションにより動作検証を行った。本リザーバにおいても磁化配列に起因したフラストレーションが生じることで、短期記憶容量(5)、パリティチェック容量(5)のいずれも高い値を示した。また、通常よりも熱擾乱に対する耐性が高いことがわかり、デバイス化に向けて重要な成果が得られた。シミュレーションによる研究に加え、入出力端子を持たない実際の素子を用いた動作検証実験のため、磁気力顕微鏡、磁気カー効果顕微鏡からなる評価装置を開発した。拡張が容易で、かつ、長時間の連続計測が必須であるリザーバに適用可能な高い安定性をもつ評価システムを構築した。

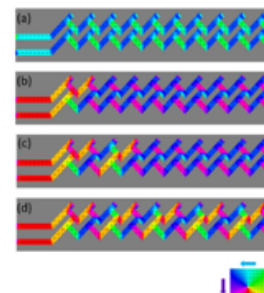


図 1 ナノワイヤを用いて構築されたリザーバの磁化状態変化の一例。

#### ③ 人工スピンアイスネットワークの設計ツール構築

C++/CUDA/Python を用いてマイクロマグネティックシミュレーションを基盤とするシミュレーターを、計画を前倒して開発し、基本機能の実装ならびに検証を完了した。一般的なシミュレータである MuMax3 と比較し、同等の速度・精度でのシミュレーションが可能であることを確認した。Windows、Linux いずれの OS 上でも動作し、タスクスケジューラにも一部対応し、配布・利用も容易であるなど、利便性、普及の観点を十分に考慮したシミュレータを開発することができた。

### 5. 今後の計画

シミュレーションにより人工スピンアイスリザーバに適したネットワークの構造の探索を引き続きおこなう。ここで得られた指針を参考に、単層磁性薄膜を用いた人工スピンアイスネットワーク試料（入出力端子なし）と強磁性トンネル接合薄膜を用いた人工スピンアイスネットワーク試料（入出力端子有り）の作製を進める。上記のシミュレーションと実験を組み合わせた人工スピンアイスリザーバの開発と並行して、設計ツールの開発も進める。

### 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

1. K. Hon, K. Takahashi, K. Enju, M. Goto, Y. Suzuki, and H. Nomura, "Numerical simulation of reservoir computing with magnetic nanowire lattices without inversion symmetry", Applied Physics Letters, 120, 022404 (2022), 査読有。
2. K. Hon, Y. Kuwabiraki, M. Goto, R. Nakatani, Y. Suzuki, and H. Nomura, "Numerical simulation of artificial spin ice for reservoir computing", Appl. Phys. Exp., 14, 3, 033001 (2021), 査読有。

### 7. ホームページ等

<https://unit.aist.go.jp/d-tech/intra/RCECT/index.html>

<http://suzukilab.jpn.org/>