

研 究 報 告 書

「スピンを利用したニューロモルフィックシステムの理論設計」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 26 年 10 月～平成 30 年 3 月

研 究 者: 荒井 礼子

1. 研究のねらい

ヒトの脳は、我々が普段使用している(ノイマン型)コンピュータとは全く異なる方式で働く情報処理システムであり、膨大な量の曖昧・不完全な情報を低消費電力で超並列に処理している。このような優れた情報処理能力は画像認識や自動学習の高効率化に不可欠な技術要素である。脳あるいは脳神経(ニューロン)の働きをまねた情報処理システムはニューロモルフィックシステムと呼ばれ、これまでにアナログ回路や半導体デバイスによる人工ニューロンの実装がなされてきた。しかしながら日常生活の様々な場面でニューロモルフィックシステムを活用するためには、さらなる低消費電力化・高集積化が必要である。シリコンデバイスの微細化・集積化が限界に近づいている現状を打破するにも、新規デバイスを中核とした新しい動作原理に基づくニューロモルフィックシステムを構築することは意義のある挑戦である。

本研究は、スピントルク発振器と磁壁型メモリを利用することでニューロモルフィックシステムの超低消費電力化を目指した。スピントルク発振器は直流電流印加によって動作する自励型発振器であり、ニューロンと同様に非線形な発振特性を持つ。磁壁型メモリはいわゆる抵抗可変型の多値メモリであり、学習によるシナプスの結合強度変化を表現できる。情報を保持するための待機電力が不要な点は低消費電力化に優位であると期待できる。本研究では、この二つのスピントロニクスデバイスの組み合わせによる人工ニューロンの実現可能性を理論的に示すべく、ナノメートルサイズの磁性体におけるスピン状態・非線形スピンダイナミクスの制御理論の構築と、それを用いたニューロモルフィックシステムの理論設計を行い、新規情報処理の基盤技術を創成することを目的とした。

2. 研究成果

(1) 概要

スピントロニクスデバイスを用いたニューロモルフィックシステムを提案するため、(a)人工ニューロンに適したスピントルク発振器の理論提案および(b)新規磁壁型メモリの理論提案を行った。さらにそれらの使用を想定した(c)画像分離システムの実験的デモンストレーションを行った。また(d)振動子を用いたニューラルネットワークの理論提案を行った。

(a)スピントルク発振器を画像分離システムやニューラルネットワーク等へ応用する場合、高集積化やシステムの簡素化を狙って、素子断面が小さく無磁場で発振するものが望ましい。この要請を満たすスピントルク発振器を新しく理論的に提案した[主な研究成果リスト 5-(1)3,4]。さらに、提案したスピントルク発振器と生体ニューロンとの対応づけを行なった[5-(1)2]。これにより神経科学分野に蓄積されている知見を利用することが容易になり、ニューロモルフィックシステム構築を通じた相互発展が期待できる。その一例として、雑音誘起同

期現象に関する理論的研究を行い、神経科学分野での理論予測と対応する結果がスピントルク発振器での同期現象に見られることを示した[5-(1)2]。

(b) 磁壁を固定する新規な方法として、材料パラメータの空間変化を利用することを提案した。具体的には、磁気異方性定数と交換スティフネス定数の空間変調によって磁壁を固定できることを解析的に示した[5-(1)5]。

(c) 位相同期実験の成功実績が多い vortex 型スピントルク発振器を用いた。発振特性に関する素子ばらつきを自動測定できる環境を構築し、発振特性の近いものを効率的に選別できるようにした。画像分離システムのモデル回路を考案し、画像分離システムが動作する上で基本となる状態が、考案した回路で実現できることを確認した。

(d) 新たにスピン波結合スピントルク発振器の理論提案を行なった[5-(1)1]。外力による同期状態制御を可能にするために、外力のない(無磁場)状態では逆相同期状態を好む独創的な設計を提案した。提案素子を用いたニューラルネットワークの動作設計を行い、典型的な認識課題を実行できることをシミュレーションにより示した。現状の認識率は 75%であり、典型的なニューラルネットワークには劣るものの、学習工程の最適化などによって向上の余地はありと期待できる。また TrueNorth チップ(IBM)[R1]と比較して低消費電力での動作可能性も期待できることがわかった。

(2) 詳細

(a) 人工ニューロンに適したスピントルク発振器の理論提案

スピントルク発振器を画像分離システムやニューラルネットワーク等へ応用するには、システムの簡素化が期待できるため、無磁場で発振するものが望ましい。高集積化を目指すには、磁性体中の磁化が揃って発振するピラー型のスピントルク発振器であることが望まれる。しかしながらこれらの要件を同時に満たすスピントルク発振器は提案されていなかった。本研究では、二次の磁気異方性をもつ磁性材料を発振層に用いることで、ピラー型でも無磁場で発振できることを理論的に示した[5-(1)3,4]。

生体ニューロンとの対応づけを行うには、外部摂動に対する発振応答(位相応答関数)を調べるのが有効である。生体ニューロンでは、外部刺激によって位相が常に進むタイプ(Type-I)と、外部刺激を受けるタイミング(位相)によって刺激後の位相の進遅が決まるタイプ(Type-II)が存在することがわかっている。そこで発振層に垂直磁化材料(二次の磁気異方性をもつ場合も含む)、参照層に面内磁化材料を用いたスピントルク発振器における位相応答関数を磁化ダイナミクスシミュレーションから求めたところ、Type-II に分類される位相応答関数を持つことがわかった[5-(1)2]。Type-II のニューロンは雑音誘起同期現象に適しているという神経科学分野での知見[R2]を確かめるため、提案したスピントルク発振器を用いた雑音誘起同期の磁化ダイナミクスシミュレーションを行った。その結果、二次の磁気異方性を考慮したスピントルク発振器間の方が、二次の磁気異方性を考慮しないスピントルク発振器間よりも雑音誘起同期状態に達しやすいことがわかった[5-(1)2]。これは、二次の磁気異方性を考慮したスピントルク発振器の方が Type-II の理想的な形状に近い位相応答関数をもつためと考えられる。

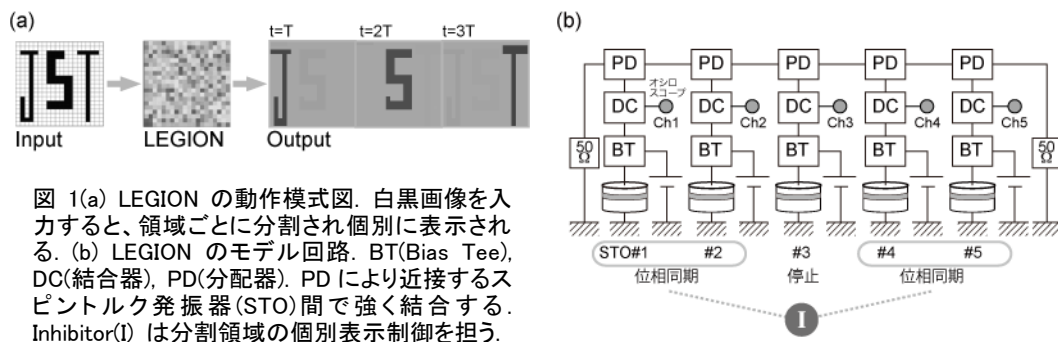
(b)新規磁壁型メモリの理論提案

磁壁型メモリは、磁壁の位置によって抵抗値が変化するいわゆる多値抵抗である。本研究では磁壁を固定する新規な方法として、材料パラメータの空間変化を利用することを提案した。具体的には、磁気異方性定数と交換スティフネス定数の空間変調が磁壁幅に与える影響を理論的に調べた。その結果、磁化ダイナミクスを記述する方程式に交換スティフネス定数の空間変調に起因する付加項が現れることがわかった。この付加項のために、磁壁幅への影響は交換スティフネス定数に関する空間変調の方が磁気異方性定数に関する空間変調よりも効果的であることがわかった。さらに、磁壁を固定する磁気異方性定数と交換スティフネス定数の条件も解析的に明らかにした[5-(1)5]。

(c)画像分離システムの実験的デモンストレーション

vortex 型スピントルク発振器はピラー型スピントルク発振器よりも発振強度が大きいので位相同期実験に適しており、報告例も多い。しかしながら磁界や電圧などの測定条件によって発振特性が大きく変わることが経験的に分かっており、同期実験を効率的に行うには発振特性に関する素子ばらつきの評価が必要だった。そこで自動高周波測定システムを構築し、ウェハ上に作製される全てのスピントルク発振器の発振特性評価を可能にした。これにより、発振特性の近いものを効率的に選択できるようになっただけでなく、電気・磁気特性に由来しないばらつきの要因が存在することが示唆された。

非線形振動子を用いた画像分離システムとして LEGION [R3]が提案されている。LEGION は白黒画像の黒の領域を一つずつ分離することができる(図 1a)。画素に相当する非線形振動子は最近接の振動子と結合しており、全振動子は Inhibitor と呼ばれる素子と結合している。そこで近接結合を再現できるモデル回路(図 1b)を考案し、スピントルク発振器を用いた同期実験を行なった。LEGION 動作時の基本状態は、黒の領域に相当する入力を受けた振動子領域(図 1(b)の STO#1-#2 ペアと#4-#5 ペア)が、白の領域に相当する入力を受けない振動子(#3)を挟んでも位相同期状態を保つことである。図 1(b)の回路でこの基本状態を実現できることを確認した。



(d)振動子を用いたニューラルネットワークの理論提案

振動子を用いたニューロモルフィックシステムの別の提案として、ニューラルネットワークの構築を行なった。典型的なニューラルネットワークでは、ニューロンに相当するセルは多数の入力を受け、活性化関数と呼ばれる非線形な関数による変換を出力する。セルからの出力に

はそれぞれ重みが掛けられ、次のセルの入力となる。このような構成をスピントルク発振器で構成するために、新たにスピン波結合スピントルク発振器の理論提案を行なった[5-(1)1]。特に重要なのは、前段からの入力に応じて後段への出力が決まる点である。本研究では、ポイントコンタクト型のスピントルク発振器を採用した。発振層に二つのポイントコンタクトを設けると、発振層を共有することでスピン波結合した二つのスピントルク発振器系とみなすことができる。外力による磁化ダイナミクスの制御を可能にするために、外力のない(無磁場)状態では逆相同期状態を示すようにした。具体的には、磁化をひねる効果があるジャロシンスキー-守谷相互作用(DMI)を考慮した。DMIは素子構成を工夫することで発振層界面に誘起することができる。入力振動磁場とした。スピン波結合スピントルク発振器からの高周波出力は振動磁場の強度に依存して非線形に変化することがわかり、活性化関数に相当する入出力関係を磁化ダイナミクスシミュレーションから得ることができた。さらに、提案素子を用いたニューラルネットワークの動作設計を行い、図2(a)のニューラルネットワーク構成でMNISTの手書き数字認識課題[R4]が実行できることをシミュレーションにより示した。現状の認識率は75%であり、シグモイド関数を活性化関数としたニューラルネットワークには劣る(図2(b))。しかしながら学習工程の最適化などにより認識率向上の余地はあると期待できる。図2(a)の構成における全振動子素子の動作電力はスピントルク発振の効率を悪く見積もっても $1\mu\text{J}$ 未満である。TrueNorthチップ(IBM)[R1]と比較しても低消費電力素子としての期待が持てることがわかった。

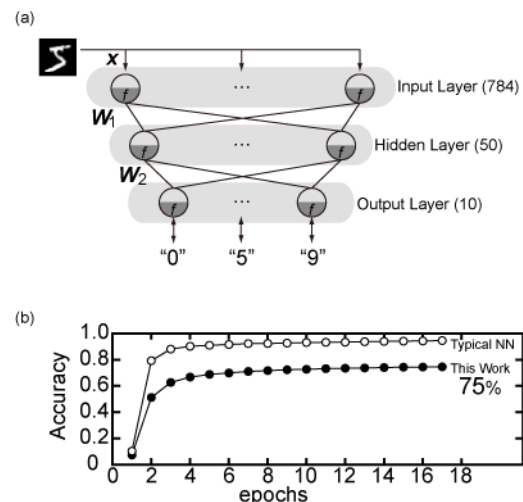


図 2(a) ニューラルネットワーク(NN)の構成模式図。括弧内の数値は各層のセル数を表す。(b) MNIST 認識率の学習推移。白丸がシグモイド関数を活性化関数に用いた NN の学習結果、黒丸が提案素子の入出力関係を活性化関数として用いた時の学習結果である。学習は誤差逆伝播法を用いた。

- [R1] P. A. Merolla, et al., Science **345**, 668, (2014).
[R2] A. Abouzeid and B. Ermentrout, Physical Review E **80**, 011911, (2009).
[R3] D. Terman and D. Wang, Physica D **81**, 148, (1995).
[R4] Y. LeCun, C. Cortes, C. J.C. Burges, The MNIST database of handwritten digits, <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>

3. 今後の展開

ナノスケールのデバイスであるスピントルク発振器や磁壁型メモリの応用の一つとして、ニューラルネットワークの構築が期待できる。ニューラルネットワークでは膨大な素子数が要求されるため高集積化が課題となってくる。CMOS 技術に基づくニューラルネットワークにおいては高集積化が進んでいるが、高集積で処理速度が増加する一方、値を保存しておくためのメモリとのやりとりが増大するため、消費電力の増大を招き処理速度の律速にもつながることが問題視されている。CMOS とは全く異なる原理に基づく情報処理基盤では、この問題を回

避しながら高集積化が可能と期待できる。

ニューラルネットワークに代表される非ノイマン型コンピューティングは、膨大で曖昧な情報を扱う新規情報処理基盤として期待が高い。アプリケーションも含めた研究開発により、専用ハードウェア化によるメリットを享受できると考えられる。またニューラルネットワークにおける重み素子に関する検討は本研究に残された課題である。新規磁壁型素子や他の新規抵抗素子などと組み合わせることで、低消費電力な非ノイマン型情報処理基盤の創成につなげていく。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

理論研究においては当初目標としていたスピントルク発振器と生体ニューロンの関連を示すことができた他、新規素子の理論提案を複数行うことができた。一方で、発振器とメモリの組み合わせによる動作に関した研究については、特に画像分離システムの分離機構に関して課題を残した。実験的デモンストレーションは研究者が所属する産業技術研究所スピントロニクス研究センター実験グループの方々に全面的に協力頂き、分離機構以外のモデル化は達成できた。分離機構の検討が行き詰まった原因として専門分野外の知識の習得に時間がかかったこととシステム・回路レイヤーとの連携不足があったと反省している。ニューラルネットワークの構成は当初計画外の研究目標であったが、上記の反省を踏まえて意識して大胆に進めた結果、システム全体の構成提案と数字認識評価まで実施することができた。新規素子の理論提案とそれを用いたシステムの動作提案ができたことはレイヤー間連携につながる研究内容であると考えている。今後は素子単体の開発指針や動作回路の実際的な構築方法を検討し、提案システムの実現可能性を高めていく。またニューラルネットワークの重みを実現する素子についてもスピントロニクス素子だけでなく他の新規デバイスを含めて適用性を検討していくことで、低消費電力で動作する新規情報処理基盤の創成につなげる。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究領域の目標は、「材料・電子デバイス・システム最適化の研究を連携・融合することにより、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現を可能にする研究開発を進め、真に実用化しイノベーションにつなげる道筋を示していくこと」と定められている。その目標の元、当該被評価者は、ニューロモルフィックシステムの特長を、「膨大で曖昧・不完全な情報を低消費電力で処理できる新しい情報処理基盤となりえること」と考え、スピンを利用したニューロモルフィックシステムの構築を目指した。採択時に行われた研究計画の作り込み時に、理論研究のみならず、磁気抵抗トンネル素子を用いた機能実証も行うことになったが、これは、まさに、さきがけ研究における「材料・電子デバイス・システム最適化」の試みであったと言える。

さきがけ研究開始当初は、位相同期を利用した画像分離システムを実証ターゲットに据え、

まずはスピントルク発振器(STO)と磁壁型メモリをニューロンの機能を模倣する基本要素としてとらえ、それぞれの制御を行うための理論的な考察を進めた。そして STO 位相同期を利用した画像分離システムに関し同期実験まで達成した。磁気異方性に着目した STO と磁壁型メモリの制御方法の提案は、スピントロニクス分野における、着実な進歩として受け取られていると考えられる。一方、画像分離システムのみではインパクトが十分ではなく、さらには、ニューロモルフィックシステムとは言えないことを指摘し、研究期間の途中で、振動子によるニューラルネットワーク構築の可能性を明らかにするという目標を追加した。短い期間ではあったが、担当アドバイザー秋永氏と意見交換を行い、新規振動子ユニットの理論提案にまで至った。さきがけ研究ならではの、研究進捗管理の在り方であったと考えられる。

先行技術との比較を行い、スピンを利用したニューロモルフィックシステムの優位性を明らかにすることは、速やかに取り組むべき課題であると思われる。また、さきがけ研究の終了後も、本分野での研究開発を継続し、スピンを利用した真のニューロモルフィックシステムを開発して頂きたい。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. H. Arai and H. Imamura, *Stochastic Phase Synchronization of Perpendicularly Magnetized Spin-Torque Oscillators With the Second-Order Uniaxial Anisotropy*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS (2017) vol. 53 , 6100705 (5pages).
2. H. Arai, R. Matsumoto, S. Yuasa, and H. Imamura, *Spin-Torque Induced Oscillation of a Magnetoresistive Nanopillar with a Conically Magnetized Free Layer and an In-Plane Magnetized Reference Layer*, Journal of Physical Society of Japan (2016), vol. 85, 063802 (4pages).
3. H. Arai, R. Matsumoto, S. Yuasa, and H. Imamura, *Critical damping constant of a spin torque oscillator with a perpendicularly magnetized free layer and an in-plane magnetized reference layer*, Physical Review B (2015), vol. 92, 220403(R), (4pages).
4. H. Arai and H. Imamura, *Control of domain wall thickness by spatial modulation of uniaxial anisotropy and exchange stiffness parameters*, Japanese Journal of Applied Physics (2015), vol. 54, 030307 (4pages.)

(2)特許出願

研究期間累積件数：2 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発 明 者：荒井礼子, 松本利映, 湯浅新治, 今村裕志

発明の名称：スピントルク型マイクロ波発振器

出 願 人：産業技術総合研究所

出 願 日：2015/12/22

出 願 番 号：2015-250062

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

国際学会発表 7 件

国内学会発表 6 件

1. H. Arai and H. Imamura, *Control of domain wall thickness by introducing spatial modulation of uniaxial anisotropy and exchange stiffness parameters*, 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), poster.
2. H. Arai R. Matsumoto and H. Imamura, *Zero-bias field spin-torque oscillator having a perpendicularly magnetized free layer with second-order uniaxial anisotropy and in-plane magnetized reference layer*, International colloquium on magnetic films and surfaces (ICMFS2015), poster.
3. 荒井礼子、松本利映、湯浅新治、今村裕志, 面直自由層を持つスピントルク発振器における二次の異方性の効果, 日本物理学会(2015), 口頭発表
4. H. Arai and H. Imamura, *Stochastic phase synchronization of perpendicularly magnetized spin torque oscillators with second-order uniaxial anisotropy*, Intermag2017, oral.
5. H. Arai and H. Imamura, *Artificial neural network based on spin-wave coupled spin torque oscillators*, Intermag2018, oral.