

第2回 CSRN-Tokyo Workshop 2018

「スピン、ニューロモルフィック・コンピューティング」報告書

2018年10月27日 東京大学（本郷キャンパス 工学部2号館）にて開催

東京大学 工学系研究科 スピントロニクス学術連携研究教育センター(CSRN)

世話人 吉田 博、田中 雅明

Session I 報告書

文責：関 宗俊（東京大学工学系研究科 CSRN）

生体ゆらぎに学ぶ確率共鳴原理によるスピングラス省電力デバイス設計と実証

講演者：東京大学工学系研究科、CSRN・田畑 仁

Hopfield が神経回路網の連想記憶モデルとスピングラスの類似性を指摘して以来、スピングラスの脳型記憶素子への応用を目指した基礎研究が精力的に進められているが、未だ実現には至っていない。本講演では、ガーネット型鉄酸化物における高温スピングラス相の実現と脳型素子応用に関する最新の研究成果が紹介された。ガーネット型鉄酸化物は 500K を超える磁気転移温度を有し、原子レベルでの磁気相互作用の制御と局所的磁気異方性の導入により、室温をはるかに超える温度領域でスピングラスが発現する。これまでに、 $\text{Lu}_3\text{Fe}_4\text{Co}_{0.5}\text{Si}_{0.5}\text{O}_{12}$ ガーネット型薄膜において、190K のガラス転移温度が達成され、比較的高温の領域（120-180K）でスピングラス相に特徴的な現象として知られるエージング・メモリ効果が観測された。また、光励起原子価間電荷移動による磁気相転移（スピングラスの光融解）を利用し、任意の温度において光刺激に対する学習・記憶の履歴機能を初めて実証した。今後、ガラス転移温度の更なる上昇、光応答性の増大とともに素子実現に向けて重要な課題となるのは、ガラス状態を簡易かつ高精度で検出可能なシステムの構築である。そこで本講演では、ガーネット型薄膜を用いたスピン波検出デバイスについての報告がなされた。これまでに、スピングラスの母体材料であり非常に小さなダンピング定数を有する $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ を用いて 2 ポート・コプレーナ線路型デバイスを形成し、強磁性共鳴とスピン波の伝搬の観測に成功している。この結果をもとに、現在、スピングラス材料に適用可能な多入力脳型スピン波素子の開発が進められており、今後の研究の展開が注目されている。

スピン波リザバーコンピューティングチップデバイス

講演者：東京大学工学系研究科・中根了昌

現在の情報ネットワークシステムの基盤技術であるクラウドコンピューティングでは、膨大なデータ量の処理に伴いネットワークトラフィックが混雑して情報転送の遅延が発生し、端末周辺における迅速な情報取得が困難になるという問題がある。このような状況を打開しうる新たな技術として、端末付近のサーバあるいは端末機器自体が情報処理を行うエッジコンピューティングが有望視されている。リザバーコンピューティングチップデバイスは、構造化されていない時系列データを超消費電力で逐次処理することが可能であり、エッジコン

ピューティングを実現する新しい情報処理素子として期待されている。本講演では、ガーネット磁性薄膜を用いたスピン波リザーバコンピュティングデバイスの提案とその動作原理の実証に関する発表が行われた。提案されたデバイスは、導電性基板、磁性ガーネット層、磁気電気変換層、入力・出力端子から構成され、入出力端子のサイズ、数、配置は自由に設計可能で、特定のタスクに対して最適化をおこなうことも可能となっている。この磁性ガーネット層を伝搬するスピン波のマイクロマグネティクスシミュレーションを行い、未知の入力に対する推定タスクを実証することに成功した。また、リザーバコンピュティング応用に重要となるスピン波ダイナミクスの履歴依存性や非線形干渉が発現することも明らかとなった。現在、素子構造の最適化や磁気電気変換層に用いる具体的な材料系の検討が行われており、今後これらの研究が進展することによって、さらに大きなインパクトを持つ成果が生まれるものと期待される。

高品質エピタキシャル単結晶ヘテロ構造を用いた縦型スピントランジスタ実現への試み

講演者：東京大学工学系研究科、CSRN・大矢 忍

スピン MOSFET は既存の半導体デバイスとの高い整合性を有しており、高速動作・高集積化が可能な不揮発性メモリや再構成可能な論理回路への応用が期待されるデバイスである。しかしながら、一般には、強磁性体/半導体界面での結晶の劣化や微粒子の形成が界面でのスピン散乱の要因となり、素子特性に重大な影響を及ぼすという問題がある。また、実用化に向けては、磁気抵抗比の大幅な増大やチャンネル内のスピン緩和の影響の抑制などの課題を解決する必要がある。本講演では、これらの問題を克服しうるデバイスとして、強磁性半導体 GaMnAs と半導体 GaAs を組み合わせた縦型スピントランジスタが紹介され、その開発の経緯や最新の研究成果に関して発表がなされた。講演者の研究グループは、2015 年に初めて GaMnAs を用いた縦型スピントランジスタについての報告を行っているが、当時のゲート電圧による電流変調量は 0.5%程度にとどまっていた。しかし、その後の素子の微細化やイオン液体や HfO₂ 等のゲート絶縁層の導入等により素子特性が向上し、最近では 130%程度の変調が得られるようになってきている。また、GaO_x をチャンネルに用い、Fe をソースとドレイン電極に用いた縦型スピントランジスタにおいて、室温で大きな磁気抵抗と電流変調を達成したという注目すべき報告もなされた。これらの優れた成果は、将来のスピントランジスタの実現に繋がるだけでなく、スピンドダイナミクスを利用したニューロモルフィックコンピューティングの開発研究にも大きな寄与をするものであり、今後の研究の進展が大いに期待される。

スピンドダイナミクスによるレザバコンピュティング

講演者：東京大学物性研究所・三輪真嗣

リカレントニューラルネットワーク (RNN) は人間の脳の神経系を模した数学モデルであり、時系列データの処理が可能である。新たな機械学習方式として注目されているレザバコンピュティング (RC) は RNN の一種で、RNN と比較して系に学習させるための最適化が容易であり、大規模実験系への実装がしやすいという特徴がある。本講演では、RNN や RC の基本的特性や応用例について説明がなされた後、講演者が推進する磁気トンネル接合 (MTJ)

を用いた RC の研究についての成果報告があった。これまでに様々な Physical reservoir computing が提案されてきたが、スピントロニクスデバイスの技術基盤が確立されている現在、MTJ を利用した RC の応用上の優位性は際立っていると見える。しかしながら、MTJ の RC としての性能指数は未だよくわかっていない。そこで講演者らは、MTJ の特性をマクロスピシミュレーションにより再現し、RC の性能指数を評価した。計算では、電圧のランダムパルスを MTJ 素子に印加し、MTJ の抵抗値をレザバとした。解析の結果、MTJ のスピンドイナミクスは有限の Short term memory capacity (メモリ効果) および Parity check capacity (非線形性) を有することが分かった。今後は具体的な材料系の探索とシステムの構築が応用に向けての重要課題となる。また、今回は考慮していないが、MTJ のスピン間の磁気/電氣的結合を取り入れることにより、より高い性能が得られると期待される。本研究の成果は、スピンドイナミクスを用いた RC の実現に向けて素子の基本的な設計指針を初めて提供したという点で、極めて大きな意義を有している。

Session II-1 報告書

文責：田中雅明（東京大学工学系研究科、CSRN）

アナログスピン軌道トルク素子を用いた人工神経回路網

講演者：東北大学電気通信研究所・深見俊輔

スピントロニクス素子に情報を書き込む新しい手法として、近年、スピン・軌道相互作用を利用したスピン軌道トルク (SOT) 誘起磁化反転が注目されている。本講演では、SOT 技術に関する最近の研究成果、およびアナログスピン軌道トルク素子を用いた人工神経回路網の設計と作製について紹介された。SOT とは、非磁性重金属 (HM) と強磁性 (FM) 金属が積層された構造に面内方向に電流を導入すると、FM 層中には面内方向に偏極したスピンの蓄積し、その角運動量が磁化に受け渡されることで磁化にトルクが働く現象である。電流の極性を変えるとトルクの方向が逆になり、逆方向に磁化を反転できる。SOT 誘起磁化反転の具体的な方式として磁化容易軸方向を基に Type Z、Type Y、Type X の 3 方式があり、それぞれの機構と特徴が説明された。続いて、Type Z 方式の SOT 誘起磁化反転では X 方向への磁場の印加が必要であったが、この磁場を不要にするために、反強磁性/強磁性積層構造 (反強磁性 PtMn と強磁性 Co/Ni 積層膜を積層した構造) を用いて十分な交換バイアスとスピンホール効果が発現されるように設計・作製することにより、実際に無磁場での SOT 誘起磁化反転を実現できることが示された。

さらに、反強磁性 PtMn と強磁性 Co/Ni 積層膜の積層構造からなるアナログ SOT 素子を作製し、人工神経回路網の動作実証が示された。この素子は、上記のように無磁場での磁化反転が可能である他、その反転量を印加する電流に応じてアナログ的に制御できるという特徴をもつ。通常の不揮発性スピントロニクスメモリ素子とは異なるこのアナログ的な振る舞いは、多数の微細な磁区が異なる電流値において徐々に反転することに由来している。このアナログスピン素子 36 個を用いて構築した人工神経回路網を用い、連想記憶と呼ばれる脳型情報処理の典型的な動作の模擬実験を行った。多数回の試行の結果、用いたアナログスピン

素子は脳におけるシナプスと同様に学習によってパターンを不揮発に記憶し、かつ不完全な入力に対しても元のパターンを想起する性能をもつことが確認された。本研究はスピントロニクス素子の不揮発性とアナログ特性を用いた人工ニューラルネットワークへの応用を示したものであり、今後ますますの発展が期待される。

Session II-2 報告書

文責：中根了昌（東京大学工学系研究科）

磁性体を用いた AI ハードウェア開発の試み

講演者：大阪大学基礎工学研究科、CSRN・鈴木義茂

スキルミオンのブラウン運動を利用した「スキルミオンブラウン計算器」の実現に向けた研究について講演がなされた。

「ブラウン計算器」は、シミュレーションによる研究が報告されており、物質における物理量のブラウン運動と、それを制御するラチェット、ハブ（三叉路）、C ジョインという3つのモジュールを組み合わせることでエネルギー損失を極限まで下げた論理演算が可能なデバイスである。はじめにこの基本概念と原理について、マックスウエルの悪魔を引き合いに出しながら熱力学を用いて詳細な説明がなされ、論理回路の構成についての紹介もなされた。また、その物理量としてスキルミオンを用いる意義について説明がなされた。次に、スキルミオンブラウン計算器を実装するために必要な、材料開発、スキルミオン生成とその観察、ブラウン運動の観察、スキルミオンの電圧による運動制御とその観察、について紹介がなされた。実際の観察動画が紹介され、それらを明瞭に確認することができた。ブラウン運動を観察することによりスキルミオンの拡散係数を求め、これが大きくなる材料の開発がおこなわれ、トラップサイトを減少させた均質な膜を作製することに注力がなされていた。様々な開発によって、計算器に必要な3つのモジュールの基本動作について実装がなされていた。今後、論理回路の実装に大いに期待の持てる発表内容であった。

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

講演者：大阪大学工学研究科・野村 光

ナノ磁性ドット（円形薄膜磁性ディスク）アレイ構造を用いたリザーバーコンピューティングの提案とシミュレーションによる動作結果に関して講演がなされた。

デバイスは、上下方向を向くバイナリ磁化状態を保持可能な円形薄膜磁性ディスクをバイナリービットに用い、それらを規則的に 2×10 個並べ、各ディスクの垂直磁気異方性 K_u を2値間（ $=0$ と $\neq 0$ ）で個別に操作できる様に構成されている。入力ディスクをアレイの端に一つ設定して、クロックに同期した磁気異方性の操作により、入力から信号転送を行いながら演算を実行している。基本的にはシフトレジスタと同様な信号転送の動作を行うが、 $K_u=0$ を持つビットは自身の初期状態や周辺からの磁気ダイポールによる漏えい磁場に影響を受け、次回に $K_u \neq 0$ となった際の磁化方向が決定される。この漏えい磁場による影響がシフトレジスタと異なる部分であり、この制御がリザーバーコンピューティングを実行可能とするキー

ポイントとなる。

リザーバーコンピューティングは、クロック時刻の異なる2つの出力ビットを用いて、線形分離不可能な論理演算である排他的論理和 (XOR) の学習と未知入力による試行が行われた。出力ビットのクロック間隔が1、2、3の場合は学習と試行により演算が可能であることが確認された。今後このクロック間隔を増加させることなど、性能向上をおこなうためにはどのようなデバイス構成とすべきかなどについて議論がなされた。今後の発展に大いに期待の持てる発表内容であった。

まとめ

当日は会場で立ち見が出るほど盛況であった。すべての講演で学術的に極めて優れた成果が発表され、活発で有意義な議論がおこなわれた。参加者の専門分野は多岐にわたり、またセッションを通じて多様な研究対象や研究手法が紹介されたのが印象的で、この分野の重要性と注目度をうかがい知ることができた。今後のこの分野の更なる発展のためには、一つの専門に捉われるのではなく、物質科学・工学・情報科学が融合した新しい研究アプローチが必要と思われる。本ワークショップのような異分野交流の場や学際的なネットワークを通じてより一層研究が発展し、ニューロモルフィック・コンピューティングの新たな指導原理や革新的デバイスが創出されるものと期待される。