

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

AI 処理や画像認識を高速・低消費電力で実現する スピン波リザバーチップによる高速信号処理の原理実証に成功！

本研究のポイント

- スピン波を用いたマイクロメートルスケールでの多入力多出力素子の開発に成功。
- 物理リザバーとして従来報告されている光・スピン素子より基本性能（短時間記憶、非線形変換）を大幅に改善。
- 半導体微細加工技術と互換性があり、半導体後工程における制御用 CMOS チップとスピン波リザバーチップを組み合わせたエッジコンピューティング素子開発が期待される。

【研究概要】

横浜国立大学大学院理工学府の長瀬 翔 氏、根津 昇輝 氏、大学院工学研究院／先端科学高等研究院／総合学術高等研究院の関口 康爾 教授らは、磁気の波であるスピン波を用いたスピン波リザバー素子の開発に成功しました。この技術は将来的に、ネットワーク端末に組み込むことで、AI 処理や画像認識といった高度な計算を高速かつ低消費電力で行うことを可能にします。例えば、スマート工場におけるリアルタイムな品質検査や、自動運転車における環境認識など、様々な分野で革新的な応用が期待されます。従来の光・スピンを用いた手法では、集積化や多入力多出力といった大規模化が困難でしたが、スピン波リザバーは素子中の配線を必要としないため、高密度集積化が可能です。これにより、AI 処理や IoT デバイスの普及に伴い、リアルタイムなデータ処理が求められる現代において、ネットワークやサーバーでの負荷低減に貢献するエッジコンピューティングの性能を飛躍的に向上させることが期待されます。

本成果は、国際科学雑誌「Physical Review Applied」（2024年8月29日付）に公開され、Editor's Suggestion にも選ばれています。尚、本研究は日本学術振興会「科学研究費助成事業」（課題番号 19H00861、22K18321）による支援を受けて行われました。

【研究の背景と経緯】

エッジコンピューティングとは、データをクラウドなどの中央サーバーに集めて処理するのではなく、データが生成された場所で（エッジ）で処理を行う信号演算技術です。IoT デバイスやセンサーなど、大量のデータを生成するデバイスが普及するにつれて、その重要性が高まっています。例えば、クラウドに情報を上げてからそのフィードバックで端末を制御すると遅延が生じてしまい、またネットワークそのものの負荷が増大してしまいます。

一方で、現代社会の情報基盤となっている電子演算回路（CMOS など）は、トランジスタのスイッチング動作に伴う消費電力が比較的大きい傾向にあります。特に、高性能な処理を長時間リアルタイムで行う場合、消費電力は飛躍的に増加します。エッジデバイ

スは、バッテリー駆動や省電力化が求められるケースが多く、CMOS 回路の消費電力は大きな制約となります。この問題を解決する手段として、リザバー演算が注目されています。リザバー演算は、入力信号を複雑な非線形ダイナミクスを持つシステム（リザバー）に通すことで、高次の特徴抽出を行うことができます。この際、リザバーとして、レーザー共振器、スピン波デバイス、ニューラルネットワークなど、様々な物理系を利用することができます。物理リザバーは、これらの物理系が本来持つ非線形なダイナミクスを直接利用するため、CMOS に比べてはるかにシンプルな構成で演算回路を実現できます。これにより、消費電力を大幅に削減し、高速な情報処理が可能になります。

【研究の内容】

今回、横浜国立大学大学院理工学府の長瀬 翔 氏、根津 昇輝 氏、大学院工学研究院／先端科学高等研究院／総合学術高等研究院の関口 康爾 教授らは、磁気の波であるスピン波を用いた物理リザバー（スピン波リザバー素子）を開発することに成功しました。軟磁性体パーマロイの薄膜（厚さ 300 ナノメートル）を、40 マイクロメートル×80 マイクロメートル（または 90 マイクロメートル×120 マイクロメートル）の微細な形状に加工し、ホイヘンススリットと呼ばれる人工構造を導入したスピン波リザバー素子を開発しました。この素子において、磁気の波であるスピン波は、パーマロイ薄膜内を伝搬する際に、ホイヘンススリットによる複雑な干渉効果を受けます。実験の結果、1つの入力信号が4つ（または8つ）の異なる出力信号に変換されることが確認されました。この変換は、微細加工技術のさらなる高精度化によって、より複雑かつ多様なパターンへと拡張できる可能性を示しています。スピン波は、パーマロイ薄膜内を伝搬する過程で、干渉、減衰、試料端での反射といった多様な動きをします。これらの複雑な現象が、各出力端子における特徴量の増大に寄与し、情報処理の多様化につながると考えられます。本素子に 0.8 ナノ秒の高速電気信号を入力し、生成されるスピン波信号の特徴を機械学習モデルに学習させました。その後、未知の入力信号に対するスピン波応答から、元の電気信号強度を推定することに成功しました。短時間記憶およびパリティチェックといった基本的なタスクにおいて、本素子は従来の光・スピン素子を大幅に上回る性能を示し、リアルタイム信号処理への応用が期待されます。

【今後の展開】

本研究で開発したスピン波リザバー素子は、その高いポテンシャルを示していますが、さらなる性能向上のためには、材料、素子構造および信号検出の各要素技術を最適化する必要があります。特に、スピン波のナノスケール伝搬特性に着目し、高集積化されたチップデバイスへの応用を視野に入れた研究を進めることで、次世代の情報処理技術の革新に貢献できると考えています。

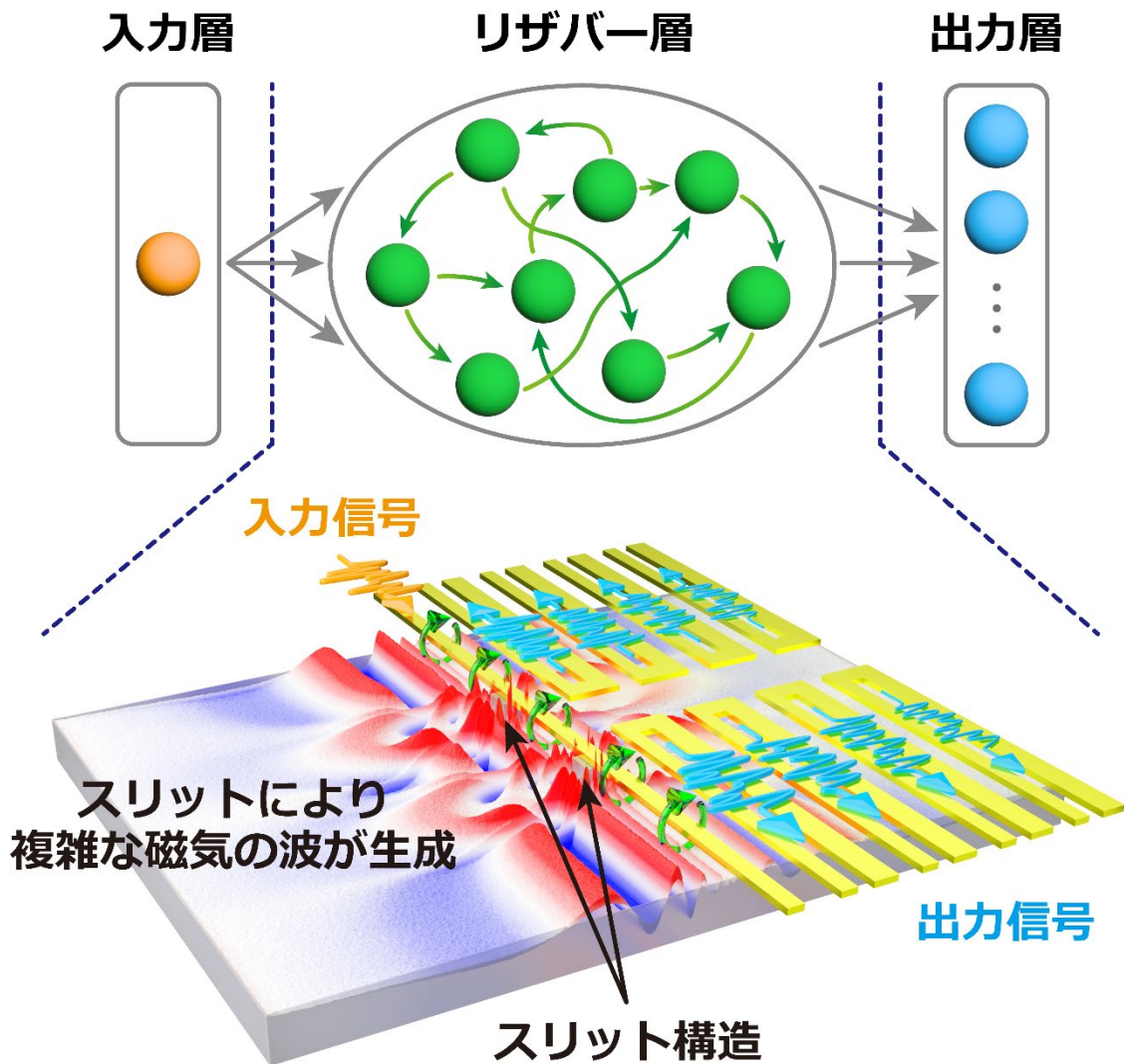


図 スピン波リザーバーチップの概略図

- 注1) スピン波: スピン波は、磁性体内部のスピンが集団的に振動する現象であり、その振る舞いは磁性体の形状や外部磁場などに大きく影響されます。ホイヘンススリットの導入により、スピン波の伝搬経路が制限され、特定の周波数成分が選択的に増幅または減衰する現象が生じます。
- 注2) ホイヘンススリット: ホイヘンススリットは、光学分野で用いられる回折格子の一種であり、波の回折現象を利用して様々な波動制御を実現します。本研究では、この原理をスピン波に応用することで、スピン波の伝搬を制御し、複雑な干渉パターンを生成しています。

注3) 特徴量の増大: スピン波の干渉、減衰、反射といった複雑なダイナミクスにより、各出力端子におけるスピン波の振幅、位相、周波数などが変化します。これらの変化を特徴量として捉えることで、多様な情報処理が可能となります。

【掲載論文】

“Spin-wave reservoir chips with short-term memory for high-speed estimation of external magnetic fields” (外部磁場の高速推定処理のための短時間記憶を有するスピン波リザーバチップ)、Sho Nagase, Shoki Nezu, and Koji Sekiguchi, Physical Review Applied, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.22.024072>

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 大学院工学研究院／先端科学高等研究院／総合学術高等研究院

教授 関口 康爾

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

Tel: 045-339-4147

E-mail: sekiguchi-koji-gb@ynu.ac.jp