

スピン波を利用した情報処理チップデバイスの提案と動作原理の実証 ーIoT 社会を推し進める高性能端末機器の実現へー

1. 発表者：

中根 了昌（東京大学大学院工学系研究科 国際工学教育推進機構社会連携講座
／電気系工学専攻 特任准教授）

田中 剛平（東京大学大学院工学系研究科 国際工学教育推進機構社会連携講座
／電気系工学専攻 特任准教授）

廣瀬 明（東京大学大学院工学系研究科 国際工学教育推進機構社会連携講座
／電気系工学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆スピン波を利用して、人工知能用に高密度で柔軟なニューロン間結合を無配線で実現する、多入出力情報処理チップデバイスを提案しました。
- ◆時系列信号の入力により生成されるスピン波の時空間パターンを用いて機械学習を行うことにより、未知の入力時系列信号のもつ特徴を抽出する汎化能力が実現できることを示しました。
- ◆IoT 社会を推進するために必須な超低消費電力高性能端末機器の実現につながることを期待されます。

3. 発表概要：

人工知能の主要技術である人工ニューラルネットワークの一つとして、時系列信号の学習に適したリザバーコンピューティング（注1）という情報処理の枠組みが知られています。近年、ニューラルネットワークの代わりに様々な物理現象を利用した物理リザバーコンピューティングが提案されてきましたが、人工知能用ニューロン間結合に相当する配線が必要なものか、配線を必要としなくてもチップとして実装することは困難であるものに限られており、大規模システムを集積化するのに適した実装方法は提案されていませんでした。

東京大学工学系研究科電気系工学専攻の中根了昌 特任准教授、田中剛平 特任准教授、廣瀬明 教授の研究グループは、スピン波を利用した多入出力情報処理チップデバイスを提案し、それを用いた物理リザバーコンピューティングが実現可能であることを数値シミュレーションにより実証しました。

本研究グループは、まず、ガーネット磁性薄膜上でスピン波の励起（入力）と検出（出力）を行うデバイス構造を考案し、材料定数、外部バイアス磁場を調整してスピン波が非線形干渉を起こす設定を発見しました。この様なスピン波の挙動はこれまで報告がない特徴的なものであることがわかりました。次に、このスピン波デバイスに基づいたリザバーコンピューティングが可能であることを示すため、入力時系列信号に応答して生成されたスピン波の時空間パターンから入力時系列信号のもつ特徴を抽出するように、サンプル信号を用いて学習を行いました。その結果、未知の入力時系列信号に対しても、それがもつ特徴を高い精度で推定できました。これは、スピン波デバイスを用いたリザバーコンピューティングが汎化能力を獲得したことを示しています。

提案したデバイスは、波動現象により高密度で柔軟なニューロン間結合に相当する働きを無配線で実現し、かつチップとして実装することが可能なので、大規模システムを集積化に適して

います。このようなデバイスは、IoT 社会を推進するために不可欠な超低消費電力高性能端末機器の実現につながることで期待されます。

4. 発表内容：

<研究の背景>

Internet of Things (IOT) 社会では、様々なモノからの膨大なデータを情報処理して活用することにより、生活、社会インフラ、産業などのあらゆる分野において、これまでにない変革をもたらすことが期待されています。センサなどの端末機器で取得されたデータの大半は構造化されていない時系列データであり、情報ネットワークを通してこれらのすべてをクラウドコンピューティングすることは、情報ネットワークシステム全体の効率を著しく低下させます。そうしたことから、端末機器近くで、あるいは端末機器自体が適切にデータ処理と情報処理を行うエッジコンピューティング（注2）の必要性が高まります。こうした背景の下、特に人工知能や機械学習のような知的情報処理を超低消費電力で高速に行う高性能端末機器の実現が求められています。しかしながら、現在の集積回路技術でこれを実現するには様々な困難があるため、新しい原理に基づく電子デバイスをチップ上に創製して、それらの端末機器を実現することが期待されてきました。

時系列データの学習に適した情報処理の枠組みの一つとして、リザーバーコンピューティングが知られています。リザーバーコンピューティングは、もともとニューラルネットワークを用いた学習手法でしたが、近年では多様な物理ダイナミクスを利用した物理リザーバーコンピューティングも提案されており、物理デバイス実装への関心も高まっています。しかしながら、これまで提案されてきた物理リザーバーコンピューティングは、ニューロン間結合に対応する配線が必要なものか、配線を必要としなくてもチップとして実装することは困難なものに限られていたため、大規模システムを集積化するのに適していませんでした。

<研究の経緯>

スピン波と呼ばれる強磁性体／フェリ磁性体薄膜におけるスピン分布の変化が時間－空間連続的に伝わる現象を利用したスピン波デバイスの提案と、それを用いたリザーバーコンピューティングの基本動作原理の実証を目指しました。強磁性体／フェリ磁性体薄膜は消失しないモーメント「自発スピン」（ここでは自発磁化（注3）と同義）を持ち、スピン波の履歴によってスピン分布が決定されることや、適切な物質定数と動作環境によって非線形干渉が起きること、などの物理現象を通して、多様な入出力特性の実現が可能であると期待できるためです。また、スピン分布の不揮発な保持が可能であることから、メモリ機能も兼ね備えた超低消費電力なデバイスの実現につながるからです。これまで、リザーバーコンピューティングに利用可能なスピン波デバイスの提案や実装は報告されていませんでした。

<研究内容>

図1に今回提案したスピン波デバイスを示します。デバイスは下部から、導電性基板、絶縁性ガーネット磁性薄膜、入出力電気（電圧または電流）信号－スピン波の変換を行う磁気－電気変換層、入出力金属電極、と構成されます。絶縁性ガーネット磁性薄膜を利用した理由は、スピン波の伝搬距離が長いため、長距離に位置する入力信号の結合が実現できるためです。デバイス動作は以下になります。信号を加えたいくらかの入力電極直下の局所において、ガーネット薄膜の物性（あるいは磁場）が変調され、スピン波が励起されます。それらがガーネット薄膜を伝搬して、その過程で線形／非線形干渉を起こします。それらの物理現象が新たなスピ

ン波を形成して、出力電極直下の局所でのスピン波に影響を与えます。この状態がその局所におけるガーネット薄膜の物性（あるいは磁場）の変調として検出され、出力信号になります。

デバイス動作原理を実証するために、 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m} \times 100\ \text{nm}$ ガーネット磁性薄膜においてスピン波を励起する2励起部とスピン波の波形を検出する3検出部を構成して(図2)、スピン波の伝搬特性をマイクロマグネティクスシミュレーションによって示しました。また、薄膜周辺部はスピン波の反射を防ぐためにダンピングをおこないました。入力信号は時間連続矩形波信号であり、遷移する2つの値のうち、高い値の継続時間の異なる条件を複数用いました(図3)。

リザーバーコンピューティングを行うため、検出部におけるスピン波が多様な出力特性を發揮できるように材料定数、外部バイアス磁場の設定をチップデバイスで実現可能な領域で探索し、励起部に対して強度が非対称に伝わり非線形干渉を起こす設定を見出しました(図4)。このようなスピン波の特異な振る舞いはこれまで報告がありませんでした。

リザーバーコンピューティングにおいて、提案したスピン波デバイスは入力時系列信号をスピン波の時空間パターン変換するリザーバーの役割をもち、読み出し部ではその時空間パターンに適当な重みづけをして入力時系列信号の特徴を抽出します。一部の入力時系列信号をサンプルデータとし、入力時系列信号の特徴が高い精度で抽出できるように重み付けを決定しました。これは訓練過程に相当します。次に、学習に用いなかった未知の時系列信号を入力してスピン波の時空間パターンを取得し、同じ重み付けを用いて出力を計算したところ、やはり入力時系列信号の持つ特徴が高い精度で推定されました。これは、スピン波デバイスを用いたリザーバーコンピューティングが汎化能力を獲得したことを示しています。

<展望・社会的意義>

今回提案したデバイスの最大の特徴は、スピン波の波動現象により、配線をせずに高密度で柔軟なニューロン間結合に相当する機能を実現し、かつチップ上にデバイスとして実現可能であるという点です。こうした特徴は、大規模リザーバーコンピューティングシステムの集積化に有利です。したがって、提案デバイスおよび手法は、知的情報処理を高速かつ超低消費電力で行う端末機器の実現につながり、新たな波動ベースエレクトロニクスの創生、ならびにIoT技術の推進に大きく貢献することが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「*IEEE ACCESS*」(オンライン版2月22日掲載)

論文タイトル：Reservoir Computing with Spin Waves Excited in a Garnet Film

著者：Ryosho Nakane*, Gouhei Tanaka, and Akira Hirose

DOI番号：10.1109/ACCESS.2018.2794584

アブストラクトURL：<http://ieeexplore.ieee.org/document/8262616/>

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科国際工学教育推進機構／電気系工学専攻
教授 廣瀬 明(ひろせ あきら)

7. 用語解説：

(注1) リザーブコンピューティング

入力時系列信号を高次元の時空間信号に変換するリザーブ部と、リザーブ部で生成された時空間信号の重み付けにより出力を与えるリードアウト部から成ります。学習はリードアウト部の重みパラメータを調整することで行われるので、リザーブ部は訓練する必要がなく、学習コストが少ないという特徴があります。

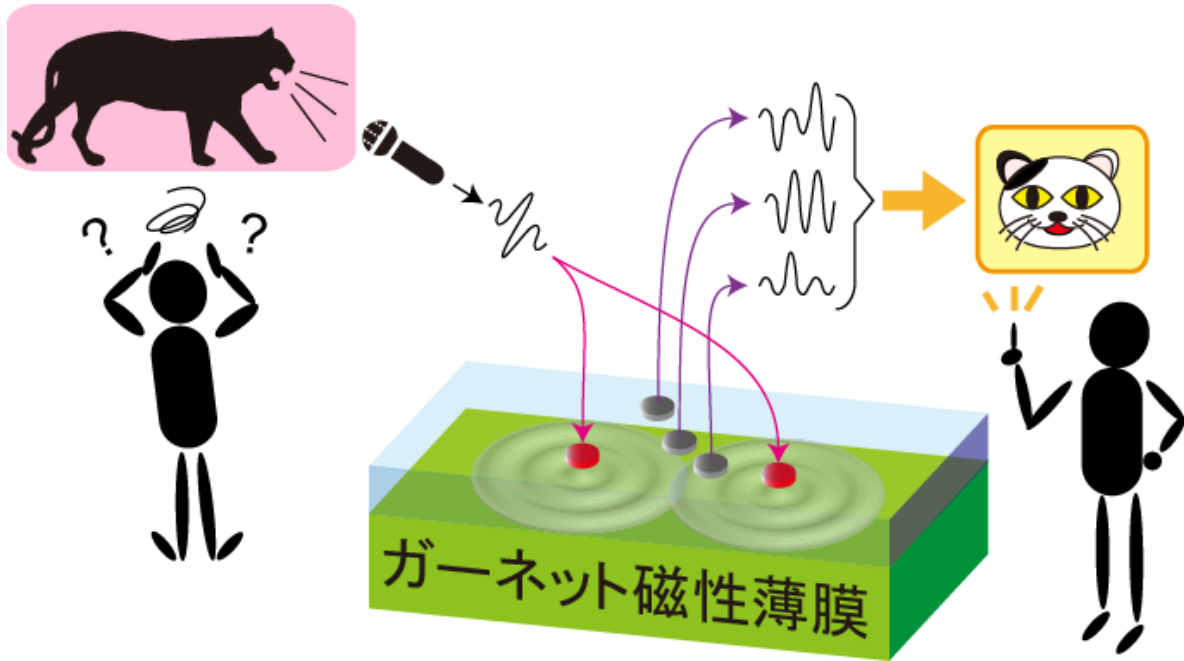
(注2) エッジコンピューティング

端末の近くにサーバを分散配置して行うネットワークコンピューティングの技法で、データ転送にかかる通信コストや通信遅延を回避できるので、高速な情報処理に適しています。端末から離れたコンピュータにデータを送信してデータ処理を行うクラウドコンピューティングと対比されます。

(注3) 自発磁化

コバルト、鉄、ニッケルなどの強磁性体における磁性を担う元素は、電子充填が不完全な電子軌道を持ち、これを原因として電子スピンモーメントと軌道磁気モーメントからなる磁気モーメントを持ちます。隣接磁気モーメントが平行に揃う交換相互作用によって、マクロな自発磁化（単位は単位体積当たりの磁気モーメント）が発現します。マグネタイトや磁性ガーネットなどのフェリ磁性体の場合は、隣接磁気モーメントが平行／反平行（など）に揃う交換相互作用が物質中で混在していますが、差し引きからマクロな自発磁化が発現します。自発とは、外部磁場を印加しなくても発現するという意味で用いています。

8. 添付資料：



本研究のイメージ図

対象物は音声のみでは簡単に認識ができませんが、その音声をスピนวェーブデバイスに入力してスピนวェーブの干渉を通じた出力を利用することで、簡単に認識が可能となります。図は将来的な活用の一例を描いています。

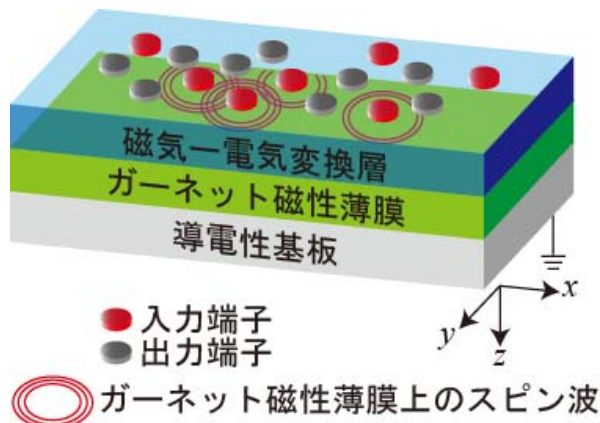


図1 提案したスピนวェーブデバイス。

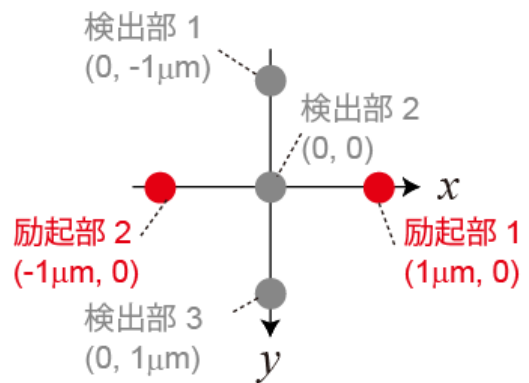


図2 シミュレーションに用いたガーネット磁性薄膜上のスピนวェーブ励起部（赤色）と検出部（灰色）の配置図。

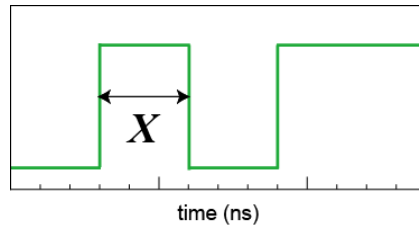


図3 シミュレーションに用いた矩形入力信号。高い値の時間 X が $1.5 - 5 \text{ ns}$ の範囲にある複数の信号を用いた。

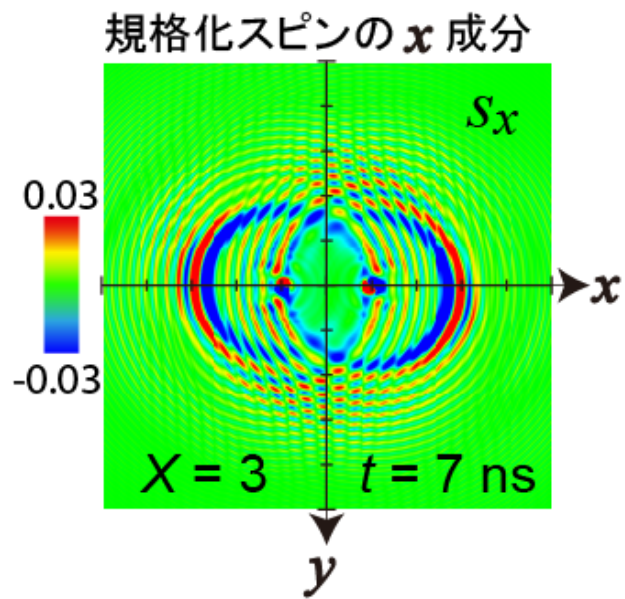


図4 スピン波干渉の一例： $X = 3 \text{ ns}$ の入力信号、時間 t が 7 ns 時点。表示は $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ の範囲。