

# 磁区を伝播するスピン波を用いたリザーバーコンピューティング

## Reservoir Computing utilizing spin waves propagating through magnetic domains

東大工学系<sup>1</sup>, 東大ニューロインテリジェンス国際研究機構<sup>2</sup>, 東大情報理工<sup>3</sup>

○中根了昌<sup>1</sup>, 廣瀬明<sup>1</sup>, 田中剛平<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, <sup>2</sup>International Research Center for Neurointelligence,

<sup>3</sup>Graduate School of Information Science and Technology, The Univ. of Tokyo

○Ryosho Nakane<sup>1</sup>, Akira Hirose<sup>1</sup>, and Gouhei Tanaka<sup>1,2,3</sup>

我々は、一様な磁性体に励起されるスピン波を用いたリザーバーコンピューティングの提案と計算実験研究を行い、その高いポテンシャルについて明らかとしてきた [1–3]。スピン波リザーバー部の動作原理は、時空間分布した非線形物理ダイナミクスを入力により励起し、空間配置した出力電極から多様な出力信号を同時に取得することである。リザーバー部の要求仕様である短期記憶性と非線形性には、スピン波の多重散乱・干渉・反射、位相速度と減衰の周波数分散、などを含む非線形物理現象を積極的に利用して、近い過去の状態に依存した入力信号の非線形変換を実現することが有望と考えられる。また、もう一つの要求仕様である多次元性には、不安定な波動が空間の局所において瞬時的に引き起こすダイナミクスを利用して、多様な出力信号を実現することが有望と考えられる。こうした考察に基づき、本研究は上記物理現象の増大を目指し、スピン波の媒体となる一様な磁性体上に磁区を導入し、物理現象とリザーバーコンピューティングの計算性能との関係を解明することを目的として行った。

マイクロマグネティクスシミュレータにより計算実験を行った [3]。フェリ磁性体  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  は xyz カーディアン座標系において  $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m} \times 320\ \text{nm}$  とし、物性パラメータはエピタキシャル  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (111)/GGG(111)の物性実験から見積もられた値を主に用いた。スピン波伝播部となる内部領域のダンピング定数は  $\alpha = 0.001$  とした。一方、端面周辺の  $40\ \text{nm}$  厚領域は  $\alpha = 0.001, 0.01, 0.1, 1$  とし、物理ダイナミクスを操作した。外部磁場を面内+y方向に  $3.98\ \text{kA/m}$  印加し、面直z軸に沿った一軸異方性定数  $K_U = 5\ \text{kJ/m}^3$  との競合によりy軸に沿ったストライプ磁区構造を実現した (図1(a))。時系列入力信号は、1 GHzで繰り返す三角パルスを搬送波として、時系列ランダムビット値に対応して振幅が変化する表現を用いた。これを  $K_U$  の変化とする物理入力信号へと変換する際に、1入力ビットに対応する離散時間ステップ長さ  $T = 1, 2, 4, 6, 8\ \text{ns}$  とし、ダイナミクスを操作した。磁性体表面の面内中心に配置した  $800\ \text{nm} \times 4\ \mu\text{m} \times 40\ \text{nm}$  の入力部に入力信号を印加し、スピン波を励起した。検出部は  $200\ \text{nm} \times 200\ \text{nm} \times 40\ \text{nm}$  を単位として入力部外の表面に72個を規則的に配置した (図1(b))、各検出部におけるスピンz方向成分の平均値をリザーバー出力信号とした。取得したリザーバー出力信号は包絡線処理とローパスフィルタ処理により時間ステップ内の平均値を算出して72次元の状態ベクトルとした。この状態ベクトルに重みベクトルを乗算して総和し、0.5の閾値処理により二値化を行いシステム出力値とした。1100ステップ長の初期100ステップを破棄し、引き続き500ステップを訓練に用い、リードアウト部の最適重みを疑似逆行列で決定した。残りステップと最適重みを用いて未知データに対する検証を行った。システム計算性能は、時間遅延タスクと時間的排他的論理和 (XOR) タスクにおける正解率1の最大遅延ステップ長により評価した。

リザーバー出力信号の時間発展波形は $\alpha$ と $T$ の値によって波形が異なるものの、すべての条件下において入力を非線形変換した波形が得られた。また、検出器ごとに波形が異なる多様な出力信号が得られた。離散フーリエ変換により波形を解析し、すべての $\alpha$ と $T$ の条件下で非線形物理現象の特徴が得られ、 $\alpha$ と $T$ が小さいほど非線形性が強い傾向を明らかとした。システム計算性能は、物理現象の非線形性が弱い方が高い傾向にあったが、非線形性が抑止され過ぎても計算性能が低下する場合があった。このことは、計算性能の向上と低下に寄与する非線形物理現象があることを示唆している。タスク計算性能を両立する $\alpha$ と $T$ の条件内での計算性能は、遅延タスク (短期記憶長): 12、XORタスク: 5、が得られ、磁区を伝播するスピン波を用いたリザーバーコンピューティングが高いポテンシャルを持つことを明らかとした。

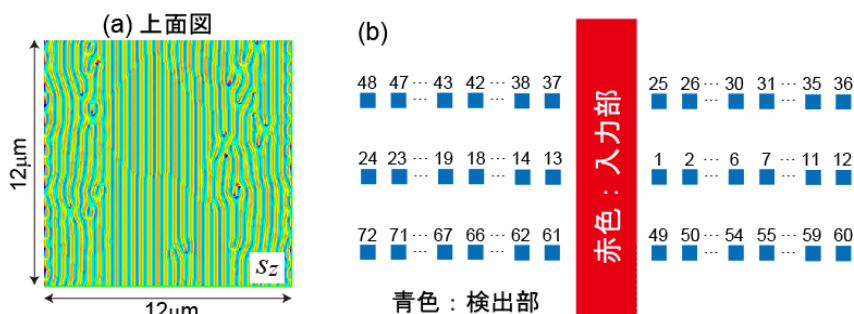


図1 (a)  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  ストライプ磁区構造の上面図 (xy 面)。スピンの z 方向成分を表示。(b) 磁性体 xy 表面の中心に配置した入力部 (赤い長方形) と 72 個の検出部 (青い正方形)。

参考文献 [1] R. Nakane, G. Tanaka, and A. Hirose, IEEE ACCESS 6, 4462 (2018). [2] T. Ichimura, R. Nakane, G. Tanaka, and A. Hirose, IEEE ACCESS 9, 72637(2021). [3] R. Nakane, A. Hirose, and G. Tanaka, Phys. Rev. Research 3, 033243(2021).

謝辞 本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成 (No.JPNP16007) により行われた。