

情報担体を活用した集積デバイス・システム
2021 年度採択研究代表者

2021 年度 年次報告書

齊藤英治

東京大学 大学院工学系研究科／東北大学 材料科学高等研究所
教授／主任研究者

非古典スピン集積システム

§ 1. 研究成果の概要

マグノンのパラメトリック励起による磁性体ドットを用いた演算素子開拓では、アニーリング計算の基盤となる 10^1 オーダーの集積磁性体ドットの磁化ダイナミクス測定を実現した。またドット内に励起されるマグノン状態の評価を、スピン流測定を用いた状態トモグラフィ法により実施した。状態トモグラフィ法を時間分解測定へと拡張し、アニーリング計算が実行される数ナノ秒の間の磁化状態の変化を測定した。これにより、磁性体ドットを用いたアニーリング計算の実現に必達であるマグノンの非古典状態の生成と制御が可能となった。並行して、集積ドット系の同時観測を可能とするため、フェムト秒パルスレーザーとマイクロ波を位相同期させた高速時間分解磁気光学イメージング法を構築し、強いマイクロ波励起で生じる非線形磁化ダイナミクスの直接観測を成功させた。また、磁性体ドット内のマグノンのダイナミクスをシミュレーションすべく、数値計算および理論解析を行い、静磁相互作用に起因するマグノン間の結合によりマグノン緩和時間を延長させる機構を見出し、磁化ダイナミクスのコヒーレンスを利用した磁性体ドット演算の計算性能向上につながる成果を得た。

スカーミオンを用いたブラウニアン回路素子の開発では、効率的な計算の実現のために、ブラウン回路に基づいて改良された非同期セルオートマトンを設計した。物理的な実装を容易にするために、状態の数と遷移ルールを数を最小にした結果、今回 3 つの状態と 10 の遷移ルールを持つ新しい非同期セルオートマトンを提案し、その計算万能性を示すことに成功した。実験では、磁性多層膜の最表面に対する微細加工技術により、複数のブラウニアン基本論理演算素子をアレイとして集積配置することに成功し、さらにゲート電圧をかけることにより基本論理演算素子の確率的挙動を調整し、最適化計算に利用可能な確率的ビット(p-bit)が実現できることを明らかにした。これに加えて、ブラウン運動の拡散係数を外部からくわえる電流で制御可能になることを示し、効率的なブラウニアン回路計算が可能となった。

§ 2. 研究実施体制

(1) 情報物理学と集積デバイス応用研究グループ(東京大学)

- ① 研究代表者 齊藤 英治 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)
- ② 研究項目
 - [1] YIG ドット加工及び集積技術開発・機械学習も活用した材料最適化
 - [2] 理論構築・性能評価
 - [3] YIG 非古典相関多ビット動作の実証
 - [4] スカーミオンおよび磁気ナノ構造を用いた古典集積回路の実装と非古典物理現象の開拓
 - [5] 純量子性の追求
 - [6] YIG 超高速最適化及びサンプリング 動作・非線型計算・ゲート情報処理実証
 - [7] スカーミオン集積回路実装

(2) ソフトウェアとデバイス研究グループ(情報通信研究機構)

- ① 主たる共同研究者 Ferdinand Peper (情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター 副室長)
- ② 研究項目
 - [1] 非古典スピン計算システムのアルゴリズムの研究
 - [2] YIG 超高速最適化及びサンプリング 動作・非線型計算・ゲート情報処理実証
 - [3] スカーミオン集積回路実装

(3) プロセスとアプリケーション研究グループ(NEC)

- ① 主たる共同研究者 石田 真彦 (NECシステムプラットフォーム研究所 主幹研究員)
- ② 研究項目
 - [1] YIG ドット加工及び集積技術開発・機械学習も活用した材料最適化
 - [2] YIG 非古典相関多ビット動作の実証
 - [3] YIG 超高速最適化及びサンプリング 動作・非線型計算・ゲート情報処理実証
 - [4] スカーミオン集積回路実装
 - [5] システム実装とアプリケーション動作実証

(4) 物質開発と計測研究グループ(東北大学)

- ① 主たる共同研究者 齊藤 英治 (東北大学 材料科学高等研究所 主任研究者)
- ② 研究項目
 - [1] YIG ドット加工及び集積技術開発・機械学習も活用した材料最適化
 - [2] 理論構築・性能評価

(5) 集積デバイス応用グループ(大阪大学)

- ① 主たる共同研究者: 鈴木 義茂 (大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授)

② 研究項目

- [1] スカームイオン集積技術開発
- [2] スカームイオンおよび磁気ナノ構造を用いた古典集積回路の実装と非古典物理現象の開拓
- [3] スカームイオン集積回路実装

【代表的な原著論文情報】

- 1) "Magnetization State Tomography", Tomosato Hioki, Hiroki Shimizu, Takahiko Makiuchi, and Eiji Saitoh, *Physical Review B*, **104**, L100419 (2021). (査読有)
- 2) "Numerical study on magnetic parametron under perpendicular excitation", Hiroki Shimizu, Tomosato Hioki, and Eiji Saitoh, *Applied Physics Letters*, **120**, 012402 (2022). (査読有)
- 3) "Effect of random fluctuations on minimizing the complexity of universal asynchronous cellular automata", L.-J. Fei, J. Lee, X. Huang, F. Peper, *Physica D* 428, 133052 (2021). (査読有)
- 4) "Asynchronous communicating cellular automata: Formalization, robustness and equivalence", Q. Lei, T. Li, J. Lee, W.-L. Xu, F. Peper, *Information Sciences* 587, 335-353 (2022). (査読有)
- 5) "Implementation of skyrmion cellular automaton using Brownian motion and magnetic dipole interaction", Ryo Ishikawa, Minori Goto, Hikaru Nomura, and Yoshishige. Suzuki, , *Applied Physics Letters*, 119, 072402 (2021), (査読有)