

先端国際共同研究推進事業
2023 年度採択
「Top 研究者/Top チームのための ASPIRE」
半導体分野

2023 年度～2024 年度
年次報告書（公開版）

研究課題名 スピントロニクス確率論的コンピュータの大規模集積化に向
けた基盤構築と『確率超越性』の実証

日本側研究代表者 深見 俊輔 東北大学 教授

相手側研究代表者 Kerem Camsari, Associate Professor, UC Santa
Barbara

研究期間 2024 年 2 月 1 日～2029 年 3 月 31 日

1. 研究成果の概要

① 研究構想にかかる成果

<実施したこと>

材料・素子研究、回路・アルゴリズム研究、CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor、相補型金属酸化膜半導体）集積技術構築のそれぞれについて、米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校の研究者らと連携しながら研究を実施した。

材料・素子研究については、様々な構造の超常磁性磁気トンネル接合（sMTJ）を作製して、時間領域での熱ゆらぎによる磁化反転の測定、磁場やバイアス電圧に対する磁化の応答の時間平均特性の測定、およびそれらの温度依存性、素子サイズ依存性の測定などを行い、大規模高性能確率論的コンピュータの実現に向けた基盤的理解の構築を進めた。

回路・アルゴリズム研究については、磁気トンネル接合からなる確率ビットと CMOS 回路で構成される疑似乱数生成回路を組み合わせたヘテロジニアス型確率論的コンピュータの動作実証や、バイナリ乱数を出力する確率ビットを組み合わせてガウス乱数を生成するガウシアン確率ビットの実現のための回路技術の構築と、それを用いた組合せ最適化の動作実証などを行った。

<得られた成果>

材料・素子研究で得られた 3 つの成果を以下に述べる。

- ・ 超常磁性磁気トンネル接合（sMTJ）の時間領域特性（磁化緩和時間）と時間平均特性（外部磁場応答特性）を室温から 120℃までで評価し、これらの特性の温度依存性を決める物理的機構を明らかにした（H. Kaneko et al., Appl. Phys. Express, 17, 053001, 2024）。
- ・ 従来の超常磁性磁気トンネル接合（sMTJ）が、磁化方向が固定された強磁性層（固定層）と磁化方向が熱によって自由にゆらぐように設計された強磁性層（フリー層）から構成されていたのに対し、いずれの強磁性層の磁化も熱によって自由にゆらぐように設計された「ダブルフリー層構造超常磁性磁気トンネル接合」を作製してその基本動作を確認した（R. Ota et al., Appl. Phys. Lett., 125, 022406, 2024）。
- ・ 上述の研究で得られた知見をもとに、さらに優れた特性が得られると期待される、2 つのフリー層が人工反強磁性（SAF）結合構造を有した「ダブル SAF フリー層構造 sMTJ」の動作特性の数値計算を行い、期待される優れた特性が得られることを計算結果として確認した（K. Selcuk et al., Phys. Rev. Appl. 21, 054002, 2024）。

次に回路・アルゴリズム研究で得られた 2 つの成果を以下に述べる。

- ・ 超常磁性磁気トンネル接合(sMTJ)からなる確率ビットが生成する自然乱数で CMOS 回路によって構成される疑似乱数生成回路を駆動するヘテロジニアス型の確率論的コンピューティングの原理実証を行った。この構造は CMOS 疑似乱数生成回路を用いることから、sMTJ からなる確率ビットのみで構成される場合と比べて消費電力や回路面積は大きくなるが、少数の sMTJ で実現可能であるため製造容易性が高いという利点がある（N. Singh, K. Kobayashi et al., Nat. Comm., 15, 2685, 2024）。
- ・ 生成 AI における拡散モデルで多用されるガウス乱数を出力するガウシアン確率ビットを超常磁性磁気トンネル接合（sMTJ）からなるバイナリ確率ビットを組み合わせて作製し、連続変数を用いた組合せ最適化などの原理実証を行った（N. Singh et al., IEEE IEDM, 22-6, 2024）。

② 国際ネットワーク構築・拡大／国際頭脳循環の促進に資する若手研究者の人材育成に関する成果

<実施したこと>

国際ネットワークの構築・拡大に向け、以下の 4 件の会議をいずれも東北大学にて実施した。

- ・ Japanese–Polish Emerging Perspective Workshop – Toward the Quantum Computing（2024/10/3-4 開催、参加者数 39 名）

- ・ CRCGP-MSSP 2024 (The 8th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics and the 7th Symposium on International Joint Graduate Programs in Materials Science and Spintronics) (2024/11/18-21 開催、参加者数 334 名)
- ・ SpinX 2024 : Harnessing Spintronics for Tomorrow's Technology (2024/12/9-10、参加者数 : 41 名)
- ・ The Future of Computing: Perspectives (2025/2/25-28 開催、参加者数 246 名※うちオンライン 92 名)

上記に加えて、国際頭脳循環の促進に資する若手研究者の人材育成を目的とし、共同研究のための海外機関への学生の派遣、海外研究機関からの学生の受入れなどを実施した。ドイツのドルトムント工科大学、チェコのチェコ科学アカデミー、スウェーデンのヨーテボリ大学に学生を派遣して数か月滞在させ、またドイツのマインツ大学、フランスのロレーヌ大学から学生を数か月間受け入れた。加えて、研究打ち合わせや国際会議参加のために学生、若手研究者を派遣した。海外派遣した学生、若手研究者の合計は 21 名、日数は延べ 521 日であった。

<得られた成果>

国際会議の開催によって、世界トップ研究者との研究動向に関する情報交換や今後の研究の方向性に関して議論する場、および学生や若手研究者と世界トップ研究者が交流する機会を提供することができた。また、学生の海外派遣および海外からの学生の受入れを通し、学生や若手研究者に対して、将来我が国の国際頭脳循環を促進するための素養を獲得する機会を提供することができた。

2. 研究実施体制

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
研究テーマ1	深見俊輔 Kerem Camsari	東北大学・電気通信研究所・教授 UC Santa Barbara・Department of Electrical and Computer Engineering・准教授

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

<原著論文>

- [1] N. S. Singh, K. Kobayashi, Q. Cao, K. Selcuk, T. Hu, S. Niazi, N. A. Aadit, S. Kanai, H. Ohno, S. Fukami, and K. Y. Camsari, "CMOS plus stochastic nanomagnets enabling heterogeneous computers for probabilistic inference and learning," Nature Communications 15, 2685(1)-(9) (2024). doi:10.1038/s41467-024-46645-6
- [2] R. Ota, K. Kobayashi, K. Hayakawa, S. Kanai, K. Y. Çamsarı, H. Ohno, and S. Fukami, "Voltage-insensitive stochastic magnetic tunnel junctions with double free layers," Applied Physics Letters 125, 022406(1)-(6) (2024). doi:10.1063/5.0219606

<学会発表>

- [1] N. S. Singh, C. Delacour, S. Niazi, K. Selcuk, D. Golenchenko, H. Kaneko, S. Kanai, H. Ohno, S. Fukami and K. Y. Camsari, "Beyond Ising: Mixed Continuous Optimization with Gaussian Probabilistic Bits using Stochastic MTJs," (oral) 70th Annual IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM 2024), San Francisco, USA, 2024/12/07-2024/12/11.

<プレスリリース>

- [1] "製造容易性に優れた確率論的コンピュータを開発～半導体とスピントロニクスを組み合わせる超省エネ AI 計算～"、2024/03/27
- [2] 【プレスリリース】 "生成 AI をスピントロニクスで省エネにーガウス乱数を出力する「ガウシアン確率ビット」を実現"、2024/12/11