

佐藤 茂雄

東北大学電気通信研究所  
教授

## スピネッジコンピューティングハードウェア基盤

### § 1. 研究成果の概要

スピネッジコンピューティングハードウェア基盤の構築のために、3 つのグループすなわちスピネッジコンピューティングハードウェア基盤(佐藤グループ)、スピネッジコンピューティング向け革新的アーキテクチャ(羽生グループ)、スピネッジコンピューティング向け材料デバイス技術(深見グループ)の協調により研究を進めている。今年度は材料・デバイス、回路、アーキテクチャそれぞれの階層で要素技術の開発を中心に研究を行った。各グループの研究成果は次の通りである。

#### 佐藤グループ

ディープニューラルネットワーク基本要素回路については、不揮発素子を活用した二値化ニューラルネットワーク向け積和演算回路の検討を行った。結合荷重を保持する記憶部と XNOR 演算部とを一体化した構造を採用するとともに、電流モード線形加算に基づく回路方式とその高信頼動作を保証するための不揮発素子ベース補正回路技術を適用することにより、省エネルギー化および省面積化を可能にした。

低消費電力アナログニューロン回路については、多様な神経活動を再現しうるニューロンモデルとして知られる Izhikevich モデルをアナログ CMOS 回路により構成した。電源電圧 0.3 V における動作を数値シミュレーションによって検証し、消費電力 50 nW 程度で良好に動作することを確認した。

#### 羽生グループ

デジタルスピネッジ演算回路については、大規模 AI ハードウェアの実現へ向けた、不揮発 FPGA の自動設計環境の整備を行った。このツールでは、ユーザが Verilog-HDL 形式で演算回路を設計すると、それに対応する FPGA コンフィグレーション情報を自動的に生成する。この設計ツール構

築により、エッジ AI ハードウェアに適する様々なアーキテクチャについて、自動的に回路構成が生成できることとなり、最適なアーキテクチャの探索に有益な成果である。

確率論的スピン演算回路については、大規模スピン演算回路時の動作検証を指向した CMOS 回路実現のための基本回路(ノード回路)について着手した。

#### 深見グループ

アナログスピン演算回路向け材料・デバイス技術については、デバイスの高性能・低消費電力化のための材料学的理解の確立、及びニューラルネットワークへの適用に向けた数理モデルの構築などに取り組んだ。研究期間以前にニューロンやシナプスのダイナミクスと類似する動作が確認されていた反強磁性/強磁性積層構造からなるデバイスをより低電流で駆動することを目的とし、反強磁性層の膜厚や合金組成とデバイス特性の関係に着目した実験を進めた。反強磁性層を流れる電流が誘起するスピントルクの起源などに関して、デバイス動作の向上に向けた重要な材料学的知見が得られた。またニューロンデバイス、シナプスデバイスの動作機構に関する物理的な理解をもとにその動作を再現し得る数理モデルを構築し、実験結果との一致を確認した。これは今後のニューラルネットワーク回路の構築に向けた重要な一歩である。

確率論的スピン演算回路向け材料・デバイス技術については、主にはスピンドバイスの確率的振る舞いに関する理解の深化、及び性能の向上に着手した。

#### **【代表的な原著論文】**

1. R. Itoh, Y. Takeuchi, S. DuttaGupta, S. Fukami, and H. Ohno, “Stack structure and temperature dependence of spin-orbit torques in heterostructures with antiferromagnetic PtMn,” Applied Physics Letters, vol. 115, 242404 (4 pages), 2019.

## § 2. 研究実施体制

### (1) 佐藤グループ

- ① 研究代表者: 佐藤 茂雄 (東北大学電気通信研究所 教授)
- ② 研究項目
  - ・ディープニューラルネットワーク(DNN)基本要素回路
  - ・低消費電力アナログニューロン回路

### (2) 羽生グループ

- ① 主たる共同研究者: 羽生 貴弘 (東北大学電気通信研究所 教授)
- ② 研究項目
  - ・デジタルスピン/アナログスピン演算回路向けエッジ AI アーキテクチャの開発
  - ・確率論的スピン演算回路向けエッジ AI アーキテクチャの開発

### (3) 深見グループ

- ① 主たる共同研究者: 深見 俊輔 (東北大学電気通信研究所 教授)
- ② 研究項目
  - ・アナログスピン演算回路向けニューロン素子、シナプス素子
  - ・確率論的スピン演算回路向けスピン素子