

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「Society 5.0 を支える革新的
コンピューティング技術」
研究課題「スパイキングネットによるエッジでの
リアルタイム学習基盤」

研究終了報告書

研究期間 2019年10月～2025年03月

研究代表者：井上 公
(産業技術総合研究所 電子光基礎技
術研究部門 上級主任研究員)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究の目標は「人に寄り添うデバイス」の基盤技術開発であり、ミリ秒から数秒にも及ぶ極端に長い時間スケールの時系列データを扱う「スローエレクトロニクス」の探求です。時定数の長い神経模倣素子を、機能性物質やアナログCMOS回路を使って開発し、マルチノードのリザバーというSNNでリアルタイム学習と推論を行います。我々は、「素子や回路側から出来るものを作り多くの技術者や研究者を巻き込んでアプリと社会課題を考える」というボトムアップ的研究を行うことを目標にしました。実際そのように研究を展開し、手持ちの素子や技術でまずは動くシステムを作ってコンセプト実証に成功しました。本チームは、ニューロモルフィック素子などのエレメント研究、リザバー計算の学習や推論そしてアトラクタ抽出などのアルゴリズム研究、さらにはSNN回路への実装に関するアーキテクチャ研究まで、5つのグループから構成されます。

以下にグループの特色の出た活動を箇条書きで要約します。特筆すべきは、多くの分野の異なる専門家が緊密に連携し、グループの垣根を超えた研究を行ったということです。分野横断研究は予想外の展開に繋がり、そのおかげで非常に幅広い成果が得られました。

井上グループ:

二層ゲート絶縁膜を用いたSrTiO₃のFETで、コンデンサなしで非常に長い時定数(～1秒)のリーコ積分動作ができるニューロンを開発。酸素欠損のドリフト拡散によるメカニズムを解明。有限要素法による数値解析で素子パラメータを抽出。素子パラメータを用いてSNNのリザバー回路をシミュレーション。筆跡の異常検知に成功。消費電力の評価と将来性を検証。機能性物質を用いた低消費電力エッジデバイス開発の道筋を明確化。

飯塚グループ:

CMOSアナログ回路による voltage controlled oscillator (VCO)を用いて、電圧変化を周波数変化に置き換えて動作する人工ニューロンとシナプスを作製。時間軸上での自由度を生かした、より生体の神経系に近いリザバー回路の設計に成功。これらを集積化したASICを試作。それを用いて時系列データのFORCE学習に成功。機能性素子とCMOS回路の融合により、消費電力を削減するための具体的な設計指針を提示。

藤原グループ:

リザバー計算の理論モデルの検討。時系列データのリアルタイム学習と異常検知の概念実証。マハラノビス距離を用いた異常検知の手法の開発に成功。SNN回路の設計指針を提唱。フィードバック付きリザバーによるFORCE学習でアトラクタを可視化する初期的試みに成功。スローエレクトロニクス研究の広汎なリポジトリを作成しGitHubで公開。

堀田グループ:

長い時定数のニューロンをFPGAでエミュレート。「人に寄り添う」デバイスという本研究のコンセプトの実証のために、筆跡異常検知のリアルタイムでのデモに成功。「人に寄り添う」デバイスの実用化のパイロット検証として、筆跡の時系列データと、ペンを持たない側の手の「無意識な動作の加速度の時系列データを共に用いる異常検知に挑戦。本人にも認知できない癖を読み取り本人認証するエッジデバイスの実用化可能性を開拓。

矢嶋グループ:

水素吸蔵合金と酸化物を用いた電子-プロトン素子を設計。これを用いて、非常に時定数の長い(～100秒)ニューロモルフィック素子の開発に成功。素子パラメータを抽出し、シミュレーションによるSNNのリザバー回路を構築。血糖値変化の異常検知(ホメオスタシスからのズレの検知)を事前予告できることを実証。消費電力の定量評価に成功。将来の生体反応モニタリングデバイスへの応用を提唱。

(2)顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. H. Inoue, H. Tamura, A. Kitoh, X. Chen, Z. Byambadorj, T. Yajima, Y. Hotta, T. Iizuka, G. Tanaka, I. H. Inoue, *Taming prolonged ionic drift-diffusion dynamics for brain-inspired computation*. Advanced Materials **37**, 2407326 (2025).

概要: チタン酸ストロンチウムSrTiO₃を用いて、長い時間スケールでリーク積分動作するトランジスタを開発。動作メカニズムが、酸素欠損イオンの電界ドリフトと熱拡散現象であることを解明。素子パラメータを抽出して、リザバー回路をシミュレーション。筆跡の異常検知の実証実験に成功しました。本CRESTチームの機能性素子研究の総まとめ的論文です。物性物理学においてはトップクラスのQ1ジャーナルに採択されました。

2. G. Tanaka, T. Matsumori, H. Yoshida, K. Aihara, *Reservoir computing with diverse timescales for prediction of multiscale dynamics*. Physical Review Research **4**, L032014 (2022).

概要: 機械学習を動的システムのモデルの補助として利用し、異種のリーク積分ニューロンを用いた多様な時間スケールのリザバー計算モデルを提案しました。4つのカオス的な速-遅ダイナミクスに関する2つの時系列予測タスクで評価した結果、標準モデルよりも優れ、特に長期予測で性能向上を確認しました。この研究は本CRESTプロジェクトの時系列予測タスクの基盤となる理論です。

3. S. P. Pati, T. Yajima, *Review of solid-state proton devices for neuromorphic information processing*. Japanese Journal of Applied Physics **63**, 030801 (2023).

概要: プロトンを用いた固体スイッチングデバイスについて、先行研究を網羅的にまとめ、プロトンを用いた情報処理に向けた現状の課題を浮き彫りにしました。固体材料中のプロトン挙動については、近年基礎研究レベルで議論が広がっており、それをいち早く情報処理デバイスに応用できることを示した本研究は革新的で非常に重要な成果です。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. X. Chen, Z. Byambadorj, T. Yajima, H. Inoue, I. H. Inoue and T. Iizuka, *CMOS-based area-and-power-efficient neuron and synapse circuits for time-domain analog spiking neural networks*. Applied Physics Letters **122**, 074102 (2023).

概要: 低電圧で動作する先端集積回路上に、パルスの周期や幅を用いた新たな回路方式で効率的なスパイキングニューラルネットワークを構築し、試作・実証しました。また、生物の活動に近いミリ秒時定数を持つニューロンやシナプス回路を実装し、レザバー計算機としての妥当性も確認しました。ヒューマン-コンピュータインタラクション応用に向けた重要なマイルストーンとなる論文です。

2. Z. Li, Y. Liu, and G. Tanaka, *Multi-Reservoir Echo State Networks with Hodrick-Prescott Filter for Nonlinear Time-Series Prediction*. Applied Soft Computing **135**, 110021 (2023).

概要: Hodrick-Prescottフィルタを用いて信号を分解し、分解された各時系列データに対してリザバー計算モデルを適用するマルチリザバー計算モデルを提案しました。このモデルにより、複雑な時系列データに対して従来手法を超える高精度な予測が可能となりました。また、並列学習が可能な設計により、学習時間を増やすことなく高性能な予測を達成する効率的な手法もあります。本CRESTプロジェクトの応用展開に大きく寄与する重要な成果です。

3. N. Kimura, C. Duran, Z. Byambadorj, R. Nakane, and T. Iizuka, *Hardware-Friendly Implementation of Physical Reservoir Computing with CMOS-based Time-domain Analog Spiking Neurons*. Neuromorphic Comput. Eng. doi: 10.1088/2634-4386/addb6d

概要：低電圧で動作する先端集積回路上で効率的なスパイキングニューラルネットワークを構築するため、新たな回路方式を提案し、2次元平面上にField programmableなネットワークとして実装しました。また、レザバー計算機としての性能をシミュレーションと実測で確認し、カスタマイズ可能なニューロン素子を用いた計算性能の関係性をCMOS集積回路上で実証しました。これは分野の革新に貢献する重要な成果です。

<代表的な論文>

1. H. Tamura, K. Fujiwara, K. Aihara, G. Tanaka, Mahalanobis distance of reservoir states for online time-series anomaly detection.

投稿中 (TechRxiv doi: 10.36227/techrxiv.22678774.v1)

概要：時系列データの異常検知は限られた計算資源や少ない学習データでリアルタイムに評価する必要がある場合に課題が生じます。レザバーコンピューティングモデルは、計算コストと精度のトレードオフを解決する手段として有望です。本論文はマハラノビス距離をリザバー計算に用いるという画期的なアイデアを提唱し、予測誤差に基づく従来の方法よりも優れた精度で異常検出できることを示しました。本CREST研究の礎となる成果です。

2. S. P. Pati, Y. Geng, S. Hamasuna, K. Fujiwara, T. Izuka, H. Inoue, I. Inoue, T. Yajima, *Real-time information processing via volatile resistance change in scalable protonic devices*. Commun. Mater. **5**, 1 (2024).

概要：プロトンを用いて微細化可能なアナログ時定数デバイスを実験的に作製し、それを用いたエッジ学習・推論用のアナログ回路システムで血糖値予測タスクを実現できることをシミュレーションで示しました。プロトンを用いたアナログ時定数デバイスの報告は本件が世界初であり、さらに情報処理システムへの応用まで含めて一貫して示した本論文は、まさにこの分野のマイルストーンになります。

3. K. Koyama, H. Ando, K. Fujiwara, *Functional improvement in β cell models of type 2 diabetes using on-demand feedback control*. AIP Advances **13**, 045317 (2023).

概要：本研究では、臍 β 細胞の数理モデルを用いて、カオス制御によるエネルギー効率の良い電気刺激制御を検討しました。シミュレーションにより、フィードバック機構による制御と効果的な入力タイミングが確認され、カオス制御がインスリン分泌改善と2型糖尿病治療に寄与する可能性を示唆しました。本CREST研究の生体応用への方向性を示す重要な成果です。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「井上」グループ

研究代表者：井上 公 ((国研)産業技術総合研究所 電子光基礎技術研究部門／筑波大学 大学院 数理物質系、上級主任研究員／教授)

研究項目

- ・素子開発(SrTiO_3 人工ニューロン素子の作製、 SrTiO_3 人工シナプス素子の作製)
- ・素子の動作原理解明(SrTiO_3 人工ニューロン素子動作原理解明、 SrTiO_3 人工シナプス素子動作原理解明)
- ・要素回路の動作検証(人工ニューロン素子モデル構築、人工ニューロン素子動作模擬ASIC回路の設計、人工シナプス素子モデル構築、人工シナプス素子動作模擬ASIC回路の設計、リザバー動作の計算機シミュレーション、リザバー動作のFPGAによるエミュレーション)
- ・回路設計とシミュレーションと試作(筆跡の異常検知装置を想定した回路設計、筆跡の異常検知装置回路シミュレーション、筆跡の異常検知装置回路試作、本人認証装置回路設計、本人認証装置回路シミュレーション、本人認証装置回路試作)

②「飯塚」グループ

主たる共同研究者:飯塚 哲也 (東京大学大学院 工学系研究科、准教授)

研究項目

- ・要素回路の動作検証(人工ニューロン素子モデル構築、人工ニューロン素子動作模擬ASIC回路の設計、人工シナップス素子モデル構築、人工シナップス素子動作模擬ASIC回路の設計)

- ・回路設計とシミュレーションと試作(筆跡の異常検知装置を想定した回路設計、筆跡の異常検知装置回路シミュレーション、筆跡の異常検知装置回路試作、本人認証装置回路設計、本人認証装置回路シミュレーション、本人認証装置回路試作)

③「藤原」グループ

主たる共同研究者:藤原 寛太郎 (東京大学 国際高等研究所ニューロインテリジェンス国際研究機構、特任准教授)

研究項目

- ・要素回路の動作検証(リザバーの数学的モデル構築、リザバー動作の計算機シミュレーション)

- ・アトラクタ解析と設計(アトラクタ解析の数学的モデル構築、スペイク信号に対するアトラクタの設計、ノイズに対するアトラクタシステムの設計)

- ・回路設計とシミュレーションと試作(筆跡の異常検知装置を想定した回路設計、筆跡の異常検知装置回路シミュレーション、本人認証装置回路設計、本人認証装置回路シミュレーション)

④「堀田」グループ

主たる共同研究者:堀田 育志 (兵庫県立大学大学院 工学研究科、教授)

研究項目

- ・要素回路の動作検証(リザバー動作のFPGAによるエミュレーション)

- ・アトラクタ解析と設計(ノイズに対するアトラクタシステムの設計、ノイズによるアトラクタ切替制御の開発)

- ・回路設計とシミュレーションと試作(筆跡の異常検知装置を想定した回路設計、筆跡の異常検知装置回路シミュレーション、筆跡の異常検知装置回路試作、本人認証装置回路設計、本人認証装置回路シミュレーション、本人認証装置回路試作)

⑤「矢嶋」グループ

主たる共同研究者:矢嶋 趟彬 (九州大学大学院 システム情報科学研究院、准教授)

研究項目

- ・素子開発(WO_3 ニューロモルフィック素子の開発)

- ・素子の動作原理解明(WO_3 ニューロモルフィック素子動作原理解明)

- ・要素回路の動作検証(人工ニューロン素子モデル構築、人工ニューロン素子動作模擬ASIC回路の設計、人工シナップス素子モデル構築、人工シナップス素子動作模擬ASIC回路の設計)

- ・回路設計とシミュレーションと試作(筆跡の異常検知装置を想定した回路設計、本人認証装置回路設計)

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本CRESTの活動期間の大半とコロナ禍が重なってしまったのは非常に不運でしたが、2023年度に入つて徐々に渡航許可が降りるようになってからは、コロナの間、訪問交流が途絶えてしまっていた国内外の共同研究者との相互訪問を徐々に再開しました。ニューロモルフィック素子/回路の共同研究を行つてゐるソウルの漢陽大学、パリのサクレー大学とCNRS-Thales研究所、およびハイファのイスラエル工科大学(Technion)との人的交流がコロナ禍で中断したままの状況でしたので、それらを速やかに再開し、そこを起点として人的交流のネットワークを広げていく予定にしていましたが、最終年度によつやくサクレー大学とThales研究所と漢陽大学を訪問して共同研究を再開できました。しかしTechnionはイスラエルの戦争の影響で渡航だけでなく産総研では共同研究さえも許可されなくなりましたので、しばらくは難しい状況です。これまでに、二

部上場企業から詳しく話を聞かせてもらいたいとの問い合わせが数件ありました。我々の研究は成果が出るまでに時間のかかる基礎研究なのですが、それでも興味を持ってくれるような企業があるというのは大変に心強いことです。すぐに具体的な共同研究を開始できるような段階ではありませんが、成果発表を続けることで注目を維持し、今後の発展にとっての有益な情報交換の場をさらに広げたいと考えています。