

研究終了報告書

「立体配線型メモリ素子による高実装効率な CNN アクセラレータの創出」

研究期間： 2021 年 10 月～ 2024 年 3 月

研究者： 萩原 成基

1. 研究のねらい

近年の深層学習モデルは大規模複雑化の一途を辿っており、逐次処理方式を採用している従来のコンピュータでは度重なるメモリアクセスに伴う処理時間や消費電力の増加が顕在化しつつある。そのため、効率よく深層学習処理を実行可能なハードウェアの開発が急務であるといえる。例えば近年では、抵抗値を連続的・可逆的に書き込み可能な抵抗変化メモリ素子をシナプス素子として用いたアナログニューラルネットワーク (NN) 演算回路が、人工知能アクセラレータとして精力的に研究されている。ワード線とビット線の各交点がシナプス素子として機能するクロスバー構造はその典型であり、各素子が結合重みの役割を担うことで NN の並列積和演算を省電力かつ高速に実行できる。本構造は既存の集積化技術を用いて高集積に作製でき、深層学習モデルの基本形である全結合型 NN モデルを容易に実装できることから広く用いられている。

一方、画像認識等に広く応用されている畳み込み NN (CNN) に代表されるような、近傍結合を有するモデルをクロスバー構造で実装する場合、学習に関与しない不使用シナプス素子が大量に生じてしまう (使用率は一般的に数~70 %程度) ため実装効率が上がらず、それに伴う消費電力と処理速度の増大、チップ面積の大規模化が大きなボトルネックになっている。そこで本研究では、クロスバー構造に代わって効率良く近傍結合型モデルを実装可能な新規回路アーキテクチャを提案する。電極間抵抗値の変化を誘起する導電性フィラメントを立体的に自由配線することで、CNN における畳み込みフィルタのような近傍結合を物理的に再現し、近傍結合型モデルの物理実装を試みる。

電極間の立体配線材料として、モノマー前駆体溶液中での電解重合成長によって得られる導電性ポリマー細線に本研究では着目する。自己ドーピングにより高導電性を示す導電性ポリマーとして知られる PEDOT:PSS が、矩形波交流電圧印加によって液中で細線状に成長する現象に着目し、これを立体空間上の任意の電極間を電氣的に配線するための材料として応用できないか検討する。また、導電性ポリマーとしての物性を利用することで、配線した電極間の抵抗値を書き込んだり、機械学習に利用可能な信号処理へ応用したりできないか検討する。

2. 研究成果

(1) 概要

電解研磨法を用いて作製した Au 探針を上部電極として、Au スタッドバンプを下部電極として用いた立体ポリマー配線システムを構築した。先端位置が基板表面から 100 μm の高さに固定された上部電極と、3 つの下部電極を同一の前駆体溶液の中に浸し、電極間へ重合電位差を印加したところ、導電性ポリマー細線が成長して上部-下部電極間を立体的に配線する様子が初めて観測された。また、配線する細線の本数を制御することで、各上部-下部電極間コンダクタンスをそれぞれ目標値へと高精度に制御することに成功した。このことは、本立体配線システムが CNN における畳み込みフィルタの学習を物理実装し得ることを示している。構築した立体配線システム上での簡単な機械学習として、ヘブ型連想記憶学習の実装を試みた。電極間へ配線する細線の本数を制御することで、ネットワークに連想記憶を付

与することに成功した。また、立体配線後の電極へ電圧スパイクを印加することで、実際の脳内で見られる側抑制的なシナプス強度変化に対応するコンダクタンス変化を誘起することに成功し、Winner-take all 型情報処理に代表されるような生理学的にも妥当な情報処理への応用可能性が示唆された。

電極間コンダクタンスを制御してボトムアップ的に情報処理回路を構築する以上のアプローチに加え、本研究では 3 次元的に形成されたランダムポリマーネットワークを脳型情報処理に応用するトップダウン的なアプローチを試みた。モノマー前駆体溶液を染み込ませたクライオゲル中で、挿入された白金線間へ重合電圧を印加することで、3 次元的なポリマーファイバーネットワークが形成された。生理食塩水をゲルに染み込ませ、電圧信号を本ネットワークへ入力すると、ゲート効果による非線形な応答が得られることが明らかとなった。これはゲル中の本ポリマーネットワークが、CNN における特徴抽出のように入力信号を高次元の特徴空間へマッピングできることを表しており、AI 処理のアクセラレータとして機能する可能性を示唆している。物理リザバーコンピューティングの枠組みを用いてこれを時系列データ予測タスクに適用したところ、教師信号として与えたカオス時系列データを高精度で予測できることが明らかとなった。ポリマーネットワークの 3 次元的なモルフォロジーがもたらしたこれらの成果は、実際の脳のように高密度で配線された脳型ウェアブルウェアによる次世代 AI コンピューティングを世にもたらす。

(2) 詳細

I. 立体配線型メモリ素子の開発

導電性ポリマー細線の重合成長には、電極先端における十分な電場強度が必要となる。そこで本研究では、鋭利な先端を有する立体電極を作製し、これを用いたポリマー細線の 3 次元的な重合成長を試みた。上部電極として、電解研磨法を用いて作製した鋭利な先端を有する Au 探針を採用し、マニピュレータを用いてその先端位置を制御した(図 1)。下部電極として函館電子株式会社製 Au スタッドバンプを採用し、これを 3 つほどガラス基板上へ形成した(図 2)。上部電極先端を基板表面から 100 μm の高さに固定し、これらの電極をモノマーとドーパントの混合前駆体溶液中に浸して上部-下部電極間へ重合矩形波交流電位差を印加した。基板表面からの高さ $z = 0, 100 \mu\text{m}$ に焦点を合わせて撮影された、電圧印加を通じて実際に配線されたポリマー細線の光学顕微鏡像を図 3 に示す。上部電極から 3 つの下部電極へ向かって細線が立体的に分岐配線されている様子が分かる。また、読み出した電極間コンダクタンスの値に基づいて重合電圧の印加時間をフィードバック制御することで、各電極間を配線する細線の本数を制御し、各コンダクタンスをそれぞれ独立に目標値へと高精度で制御することに成功した(図 4)。



図 1 上部電極として用いられた Au 探針の光学顕微鏡像及び、先端付近の SEM 像。小さな先端曲率半径を有する探針が電解研磨法により作製された。

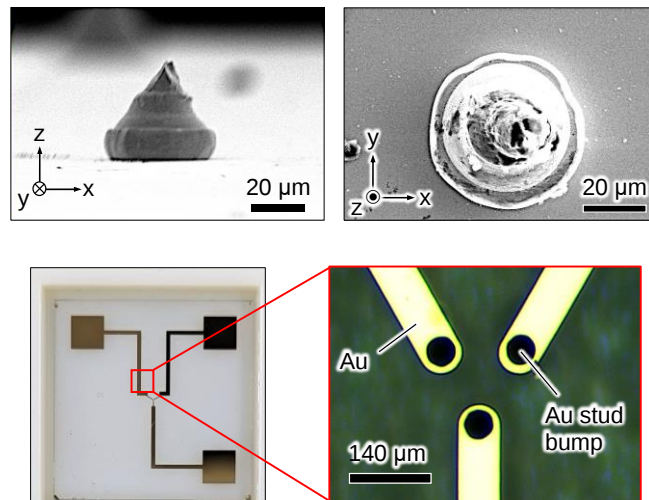


図 2 下部電極として用いられた Au スタッドバンプの SEM 像及び、ガラス基板上へ形成された Au スタッドバンプの光学顕微鏡像。

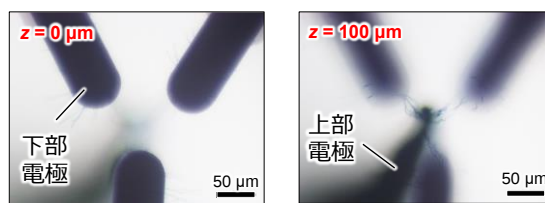


図 3 上部-下部電極間を立体的に配線する導電性ポリマー細線の光顕像。

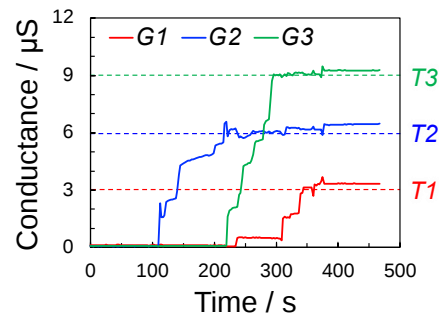


図 4 立体ポリマー配線による上部-下部電極間コンダクタンスの独立制御。

II. 実装回路アーキテクチャの評価

導電性ポリマー細線の立体配線を用いて実現される新たな CNN ベース回路アーキテクチャの有用性を、シミュレーションを通じて評価した。提案アーキテクチャで構成される特徴抽出器をソフトウェア実装される分類器と組み合わせ、手書き数字画像の分類学習に適用した際の分類精度推移をシミュレートした結果を図 5(a)に示す。本結果より、提案特徴抽出器を用いることで分類精度が大きく向上することが明らかとなった。また図 5(b)は、同程度の分類精度を達成可能な全結合型モデルを実装するクロスバー構造と提案回路アーキテクチャの回路占有面積を比較した結果であり、提案特徴抽出器は約 40 分の 1 程度の小さな面積で実装できることを示している。

III. 機械学習アクセラレータとしての実装

研究開始当初の想定では、I.で開発した立体配線型メモリ素子を用いてII.で提案した回路アーキテクチャを実装し、これを用いた機械学習の実装までを研究目的としていた。具体的には、上部電極と下部電極をマイクロ流路デバイス中へ多数作り込み、各電極間への立体ポリマー配線を制御することで CNN による機械学習を物理実装する研究計画

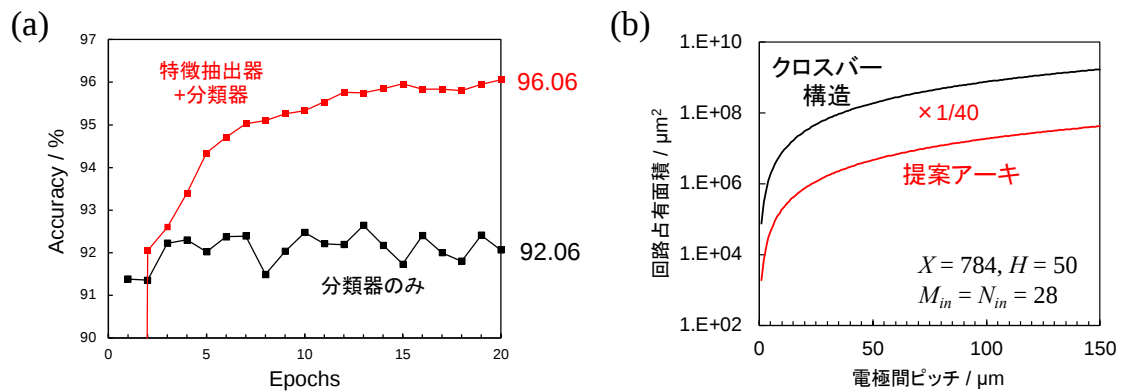


図 5 (a)立体ポリマー配線により実現される提案特徴抽出器を用いた手書き数字画像分類学習のシミュレーション結果。学習を繰り返すことで高い分類精度が得られた。
(b)提案回路アーキテクチャとクロスバー構造の回路占有面積比較。

であった。しかし、多数の上部電極と下部電極が Au スタッドバンプで作り込まれた微細構造を流路中へ形成する技術の確立が本研究の大きな課題であり、今回の ACT-X での研究期間内での実現には至らなかった。また、微小空間内では電極へのモノマーの断続的な供給が難しく、細線が成長しにくいといった課題も見出された。そこで本研究では別のアプローチとして、ゲル中でランダム形成された 3 次元ポリマーファイバーネットワークを用いた機械学習の物理実装を試みた。モノマー前駆体溶液を染み込ませたクライオゲルへ白金線を複数本挿入し、それらの間へ低周波の重合電位差を印加することで、3 次元的なポリマーファイバーネットワークがゲル中に形成された。本ゲルへ生理食塩水を染み込ませ、これを物理リザバーとして応用することで、物理リザバーコンピューティングによる時系列カオスデータの予測を高精度で行うことに成功した。

3. 今後の展開

本研究では、所望の電極間コンダクタンスを有する 3 次元ポリマーネットワークのボトムアップ的な構築と、非線形ダイナミクスを有するランダム 3 次元ポリマーネットワークのトップダウン的な脳型情報処理応用を行なった。

前者では、3 次元空間上の任意の電極間を高い選択性で液中配線し、それらの電極間コンダクタンスを高精度で制御する技術を確立した。本成果はより実際の脳構造に忠実な 3 次元脳型回路アーキテクチャを本分野へもたらし、微細化技術に大きく依存することなく高い面積効率で実装可能な脳型ウェットウェアを世に送り出す。今後の展開としては、より多数の電極が作り込まれた集積チップを作製して CNN ベースの機械学習を物理実装し、実タスクへの応用可能性を模索していく。

後者のトップダウン的なアプローチでは、生理食塩水中での遅延を伴うゲート効果が引き起こす導電性ポリマーの非線形な導電性変化を利用することで、ゲル中に形成された 3 次元ポリマーファイバーネットワークを物理リザバーコンピューティングへ応用した。ベンチマークとして時系列カオスデータ予測を試み、本ネットワークの物理リザバーとしての有用性が示された。今後の展開としては、バイオセンシングへの応用に向けた実タスク実装を積極的に行なっていく。今回構築された物理リザバーは数 Hz ~ 数十 Hz 程度の比較的遅

い入力信号に対して動作する。また、本材料は高い生体適合性やフレキシビリティといった強みも有することから、ドーパミン濃度や血糖値の変化予測といったバイオセンシングへの応用が期待できる。一方で本研究を通じ、ゲルの乾燥に伴う不安定性が課題として残った。今後はゲルの密閉方法やマイクロ流路等を用いた溶液の断続的な供給手法を模索し、安定性の向上性を図ることで、数年以内での社会実装を目指す。

4. 自己評価

当初の研究目的であった立体配線型メモリ素子の実現を達成し、本成果を学術論文やプレスリリース等を通じて世に送り出した。この点において、本研究は概ね良好な達成状況であると考えられる。一方で、当初想定していた本メモリ素子を用いた CNN 実装には本研究期間内では到達できず、いくつかの課題が残る結果となった。

領域アドバイザーと密に連携しながら進めることで、本研究を大きく加速させることができたと感じている。毎月の定例ミーティングを通じ、領域アドバイザーから主に微細加工技術に関する助言や指導を賜うことで、不足していた見聞を補いながら研究を円滑に進めることができた。また、領域内の他研究者達とも領域会議等を通じてコミュニケーションを積極的に取り、相互触発することで研究者ネットワークを形成しながら、本研究をより良いものへと昇華させることができた。

本研究成果の波及効果は大きく、例えば *Advanced Functional Materials* 誌に掲載された成果論文は国内外に発信され、*Nature Communications* 誌の掲載論文に引用されるなど、高い評価を得ている。また、本成果を皮切りに国外の研究機関ともコネクションが形成されつつあり、実際にドレスデン工科大(ドイツ国)との研究グループとは本研究成果を踏まえた共同研究が既に始まっている。これらのコネクションを通じ、今後は本研究をより発展させ、リアル空間を強靱にするハードウェアとしての社会実装にまで昇華させる見込みである。また、本研究成果に関する記事が月刊『子供の科学』に掲載されて教育教材として取り上げられたことから、本研究の独創性や社会的重要性が伺える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3件

1. N. Hagiwara, T. Asai, K. Ando, and M. Akai-Kasaya, "Fabrication and training of 3D conductive polymer networks for neuromorphic wetware," <i>Advanced Functional Materials</i> , vol. 33, pp. 02300903-(10 pages), (2023).
2. N. Hagiwara, T. Asai, and M. Akai-Kasaya, "Multi-synaptic conductance control using conductive polymer wiring," <i>2022 IEEE SNW</i> , pp.1-2, (2022).
3. N. Hagiwara, S. Kan, T. Asai, and M. Akai-Kasaya, "Construction of a neural network using organic materials and ions," <i>The 29th International Workshop on AM-FPD</i> , pp. 86-89, (2022).

(2)特許出願

研究期間全出願件数： 0 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1.プレスリリース「導電性ポリマー立体配線で脳型コンピュータの実現へ一歩 -3次元ポリマーネットワークへの連想記憶の付与にも成功-」.
2. N. Hagiwara N., T. Asai, K. Ando, and M. Akai-Kasaya, “Growth of 3D conductive polymer fiber networks towards neuromorphic wetware,” <i>The 3rd Workshop on Neuromorphic Organic Devices and Systems</i> , Poster-Award for the 3rd place, Sep. 20, 2023.
3. 萩原 成基, 「立体配線型メモリ素子を用いた高実装効率なエッジ向け深層学習アクセラレータの検討」, 第35回回路とシステムワークショップ奨励賞, 2023年2月14日.
4. N. Hagiwara, “3D conductive polymer wiring synapses for neuromorphic wetware,” <i>The 4th International Symposium of Neuromorphic AI Hardware</i> , Student Presentation Award, Dec. 14, 2022.
5. 月刊『子供の科学』, 2023年9月号 記事掲載.