

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03506

研究課題名（和文）人工知能と生体様工学の協働を加速する三次元メモリスタの創出

研究課題名（英文）3D memristive devices for accelerating collaboration between AI and bioengineering

研究代表者

浅井 哲也（Asai, Tetsuya）

北海道大学・情報科学研究所・教授

研究者番号：00312380

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：脳内で無数の神経細胞が織りなす階層的な3次元近傍結合構造に学び、導電性ポリマー細線の複数電極間高次元配線（三次元メモリスタの構築）を試みた。2次元平面及び3次元立体空間上へ複数の電極を液中配置し、これらへ印加する重合電圧を制御することで所望の電極間へのみ選択的に細線を配線する技術確立し、情報処理に必要なネットワークを軸索誘導のごとく一からその場形成し得ることを示した。また、ネットワーク形成後の電極へ外部電圧を印加することでゲート効果による細線の導電性変化が誘起され、電圧スパイク印加に伴う側抑制的な抵抗変化やリザーバ計算等に利用可能な非線形応答が観測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳内情報処理を計算機上でシミュレートする従来のAI研究のアプローチに対し、材料固有の物性を巧みに利用することで人工脳が物理的にエミュレートされた「マテリアル知能」の実現に関する試みが近年数多くなされている。本研究は、マイクロ電極ギャップ間への3次元的なポリマー細線の液中配線を用いた電極間抵抗制御によるシナプス機能模倣を行うものである。細線の配線本数や径、導電性といった物理化学的变化を外部電圧制御によって誘起し、長期増強及び短期可塑性といったシナプス機能を電極間抵抗変化により模倣し得ることを示した。これらの発見は、現代のAIハードウェアの限界を3Dメモリスタで打破できる可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）：In the brain, countless neurons form a hierarchical 3D local connectivity structure. We attempted to create high-dimensional wiring of conductive polymer micro-wires between multiple electrodes (3D memristers). By placing multiple electrodes in a liquid medium on a 2D plane and in 3D space, we established a technique to selectively wire micro-wires only between desired electrode pairs by controlling the applied polymerization voltage. This allowed us to dynamically form networks necessary for information processing, akin to axon guidance. Furthermore, after network formation, applying an external voltage to the electrodes induced changes in micro-wire conductivity due to gate effects. Nonlinear responses, including inhibitory resistance changes associated with voltage spikes and reservoir computing, were observed.

研究分野：集積回路工学

キーワード：メモリスタ 三次元配線 ニューラルネットワーク 導電性ポリマー 人工知能

1. 研究開始当初の背景

近年精力的に研究がなされてきたニューロモルフィックデバイスは、予め作製及び加工がなされたものがチップ上へ作り込まれて AI チップとして出荷されることで、AI 処理のアクセラレータとしての貢献を目指すものが主流であった。一方で、歩留まりの低下やデバイス間での性能ばらつきによる信頼性の低下は大きな課題である。特に、AI 処理に適用した際に十分な性能が得られるケースは少なく、ソフトウェアによるシミュレーション結果よりも性能が劣化してしまうのが一般的である。例えば、不揮発性アナログ抵抗変化メモリシナプスを用いて重み行列が物理実装された ANN は、素子の非理想的な書き込み特性や歩留まりに性能が大きく左右されることが指摘されている。また、近年多数報告されている物理リザバーは選択する物理系のダイナミクスに依存して性能が決まるため、偶発形成されたランダム分子ネットワークを物理リザバーとして用いる場合、所望のダイナミクスを内部に持つ試料の作製が大きな課題となる。適用するタスクによって要求されるリザバー特性が異なるため、試料の内部構造を適用タスクに応じて後天的に制御できることが望まれる。

研究開始当初は、マテリアル知能の実現に向けたアプローチが ANN の物理実装に限定されており、その有用性が工学的な観点に留まっていた。脳神経系の情報処理をモデル化した ANN はこれまで、工学的な目的を達成するために独自の発展を遂げ、今や実際の脳とは大きく乖離した複雑なモデルへと進化を遂げた。ところがそういった複雑なモデルを脳型ハードウェアとして実装することは依然として困難であり、多層パーセプトロンやリザバーコンピューティングといった比較的シンプルなモデルの実装に留まっている。それらはいずれも実タスク応用を前提としており、AI 処理の高速化や省電力化といった工学的な目的に根ざしている。理学的な立場から研究がなされているものとして、ニューロンのスパイク発火イベントに基づいて処理を行うスパイクニューラルネットワークモデルの物理実装に関する研究が挙げられるが、SNN のモデル自体が未だ発展途上であり、またスパイク発火ベースの情報処理の有用性は依然として懐疑的である。

2. 研究の目的

本研究では、脳の形態(モルフォロジー)に学んでマテリアル知能の実験的な創出を目指すアプローチを図った。脳の形態に学ぶアプローチとして、軸索誘導のごとく液中でファイバー状にその場合成長可能な導電性ポリマーを用いた 3 次元脳型情報処理ネットワーク回路の実験的構築を試みた。これは分子ネットワークを偶発的に形成するのではなく、目的とする情報処理に必要なとされるネットワーク回路を分子材料のその場合成長を通じてボトムアップ的に獲得する点において既存の類似研究と一線を画す。有機材料特有の物理的なフレキシビリティに加え、脳のごとく知覚や学習を行いながら周囲の環境へ柔軟に適応できる柔らかなマテリアル知能の実現可能性を見出すことを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 電極作製及び分岐ポリマー配線の制御法の確立

ガラス基板上へ成膜された同一溶液中の複数電極間へ導電性ポリマー細線を分岐的に配線する技術の確立及び、これを応用した複数電極間の同時コンダクタンス制御を試みた。

(2) 電圧スパイク印加に伴う相対コンダクタンスの制御法の確立

先行研究[1]では、導電性ポリマー細線の分岐配線本数制御による複数電極間コンダクタンス比の制御に成功している。そこで本研究では、電圧スパイク印加による細線の局所的径増加を利用することで、分岐配線後における電極間のコンダクタンスを後天的に制御できないか新たに検討した。

(3) 入力層と畳み込み層の電極位置関係依存性の調査

ネットワークが潜在的に有する学習性能は結合重みの位置や数に大きく依存する。3D メモリにおいては入力層と畳み込み層の電極ノード同士の位置関係によって取りうる結合重み位置や数が決定付けられるため、特徴抽出器の性能を最大限に引き出すためには電極ノード配置の最適化が鍵を握る。そこで本節では 3D メモリにおける電極ノード配置の違いが特徴抽出器の性能へ与える影響について、局所結合畳み込みオートエンコーダ (Locally-Connected Convolutional Autoencoder: LCC-AE) と呼ばれる特徴抽出モデルを用いて評価した。

(4) 電極ノード配置パターン依存性の調査

電極ノードの配置パターンについて検討した。(3) では入力層電極ノードを正方格子状に並べたが、その他のパターンとして三角格子状や六角格子状といった様々なバリエーションが考えられる。1つの電極ノードが持つ結合パラメータ数や、取りうる最大の畳み込み層内ノード総数がパターン毎に異なるため、これらの違いは特徴抽出器としての性能に大きな影響を及ぼし得る。そこで本節では異なるパターンで電極ノードを配置して LCC-AE を構築し、入力画像と復元画像の乖離度合いを表す交差エントロピー誤差を用いてどの配置パターンが最適であるか評価を行った。また比較対象として、重みが正負の任意な値を取ることができる $784 \times$

(50 or 100) × 784 の全結合オートエンコーダ (FC-AE50, 100) について評価を行った。

(5) 手書き文字画像分類による評価

上記 (4) では入力層電極ノードが三角格子状に配列された特徴抽出器が高い性能を有する可能性が示唆された。そこで本節ではこの特徴抽出器 1 層を隠れ層として用いた局所結合畳み込みニューラルネットワーク (LCCNN) [2] による画像分類の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 電極作製及び分岐ポリマー配線の制御

電極の外観を図 1a に示す。4 つの Au 電極が先端間距離 50 μm で向かい合って配置されており、各電極は Au パッドを通じて外部電源に接続された。4 つの電極のうち 1 つを作用極、3 つを対極とし、作用極へ重合矩形波交流電圧を印加する。作用極との間へ細線の配線を所望する対極を接地することで、作用極から複数の対極への分岐的なポリマー配線を試みる。また、配線を所望しない対極には重合電圧の半分の振幅を持ち、かつ重合電圧と同位相の抑制電圧を導入することで、不要なポリマー配線の抑制を図る。

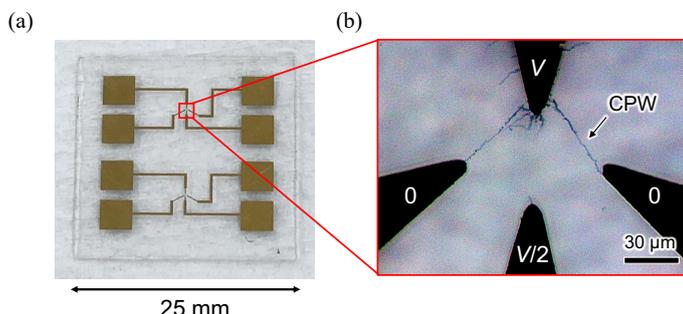


図 1：分岐ポリマー配線に使用された電極基板の外観及び、電極先端付近の倒立光学顕微鏡像。作用極へ振幅 V の重合電圧を印加し、所望の電極を接地することで導電性ポリマーワイヤー (CPW) の配線がなされた。

抑制電圧の導入により選択的に配線された細線の倒立光学顕微鏡像を図 1b に示す。重合電圧 (50 kHz, 24 V_{p-p}) が印加された作用極と接地された 2 つの対極間には細線が成長してポリマー配線された。一方、抑制電圧 (50 kHz, 12 V_{p-p}) が印加された対極との間には細線がほとんど成長せず、不要な配線も起こらなかった。これは、抑制電圧の印加により電極界面において電解重合に必要な電位差が印加されなかったためである。また、重合成長時における細線は酸化重合によって正の電荷を帯びていることから、陰極からのクーロン引力を受けながら電場に沿って成長していく。重合電圧と同位相の抑制電圧を印加することで、作用極から成長した細線との間に電気的な反発が起こり、不要な配線が抑制されて配線精度が向上したと考えられる。

(2) 電圧スパイク印加に伴う相対コンダクタンスの制御

図 2a のように 1 つの作用極と 3 つの対極間を分岐配線したのち、作用極を接地しながら対極電位 V_1, V_2, V_3 として 0 V またはスパイク (1.9 V, 幅 10 ms) を与えた際の各作用極-対極間コンダクタンス G_1, G_2, G_3 の推移を調べた。コンダクタンス比は $G_1 : G_2 : G_3 = 1 : 2 : 3$ を目標値として定めた。 V_1 は常に接地されており、30 s おきに読み出したコンダクタンス比に基づき V_2, V_3 をフィードバック制御した。具体的には、 G_i/G_1 ($i = 2, 3$) を 30 秒毎に計算し、 $G_i/G_1 < i$ の場合は V_i としてスパイクを印加して径増加を促し、 $G_i/G_1 > i$ の場合は既に目標値へ到達しているため接地された。実際に V_2, V_3 へ印加されたスパイクパターン及び G_1, G_2, G_3 の時間推移を図 2b に示す。まず V_2, V_3 のいずれかにスパイクが印加されると、その直後に全てのコンダクタンスが急激に減少した。その後各コンダクタンスは次のスパイクが印加されるまでの間指数関数的にゆっく

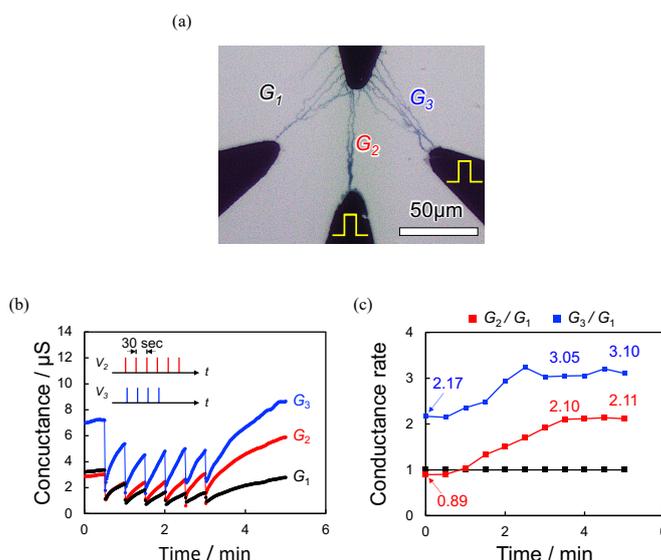


図 2：(a) 分岐ポリマー配線された Au 電極の倒立光学顕微鏡像。(b) 電圧スパイク印加に伴う電極間コンダクタンス G_1, G_2, G_3 の推移。 $G_1 : G_2 : G_3 = 1 : 2 : 3$ の目標比に近づくよう、スパイク印加は 30 s 毎に読み出したコンダクタンスに基づいてフィードバック制御された。(c) G_1 に対する G_2, G_3 の比の時間推移。

その後各コンダクタンスは次のスパイクが印加されるまでの間指数関数的にゆっく

りと増加してある平衡値へと漸近した. 図 2c に, 30s 毎に取得されたコンダクタンス比 G_i/G_1 ($i = 1, 2, 3$) の推移を示す. スパイク印加が進むにつれて各コンダクタンス比が目標比へと近づいていることが分かる. 以上の結果は, スパイク印加に伴う細線の局所的径増加によって, 将来的に得られるコンダクタンスの平衡値が増強されることを示しており, この様子はシナプス長期増強 (LTP) に対応づけられる.

(3) 入力層と畳み込み層の電極位置関係依存性

入力層と畳み込み層内の電極ノードが各層内で正方格子状に並べられた電極配置 (図 3, 電極位置関係 A) を用いて LCC-AE による特徴抽出を試みた. 入力層には $28 \times 28 = 784$ 個の電極ノードが格子状に配列されている. 本配置では, 畳み込み層内の各電極ノード近隣および直下の電極ノードとのみ結合重みを持っており, 重み同士の交差は生じていない. また, 各重みは $0 \sim \infty$ のコンダクタンス値を取ることができる理想的なものを想定した. 使用したデータセットは 10 種類の手書き数字 (0~9) から構成される 28×28 のグレースケール MNIST 画像データセットを用いた. 入力された画像を特徴量へ圧縮 (エンコード) し, 元の画像へと復元 (デコード) するよう, 60,000 枚の学習用画像データセットを用いて LCC-AE を学習させた. 活性化関数はシグモイド関数を用い, 学習率は 0.01 を採用した. 学習後に復元された画像の例を図 3 に示す. 格子状の斑点が生じてしまい, 元の画像を正しく復元できていないことが見て取れる. これは畳み込み層内電極ノード直下にある入力層内電極ノードが結合を 1 つしか有しておらず, デコード信号の正負が一意に決まってしまうことに起因する.

この結果から, 特徴抽出器として用いるためには入力層の各電極ノードが興奮性ノードと抑制性ノードの両方に最低 1 つずつ結合している必要があると考えられる. そこで今度は図 3 中の電極位置関係 B に示すような電極配置を考える. 本配置では入力層の電極ノードが形成する正方格子の中心直上にそれぞれ 1 つの畳み込み層電極ノードが配置されている. 入力層の各電極ノードが興奮性ノードと抑制性ノードの両方に結合しており, また, 畳み込み層内の電極ノードがより高密度に並んでいる. 本配置を用いて同様の画像復元処理を行ったところ, 斑点が生じることなく入力画像が復元された. 以上の結果から, 畳み込み層内電極ノードは入力層電極ノードが形成する格子の中心直上に配置して高密度に配列するのが適切であることが示された.

(4) 電極ノード配置パターン依存性

入力層電極ノードを三角 (図 4a), 正方, 六角格子状 (図 4b) に配列したハードウェア志向モデル LCC-AE3, LCC-AE 4, LCC-AE 6 及び, ソフトウェアモデル FC-AE50, FC-AE100 に関して, 学習中に取得した 1 復元画像あたりの平均交差エントロピー誤差の推移を図 4c に示す. これらの結果から, 入力層電極ノードを三角格子や六角格子状に並べた場合, 正方格子を用いた場合に比べて誤差が大きく減少することが明らかとなった. また, 総結合重み数が 10 分の 1 程度であるのにも関わらず, LCC-AE3 の誤差は FC-AE50 と同程度の値を示した. このことは, CF の混線や配線可能距離といった物理的制約のために結合をスパースにしても, 畳み込み層のノ

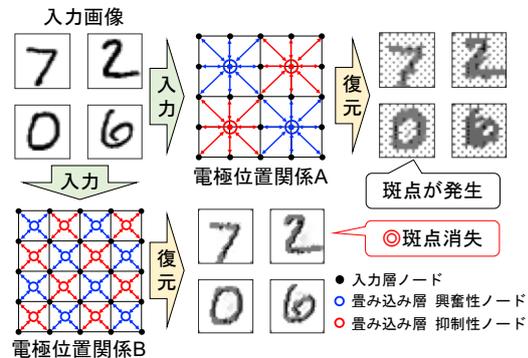


図 3: オートエンコーダによる入力画像復元結果の電極位置関係依存性.

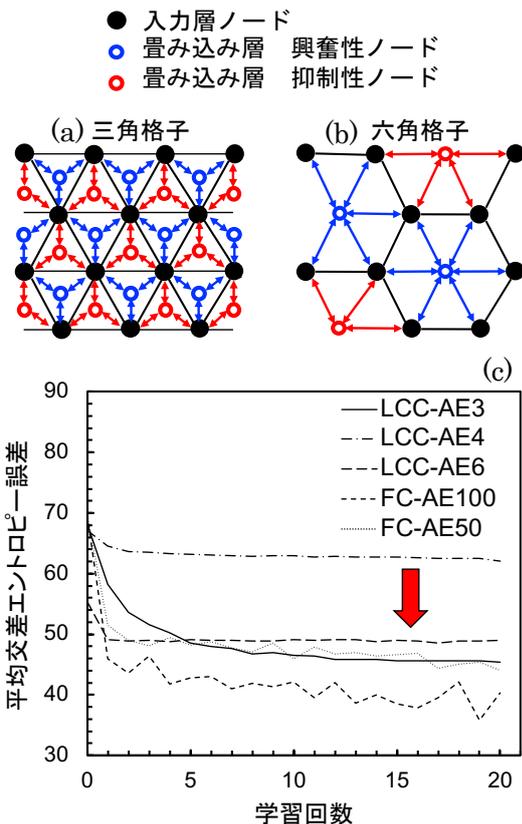


図 4: (a) 三角格子, (b) 六角格子状の入力層電極ノードが配列したモデルの結合位置, (c) 平均交差エントロピー誤差推移のモデル間比較.

ード数を増やすことによって特徴抽出器の性能を維持し得ることを示している。

また、LCC-AE3 と FC-AE50 によって復元された画像の一例を図 5 に示す。誤差は同程度なのにも関わらず、FC-AE50 により復元された画像は LCC-AE3 のものよりぼやけた画像が復元されていることが分かる。一方で LCC-AE3 により復元された画像は文字の濃淡を細かに復元することはできていないものの、文字のエッジを明瞭に捉えられていることが分かる。これは局所的に形成されたフィルタが文字のエッジに強く反応したためであると考えられる。

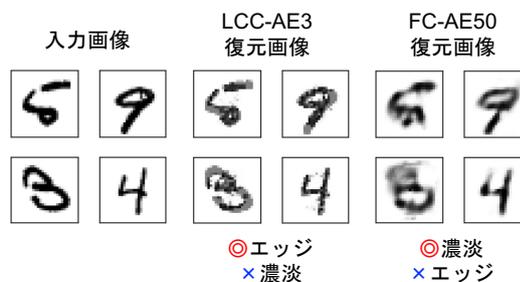


図 5: パードウェアおよびソフトウェア AE モデルにより復元された手書き数字画像。

(5) 手書き文字画像分類

MNIST に含まれる 60,000 枚の学習用データを用いて確率的勾配降下法(バッチサイズ 15, 学習率 0.01)による学習を行い、10,000 枚のテスト用データを用いて分類精度を取得した。また比較モデルとして、単層パーセプトロン (Single-Layer Perceptron: SLP) 及び 50 個の隠れ層ノードから成る多層パーセプトロン (Multilayer Perceptron: MLP) についても同様に学習させた。各モデルの分類精度推移を図 6 に示す。100 回ほど学習させた LCCNN の精度は約 95.62 % にまで到達した。SLP の精度が約 92 % に留まっていることから、特徴抽出器による分類精度向上の効果が顕著に現れているといえる。勾配消失の影響を抑えるため、ここでは活性化関数として ReLU 関数を用いた。顕著な精度向上が見られ、特徴抽出器多層化の有効性が示唆された。

最後に本研究では、メモリ素子の歩留まりが LCCNN の性能に与える影響について調査した。結合重み数を一定割合だけランダムに削減して学習を 100 回ほど行った時、分類精度がどのように変化していくのか観察した結果を図 7 に示す。電極ノードの配置パターンとして三角格子を採用した場合、結合の約 70 % が除かれても SLP の分類精度 92.08 % を上回る精度が得られた。これは特徴抽出器がメモリ素子の歩留まりに対して強いロバスト性を有していることを示しており、何らかの不具合によって CF の成長が起こらずコンダクタンスが変化しないような電極間がいくつか存在した場合でも、ネットワーク全体としてある程度の性能を維持し得ることを示唆している。一方で六角格子状に電極ノードが配列した特徴抽出器を用いた場合、歩留まりに関わらず低い分類精度を示した。これは畳み込み層内に電極ノードを高密度に敷き詰められず、隠れ層ノード数が不足したためであると考えられる。

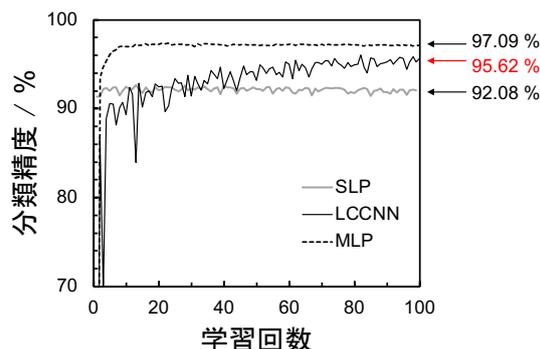


図 6: 画像分類精度のモデル間比較。

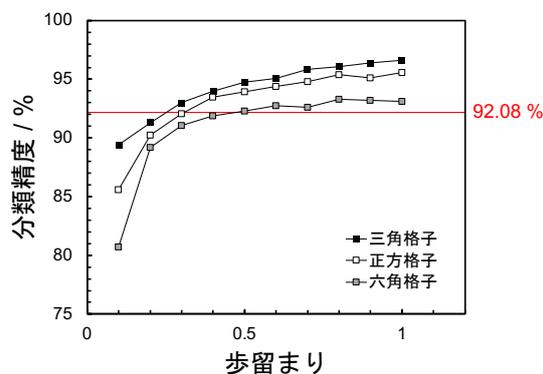


図 7: LCCNN による画像分類精度のメモリ素子歩留まり依存性。

文献

1. Akai-Kasaya M., Hagiwara N., Hikita W., Okada M., Sugito Y., Kuwahara Y., and Asai T., "Evolving conductive polymer neural networks on wetware," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. 5, 060601 (2020).
2. Achararit P., Hida I., Marukame T., Asai T., and Hara-Azumi Y., "Structural exploration of stochastic neural networks for severely-constrained 3D memristive devices," Nonlinear Theory and Its Applications, vol. E9-N, no. 4, pp. 466-478 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Amemiya Yoshiki, Jose Ali Emiliano, Hagiwara Naruki, Akai-Kasaya Megumi, Asai Tetsuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Heuristic model for configurable polymer wire synaptic devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 379 ~ 384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ali Emiliano J., Amemiya Yoshiki, Akai-Kasaya Megumi, Asai Tetsuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Smart hardware architecture with random weight elimination and weight balancing algorithms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 336 ~ 342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hagiwara Naruki, Asai Tetsuya, Ando Kota, Akai Kasaya Megumi	4. 巻 33
2. 論文標題 Fabrication and Training of 3D Conductive Polymer Networks for Neuromorphic Wetware	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2300903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202300903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hagiwara Naruki, Kunimi Takafumi, Ando Kota, Akai-Kasaya Megumi, Asai Tetsuya	4. 巻 15
2. 論文標題 Design and evaluation of brain-inspired predictive coding networks based on the free-energy principle for novel neuromorphic hardware	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 107 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.15.107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Ali E.J., Amemiya Y., Hagiwara N., Akai-Kasaya M., and Asai T.
2. 発表標題 A comparison between simulations and experiments of neuromorphic devices using electropolymerization of conductive polymer nanowires
3. 学会等名 Joint Symposium of JSPS-DST Bilateral Research on Charge- and Spin-Blockade in Ultrathin-Layers of Single Molecule Magnets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hagiwara N., Amemiya Y., Ali E.J., Asai T., and Akai-Kasaya M.
2. 発表標題 Feasibility of neuromorphic wetware using configurable polymer networks
3. 学会等名 The 10th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Amemiya Y., Ali E.J., Hagiwara N., Akai-Kasaya M., and Asai T.
2. 発表標題 A heuristic model for configurable polymer-wire synaptic devices
3. 学会等名 The 2021 Nonlinear Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ali E.J., Amemiya Y., Akai-Kasaya M., and Asai T.
2. 発表標題 Smart hardware architecture with random weight elimination and weight balancing algorithms
3. 学会等名 The 2021 Nonlinear Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 雨宮 佳希, アリ ホセ エミリアーノ, 赤井 恵, 浅井 哲也
2. 発表標題 再構成可能な分子シナプス素子の簡易モデル
3. 学会等名 第34回 回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 アリ ホセ エミリアーノ, 雨宮 佳希, 浅井 哲也, 赤井 恵
2. 発表標題 Neuromorphic Devices using Spatial Free Wiring of Conductive Polymer for Hardware Artificial Neural Networks
3. 学会等名 電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋原 成基, 浅井 哲也, 赤井 恵
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第35回 回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋原 成基, 雨宮 佳希, アリ ホセ エミリアーノ, 浅井 哲也, 赤井 恵
2. 発表標題 立体配線型メモリ素子で構成される新規脳型回路アーキテクチャの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hagiwara N., Kan S., Asai T., and Akai-Kasaya M.
2. 発表標題 Construction of a neural network using organic materials and ions
3. 学会等名 The 29th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hagiwara N., Amemiya Y., Ali E.J., Asai T., and Akai-Kasaya M.
2. 発表標題 Feasibility of neuromorphic wetware using configurable polymer networks
3. 学会等名 The 10th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hagiwara N., Asai T., and Akai-Kasaya M.
2. 発表標題 Multi-synaptic conductance control using conductive polymer wiring
3. 学会等名 2022 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hagiwara N., Asai T., Ando K., and Akai-Kasaya M.
2. 発表標題 3D Conductive Polymer Wiring Synapses for Neuromorphic Wetware
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hagiwara N., Asai T., Ando K., and Akai-Kasaya M.
2. 発表標題 Growth of 3D Conductive Polymer Fiber Networks towards Neuromorphic Wetware
3. 学会等名 Neuromorphic Organic Devices 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 萩原 成基, 安藤 洸太, 浅井 哲也, 赤井 恵
2. 発表標題 脳型ウェアウェア創製に向けた3次元導電性ポリマーネットワークの構築及び学習
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Megumi Akai-Kasaya and Tetsuya Asai (Andrew Adamatzky Ed.)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 1208
3. 書名 Handbook of Unconventional Computing	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	赤井 恵 (Akai-Kasaya Megumi) (50437373)	北海道大学・情報科学研究院・教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------