

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22114

研究課題名（和文）銀/硫化銀ナノ粒子によるランダムネットワークを用いた革新的脳型デバイスへの挑戦

研究課題名（英文）Challenge for innovative brain device by random network in aggregation of Ag/Ag₂S nanoparticles

研究代表者

田中 啓文（Tanaka, Hirofumi）

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・教授

研究者番号：90373191

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：人工知能（AI）が非常にホットな話題として注目を浴びている。人工知能をソフトウェアで達成しようとするプロジェクトは多く見受けられるが、デバイス作製などハードウェアで達成しようとする取り組み（脳型ハードウェア）はこれまでにほとんどなされてこず、小型で消費電力が小さくかつ人間の脳と同程度のプロセッシング能力のあるコンピュータの開発が急務である。ランダムネットワークは人工ニューラルネットワーク演算の消費電力を下げると期待されており、研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

定化されたAg/Ag₂Sコアシェルナノ粒子を凝集させて作った電気デバイスで、ニューロモルフィックな学習スイッチング動作（可塑的メモリ動作）を調べた。チオールには分極性の高いアリルメルカプタンを用いた。Ag/Ag₂Sコアシェルナノ粒子を、二層修正Brust-Schiffrin法を用いて合成した。XPSで同定したところAg/Ag₂Sコアシェルナノ粒子は、Ag-SおよびAg-S-R結合状態を示したことからAgイオンの酸化還元反応によるスイッチングが可能であることが分かった。リザーバ演算の基本的ベンチマークタスクにより、Agナノ粒子を凝集させたデバイスはリザーバ素子として働くことが実証できた。

研究成果の概要（英文）：Artificial intelligence (AI) has become a very hot topic. There are many projects that try to achieve artificial intelligence with software, but there have been few efforts to achieve it with hardware, such as device fabrication (brain-type hardware). There is an urgent need to develop a computer that is small, consumes little power, and has the same processing power as the human brain. Random networks are expected to reduce the power consumption of artificial neural network operations, and we conducted research on this topic.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：リザーバ ランダムネットワーク

1. 研究開始当初の背景

我々はこれまで原子スイッチを用いた研究にも従事してきた (H. Tanaka et al., Adv. Mater. 25, 5893-5897 (2013). など)。原子スイッチとは Ag_2S と Pt 対向電極を 1 nm 離れた構造の微小スイッチング素子である。一方、リザーバー素子とは、脳型演算の一つであり、積和演算をブラックボックス (BB) にし、そこに入力した電気信号を類推するために出力を観測する手法である。BB には経験学習的なものが必要とされ、本研究では Ag/ Ag_2S コアシェルナノ粒子 (NP) によって作製されるランダムネットワークを用いる。我々は微粒子作製にも長けている (H. Tanaka et al., Nanotechnology 23, 215701 (2012). など)。以上を組み合わせることにより、原子スイッチ挙動を示すナノ粒子集合体を用いて常温で組み換え可能なランダムネットワーク作製すること、またその演算利用に思い至った。

2. 研究の目的

人工知能 (AI) が非常にホットな話題として注目を浴びている。人工知能をソフトウェアで達成しようとするプロジェクトは多く見受けられるが、デバイス作製などハードウェアで達成しようとする取り組み (脳型ハードウェア) はこれまでにほとんどなされてこず、小型で消費電力が小さくかつ人間の脳と同程度のプロセッシング能力のあるコンピュータの開発が急務である。ランダムネットワークは人工ニューラルネットワーク演算の消費電力を下げると期待されており、これまで申請者も研究を行ってきた (Nature Commun. 9, 2693 (2018). 他)。本研究ではランダムネットワークの材料系と作製方法を挑戦的に変更し、さらに高度なニューロモルフィック (脳型) デバイスへの到達を目指す。

3. 研究の方法

従来の研究にしたがって、Brust-Schiffirin 法を用い Ag- Ag_2S コアシェル NP を合成した。粒子の大きさや表面の化学結合状態などの構造特性は、あらかじめ X 線回折、透過型電子顕微鏡、X 線光電子分光などで調べた。その結果、数十ナノメートルのコアシェル構造の NP が得られた。Ag/アリルメルカプタンのモル比を 0.25/1 にして合成したところ、得られた NP は I-V 曲線に非線形性とヒステリシスが見られ、リザーバーデバイスの構築に適していることがわかった。次に、合成した NP を、Pt/Ti (24/6 nm) を電極として、リソグラフであらかじめパターン化した SiO_2/Si 基板上に 50 °C でドロップキャストした。RC に関する研究では、まず半導体アナライザーを用いて電気的特性を調べた。次に、ファンクションジェネレータから生成した一定の直流電圧と正弦波をデバイスに供給し、データ収集システムを用いて、読み出しのマルチチャネルからの出力を時間領域で記録することで、高次高調波や位相シフトなどのリザーバー層の動的特性を調べた。この出力を線形回帰法で学習させ、目標とする波形を生成しました。精度と誤差を算出し、ナノワイヤー型の Ag_2S リザーバーの性能と比較した。

4. 研究成果

簡単な実験手順で合成した Ag- Ag_2S NPs を用いて、室温での RC デバイスの作製に成功した。これらの NP の I-V 特性は非線形であり、オン/オフ比が約 10^4 のメモリスティックな

動作を示した。この NP ベースのデバイスは豊かな高次高調波を示し、入力を高次元でマッピングした。さらに、NP ベースのデバイスのエコー状態の特性は、リサーチプロットによって示され、すべての読み出しチャンネルでさまざまな位相変化が観察された。このように、HHG による非線形性、スケールフリーネットワーク、エコー特性を持つ NP デバイスは、リザーバーへの応用に適している。RC の簡単なデモンストレーションとして、波形生成タスクを実行するためのシナプス出力の重みを学習するために、教師付き学習原理を適用した。波形生成タスクの性能は、信頼度 R^2 と平均二乗誤差によって定量化された。マルチノード・デバイスを用いた RC では、学習を最適化するために、ある程度の数の読み出しチャンネルが必要となる。さらに、ナノワイヤーと比較して、NP ベースの RC は、読み出しチャンネルの数が少ないほど性能が高かった。さらに、ナノワイヤーと比較して、NP ベースの RC は、読み出しチャンネル数が少なくても優れた性能を発揮した。さらに、ナノワイヤーと比較して、NP ベースの RC は、読み出しチャンネル数が少なくても優れた性能を発揮した。これは、NP の表面積と体積の比率が大きいため、ネットワークのダイナミクスが増大するためであると考えられる。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田中啓文、赤井恵、浅井哲也、小川琢治	4. 巻 J103-C1
2. 論文標題 単層カーボンナノチューブとポリ酸によるニューロモルフィックランダムネットワークデバイス（招待）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 和文誌C	6. 最初と最後の頁 53-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Y.Nakao, S. Oradee, Hadiywarman, H. Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Synthesis Procedure to the Size of Ag-Ag ₂ S Core-shell Nanoparticles for Memristive Brain-like Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings for 2019 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM2019)	6. 最初と最後の頁 79-83
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hadiywarman, Usami Yuki, Kotooka Takumi, Azhari Saman, Eguchi Masanori, Tanaka Hirofumi	4. 巻 60
2. 論文標題 Performance of Ag ₂ S core-shell nanoparticle-based random network reservoir computing device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCF02 ~ SCCF02
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abe206	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hadiywarman, Eguchi Masanori, Tanaka Hirofumi	4. 巻 59
2. 論文標題 Control of the neuromorphic learning behavior based on the aggregation of thiol-protected Ag-Ag ₂ S core-shell nanoparticles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 015001 ~ 015001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab5c77	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Neuromorphic pulse generation from SWNT/POM random network
3. 学会等名 MRS-Thailand2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Neuromorphic pulse generation from SWNT/POM random network
3. 学会等名 ANM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Neuromorphic pulse generation from SWNT/POM random network
3. 学会等名 JCC2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Kotooka, Samuel Lilak, Adam Z. Stieg, James K. Gimzewski, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 セレン化銀ナノワイヤを用いたニューロモルフィックデバイスの電気特性
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Banerjee Deep, Yoshito Yamazaki, Takuji Ogawa, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Neuron like pulse behavior of SWNT/POM random network
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Kotooka, Faisal Budiman, Yoichi Horibe, Kouichi Takase, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 The Electric and Magnetic Property of Free-Standing Strontium Titanate Nanoparticles
3. 学会等名 ISAS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Banerjee Deep, Xinguang Yu, Detiza Goldianto, Yoshito Yamazaki, Takuji Ogawa, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Neuron like pulse behavior of SWNT/POM random network
3. 学会等名 ISAS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Kotooka, Samuel Lilak, Adam Z. Stieg, James K. Gimzewski, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 The Electric Property of Silver Selenite Nanowires Network for Reservoir Computing Device
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Banerjee Deep, Detiza Goldianto, Tomoya Ishizuka, Takahiko Kojima, Takuji Ogawa, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Neuron like pulse behavior of SWNT/POM random network
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Kotooka, Samuel Lilak, Adam Z. Stieg, James K. Gimzewski, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 セレン化銀ナノワイヤを用いたリザパーコンピューティングの波形学習
3. 学会等名 第10回分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村添脩保、Deep Banerjee、山崎喜登、田中啓文
2. 発表標題 傾斜ポルフィリンサンドイッチPOM/SWNTランダムネットワーク複合体のパルス発生特性
3. 学会等名 第10回分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Banerjee Deep, Detiza Goldianto, Tomoya Ishizuka, Takahiko Kojima, Takuji Ogawa, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Neuron like pulse behavior of SWNT/POM random network
3. 学会等名 第10回分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanaka
2. 発表標題 Neuromorphic pulse generation from SWNT/POM random network
3. 学会等名 International Symposium for Neuromorphic AI Hardware Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hadiyawardan, H. Tanaka
2. 発表標題 Device fabrication of Ag-Ag ₂ S core-shell nanoparticles for reservoir computing
3. 学会等名 International Symposium for Neuromorphic AI Hardware Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中啓文、琴岡匠、ディーブ・バナジー、ハディヤワルマン、サマン・アズハリ、宇佐美雄生
2. 発表標題 多様な材料を利用したランダムネットワーク物理リザーバーの比較
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 琴岡匠、Samuel Lilak、Adam Z. Stieg、James K. Gimzewski、田中啓文
2. 発表標題 セレン化銀ナノワイヤを用いたリザーバーコンピューティングデバイスの作製
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 "田中 啓文・琴岡匠・バナージー ディープ・ハディアワルマン T.・アズハリ サマン・宇佐美 雄生 "
2. 発表標題 SWNT/ポリ酸ランダムネットワークによる脳型パルス発生とニューロモルフィック演算
3. 学会等名 高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中啓文
2. 発表標題 "ニューロモルフィックAIハードウェア研究センターの取り組みと今後 "
3. 学会等名 北九州学研都市フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Kotooka, Yuki Usami, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Temperature Dependence of Silver Selenide Nanowires Network for Reservoir Computing Device
3. 学会等名 MNC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tanaka
2. 発表標題 Recent Development of Neuromorphic AI Hardware
3. 学会等名 ISIPS2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tanaka
2. 発表標題 Recent Development of Neuromorphic AI Materials
3. 学会等名 ISMM2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tanaka
2. 発表標題 Random network structure of materials developing next generation AI devices for autonomous systems
3. 学会等名 IUMRS-ICA2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 琴岡匠、Samuel Lilak、Adam Z. Stieg、James K. Gimzewski、田中悠一朗、田向権、宇佐美雄生、田中啓文
2. 発表標題 Ag ₂ Seナノワイヤネットワーク物理リザーバードバイスをを用いた音声分類
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tanaka
2. 発表標題 Reservoir computing device composed by chemical dynamics
3. 学会等名 UCLA Physical Chemistry Seminar Series (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tanaka
2. 発表標題 Reservoir computing device composed by random network systems
3. 学会等名 Suranaree University of Technology, The school of Physics Seminar (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 3次元電気素子及びそれを備えた機械学習システム	発明者 田中啓文、宇佐美雄生、アズハリ・サマン	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-174660	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	田向 権 (Tamukoh Hakaru)		
研究協力者	江口 正徳 (Eguchi Masanori)		

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
---------	---------