

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22485

研究課題名（和文）ナノ物質界面ネットワークを計算資源とした脳神経回路型マテリアル知能の開拓

研究課題名（英文）Creation of brain-inspired material intelligence composed of nanomaterial network

研究代表者

宇佐美 雄生（Yuki, Usami）

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・助教

研究者番号：60878437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、自己組織的に組みあがるナノ物質ネットワーク界面の持つ電気的な特性を抽出し、揺らぎを駆動力としたリザーバー演算を実行することを目的として、光応答性の強い物質である -Fe₂O₃/Ti-Bi-O ナノ粒子複合体を用いてリザーバー演算を実装した。構造解析の結果からナノ粒子の形成を確認し、光照射により電流値が上昇し、界面におけるイオン伝導が支配的であることを明らかにした。さらに代表的なベンチマークである波形生成タスクの結果、一定量の光照射により電流ノイズ量を最適化することで波形予測精度が上昇することを見出した。以上の結果から、光照射による揺らぎによるリザーバー演算性能の制御に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、光応答材料を演算部に組み込むことで、外部からの光刺激により電流ノイズの量が最適化され、演算機能が制御可能となることを見出した。本研究の進展により、ノイズや揺らぎといったこれまで演算機能向上の妨げとなっていたものを逆に活用する、真に脳機能を模倣した演算処理の実現が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we implemented reservoir computing using -Fe₂O₃/Ti-Bi-O nanoparticle composites, which are highly photo-responsive materials in order to perform reservoir computing driven by fluctuations. Structural analysis results showed the formation of nanoparticles and revealed that the current value increased upon light irradiation. From impedance spectroscopy, ionic conduction at the interface was dominant in this material system. Furthermore, the results of the waveform generation task, a representative benchmark, showed that a certain amount of light irradiation increased the accuracy of waveform prediction by optimizing the amount of current noise. These results show that fluctuations caused by light irradiation successfully control the reservoir computing performance.

研究分野：材料科学

キーワード：リザーバー演算 光応答素子 金属酸化物

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体の集積化の限界が近づき、情報処理のさらなる発展のために脳神経回路の仕組みを模倣したデバイスを用いて学習や認識を行う人工知能(AI)素子が検討されている。しかしながら、既存の CMOS 技術と違い、脳神経回路を模倣した素子の社会実装においては、自然界に普遍的に存在する揺らぎの影響により、情報処理の動作に関する制約が数多く残存している。本研究では、図 1 のように代表的な脳神経回路型アルゴリズムであるリザーバ演算(5 頁に詳細を記述)の演算プロセスにナノ物質ネットワーク界面の電子状態の揺らぎを用いて入力信号を増幅させることにより、逆に積極的に情報処理に活用することを目指す。リザーバ演算では、ネットワークの持つダイナミクスを利用することで、記憶領域と演算領域が一体となり、低コスト及び高度な時系列情報処理が可能である。さらに統計的な情報処理を扱う際に揺らぎを与えることで最適解を探しやすく、利用可能なのではないかという研究が生体系の動作原理を用いて検討され始めている。[N. Takeuchi, et al., Phys. Rev. Applied 11, 044069 (2019)]この両者を組み合わせるために、状態の揺らぎそのものをリザーバ演算の計算資源とすることで、従来の素子開発で妨げとなっていた揺らぎを積極的に情報処理に利用する。このような研究を通じて、材料科学と情報科学が一体となった「マテリアル知能」の学理を追求する。

2. 研究の目的

本研究は、自己組織的に組みあがるナノ物質ネットワーク界面の持つ電気的な特性を抽出し、揺らぎを駆動力としたリザーバ演算を実行することを目的とする。具体的には、物質単体で現れない界面特有の電子状態や環境を用いて材料の持つ揺らぎをネットワークに印加する入力信号の増幅に活用し、リザーバ演算の実装及び最適化を行う。

3. 研究の方法

本研究は脳を模倣した情報処理実現のための要素開発に着目して研究を進めた。脳神経回路網をナノ物質界面ネットワークで表現し、揺らぎを許容した情報処理を行うことで、社会システムへの実装に耐えうるデバイスの開発に向けた設計指針を提示することを狙いとして研究を進めた。

(1) リザーバ演算を用いたナノ物質ネットワークデバイス界面の機能抽出

まずはナノ物質界面ネットワークにリザーバ演算を実装した。マイクロスケールの 16 電極を光学リソグラフィ法を用いて作製し、多入出力演算システムをデータ収録システムおよび LabVIEW による制御により構築した。当初の研究計画ではナノ物質界面ネットワークにポリアニリンスルホン酸/金微粒子ネットワークを用いる予定であったが、検討の結果、より光応答性の強い物質である $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-0}$ ナノ粒子複合体を用いてリザーバ演算を実装した。 $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-0}$ ナノ粒子複合体が作製されていることを X 線結晶回折(XRD)及び透過電子顕微鏡(TEM)で確認し、電気計測および電気化学インピーダンス計測により電気特性を調べた。作製した $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-0}$ ナノ粒子複合体のリザーバとしての性能を評価するために、代表的なベンチマークタスクである波形生成タスクを用いて波形予測精度を算出した。

(2) 揺らぎを用いた情報処理の最適化

上記で述べたリザーバ演算に揺らぎを与えることで、情報処理の最適化を行った。上記で検討した $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-0}$ ナノ粒子複合体に白色光を照射し、電流 - 電圧特性の変化を調べた。さらに波形生成タスクの予測精度の光照射強度依存性を調べ、光照射によってリザーバ性能にどのような影響があるかを検討した。さらに得られた出力の信号とノイズの強度比を計算し、光学変調によるノイズ量の変化及び演算システムへの影響を考察した。

4. 研究成果

(1) $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-0}$ ナノ粒子の作製

金属酸化物ナノ粒子の合成に一般的に用いられるゾル-ゲル法を用いて $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 及び Ti-Bi-0 ナノ粒子をそれぞれ作製した。XRD の結果から、 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、アナターゼ型 TiO_2 、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の存在が確認された。XRD のピーク幅からシェラー式を用いて各ナノ粒子の結晶子サイズを計算したところ、約 16 nm ($\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、6 nm (アナターゼ型 TiO_2)、20 nm ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$)であった。TEM 画像から粒子状構造の形成が観察された。電子回折像においても、回折パターンの帰属から $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、アナターゼ型 TiO_2 、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の存在が確認された。TEM 画像から粒径分布を調べヒストグラムを作成したところ、各ナノ粒子のサイズは 150 nm ($\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、13 nm (Ti-Bi-0)であった。以上の結果

から、 $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-O}$ 各ナノ粒子の作製に成功した。

(2) $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-O}$ ナノ粒子複合体の電気特性
 図 1 に 100W 白色光照射前後の電流電圧特性の変化を示す。電流電圧特性に大きな変化はないものの、光照射により電流値がわずかに上昇することがわかった。また図 2 に光照射なしの場合の電気化学インピーダンスの結果を示す。青点が実測値、赤線が右に示す等価回路から算出された計算値であり、良い一致を示すことから作製したデバイスがイオン伝導を示すことが明らかになった。

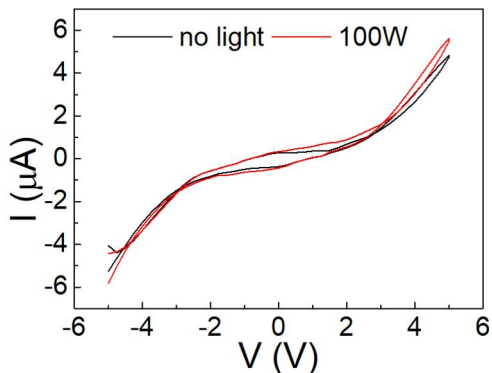


図 1. 電流 - 電圧特性。黒線は光照射なし、赤線は光照射ありの結果。

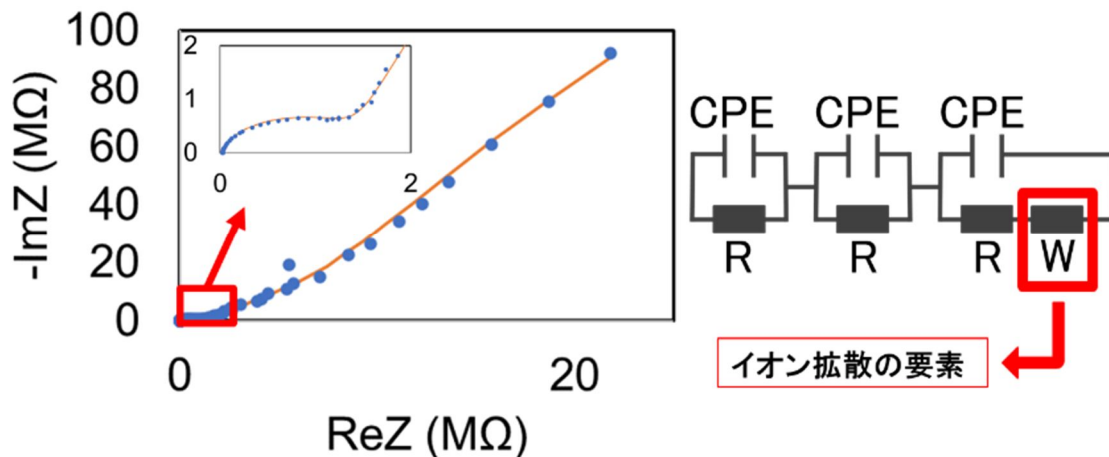


図 2. 電気化学インピーダンス計測結果。青点は実測値、赤線は等価回路から算出された計算値。図中のグラフは拡大図。右図は実測値と最も良い一致を示した等価回路を示す。

(3) $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-O}$ ナノ粒子複合体の RC 性能

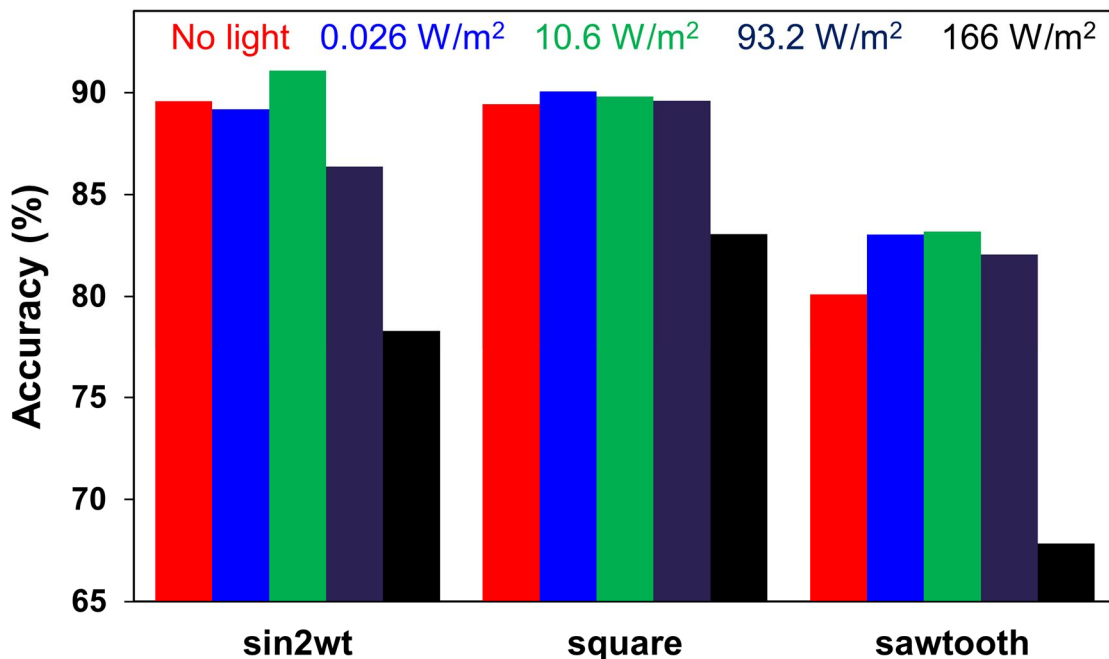


図 3. 波形生成タスクの結果。グラフの色は上部の光照射条件に対応する。横軸のラベルはターゲット波形を示す。入力信号は正弦波(11Hz, 6Vpp)である。

図 3 に $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ti-Bi-O}$ ナノ粒子複合体の波形生成タスクの予測精度を光照射強度ごとに示す。横軸ラベルは波形生成タスクの際に使用したターゲット波形である。図 3 に示すように、10.6

W/m²の白色光を照射した時に最も波形予測精度が高いことがわかった。この結果は、光照射により波形予測精度が向上し、光強度に応じて波形予測精度が変化することを示している。これにより、当初の目的であった光照射によるナノ物質ネットワークの演算性能の制御が実現されたといえる。さらに各光照射条件における信号のS/N比を算出したところ、弱い光強度で照射した際にノイズが減少していることがわかった。このことから、光照射によりノイズが減少し、波形予測精度が上昇していることが明らかになった。その一方でS/N比0.1%の時よりS/N比0.2%以上の波形予測精度が高いことから、ノイズによる演算機能の最適化が実現されているといえる。結果から、-Fe₂O₃/Ti-Bi-Oナノ粒子複合体に一定量の光照射を行うことで、リザーバ演算の性能が上昇することが示された。

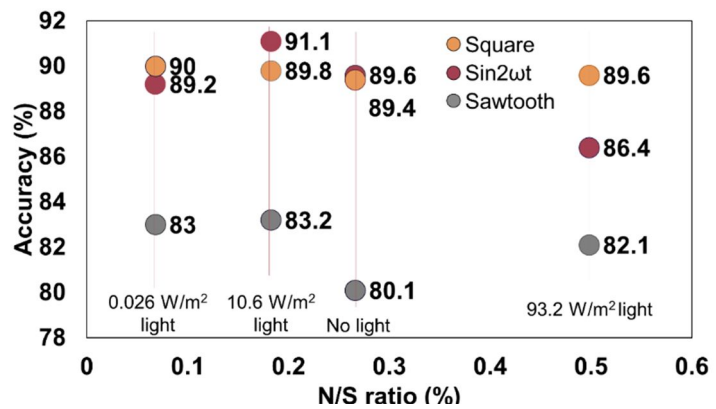


図4. 波形生成タスクの結果。グラフの色は上部の光照射条件に対応する。横軸のラベルはターゲット波形を示す。入力信号は正弦波(11Hz, 6Vpp)である。

(4)今後の展望

本研究を通して、光応答材料を演算部に組み込むことで、外部からの光刺激により演算機能が制御可能となることを見出した。今後は光照射による演算機能制御の起源を解明するとともに、他のリザーバ演算機能の評価タスクを行い外部刺激による演算機能制御の性能をさらに向上させていく。本研究の進展により、ノイズや揺らぎといったこれまで演算機能向上の妨げとなっていたものを逆に活用する、脳機能を模倣した演算処理の実現が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Usami Yuki, Ven Bram, Mathew Dilu G., Chen Tao, Kotooka Takumi, Kawashima Yuya, Tanaka Yuichiro, Otsuka Yoichi, Ohoyama Hiroshi, Tamukoh Hakaru, Tanaka Hirofumi, Wiel Wilfred G., Matsumoto Takuya	4. 巻 33
2. 論文標題 In Materio Reservoir Computing in a Sulfonated Polyaniline Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2102688 ~ 2102688
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202102688	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 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 宇佐美 雄生、川嶋 悠哉、福丸 知世、三坂 朝基、琴岡 匠、大塚 洋一、内藤 泰久、大山 浩、田中 啓文、松本卓也
2. 発表標題 非線形電子物性を有する分子ネットワークの化学的構築と情報処理への応用
3. 学会等名 第11回分子アーキテクニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇佐美 雄生、川嶋 悠哉、福丸 知世、三坂 朝基、琴岡 匠、大塚 洋一、内藤 泰久、大山 浩、田中 啓文、松本 卓也
2. 発表標題 脳神経型情報処理を目指した非線形電子物性を有する分子ネットワークの化学的構築
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 宇佐美 雄生、松本 卓也、Wilfred G. van der Wiel、田中 啓文
2. 発表標題 Electrochemical Controlled Neuromorphic Behavior Based on Self-Doped Polyaniline
3. 学会等名 MNC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川嶋 悠哉、宇佐美 雄生、 琴岡 匠、 田中 啓文、 松本 卓也
2. 発表標題 物理リザバーに向けたポリアニリン-金微粒子ランダムネットワークの構築
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇佐美 雄生、松本 卓也、 Wilfred G. van der Wiel、 田中 啓文
2. 発表標題 自己ドーブ型ポリアニリンを用いた電気化学制御リザバーコンピューティング
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇佐美 雄生、Wilfred G. van der Wiel、 松本 卓也、 田中 啓文
2. 発表標題 自己ドーブ型ポリアニリンを用いた電気化学的物理解リザバーの演算機能創製
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 中尾祐介、宇佐美雄生、Saman Azhari、Hadiyawarman、田中啓文
2. 発表標題 ナノ材料集合体を記憶部に用いた時間遅延型リザバーコンピューティング
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 宇佐美 雄生、Wilfred van der Wiel、松本 卓也、田中 啓文
2. 発表標題 ポリアニリンネットワークの電気化学的物理解ザバー演算機能創製
3. 学会等名 ナノ学会第19回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇佐美 雄生、田中 啓文
2. 発表標題 ナノ材料ネットワークの時間ダイナミクスが拓く物理解ザバーの演算機能
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Usami, Yuichiro Tanaka, Hakaru Tamukoh, Takuya Matsumoto, Wilfred G. van der Wiel, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 In-materio voice classification based on self-doped polyaniline by binarized convolutional neural network
3. 学会等名 MNC2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Usami, Tomoyo Fukumaru, Yuya Kawashima, Tomoki Misaka, Yoichi Otsuka, Yasuhisa Naitoh, Takuya Matsumoto
2. 発表標題 Chemical integration of molecular network with electrical nonlinearity toward neuromorphic computing
3. 学会等名 Pacifichem2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaya Hakoshima, Yuki Usami, Takumi Kotooka, Hirofumi Tanaka
2. 発表標題 Electrical Properties of Photoresponsive Materials for In-materio Reservoir Computing
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇佐美 雄生、田中 悠一郎、田向 権、 Wilfred van der Wiel、松本 卓也、田中 啓文
2. 発表標題 電気化学ダイナミクスを用いたインマテリオリザーによる音声分類
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 箱嶋 将弥、宇佐美 雄生、琴岡 匠、田中 啓文
2. 発表標題 インマテリオリザー利用を指向した光応答性材料の電気特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3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 アズハリ サマン、宇佐美 雄生、田中 啓文	権利者 九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-174660	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

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並びにそれぞれの製造方法	発明者 アズハリ サマン、宇佐美 雄生、田中 啓文	権利者 九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/37158	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 演算素子及びそれを具備する機械学習システム	発明者 宇佐美 雄生、田中 啓文、琴岡 匠、川嶋 悠哉、松本 卓也	権利者 九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、2021-165303	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究者詳細 - 宇佐美 雄生
https://hyokadb02.jimu.kyutech.ac.jp/html/100001328_ja.html

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

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