

一般セッション(口頭講演)| FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」: FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

■ 2025年9月10日(水) 9:00 ~ 12:00 | 会場 N106 (共通講義棟北)

[10a-N106-1~10] FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

丸亀 孝生(北大)、吉川 宜史(Rapidus)

先端半導体AIに関する招待講演1件、リザーバーコンピューティング、物理リザーバー、センサAI融合、センサ内AI、新原理コンピューティング技術: 材料/デバイス

9:00 ~ 9:15

[10a-N106-1] 多電子系ランダムネットワークの識別タスクへの応用

○渡邊 隼弥¹、大矢 剛嗣^{1,2} (1.横国大院理工、2.横国大 IMS)

◆ 英語発表

9:15 ~ 9:30

[10a-N106-2] Performance Enhancement of FeFET-based Reservoir Computing Using Substrate Bias

○Mingxia Wan¹, Eishin Nako¹, Shin-Yi Min¹, Mitsuru Takenaka¹, Shinichi Takagi¹, Kasidit Toprasertpong¹ (1.Univ. Tokyo)

9:30 ~ 9:45

[10a-N106-3] イオンゲル/電極界面への金属カチオンのアクセス性制御によるイオンゲル物理リザーバーの情報処理性能向上

○島 久¹、日下 靖之¹、加納 伸也¹、高武 正義¹ (1.産総研)

9:45 ~ 10:00

[10a-N106-4] 銅イオン添加イオン液体リザーバーにおける光照射ウォームアップ効果

○(M1)山上 雅仁^{1,2}、島 久²、野上 敏材³、持田 智行⁴、内藤 泰久²、秋永 広幸²、鄭 雨萌¹、木下 健太郎¹ (1.東理大先進工、2.産総研、3.鳥取大工、4.神戸大理)

◆ 奨励賞エントリー

10:00 ~ 10:15

[10a-N106-5] イオン液体リザーバーの学習性能における高分子封入効果

○(M1)山本 里菜¹、鄭 雨萌¹、矢野 敬将²、石田 久征²、浜田 昂²、村上 賢志²、木下 健太郎¹ (1.東理大先進工、2.第一工業製薬株式会社)

10:30 ~ 11:00

[10a-N106-6] [分科内招待講演] Rapidusが提供する短TAT設計環境Raads(Rapids AI-Assisted Design Solution)のご紹介

○鶴崎 宏亀¹ (1.ラピダス株式会社)

◆ 奨励賞エントリー

11:00 ~ 11:15

[10a-N106-7] 波長依存型双極性色素増感人工シナプス素子の創製と物理リザーバー応用

○(D)小松 裕明¹、細田 乃梨花¹、生野 孝¹ (1.東理大先進工)

◆ 奨励賞エントリー

11:15 ~ 11:30

[10a-N106-8] 液晶の電気対流によるパターン形成を用いた物理リザーバーコンピューティング

○中島 涼介¹、渡部 誠也¹、加藤 浩之¹、赤井 恵¹ (1.阪大院理)

◆ 奨励賞エントリー

11:30 ~ 11:45

[10a-N106-9] 導電性ゲルを用いたインセンサーリザーバーコンピューティング

○(M1)畠中 茜¹、渡部 誠也¹、田中 稔佑紀²、加藤 浩之¹、赤井 恵¹ (1.阪大院理、2.阪大理)

◆奨励賞エントリー◆英語発表

11:45 ~ 12:00

[10a-N106-10] Polymer Wire Synaptic Device with Enhanced Endurance for Neuromorphic Wetware Computing

○(D)Adrian Dy Go¹, Seiya Watanabe¹, Hiroyuki S. Kato¹, Megumi Akai-Kasaya¹ (1.Osaka Univ.)

多電子系ランダムネットワークの識別タスクへの応用

Application of a Multiple-Electron Random Network to a Classification Task

渡邊 隼弥¹, 大矢 剛嗣^{1,2} 1 横国大院理工, 2 横国大 IMSShunya Watanabe¹, Takahide Oya^{1,2}

1 Grad. School of Eng. Sci., Yokohama Nat'l Univ., 2 IMS, Yokohama Nat'l Univ.

1. 研究背景

AI 技術の発展が目覚ましい一方で、それに伴う消費電力が課題となっている。このような背景のもと、近年、低消費電力な AI デバイスの実装方法として、脳の構造や機能をハードウェアレベルで模倣するニューロモルフィックデバイスが期待されている。

ニューロモルフィックデバイスの材料の一つとして、カーボンナノチューブ(CNT)とポリオキシメタレート(POM)というナノ材料が注目されている。これらのナノ材料で構成される CNT/POM ランダムネットワークは神経細胞のスパイクのような応答を示すことが報告されている[1]。

2. 研究内容

前回の報告[2]では、CNT/POM ランダムネットワークを想定して設計した多電子系ランダムネットワークのシミュレーション、また電流-電圧特性にヒステリシスが現れるなどの多電子系ランダムネットワークの振る舞いについて紹介した。

この多電子系ランダムネットワークのリザーバコンピューティングへの応用を目指しており、今回はその一環としてシミュレーションにて多電子系ランダムネットワークを用いたシンプルな識別タスクを試みた。

識別タスクとして、簡単な delayed XOR を用いた。ランダムに生成した 0,1 のビット列 $u(n)$ を用意した。また入力ビット列 $u(n)$ とその 1 ステップ前のビット列 $u(n-1)$ の排他的論理和 $t(n) = u(n) \oplus u(n-1)$ をターゲットとして用意した。ビット列 $u(n)$ の各ビットに対して、0 を -7V 、1 を $+7\text{V}$ に割り当て、一つのビットあたり 40000 タイムステップの間隔で台形状の電圧信号を生成した。この電圧信号を多電子系ランダムネットワークへ入力し、応答として得られる電流を観測した (Fig. 1 (a))。応答信号である電流は連続値で得られるため、ビットの間隔に合わせて 40000 タイムステップ毎に電流値の二乗を積分し、出力信号 $O(n)$ として扱った。このタスクにおける $u(n)$ 、 $t(n)$ 、及び $O(n)$ の一例を Fig. 1 (b) に示している。ここで、多電子系ランダムネットワークからの出力 $O(n)$ から $t(n)$ を判別できるかを確かめた。横軸に $t(n)$ と縦軸に多電子系ラ

ンダムネットワークからの出力信号である $O(n)$ をプロットした (Fig. 1 (c))。単純な閾値を設定することで $O(n)$ から $t(n)$ を判別できることが確認された。

この結果は、多電子系ランダムネットワークが排他的論理和の処理に求められるような非線形性を有することや、短期的な過去の入力の保持が可能であることを示しており、リザーバコンピューティングへの応用が期待される。詳細は講演にて述べる。

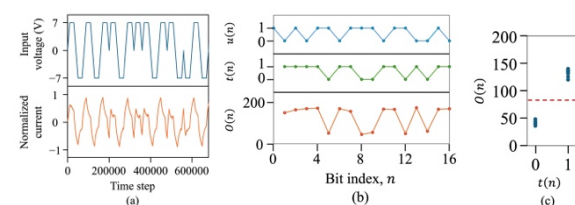


Fig. 1 (a) Input voltage (top) and normalized output current (bottom) plotted against simulation time steps. The input is a trapezoidal voltage signal corresponding to a random bit sequence, where bit values 1 and 0 are mapped to $+7\text{V}$ and -7V , respectively. The output current is normalized to the range from -1 to 1 and is dimensionless. (b) Input bit sequence $u(n)$, delayed XOR target signal $t(n) = u(n) \oplus u(n-1)$, and output signal $O(n)$ obtained from the multiple-electron random network. (c) Scatter plot of the output signal $O(n)$ versus the target value $t(n)$. A red dashed line indicates the threshold used for classification, which separates the outputs corresponding to $t(n) = 0$ and $t(n) = 1$.

【参考文献】

- [1] H. Tanaka et. al., Nature Communications, vol. 9, 2693, 2018.
- [2] 渡邊隼弥, 大矢剛嗣, 第 72 回応用物理学会 春季学術講演会, 17a-K306-4, 2025.

【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費・基盤研究 (A)(JP23H00169) および挑戦的研究 (萌芽)(JP23K17814)の助成を受け実施された。また JST 国家戦略分野の若手研究者及び博士後期課程学生の育成事業 (博士後期課程学生支援) JPMJBS2427 の支援を受け実施された。

Performance Enhancement of FeFET-based Reservoir Computing Using Substrate Bias

°Mingxia Wan, Eishin Nako, Shin-Yi Min, Mitsuru Takenaka, Shinichi Takagi, Kasidit Toprasertpong

The University of Tokyo, School of Engineering

E-mail: mxwan@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

1. Background: We have experimentally investigated physical reservoir computing using ferroelectric-gate FETs (FeFETs) [1,2]. To improve the performance of physical reservoirs [3], dynamics with nonlinearity and short-term memory characteristics are crucial. Previous studies have mainly focused on the effects of gate and drain input voltages [4]. In this study, we investigate how substrate bias input affects computing performance.

2. Experiment: A FeFET used in this experiment has a gate stack structure of TiN/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂/SiO₂/Si and its ferroelectricity has been confirmed. As shown in Fig.1, Time series random binary data was converted into a triangular voltage waveform V_g . The waveform was defined by a center gate voltage of 0.5 V, an amplitude of 3 V, a duration of 4 μ s. Binary inputs “1” and “0” are represented by positive and negative pulses, respectively. To confirm the effects of the substrate bias, a substrate bias V_{sub} was applied in the range from 0 V to -5 V. Drain and source currents were measured at 200 points each per pulse, and the obtained current waveforms were concatenated to generate 400 virtual nodes. Output weights were trained using these virtual nodes with ridge regression. Short Term Memory (STM) [5] task and Exclusive OR (XOR) [6] task were used to evaluate the computing performance.

3. Result and Discussion: Fig. 2(a) shows the reservoir performance under different substrate biases. It was confirmed that the reservoir performance was maximized at around -2V for all tasks. Fig. 2(b) shows the accuracy of the 3-bit input in the STM task, where the rightmost bit corresponds to the present input $u(t)$, the middle and the leftmost bit correspond to past time-step input $u(t-1)$ and $u(t-2)$. The accuracy clearly improved for input patterns “010” and “110”. As shown in the current waveforms under input pattern “010” in Fig. 3(a), the polarization switching current decreased as the substrate bias became more negative. Without substrate bias, the polarization is almost fully switched by the gate pulse, which results in less variety of polarization states. In contrast, when the substrate bias V_{sub} is applied, polarization switching under negative gate pulses is partially suppressed, helping achieve intermediate polarization states. This contributes to improved nonlinearity and short-term memory characteristics, thereby enhancing reservoir performance. On the other hand, as shown in the current waveforms under input pattern “011” in Fig. 3(b), more negative substrate bias V_{sub} makes channel formation under the gate stack difficult due

to the V_{th} increase by the body effect, leading to degraded reservoir performance.

4. Conclusion: The performance of FeFET reservoirs can be optimized by a moderate negative substrate bias. This improvement in performance is attributed to the trade-off between improved memory/nonlinearity characteristics due to partial suppression of polarization switching and the difficulty of channel formation by body effect.

5. Acknowledgement:

This work was supported by JST-CREST (JPMJCR20C3) and JSPS KAKENHI (23K20951).

6. Reference: [1] K. Toprasertpong, et al., Commun. Eng. 1, 21 (2022). [2] 名幸他、春季応用物理学会 16p-K306-9 (2025) [3] G. Tanaka, et al., Neural Networks 115, 100-123. (2019). [4] S.-Y. Min et al, Jpn. J. Appl. Phys. 63, 03SP19 (2024). [5] K. Fujii, et al., Phys. Rev. Applied 8, 024030 (2017). [6] R. Nakane, et al., Phys. Rev. Res. 3, 033243 (2021).

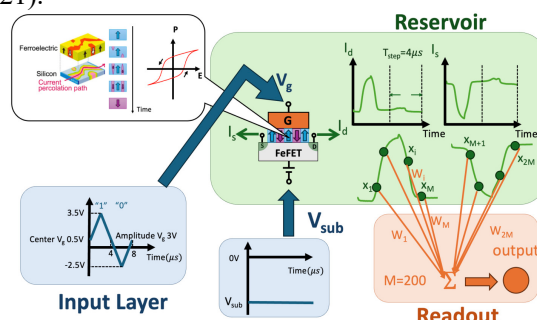


Fig.1 Operating schematic of FeFET reservoir computing with substrate bias.

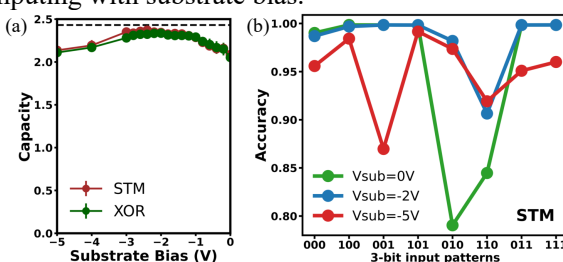


Fig.2 (a) Computing performance as a function of substrate bias. (b) Accuracy of STM task for given 3-bit history.

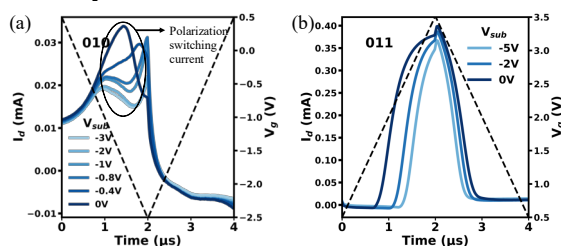


Fig.3 V_{sub} -dependent current waveforms of (a) input pattern “010” and (b) input pattern “011”.

イオンゲル/電極界面への金属カチオンのアクセス性制御による イオンゲル物理リザーバーの情報処理性能向上

Improvement in information processing capability of ionogel-based physical reservoir device through control of metal-cation accessibility to ionogel/electrode interface

産総研¹, [○]島 久¹, 日下靖之¹, 加納伸也¹, 高武正義¹

AIST¹, [○]Hisashi Shima¹, Yasuyuki Kusaka¹, Shinya Kano¹, Masayoshi Koutake¹

E-mail: shima-hisashi@aist.go.jp

【背景】物理リザーバー計算(PRC)はエッジ領域で省電力 AI 情報処理を実現するための有力な候補技術であり、その中核を担う物理リザーバー素子(PRD)の研究が様々な物理系・材料を対象として実施されている。イオン液体(IL)/電極界面における電気化学反応を利用した PRD もその一つであり、IL に添加した金属カチオンによるファラデー電流(FC)を含むデータセットは PRD の性能を向上させる[1]。IL をシリカ微粒子(SiO₂-NP)と混合してイオンゲル(IG)インクとし、印刷エレクトロニクス技術で IG をパターンニングした PRD (IG-PRD)は液体材料である IL を半導体微細加工プロセスへ導入する障壁を低減させ、デバイス構造の設計自由度も向上する。一方、ゲル化によって素子からの出力電流に含まれる FC 量が低減するという課題が生じる。電気化学反応中に界面にアクセスする金属カチオン量が増加すれば FC 量の低減を抑制できると考えられるが、電気二重層を構成する IL のカチオンと金属カチオンとのクーロン反発の抑制が必要である。本研究では金属カチオンへの中性分子の配位に着目し、界面への金属カチオンのアクセス性の制御を通じた IG-PRD の性能向上を検討した。

【実験方法】IG インクとして、[C₄mim][Tf₂N]インク(以降、C4 と記載)、[C₄mim][Tf₂N]とグリセリンカーボネート(GC)を混合(1:2)したインク(C4+GC)を調整した。いずれも Cu カチオンを添加している。C4 の Cu カチオン濃度(C_{Cu})は 0.4 M (飽和濃度)、C4+GC の C_{Cu} は 0.4 M および 1.0 M である。C4 (Cu 0.4M)、C4+GC (Cu 0.4 M)、C4+GC (Cu 1.0 M) のインクをそれぞれ IG1、IG2、IG3 とする。半導体微細加工プロセスと反転オフセット印刷[2]で上部電極(TE)/IG/下部電極(BE)構造のクロスバー(CB)型 IG-PRD を作製した (Fig. 1)。TE、BE の材料は Au であり、線幅は 50 μm である。IG 膜厚は約 300 nm である。電気特性評価と機械学習用データセット計測には Keysight B1500 を用いた(室温・大気中)。IG-PRD の機械学習(ML)性能は STM タスクの記憶容量(MC)で定量化した。入力信号は疑似ランダム信号であり、0 と 1 をそれぞれ負および正の三角波電圧パルスで表現した。出力電流のデータセットをもとに、リッジ回帰で ML モデルを作成した。重みは正規方程式の解析解として決定した。データセット数は 400、トレーニングとテストデータの割合は 8:2 とした。また、データは仮想ノード(VN)法で高次元化した。

【結果・考察】Fig. 2(a)の入力 1 に対する出力電流波形(パルス波高 1.2V、パルス幅 100 ms)の一例を Fig. 2(b)に示す。縦軸は規格化した電流値、横軸はデータ番号(VN 番号)である。ここで、全データ(All)のうち VN 番号 1~25 のデータを“前半(1st half)”、VN 番号 26~50 番のデータを“後半(2nd half)”とする。Fig. 2(b)の矢印が示す FC は前半に多く含まれ、そのピークは IG3 で最も明瞭に観測される。Fig. 3 は STM タスクの MC と IG インク材料の関係である。MC は ML に用いるデータセットが All の場合、1st half の場合、および 2nd half の場合の 3 条件で評価した。まず All に着目すると、MC は C_{Cu} が高い IG3 で最大であるが、C_{Cu} が同等の IG1 と IG2 では IG1 < IG2 である。また、1st half の MC は 2nd half よりも大きく、All と同様の IG 材料依存性を呈する。よって、MC の IG 材料依存性は FC を多く含む 1st half のデータセットに由来し、IG2 では Cu カチオンに GC が配位して[3]界面へのアクセス性が向上し、IG1 よりも FC が増加して MC が向上したと推察される。また、C_{Cu} が高い IG3 では IG/電極界面にアクセスできる Cu カチオン量が IG2 よりも多く、FC 量がさらに増加して MC が向上したと考えられる。本研究を通じて、IG-PRD のインク材料最適化に向けた指針が得られた。

【謝辞】本研究の一部は、村田学術振興・教育財団からの助成を受けて実施した。

【参考文献】[1] T. Matsuo *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces (2022). [2] Y. Kusaka *et al.*, Flexible and Printed Electronics (2022). [3] J. H. Huang *et al.*, Electrochimica Acta (2022).

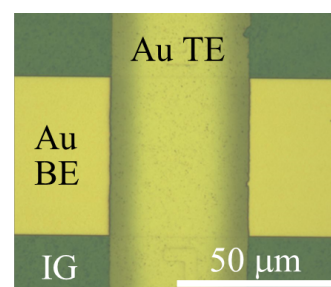


Fig. 1 Optical microscope image of CB-type IG-PRD. TE and BE material is Au.

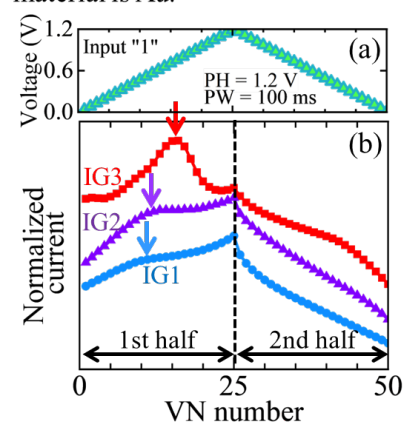


Fig. 2 (a) Input and (b) output signal of IG-PRD as a function of VN number.

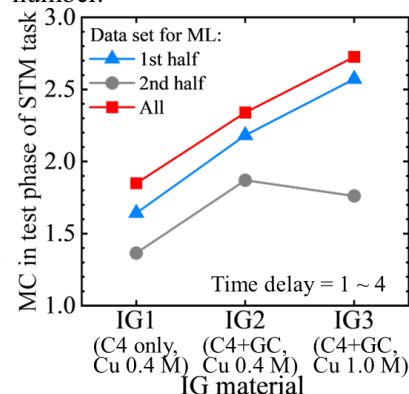


Fig. 3 IG material dependence of MC values in IG-PRD evaluated using different dataset.

銅イオン添加イオン液体リザーバーにおける光照射ウォームアップ効果

Photo-Induced Warm-Up Effect in Copper-Ion-Doped Ionic Liquid Reservoirs

東理大先進工¹, 産総研², 鳥取大工³, 神戸大理⁴°山上雅仁^{1,2}, 島 久², 野上敏材³, 持田智行⁴, 内藤泰久², 秋永広幸², 鄭 雨萌¹, 木下健太郎¹Tokyo Univ. of Sci.¹, AIST², Tottori Univ.³, Kobe Univ.⁴°M. Yamanoue^{1,2}, H. Shima², T. Nokami³, T. Mochida⁴, Y. Naitoh²,H. Akinaga², Y. Zheng¹ and K. Kinoshita¹

E-mail: 8425538@ed.tus.ac.jp

[序論] 我々はイオン液体 (IL)/電極界面で生じる電気化学反応を利用した物理リザーバードバイス (IL-PRD)の研究を進めてきた。これまでに, Cu-IL/電極界面上での酸化還元反応に伴うファラデー電流ピークが物理リザーバーの情報処理性能を高めることを明らかにし, その制御手法としてイミダゾリウム系 IL の官能基置換が有効であることを示した^[1]。本研究では, 反応過程で界面に形成されうる Cu 化合物 (Cu₂O や Cu_xS)の光電気化学応答^[2]による反応活性化を狙い, 機械学習(ML)性能に対する光照射効果を調べた。その結果, 光照射下でのウォームアップ (前処理) により未照射に比べ高い ML 性能が実現した。

[実験方法] 光照射が電気化学反応に及ぼす影響を 3 電極(3E)マイクロ電気化学セル (Fig. 1(a))で, ML 性能に及ぼす影響を 2 電極(2E)マイクロ電気化学セル(Fig. 1(b))でそれぞれ評価した。3E 測定は, 光照射あり/なし(以降, 明/暗条件と記載)で行い, 掃引速度は 1 V/s に固定した。ML 性能に対する光照射の影響を評価する際には, 前処理として明/暗条件下で正負の三角パルス電圧を交互に 600 cycle 印加した後にベンチマークタスク(STMタスク, NARMA2タスク)を実施した。前処理の電圧掃引速度は 500 mV/s とした。タスク実行時には, 正負の三角波パルス電圧をそれぞれ“1”と“0”と定義し, ランダムなバイナリ時系列信号をリザーバーに入力した。ここで, 電圧振幅を 3 V, 掃引速度を 500 mV/s とした。ML 性能評価用の出力データの計測は全て暗条件で実施した。出力データは仮想ノード法で高次元化した。リザーバーに用いた IL は 0.4 M の Cu(Tf2N)2 を添加した[C3CNmim][Tf2N]であり, 光源には 1860 cd の白色 LED を用いた。

[結果及び考察] Figs. 2(a)および 2(b)は明/暗条件それぞれの 3E 測定の結果である。電流ピークの形状や電圧値をもとに先行研究^[1]に基づいて反応の種類を解析し, 酸化 O1 および還元 R2 は Cu の 0 価⇌1 価の酸化還元反応, 酸化 O2 および還元 R1 は 1 価⇌2 価の酸化還元反応と特定した(Figs. 2 の矢印)。なお, Figs. 2(a)および 2(b)の測定はそれぞれ 0 価⇌1 価の反応のみ, および 1 価⇌2 価の反応のみが生じる電圧範囲で行っている。Figs. 2 が示すように, 光照射によって 0 価⇌1 価, 1 価⇌2 価の電流ピークはどちらも増大するが, その増大は特に前者において著しい。Fig. 3(a)および 3(b)は明/暗条件それぞれのウォームアップを施したリザーバーに対し, ランダム信号を印加して計測した出力電流波形である。2 タイムステップ前までの信号入力順(クラス)に基づいて電流波形を色分けしている。前処理が暗条件の場合は電流波形にピークは無く単調な波形であるが(Fig. 3(b)), 明条件の場合は 1 V 付近に明瞭な電流ピークが観測される(Fig. 3(a))。これらのデータをもとに STM タスクを実行した結果, 前処理が暗条件のデータでは MC = 2.45, 明条件のデータでは MC = 2.95 であった。また, NARMA2 タスクの誤差は前処理が暗条件の場合は NMSE = 0.018, 明条件の場合は NMSE = 0.016 となり, 明条件で前処理したリザーバーの ML 性能がより高いことが分かった。これらの結果は, 前処理中の光照射により電流波形中に現れた 1 V 付近のピークが ML 性能の向上に寄与していることを示す。この電流ピークの出現は, 前処理の電気化学反応の過程で Cu-IL/電極界面に形成される Cu 化合物(Cu₂O や Cu_xS)が, 明条件の下ではその光電気化学応答によって反応を活性化させ, 電極表面に Cu の酸化還元反応を促す生成物が生じたことによるものと示唆される。今後, 光照射前後で組成分析を行い, 本仮説を検証する。

[参考文献] [1] Y. Kubo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. (2025). [2] Z. Li and Z. Zhang, Nano Research (2018).

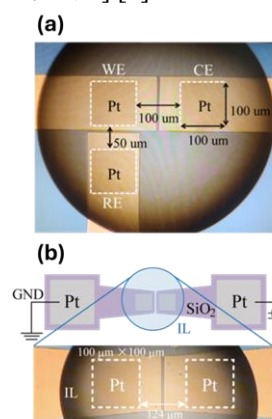


Fig. 1 Micro electrochemical cell with (a) 3E and (b) 2E device structure.

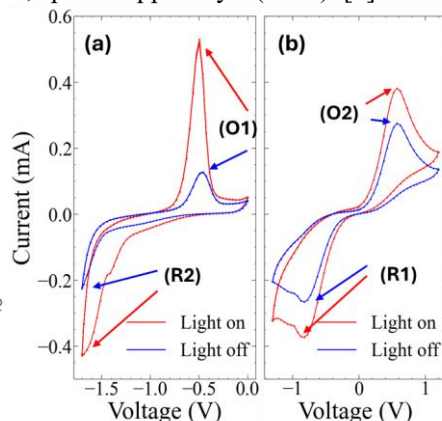


Fig. 2 Light illumination effect on 3E measurement: (a) Cu(0)⇌Cu(I) and (b) Cu(I)⇌Cu(II).

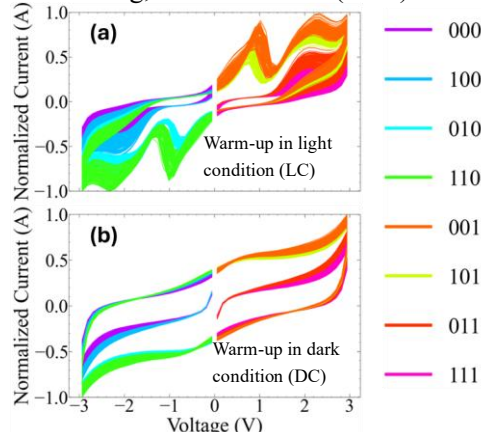


Fig. 3 Color-coded current waveforms measured by applying random binary data stream after warm-up in (a) LC and (b) DC.

イオン液体リザーバーの学習性能における高分子封入効果

Effect of polymer encapsulation on the learning performance of ionic liquid reservoir

東理大先進工¹, 第一工業製薬(株)² ◯(M1)山本 里茉¹, 鄭 雨萌¹,

矢野 敬将², 石田 久征², 浜田 昂², 村上 賢志², 木下 健太郎¹

Tokyo Univ. of Sci.¹, Daiichi Kogyo Seiyaku Co., Ltd.², ◯Rima Yamamoto¹, Yumeng Zheng¹,

Keisuke Yano², Hisayuki Isida², Akira Hamada², Satoshi Murakami², Kentaro Kinoshita¹

E-mail: 8425539@ed.tus.ac.jp

【序論】我々はこれまで、イオン液体(IL)の高いデザイン性を生かし、生活環境で発生する信号の多くが対象となる $10 \mu\text{s}$ - 1 ms のスローな信号を広くカバーする物理リザーバーとして、高い適性を持つことを示した^[1]。一方で、IL の流動性は、安定な構造形成を困難にするため、デバイス作製上の課題となっている。本研究では、IL のポリマ封入がリザーバー応答特性に及ぼす影響を評価し、流動性の抑制と学習性能の向上・制御性の関係について議論した。

【実験方法】IL として[C₂mim][Tf₂N] (C2)と[C₈mim][Tf₂N] (C8)を用いた。カチオンのアルキル側鎖長および粘性率は $C2 < C8$ である。IL をポリマと混合し、Au 電極アレイをパターンニングしたエポキシ樹脂基板上に滴下し、光架橋を行うことでデバイスを作製した(以下 poly-C2, poly-C8 と表記)。インピーダンス分光法を適用し、コンダクタンス G の角振動数 ω 依存性を評価した。また、正、負三角電圧パルスで“1”、“0”とそれぞれ定義し、ランダム値データとして入力した。出力電流を用いて短期記憶特性(STM)タスクを実行し、記憶容量(MC)のパルス幅(PW)依存性を評価した。

【結果及び考察】Fig. 1 挿入図に poly-C2 の写真を示す。ポリマへの封入により、可視光に対して透明な固体が得られた。Fig. 1 に poly-C2, poly-C8, 単体 IL の C2, C8 の G/ω ($\propto$ 誘電率虚部 ϵ'') の周波数依存性を示す。 ϵ'' のピーク位置より見積もられる緩和時定数 τ は粘性の低下により短くなる。また、側鎖の短い C2 はポリマへの閉じ込めの影響を強く受け、 τ が 1桁長くなったが、側鎖の長い C8 ではポリマの影響が弱く τ はわずかに長くなった。Fig. 2 に MC の PW 依存性を示す。IL の MC は緩和時定数近傍で最大となった。また、ポリマへの封入により C2 の短 PW における MC は低下したが、中-長 PW での MC が広く向上することも示された。本結果より、IL のポリマ封入は、流動性を抑えるだけでなく、IL-ポリマ間の相互作用をデバイス設計に取り入れることで、IL リザーバーの性能向上に寄与しうることが示された。

[1] 山本他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 14p-P06-15.

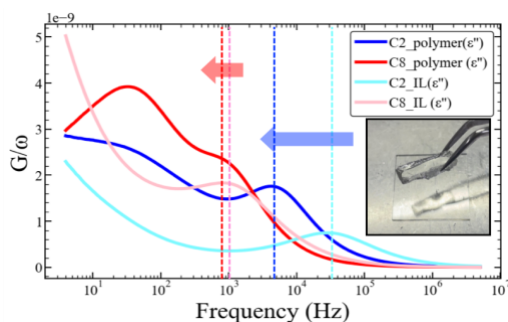


Fig. 1 Frequency dependence of imaginary part of permittivity.

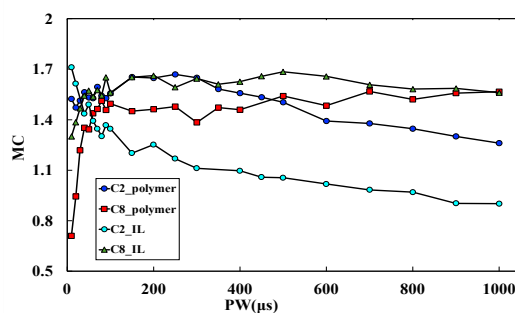


Fig. 2 dependence of MC on pulse width for STM tasks

一般セッション(口頭講演)| FSフォーカストセッション「AIエレクトロニクス」: FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

2025年9月10日(水) 9:00 ~ 12:00 | N106 (共通講義棟北)

[10a-N106-1~10] FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

丸亀 孝生(北大)、吉川 宜史(Rapidus)

先端半導体AIに関する招待講演1件、リザバーコンピューティング、物理リザバー、センサAI融合、センサ内AI、新原理コンピューティング技術: 材料/デバイス

10:30 ~ 11:00

[10a-N106-6] [分科内招待講演] Rapidusが提供する短TAT設計環境Raads(Rapids AI-Assisted Design Solution)のご紹介

○鶴崎 宏亀¹ (1. ラピダス株式会社)

キーワード: 短TAT、ML/AI (Machine Learning and Artificial intelligence)、設計環境

Rapidusが提供する短TAT設計環境Raads(Rapidus AI-Assisted Design Solution)について紹介します。ML/AIを活用することで設計生産性の向上、早期のデザイン収束を実現します。また、従来のRTL-GDSのフローより上流の設計をサポートする環境を提供することで物理情報考慮のShift leftを実現し、短TATの実現を目指します。

波長依存型双極性色素増感人工シナプス素子の創製と 物理リザーバー応用

**Fabrication of wavelength-dependent bipolar dye-sensitized artificial
optoelectronic synapse and their application in physical reservoir computing.**

東理大先進工 ○小松 裕明, 細田 乃梨花, 生野 孝

Tokyo Univ. of Science, °Hiroaki Komatsu, Norika Hosoda, Takashi Ikuno

E-mail: tikuno@rs.tus.ac.jp

従来のシリコンベースのマシンビジョンシステムは、データ処理や保存のために膨大な計算資源とエネルギーを必要とすることから、生体診断やセキュリティカメラといったエッジ用途には適さない。そこで、省電力で動作する効率的なビジョンシステムを目指して、人間の知覚システムに着想を得た光電子人工シナプスが注目されている。我々はこれまでに、色素増感太陽電池(DSC)が自身の発電した電力のみでシナプ斯的応答を示し、動作認識や時系列データ処理を実行できることを示した¹。しかし、従来の素子では波長の識別ができず、カラービジョンシステムとしての応用には課題があった。波長識別が可能となれば、視覚情報の多様化に加え、血中酸素濃度(SpO₂)²や心拍数³などの生体信号計測への応用も期待される。

本研究では、自己発電型の人工光電子シナプス素子に波長識別能力を付与することを目的として、異なる二種類の色素(SQ2 および D131)で増感されたDSCを逆方向に接続した新規構造のデバイスを作製し、単色光照射に対する電気的特性とシナプス特性を評価した⁴。

FTO ガラス上に TiO₂ 多孔質膜を作製し、それぞれ二種類の色素(SQ2, D131)を吸着させ光極とした。2つの光極はヨウ素系電解液を介して共通の Pt 板に接続されている。図 1(a)に本素子のバンド図を示す。作製したデバイスに単色光($\lambda = 460 - 620$ nm)パルス照射し、開放電圧の過渡応答を測定した。出力電圧の符号は入力波長によって反転し、 $\lambda = 510 - 570$ nm 付近では 10 nm オーダで応答が変化した(図 1b)。青色光($\lambda = 460 - 500$ nm)照射で正電圧、赤色光($\lambda = 570 - 620$ nm)照射で負電圧が観測され、照射停止後にはゼロ電圧に復帰する応答がみられた。これは、赤色を吸収する SQ2-DSC が逆方向、青色を吸収する D131-DSC が正方向に接続されているため、発生した電圧の差分が出力として観測されたと考えられる。この結果は、本デバイスが赤、青、緑の各色を識別できる可能性を示唆するものである。当日は、本デバイスの波長依存型双極性応答の動作メカニズムに加え、波長入力に対するシナプス応答、本素子を物理リザーバーとして動作させた際の分類タスク、動作認識タスクの結果について報告する。

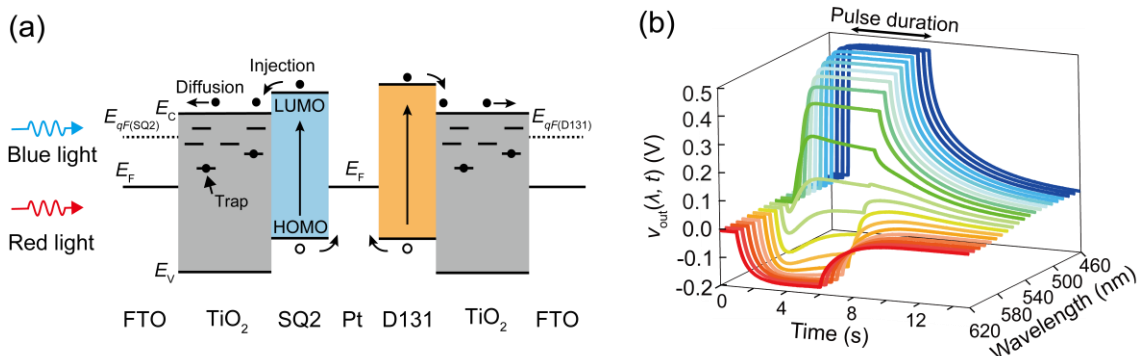


Fig.1 (a) Band diagram of the bipolar dye-sensitized optoelectronic artificial synapse. (b) Open circuit voltage dynamics under light pulse with various light wavelengths.

【謝辞】本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2144, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151, JSPS 科研費 JP25KJ2114, 東京理科大学トップ研究者育成支援費, 村田学術振興・教育財団研究助成の支援を受けたものです。[1] H. Komatsu et al. ACS Appl. Mater. Interfaces 17, 3, 5056–5065(2024). [2] Y. Zhang et al. Sensors 19, 673(2019). [3] C. Shen et al. Sensors 22, 328(2022). [4] H. Komatsu et al. Sci Rep 15, 16488 (2025).

液晶の電気対流によるパターン形成を用いた 物理リザーバーコンピューティング

Physical reservoir computing using pattern formation
by electrohydrodynamic convection of liquid crystals.

阪大院理¹ ○中島 涼介¹, 渡部 誠也¹, 加藤 浩之¹, 赤井 恵¹,

Osaka Univ.¹, °Ryosuke Nakajima¹, Seiya Watanabe¹, Hiroyuki S. Kato¹, Megumi Akai-Kasaya¹

E-mail: nakajimar22@chem.sci.osaka-u.ac.jp

はじめに：ネマチック液晶を封入した液晶セルに電圧を印加すると、液晶の電気力学的不安定性によって対流が生じ、配向変化による特徴的なパターンが観察される[1]。このパターンは、印加する電圧の大きさや周波数を変化させることで他の様々なパターンへと転移する。加えて、液晶の配向状態は偏光顕微鏡などによって比較的容易に観察できるため、液晶を用いた非線形・非平衡系に関する研究がこれまで数多く行われてきた。本研究では、このネマチック液晶の電圧印加によるパターン形成に着目し、物理リザーバーコンピューティングに利用した。

実験：ITO 電極が蒸着されたガラス基板の間に、スペーサーとして厚みが 12.5 μm の絶縁性ポリイミドフィルムを挟むことで、電極間にギャップをもつサンドイッチ状のセルを作成した(Fig. 1)。試料は、負の誘電異方性を示すネマチック液晶の MBBA(*N*-(4-Methoxybenzylidene)-4-butylaniline) に 0.01 wt% の TBAB(Tetrabutylammonium Bromide)を添加したものをを用い、これをセル中に封入した。この液晶セルに直流電圧を印加すると、電圧の大きさに応じたパターンが形成される(Fig. 2)。物理リザーバーの測定として、液晶セルにランダムな大きさの直流電圧を印加した際のパターンの形成と変化の様子を偏光観察法により撮影した。入力毎に撮影された画像を空間的に分割し、領域ごとに画像の明度を計算し、この値をリザーバーのノードとして用いた。ベンチマークタスクには NARMA2 を採用し、リッジ回帰による学習後の予測精度を求めた。

結果と考察：ランダム入力を与えた液晶の応答を用いて、NARMA2 方程式を学習させた後のリザーバー出力を Fig. 3 に示す。この正規化平均二乗誤差(NMSE)は 0.168 であり、非線形な時系列予測が可能であることが示された。液晶のパターン形成は、印加電圧に依存した応答を示すことに加えて、時空間的な緩和現象を示すため、物理リザーバーに必要な複雑で多様な応答が得られると考えられる。他の解析や詳細については当日報告する。

参考文献： [1] R. Williams, *J. Chem. Phys.* **39**, 384-388 (1963)

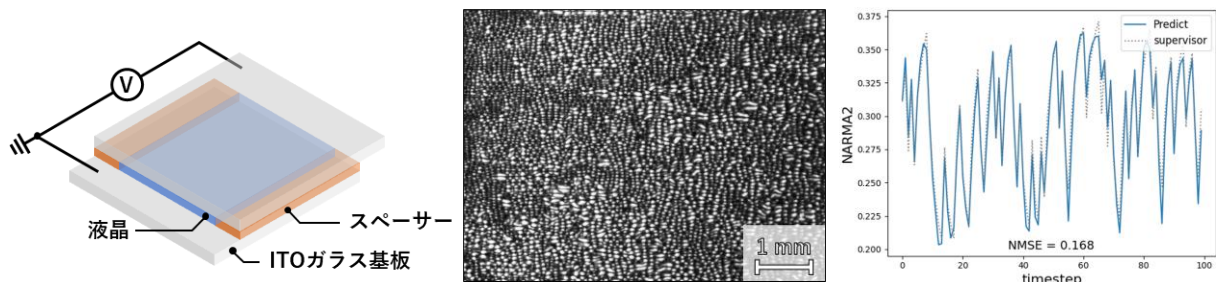


Fig. 1 Schematic of liquid crystal cell Fig. 2 Pattern of liquid crystal (3V) Fig. 3 Result of NARMA2 task

導電性ゲルを用いたインセンサーリザーバーコンピューティング

In-sensor reservoir computing with conductive gel

阪大院理¹ 阪大理² ○(M1) 畠中 茜¹, 渡部 誠也¹, (B) 田中 稔佑紀², 加藤 浩之¹, 赤井 恵¹

Osaka Univ.^{1,2}, ○Akane Hatanaka¹, Seiya Watanabe¹, Toshiyuki Tanaka²,

Hiroiyuki S. Kato¹, Megumi Akai-Kasaya¹

E-mail: hatanakaa24@chem.sci.osaka-u.ac.jp

リザーバーコンピューティング(RC)はリカレントニューラルネットワークの一形態であり、中間層の学習が不要で計算コストが低いという特長がある。近年、センサーとリザーバー素子を統合し、センサー信号を直接アナログ領域で処理する手法が提案されている。このようなアーキテクチャはインセンサーRCと呼ばれ、デバイスの小型・簡素化が可能なことから、エッジ環境での応用が期待できる。インセンサーRCでは、様々な信号（光、ひずみなど）を入力とするため、目的の信号に感応し、かつ、出力応答の非線形性や短期記憶特性などのRCに必要な性能を有する材料が探索されている。

PEDOT:PSS 導電性ゲルは、変形時の導電性変化が報告されており[1]、一定電圧印加時に入力変位を入れると、変形による出力電流変化が得られる。また、ゲルの粘弾性に由来する変形の緩和挙動は短期記憶特性に寄与すると予想されることから、RCに必要な性能を有すると考えられる。加えて、PEDOT:PSS ゲルは3Dプリンティングにより複雑な3次元構造体を作製することが可能であり[2]、構造制御により剛性・応答電流を調整することで、リザーバー性能向上も期待できる。以上を背景として、本研究では、PEDOT:PSS ゲルを用いたひずみインセンサーRCの開発を試みた。

測定に用いた装置の概略図を Fig.1 に示す。作製したゲル試料を PTFE 製の平板で挟み、上

部平板を上下動させて入力変位を加えた。ゲルには一定電圧を印加し、流れる電流値を測定した。さらに、下部平板に取り付けたロードセルにより、荷重の変化も同時に計測した。検出電流と入力変位による荷重の関係 (Fig.2) から、非線形な応答が確認された。本発表では、短期記憶特性などリザーバーに必要な性能を評価するとともに、インセンサーRC 応用における PEDOT:PSS ゲルの有用性について調査し報告する。

参考文献:

- [1] Wang et al., *Sci. Adv.*, **3**, e1602076(2017).
- [2] X. Y. Cheng et al., *Chemical Engineering Journal*, **470**, 144058 (2023).

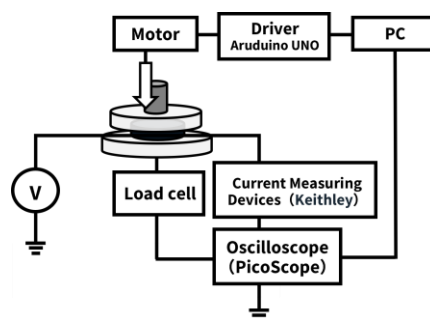


Fig.1 Schematic of measurement system

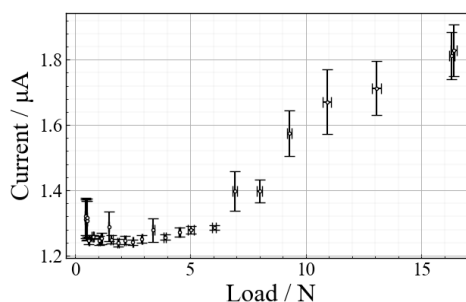


Fig.2 Relationship between applied load and detected current of PEDOT:PSS gel (N=4)

Polymer Wire Synaptic Device with Enhanced Endurance for Neuromorphic Wetware Computing

Department of Chemistry, Graduate School of Science, Osaka University¹, [○]Adrian D. Go¹, Seiya Watanabe¹, Hiroyuki S. Kato¹, Megumi Akai-Kasaya¹

E-mail: adriang24@chem.sci.osaka-u.ac.jp

The recent surge in Artificial Intelligence (AI) usage has necessitated the demand for higher-performance and energy-efficient computing architectures beyond the traditional Von Neumann architecture. Neuromorphic computing offers an alternative approach by integrating memory and processing units, thereby emulating the parallel nature of the biological brain. Organic-based synaptic devices are one of the promising platforms for neuromorphic devices due to their intrinsic flexibility, biocompatibility, and tunable properties. Nevertheless, organic materials have drawbacks, such as structural degradation and operational instability remain an obstacle. It is essential for materials to have stable cycling endurance to reliably support long-term memory processing. In this study, we report on the fabrication of a two-terminal synaptic wetware device based on hydroxymethyl PEDOT:sodium dodecyl benzene sulfonate (PEDOT-MeOH:SDBS) polymer wires (**Fig. 1a-b**). The polymer wire was grown between two Au electrodes via electropolymerization. Synaptic behavior was induced by applying repeated voltage pulses on one side of the wire which resulted in a thicker region. This structural asymmetry enabled the short-term potentiation/depression (STP/STD) characteristics (**Fig. 1c**), which were attributed to the uneven ionic doping and dedoping process

across the wire upon voltage application. Furthermore, the wire exhibited excellent endurance (>100 cycles) against repeated voltage (± 1.1 V, width = 25 ms) pulses when suspended in ethylene glycol (**Fig. 1d**). To demonstrate the applicability of the device for neuromorphic computing, we implemented the device for convolutional neural network (CNN) digit recognition. The training involved directly utilizing the physical conductance states of the polymer wires as kernels in a closed-loop system. At every epoch, backpropagation was used to obtain new target weights, which were mapped to the conductance of polymer wires via voltage tuning. The resulting training achieved an accuracy of 96% over 450 epochs for classifying 5x5 digits from 0-9. Our work highlights the feasibility of using polymer-based wetware synaptic devices for brain-inspired systems.

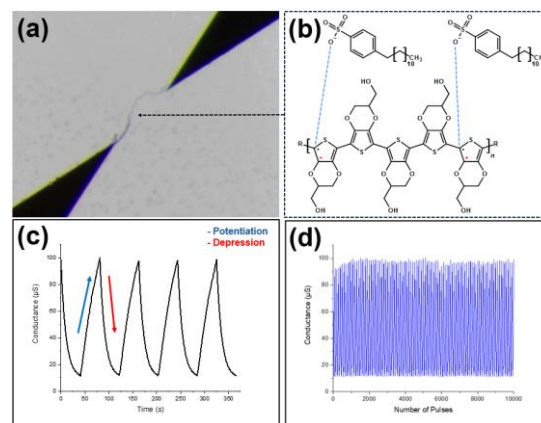


Figure 1. (a) PEDOT-MeOH:SDBS synaptic device, (b) structure of PEDOT-MeOH:SDBS polymer wire, (c) STP and STD synaptic behavior of polymer wire, (d) endurance cycling of polymer wire