

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

田中 啓文^{†a)} 赤井 恵^{††} 浅井 哲也^{†††} 小川 琢治^{††††}

A Molecular Neuromorphic Random Network Device Consisting of Single-Walled Carbon Nanotubes Complexed with Polyoxometalate

Hirofumi TANAKA^{†a)}, Megumi AKAI-KASAYA^{††}, Tetsuya ASAI^{†††}, and Takuji OGAWA^{††††}

あらまし 昨今非常にホットな研究テーマとなっている AI ハードウェアとは対照的に、ニューロモルフィックハードウェアは神経科学に基づいており、スパイクニューロンとその高密度で複雑なネットワークの両方を構築することが「知能」を得るために不可欠である。しかしながら、現在のニューロモルフィックデバイスの集積密度は、人間の脳に比べはるかに及ばない。本論文では、単層カーボンナノチューブ (SWNT) とポリオキソメタレート (POM) の複合体が形成した動的で非常に高密度のネットワークからなる分子ニューロモルフィックデバイスに関して得られた実験結果を中心に、最近得られた結果を加えつつ解説する。

キーワード インパルス発生, リザーブ計算, ニューロモルフィックデバイス, マテリアル知能

1. ま え が き

近年、脳型コンピューティングが知的で堅牢で低消費電力のコンピューティングを実行可能と期待されており、大きな注目を集めている。その一方で、ノイマン型ベースのコンピュータのうち、従来のアルゴリズムベースのコンピューティングの重要性が低下する可能性がある [1]。これまで、MIT や NVIDIA の Eyeriss プロセッサ [2]、機械学習スーパーコンピュータ (DaDianNao) [3]、市販の汎用グラフィック処理ユニット (GP-GPU) などのノイマン型シリコンベース

の AI アクセラレータを使用して、学習認知能力を有するデバイスを実現しようとしてきた。上述のシリコンベースのニューロアクセラレータはそのような知的機能を提供する。しかしながら、それらは高度なコンピュータ科学と工学を融合することにより実現しているものの、現代の神経科学に基づいていないため、その用途は現状パターン分類や推論などに限定されている。一方、ニューロモルフィックハードウェアは、ニューロサイエンスに基づいており、より高レベルの脳機能を再現する優れた機会を提供してくれる。現代のニューロモルフィックハードウェア (例えば、IBM のニューロシナプスチップ (TrueNorth) [4]、アナログまたはデジタルニューロモルフィック集積回路 [5], [6] など) では、神経インパルス (スパイク) 生成を模倣する人工スパイクニューロン及びそれらの高密度で複雑なネットワークの構築が必要である。スパイクを使用して神経細胞情報をコード化することは、ノイズが多く信頼性の低い環境で神経細胞膜 (能動伝達ライン) への作用を伝達する上で機能的に重要である [7]。スパイクニューラルネットワークを実用化することによる有用性はいまだ不明である。しかしながら、大規模スパイクニューラルネットワークによって生成

[†] 九州工業大学生命体工学研究科, 北九州市
Graduate School of Life Science and Systems Engineering,
Kyushu Institute of Technology, 2-4 Hibikino, Wakamatsu,
Kitakyushu-shi, 808-0196 Japan

^{††} 大阪大学工学研究科, 吹田市
Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1
Yamadaoka, Suita-shi, 565-0871 Japan

^{†††} 北海道大学情報科学研究院, 札幌市
Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido
University, Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo-shi, 060-
0814 Japan

^{††††} 大阪大学大学院理学研究科, 豊中市
Graduate School of Science, Osaka University, 1-1
Machikaneyama, Toyonaka-shi, 560-0043 Japan

a) E-mail: tanaka@brain.kyutech.ac.jp

された複雑で自発的なダイナミクスが未知音源の分離 [8], リザーブコンピューティング [9] などに役立つことが最近になって実証されてきている。

現在のニューロモルフィックハードウェアはシリコン相補型金属酸化物半導体 (CMOS) のみで構成されており, 現在のニューロモルフィックシステムでは, 潜在的な知的情報処理能力を直接表す集積密度と配線の複雑さの両方が人間の脳に比べはるかに低い [10]. 本論文では, 現在のシリコン CMOS アナログ及びデジタルニューラルプロセッサに代わるものとして, ポリオキソメタレート (ポリ酸, POM) [11] と複合体を形成した単層カーボンナノチューブ (SWNT) のランダムネットワークで構成される, 非常に高密度の分子ニューロモルフィックネットワークデバイスを紹介する。

アナログのニューロモルフィックハードウェアを構築するためには, シナプスデバイスとニューロン膜の少なくとも 2 種類のデバイスが必要である. シナプスデバイスは, ニューロンデバイスの軸索ワイヤと樹状ワイヤとの間の交差点にあり, その結合強度が記憶されている記憶接合部として機能する. これまでにカーボンナノチューブ (CNT) ネットワークからなるシナプスデバイスが提案されている [12]. ニューロンデバイスはスパイク (神経インパルス) を生成し, 軸索と樹状突起相当のワイヤを介して別のニューロンにインパルスを伝達する [13]. このようなニューロンデバイスは, 材料科学における最近の著しい進歩にもかかわらず, 深く研究されていない. 金属 CNT ベースの導体は豊富なダイナミクスで大きな電気ノイズを生成するため, SWNT はニューロンデバイスの材料として優れた候補となる [14]~[16]. 更に, SWNT の電子状態と伝導特性は, 吸着された分子種の種類によって大きく異なることも報告されている [17], [18]. ケギン型ポリ酸 (POM) の一種であるホスホドデモリブデン酸 ($\text{H}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$, 以下 PMo_{12}) は, 高配向性熱分解グラファイト (HOPG) 上で可逆的な多電子酸化還元特性 [19]~[21], 電子的汎用性 [22], [23], 負性微分抵抗 (NDR) [24] を示すことが報告されている。

本論文では, 大規模なスパイクングニューラルネットワークを模倣した高密度で複雑なスパイクング分子 (PMo_{12} 粒子 [25]) のネットワークからなる複雑な SWNT/POM ネットワーク分子ニューロモルフィックデバイスを紹介する. 製作した SWNT/POM ネットワークにより得られた実験結果に基づいて, 最初

にその NDR と雑音特性を議論し, 次にその集団的インパルス発生を実証した. 可能性のあるインパルス生成メカニズムを明らかにするために, 分子接合の二次元 (2D) 構造を仮定したネットワークの抽象モデルを提案し, 実験結果をよく再現した. 更には, ネットワークの基本的な学習能力をシミュレーションし, SWNT/POM ネットワークモデルがリザーブコンピューティング [26], [27] に利用可能であることを示した。

2. 結 果

原子間力顕微鏡 (AFM) によって観察した Si 基板上に個別に配置した SWNT/POM 複合体の典型的な構造を図 1a に示す. バンドルの SWNT 及び吸着された POM 粒子の両方は, 数ナノメートルの直径を有する. 複合体の全厚は約 10 nm である. 点接触電流イメージング (PCI-) AFM [18], [28], [29] によって個々の錯体において測定された電流-電圧 (I-V) 特性を図 1b に示す。

AFM コントローラでは電圧掃引速度はミリ秒オーダーに固定されていて速いため, この測定は予備的なチェックに用いた. SWNT/POM デバイスの NDR 特性のためにバイアス電圧が増加するにつれ, 電流は非単調に増加し, 幾つかのピークが見られた. POM 粒子に起因する NDR は, POM の多重酸化還元反応の結果であると考えられる. NDR のピーク位置は, 電気陰性度と還元電位とに密接に関係していると考えら

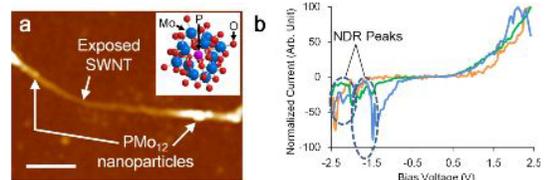


図 1 SWNT ポリ酸複合体 [30] (a) SWNT/POM 複合体の AFM 像 (スケールバー = 200 nm). (挿入図) 既報の X 線結晶構造から再現した PMo_{12} の分子構造. (b) PCI-AFM によって測定された SWNT/POM 複合体の I-V 特性. 幾つかの NDR ピークがみられた。

Fig. 1 SWNTs complexed with POM. [30] (a) AFM image of the SWNT/POM complex. (Inset) Molecular structure of PMo_{12} , reproduced from its reported X-ray crystallographic structure (scale bar = 200 nm). (b) I-V characteristics of the SWNT/POM complex, measured by PCI-AFM, where several NDR-related peaks are observable.

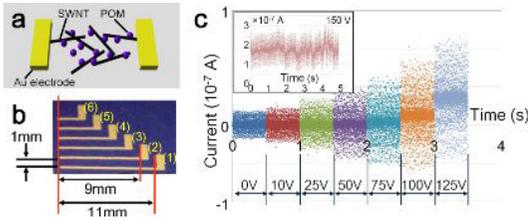


図 2 SWNT/POM ネットワークデバイスの電流測定と雑音発生 [30] (a) SWNT/POM 複合体ランダムネットワークの模式図. (b) 六つの電極を配置した基板の写真. 基板全体が SWNT/POM 複合体ランダムネットワークで覆われている. (c) サンプル A における, バイアス電圧 V_B が 0 V から 125 V まで段階的に増加した際の電流の経時変化.

Fig. 2 Experimental setup and noise generation of the SWNT/POM network. [30] (a) Schematic of a network with the SWNT/POM complex network. The yellow cuboids, black tubes, and purple spheres represent the terminal electrodes, SWNTs, and POM particles, respectively. (b) Photograph of the substrate including six terminal electrodes. The entire substrate was covered with the SWNT/POM complex. (c) Sampled current density over time, representing the current magnitude distributions, with the bias voltage V_B increasing stepwise across the electrodes from 0 V to 125 V for sample A.

れる [23]. しかしながら, 図 1b に示す I-V プロットにおける NDR の位置は一意的ではない. 周囲の対イオンとの反応によっては, NDR の特性に大きな影響を与える可能性がある. しかしながら, POM 粒子の NDR 現象は基本的には水分存在下での酸化還元反応に起因することはわかっているが, いまだ完全には理解されていない.

SWNT/POM ネットワークの電気的性質を調べた. 図 2a は, SWNT/POM デバイスの模式図を表しており, 複合体ネットワーク構造を形成する様子を示す. 図 2b は, (1)-(6) の六つの端子電極 (ギャップ 1 mm) を有する SWNT/POM ネットワークデバイスの顕微鏡写真である. この電極のうち二つを用いて, エタノールで洗浄した「試料 A」及び脱イオン水で洗浄した「試料 B」の 2 種の試料の測定を行った.

試料 A の電流の経時変化を図 2c, 3a, 3b, 3e, 3f に示す. 図 2c は, 段階的に増加する V_B (0 V から 125 V) での電流分布を示す. 正規分布にはほぼ従った雑音が発生し, 各分布の平均と分散はバイアス電圧 V_B が増加するにつれて増加した. 図 3a は試料 A の電極 (1) と (2) の間の I-V 特性を示し (図 2b), V_B

が 125 V と 150 V の間で NDR ピーク (赤矢印) が出現した. 大気中室温下で 60 Hz の電力ラインで 100 Power Line Cycle (PLC) にわたって平均することで, I-V 特性を測定した. V_B を 150 V に上昇させると, 図 2c の挿入図に示すように電流は不安定になり, 図 3b に示すような周期的/非周期的な電流インパルスが発生した. 条件を選ぶことにより, 図 3b の挿入図に示されるような周期的な電流インパルスの発生をも可能にした.

試料 B の電極 (1) と (2) の間の I-V 特性を図 3c に示す. V_B が約 80 V を超えると, 電流が不安定になり, 順方向掃引と逆方向掃引の間に大きなヒステリシスが観測され, NDR 特性を示した. この場合, V_B が 80 V より低い場合には, この不安定な電流はイオン伝導によって抑制されていることが, エタノール処理した試料との比較することにより類推される. この場合, SWNT/POM ネットワークの NDR ピークは, 負バイアスと正バイアスの両方で現れた. 一方, 図 1b のピークは負の場合のみ現れた. AFM に付属の制御系では, 電圧スイープ速度がミリ秒オーダーのため速すぎて同じ極性の掃引で酸化還元を検出できないためである. PMo_{12} の酸化還元から生じる NDR は極性とは無関係であるはずである. 図 3d に $V_B = 80$ V のときのサンプルについての電流の経時変化 (I-t) のグラフを示す. 周期的/非周期的な電流振動 (約 25 Hz) 及びランダム電流インパルスの両方が観測された. インパルスの発生傾向を定量化するために, インパルス発生インターバルの時系列を測定した. 図 3e の挿入図はポアンカレプロット作成法の例示である. ここで, t_n は n 番目のインパルス発生インターバルを表し, n は測定されたインパルスの数である. 全ての n について (t_n, t_{n+1}) をプロットすることで, 各プロットを作成し, その軌跡 (アトラクタ) を比較することでインパルス発生傾向を調べた. 図 3e, 3f は, 各々印加バイアス電圧 V_B を変化させた際, 及び SWNT に対する POM の濃度比を変化させた際に得られたポアンカレプロット [31] である. 図 3e に示すように, インパルス発生傾向が印加電圧に依存しなかった. 図 3f に示すように, ポアンカレプロットのアトラクタが POM 濃度増加により徐々に右上にシフトしたことから, POM 濃度増加により徐々にインパルス発生インターバルが増加することが得られた. 実際には POM の量が増加すると POM ナノ粒子も大きくなり, キャパシタンスが増大することから POM ジャンクションの電気特性

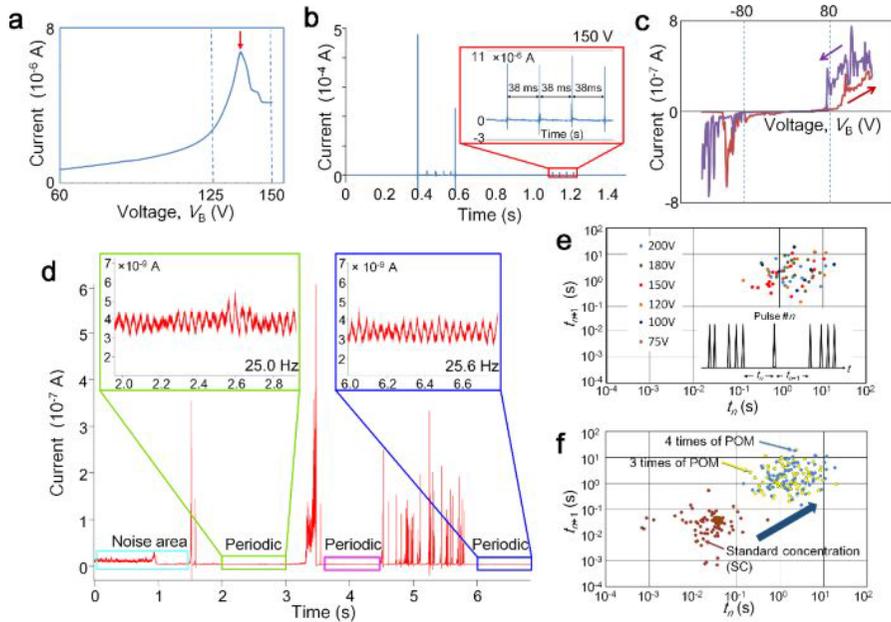


図 3 SWNT/POM ネットワークの電気的特性 [30] (a) 図 2b の電極 (1)-(2) 間で測定された試料 A (エタノール洗浄サンプル) の I-V 特性. (b) $V_B = 150$ V 印加時の試料 A の電流経時変化. (挿入図) 適切な条件を選択することで周期的な電流インパルスが得られた. (c) 水処理した POM/SWNT 試料 (試料 B) の I-V 曲線. いくつかの NDR ピークが, 約 80 V 印加時に顕著に表れた. (d) 試料 B の 80 V 印加時の流経時変化. (挿入図) 周期的インパルス発生部分の拡大図. (e) 試料 A の印加電圧変化時のポアンカレプロット (t_n, t_{n+1}). (挿入図) インパルス列とインパルス発生インターバル (t_n, t_{n+1}) の取り方の例. (f) SWNT に対する POM 濃度比を変化させた際のポアンカレプロット (試料 A).

Fig. 3 Electrical characteristics of the SWNT/POM network. [30] (a) *I-V* characteristics of sample A (rinsed with ethanol) lying between electrodes (1) and (2) in Fig. 2b. (b) Plot of the measured current versus time of sample A when V_B was set at 150 V. (Inset) Magnification of periodic current impulses. (c) *I-V* curve of the water-treated POM/SWNT samples (sample B). A number of NDR peaks are noticeable over approximately 80 V. (d) Time dependence of the current at 80 V. (Inset) Magnification of periodic base current modulation. (e) Poincaré plots formed by changing the applied voltage obtained using sample A. (inset) Example of impulse trains and sequences of the impulse intervals ($\dots, t_n, t_{n+1}, \dots$). (f) Dependence of impulse intervals for sample A on the concentration ratio of POM to SWNT.

に大きく影響すると考えられる. 実験結果はノイズ存在下で POM/SWNT ネットワークから生み出されたインパルスが I-V 曲線中の NDR の存在に極めて密接に関係していることを示している. 単体の POM 粒子からも類似の NDR が検出されており, POM ジャンクションが多段の酸化還元反応をする際のコンダクタンスのスイッチングがインパルスの起源であると思われる. 電子化学測定は, PMo_{12} が分子構造変化を伴う最大 24 個の電子を蓄積できることを証明しており, そのことから PMo_{12} は「電子スポンジ」と呼ば

れている [32]. 一方, 単一分子接合のコンダクタンスは, 電子状態及び構造状態によって変化し, そのようなジャンクションではノイズが大きい. 分子の酸化及び還元によるコンダクタンススイッチング現象が近年報告されており [33], そこでは過渡的充電効果が 1 V 未満の印加電圧で観察されており, その電流比が時として 1000 を超える. なお, ランダムネットワーク中のジャンクション数は, SEM 観察の結果から直列方向に約 100~1000 であり, この場合一つのジャンクションに係る電圧は 0.15~1.5 V である. 図 1 の NDR 出

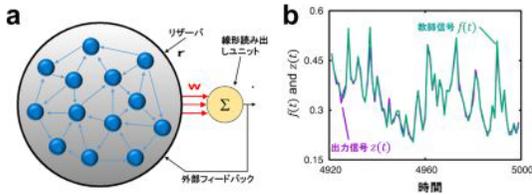


図 4 リザーバ計算のシミュレーション [30] (a) リザーバ演算シミュレーションを行った際の模式図 (b) シミュレーションの結果. 学習後, 経時変化する教師信号に対し出力信号を忠実に再現することに成功した. よって SWNT/POM ランダムネットワークデバイスを時系列メモリとして用いることができると期待される.

Fig. 4 Reservoir computing simulation. [33] (a) Model for reservoir computing simulation. (b) Output signal followed precisely supervisor signal changing over time after learning, which means the SWNT/POM random network can be expected to work as time series memory.

現電圧と図 3 の電圧の関係に大きな矛盾はない.

上記の結果に基づいて, 我々は POM/SWNT ネットワークモデルを構築した. 我々のモデルでは, POM に蓄積された電荷がその電子蓄積限界を超えると, POM と SWNT の間の接合部のコンダクタンスが高くなる. POM で複数の電荷を保存するには, 接合部のコンダクタンスが低い必要がある. POM に多数の電荷を保存すると, 接合部に大きな電位差が発生し, これがコンダクタンススイッチングを引き起こす. POM/SWNT ネットワーク内の POM に蓄積された電子が高導電性接合を通して放電されると, それらは最大の電位勾配で隣接する POM に転送される. 隣接する POM の充電限度も超えていると, 放電によってネットワーク内で連鎖反応が起こる. そのときネットワークにカスケードの電荷が発生し, 電極での電荷インパルスが検出されたことから, インパルス発生メカニズムが説明された. 更に, このカスケードモデルを用いて, リザーバ計算のシミュレーションを行うと (図 4a), 経時変化する入力信号を完全に追従させる出力信号を得ることができた (図 4b). よって SWNT/POM ランダムネットワークを時系列メモリとして用いることが可能と考えられる. 紙面の関係上, カスケードモデル及びリザーバ計算のシミュレーションの詳しい記述は原著論文に譲る [30].

最近では電流と逆向きのパルス (ネガティブパルス) を出力する系も観察されている. 例えば, SWNT/POM の系にゲート電圧を加えた場合 (図 5a), ゲートバイアスが正の場合には不変であったが, 負の場合に

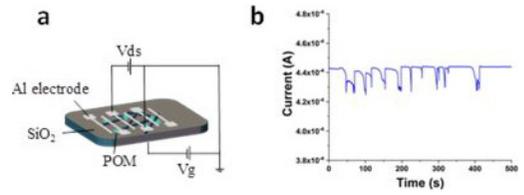


図 5 ゲートバイアス効果の測定. (a) デバイスの構造 (b) SWNT/POM ランダムネットワークのゲート電流特性. ゲートバイアス V_g が正の場合変化がなかったが, V_g が負の場合, 電流と反対方向へ発生するネガティブパルスを確認した.

Fig. 5 Gate bias effect of neuromorphic device. (a) Device structure. (b) Current modulated by gate effect of SWNT/POM random network. Negative impulse was appeared when negative gate bias was applied, even no change occurred when gate bias was positive.

は急に SD 間にネガティブパルスが発生した (図 5b).

電子を SWNT に注入する POM 系であれば同様の事が起きると期待される. 実際, ポルフィリン 2 枚が POM を挟み込んだ構造の $C_{248}H_{264}N_{12}O_{42}Mo_2BW_{12}$ やアクセプターの強いテトラブチルアンモニウム基 (TBA) を有する $(TBA)_2[SW_{12}O_{40}]$ など同様にネガティブパルスを発生した. これらの場合, 系へのホール注入やプロトン伝導の寄与が示唆される. ネガティブパルス発生に関しては, 更なる研究の進展が待たれる. ポジティブパルスを興奮系, ネガティブパルスを抑制系としたニューロンに近い発火モデルを構築できると期待される. なお, 本研究では複数の電極材料を用いたが, 実際には電極は SWNT に電圧を印加するためだけに使用されており, インパルス発生に大きな役割がある POM と SWNT のジャンクションに直接的な影響はない. したがって電極材料のフェルミ準位の違いなどがパルス発生特性へ与える直接的な影響はないと考えられる.

3. む す び

SWNT/POM 複合体は NDR を発生することからノイズ発生が期待された. そこで, ランダムネットワークを形成したところ 0-125 V を印加した場合, ノイズ発生デバイスとして動作した. 150 V を印加するとインパルス発生が見られた. リザーバ計算のシミュレーションから教師信号に追従する波形を出力させることに成功したことから, SWNT/POM ランダムネットワークデバイスを時系列メモリとして用いることができると期待される. 負のゲート電圧印加や, POM

の種類変更により、ネガティブパルスの発生も可能であった。実際にニューロモルフィック演算が実行できるよう今後更なる研究を進めて参りたい。なお、本論文で紹介したデータの大半は既に論文として既報である[30]ことを断っておく。

謝辞 本研究は著者及び各著者の研究室のスタッフ及び学生の努力によって結実したものである。また本研究の多くは科研費 JP21710107, JP20111001, JP15K12109, JP20111012, JP25110002, JP25110015 及び稲盛助成金, 池谷助成金からの研究費支援, 及び文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(北九州産業学術推進機構共同研究開発センター)からの技術的支援を受けた。心より感謝申し上げる。

文 献

- [1] T. Potok, et al., “Neuromorphic computing architectures, models, and applications: A beyond-CMOS approach to future computing,” Advanced Scientific Computing Research (ASCR) Program Documents, 2016.
- [2] Y.-H. Chen, J. Emer, and V. Sze, “Eyeriss: A spatial architecture for energy-efficient dataflow for convolutional neural networks,” 2016 ACM/IEEE 43rd Annual International Symposium on Computer Architecture, pp.367–379, 2016.
- [3] Y.H. Chen, “DaDianNao: A machine-learning super-computer,” Proc. 47th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2014.
- [4] P.A. Merolla, et al., “A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface,” Science, vol.345, pp.668–673, 2014.
- [5] D. Monroe, “Neuromorphic computing gets ready for the (Really) big time,” Commun. ACM, vol.57, pp.13–15, 2014.
- [6] S. Soman, Jayadeva, and M. Suri, “Recent trends in neuromorphic engineering,” Big Data Analytics, vol.1, 15, 2016.
- [7] A. Ochab-Marcinek, G. Schmid, I. Goychuk, and P. Hanggi, “Noise-assisted spike propagation in myelinated neurons,” Phys. Rev. E 79, 011904, 2009.
- [8] N. Hiratani and T. Fukai, “Mixed signal learning by spike correlation propagation in feedback inhibitory circuits,” PLoS Comput. Biol., vol.11, e1004227, 2015.
- [9] L.F. Abbott, B. DePasquale, and R.M. Memmesheimer, “Building functional networks of spiking model neurons,” Nat. Neurosci., vol.19, pp.350–355, 2016.
- [10] P. Ruch, T. Brunschwiler, W. Escher, S. Paredes, and B. Michel, “Toward five-dimensional scaling: How density improves efficiency in future computers,” IBM J. Res. & Dev., vol.55, pp.15:11–15:13, 2011.
- [11] L. Hong, H. Tanaka, and T. Ogawa, “Rectification direction inversion in a phosphododecamolybdic acid/single-walled carbon nanotube junction,” J. Mater. Chem., vol.C 1, pp.1137–1143, 2013.
- [12] K. Kim, C.L. Chen, Q. Truong, A.M. Shen, and Y. Chen, “A carbon nanotube synapse with dynamic logic and learning,” Adv. Mater., vol.25, pp.1693–1698, 2013.
- [13] W. Bialek, D. Warland, and R. Steveninck, d. R. v. Spikes —Exploring the Neural Code—, The MIT press, 1996.
- [14] P.G. Collins, M. Fuhrer, and A. Zettl, “1/f noise in carbon nanotubes,” Appl. Phys. Lett., vol.76, pp.894–896, 2000.
- [15] A. Setiadi, et al., “Room-temperature discrete-charge-fluctuation dynamics of a single molecule adsorbed on a carbon nanotube,” Nanoscale, vol.9, pp.10674–10683, 2017.
- [16] H. Fujii, A. Setiadi, Y. Kuwahara, and M. Akai-Kasaya, “Single walled carbon nanotube-based stochastic resonance device with molecular self-noise source,” Appl. Phys. Lett., vol.111, 133501, 2017.
- [17] S. Wen, et al., “Theoretical insights into [PMo12O40]3- grafted on single-walled carbon nanotubes,” Phys. Chem. Chem. Phys., vol.15, pp.9177–9185, 2013.
- [18] H. Tanaka, T. Yajima, T. Matsumoto, Y. Otsuka, and T. Ogawa, “Porphyrin molecules working as nanodevice on single-walled carbon nanotube wiring,” Adv. Mater., vol.18, pp.1411–1415, 2006.
- [19] A. Lewera, M. Chojak, K. Miecznikowski, and P.J. Kulesza, “Identification and electroanalytical characterization of redox transitions in solid-state keggin type phosphomolybdic acid,” Electroanal., vol.17, pp.1471–1476, 2005.
- [20] M.T. Pope and A. Müller, “Polyoxometalate chemistry: an old field with new dimensions in several disciplines,” Ang. Chem. Int. Edit., vol.30, pp.34–48, 1991.
- [21] R.Y. Wang, et al., “rapid synthesis of amino acid polyoxometalate nanotubes by one-step solid-state chemical reaction at room temperature,” Adv. Funct. Mater., vol.16, pp.687–692, 2006.
- [22] D. Velessiotis, et al., “Molecular junctions made of tungsten-polyoxometalate self-assembled monolayers: Towards polyoxometalate-based molecular electronics devices,” Microelectron. Eng., vol.88, pp.2775–2777, 2011.
- [23] X. Guo, et al., “Using phosphomolybdic acid (H3PMo12O40) to efficiently enhance the electrocatalytic activity and CO-tolerance of platinum nanoparticles supported on multi-walled carbon nanotubes catalyst in acidic medium,” J. Electroanal. Chem., vol.638, pp.167–172, 2010.

- [24] M.S. Kaba, I.K. Song, and M.A. Barteau, "Ordered array formation and negative differential resistance behavior of cation-exchanged heteropoly acids probed by scanning tunneling microscopy," *J. Phys. Chem.*, vol.100, pp.19577-19581, 1996.
- [25] A.J. Gaunt, et al., "A rare structural characterisation of the phosphomolybdate lacunary anion, [PMo11O39]7-. Crystal structures of the Ln (iii) complexes, (NH₄)₁₁[Ln(PMo11O39)₂·16H₂O (Ln=Ce III, Sm III, Dy III or Lu III)," *Dalton Trans.*, pp.2767-2771, 2003.
- [26] K. Vandoorne, et al., "Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip," *Nat. Commun.*, vol.5, 3541, 2014.
- [27] L. Appeltant, et al., "Information processing using a single dynamical node as complex system," *Nat. Commun.*, vol.2, 468, 2011.
- [28] Y. Otsuka, Y. Naitoh, T. Matsumoto, and T. Kawai, "Point-contact current-imaging atomic force microscopy: Measurement of contact resistance between single-walled carbon nanotubes in a bundle," *Appl. Phys. Lett.*, vol.82, pp.1944-1946, 2003.
- [29] T. Yajima, et al., "Refinement of conditions of point-contact current imaging atomic force microscopy for molecular-scale conduction measurements," *Nanotechnology*, vol.18, 095501, 2007.
- [30] H. Tanaka, et al., "A molecular neuromorphic network device consisting of single-walled carbon nanotubes complexed with polyoxometalate," *Nat. Commun.*, vol.9, 2693, 2018.
- [31] H.V. Huikuri, et al., "Fractal correlation properties of R-R interval dynamics and mortality in patients with depressed left ventricular function after an acute myocardial infarction," *Circulation*, vol.101, pp.47-53, 2000.
- [32] H. Wang, et al., "In operando X-ray absorption fine structure studies of polyoxometalate molecular cluster batteries: polyoxometalates as electron sponges," *J. Am. Chem. Soc.*, vol.134, pp.4918-4924, 2012.
- [33] F. Schwarz, et al., "Field-induced conductance switching by charge-state alternation in organometallic single-molecule junctions," *Nat. Nanotechnol.*, vol.11, pp.170-176, 2016.

(2019年5月8日受付, 8月9日再受付,
12月13日公開)



田中 啓文

1998年日本学術振興会特別研究員(DC2). 1999年大阪大学大学院工学研究科材料物性工学専攻博士後期課程了. 学位取得 博士(工学)(大阪大学). 1999年理化学研究所基礎科学特別研究員. 2002年ペンシルバニア州立大学博士研究員. 2003年岡崎国立研究機構(2004年より自然科学研究機構)分子科学研究所分子スケールナノサイエンスセンター助手/助教. 2008年大阪大学大学院理学研究科化学専攻助教. 2014年大阪大学大学院理学研究科化学専攻准教授(3月のみ). 2014年九州工業大学大学院生命体工学研究科人間知能システム工学専攻教授, 現在に至る. この間, 2012年~2018年応用物理学会優秀論文賞受賞. 2014年大阪大学理学研究科化学専攻招聘教授. 2018年ベトナム国家大学ホーチミン校ホーチミン市工科大学招聘教授, 現在に至る. 2019年(一財)ファジシステム研究所主席研究員, 現在に至る. 2019年分子アーキテクトニクス研究会会長, 現在に至る. IEEE, 応用物理学会, 表面真空学会, ナノ学会, 日本MRS会員. 現在の主な研究テーマ ナノテクノロジー, ナノ伝導評価, 分子エレクトロニクス, 触感センサー, 生体信号再現, ニューロモルフィック素子.



赤井 恵

1997年大阪大学大学院理学研究科無機・物理化学専攻了. 学位取得 博士(理学). 1999年大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻精密科学講座研究員. 2007年大阪大学大学院工学研究科助教, 現在に至る. この間, 2005年科学技術振興機構(JST)戦略的創造推進事業「さきがけ」研究員専任. 2015年科学技術振興機構(JST)戦略的創造推進事業「さきがけ」研究員兼任. 現在の主な研究テーマ ナノテクノロジー, 分子素子, ニューロモルフィック素子.



浅井 哲也 (正員)

1999年豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程了. 学位取得 博士(工学). 1999年北海道大学大学院工学研究科助手, 2002年北海道大学大学院工学研究科助教, 2004年北海道大学大学院情報研究科助教/准教授. 2016年北海道大学大学院情報科学研究科教授. 現在に至る. この間, 2004年~2009年University of the West of England(英国)コンピュータ工学数理サイエンス学科客員教授. 2006年~2015年JEITA STRJ, ITRS 委員として, 新探求デバイス・アーキテクチャのロードマップ作成に従事. 2017年IRDS, SDRJSA 委員, 現在に至る. 現在の主な研究テーマ 低電力プロセッサ, 脳型集積回路, 新探求素子のための非ノイマンアーキテクチャ等. IEEE, 電子情報通信学会, 応用物理学会, 日本神経回路学会, 信号処理学会会員.



小川 琢治

1984年京都大学大学院理学研究科博士後期課程了。学位取得 理学博士(京都大学)。1984年愛媛大学理学部化学科助手。1987年愛媛大学理学部化学科講師。1989年愛媛大学理学部化学科助教授。1995年文部省在外研究員(マサチューセッツ工科大学)。1997年九州大学有機化学基礎研究センター助教授。1999年愛媛大学理学部化学科助教授。2003年岡崎共同研究機構分子科学研究所分子スケールナノサイエンスセンター教授。2007年大阪大学大学院理学研究科化学専攻教授。現在に至る。その間、1999年～2002年科学技術振興事業団さきがけ21研究者兼任。2000年～2001年郵政省通信総合研究所関西支所併任職員。2000年～2001年東京大学物性科学研究所嘱託研究員。2001年～2003年岡崎共同研究機構分子科学研究所客員助教授。2001年4月(独)通信総合研究所基礎先端部門関西先端研究センター併任職員。2002年産業総合研究所客員研究員。2003年～2007年分子科学研究所分子スケールナノサイエンスセンター長などを歴任。現在の主な研究テーマ 分子エレクトロニクス、新規電気、磁気、光物性デバイス用有機合成。日本化学会、応用物理学会会員。