

イオン・電子・スピンの時空間ダイナミクスを用いる AI デバイス

SATテクノロジー・ショーケース2025

■ はじめに

近年、深層学習や生成AIに代表される機械学習が大きく発展し、様々な産業で活用されています。一方、機械学習によって消費される電力やクラウドとの通信量は指数関数的に増加しており、深刻な社会問題となっています。この解決のためにはソフトウェア改良だけで改善するには限界があるため、全く新しいAIデバイス(ハードウェア)の開発が急務です。特に、従来型コンピュータを基盤とするAIデバイスは人間の脳と比較してエネルギー効率が非常に低いことが指摘されており、脳の高効率性を再現するAIデバイスの需要が高まっています。NIMSは、材料中のイオンや電子、スピンといった様々な情報担体が示す時空間ダイナミクスを計算資源として利用することで、脳神経の働きをハードウェアで模擬して消費電力(計算量)を低減するAIデバイス、「ニューロモルフィック(神経模擬)デバイス」の研究開発を進めています。

■ イオンと電子で脳の働きを模した情報処理素子

NIMSは、固体でありながらリチウムイオンを伝導するリチウム固体電解質薄膜とダイヤモンド単結晶を積層した界面近傍のイオンと電子の振舞いを利用して「カオスの縁」状態を発現させ、高い情報処理機能を示す小型素子を開発しました(図1)。この素子は固体電解質/ダイヤモンド界面に形成される電気二重層の充放電によってダイヤモンド表面の電子キャリア密度が変化することで電気抵抗が変化する電気二重層トランジスタの原理で動作します。この素子に、情報処理に必要な時系列データを電圧パルス列として入力すると、前述の電気二重層の充放電によってダイヤモンド表面を流れる電流(ドレイン電流)が刻一刻と変化します。この際、リチウムイオンと電子の輸送がお互いに影響を及ぼし合って複雑に振舞い、無数のニューロンが互いにフィードバックしあう脳神経に近い状況が生まれます。実際に、脳神経の電気応答に見られる様なスパイクや緩和を伴う、複雑・多様な電気応答を出力することがわかりました(図1)。そこで、NIMSはこの素子を「物理リザーバー」に用い、情報処理に応用しました(物理リザーバーコンピューティング)。物理リザーバーコンピューティングとはニューロモルフィックコンピューティングの一種であり、「物理リザーバー」に信号を入力し、「物理リザーバー」内部での信号変化を利用して情報処理を行う手法です。深層学習を含む一般的な階層型ニューラルネットワークよりも低い計算コスト(消費電力)で情報処理することが原理的に可能ですが、高性能

を得るためには優れた性能を持つ物理リザーバーが要求されます。

この素子の情報処理性能を、物理リザーバーコンピューティングの性能試験に用いられる二次非線形変換タスクで評価しました(図1)。予測誤差を評価したところ、 2.08×10^{-4} という非常に小さな値(高い予測精度)が得られました。これは、スピントルク振動子やメモリスタを用いた報告よりも数倍から1桁程度高い精度であり、小型素子の中で世界最高性能でした。こうした高性能の起源を探るべく電気応答を詳しく調べたところ、人間の脳の高効率な情報処理能力の起源と考えられている「カオスの縁」状態にあることが示唆されました。

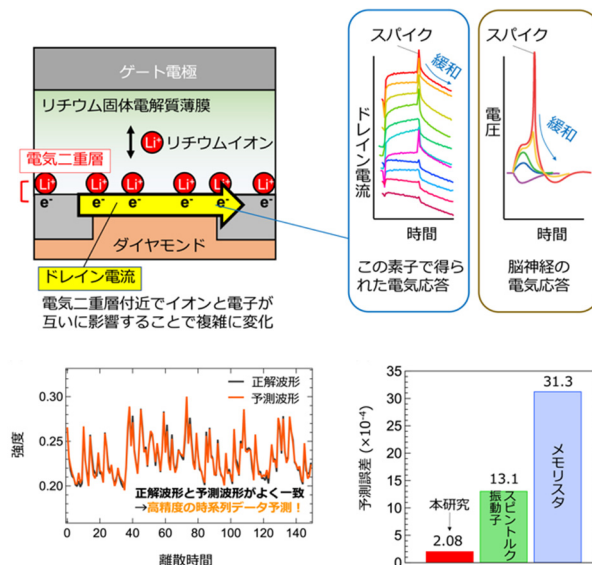


図1. 電気二重層トランジスタの仕組みを用いる脳型情報処理素子

■ たった数個の有機分子が情報を記憶・計算して血糖値変化を高精度予測

NIMSは、たった数個の有機分子の分子振動を利用した物理リザーバーコンピューティングを世界で初めて実証しました。図2に示すように、情報の入力、酸化タングステンナノロッド表面の有機分子(p-メルカプト安息香酸, pMBA)の水素イオン吸着量(化学状態)を電圧印加で制御して行い、水素イオン吸着量に依存して変化するpMBA分子の分子振動の時間変化を記憶と計算に利用します。

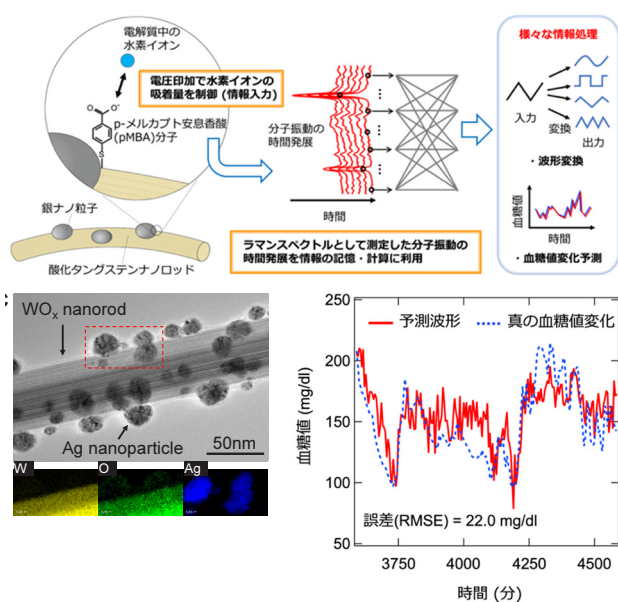
代表発表者 土屋 敬志(つちや たかし)
所属 国立研究開発法人 物質・材料研究機構(NIMS) ナノアーキテクトニクス材料研究センター ニューロモルフィックデバイスグループ
問合せ先 〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1
TEL: 029-860-4563 FAX: 029-860-4790
TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

■キーワード: (1) ニューロモルフィックデバイス (2) 物理リザーバーコンピューティング (3) 脳型情報処理

■共同研究者: 西岡大貴(NIMS 若手国際研究センター)、並木航(NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センター)、新ヶ谷義隆(NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センター)、寺部一弥(NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センター)

SATテクノロジー・ショーケース2025

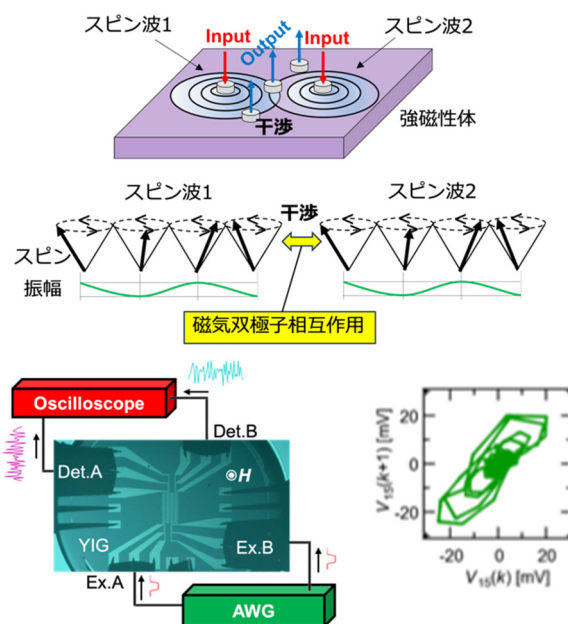
本手法を用いて糖尿病患者の血糖値変化の予測を行いました。まず、ある1型糖尿病患者の約20時間程度の血糖値変化を電圧信号に変換して作用極に入力して学習(訓練)を行い、その後の同患者の血糖値の変化を予測しました。5分後の血糖値変化を予測した結果と実際の変化の比較を図2に示します。予測波形は実際の血糖値変化の特徴をよく捉えており、得られた予測誤差(22.0 mg/dl)は、従来知られているデバイスのチャンピオンデータ(46 mg/dl)より約50%低いものでした。



■ 水紋のように干渉するスピン波で高性能な機械学習

NIMSは、磁性体内を伝播する「スピン波」と呼ばれる磁気の波を利用し、水面に広がる波紋のように干渉させて生じる干渉パターンを計算資源として利用する、高度な物理リザーバーコンピューティングを行う新技術を新たに開発しました。スピン波の干渉を利用する手法は、東京大学の中根らによる理論研究に基づき、NIMSが世界に先駆けて実験的に実証したものです。実験では、図3に示すように、スピン波の減衰が小さく、伝播距離が長い磁性体としてイットリウム鉄ガーネット(YIG)を採用し、スピン波を励起するためのアンテナと干渉後の信号を検出するためのアンテナ

を取り付けたデバイスを作製しました。このデバイスで実際にスピン波を励起して干渉パターンを測定したところ、カオス的な性質を伴う強い非線形性を示し、これを用いた時系列パターン認識では非常に高い計算性能が得られました。



■ 関連情報等

- D. Nishioka et al. Edge-of-chaos learning achieved by ion-electron-coupled dynamics in an ion-gating reservoir. Science Advances. 8 [50] (2022)
- D. Nishioka et al. Few- and single-molecule reservoir computing experimentally demonstrated with surface-enhanced Raman scattering and ion gating. Science Advances. 10 [9] (2024) eadk6438
- W. Namiki et al. Experimental Demonstration of High-Performance Physical Reservoir Computing with Nonlinear Interfered Spin Wave Multidetector. Advanced Intelligent Systems. 5 [12] (2023) 2300228