



金属ナノワイヤーネットワークによる脳機能模倣技術

～記憶や学習などの脳活動と同様な通電経路の揺らぎを再現 新概念メモリ技術への展開に期待～

配布日時：2019年11月11日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. NIMS を中心とする国際共同研究チームは、多数の金属ナノワイヤーからなるニューロモルフィックネットワーク材料¹⁾を作製し、「記憶」「学習」「忘却」さらに「覚醒」「鎮静」など人間の脳特有の高次機能に似た特性が、材料の電気特性として発現することを見出し、その起源を明らかにしました。
2. 近年、人工知能 (AI) 関連技術は目覚ましい進歩を遂げており、私たちの生活の中にも様々な形で浸透しつつあります。AI 技術は、脳型の情報処理ですが、お手本である人間の脳の動作メカニズムについてはほとんど解明されておられません。もちろん、神経細胞そのものや神経細胞同士の連結部 (シナプス) など脳の重要な構成要素については精密な理解が進んでいます。しかし、要素の集合体である脳が、どのようにして学習、記憶、忘却という機能を発現しているのか、なぜ覚醒、鎮静などの状態が生じるのかなどの様々な疑問に対する明確な回答はなく、生きた脳を扱う実験の困難さもあいまって、脳は「神秘の臓器」とも言われております。そのため、脳に類似した機能を発現する材料やシステムを創製し、そのメカニズムを解明すれば、脳型情報処理に新しい可能性を見出すのみならず、脳科学の進歩にも貢献するものと期待されています。
3. 今回、共同研究チームは、1 ナノメートル程度のポリマー絶縁体 (PVP) 被覆を施した銀 (Ag) ナノワイヤーを集積して、複雑なネットワークを組み上げました。このネットワーク中では、ナノワイヤーとナノワイヤーとが接触する「接点」が「シナプス的に動作する可変抵抗素子 (シナプス素子)」として働くため、多数のシナプス素子が複雑に接続されることとなり、神経細胞網を模倣した「ニューロモルフィックネットワーク」が出来上がります。このニューロモルフィックネットワークに電圧を印加して電流を流したところ、あたかも材料が試行錯誤しているかのように、より適切な (低消費電力で電流を流せる) 通電経路を探索していく様子が観測されました。研究チームは、通電経路の形成、維持、解消などの過程を、電流の時間変化として計測し、それらの過程が常に揺らぎつつ進行することを見出しました。このような、通電経路の形成、維持、解消が[脳の学習、記憶、忘却]に、揺らぎの変化は「脳の覚醒、鎮静」に似ています。これら脳機能模倣とも言えるニューロモルフィック材料の特性は、ニューロモルフィックネットワーク中で多数のシナプス素子の抵抗が連携しつつ最適化していく自発的・創発的現象に起因することを明らかにしました。
4. 現在、研究チームはニューロモルフィックネットワーク材料を特徴づける創発性・自発性を活かした脳型メモリの開発に取り組んでいます。例えば、現在のコンピュータが「時間と電力を使ってでも最適な解を導く」正確無比なシステムであるのに対し、「真に最適ではなくとも許容範囲内の判断を迅速に提案する」機能を備えたメモリの実現を目指しています。また、本研究結果が、脳型の情報処理とは何かを「解き明かす」ための、重要な一步になるものと期待しています。
5. 本研究結果は、国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点 (WPI-MANA) の中山知信 副拠点長、Adrian Diaz Alvarez 博士研究員、オーストラリア シドニー大学 物理学専攻の Zdenka Kuncic 教授、米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校 カルフォルニアナノシステム研究所の James K. Gimzewski 教授らからなる国際共同研究チームによって行われました。なお本成果は、オープンアクセスジャーナル Scientific Reports 誌にてオンライン公開 (公開日 2019 年 10 月 17 日) されています。

研究の背景

脳の機能を模倣して「知的なマシン」を生み出そうとする試みは、20世紀中ごろから活発化し、現在の人工知能(AI)技術へと発展してきました。一方で、「知能とは何か?」「脳の中にどの様にして記憶が保持され、利用されているのか?」など、脳機能の発現メカニズムはその多くが未解明のまま取り残されています。脳の機能を精密に理解できれば、より高度且つ低消費電力で動作する次世代AI技術への応用が期待されますが、生きた脳を扱う実験は現実的に困難です。そこで、脳に類似した機能を発現する材料やシステムを創製し、その機能を理解することで、人工脳や脳型計算機(ニューロモルフィックコンピュータ)の開発に応用しようとする研究が注目を集めています。特にニューロモルフィックコンピュータは、人間の脳が非常に複雑な情報処理をこなすにも関わらず、20W程度の少ない消費電力で動作しているという事実から、超低消費電力のコンピュータになると期待されています。

MANAでは「原子スイッチ²⁾」が、オンとオフを切り替えるだけの単純なスイッチではなく、過去の動作履歴に応じて「オンのしやすさ」、「オン状態の持続時間」が変化する履歴依存型の特性(メモリストイブ特性)を有することを明らかにしています。これは、シナプス(神経細胞と神経細胞の接続部)機能の模倣に相当するため、原子スイッチを「シナプス素子」と位置付けた研究を展開してきました。近年、世界中の多くの研究グループが、脳型情報処理チップの開発を目的として、シナプスを模倣した素子や回路要素を電子回路の一部に組み込もうと試行錯誤を重ねています。一方、人間の脳は千数百億個もの神経細胞からなる巨大な神経細胞網(ネットワーク)であり、神経細胞ひとつから伸びる配線の数(シナプスの数と等価)は、およそ1万本もあり、現在の電子回路とは全く異なる配線構造を持っています。残念ながら、最新の半導体加工技術を駆使しても、脳が実現しているような複雑なネットワーク回路を空間に張り巡らせることは出来ず、その複雑ゆえに発現すると考えられている機能について、特にネットワークの構造的特徴と機能との関係については、ほとんど理解されておられません。

研究内容と成果

国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS、理事長 橋本和仁)国際ナノアーキテクニクス研究拠点(WPI-MANA、拠点長:佐々木高義)の中山知信 副拠点長、Adrian Diaz Alvarez 博士研究員、オーストラリア シドニー大学 物理学専攻の Zdenka Kuncic 教授、米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校 カルフォルニアナノシステム研究所の James K. Gimzewski 教授、Adam Z. Stieg 博士らからなる国際共同研究チームは、1ナノメートル程度のポリマー絶縁体(PVP)被覆を施した銀(Ag)ナノワイヤーを集積して、複雑なネットワークを組み上げました。この複雑なネットワークに電圧を印加して電流を流したところ、あたかも材料が試行錯誤しているかのように、より適切な(低消費電力で電流を流せる)通電経路を探索しながら選択していく過程を、電流信号の時間変化として捉えました。

複雑ネットワーク中のナノワイヤーとナノワイヤーとの接点には、金属(Ag)―絶縁体(PVP)―金属(Ag)接合が形成されます。接点部における絶縁体の厚みがナノメートルオーダーと薄いため、電圧印加によってAg原子が絶縁体領域に移動し導電性フィラメントを形成すれば接点は低抵抗化します。また、この電圧印加が不十分であると、導電性フィラメントが時間と共に消滅して、高抵抗化します。これは接点が一種の原子スイッチ(シナプス素子)として動作しているためです。つまり、作製したネットワークは、多数のシナプス素子が複雑なネットワークを介して相互に接続された構造、すなわち神経細胞網を模した脳型ネットワーク(ニューロモルフィックネットワーク)構造とみなせます(図1参照)。

近年、シナプス素子の特性の解明と制御に関しては盛んに研究が行われていますが、研究チームは個々のシナプス素子の特性ではなく、ニューロモルフィックネットワーク全体の挙動、つまり、多くのシナプス素子が接続されたことで創発される自己組織的ダイナミクスに注目しました。具体的には、ニューロモルフィックネットワークに様々な電圧刺激を与え、通電経路の形成、維持、解消などの過程を電流の時間変化として計測しました。計測手法の工夫と計測結果の丹念な解析から、それらの過程が常に揺らぎつつ進行することを見出し、複雑かつ大規模なシステムの特徴として知られている Self-organized criticality (SOC) と呼ばれる自己組織化臨界現象³⁾を介して、ニューロモルフィックネットワーク中を貫く通電経路が形成される(図1)ことを示しました。

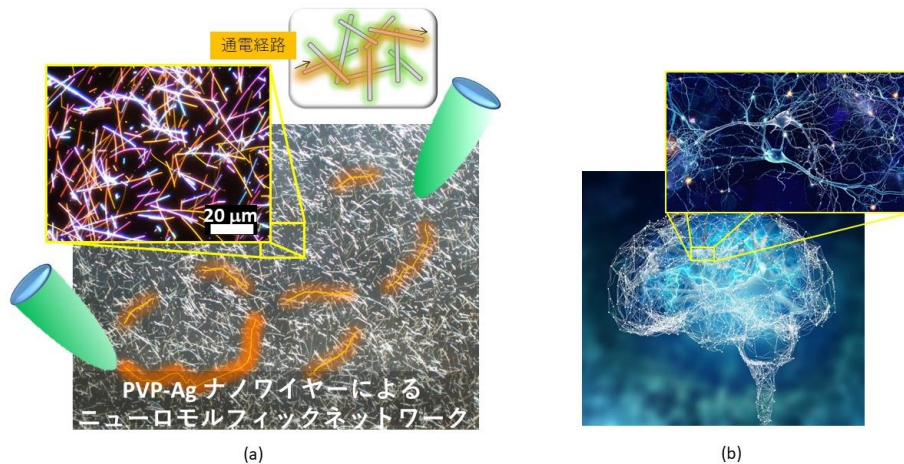


図1. (a) 研究チームが作製した「ニューロモルフィックネットワーク」の顕微鏡写真。ナノワイヤーが交差する接点が多数含まれており、その各接点がシナプス素子として働く。ネットワークに電圧を印加すると（緑のプロブ間に電圧を印加）、ネットワーク内に通電経路（オレンジ色）が現れる。(b) 人間の脳と、それを構成する神経細胞ネットワーク。複雑なネットワーク構造が存在し、脳は複雑ネットワークを介した電気信号の伝搬によって動作していることが知られている。

本研究は、ニューロモルフィックネットワークに情報を書き込むという作業（脳内の記憶形成に相当）は、一つ一つのシナプス素子の抵抗を丹念に制御する作業とは全く異なるダイナミックな作業であることを示しました。言い換えれば、1 ビットずつ正確に記録していくという現在のメモリへの情報書き込み作業とは全く異なるものであることを明瞭に示しました。ニューロモルフィックネットワークへの情報の書き込みは、ネットワーク中の2点間に通電経路を形成する事に対応しますが、これは2点間の最短な経路上にあるシナプス素子を低抵抗化していくプロセスではなく、ネットワーク中の様々な場所で多くのシナプス素子が連携を保ちつつ低抵抗化と高抵抗化を繰り返し続け、その連携が長距離に波及して行くプロセスです。大変興味深いのは、形成される通電経路が最安定経路（最も抵抗が小さく電流を流しやすい経路）であるとは限らないということです。ニューロモルフィックネットワーク中では、ある準安定経路から他の準安定経路への切り替えが起り続ける「揺らぎ続ける通電経路」が形成されることが判明しました。さらに、通電経路形成を促す電圧印加を止めた後も、経路は即座には消滅せず、「短期記憶」が発現しました。この時も多数のシナプス素子が連携して揺らぎ続けるというニューロモルフィックネットワークの特性に助けられて、シナプス素子単体の低抵抗状態保持時間よりも長い時間に渡って通電経路が保持されました。これらの特性は、複雑なニューロモルフィックネットワーク構造があるからこそ発現する「時空間的なシナプス素子間相互作用がもたらす揺らぎ」に起因するものです。また、観測された揺らぎは常に $1/f^\beta$ 特性を示しており、この β がニューロモルフィックネットワーク中における通電経路の形成、維持、消滅という動的過程に呼応して変化する様子を捉えることにも成功しました（図2参照）。

実は、脳活動を電氣的に捉える計測実験でも、前述のような揺らぎが確認されています。研究チームは、金属ナノワイヤーからなるニューロモルフィックネットワークにおける通電経路の形成、維持、消滅は、脳の「学習、記憶、忘却」に、変化する揺らぎの特徴は「覚醒」、「鎮静」に似ていることを見出しました。言い換えれば、ニューロモルフィックネットワーク中の多数のシナプス素子がネットワーク中で協調しつつ最適化を目指す現象が、「ネットワーク構造に起因する創発性・自発性によって引き起こされる脳活動の模倣」に相当すると考えられることを、研究チームは示しました。

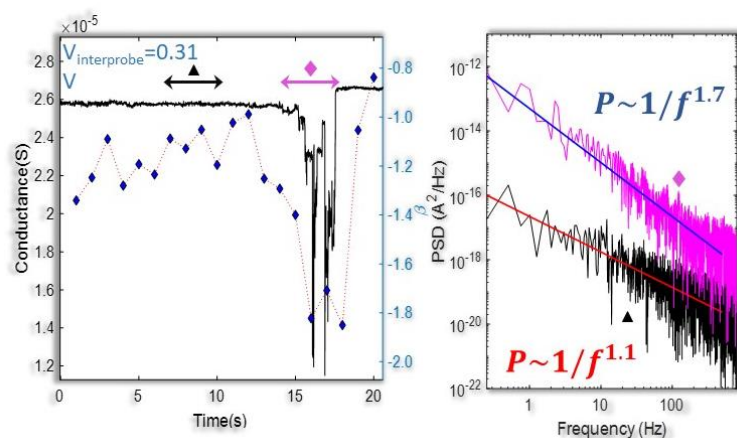


図2. ニューロモルフィックネットワーク内の通電経路が変化する様子を、電流の時間変化と揺らぎを表すパワースペクトル密度 (PSD) の変化で計測。左図は、電流の時間変化 (伝導度に換算してある) は一様ではなく、時間的変動が少ない部分 (0~15秒) と急激に不安定になる部分 (15~18秒) から成る。時間的変動が少ない時の揺らぎは $1/f$ で表されるが、不安定な領域では $1/f^2$ に近くなる。これは、一旦安定になった電流経路も揺らぎを通じて、別の電流経路へと移り変わる現象に対応している。

今後の展開

今回の成果を踏まえて、研究チームはニューロモルフィックネットワーク材料を活用して実現できる、新しい脳型メモリの開発に取り組んでいます。現在のコンピュータは「最も適した選択肢」を間違えることなく提示します。そのために、複数ある選択肢をメモリに保存しておき、そこから希望の条件に合致した選択肢を提示する「検索作業」を実行します。今後のビッグデータ化を考えれば、選択肢の数が膨大になるほど選別作業には膨大な時間がかかり、当然ながら消費電力も増加すると懸念されています。実際に、最速のコンピュータを用いたとしても、解を得るために膨大な時間が必要で解決困難な問題⁴⁾も知られています。一方、脳型メモリは、「見落としのリスクは残るが、リーズナブルな解」を、検索アルゴリズムを介さず現実的な時間内に導くものとなるでしょう。解が一つに定まらず、複数を提示することも想定されます。この一見曖昧な情報処理は、現代社会の複雑な問題に対処する時、有効な解決策を「迅速かつ適切に絞り込んでいく」作業に相当し、非常に重要な処理となります。

また、本研究成果を発展させれば、脳科学における大きな謎である「脳の物理的な動作メカニズム」の解明にも役立つと考えられます。生きた脳を用いた様々な物理計測は、技術的にも倫理的にも困難です。研究チームは、ニューロモルフィックネットワークの機能研究が、複雑な神経細胞ネットワークに「我々が人間らしいと認識している機能」がいかんとして発現するのか、そしてその起源に迫る手段へと発展することを期待しています。

掲載論文

題目: Emergent dynamics of neuromorphic nanowire networks

著者: Adrian Diaz-Alvarez, Rintaro Higuchi, Paula Sanz-Leon, Ido Marcus, Yoshitaka Shingaya, Adam Z. Stieg, James K. Gimzewski, Zdenka Kuncic, and Tomonobu Nakayama

雑誌: Scientific Reports

掲載日時: 2019年10月17日: オンライン公開済み

用語解説

- 1) ニューロモルフィック材料：神経細胞（ニューロン）は複雑な結線によって互いに連結しあつて、神経細胞網（ニューロンネットワーク）を形成する。これにより、人間の脳のみならず、体中に張り巡らされた複雑な通信網が構築されている。特に脳内のニューロンネットワークの複雑さには目を見張るものがあり、現在の半導体加工技術による配線加工では同等の複雑性を再現できない。自然に存在するニューロンネットワークの複雑な形態を模倣した材料をニューロモルフィック材料と呼ぶ。
- 2) 原子スイッチ：NIMSが開発した全く新しいスイッチ（2005年発表）。1ナノメートル（10億分の1メートル）レベルの空間を隔てて置かれた電極間を繋ぐ原子の架橋を制御して、電極間の電気的導通をオン-オフする。原子架橋の制御については、イオン化した金属原子を電界によって移動させる方式が当初開発されたが、その後、様々な原理に基づく同様のスイッチが開発されており、2017年には実用デバイスに搭載された。
参考：<https://www.nims.go.jp/news/press/2005/01/p200501050.html>
- 3) 自己組織化臨界現象（SOC）：複雑かつ大規模な系に発現する現象として知られており、小さなスケールで生じる現象の頻度と大きなスケールで生じる現象の頻度との関係が対数関係で表される物理現象。卓上に砂山を作る際、砂時計の様に少しずつ砂の量を増していくと、砂山のあらゆる場所で小規模な崩壊が頻繁に発生するが、砂山全体が崩れるような大規模な崩壊の発生頻度は少ない。連続的かつ慎重に砂粒を供給していくと、崩壊規模と頻度の対数関係が保持された状態（砂山の形状）に留まり続ける。このような現象は自然現象や社会現象の様々な場面で確認されており、例えば株価の変動（変動の大きさとその発生頻度の関係）、地震の発生（地震規模とその発生頻度の関係）などが知られ、脳活動における発火現象（神経細胞が活性化する現象）などが、SOCであると考えられている。
- 4) 解決困難な問題：良く知られている問題の例として、「巡回セールスマン問題」が挙げられる。N箇所の全ての都市を巡回する際の総コストを最小にするやり方を求める問題であり、全ての組み合わせを計算して比較すれば解が求まる。しかし、Nの増加に対して、組合せの数が爆発的に増大してしまう。例えば、たったの20都市を回ろうとしただけで、 $20! = 20 \times 19 \times 18 \times \dots \times 2 = 2,432,902,008,176,640,000$ 通りの計算を実施しなければならない。たとえ1通りの計算がナノ秒（ 10^{-9} 秒）で完了したとしても、 2.43×10^9 秒、つまり80年程度かかることになり現実的ではない。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
MANA 主任研究者／ナノ機能集積グループ グループリーダー 中山 知信（なかやま とものおぶ）
TEL：029-860-4129
FAX：029-860-4886
E-mail：NAKAYAMA.Tomonobu@nims.go.jp

（報道・広報に関すること）

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
TEL：029-859-2026, FAX：029-859-2017
E-mail：pressrelease@ml.nims.go.jp