

分野:工学系 キーワード:ニューロモルフィック、カーボンナノチューブ、分子デバイス、神経細胞スパイク

## カーボンナノチューブと分子の乱雑ネットワークが 神経様スパイク発火を可能に —ナノ材料で脳機能の一部を再現—

### 【研究成果のポイント】

- ◆神経細胞の発火信号に類似した自発的スパイク信号の発生を可能にする、分子/カーボンナノチューブ※<sup>1</sup> 複合ネットワークデバイスの作製に成功した
- ◆これまでニューロモルフィック※<sup>2</sup> チップの開発において、自発的なスパイク信号の発生とその伝達の機能はまだ十分利用されていなかった
- ◆本研究の結果は、ナノ分子材料※<sup>3</sup> を用いて脳機能の一部を再現したと言え、将来のニューロモルフィックデバイス開発に大きく寄与すると期待

### ❖ 概要

田中啓文(九州工業大学大学院生命体工学研究科教授)及び小川琢治(大阪大学大学院理学研究科教授)は、**カーボンナノチューブ(CNT)とポリオキソメタレート分子(POM)※<sup>4</sup> の高密度ネットワークデバイスを作製し、神経細胞(ニューロン) ※<sup>5</sup> のスパイク発火に似たインパルス状の信号を発生させることに成功しました。**また、赤井恵(大阪大学大学院工学研究科助教)及び浅井哲也(北海道大学大学院情報科学研究科教授)らのグループとの共同研究において、**特殊な電荷貯め込み特性を持ったランダムネットワークモデルのシミュレーション計算からスパイク発火の機構を提案し、これらの機能が未来の人工知能や超高速計算をもたらすニューロモルフィックデバイスを構成する材料として期待出来ることを示しました。**

脳の構造や機能を真似た回路網を人工的に再現しようとするニューロモルフィックチップの開発において、自発的なスパイク信号の発生とその伝達の機能はまだ十分利用されていませんでした。本研究の結果は、**ナノ分子材料**によって**小型の自発的スパイク信号を発生する独立デバイスの作製を可能に**しただけでなく、**分子を繋ぐ乱雑なネットワーク自体が脳型人工知能となる可能性を示しており、ニューロモルフィック工学分野の発展に大きく寄与することが期待出来ます。**

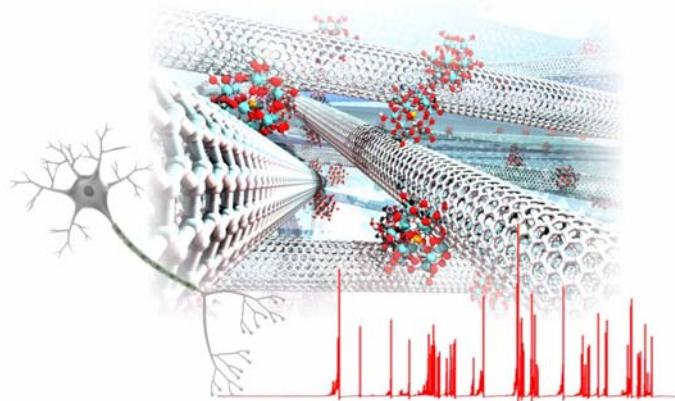


図1 POM/CNT 複合ネットワークから発生する神経様スパイク信号

本研究成果は、英国科学誌「Nature Communications」に、2018年7月12日(木)18時(日本時間)に公開されます。

## ❖ 研究の背景

脳は驚くような小さなエネルギーで動いています。環境に適応して学習し、あいまいな認識をし、高度な認知力と知能を有し、現在の計算機に比べるとスピードは遅いけれども、複雑な情報の処理を行なっています。最近の人工知能技術の源流は、脳の構造を極端に単純化したニューラルネットワーク<sup>※6</sup> モデルの学習方法を工学的に進化させたものですが、それらは主に既存のコンピュータ上で動く「ソフトウェア」として実現されています。例えば「新しい脳型の計算手法を昔の古い入れ物に流しこんで無理矢理脳の真似をさせているようなもの」とも言えます。

一方でニューロモルフィック工学の分野ではチップや回路、デバイスといった、計算機（ハードウェア）となりうる構成要素を一から脳の形に組み立てて脳の優れた能力を再現しようとしています。脳神経回路の最も重要な構成要素は二つです。一つはシナプス<sup>※7</sup> の持つ学習能力、もう一つがニューロンの発火機能です。複雑な神経回路網の中で、この二つによって脳の情報伝達や思考が行われていることは、現在の脳科学の発展から少しずつ理解されてきています。しかしながら、実際の脳の構造は複雑すぎてまだ我々はそれを完全に真似することは出来ません。現状では脳の一部の仕組みを単純化して模倣した脳型回路やデバイスによってその機能を再現しようとする取り組みが盛んに行なわれています。

## ❖ 本研究成果の内容

田中啓文教授らの研究グループでは、導電性 AFM を用いた単層カーボンナノチューブ(SWNT)に吸着した様々な分子や微粒子の接合点における電流の整流性制御の研究を通じ、SWNT に吸着した POM 分子には大きな負性抵抗<sup>※8</sup> が発生することを発見しました。これらの結果は分子接点において、不安定な動的非平衡状態が発生することを示唆しています。田中教授らの研究グループはさらに、これら SWNT と POM を高密度で乱雑にネットワーク化したデバイスを作製し、神経細胞のスパイク発火に似たインパルス状の信号(図 1)を発生させることに成功しました。

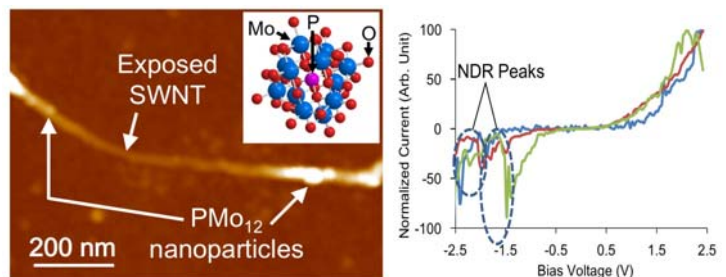


図 2 SWNT に吸着した POM 分子の AFM 像と分子骨格。右は POM 上に観測された負性抵抗

POM 分子は図 2 に見られるように金属と酸素が結びついた 3 次元粒子形状をしています。一般的な有機分子とは異なり、1 分子の中に多くの電荷を溜め込めることが知られています。今回観測された負性抵抗やネットワークからのスパイク発生は、ネットワーク内の各分子接点における、電荷蓄積と放出の非平衡状態が原因ではないかと考えられました。赤井恵助教授らの共同研究グループは、モデル計算を行ない、ランダム分子ネットワークから発生するスパイク信号を再現しました(図 3 左)。さらにこの分子モデルが次世代人工知能と期待されているリザーバ計算<sup>※9</sup> デバイスの構成要素として高い可能性を持つことを示しました(図 3 右)。

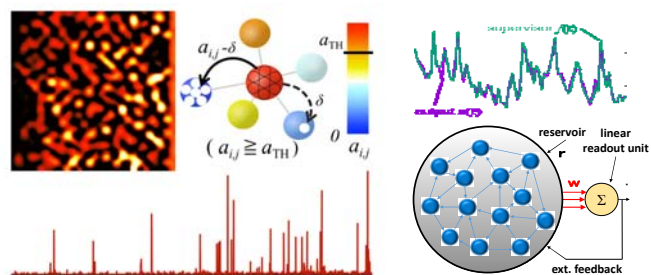


図 3 分子ネットワークモデルが再現したスパイク信号と、そのニューロモルフィックデバイス応用（リザーバ計算機）

## ❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

我々のテクノロジーが「脳」を創りうる日はいつか来るのでしょうか。2014 年に革新的なニューロモルフィックチップとして IBM の TrueNorth が発表されました。TrueNorth は高い情報処理能力と低消費電力を実現した素晴らしい人工知能プラットフォームですが、今のところ、深層ニューラルネットワーク<sup>※6</sup> のアプリケーション例しか示されておらず、また既

存コンピュータと同様の半導体集積回路技術を用いているため、『「脳」の一部を学んではいらぬもの「脳」からはほど遠い』という見方も出来ます。

本研究の意義は、ナノ分子材料を用いて脳機能の一部を再現したことにあります。脳のように高密度に集積され、低消費電力で自律的に動く“計算機”を目指した時、今のコンピュータを構成している電子回路素子とは異なる、全く新しい技術や材料を模索すべきではないでしょうか。本研究が見出した分子ネットワークからのスパイク信号発生は、現在のテクノロジーではまだ利用出来ていない“一分子の動態変化”を利用しています。生物の脳はそもそも全て、有機分子から構成されているのです。本研究の結果は未来の「小型分子ニューロモルフィックチップ」実現への、強い期待感を抱かせます。

## ❖ 特記事項

本研究成果は、2018年7月12日(木)18時(日本時間)に、英国科学誌「Nature Communications」(オンライン)に掲載されます。

タイトル：“A molecular neuromorphic network device consisting of single-walled carbon nanotubes complexed with polyoxometalate” 「カーボンナノチューブ/ポリオキソメタレート分子複合高密度ネットワークが創るニューロモルフィック素子」

著者名：田中啓文<sup>1</sup>、赤井恵<sup>2</sup>、Amin TermehYousefi<sup>1</sup>、Liu Hong<sup>3</sup>、Lingxiang Fu<sup>1</sup>、田向権<sup>1</sup>、田中大輔<sup>3</sup>、浅井哲也<sup>4</sup>、小川琢治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州工業大学大学院生命体工学研究科、<sup>2</sup>大阪大学大学院工学研究科、

<sup>3</sup>大阪大学大学院理学研究科、<sup>4</sup>北海道大学大学院情報科学研究科

DOI: 10.1038/s41467-018-04886-2

なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」、分子アーキテクニクス「単一分子の組織化と新機能創成」研究の一環として行われました。

## ❖ 用語説明

※1 カーボンナノチューブ(CNT)

炭素によって作られる六員環ネットワークシート(グラフェン)が単層あるいは多層の同軸管状になった物質。半導体特性と金属特性を持つものがあり、特に単層のものはシングルウォールナノチューブ(SWNT)と呼ばれる。

※2 ニューロモルフィック(neuromorphic)

-morphicとは ~の形態を持つという意味の接尾辞。即ち「神経細胞の形状を持ったもの」を意味する。神経細胞の形状そのものや機能、神経回路網の構造を模倣しようとするものに対して広く使われている。日本語としては「脳型」「脳機能模倣」「生体様」等、一意的には対応しておらず、本稿のようにカタカナ語で使われることも多い。

※3 ナノ分子材料

少なくとも一辺の長さが1~100nmの大きさを持つ材料。次世代の産業基盤技術として、社会に大きな便益をもたらすことが期待されており、多様な分野で利用が進んでいる。カーボンナノチューブやグラフェンなどの炭素系のもの、銀、二酸化チタン、酸化亜鉛などの金属系のものが有名である。

#### ※4 ポリオキソメタレート分子(POM)

名前の「Poly-」は多数、「-oxo-(オキソ)」は酸素、「-metallate」は金属酸を意味し、多数の金属と酸素原子が結合した化合物で、ポリ酸とも呼ばれる。正四面体や正八面体の多面体構造の様々な美しい立体構造をとる。形状や中心金属、酸素以外の配位子の導入によって様々な特徴的性質を持つ。抗癌剤にも利用される。

#### ※5 神経細胞(ニューロン)

脳の構成要素の一つ(図 1 左下模式図に示すような神経膜からなる細胞体)。他の神経細胞のスパイクを受ける樹状突起と、自身のスパイクを別のニューロンに送る軸索を持つ。それらが複雑に連結された神経回路網におけるスパイクの発生と伝達が脳の高い情報処理能力の一つの要となっている。

#### ※6 ニューラルネットワーク・深層ニューラルネットワーク

脳の構成要素(神経細胞とそれらを結ぶシナプス、およびネットワーク)を数理解析出来るように単純化したモデルをニューラルネットワークと呼ぶ。本来は脳の神経回路網を意味する言葉でもある。一般には複数の層により構成されるが、その高機能化のために層の数を増やすとエラーが全層に伝わらず、学習が困難になるという問題があった。近年、この問題を解決する学習(深層学習・ディープラーニング)アルゴリズムが発見され、高い機能・豊かな表現力を持つ「深層ニューラルネットワーク」の学習が可能となった。この技術が、現在の第三次人工知能ブームの火付け役となった。

#### ※7 シナプス

脳の高い情報処理能力のもう一つの重要な要素がこのシナプスである。シナプスとはニューロン同士の接合点であり、ニューロン同士の信号受け渡しの水門の役割をする。シナプスにおける信号の伝達効率率は様々な条件によって変化し、この変化が脳の「学習」を主に担っていると考えられている。

#### ※8 負性抵抗

一般的に電気抵抗は正の値しかとらず、電圧増加に応じて電流は増加する。しかしある領域のみ増加すべき電流が減少するような状態が現れることがあり、これを負性抵抗という。電流電圧特性の中ではピーク形状となり、その領域では一つの電圧に対して系が複数の状態を取りうることを示している。一例として半導体素子等で実現され、自励発振の発生源として利用されている。なお、負性抵抗は機械系の摩擦抵抗にも現れることが知られている。

#### ※9 リザーバ計算

次世代の情報処理形態として最近注目を集めているニューラルネットワークの一種。リザーバとは貯水池という意味を持ち、中心部のネットワークで情報がさざ波のように干渉し合う様子からこの名前がついた。小脳の中の神経回路網構造を模倣している。