

メモリスタ機能を有する原子層物質を発見

—脳内シナプスのように学習するデバイスへの新たな一歩—

1. 発表者：

- 吉田 将郎（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程 2年）
鈴木 龍二（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程 2年）
張 奕勁（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程 3年）
中野 匡規（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻 特任講師）
岩佐 義宏（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻 教授 / 理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー）

2. 発表のポイント：

- ◆原子層物質（注1）の一種である二硫化タンタルの超薄膜が、次世代不揮発性メモリ（注2）「メモリスタ」（注3）として機能することを発見。
- ◆従来のメモリスタとは動作原理が異なり、素子構造が単純で高密度実装が容易。
- ◆新しい多値デバイスとして、次世代の「脳型コンピュータ」に用いられる可能性がある。

3. 発表概要：

脳の情報処理の仕組みを模倣して動作する脳型コンピュータは、膨大な量の情報を効率的に「学習しながら」処理するのに適したデバイスであり、従来のコンピュータを遥かに超える性能を実現できる可能性がある。脳の中では、ニューロン（注4）の間をつなぐシナプス（注5）の結合強度を変化させることで、情報の記憶や忘却が実現されているが、これは一つのニューロン、あるいは一つのシナプスが複数の情報を同時に処理することで実現されている。この仕組みを情報処理に利用するためには、従来のコンピュータのように情報を“0”と“1”の二つで処理するのではなく、中間の値も利用する多値デバイスを実現することが必要である。その候補として、メモリスタと呼ばれる次世代不揮発性メモリが注目されているが、2008年に初めて開発されて以降、その素子構造や材料が抜本的に見直されたことはほとんどなかった。

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻の岩佐義宏教授率いる研究グループは、グラフェン（注6）に類似した原子層物質の一種である二硫化タンタルの超薄膜が、メモリスタとして機能することを発見した。これまでメモリスタ動作を実現するには、酸化物薄膜の積層構造を作製する必要があった。一方本研究では、原子層物質の一種である二硫化タンタルの超薄膜を用意するだけでメモリスタ動作を実現できることが明らかになった。これは新原理に基づくデバイスであり、特に素子構造の簡素化は、製造コストの低下や集積度の向上などに直結するため、応用上も極めて重要である。本研究成果がメモリスタの新たな開発指針となることが期待される。

本研究成果は、米国科学雑誌『Science Advances』（平成27年10月2日）に掲載される。

4. 発表内容：

①背景

来たる高度情報化社会においては、人間並みの複雑な情報処理を実現するコンピュータが必ず必要になってくる。そこで現在、人間の脳内で行われている情報処理の仕組みを模倣して動作する脳型コンピュータを開発する試みが始まっている。脳内の神経回路は、ニューロンと呼ばれる細胞と、ニューロン間をつなぐシナプスと呼ばれる部位から構成される。情報の入力頻度が多いと、シナプスが変化しニューロン間の結合が強まって、情報が記憶される。逆に入力頻度が少ないと、結合が弱いままで情報は忘却される。

脳型コンピュータを実現するには、ニューロンとシナプスに対応した電子素子が必要である。そこでシナプス素子として、「メモリスト」と呼ばれる次世代不揮発性メモリが注目されている。不揮発性メモリとは、電源を切っても記憶した情報が消えないメモリのことである。電圧を加える回数を増やすたびにメモリストの抵抗値が段階的に変化し、各中間的な抵抗値が電圧を遮断しても保持されるという、多値の不揮発性メモリとしてメモリストは動作する。脳型コンピュータにおいてメモリストはニューロン素子間に接続され、メモリストへ電圧を加えることがシナプスへの情報の入力に対応する。電圧を何度も加えると、ニューロン素子間の電気の流れやすさが徐々に変化するが、これは情報が高頻度に入力されてニューロン間の結合が強くなることに対応する。2008年に米ヒューレット・パカード (HP) 研究所で初めてメモリストが開発されて以来、メモリストの研究開発が世界中で行われている。

しかしながら、現時点でメモリスト研究が急発展しているとは決して言えない。原因の一つは、これまでの研究のほとんどが、2008年に初めて報告されたメモリストの動作原理や素子構造を踏襲していることである。従来型のメモリストは酸化物の多層膜構造を有し、電圧印加に伴う原子配置の変化を利用して動作している。メモリストの研究開発を活性化させるためには、従来型とは異なる材質、構造の、全く新しいメモリストの形を提示する必要がある。

②研究内容（具体的な手法など詳細）

そこで本研究グループは、近年注目を集める新規ナノ材料「原子層物質」の一つ、二硫化タantal (TaS₂) の超薄膜に着目した。原子層物質とは、2008年にノーベル物理学賞の対象になったグラフェンのような、層状構造を有する物質の超薄膜である。タantal (Ta) と硫黄 (S) の原子層から構成される TaS₂ 超薄膜 (図 1 A) をシリコン基板上に用意し、超薄膜上に電圧印加及び抵抗測定用の電極を設置して、素子を完成させた。超薄膜の厚みは 7 ~ 100 ナノメートル、大きさは数ミクロン各程度である。

実験では、素子に 4 ボルトの電圧を短時間加えた (図 1 B)。そして電圧を加える操作を繰り返した。すると、電圧を加える回数を重ねるごとに、抵抗値の増加が観測された (図 1 B)。すなわち、素子は電圧印加の履歴を記憶していることになる。さらに、電圧印加が終了するたびに抵抗値の経時変化を追跡したところ、各電圧遮断後の抵抗値がほとんど変化しなかった。つまり電圧を遮断した後の各状態は、いずれも不揮発な状態である。よって素子は多値の不揮発性メモリとして動作しており、メモリストと言える。

本研究で実証されたメモリスト動作は、TaS₂ 超薄膜において生じる電子の相転移を利用している。相転移とは、例えば水が、水分子が自由に動ける液体状態と動けない固体状態 (つまり氷) の間を移り変わることである。TaS₂ の超薄膜は、多数の電子が自由に動ける低抵抗な準金属的状态 (図 1 C 左)、動けない高抵抗な絶縁体的状态 (図 1 C 右)、さらに一部の電子が動ける複数の中間的状态 (例えば図 1 C 中央) の間を相転移することが本研究で分かった。

過冷却状態の水に振動を加えると氷になるように、本研究の TaS₂ 超薄膜においては電圧を加えることが刺激となって、異なる状態間を行き来できていると考えられる。

③今後の展望

本研究で実現したメモristaは、動作原理や材料の点で従来型メモristaと一線を画しており、メモrista研究開発の上での新たな試金石になりえる。本研究で達成した構造の単純化は、製造コストの低化や集積度の向上に直結するものであり、シナプス素子の高密度実装が必要な脳型コンピュータの実現を後押しするものである。また本研究で採用した原子層物質は、現在ポストシリコン・ポストグラフェン材料として注目されているナノ材料である。本研究が原子層物質の未知の潜在能力を再認識する契機となり、原子層物質の研究を促進する効果も期待できる。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Science Advances」（オンライン版：10月2日午後2時：米国東部時間）

論文タイトル：Memristive phase switching in two-dimensional 1T-TaS₂ crystals

著者：Masaro Yoshida*, Ryuji Suzuki, Yijin Zhang, Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa

DOI 番号：10.1126/sciadv.1500606

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター

教授 岩佐 義宏（いわさ よしひろ）

TEL：03-5841-6828（東京大学）、048-467-8083（理化学研究所）

E-mail：iwasa@ap.t.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説：

注1：原子層物質

グラフェンのような、原子層から構成されるシート状の物質。グラフェンに次いで注目されている原子層物質が、遷移金属ダイカルコゲナイドの超薄膜である。これは遷移金属原子とカルコゲン原子（硫黄など）から構成される原子層物質であり、本研究で扱った二硫化タンタルはその一種である。

注2：不揮発性メモリ

電源を切っても記憶した情報が消えないメモリ。

注3：メモrista

通過した電荷を記憶し、それに伴って抵抗が変化する素子。記憶素子（メモリ）と抵抗素子（レジスタ）の特徴を併せ持つので、二つの言葉を組み合わせて名付けられた。

注4：ニューロン

神経回路を構成する細胞。

注5：シナプス

ニューロン間に形成される接合部分。

注6：グラフェン

1原子の厚みの炭素原子のシート。炭素の単原子層。グラファイト（黒鉛）は、無数のグラフェンが層状に積み上がったものである。2004年に初めてグラフェンが発見された後、グラフェンにおける特殊な現象が多数観測されている。またグラフェンの優れた機能性が多数明らかになりつつあり、新しいナノ材料としても注目されている。2010年にはグラフェンの発見者に対してノーベル物理学賞が与えられた。

8. 添付資料：

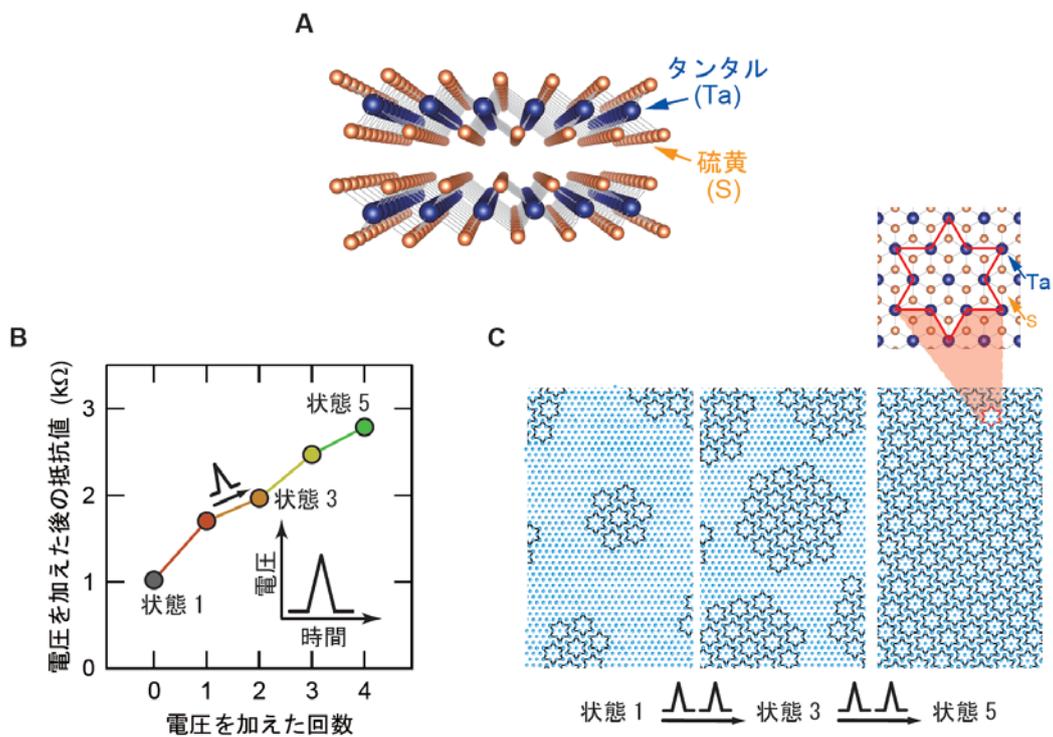


図 1.

(A) 二硫化タンタル (TaS₂) の超薄膜の模式図。

(B) 電圧を加える操作を繰り返したときの、抵抗値の推移。

(C) 電圧を加える操作を繰り返したときの、超薄膜を上から見た電子状態の変化の概念図。黒線で結ばれても囲まれてもいない青色球が、自由に動くことができる電子を表わす。