

人間のように記憶も忘却もする新しい脳型素子

—世界初、たった一つの素子で複雑なシナプス活動を実現—

解禁日：平成23年6月27日（月）午前2：00

平成23年6月23日

独立行政法人 物質・材料研究機構

独立行政法人 科学技術振興機構

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点の大野 武雄博士研究員、長谷川 剛主任研究者、青野 正和拠点長らの研究グループは、カリフォルニア大学ロサンゼルス校（米国）のJ. ジムゼウスキー教授と共同で、脳の神経活動の特徴である2つの現象「必要な情報の記憶」と「不要な情報の忘却」をたった一つの素子で自律的に再現する新しい素子“シナプス素子”の開発に世界で初めて成功しました。
2. 現在のコンピュータシステムは高性能化の限界が近付いているとされ、さらなる高性能化には脳型回路・脳型コンピュータの開発が必要とみられています。その実現に不可欠なのが今回の素子で、いわば1つ1つの神経細胞に相当します。人間の脳は、情報の入力頻度が高いほど確実に記憶し、逆に入力頻度が低ければ曖昧な記憶しか形成されずに忘却します。これらの仕組みは脳の神経回路におけるシナプスの結合強度の変化によって実現されていると考えられています。
3. 本研究で実現したシナプス素子は、電気信号の入力頻度によって自身の結合強度を調節することができます。信号強度とその入力回数が同じであっても、入力頻度の高い信号は長時間持続する高い結合強度を誘発し、入力頻度の低い信号は一時的にのみ結合強度を増大させます。このようなシナプス素子の動作は脳内におけるシナプスの結合強度の変化とよく一致することが分かりました。
4. シナプス素子は、金属電極とイオン・電子混合伝導体電極で構成されています。電気信号の入力頻度に依存したイオンの動きを利用し、電極間に形成される金属原子架橋の状態（シナプスの結合強度）を制御することに成功しました。
5. 神経回路の重要な構成要素であるシナプスの人工的な再現は脳型回路や脳型コンピュータにとって不可欠です。複雑な回路やソフトウェアによって実現されていた従来の人工シナプスは、予め設計された通りの動作しかできません。シナプス素子は事前の動作設計無しに多様な動作が可能であることから、将来、まるで人間のように経験によって賢くなる人工知能の構築に大きく寄与することが期待されます。
6. 本研究成果は、日本時間2011年6月27日2：00（現地時間26日18:00）に英国科学雑誌「Nature Materials」のオンライン速報版で公開されます。

研究の背景

人間の記憶に関するさまざまな仕組みは大変興味深く、神経科学・医学・生物学などの分野で盛んに研究されています。同時に、その仕組みを再現することで動作する脳型回路、知能機械あるいは脳のように柔軟なコンピュータの実現は、今日の高度情報化社会における新たなブレークスルーをもたらす可能性を秘めています。

脳の神経回路は常に変化し続けていますが、そのうちのシナプスの結合強度（注1）の変化は記憶に関する最も重要な仕組みの一つであると考えられています。そのため、脳型回路やその基本素子の開発におけるシナプス活動の再現は重要な課題です。従来までのシナプス動作は、トランジスタや抵抗・コンデンサなどを組み合わせた電子回路、そしてソフトウェアによるプログラミングによって人工的に模倣されています。つまり、人間によって設計された通りの動作しかできません。もし、何ら設計無しにシナプス活動を再現する素子や回路が存在すれば、自ら学習して賢くなる人間の脳のようなコンピュータの実現も可能となります。

成果の内容

本研究で発明された「シナプス素子」（図1）は、自身の結合強度（コンダクタンス）（注2）を電気信号の入力頻度によって制御することが可能です。低頻度（例えば20秒間隔）でパルス電圧を入力すると結合強度は一時的に増大し、その後初期値に向かい減少します（図2）。一方で、高頻度（例えば2秒間隔）でパルス入力を行った場合、結合強度の増大した状態が長時間持続します。このような変化は、神経回路におけるシナプスの結合強度の変化と一致し、それぞれ短期可塑性および長期増強に相当することが分かりました。

シナプス素子の特性は、本研究グループが以前から研究しているイオンと原子の移動を制御した素子「原子スイッチ」を用いて得られました。原子スイッチに十分大きな電圧信号を入力すると、硫化銀（注3）と白金の電極間に銀原子で構成された原子スケールの結合（銀原子架橋）が安定的に形成されます。本研究では、脳内のシナプス活動時に観測される活動電位程度の小さなパルス電圧をシナプス素子に入力することで、不安定な銀原子架橋の形成とその後の自然消滅を実現しました（図3）。この場合の結合強度の変化は、シナプスの短期可塑性に相当します。また、パルス電圧の高頻度な入力は銀原子架橋の安定形成を誘発し、その結果として長期増強が発生します。

本研究成果の重要な点は、シナプス素子が回路設計、他の電子回路およびプログラミングなどを一切必要としないことです。電気信号の入力頻度によって自律的にコンダクタンスを制御してシナプス動作をする素子はこれまでありませんでした。

本研究ではさらに、実験心理学における人間の記憶（注4）に関する二重貯蔵モデル（注5）を再現しました。シナプス素子への情報入力を頻繁に繰り返すと、情報を継続的に保存する記憶システムである長期記憶として保持され、入力頻度が低い場合は短期記憶を形成します（図4）。また、記憶された情報が時間経過とともに失われることを示す忘却曲線（注6）を実験的に得ました。さらに、画像記憶のデモンストレーションを行い、記憶と忘却の仕組みの再現に対するシナプス素子の有用性を示しました（図5）。

波及効果と今後の展開

シナプスの結合強度の変化およびそれをベースとした人間の記憶と忘却を、事前の設計なしに再現するシナプス素子は、これまでの人工脳型回路のデザインを大きく変える可能性を秘めています。将棋やチェスの試合で、短時間にすべての手を計算してしまうコンピュータと対等な勝負を人間ができるのは、人間が過去の経験に基づいた直感的な判断をしているからです。シナプス素子は、この直感的な判断をするコンピュータの開発を可能とします。

脳内には膨大な数のシナプスやニューロンが存在し、それらは複雑なネットワークを構築しています。脳内における信号伝達の仕組みにより近づくために、今後はシナプス素子のネットワーク化を進める予定です。単体で動作するナノスケールのシナプス素子を用いることで、脳内の神経回路と同様な三次元回路への集積化も容易になります。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省・産学官連携プロジェクトにおける研究課題「原子スイッチを用いた次世代プログラマブル論理演算デバイスの開発」（研究代表者：青野 正和）、および科学技術振興機構・戦略的国際科学技術協力推進事業日本ードイツ研究交流における研究課題「固体電解質原子スイッチ動作における電荷交換と移動に関する研究」（研究代表者：長谷川剛）の支援を受けて行われました。

掲載論文

題目：Short-term plasticity and long-term potentiation mimicked in single inorganic synapses

著者：Takeo Ohno, Tsuyoshi Hasegawa, Tohru Tsuruoka, Kazuya Terabe, James K. Gimzewski, Masakazu Aono

雑誌：Nature Materials (2011) (巻・号・ページは現時点では未定)

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

主任研究者 長谷川 剛 (はせがわ つよし)

独立行政法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点

E-mail: HASEGAWA.Tsuyoshi@nims.go.jp

TEL: 029-860-4734

URL: http://www.nims.go.jp/atom_ele_gr/index.html

(JST の事業に関すること)

屠 耿 (と こう)

独立行政法人科学技術振興機構 国際科学技術部

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

E-mail: sicpge@jst.go.jp

TEL: 03-5214-7375

FAX: 03-5214-7379

(報道担当)

独立行政法人物質・材料研究機構 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

独立行政法人科学技術振興機構 広報ポータル部

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

E-mail: jstkoho@jst.go.jp

TEL: 03-5214-8404

FAX: 03-5214-8432

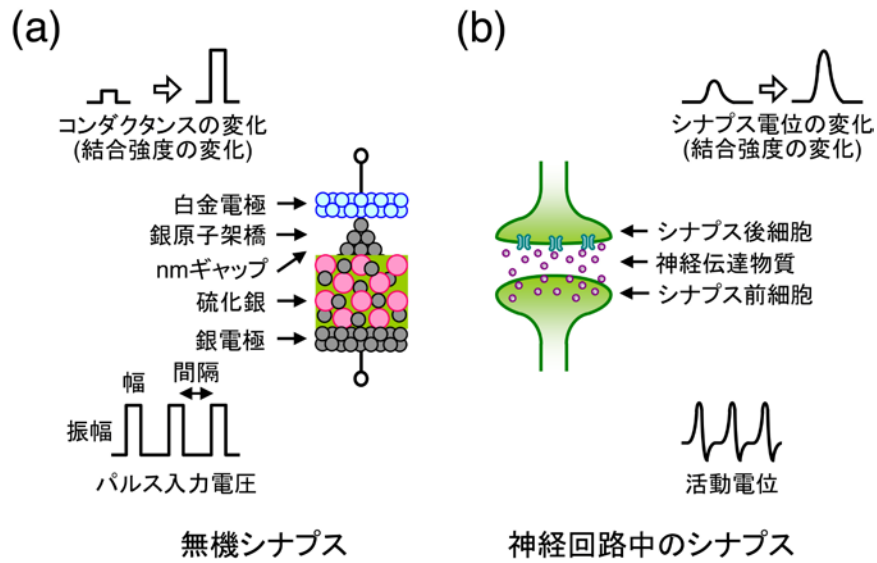


図 1 シナプス素子の模式図。(a)シナプス素子にパルス電圧を印加すると、硫化銀中の銀イオンが原子として析出し、ナノメートル(nm)ギャップ中に銀原子架橋を形成する。銀原子架橋の状態によってシナプス素子の結合強度は変化する。(b)神経回路中のシナプスによる信号伝達。活動電位がシナプス前細胞に到達すると神経伝達物質が放出され、それがシナプス後細胞に到達することでシナプス電位が発生する。シナプスの活動状態によってシナプス電位の発生の仕方は変化する。

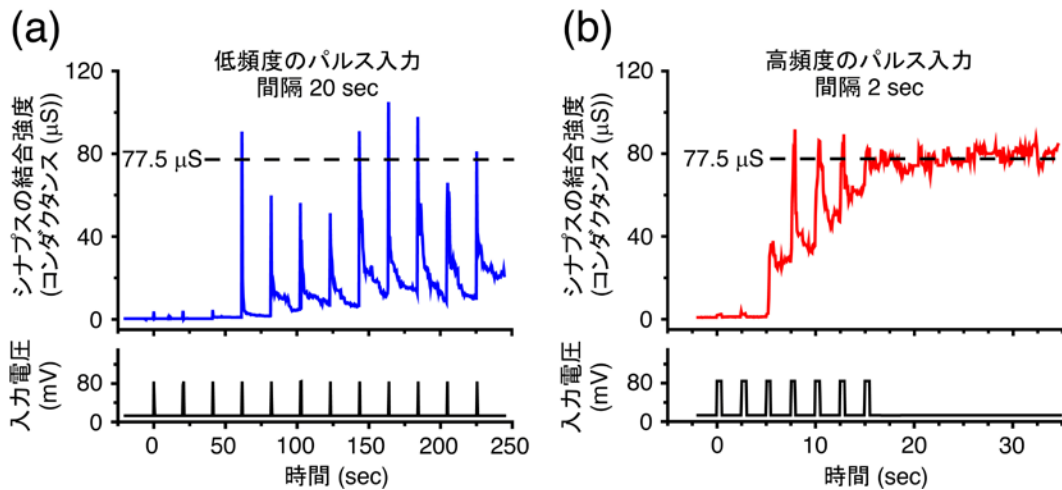


図 2 シナプス素子の結合強度の変化。(a)間隔 20 sec、振幅 80 mV、幅 0.5 sec の条件でパルス電圧を繰り返し入力すると、コンダクタンスは一時的に $77.5 \mu\text{S}$ (マイクロジーメンズ) 付近まで増加するが、時間経過にともない初期値に向かって減少する (=短期可塑性)。結合強度は信号の伝達効率を意味するため、電気回路におけるコンダクタンスと神経回路における結合強度は等価とみなすことができる。図中の点線は銀原子一個が白金電極に接触している状態を示す。(b)2 sec 間隔で数回のパルス入力を行った場合、高い結合強度が長時間持続される (=長期増強)。

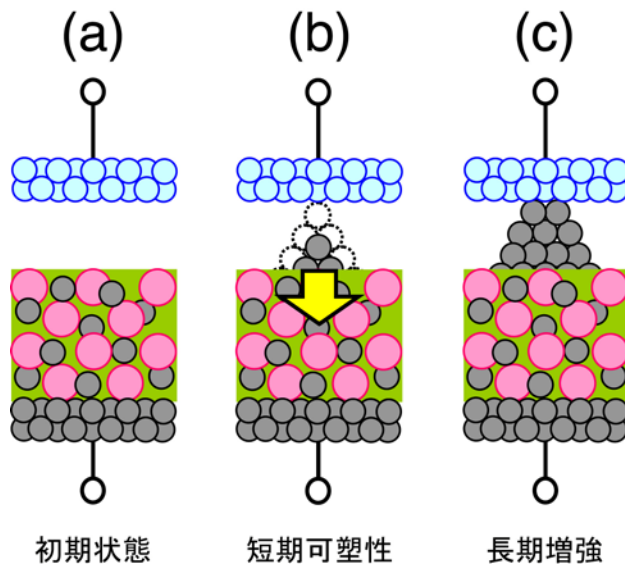


図 3 銀原子架橋の様子。(a)初期状態。電気信号の入力が無ければ銀原子の析出は無い。(b)短期可塑性の状態。銀原子が白金電極と接触していない場合の銀原子架橋は不安定なため、初期状態に戻ろうとする。(c)長期増強の状態。太い銀原子架橋は安定に存在する。

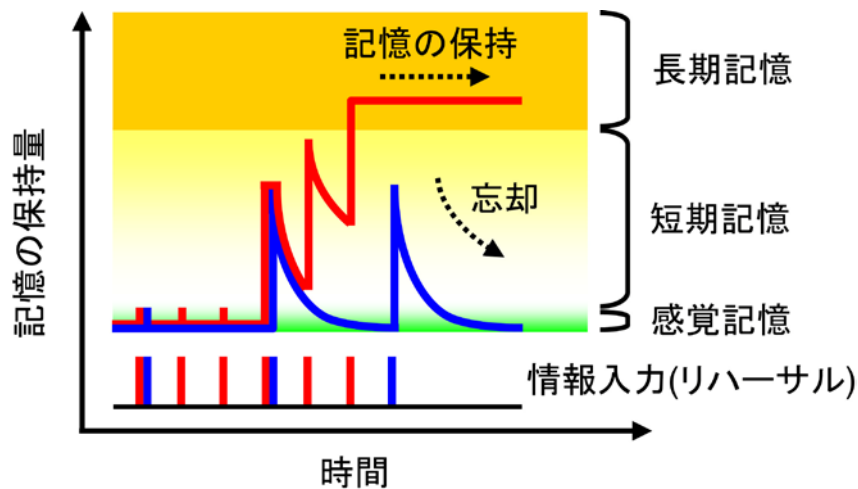


図 4 シナプス素子の記憶モデル。情報入力の高頻度な繰り返しは長期記憶を形成するのに対し（赤色の線）、低頻度な入力は長期記憶を形成せず、短期記憶となる（青色の線）。始めの数回の情報入力では記憶レベルはほとんど変化せず、感覚記憶に対応する。図2の結果はこの記憶モデルとよく一致しており、シナプス素子は人間の記憶に関する二重貯蔵モデルをよく再現できる。

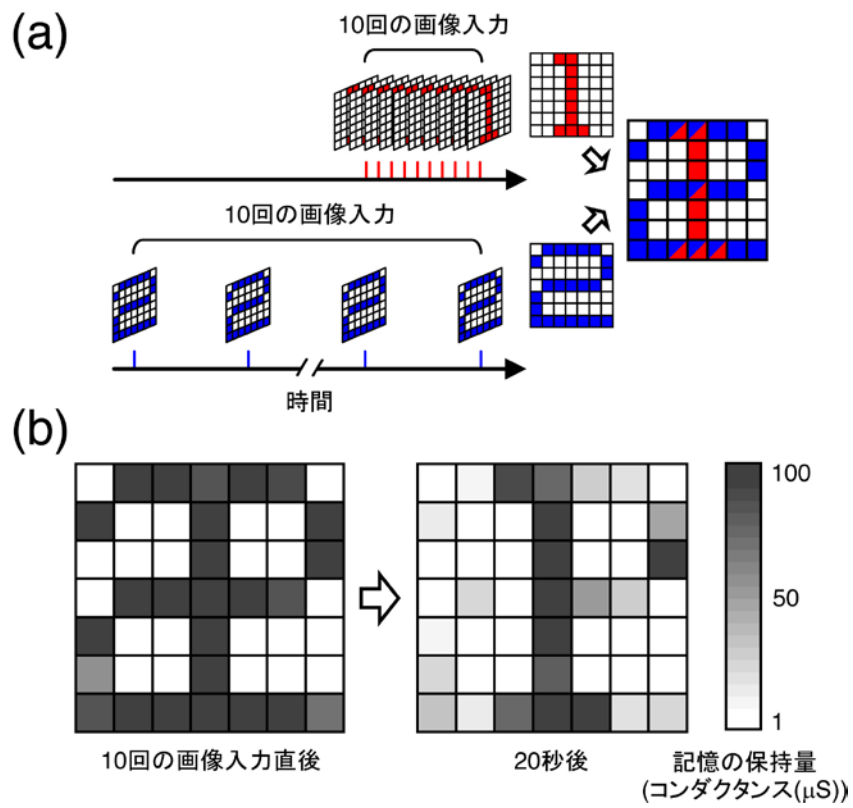


図5 シナプス素子を用いた画像記憶。(a)7×7に配列されたシナプス素子のアレー中に入力頻度の異なる二つの画像を同時に記憶するデモンストレーション。アレー中の個々の画素は一つのシナプス素子に対応する。(b)画像記憶の結果。入力間隔2 secの文字‘1’と20 secの文字‘2’を10回入力してからしばらく待つと、‘1’は表示され続けたのに対し(=長期記憶)、‘2’は消失した(=短期記憶)。

用語解説

(1) シナプスの結合強度

シナプス前細胞からシナプス後細胞への信号の伝達効率のこと。シナプスとは、神経回路を構成する細胞（ニューロン）間に形成される接合部分およびその構造のことである。結合強度の変化は人間の記憶や学習に大きく関与すると考えられており、例えば、短期的に伝達効率が変化する短期可塑性、長期的に増加する長期増強がある。

(2) コンダクタンス

電気回路における電流の流れやすさを示す量。単位はジーメンズ(S)。直流回路における電気抵抗(単位はオーム(Ω))の逆数。

(3) 硫化銀

銀の硫化物のこと。化学式は Ag_2S 。イオンと電子が同時に移動する混合伝導体である。

(4) 記憶

実験心理学における人間の記憶は、情報を覚える記録、情報を保存しておく保持、および情報を思い出す想起という三つの過程によって構成される。

(5) 二重貯蔵モデル

1968年にアトキンソンとシフリンによって提案された心理学の記憶モデル。外界からの情報を一時的に保存する記憶システムである短期記憶、半永久的に保存する長期記憶、および感覚器官からの情報をわずかな時間だけ保存する感覚記憶からなる。情報入力（リハーサル）の回数が多いほど短期記憶の情報が長期記憶に転送される確率が高まる。

(6) 忘却曲線

想起に失敗することを忘却といい、時間経過に伴いどのように忘却するかを示したグラフ。情報の入力直後に忘却は急速に進行するが、その後の忘却は緩やかとなる。1885年にエビングハウスによって最初の結果が提示された。