

極小の500ピコワットで動くトランジスタ 遅い信号を高效率処理する「生体神経組織」を模倣

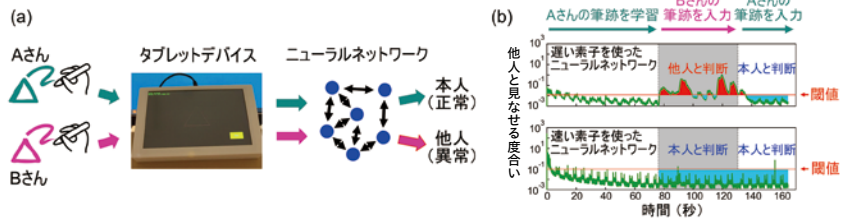
スマートフォンなどの情報通信機器を誰もがどこでも利用できる便利で安全な情報社会の実現には、機器の小型化・低消費電力化・情報処理能力の効率化が必要です。今やデバイスの中央演算処理装置(CPU)は、外部からの電圧や電流に応じて素子を通る電流を制御するスイッチング素子のトランジスタを数百億個も集積しています。従来の技術によるトランジスタの小型化・省エネ化は限界を迎えつつあったため、異なる原理に基づいた情報処理技術が求められていました。

産業技術総合研究所はこれまで、物質中で起こるさまざまな物理現象を素子として応用することを目指して、酸化物材料の作製技術や素子化技術などを開発してきました。今回、同研究所電子光基礎技術研究部門強相関エレクトロニクスグループの井上悠研究員、井上公上級主任研究員らがこれらの技術を応用し、遅い入力信号を高效率に処理できる「生体神経組織」の動作を人工素子で模倣。これにより、500

ピコ(ピコは1兆分の1)ワットという非常に小さな電力で動作できるトランジスタの開発・動作実証に成功しました。

このトランジスタは人工のニューラルネットワークの構築に適しており、開発した素子を想定したシミュレーションで、Aさん・Bさんが書いた三角形の筆跡の異常検知にも成功しました。一方、開発した素子より10万倍速い素子を想定したシミュレーションでは失敗。これはゆっくりと動作する素子ほど、長期間にわたって情報を保持できるためです。人と相互作用するような情報処理では、生体神経組織のように「遅い」ことを積極的に利用した省エネが期待されます。共同研究グループは今後、開発したトランジスタを用いたニューラルネットワークの構築により、小さな電力でも動作するエッジデバイス向けの情報処理基盤を整えます。

■ニューラルネットワークを利用した筆跡の異常検知のシミュレーション



(a)はAさん、Bさんが書いた三角形の筆跡を見分ける異常検知の概念図。(b)は開発した素子を想定したシミュレーションで、筆跡の異常検知の検証実験を行った結果。生体神経組織を模倣した、遅い素子を用いたニューラルネットワークの方が、筆跡の異常検知に成功していることがわかる。

小型かつ堅牢な超高精度光格子時計を実現 地殻変動の精密な観測など、多様な分野での利用に期待

原子時計の一種である光格子時計は、現在の「秒」の定義の基準となっているセシウム原子時計に対して100倍以上の精度を実現します。その精度はおよそ100億年に1秒の誤差に相当し、非常に高い精度であることから、光格子時計は2030年の「秒の再定義」の有力な候補として注目を集めています。しかし、将来の社会基盤としてさまざまな環境で利用するには、装置のさらなる小型化と長期運用可能な堅牢性が求められていました。

今回、東京大学大学院工学系研究科の香取秀俊教授らの共同研究チームは、光格子時計の装置体積を従来の約4分の1に当たる250リットルへと小型化することに成功。高精度な光格子時計に必要な黒体放射シールドを時計分光用の真空槽内に組み込み、また、光軸の調整機構を排除した安定な光学系を採用しました。これらを高密度に配置した制御回路と組み合わせることで、小型かつ堅牢な超高精度光格子時計を実現。さらに、制御回路は機能ごとに交換できるように設計することで、運用時の保守もしやすくなりました。

高精度な原子時計では、地上わずか数センチメートルの高さの違いで、アインシュタインの一般相対性理論から導

かれる時間の遅れによる周波数の変化を観測可能です。今後は、この周波数の変化を利用して標高差を計測する新たな応用技術「相対論的センシング」などで光格子時計の活用が望まれます。具体的には、数センチメートル精度のプレート運動や火山活動による地殻の上下変動の監視、数時間から数年かけて起こる地殻変動の精密な観測、超高精度な標高差計測・測位システムの確立など、多様な分野で利用することが期待されます。

■19インチラックに組み込んだ250リットル光格子時計



開発した超高精度小型光格子時計装置。冷却した原子を光格子中に捕獲し、黒体放射シールドの中で時計遷移を高精度に分光する。この分光を行う時計分光用真空槽、それに必要な光共振器やレーザー・制御システムを搭載している。横の大きさは40センチメートルと非常に小型だ。

(写真は島津製作所より提供)

目のない線虫も光を感知している

光反応に必要な遺伝子を発見、駆除法開発へ道

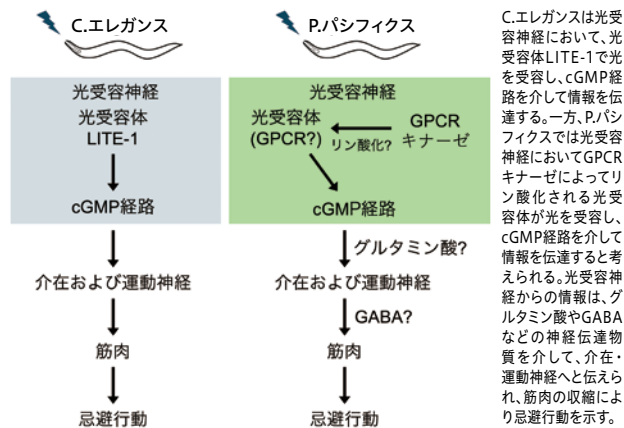
多くの生物にとって光の感知は重要な機能の1つであり、脊椎動物では光受容体たんぱく質であるオプシンが光を受容し、その情報を2次メッセンジャーであるサイクリックGMP (cGMP) 依存性経路を通じて伝達しています。これに対し、線虫のほとんどは目のような光受容器官を持たないにも関わらず、いくつかの種で光反応性が確認されています。生物学のモデル生物である「C.エレガンス」の光受容メカニズムはある程度解明されていますが、それ以外の線虫種においてどのように光を受容しているのかは不明でした。

広島大学大学院統合生命科学研究科の奥村美紗子准教授らの研究グループは、C.エレガンスと比較可能な進化生物学のモデルである別種の線虫「P.パシフィクス」に着目。C.エレガンスとは異なる遺伝子を使って光に反応していることを明らかにしました。始めに、P.パシフィクスが光に忌避行動を示すかを調査したところ、特に青色光や紫外光に対して強い反応を示しました。しかし、バイオインフォマティクス解析の結果、既知の光受容たんぱく質の遺伝子候補は見つかりませんでした。そこで、多くの変異体から光忌避行動を示さない変異体を見つけ出す「順遺伝学的スク

リーニング」を行い、光応答に重要な遺伝子を特定しました。また、神経伝達物質であるGABAやグルタミン酸が忌避行動に必要なことも明らかにしました。

今回の研究により、C.エレガンスとP.パシフィクスの光受容における共通点と相違点が明らかになり、暗闇に生息する線虫でも光受容のメカニズムが多様に進化している可能性が示唆されました。植物や動物に寄生する線虫も多く存在することから、今回の成果は線虫が引き起こす被害に対する新たな駆除法の開発に寄与すると期待されます。

■ C.エレガンスとP.パシフィクスの光忌避行動メカニズムの比較



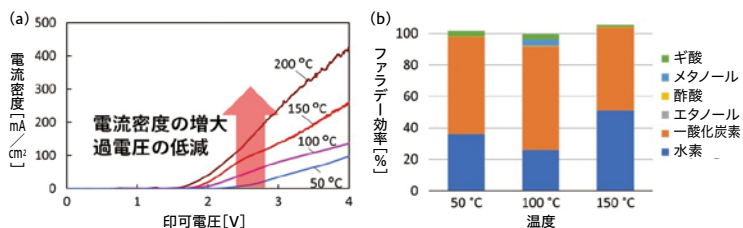
高温高压水環境で高効率にCO₂を資源化 未利用廃熱にも着目、炭素完全循環社会の実現に一步

化学産業のカーボンニュートラル達成のために、化石資源以外の原料を使用する取り組みが進んでいます。特に、二酸化炭素 (CO₂) の大気中濃度削減に向けて、再生可能エネルギー由来の電力でCO₂を化学品原料に直接変換する「電気化学的CO₂還元反応 (CO₂RR) プロセス」は抜本的なCO₂削減手法として注目されています。しかし、現状、CO₂RRのエネルギー効率は低く、その改善が実用化に向けた大きな課題でした。

東北大学学際科学フロンティア研究所の菅居高明教授らの研究グループは、高温高压状態にある水環境 (水熱反応場) を利用することでCO₂RRプロセスの高効率化を可能としました。一般に、電気化学反応は高温化に伴い促進するため、工業的な水分解は100度未満の高温で実施します。一方で、気体は温度上昇によって水中への溶解度が低下するため、CO₂RRプロセスの場合は、過度な高温条件ではCO₂溶解度とエネルギー効率が共に下がることになっていました。研究グループでは100気圧以上の高压環境とすることで、高温条件でCO₂

溶解度が低下する問題を克服。その結果、150度、100気圧の水熱環境でCO₂溶解度と拡散係数の向上による電極へのCO₂供給を促進することで、CO₂RRプロセスの大幅なエネルギー効率の改善ができることを実証しました。

また、研究グループは高温環境にするためのエネルギー確保先として、工場や発電所の未利用低温廃熱に着目。検証の結果、CO₂吸収量が排出量を上回る「カーボンネガティブ」なメタノール生成の可能性も示しました。化学工学的アプローチを電気化学プロセスに取り入れることで得られた今回の成果は、CO₂を高効率に資源化する炭素完全循環社会の実現に向けた化学産業の変革に貢献するものです。次世代の持続可能な循環型社会において水熱反応場を利用した電解技術が重要な役割を果たすと見込まれます。



(a) 100気圧条件下での各温度における電流電圧曲線。陽極にプラチナ板、陰極に金板、CO₂飽和炭酸水素カリウム溶液を使用。(b) 電流密度が1平方センチメートル当たり100ミリアンペアまでの各温度における生成物の割合。温度上昇に伴って電流密度が増大するため、より低い電圧でも同等の反応が進行しており、エネルギー効率が向上している。