



# NEDO 海外レポート

2026.6.30.

1147

1	【ナノテクノロジー・材料分野】 イオン分離を強化するトランジスタのようなメンブレン (米国)	2026/2/19 公表	1
2	【電子・情報通信分野】 設計と学習で進展する熱力学的コンピューティング (米国)	2026/3/5 公表	3
3	【ナノテクノロジー・材料分野】 逆設計:機能性ポリマーをカスタム作製する新手法 (米国)	2026/3/16 公表	8
4	【電子・情報通信分野】 量子技術を進展させるマイクロ波フォトンの微小な検出器 (スイス)	2026/4/6 公表	13

※ 各記事への移動は Adobe Acrobat の「しおり」機能をご利用ください

URL : [https://www.nedo.go.jp/library/kankobutsu\\_report\\_index.html](https://www.nedo.go.jp/library/kankobutsu_report_index.html)

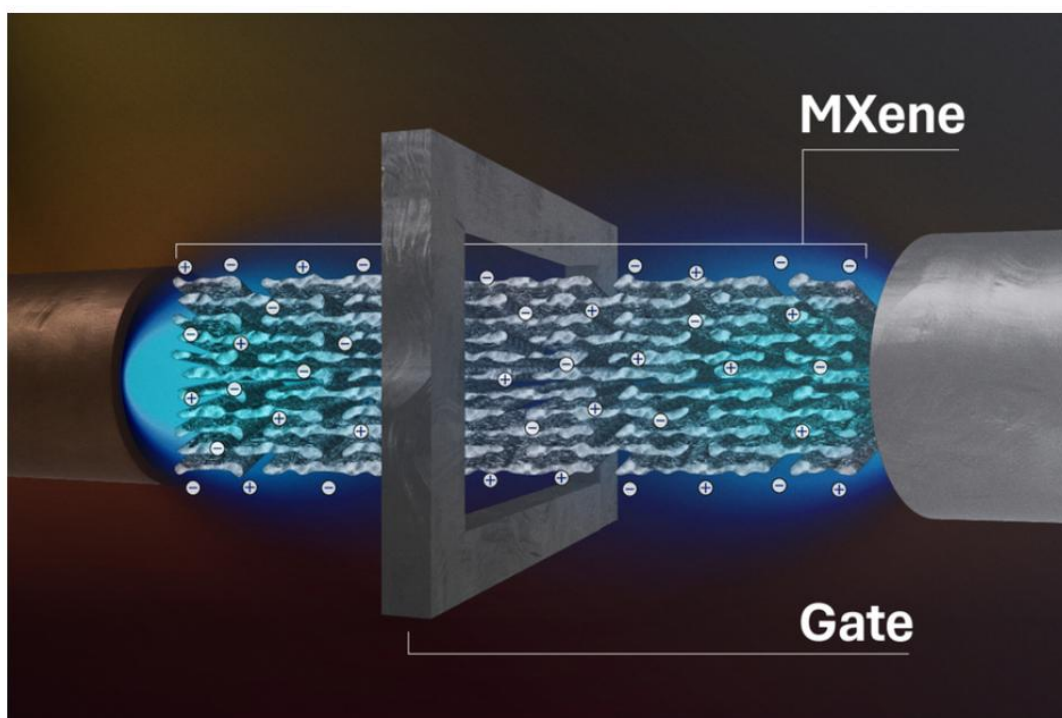
《本誌の一層の充実のため、ご意見、ご要望など下記宛お寄せください。》  
海外レポート問い合わせ E-mail : [q-nkr@ml.nedo.go.jp](mailto:q-nkr@ml.nedo.go.jp)  
NEDO は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の略称です。

【ナノテクノロジー分野】

仮訳

## イオン分離を強化するトランジスタのようなメンブレン（米国）

2026年2月19日



MXeneメンブレンを介したイオン輸送の仕組みを示す概略図。ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)の研究者らは、ゲートに電場を印加することで、メンブレンを介した分子輸送の効率が変化することを発見した。(Graphic: Dan Herchek)

ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)の研究者らが、新しい「トランジスタ」メンブレンに電圧を印加して電氣的に制御することで、イオン分離のリアルタイム制御を実現した。これは、これまで不可能と考えられていた。この最新の研究成果は、水処理、薬剤送達や希土類元素抽出といった精密分離プロセスの効率化に貢献する可能性があり、[Science Advances](#)に掲載されている。

このメンブレンは、原子数個分の薄さの2次元シートであるMXene(マキシム)を積層して作られている。イオンは、このMXene層間の隙間に形成されたナノスケールのチャンネルを押し通って行く。

これまでは、MXene メンブレンの特性が一度作製されると変化しない固有のものであり、イオンの輸送速度は最初から決まっていると考えられていた。

しかし、この分野の進展において、MXene メンブレンがトランジスタのような動作に構成可能であることを発見した。MXene 材料は導電性を持つため、電場の印加によりメンブレンを通る分子輸送の効率を変えることができる。

「この研究は、ゲート電圧を印加することでデバイス内の電流を制御できるという、トランジスタの特性に着想を得たものです」と、本研究論文の筆頭共著者で LLNL 研究員である Aleksandr Noy 氏は言う。「これは、庭のホースの水流量をバルブや足で踏むことで調整することと全く同じ原理です」。

電圧で電流を制御するトランジスタと同様に、MXene メンブレンは印加された電場によって分子の流れを制御する。この表面の電荷が、MXene 層間に入り込めるイオンの量と、イオンの移動のし易さを決定する。このトランジスタのような挙動により、分離プロセス全体を通して MXene メンブレンの輸送特性のオン・オフをリアルタイムで切り替えることができる。

「また、正負の電圧を交互に印加することで、メンブレンでのイオン輸送を促進し、自己ポンプ機能を持たせることができることも実証しました」と、本研究論文の共著者で元 LLNL ポスドク研究員の Aaditya Pendse 氏は言う。「これにより、メンブレンでのイオンの移動効率が向上します」。

「受動拡散に頼るのではなく、メンブレンの分子輸送の能動的な促進を可能にするため、この振動電圧によるアプローチは特に重要な発見です」と、本研究論文の共著者であるマサチューセッツ工科大学の大学院生、Arjun Yennemadi 氏は説明する。

今後は、米国の強固なサプライチェーンに不可欠な重要な物質である、希土類元素イオンの輸送と分離での MXene メンブレンの機能を検証する予定である。

訳：NEDO（担当 イノベーション戦略センター）

出典：本資料は、ローレンス・リバモア国立研究所の記事 “Transistor-like membranes enhance ion separation” (<https://www.llnl.gov/article/54081/transistor-membranes-enhance-ion-separation/>) を翻訳したものである。

【電子・情報通信分野】

仮訳

## 設計と学習で進展する熱力学的コンピューティング (米国)

著者: Elizabeth Ball

2026年3月5日

熱雑音で駆動するコンピューターでエネルギー消費量の大幅な削減が可能に

古典コンピューターと量子コンピューターの両方の効率を阻害する熱雑音を、逆に電源として利用できたならば？熱雑音を抑制したり克服したりするのではなく、コンピューターがそれらを活用できたならば？これらは、熱力学的コンピューティングと呼ばれる比較的新しいコンピューティング分野の目標である。

米国エネルギー省(DOE)のユーザー施設であり、ローレンス・バークレー国立研究所(バークレー研究所)の **Molecular Foundry** と米国立エネルギー研究科学計算センター(NERSC)の研究者らによる共同研究が、これらの目標の実現へと前進した。[\*Nature Communications\*](#) 誌に掲載された本研究の論文において、研究者らはニューラルネットワーク(NN)を模倣する熱力学コンピューターの設計と学習のフレームワークを提案している。これにより、機械学習(ML)にかかるエネルギーの消費量を大幅に削減できる可能性がある。

現代のコンピューティングには、大量のエネルギーが必要である。例えば、Google 検索を 1 回行うだけで 6W の LED を 3 分間点灯させるのに十分なエネルギーを消費する。これは、コンピューターが熱雑音、つまり導電性材料中の電荷キャリア(主に電子)の振動に対処しなければならないことが一因となっている。古典コンピューターでは、トランジスタやゲートといった最小のデバイスでさえも、このような振動エネルギーの数千倍もの規模のエネルギーで動作している。信号とノイズのこのようなスケールの違いによって安定したアウトプットが得られ、計算が成り立っているが、これにはエネルギーコストがかかっている。古典コンピューターでは、熱力学的効率の限界をはるかに超えた、安定した動作のために大量の電力を必要としている。

古典・量子コンピューターではどちらも、熱雑音の排除または抑制を目指している。しかし、非従来型コンピューティングの一分野である熱力学的コンピューティングは、両者のパラダイムを逆転させ、まさに熱雑音の振動を動力源として利用する。これにより、計算に必要な外部エネルギー量が大幅に削減され、多くの量子コンピューターでは不可能な、室温下での動作が可能になる。熱力学的コンピューティングは、ムーアの法則を超えるマイクロエレクトロニクスと、低消費電力でエネルギー効率の高いコンピューティングの有望な一例と言える。

「熱力学コンピューティングは、ノイズを動力源としています」と、本研究論文の著者の一人である **Molecular Foundry** のスタッフサイエンティストの **Stephen Whitelam** 氏は説明する。「熱エネルギーと同程度のエネルギーを持つ物理デバイスを放置した場合に、その状態が熱揺らぎによって時間とともに変化することを前提としています。私たちの目標は、この経時的な展開が何らかの有用な結果をもたらすようにプログラムすることです。古典・量子コンピューティングはノイズを排除しようとするのに対し、熱力学的コンピューティングはノイズを使って動作するのです」。

## 課題の克服

熱力学的コンピューティングを実用的な計算フレームワークとするには、主に 2 つの解決すべき課題がある。第一に、現在の熱力学コンピューターは熱力学的平衡状態で計算を行うように設計されており、コンピューターが最低のエネルギー状態に落ち着くまで次の計算を実行することができない。システムの基底状態が明確となっても、平衡状態に達するまでの時間は予測不可能であり、日常的な計算での使用には長すぎる場合がある。

さらに、熱力学的コンピューティングで実行できる計算の範囲は、線形代数問題の解決に限られている。これを汎用計算に活用するためには、非線形計算も解けるようになる必要がある。

**Whitelam** 氏とその同僚の **Corneel Casert** 氏はデジタルシミュレーションを用いてこれらの課題に取り組み、平衡状態でない熱力学コンピューターにおいても、NN が実行するような非線形計算が実際に可能であることを本研究の論文で実証している。



NERSCのスパコン Perlmutter の前に立つ Corneel Casert 氏 (左) と Stephen Whitelam 氏 (右)。

(Credit: Elizabeth Ball)

Whitelam 氏と Casert 氏によると、熱力学コンピューターは、その構成要素自体が非線形であれば、平衡状態に関係なく指定されたタイミングで非線形計算を実行するよう学習できるようになるという。これは、平衡状態を待たずして、熱力学コンピューターがより古典的なコンピューター的な動作をするということである。このことはまた、NN が処理できるのと同じ種類の複雑な非線形問題にまで熱力学アルゴリズムの範囲を押し広げる。つまり、熱力学的コンピューティングは、これまでは ML の能力範囲外であったワークロードに適したツールとなる可能性がある。

「非線形熱力学回路は、NN のニューロンのように振る舞うことができます」と Whitelam 氏は言う。「非線形性こそが、NN にその表現的な能力を与えるものです。これらの熱力学ニューロンを繋いだ構造を構築すれば、そのような構造は NN を模倣する表現的な能力を持ち、ML を実行できるはずだと私たちは考えました」。

これらの解決方法は、熱力学的コンピューティングの可能性を大きく広げる。

## 逆転の学習

そして次に課題となるのは、このようなシステムによる学習である。熱力学コンピューターは確率的なシステムであり、そこで実行される 2 つのプロセスは同一とはならず、デジタル NN の学習手法は適用できない。しかし、Whitelam 氏と Casert 氏は、この点においても解決策を提供している。

Whitelam 氏の熱力学コンピューターモデルの学習のために、Casert 氏が大規模な計算フレームワークを開発した。Casert 氏は NERSC のスーパーコンピューターである Perlmutter で 96 個の GPU を並列使用して大規模な並列進化シミュレーションを構築・実行して世代ごとの数十億ものノイズを含む動的軌跡を評価し、最も効果的なネットワークパラメータを特定した。

Casert 氏は、具体的には遺伝的アルゴリズムと呼ばれるフレームワークを使用した。まず、複数の異なる熱力学的 NN のそれぞれの有効性を評価することで最も性能の高いものを選び出し、それらのパラメータにランダムなノイズを加えて変化させ、再度評価した。最終的に、Perlmutter の GPU の並列使用により、Casert 氏は熱力学コンピューターでのプロセスを 1 兆回以上実行した。このトレーニングフレームワークは、デジタルネットワークのトレーニング方法に比べてはるかにコストがかかるものだが、構築・学習後は極めて少ないエネルギーで動作するコンピューターを実現することができる。

「これは、これまでとは全く異なる NN の最適化方法です。熱力学的 NN をデジタルのシミュレーションで学習させるのにはコストがかかりますが、学習を完了して物理的なハードウェアとして構築すれば、そのハードウェアで極めて低いエネルギーコストで推論を実行できます」と Casert 氏は説明する。

このような設計と学習の組み合わせは、大幅に少ないエネルギーで動作する ML コンピューターの実現が可能であることを示している。

## より多くのハードウェアでより多くのアルゴリズムを

熱力学的コンピューティング分野は、比較的新しいものである。では、これからはどのように展開して行くべきだろうか？Whitelam 氏によると、これらの設計をハードウェアで実現する方法の解明が重要だという。現在、研究チームはハードウェアとソフトウェアの両方の実現に向けて実験が実施できる協力者を探している。これは、熱

力学的コンピューティングの可能性を探るためのもう一つのステップとなる。

もう一つのステップとして、より多くのアルゴリズムが必要であると Whitelam 氏は言う。既存のアルゴリズムは平衡状態にあるシステムを対象としているが、その要件がもはや障害とならなくなった今、新たなアルゴリズムの開発が必要となる。また、デジタル NN で使用されているものと同様の、非線形計算のための新たなアルゴリズムも必要となる。

「これは、極めてエキサイティングな分野です」と Whitelam 氏は言う。「より効率的な計算方法が探究されていますが、熱力学的コンピューティングは間違いなくその一つです」。

訳：NEDO（担当 イノベーション戦略センター）

出典：本資料は、ローレンス・リバモア国立研究所の記事“Thermodynamic Computing Advances with Design and Training”

（<https://newscenter.lbl.gov/2026/03/05/thermodynamic-computing-advances-with-design-and-training/>）を翻訳したものである。

【ナノテクノロジー・材料分野】

仮訳

## 逆設計：機能性ポリマーをカスタム作製する新手法（米国）

2026年3月16日

*新たな素材を思い描き、あとは人工知能とロボットに任せられるとしたら？*

AI、機械学習とロボット工学を組み合わせた自律型ワークフローが、精密でカスタマイズ可能な特性を持つポリマーの迅速な製造を可能にする

ポットラックパーティーで、黄金色に焼き上がった、分厚くて噛み応えのある最高のチョコレートチップクッキーを食べた。残念ながら、誰が作ったのか分からず、レシピを聞くことができない。そこで、自分で再現してみることにした。順方向設計の原則を利用すれば、数十種類のレシピの中からランダムに1つを選び、焼き上がったクッキーを観察できる。もしクッキー



多彩なエレクトロクロミックポリマーサンプルは、AIを活用した逆設計によって実現された精密な色調調整を実証し、スマートディスプレイ技術向け材料の進歩を際立たせている。(画像提供:アルゴンヌ国立研究所)

が薄すぎたなら、新たなレシピでやり直したり、小麦粉の量を増やしたり、生地をもっと長時間冷やしたりして新しいバッチを作れるだろう。もう一つの方法としては、まず理想とするクッキーの特性を特定してから、「このタイプのクッキーを作るには、どのようなレシピと焼き加減が必要だろうか」と問いを立てる。この方法は、逆方向設計と呼ばれているものだ。

このような「目標から逆算する」考え方は、現代の材料科学においてますます重要になっている。研究者は、材料に求める特性、例えば電気伝導性や耐熱性の向上、刺激への反応性や特定の色彩の発現等を明確に把握していることが多い。しかし、これらの要件を化学式と信頼性の高い製造方法に落とし込むには、数ヶ月から数年にわたる

試行錯誤が必要となる。

特に、包装材から医療機器、電子機器に至るまであらゆるものに用いられる長鎖分子であるポリマーでは、その課題は極めて厳しいものになる。ポリマーはより小さな分子の構成要素から成り、これらの構成要素の僅かな変化や組み合わせ方の変化が、性能に多大な、時には予測不可能な変化をもたらす可能性がある。

**「この研究は、機能性材料の自律的かつオンデマンドな生産における画期的な成果です」**

— ANL およびシカゴ大学の科学者 Jie Xu 氏

米国エネルギー省(DOE) アルゴンヌ国立研究所(ANL)、シカゴ大学、パデュー大学の研究者らが、目標とする特性からポリマーの配合をはるかに少ない実験回数で導き出すことのできる、より迅速な方法である[自律的な](#)逆設計ワークフローを実証した。

「この研究は、機能性材料の自律的かつオンデマンド生産における画期的な成果です」と、ANL の研究員であり、シカゴ大学プリツカー分子工学大学院の助教授でもある Jie Xu 氏は言う。「何ヶ月も試行錯誤を繰り返すのではなく、目的とする特性を定め、システムにポリマーの配合を導いてもらうことができるのです」。

このアプローチは、従来の研究では一般的に個別に実施される 3 つの要素を結合させている。最初に、公表されている科学論文からテキストと画像の両方に含まれる情報を含むデータを自動的に抽出することで、既存の知識を収集する。これには、今日のチャットボットで使用されているような大規模言語モデルを含む AI の「読解」ツールを用いて論文をスキャンし、通常は手作業で収集される詳細情報を抽出した。これらの AI ツールは、段落、表、さらには画像の中に埋もれた情報を識別し、整理することができる。

「現代の AI は、人間にはとうてい不可能な規模で科学文献を読み込み、重要な要素と結果を抽出し、利用可能なデータに変換することができます」と、ANL Data Science and Learning division のディレクターであり、ANL 特別研究員、シカゴ大学コンピュータサイエンス教授でもある Ian Forster 氏は説明する。「これにより、研究室は有利なスタートを切ることができます。そして、モデルが新しい実験ごとに学習することで、システムはどんどん賢くなっていきます」。

次に、このアプローチは[機械学習](#)を用いて、望ましい結果を生み出す可能性が最も高くなる構成要素の組み合わせを予測する。最後に、その予測結果は、自動化された実験室ワークフローに直接送られ、ポリマーの合成、精製、サンプルの準備、物性測定を実施し、その結果をフィードバックして次の予測精度を向上させることができる。

「化学における GPS のようなものだと考えられます」と、ANL の科学者 Henry Chan 氏は言う。「何千件ものポリマー合成レシピを一つ一つ調べていく代わりに、AI は既知の情報に基づいて最適な次のステップを提案し、ロボットがそれを迅速にテストして結果を報告します」。

このワークフローでは、ANL にある DOE 科学局(SC)のユーザー施設である [Center for Nanoscale Materials](#) に設置される、自律走行型実験プラットフォームの [Polybot](#) を活用している。AI 駆動システムによってロボットと計測機器を連携させるように設計された Polybot は、人間の介入を最小限に抑えた実験の継続的な実行を可能にする。Polybot は、既知の手順を自動化することに加え、各実験が望ましい結果に近づくように選択される逆設計ループの実行にも使用されている。

精度が重要とされる課題においてワークフローがどのように機能するかを示すため、研究チームは、微弱な電圧を印加すると色や透明度が変化する材料のエレクトロクロミックポリマーに注目した。これらのポリマーは、建物のエネルギー消費を削減するスマートウィンドウや、拡張現実(AR)や仮想現実(VR)ヘッドセット用のティントレイヤーといった技術の候補となっている。

「エレクトロクロミックポリマーは、印刷やパターン形成によってデバイスにすぐに使える形態に加工できるため、特に注目されています」と、ANL の [Materials Engineering Research Facility](#) で printable electronics lab を率い、これらの機能性ポリマーをプロトタイプディスプレイデバイスに印刷する研究チームと協力した材料科学者の Yuepeng Zhang 氏は説明する。

「科学者たちは長年にわたり多くのエレクトロクロミックポリマーを開発してきましたが、正確な色合いを再現することは、単に赤色や緑色を再現するよりもはるかに困難です。色合いは RGB 値等の標準化された色座標を用いて定量的に定義できますが、近似色を得るには一般的にポリマーの配合を大幅に最適化する必要があります」と、パデュー大学の Richard and Judith Wien Professor of Chemistry であり、本研究の共著者でもある Jianguo Mei 氏は言う。RGB とは、赤、緑、青の光を用いた 3 色ビデオディスプレイモデルを指す。

研究者らはまず、公表されている文献からポリマーの構造、合成の詳細、そしてこれらの材料が発する色合いに関するデータを収集し、専用のエレクトロクロミックポリマーデータベースを構築した。AIは、多数の論文の散在する情報を一貫性のある使いやすいデータセットに変換し、検索可能なレシピと結果のライブラリを作成することで、「知識収集」のステップの加速を支援した。

収集したデータから標準化された色値を算出し、既に報告されている色の「マップ」を作成した。次に、ポリマーの「レシピ」がほとんど、あるいは全く記録されていないマップ上の領域にある 2 つの特定の色、すなわち難易度の高い緑色と橙色を目標とするよう Polybot に指示した。

Polybot は 72 時間以内に自律的にポリマーのレシピを提案し、材料を製造してその結果を目標値と比較した。1,000 種類以上の組成候補があったにもかかわらず、同システムは僅か数十回の実験後に目標値に近い組成を絞り込んだ。3 種類の構成要素の比率を段階的に微調整することで、これを実現した。新たな結果はすべてデータベースに追加され、モデルの次の予測精度向上に役立てられた。

この成果は、エレクトロクロミックポリマー材料にとどまらない。自動化された知識収集、予測型機械学習、そしてロボットによる反復実験サイクルを組み合わせたこのアプローチは、探索空間が膨大で試行錯誤のコストが高い他の材料の課題にも応用できる。

Xu 氏と Mei 氏が述べているように、「エレクトロクロミック特性の逆設計は、私たちの AI ロボットフレームワークによって実証された最初の機能です。このアプローチは、機械、光学や電気といった他の特性や、他の種類の材料にも広げることができます」。

材料設計をより迅速かつ体系的なプロセスへと変革することで、本研究は科学者が特定の特性を要求し、それに応じたレシピを迅速に入手し、さらなる開発や実用化に活用できる未来を示唆している。

本研究成果は、[Journal of the American Chemical Society](#) に掲載されている。

本研究には、ANL の Doga Ozgulbas 氏、Subramanian Sankaranarayanan 氏、Maria Chan 氏、Qiaomu Yang 氏、ANL とパデュー大学の Yukun Wu 氏、Jianing Zhou 氏も貢献した。パデュー大学の Zhiyang Wang 氏、ジョージア工科大学の Anna Österholm 氏と John Reynolds 氏、Shiyu Hu 氏、Rafael Vescovi 氏、Aikaterini Vriza

氏は、本研究が行われた当時、ANL に所属していた。

本研究は、DOE 基礎エネルギー科学部(BES)および ANL の Laboratory Directed Research and Development Program の資金援助を受けて実施された。さらに、シカゴ大学の Big Ideas Generator seed funding program と米国空軍科学研究所(AFOSR)からも支援を受けた。

訳：NEDO（担当 イノベーション戦略センター）

出典：本資料は、米国アルゴンヌ国立研究所の記事 “Inverse design: A new pathway to custom functional polymers”（<https://www.anl.gov/article/inverse-design-a-new-pathway-to-custom-functional-polymers>）を翻訳したものである。

【電子・情報通信分野】

仮訳

## 量子技術を進展させるマイクロ波フォンの微小な検出器 (スイス)

2026年4月6日

著者：[Nik Papageorgiou](#)

出典：[EPFL](#)

スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)の研究者らが、連続動作が可能で複雑なリセット手順も不要とする、最大 70%の効率で個々のマイクロ波光子を検出できる装置を開発した。

光の粒子一個を検出することは困難だが、マイクロ波光子一個を検出することはさらに困難である。Wi-Fi やレーダーといった最新技術で用いられている微小な電磁波であるマイクロ波光子は、可視光に比べて大幅にエネルギーが低く、光子の約 10 万分の 1 の強さしかない。

現在の量子技術の多くでは、個々の光子の高効率での検出が重要である。可視光では、入射光を直接電気信号に変換する装置の使用でこれが実現されているが、マイクロ波周波数帯(0.3~30GHz)では、個々の光子が物質中で電荷を放出するのに十分なエネルギーを持たないため同じ方法は適用できない。つまり、一個のマイクロ波光子の検出には全く異なるアプローチが必要となる。

マイクロ波光子を連続的に検出するシンプルな装置の実現は、長年の目標であった。今回、EPFL の [Pasquale Scarlino 氏](#)率いる研究チームが、この目標への重要な一歩となる半導体ベースの検出器を開発した。

*Science Advances* に掲載されたこのデバイスは、「二重量子ドット」と呼ばれる半導体構造と超伝導マイクロ波共振器(マイクロ波光子を捕捉・蓄積し、デバイスとの強い相互作用を可能にする微小な共振回路)を組み合わせたものである。これらの構成要素の連携により、入射したマイクロ波光子を微弱ながら測定可能な電流に変換する。

「本研究は、半導体ベースのマイクロ波光検出器の新たなベンチマークを確立することに加え、量子マイクロ波光学、量子センシング、そしてスケーラブルな量子情報プラットフォームに新たな展望を開くものです」と Scarlino 氏は言う。

#### 資金提供

スイス連邦教育研究イノベーション事務局(SERI)

スイス国立科学財団(SNSF)(NCCR SPIN)

EPFL QSE Postdoctoral Fellowship Grant

NanoLund

#### 参考文献

Fabian Oppliger、Wonjin Jang、Aldo Tarascio、Franco De Palma、Christian Reichl、Werner Wegscheider、Ville F. Maisi、Dominik Zumbühl、Pasquale Scarlino

Tunable high-efficiency microwave photon detector based on a double quantum dot coupled to a superconducting high-impedance cavity.

Science Advances 2026 年 4 月 3 日

DOI: [10.1126/sciadv.aeb9784](https://doi.org/10.1126/sciadv.aeb9784)

訳：NEDO（担当 イノベーション戦略センター）

出典：本資料は、スイス・ローザンヌ工科大学(EPFL)の記事“A tiny detector for microwave photons could advance quantum tech” (<https://actu.epfl.ch/news/a-tiny-detector-for-microwave-photons-could-advanc/>) を翻訳したものである。