

科学を支え、未来へつなぐ

例えば、世界的な気候変動、エネルギーや資源、感染症や食料の問題。
私たちの行く手にはあまたの困難が立ちほだかり、乗り越えるための解が求められています。
JSTは、これらの困難に「科学技術」で挑みます。
新たな価値を生み出すための基礎研究やスタートアップの支援、研究戦略の立案、
研究の基盤となる人材の育成や情報の発信、国際卓越研究大学を支援する大学ファンドの運用など。
JSTは荒波を渡る船の羅針盤となって進むべき道を示し、多角的に科学技術を支えながら、
安全で豊かな暮らしを未来へとつなぎます。
JSTは、科学技術・イノベーション政策推進の中核的な役割を担う国立研究開発法人です。

JST

事業成果 2025

Japan Science and Technology Agency

HP <https://www.jst.go.jp/>

X https://x.com/JST_info

事業成果 <https://www.jst.go.jp/seika/>





生体組織を再生する革新的な足場材料に

含水率 99% かつ疎水性の「ゲル・ゲル相分離材料」を発明

酒井 崇匡（東京大学 大学院工学系研究科 教授）



CREST 「ナノ力学」領域・「ゲルのロバスト強靱化機構の解明と人工腱・靱帯の開発」研究代表者（2019-2024）

「ゲル・ゲル相分離」を世界で初めて発見

酒井崇匡東京大学大学院工学系研究科教授らの研究グループは、水溶性高分子^{※1}のポリエチレングリコール(PEG)^{※2}が大量の水を保持した状態の PEG ハイドロゲル(以下、ゲル)において、濃厚なゲルと希薄なゲルの2相に分離する「ゲル・ゲル相分離」を世界で初めて発見した。今回発見したゲル・ゲル相分離では、希薄ゲルの中に100マイクロメートル(マイクロ:百万分の1)程度の濃厚ゲルによる繊維状網目が張り巡らされた構造が形成された。しかも、含水率99%にも関わらず、水を弾く疎水性を示した(図1)。

PEGゲルは、ソフトコンタクトレンズや止血剤、薬を体内に運ぶドラッグデリバリー、身体の組織を再生する組織工学、医療診断などの用途に広く利用されている。その物性も長年にわたって研究されてきたが、疎水性スポンジ構造の観察例はこれまでになかった。

研究グループは、新たに発見・開発したゲル・ゲル相分離PEG材料をモデル動物の皮下に埋め込んだところ、周囲から網目の中に細胞が入り込んで血管を含む脂肪組織が形成されたことを確認した。このような生体組織との親和性は、従来のPEG ゲルでは全く見られないものであり、ゲル・ゲル相分離PEG材料は皮膚や血管などの組織再生を促す足場材料として医療分野への幅広い応用が期待される。

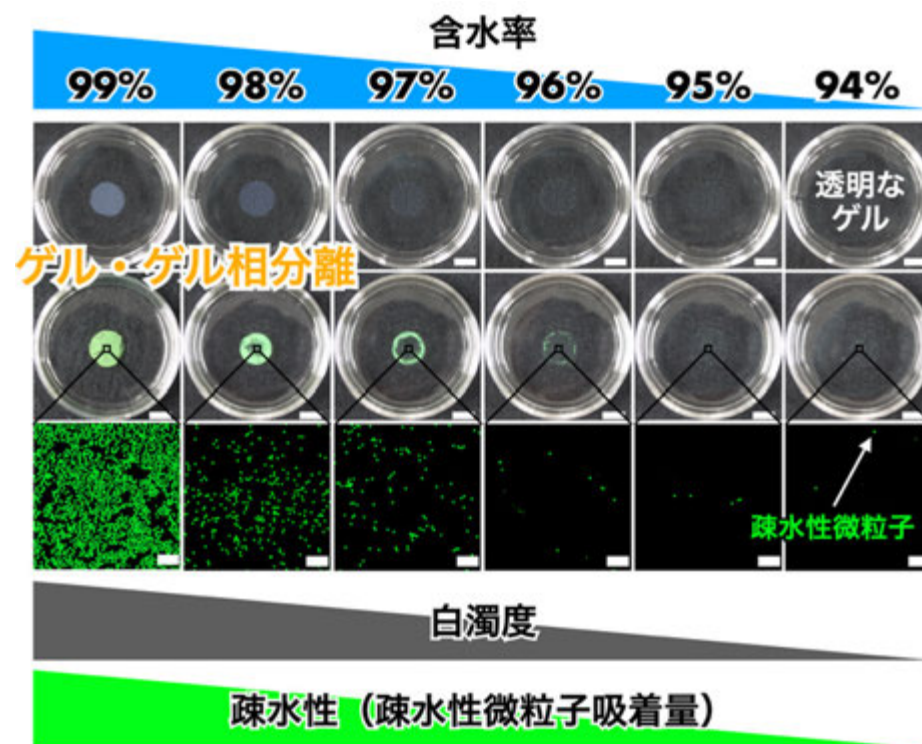


図 1

ゲルを作製する際に含まれる水の量を増やせば増やすほど、相分離が進行してゲルは白濁し、疎水性微粒子をより吸着するようになる。

※ 1 水溶性高分子

水に溶ける性質を持つ大きな分子の化合物。植物性の寒天、動物性のコラーゲン、ゼリー、ポリエチレングリコール（PEG）が水溶性高分子の一例。

※ 2 ポリエチレングリコール（PEG）

新型コロナワクチンなどの医薬品や工業製品に使われる水溶性の合成高分子化合物。

組織再生足場となるPEGゲルの開発

病気や怪我、老化などにより機能を失った組織や器官の再生、修復を行う組織工学の研究が進んでいる。組織を再生するには、細胞が定着し増殖する基盤となる足場が必要となる。これまで足場材料としてコラーゲンやゼラチンなどの生体由来材料が開発されてきた。これらは免疫原性の低さや毒性の少なさなど総合的な生体親和性を持ち、細胞の付着・増殖にも適しているが、異物反応^{※3}や感染症リスクも否めない。特に動物由来材料の場合、ウイルス感染の懸念があり、使用が制限されるケースもある。このため、人工合成による足場材料の研究開発も並行して進められてきた。ただし、合成材料は一般に細胞が定着しにくいという課題がある一方、材料の種類によって性質は多様である。適切な化学修飾^{※4}を行うことで細胞接着性を高めることも可能だが、材料が複雑化すると予測不能な生体反応が起こる可能性が高まり、実用化が難しくなるという指摘もある。

そうした中、PEGは人工合成物質ながら免疫原性や毒性の低さといった点で生体親和性が高く、医療分野で広く利用されてきた。しかし、PEG ゲルは 10ナノメートル程度の細胞よりもはるかに微細な網目構造をもち、さらに細胞接着性をほとんど持たないために、従来は組織再生足場として不向きと考えられてきた。

研究グループが今回開発したPEGゲル・ゲル相分離材料は、こうしたPEGゲルの課題を解決し、組織再生足場材料に道を開くものとなる。

ゲル・ゲル相分離材料で動物の組織再生に成功

研究グループが、PEGゲルのゲル・ゲル相分離を発見したのは2016 年頃のこと。人工硝子体(しょうしたい)用の材料を作るために、極端に含水率の高いPEGゲルを作製する研究を行っていた学生が、ゲルが白濁していることに気付いたのがきっかけだった。本来、水によく溶けるはずのPEG が低濃度で不溶化する現象は不可解だった。PEGと水の2成分系は、これまでに50万報もの学術論文で調査されてきた「やり尽くされた物質」であり、ゲル・ゲル相分離のような現象の観察例は皆無だったからだ。

研究グループは、この現象を解明するため顕微鏡の専門家である理化学研究所生命機能科学研究センター細胞極性統御研究チームの岡田康志チームリーダーに協力を仰いだ。結果は、まさに百聞は一見にしかずで、顕微鏡写真は見事にゲル・ゲル相分離を捉えていた。

今回発見したゲル・ゲル相分離により、PEGゲルの疎水化とともに100マイクロメートル程度のマトリックス構造(網目構造)が形成されたことで、細胞がゲル内に入り込んで組織再生の足場材料となる可能性が一気に広がった。しかも、ゲル・ゲル相分離は水分量が多いほど顕著になり、より疎水性が高まる。つまり「ゲルの含水量が多ければ多いほど、水となじみにくなる」というこれまでの常識を覆すものだった(図2)。

この成果は、化学構造から予測されるPEGの特性を、3 次元の網目構造の形成により変えることができることを示すものでもある。一般に、高分子の性質は化学構造によって定まり、分子量や分子の形によらないとされてきたが、今回の発見は高分子化学に新たなパラダイムシフトをもたらす可能性もある。

その後、研究グループは、99%の水と1%のPEGからなるゲル・ゲル相分離材料をつくり、モデル動物の皮下に埋め込む実験を行った。その結果、網目構造の中に周囲から細胞が入り込んでゲル・ゲル相分離材料は分解され、分解された場所に血管を含む脂肪組織が形成されたことを確認した(図3)。

※ 3 異物反応

体が自分自身とは異なる物質を異物と認識し、反応を起こすこと。例えば、埋め込まれた医療デバイスや移植された臓器に対する反応などのこと。

※ 4 化学修飾

化合物の構造を特定の目的のために変更するプロセス。物質の溶解性や反応性を改善するためなどに行われる。



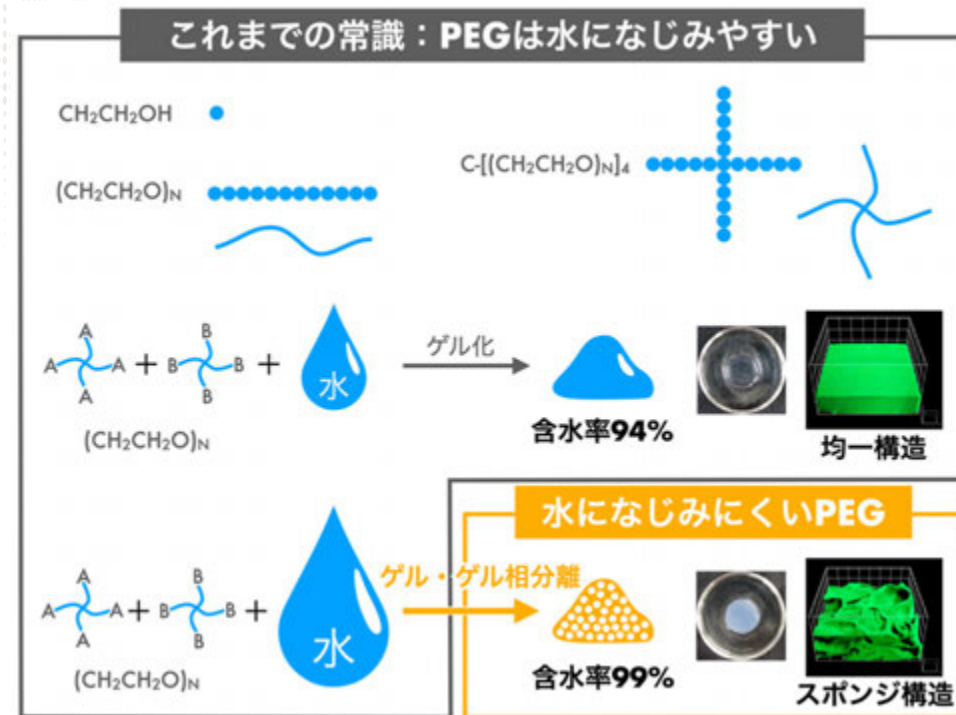


図 2
PEGは親水性であることが知られている。例えば、PEGのモノマー（基本単位）であるエタノール $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ 、1本の鎖状のPEG $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_N$ 、分岐構造を持つPEGの全てが重合度Nによらず親水性である。さらには、PEGの3次元的な網目構造が水を保持したPEGゲルも同様に親水性であることが知られていた。本研究では、ゲル・ゲル相分離によって世界で初めて水になじみにくいPEGゲルの合成に成功した。

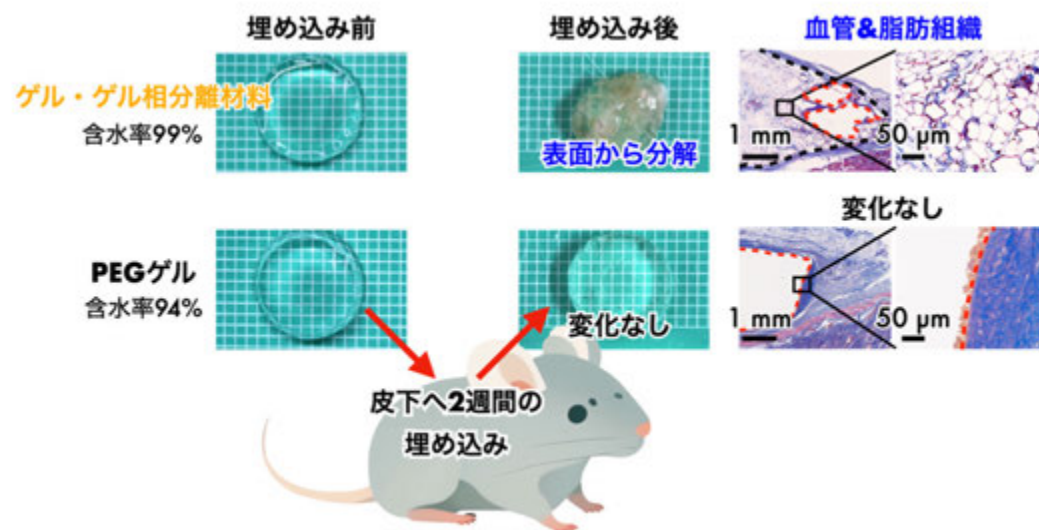


図 3
通常のPEGゲルとゲル・ゲル相分離材料をマウスの皮下に2週間埋め込んだ。その結果、PEGゲルでは、ゲル自体にも生体組織にも際立った変化は見られなかった。一方、ゲル・ゲル相分離材料は生体内で分解され、分解された場所には血管と脂肪組織が形成された。

組織工学にとどまらず新規高分子材料開発に貢献

本研究の成果は、組織工学の新たな可能性を切り開くものといえる。開発したゲル・ゲル相分離材料は、生体由来の材料の持つ感染リスクを排除すると同時に、合成材料が抱える生体親和性の低さという問題を解決する可能性を秘めている。つまり、安全性と効果性を両立した新たな組織再生材料として、広範な医療分野での応用が期待される。特に、今回の研究を通じて、ゲル・ゲル相分離材料は皮下組織の再生を促進することが示された。これは、慢性創傷や糖尿病性足潰瘍などの治療に役立つ可能性がある。これらの疾患は患者の生活の質（QOL）を著しく低下させ、治療費の増大をもたらすなど大きな社会問題となっており、新たなゲル材料の適用により、これら疾患の治療方法が大きく進歩することが期待できる。

しかも、ゲル・ゲル相分離PEG材料は既存の製造プロセスや規制への対応が比較的容易であり、実用化への道のりも近い。さらに、ゲル・ゲル相分離は、PEG以外の高分子材料にも応用できる可能性があり、今後、画期的な新機能を有する高分子材料開発への貢献も期待できる。





新たな磁気情報デバイスの開発に道

磁石に隠されていた振動の情報を取り出すことに成功

齊藤 英治（東京大学 大学院工学系研究科 教授／東北大学 材料科学高等研究所 客員教授）



CREST 「情報担体」領域・「非古典スピン集積システム」研究代表者（2020-2025）

磁気振動の情報を取り出す新測定法を開発

齊藤英治東京大学大学院工学系研究科教授を研究代表者とする研究グループは、これまで磁石の中で約100ナノ秒（ナノ：10億分の1）程度の短い時間しか存在できないと考えられていた磁気振動の情報（コヒーレンス）について、新たな測定法（ポンプ-プローブ測定）を開発することで、約5000ナノ秒もの長い時間隠れて存在できる機構を発見した。さらに、その情報を取り出すことが可能であることも明らかにした。

磁石の中のコヒーレンスは、コンピュータが情報を処理する際の最小単位ビット（「0」と「1」の情報）の代わりとして利用できる可能性があるものの、その状態を長く保つことが難しいために応用が困難と考えられてきた。今回、磁石に隠された情報を取り出すことが可能であることを実証できたことで、新たな磁気情報デバイス開発の道が開けたといえる。

室温で動作する磁気情報デバイス実現に向けて

磁気の振動からはさまざまな情報を得ることができる。例えば、磁気振動の速さからは、物質の種類や空間分布の情報が得られるため、元素分析装置や医療診断装置などに役立っている。

また、磁石（強磁性体）に外部から磁場を与えると、磁気振動状態を生成することができる。磁石を構成する原子レベルのミクロな磁石（スピン）がそろって動く磁気振動は、スピンの向きによって「0」と「1」に対応させることができる。この性質を活用すれば室温で動作する演算素子を作ることが可能だ。しかし、実用化の大きな壁として、コヒーレンスは約100ナノ秒程度のきわめて短い時間で失われてしまうという課題があった（図1）。仮に、ある程度の長い時間を経てからでもコヒーレンスの情報を取り出すことが可能となれば、磁気情報デバイスへの応用が期待できるようになる。

本研究では、コヒーレンスを測る新たな実験手法を開発し、コヒーレンスが存在できる機構の実証に挑むことにした。

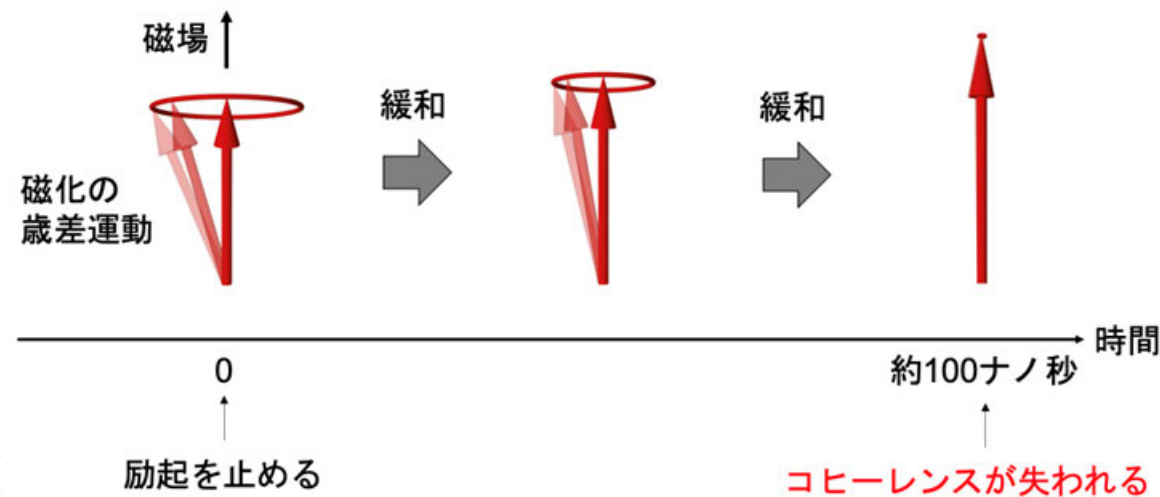


図1 通常の磁化歳差運動

パラメトリック励起を用いて測定、理論モデルで検証

磁石の中には多数のスピンが磁場の方向に揃った状態（磁化）で存在している。これに外部からマイクロ波の振動磁場を与えると、スピンは力を受けて一斉に磁場の周りを振動する（歳差運動・図1）。この振動のコヒーレンスは外部からマイクロ波を与え続ける限り維持されるが、マイクロ波を止めると散逸によって減衰するため、きわめて短時間にコヒーレンスが失われていく。

そこで本研究では、外部からの力を絶った後のコヒーレンスの情報を取り出す測定法（ポンプ-プローブ測定）を新たに開発した（図2）。この測定方法は、ブランコの立ちこぎと同じ原理の「パラメトリック励起」を用いる。ブランコの立ちこぎでは、身体を上下に動かすとブランコを大きく揺らすことができる。それと同じように、共鳴周波数（パラメーター）を周期的に変化させ、その半分の周波数の振動を引き起こすのがパラメトリック励起である。ここで重要なポイントは、励起を開始した瞬間にブランコが前に振れるか（0位相）後ろに振れるか（ π 位相）という点。例えば、0位相が実現する確率のほうが大きかった場合は、ブランコが0位相のコヒーレンスを持っていたことがわかる。

この測定法を何度も繰り返し、磁石のコヒーレンスがどれだけ長く存在できるかを調べた。まず、比較のために共鳴周波数と同じ周波数の力を加えて測定すると、予想通り、約100ナノ秒後にはコヒーレンスが失われ、0位相を読み出す確率も50%になった。つまり、コイントスで表が出る確率と同じランダムな結果だった。次に、パラメトリック励起を行って測定すると、約5000ナノ秒という長い時間まで繰り返し振動することが明らかになった。もちろん、磁化の歳差運動自体は約100ナノ秒で失われるので、この結果はコヒーレンスが約5000ナノ秒にわたり“隠れて”存在していたことを示している。

この確率振動を説明するため、研究グループは理論モデルを構築し、その検証実験を行った（図3）。理論モデルでは、コヒーレンスの情報を半分の周波数の運動に埋め込み、その情報を再び元の周波数として取り出す機構を考案した。その検証実験では、磁化歳差運動の振幅・位相・ゆらぎを取得する状態トモグラフィ^{※1}を利用して振幅の時間変化を測定し、理論モデルと同じ特徴的な2つの傾きが現れることを観測するのに成功した。

この結果から、従来考えられていたコヒーレンスの存在時間の50倍もの長い時間にわたり磁気振動の情報を保持できる機構が存在することが明らかになり、その隠された情報を取り出せることも実証できた。

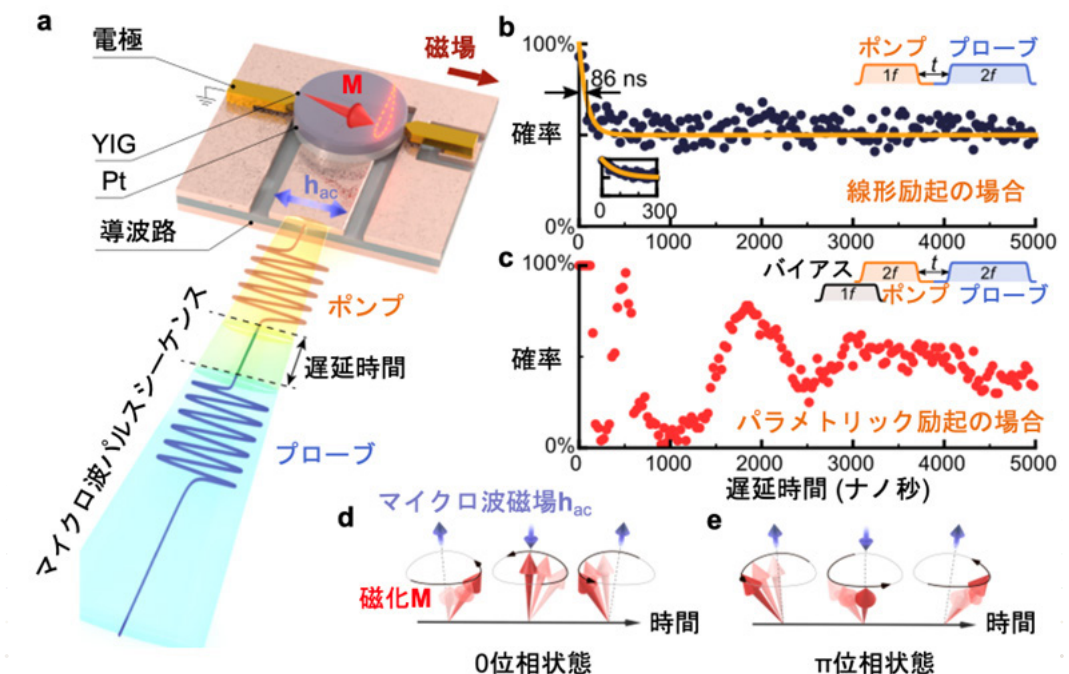


図2 測定方法の概念図と結果

(a) ポンプ-プローブ測定の模式図、(b) ポンプが線形励起の場合の結果、(c) パラメトリック励起のポンプパルスを印加した結果、(d) 0位相状態の模式図、(e) π 位相状態の模式図。

※1 状態トモグラフィ

対象とする物理系の射影測定により物理状態を特徴づける確率分布関数（ウィグナー関数）を同定する実験方法。ウィグナー関数は位置と運動量のように正準共役な関係^{※2}にある力学変数の関数であり、分布の平均値は振幅と位相を、広がりゆらぎを表す。

※2 正準共役な関係

2つの量が互いに相関し合い、明確に区別できない関係。量子力学において正準共役な関係にある2つの物理量の値は同時に測定できず（不確定性原理）、一定の誤差でゆらいで観測される。



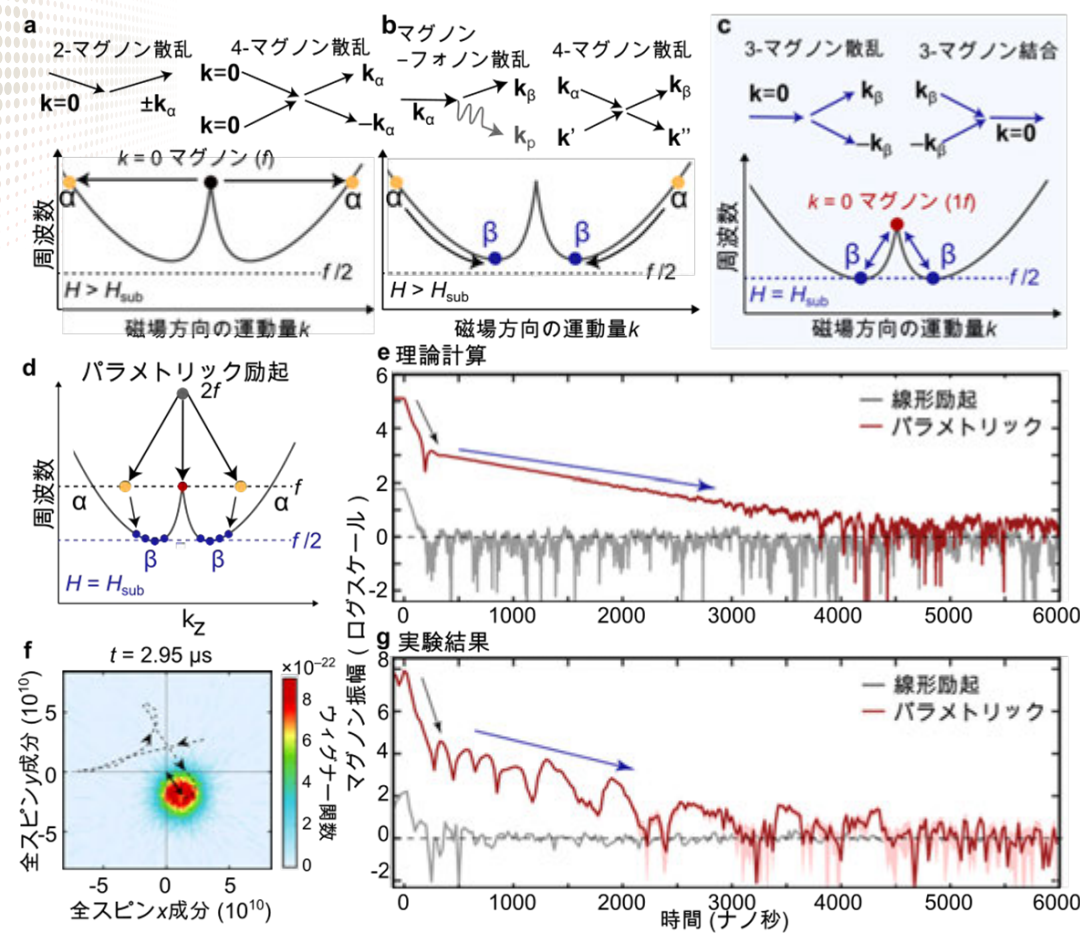


図3 理論モデルの概念図と実験結果
(a-d) スピン波を量子化したマグノンの周波数-運動量の関係(分散関係)、(e) 理論モデルに基づく数値計算で得たマグノン振幅の時間変化、(f) 状態モグラフィ測定によって得たマグノンのウィグナー関数の軌跡、(g) 状態モグラフィ測定で得たマグノン振幅の時間変化。

新規磁気情報デバイスの開発だけでなく、材料・物性物理学などにも貢献

今回、磁石に隠されていた磁気振動を発見し、その情報を取り出せたことで、新たな磁気情報デバイス開発への可能性を開いたといえる。今回発見した情報保持機構は、スピントロニクスや磁性の分野だけでなく、材料物理学・物性物理学の広範囲に影響を与えるものと考えられる。また、磁性体をナノメートルサイズに集積化し演算素子やメモリーに利用する際も、この原理により隠れたコヒーレンスを利用できるようになる。

今後、この成果をもとに、磁石の物理がさまざまな量子物性物理学の領域と融合するように展開していくことが期待できる。





原子スケールモノづくりの出発点

金属ナノワイヤの大量成長を実現、その原理を解明

木村 康裕（九州大学 大学院工学研究院 准教授）



「ナノ力学」領域・「電子流による原子拡散に基づくナノワイヤ結晶性デザイン」研究代表者（2020-2024）

アルミニウムナノワイヤの大量森状成長手法を開発

木村康裕九州大学大学院工学研究院准教授らの研究グループは、固体中で原子を運ぶ原子拡散現象^{※1}を活用して、アルミニウムナノワイヤ^{※2}の大量森状成長手法を開発した。

ウィスカとも呼ばれる線状の純金属ナノワイヤは、人の髪の毛の太さの1000分の1の直径と数百マイクロメートルほどの長さの素材で、ナノテクノロジーにおける有望材料の1つとされている。特に、固体基板から自立成長した単結晶純金属ナノワイヤは、次世代センシングデバイスとしてのガスセンサーやバイオマーカー、次世代オプトエレクトロニクスとしてのプラズモン導波路^{※3}への応用など、広範囲なマイクロ・ナノデバイスの構成材料として注目されている。

しかし、すでに大量合成法が確立している半導体ナノワイヤや有機材料のカーボンナノチューブ、金属酸化物ナノワイヤと異なり、単結晶純金属ナノワイヤを大量に作り上げる技術は確立されていなかった。

本研究では、イオンビーム照射という簡便な方法で金属薄膜の結晶粒^{※4}分布を制御し、原子輸送のための特異な応力^{※5}場を与えることにより、狙った場所に金属原子を大量に集めてアルミニウムナノワイヤを成長させる技術の開発に成功した(図1)。

この成果は、これまで偶発的かつ少量しか成長させることができなかったボトムアップ的純金属ナノワイヤ成長法の実用化に道を開くものであり、金属の原子スケールモノづくり技術の出発点になることが期待される。

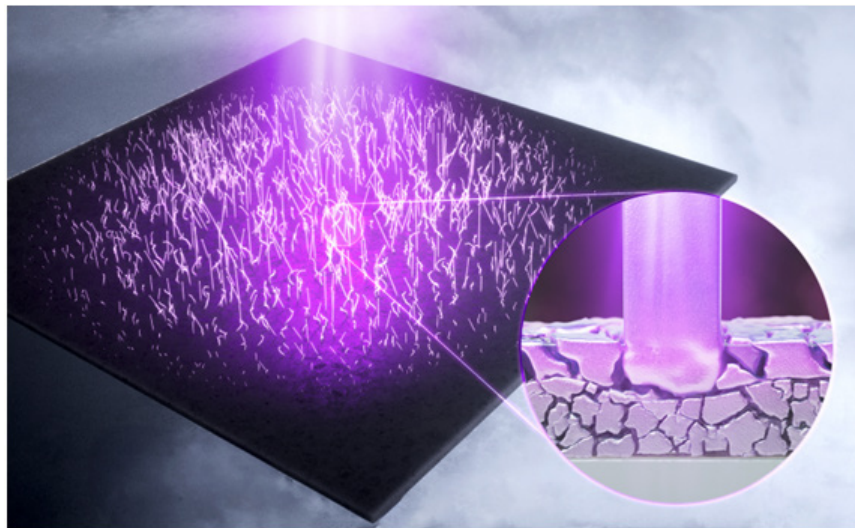


図1 金属薄膜上で森のように成長したアルミニウムナノワイヤ

※1 原子拡散現象

固体中の原子輸送現象であり、原子濃度勾配、静水圧応力勾配、温度勾配、電位勾配などが駆動力となる。

※2 ナノワイヤ

人髪の毛の太さの1000分の1程度の直径(100～600ナノメートル程度)を有した線状ナノ構造体。

※3 プラズモン導波路

金属表面では、光は金属の電子と結合した状態(表面プラズモンポラリトン)で存在する。この特性を活用した導波路をプラズモン(プラズモニック)導波路と呼び、光をナノメートルレベルの領域に閉じ込めた状態で導波させることができる。

※4 結晶粒

原子が規則的に並んでいる固体の塊のこと。本研究では数ナノメートルから数十ナノメートルの極細粒を扱っている。

有望なナノ構成部品として期待されるアルミニウムナノワイヤ

純金属ナノワイヤは、単結晶で欠陥の少なさに由来する高い強度だけでなく、電気伝導性や熱伝導性における電子やフォノン(音子)の異常散乱、プラズモニック現象から生じる表面光の伝搬や発光を示すことが近年明らかになってきた。

特に、垂直に自立成長したアルミニウムナノワイヤは、巨大な表面積を持ち、自然酸化に強いいため良好な電気的特性を半永久的に維持でき、単結晶に由来する強度や硬さ、伸びやすさといった優れた機械的特性を持つ。こうしたユニークな特徴から、センシングデバイスやオプトエレクトロニクスにおける有望なナノ構成部品として活用されることが期待されている。

この応用に向けては、アルミニウムナノワイヤを安定して大量につくる手法の開発が欠かせない。カーボンナノチューブや半導体ナノワイヤは、原材料を気体で供給し基板上の触媒との反応を介して成長させる大量合成手法が確立しているが、アルミニウムは蒸気圧が低いので気体での供給が難しく、仮に供給できたとしても成長の核となる触媒が見つからないため既存手法は使えない。そのため、独自のナノワイヤ成長の手法を確立することが急務となっていた。

原子拡散を採用し大量成長技術を確認

金属ナノワイヤを成長させる難しさは、成長の仕組みにある。樹木のように根本から成長するため、母材となる固体中でナノワイヤの成長に供する金属原子を、狙った場所に大量に運搬する必要がある。しかし、気体中や液体中と違って固体中では原子は活動しにくく運搬が困難だった。

本研究は、固体中で原子を大量に運ぶ手段としてナノスケール物質輸送現象である原子拡散を採用し、あたかも森をつくるように大量のアルミニウムナノワイヤを希望した箇所に成長させる技術を確認した。本成果を実現した鍵は、原子拡散の源である駆動力を薄膜内部の結晶粒に着目して作り出したことにある。イオンビーム照射によって薄膜表層のみの結晶粒を粗粒化させ、薄膜表層では粗粒、薄膜下層では細粒となる粒勾配を作り出した。この粒勾配が原子拡散の駆動力を増大させる引き金になるという仕組みを電子顕微鏡での観察と有限要素解析^{※6}による数値計算で明らかにした。

イオンビーム照射後に薄膜を加熱すると原子は以下に記すいくつかの順序を経て運搬されナノワイヤに成長するための準備が整っていく。はじめに、薄膜を加熱すると降伏応力^{※7}の粒径依存性によって粒勾配が原子の上昇流を引き起こし、多くの原子が薄膜表面に運搬される。その後、降伏応力の方位依存性によって特定粒に向かった原子の流れ込みが生じる。こうした一連の原子の流れは静水圧応力^{※8}勾配に基づいており、有限要素解析によってその値を算出することができた。このようにして大量の原子を貯め込んだ粒は、それを解放するように垂直方向にナノワイヤとして成長する(図2、3)。

※5 応力

物体内部に働く仮想的な面に対する単位面積あたりの力。

※6 有限要素解析

連続体力学の問題を解く解析手法の1つ。

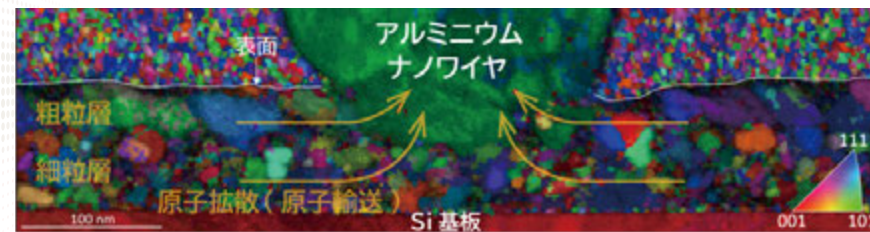
※7 降伏応力

材料に負荷を加えて変形させた際に、除荷しても元に戻らなくなる(変形の影響が残る)臨界の応力値。材料強度の指標となる。

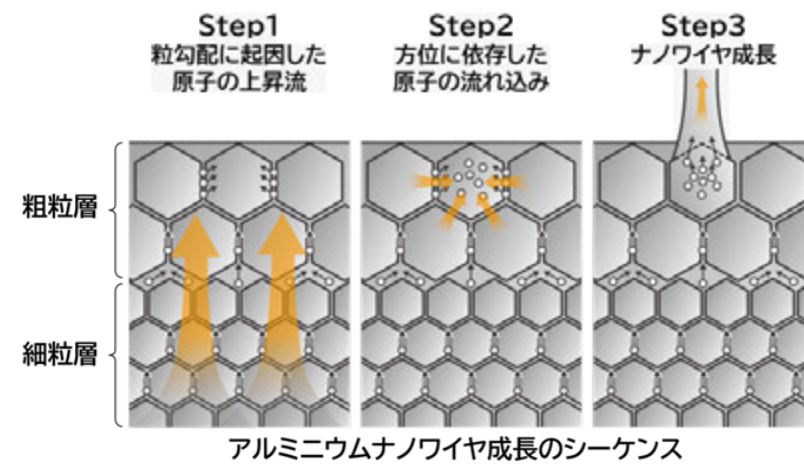
※8 静水圧応力

水の中に沈めた物体に加わる圧力のように物体表面の垂直方向に作用する応力。平均垂直応力とも呼ばれる。



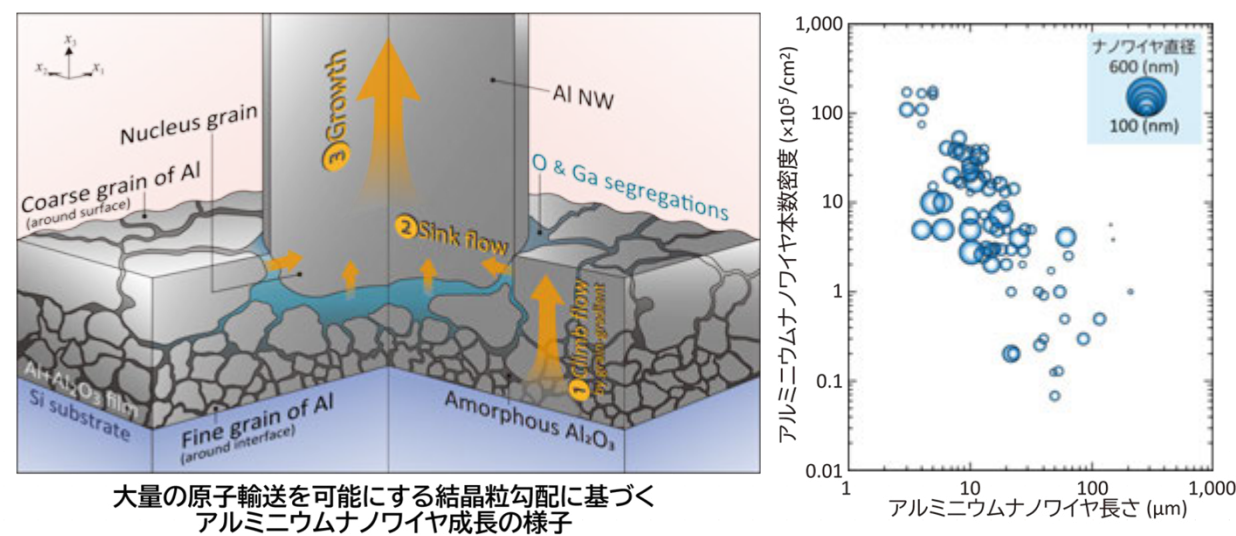


ナノワイヤ付薄膜断面の STEM-EBSD 像



アルミニウムナノワイヤ成長のシーケンス

図 2
ナノワイヤ付薄膜断面の STEM-EBSD^{※9}像（上）。ワイヤ成長の順序（シーケンス）（下）。



大量の原子輸送を可能にする結晶粒勾配に基づく
アルミニウムナノワイヤ成長の様子

図 3
アルミニウムナノワイヤ成長機構を示すイメージ図（左）。ケイ素の基板の上にアルミニウムと酸化アルミニウムからなる薄膜を堆積。①原子の上昇流が起きる。②原子の流れ込みが起きる。③アルミニウムナノワイヤが成長していく。
実験で成長させたナノワイヤの本数密度と長さのグラフ（右）。縦軸の値が最大で 180×10^5 本/cm² となった。

成長プロセスの原理も解明

本成果は、金属ナノワイヤの大量成長を実現しただけでなく、成長プロセスの仕組みを透過電子顕微鏡観察と有限要素解析による数値シミュレーションの併用で明らかにした。

この成長プロセスは、アルミニウムにとどまらず原理的に他の金属にも拡張可能であり、これまで閉ざされてきた原子の自己組織化による金属ナノワイヤ製造技術の出発点になると期待される。ちなみに、これまでに原子拡散を用いて作られたアルミニウムナノワイヤの本数密度は1975年に報告された 2×10^5 本/平方センチメートル（表面被覆率 0.04%）が最大だったが、本研究は半世紀ぶりにそれを上回る最大 180×10^5 本/平方センチメートルが得られることを実証した。

本研究は、マイクロ・ナノデバイスへの応用を志向した原子スケールモノづくり技術の創出に繋がると期待される。

※ 9 STEM-EBSD

STEM：走査透過電子顕微鏡。細く絞った電子線を試料に照射・走査し、照射点から出てくる透過波もしくは回折波を検出して画像化する顕微鏡。SEMよりもより小さな物を観察することが可能。

EBSD：結晶粒の傾き具合を示す方位を解析する手法。





ディープフェイク映像検知技術を国内初の実用化

AI が生成したフェイク顔映像の真贋を自動判定する「SYNTHETIQ VISION」

越前 功（国立情報学研究所 シンセティックメディア国際研究センター センター長）

CREST

「信頼される AI システム」 領域・「インフォデミックを克服するソーシャル情報基盤技術」 研究代表者（2020-2025）

A-STEP

トライアウト「AI により生成された顔映像フェイクメディアを検出する技術の確立」 研究代表者（2021）

山岸 順一（国立情報学研究所 シンセティックメディア国際研究センター 副センター長）

CREST

「共生インタラクション」 領域・「Voice Personae：声のアイデンティティクローニングと保護」 研究代表者（2018-2023）



タレントなど著名人の「分身」の真偽を自動判定

国立情報学研究所シンセティックメディア国際研究センターの越前功センター長と山岸順一副センター長らの研究チームが開発した「AI が生成したフェイク顔映像の真偽を自動判定するプログラム『SYNTHETIQ VISION: Synthetic video detector』」を、株式会社サイバーエージェントが採用し、2023年からタレントなどの著名人のディープフェイク^{※1}映像検知に使用されることになった。

サイバーエージェント社は、2021年よりタレントやアーティストなどの著名人の「分身」となる公式3DCGモデルを制作し、サイバー空間でのイベントやコマーシャル、アパレルモデルなどに活用するサービス「デジタルツインレーベル」を展開している。この事業において、悪意ある第三者によって「分身」の顔を他人の顔と入れ替えたり加工したりするディープフェイク映像の作製やその流布を防ぐ目的で、「SYNTHETIQ VISION」を導入することになった。

今回の導入は、AIにより生成されたフェイク顔映像の真偽を自動判定する技術が実サービスに適用される国内初の事例となる。

「本物」と「偽物」を見分ける高精度な技術が待望される

人間の顔や音声、言語などのデータを大量にAIに学習させることで、本物と見紛う顔映像、音声、文章などを生成する「シンセティックメディア」が可能となってきた。シンセティックメディア技術^{※2}は、工学的なシミュレーション、新たな芸術表現、エンターテインメント分野などに広く活用されて、私たちの社会や生活を豊かにすることが期待されている。

その反面、悪意ある第三者が本物そっくりな映像・音声などのディープフェイク（フェイクメディア）を作成して、詐称行為や顔認証・音声認証システムの突破、社会に混乱を引き起こすフェイクニュースの流布などを行う危険性ははらんでいる。実際に、著名人の偽画像や偽音声を使ってサイバー空間に偽情報を流す事例が社会問題化しており、そうした問題を防ぐために「本物」と「偽物」を見分ける真贋判定技術の高度化が求められている。

※1 ディープフェイク

ディープラーニング（深層学習）とフェイク（偽物）を合成した造語。悪意を持って AI を使って本物のように合成された偽画像、偽映像、偽音声、偽文書などのフェイクメディアを指す。

※2 シンセティックメディア技術

AI によって生成されたリアルな音声・画像・映像を作り出す合成技術。

※3 インフォデミック

「インフォメーション」と、感染症などが限られた域内で急増する状況をさす「エビデミック」を合わせた造語。インターネットなどソーシャルメディアを通じて不確かな情報と正しい情報が混在したまま急速に広まる現象。

※4 深層学習

深層学習（ディープラーニング）は、複数の独立した機械学習手法の総称。対象とするものの全体像から細部までを階層構造として関連づけて学習する手法。

導入企業が容易かつ迅速に真贋判定できる「SYNTHETIQ VISION」

国立情報学研究所では、画像や動画、音声などのデジタルデータに特殊な情報を埋め込むことで違法な複製や改ざんを防止する「電子透かし」技術など、デジタルコンテンツの権利保護につながる研究を進めてきた。

今回の「SYNTHETIQ VISION」の開発は、CRESTの2つの研究領域課題による開発成果をもとに、A-STEP も活用して開発された。

「声のアイデンティティクローニングと保護」の研究では、高精度な音声合成技術を開発する一方で、音声のセキュリティ対策とプライバシーの保護を強化する新技術の創出に取り組んだ。ユニークなのは研究者が攻撃側と防御側に分かれて競い合う「敵対的競争型研究」を通じて、話者認証システムの安全性向上、プライバシー保護、音声のなりすまし攻撃の自動防御などの技術レベルを高めてきたことだ（図1）。

「インフォデミック^{※3}を克服するソーシャル情報基盤技術」の研究では、偽映像・偽音声・偽文書などを用いた攻撃を自動検出・防御する技術開発により、フェイクメディアがもたらす潜在的な脅威に対処すると同時に、サイバー空間での多様なコミュニケーションと意志決定を支援する信頼性の高いソーシャル情報基盤技術の確立に取り組んできた。

両研究チームは、共通基盤研究としてフェイク音声やフェイク映像の真贋判定を行う深層学習^{※4}モデルの開発を進めてきた。その判定方法は、大量のデータに基づいて自動識別を行うもので、人間による分析などを一切必要としない。さらに、情報の圧縮や低解像度化などにより品質が劣化したメディアであっても、一定の信頼度による判定を行うことができる点も大きな特色となっている。

研究チームは、こうした成果を社会実装に移すため、A-STEPの支援を受け、2021年に他のアプリケーションに簡単に導入できるパッケージソフトとして、フェイクメディア検出アプリケーション「SYNTHETIQ VISION」を開発した（図2）。「SYNTHETIQ VISION」は、真贋判定の対象となる映像をサーバーにアップロードする段階から判定結果をダウンロードするまでの一連のプロセスを自動的に行うことができ、導入企業が容易かつ迅速に真偽判定ができる。



図1 「声のアイデンティティクローニングと保護」のプロジェクト体制



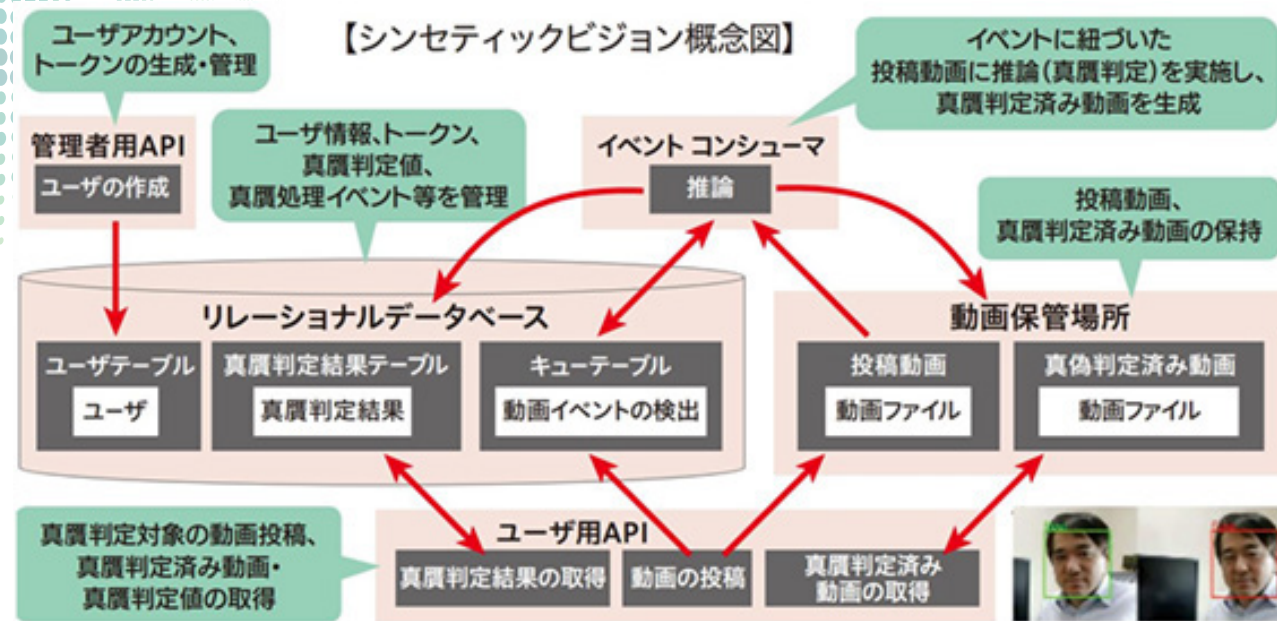


図2 「SYNTHETIQ VISION」の概念図（NII Today 100 号から引用）

フェイクメディアの悪用防止に広範囲な利用へ

「SYNTHETIQ VISION」は、2023年に複数の企業にライセンスアウトされ、サイバーエージェント社は自社の「デジタルツインレーベル」における真偽自動判定に採用することを発表した。これは、AIにより生成されたフェイク顔映像の真偽を自動判定する技術が実サービスに国内で初めて適用される事例となるが、企業が簡単に導入でき、迅速にファクトチェックができるサービスとして社会実装された意義は大きい。今後、「SYNTHETIQ VISION」は、金融機関やオンラインコミュニケーション事業者、エンターテインメント業界、ソーシャルメディア、報道機関、フォレンジック事業者など広範囲に導入されることが期待される。

また、2024年10月に発表された、富士通株式会社など産学協同組織9者によるプロジェクト「偽情報対策プラットフォームの構築」においても、「SYNTHETIQ VISION」を開発した国立情報学研究所が参画して重要な役割を担うことになった。





睡眠障害患者の負担を大幅に軽減

自宅で精度の高い睡眠時脳波測定を実現

柳沢 正史（筑波大学 国際統合睡眠医科学研究機構 機構長・教授）



CREST 「オプトバイオ」 領域・「光を用いた睡眠の機能と制御機構の統合的解析」 研究代表者（2016-2022）

自宅で閉塞性睡眠時無呼吸症候群の正確な評価を可能に

柳沢正史筑波大学国際統合睡眠医科学研究機構教授らの研究グループは以前に、筑波大学発スタートアップ企業である株式会社S'UIMINを立ち上げ、自宅で簡単に睡眠時脳波を計測できるInSomnograf(インソムノグラフ)を開発した(図1)。インソムノグラフはこれまでの研究で、健常者の睡眠において、終夜睡眠ポリグラフ(PSG)検査^{※1}と同等の精度で測定できることが確認されている。

柳沢教授らは、健常者とは睡眠状態が大きく異なる閉塞性睡眠時無呼吸症候群(OSA)でも、インソムノグラフが同様の精度で測定できるかを検証し、OSAの早期発見や睡眠評価に十分な精度を有していることを確認した。

これにより、睡眠障害の診断や経過観察の遠隔医療が可能となり、大幅な患者の負担軽減が期待される。



図1 InSomnograf(インソムノグラフ) © (株) S'UIMIN

在宅で睡眠時の脳波を測定してAIで解析し、医師の見解や改善アドバイスを加えて利用者にレポートする、睡眠計測サービス。

患者負担の少ない睡眠時脳波測定が課題

OSAは、世界で10億人以上、日本でも中等症以上の患者だけで900万人以上が罹患していると推定されている。OSAは終夜睡眠ポリグラフ検査で診断することができるが、そのためには入院が必要であるため費用や時間がかかる。また、実施可能な医療機関が限られているため、終夜睡眠ポリグラフ検査は年間わずか8万件しか行われていない。そこで、日常環境でも行える患者負担の少ない新しい検査が求められてきた。

※1 終夜睡眠ポリグラフ(PSG)検査

睡眠時の脳波、呼吸、足の運動、あごの運動、眼球運動、心電図、酸素飽和度、胸壁の運動、腹壁の運動などを記録する検査。睡眠関連疾患の診断のために、専門の施設に入院して行われることが多い。

インソムノグラフとPSG検査の同等性を確認

本研究では、20歳以上の成人で、事前の簡易検査で、睡眠時無呼吸症候群の疑いがあるとされる無呼吸低呼吸指数(AHI)または3パーセント酸素飽和度低下指数(3パーセントODI)^{※2}が5以上の77人を対象に、インソムノグラフとPSG検査の機器を同時に装着してもらい、一晩の睡眠測定を井上病院にて実施した。翌日、各機器から取得したデータを解析して、11種類の定量的睡眠指標(総睡眠時間、各睡眠ステージの割合、覚醒反応指数、呼吸イベント指数もしくは無呼吸低呼吸指数等)を算出し、両機器の同等性を検証した。その結果、すべての指標において、2つの測定方法の一致性が確認された。例えば、呼吸関連指数は、在宅睡眠時脳波測定と経皮的動脈血酸素飽和度(SpO2)測定を組み合わせで得られた呼吸イベント指数(REI)を、PSG検査で得られたAHIと比較した結果、0.899の級内相関係数が得られた(図2)。また、インソムノグラフで得られた覚醒反応指数により、重症OSA患者が高い特異度で検出された(図3)。

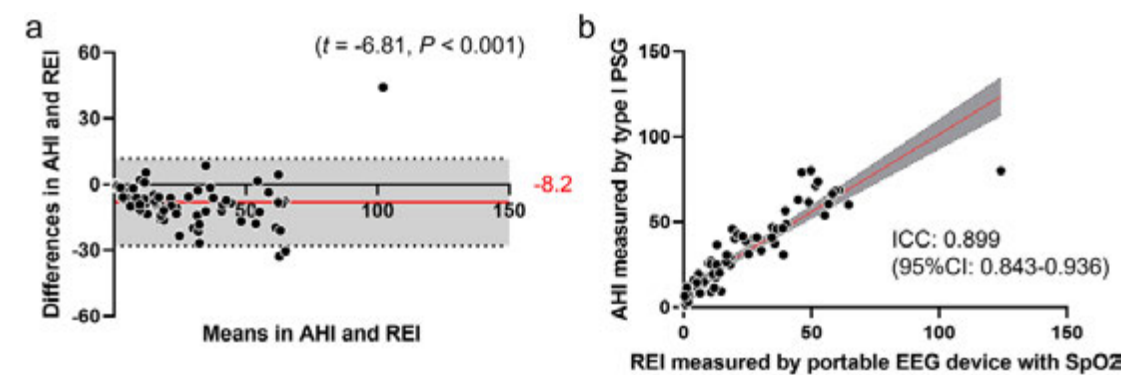


図2 呼吸イベント指数(REI)の同等性の検証

インソムノグラフと酸素飽和度(SpO2)測定機器より得られた呼吸イベント指数(REI)と、PSG検査によって得られた無呼吸低呼吸指数(AHI)のBland-Altman分析と級内相関係数^{※3}の分析結果。両者間の高い同等性が確認された。(掲載論文: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-53827-1>)

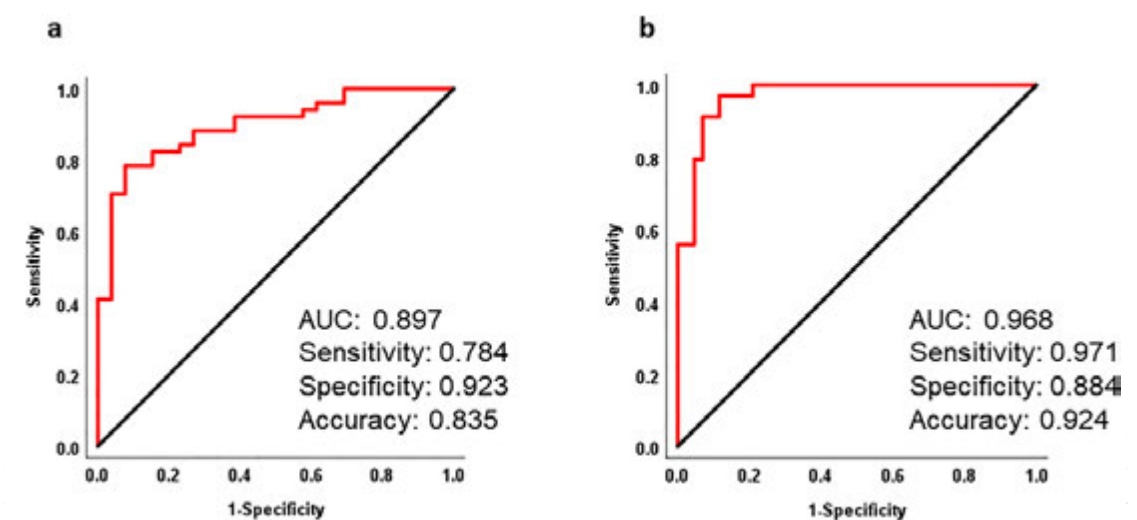


図3 覚醒反応指数のスクリーニング精度

インソムノグラフで得られた覚醒反応指数によるOSA患者のスクリーニング精度の検証結果。覚醒反応指数25以上でAHI15以上のOSA患者(a)が、覚醒反応指数32以上でAHI30以上のOSA患者(b)が、それぞれ高い精度で検出された。(掲載論文: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-53827-1>)

※2 3パーセント酸素飽和度低下指数(3パーセントODI)

睡眠中に血中の酸素飽和度が3パーセント以上低下するイベントの発生回数を1時間あたりで計測した指標。この指数は睡眠時無呼吸症候群(SAS)などの呼吸関連睡眠障害の診断や重症度評価に使用され、酸素飽和度の低下頻度が高いほど、呼吸障害の可能性や重症度が高いことを示す。

※3 Bland-Altman分析と級内相関係数

Bland-Altman分析と級内相関係数は測定方法間の一致性や信頼性を評価する2つの異なる統計手法。Bland-Altman分析では、異なる測定法から得たデータの平均差と許容差範囲を算出し、データがこの許容差範囲内に収まる場合、2つの測定法が実用的に一致していると評価する。級内相関係数は、異なる評価者間や同一評価者の再測定における一致性を定量的に評価する手法。



WEB <https://www.jst.go.jp/seika/bt2025-05.html>



自覚している睡眠時間や睡眠の質は「当てにならない」

さらに、柳沢教授らは睡眠障害の治療を受けていない421人を対象として、インソムノグラフにより得られた睡眠脳波と血中酸素飽和度の測定データ(客観的睡眠データ)、睡眠に関する質問票回答(自覚的な睡眠評価)、これらのデータから「不眠」、「睡眠不足」、「睡眠時無呼吸」等の観点に対する医師の評価を分析した。その結果、医師の評価は客観的数値と強く関連しているものの、自覚的な睡眠の評価とは全く異なることがあることが判明した。自分では十分な睡眠を取っていると思っている対象者のうち45%で睡眠不足が客観的に疑われ、睡眠の不調を訴えている対象者のうち66%には客観的な問題は確認されなかったのである。また、自覚的な「睡眠の質」の評価も、客観的な「睡眠の深さ」、「短い覚醒の有無」、「睡眠時無呼吸症候群のリスクの有無」をほとんど反映していなかった(図4)。これらのことから、客観的な睡眠計測とそれに基づく医師の総合的な評価の重要性が示唆された。

迅速かつ幅広い疾患を診断する次世代の基盤技術へ

現代社会において日本人の4人に1人が睡眠の悩みを抱えているとも言われ、睡眠障害は大きな社会課題となっている。睡眠障害を診断するためには睡眠の量や質を可視化する必要がある。睡眠の量は活動量計などで自宅でも測ることができるが、睡眠の質に関しては、これまで、入院して脳波測定する必要があり、簡単には測定できなかった。

柳沢教授らの開発したインソムノグラフは、従来の睡眠検査の標準法であるPSG検査とほぼ同等の精度で、OSA患者の睡眠時脳波測定が可能である。呼吸フローや血中酸素飽和度、脈拍などの測定機器と適切な組み合わせることにより、さらに精度を高め、在宅等での遠隔医療でもOSAの診断や経過観察ができる。インソムノグラフはすでに予防医療や研究の分野で活用されているが、睡眠障害の診断、治療へと、今後、さらなる活用の方が広がることが期待される。

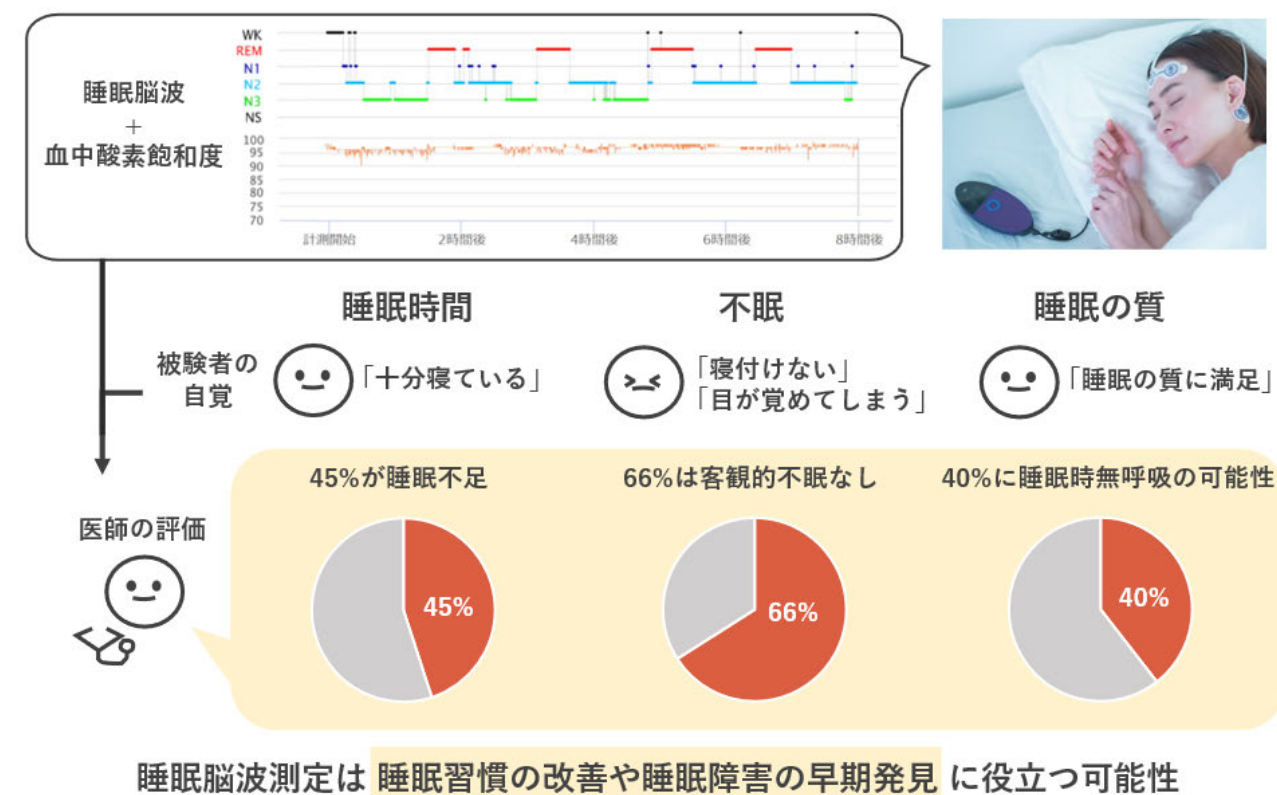


図 4 睡眠に対する自覚的評価と客観的評価の乖離
(掲載論文を元に作成 : <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2412895121>)





スピントロニクス省電力半導体技術の展開

低消費電力かつ高速動作の 縦型 BC-MOSFET の量産化へ

遠藤 哲郎（東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センター センター長）



CREST

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」領域・
「縦型ボディーチャンネル MOSFET とその集積プロセスの開発」研究代表者（2008-2013）

ACCEL

「縦型 BC-MOSFET による三次元集積工学と応用展開」研究代表者（2014-2018）

縦型BCトランジスタ+MRAMで飛躍的な低消費電力と高速動作を実現

東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センターの遠藤哲郎センター長らの研究グループは、現在3nm以降のCMOS世代で活発に開発されているGAA型MOSFETの源流にあたる低消費電力・低ノイズの革新的トランジスタ「縦型BC（ボディーチャンネル）-MOSFET^{※1}」を世界で初めて開発している。この縦型BC-MOSFETをメモリーセルの周辺回路に配した1ギガビット（ギガ：10億）級の大規模DRAM^{※2}を大口径300mmウエハーにて試作し、従来のDRAMに比べて大幅に低電圧化した条件下でも良好に動作することを実証している。この縦型BC-MOSFET（縦型GAA-MOSFET）は、半導体技術に関する国際デバイスシステムロードマップ（IRDS）にも3nm以降の標準技術として記載されている。

さらに、研究グループは、縦型BC-MOSFETをスピントロニクス半導体である磁気記録式メモリー（MRAM）に適用するための基盤技術に取り組み、128メガビット（メガ：100万）のSTT-MRAM^{※3}を試作して世界最高性能の書き込み速度の実証にも成功している。

このような成果を社会実装していくために、2018年に東北大学発のスタートアップであるパワースピン株式会社が設立された。パワースピン社の代表取締役&COO（最高執行責任者）を兼ねる遠藤センター長は、半導体メーカーとの連携により、STT-MRAM をはじめスピントロニクス省電力半導体^{※4}の実用化・量産化に向けた研究開発を進めている。2018年には、台湾の世界的な半導体ファウンドリーである台湾セミコンダクター・マニュファクチャリング・カンパニー（TSMC）などから、MRAMの量産が開始されている。

待機電力とリーク電力を削減が低電力化の決め手

スマートフォンやタブレット端末の高機能化にともない、バッテリー使用持続時間が短くなるのが大きな課題となってきた。要因の1つが半導体デバイスの待機電力である。現行のCPU（中央演算処理装置）やDRAMなどは電源を切るとデータが失われるため、動作しないときも通電する待機電力が発生する。これを解消する手段として開発が進められているのがスピントロニクス半導体だ。スピントロニクス半導体は電子スピン（回転）により生じる磁気の向きで情報を記録する。磁気は電源を切っても保存されるので待機電力を必要とせず、理論的には消費電力が約100分の1になる。スピントロニクス半導体の研究は東北大学が世界をリードしており、すでに世界の半導体メーカーでMRAMが量産されている。

もうひとつの要因が集積回路の基本素子であるMOSFET自身のリーク電流である。半導体素子（トランジスタ）はゲートにて電流を流したり遮断したりして情報の出し入れをする。ナノサイズにまで素子の微細化が進むとゲート長も短くなることで外部に漏れる電流が無視できなくなり、消費電力に影響をもたらしていた（図1）。これを解消するために、遠藤センター長らが研究してきたのが「縦型BCトランジスタ」である。この縦型BC-MOSFET（縦型GAA-MOSFET）は、国際デバイスシステムロードマップ（IRDS）にも3nm以降の標準技術として記載されている。

※ 1 MOSFET

金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ。集積回路の中で最も一般的な構造。

※ 2 DRAM

ダイナミック・ランダムアクセス・メモリー。情報を読み書きする記録デバイス。

※ 3 STT-MRAM

スピン注入型磁気抵抗型メモリー。磁化の方向で情報を記憶する不揮発性メモリー。高速磁化反転により高速動作が可能で、原子移動が無いために書き換え耐久性も高い。

※ 4 スピントロニクス省電力半導体

スピントロニクスとは、スピンとエレクトロニクスの合成語。これまでの半導体は電荷の有無を「0」「1」の情報として扱うが、スピントロニクス半導体では電子の自転で生じる磁気（電子スピン）の向きの違いを利用して情報を扱う。従来の半導体は電源を切ると情報が消えてしまうが、磁気は電源を落としても失われないので大幅な低消費電力化が期待できる。

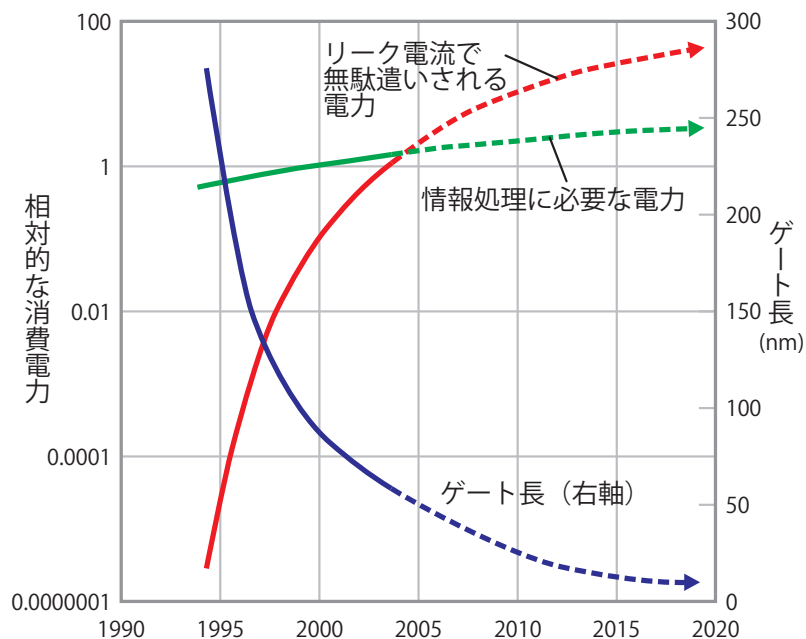


図1 半導体集積回路におけるリーク電流

半導体集積回路ではゲート長の短縮に伴い、リーク電力が急増する。（IEEE Computer, 36(12):68-75, 2003 より作成（点線は当時の予測））

産学連携で縦型BC-MOSFETを活用したデバイスの開発を展開

遠藤センター長らの研究チームは、縦型BCトランジスタの基礎研究を進めてきた。従来のトランジスタがシリコンの土台に平面的に回路を形成するのに対し、縦型BCトランジスタは直径数十ナノメートルのシリコンの円柱にゲートを360度巻きつける構造のためゲート長を十分にとることで、リーク電流を大幅に減らすことができる（図2）。しかし、極細のシリコンの円柱に絶縁膜を形成するのが難しかった。5年間の研究でシリコンの結晶の方向（面方位）により酸化の程度が変わるために絶縁膜形成を妨げていたことをつきとめて、1メガビットの縦型BCメモリーを世界で初めて開発した（図3）。

この成果をもとに、2014年からは、縦型BCトランジスタ技術とスピントロニクス半導体技術との組み合わせにより、超低消費電力かつ高速動作を可能とする新規デバイスの開発に向けた研究開発を進めてきた。プロジェクトには大学だけでなく東京エレクトロン株式会社やマイクロンジャパン株式会社などの有力半導体関連企業が参画し、縦型BC-MOSFETの飛躍的な高集積化と省エネ性を実現する基盤技術とともに、ワーキングメモリー（DRAM やSTT-MRAMなど）を中心にロジックLSI、アナログLSI、AI・脳型LSI^{※5}などの応用展開につながる共通基盤技術の開発を進めてきた。

この研究を通じて、縦型BC-MOSFETを周辺回路に搭載したギガビット級の大規模STT-MRAMを試作し、低電源電圧での動作実証に世界で初めて成功、高密度・高速のMRAMの実現に向けた集積化プロセス技術を確立した。また、ロジックLSIにおけるSRAMの大幅な面積縮小と待機電力削減にも成功している。

このような研究開発と併行して、2018年に東北大学発のスタートアップとなるパワースピン株式会社を設立し、国際集積エレクトロニクス研究開発センターを中核とした産学連携のもとで、縦型BC-MOSFETの実用化に向けて製造コスト、耐久性、信頼性などを含めた研究開発を進めている。

※ 5 AI・脳型LSI

脳の構造を模したニューロモーフィック技術を活用したAI半導体。



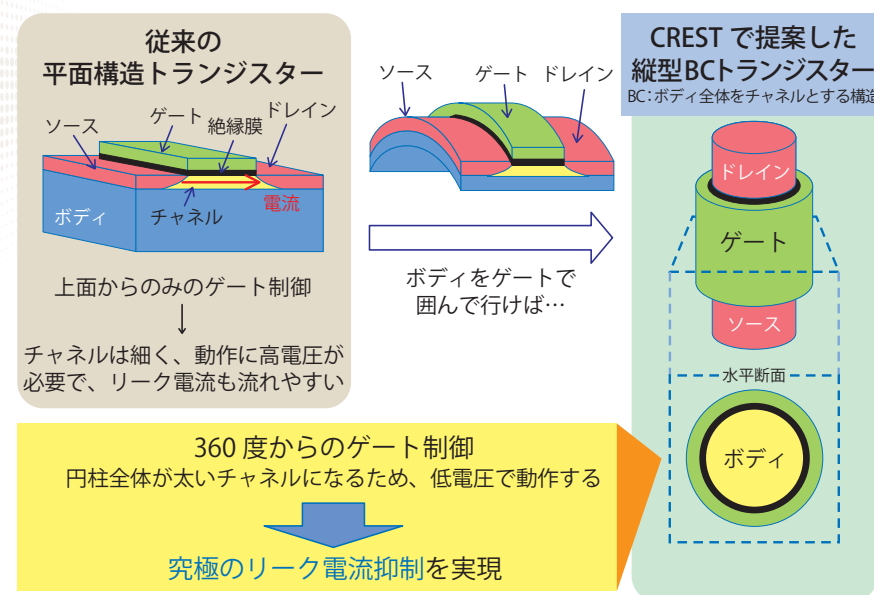


図2 縦型BCトランジスタの構造

トランジスタは、ゲート電圧により電気の通り道(チャンネル)をつくり、ソースからドレインに電気を流すことで信号を伝える。ゲート長が短くなると、チャンネルつからないときでもソースとドレイン間の電圧により「リーク電流」が通ってしまう。リークの元になるソースとドレイン間の電圧を下げるのが縦型構造の狙いである。

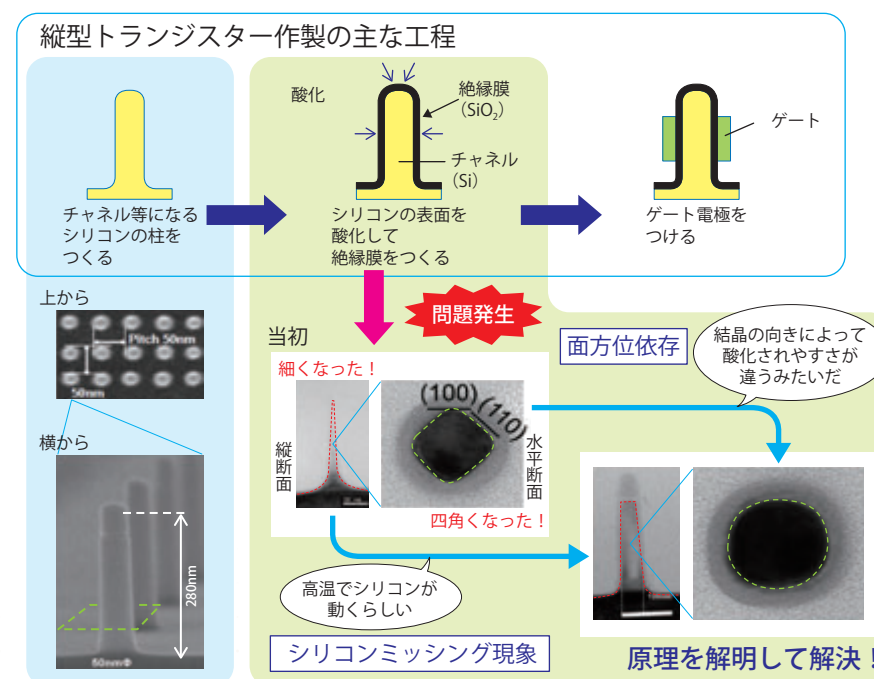


図3 縦型トランジスタ作成の主な工程

ナノレベルの結晶をつくることで初めて明らかになったシリコンの円柱が痩せる「ミッシング現象」(中央)とその解決につながった「面方位依存」(右下)。

超高速なAI実現に貢献する光電融合半導体開発に参画

パワースピン社では、今回の研究成果を活用し、アイリスオーヤマ株式会社と共同で「非接触多人数対応検温カメラ」を開発した。従来の検温カメラの検出人数が5～10人/秒だったのに対し、40～170人/秒の高速検温を実現したもので、コロナ禍の中で開催された2023年5月の広島G7サミット(主要国首脳会議)の場でデモンストレーションされた。

また、東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センターは、次世代通信基盤(IOWN)の中核技術としてNTTなどが国際連携によって開発する「光電融合半導体プロジェクト」にも参画してメモリー制御技術の開発の一部を担うなど、超高速性が求められる将来のデバイス開発に貢献すべく研究開発を続けている。





クロマチンにおける DNA 修復機構の解明

切断された二本鎖 DNA がクロマチン上で修復される仕組みを解明

胡桃坂 仁志（東京大学 定量生命科学研究所 クロマチン構造機能研究分野 教授）



ERATO

「胡桃坂クロマチンアトラス」研究代表者（2019-2024）

クロマチン上でRAD51が二本鎖DNA切断修復を開始する仕組みを解明

東京大学定量生命科学研究所クロマチン構造機能研究分野の胡桃坂仁志教授らの研究グループは、DNA修復タンパク質のRAD51が、クロマチン内の二本鎖DNAが切断した部位を見つけ出し、DNAの修復を開始するメカニズムを明らかにした。

真核生物のゲノムDNAは、ヒストンタンパク質に巻き付いてクロマチンと呼ばれる複合体を形成する。クロマチンは折り畳まれることで細胞核内に収納されているが、遺伝子発現に応じてその構造を動的に変化させる。

胡桃坂教授らの研究グループはこれまで、クロマチンの構造変化とDNA機能制御発現を解明するとともに、それらの構造情報を核内空間において地図のように記した「クロマチンアトラス」という概念の確立を目指して研究を進めてきた。

この成果は、「クロマチンアトラス」確立への前進と、DNAの二本鎖切断が原因となるがん発症メカニズムの解明に貢献することが期待される。

RAD51は切断されたDNAをどのように修復するのか

生物の設計図であるゲノムDNAは、紫外線や細胞の代謝により、日常的にDNA損傷^{※1}を受けている。特に、放射線などにより生じる二本鎖DNAの切断は、日本人の死亡原因の一位であるがん発症の原因となる。ただし、切断されたDNAの多くは、DNA修復機構によって修復される。RAD51は、このDNA修復に関わるタンパク質のひとつとして知られている。

ヒトを含む真核生物では、ゲノムDNAはヌクレオソーム^{※2}が連なったクロマチンを形成することで核内に収納されている。ヌクレオソームはヒストン複合体にDNAが強固に巻きついた構造で、そのままの構造では修復の妨げになると考えられる。切断されたクロマチン上において、RAD51がどのようにヌクレオソームと結合し、DNA修復を進めるのか、そのメカニズムは不明だった(図1)。

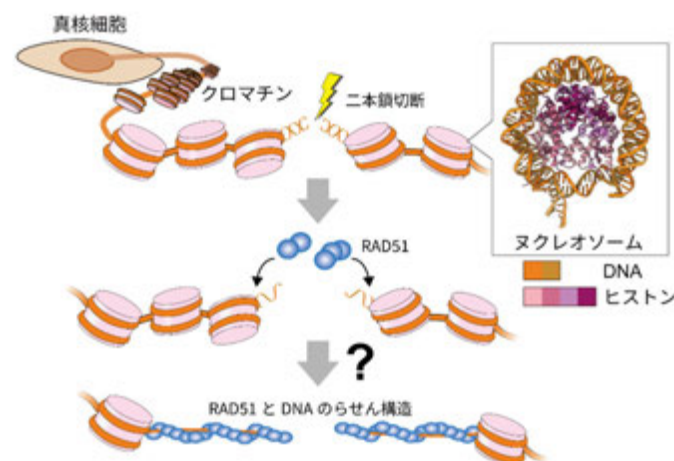


図1 RAD51によるクロマチン上での二本鎖DNA切断修復の謎

ヒトを含む真核生物のゲノムDNAは、ヌクレオソームを基本構造としたクロマチン構造を形成する。ゲノムDNAに二本鎖切断が生じた後、DNA上にRAD51が集積してDNA修復が進行するが、クロマチン上における反応進行のメカニズムは謎だった。

※1 DNA 損傷

DNAを構成する塩基の酸化や塩基同士の異常な結合、DNA切断など、ゲノムDNA配列や構造に影響を及ぼすさまざまな損傷。二本鎖切断はDNAの両方の鎖が切断される損傷であり、X線などの電離放射線、環境物質、DNA複製ストレスなどによって生じる。DNA損傷はがんや遺伝病といった重篤な疾患の原因となるため、生物は損傷を正確に修復する仕組みを持っている。

※2 ヌクレオソーム

クロマチンの基本単位であり、4種類のヒストン（H2A、H2B、H3、H4）をそれぞれ2分子ずつ含んだヒストン8量体に、約150塩基対のDNAが巻き付いた構造体。

RAD51が段階を経てDNAを修復するプロセスを明らかに

胡桃坂教授らの研究グループは、クライオ電子顕微鏡^{※3}を使って、DNA切断末端を含むヌクレオソームとRAD51の複合体の構造を解析した。その結果、RAD51がリング状構造を形成してヌクレオソームに結合すること、またRAD51がリング状構造でDNA切断末端を認識すること、さらにRAD51がヌクレオソームからDNAを引き剥がしながら、らせん状の構造を形成することが発見された(図2)。これらは、RAD51のクロマチン上への集積、損傷部位への結合、DNA修復の開始という3つの過程に対応していると考えられる(図3)。

一方、RAD51のアミノ末端ドメイン(以下、N末端ドメイン)^{※4}は、クロマチン構造を持つ真核生物にのみ存在する領域で、クロマチン構造を持たない原核生物のRecA(RAD51に相当するタンパク質)には存在せず、その機能は不明だった。本研究により、RAD51のN末端ドメインがヌクレオソームDNAとの結合に重要な機能を果たしていることが明らかになった。この結果から、RAD51のN末端ドメインは、RAD51がクロマチン上に集積して二本鎖切断を修復できるよう、進化の過程で真核生物が獲得したドメインであることが明らかとなった。また、RAD51のリング構造においては、二本鎖切断の修復の活性中心であるL1ループ領域^{※5}を介して、二本鎖切断部位を検知していた(図2b右)。

以上から、クロマチンにおいてDNAが切断されると、RAD51はN末端ドメインを介してヌクレオソームに結合し、リング状構造を形成して切断部位を認識する。さらにRAD51がヌクレオソームからDNAを引き剥がしながららせん状の構造を形成し、DNA修復を開始するというプロセスが今回の研究で明らかとなった。

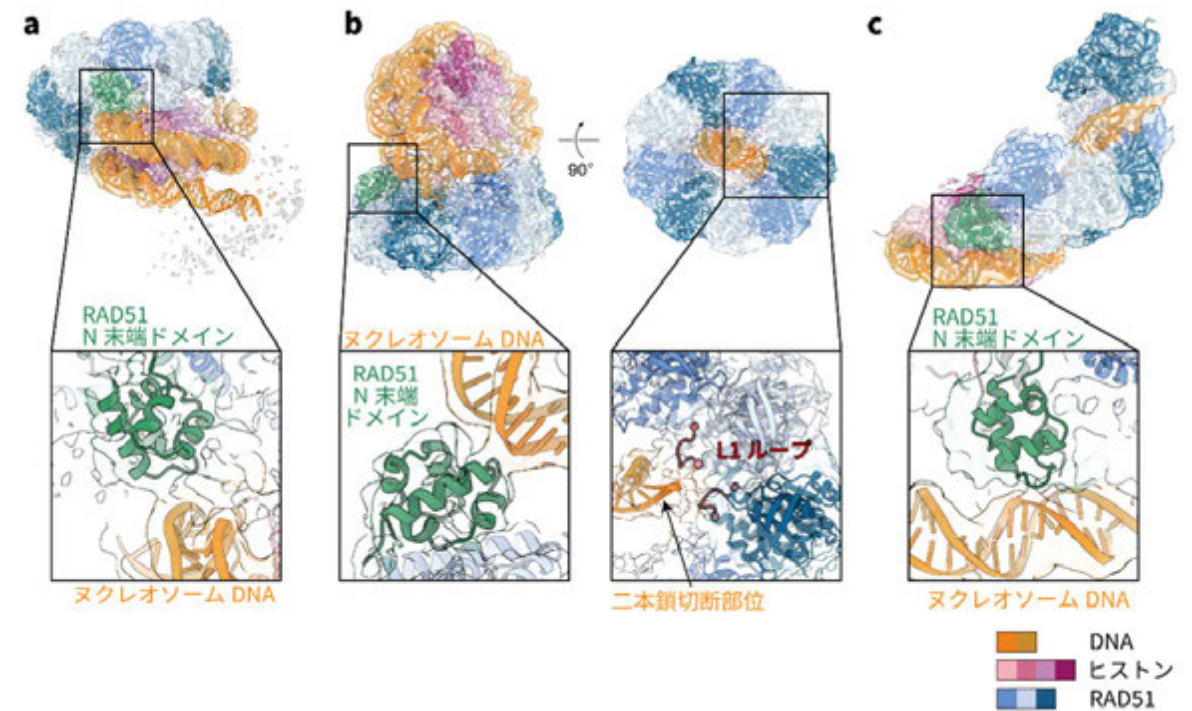


図2 RAD51がヌクレオソームに結合した構造

(a)RAD51がヌクレオソーム上でDNA修復開始の待機している様子、(b)RAD51がヌクレオソーム上の二本鎖切断を認識している様子、(c)RAD51がヌクレオソーム上でDNA修復を開始した様子。(b)の構造では、RAD51のL1ループ領域が、二本鎖切断部位と結合していた。

※3 クライオ電子顕微鏡

タンパク質を含む試料を極低温環境下で凍結し、氷包埋した試料を電子線で観察する顕微鏡。大量の画像を撮影することで、多様な角度情報を持つ粒子像を得ることができ、その情報からタンパク質の立体構造を再構成できる。

※4 RAD51 アミノ末端ドメイン (N末端ドメイン)

RAD51のアミノ基のある末端側に存在するドメイン。RAD51は2つの球状ドメインで構成されており、アミノ末端側に存在する球状ドメインとRecAと相同な球状ドメインを有する。

※5 L1ループ領域

RAD51のRecAと相同な球状ドメインに存在する領域で、直鎖状のDNAとの結合に重要であることが分かっている。



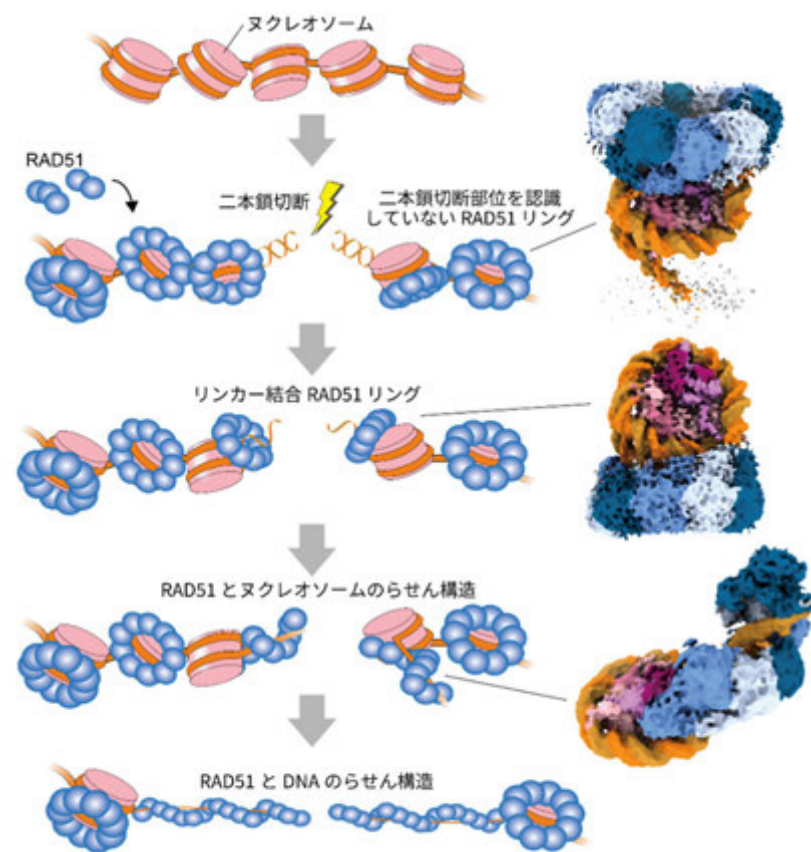


図3 RAD51 がクロマチン上で DNA の二本鎖切断を修復するモデル

RAD51 はクロマチンにリング構造で結合して待機し、さらに二本鎖切断の認識に機能する。その後、RAD51はヌクレオソームからDNAを引き剥がしながららせん構造を形成することで、二本鎖DNA切断の修復を進行する。右列の3つの構造は、図2で示したRAD51とヌクレオソームの複合体の構造に対応している。

がん発症メカニズムの解明、新しい治療法の確立に期待

DNAの修復において、クロマチン結合への重要性が明らかとなったRAD51のN末端ドメイン。このRAD51のN末端ドメインには、多くのがん患者でアミノ酸の変異が見つかっている。本研究成果により、RAD51のN末端ドメインが変異することによって、DNA修復時に、RAD51とヌクレオソームの結合に支障が生じ、発がんの原因になると示唆された。本研究の進展は、今後、RAD51のN末端ドメインの変異を原因とするがん発症のメカニズム解明や、治療法の確立に貢献することが期待される。

また、胡桃坂教授らは、これまでクロマチンアトラスの実態解明に取り組んできており、本研究はその成果のひとつとなるが、まだまだ全貌解明は遠い。将来、クロマチンアトラスの実態が解明されれば、生命の遺伝情報利用の根幹に迫るとともに、関連疾患においては、これまでにない新たな治療法の確立に貢献することが期待される。





バイオフィルムのメカニズムの解明

油分解性の海洋細菌が形成するバイオフィルムは油を効率的に分解

野村 暢彦（筑波大学 生命環境系 教授）



ERATO

「野村集団微生物制御」研究代表者（2015-2021）

細菌が油を分解するメカニズムの解明

生き物を取りまく環境において、多くの細菌はバイオフィルム^{※1}と呼ばれる集団を形成して生存している。海洋に広く存在するある種の細菌は、海洋に流出した石油などを分解して、これを栄養源としている。その際、油の周りにバイオフィルムを形成することがわかっている（図1）。しかし、バイオフィルムがどのように形成され、それが油を分解することにどのように関わっているのか、その関連性はわかっていなかった。

本研究では、マイクロ流体デバイス^{※2}を利用して、細菌と微小な油滴との相互作用を時空間的に高解像度で可視化することにより、海洋に存在する油分解性の細菌が、油水界面上に強く付着しながら集団で密集して生育することで、油界面の屈曲を生じさせることを発見。これにより油水界面の面積を拡大させ、より多くの細胞が直接油に接触できるようになり、効率的に油を分解しているという、油を分解するメカニズムを明らかにした。本研究成果は、細菌を用いた環境浄化技術の向上に貢献することが期待される。

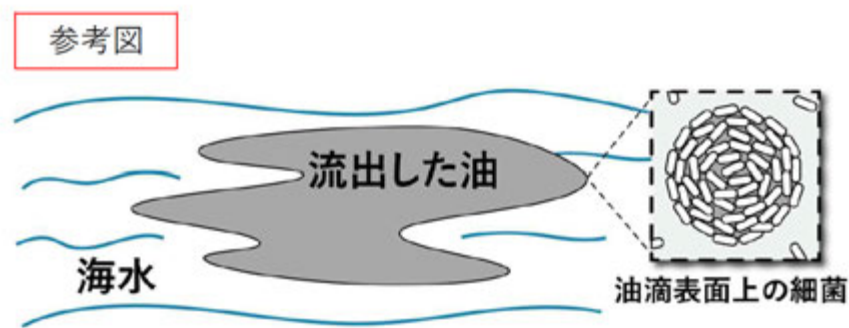


図1 海中の油滴表面上に存在する細菌の模式図

実環境でバイオフィルムが形成されるメカニズムの解明が課題

多くの細菌は、バイオフィルムと呼ばれる集団を形成して生存している。バイオフィルムは植物、動物、そして人間の健康や生活に関わっており、致命的な感染症や、工業用パイプの詰まりや腐食による経済的損害の原因となる。一方で、廃水処理における浄化にも重要な役割を果たしており、バイオレメディエーション^{※3}の担い手としても知られている。

海洋に存在する細菌の中に、石油を栄養源としている細菌があり、海洋に流出した油なども分解することが知られている。この細菌が油を分解する際、油滴の周囲にバイオフィルムを形成することが分かっているが、どのようにバイオフィルムを形成するのか、どのように石油を分解するのかは不明だった。

※1 バイオフィルム

微生物が形成する集合体のこと。微生物の細胞と微生物が自ら産生するマトリクス（多糖やタンパク質、核酸など）から成る。

※2 マイクロ流体デバイス

微細加工技術を利用して樹脂やガラスなどの基盤に微小流路を形成した装置。

※3 バイオレメディエーション

微生物や植物などの生物を用いて、有害物質で汚染された土壌、地下水や海洋を浄化する技術のこと。

マイクロ流体デバイスでバイオフィルムの仕組みを解き明かす

これまで油を分解する海洋の細菌がバイオフィルムを形成し、石油を分解するメカニズムの研究は、試験管内で行われてきたが、メカニズムの解明には至らなかった（図2左）。本研究では、人間の髪の毛の直径の2分の1ほどの大きさの油滴をトラップし、油滴上の油分解性細菌の挙動を1週間以上観察し続けることができるマイクロ流体デバイスを用いて、油分解性の海洋細菌である*Alcanivorax borkumensis* (*A. borkumensis*)の観察を行った（図2右）。

観察の結果、*A. borkumensis*は、油滴上に異なる2つのタイプのバイオフィルムを形成することが分かった。本研究グループは、この2つのタイプを球状バイオフィルム(spherical biofilm: SB)と樹状バイオフィルム(dendritic biofilm: DB)と名付けた。

油と水は混ざらないため、通常、油滴は海水中では球状の構造を保つ。SBは油滴を丸く包み込むだけだが、DBには油界面の面積を広げる性質があり、SBよりもはるかに速く油滴を分解することがわかった。*A. borkumensis*が油を分解する際、油液界面にDBを形成することにより、界面の構造が崩れ、油滴は樹状様構造を示す。これによって油界面の面積が指数関数的に拡大し、より多くの細胞が油に直接、接触できるようになる。

本研究では、DB細胞が油滴をどのように変形させるかを明らかにするため、細胞表面の特性を調べた。その結果、DB細胞の表面は、SB細胞よりも疎水性が増しており、油に強く付着することがわかった。また、*A. borkumensis*はバイオサーファクタント^{※4}と呼ばれる分子を分泌して表面張力を低下させ、油との界面を変形する。こうして油界面の面積を広げるのだ。

さらに本研究は、理論物理モデルを用いて、バイオフィルムの形成のダイナミクスとその形状を予測した。その結果、細菌の細胞は油滴表面を隙間なく覆っており、その配置は特徴的なパターンを示していること、この配置パターンが液晶（個体と液体の中間状態）の物理学により説明できることを見出した。

油滴の形状変化は、油滴上の細胞が野菊の花びらのように配置されている領域の中心から始まることがわかった（図3）。そして細胞の成長と密集によってバイオフィルム内の圧力が上昇すると、野菊の花びら状の中心が隆起し、樹状突起様構造の形成が始まる。これは、ひとつひとつの細胞がバイオフィルムを形成し互いに協力することによって、細胞の成長に伴う圧力を特定の場所に集中させることで油界面の隆起が起こるためだ。その結果、細胞に覆われた油のチューブが形成されるのだ。細胞の並び方は、液晶のネマチック相（分子の長軸は一方向に配向するが、分子の重心はランダムの状態）と類似していた。

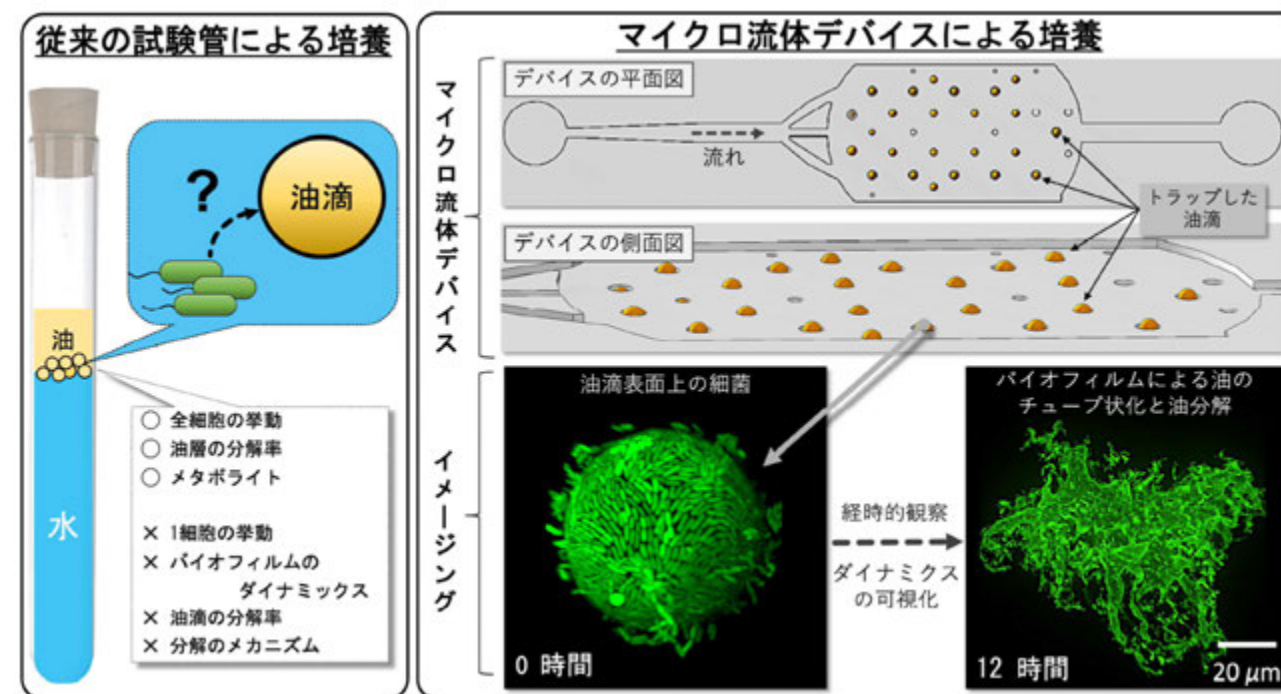


図2 マイクロ流体デバイスを用いた油滴上細菌の観察技術

※4 バイオサーファクタント

微生物が生産する界面活性剤。本来混じり合わない油と水の界面に作用して混ぜ合わせる働きがある。



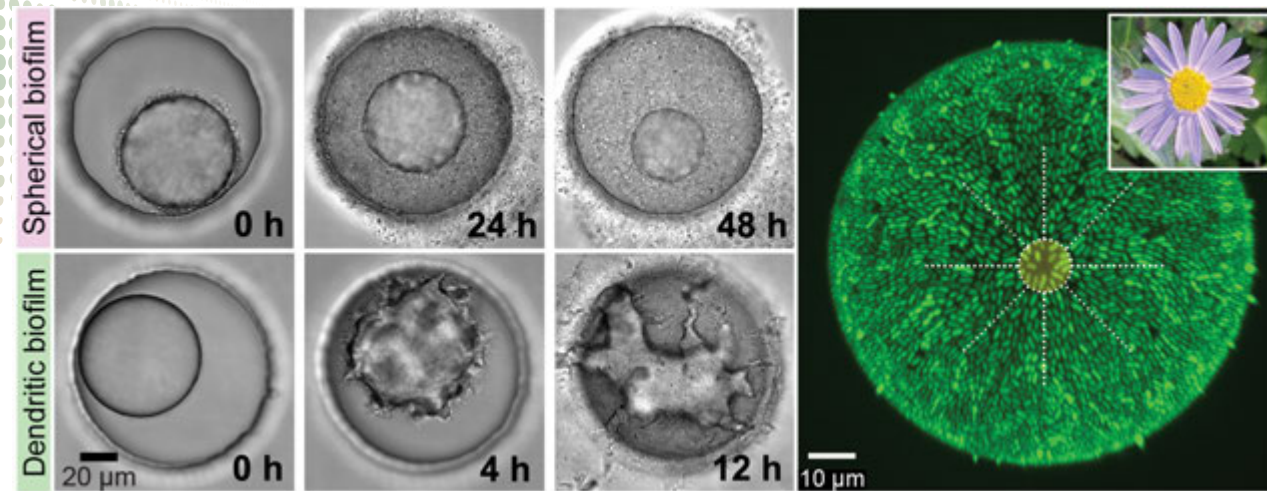


図3 共焦点レーザー顕微鏡^{※5}による油滴上における球状バイオフィルム（SB）と樹状バイオフィルム（DB）の画像
SBでは油滴は球状を保っているが、DBでは油滴が樹状突起のような形状に変化し、油がチューブ状に伸びている。右図は油滴の隆起が起きる直前の油滴上の細菌細胞の配置を示す。挿入図は野菊の写真。野菊の中心部に当たる部分から油滴の隆起がはじまる。

実環境中の微生物を制御して効率よく利用する次世代の基盤技術へ

近年、アクティブマターと呼ばれる、自ら動く能力を持つ物質における複雑な挙動が注目されている。細菌はそのような「物質」の1つであり、私たち人間にはないような特別な能力を持っていることが古くから知られている。本研究の結果から、細菌は物理学に基づき、餌である油を効率よく利用することが実証された。このようなメカニズムは、他の類似した生物の研究に応用可能であるとともに、油のバイオレメディエーションの効率化に貢献すると期待される。

※5 共焦点レーザー顕微鏡
レーザー光を観察対象上に走査させながら像をつくる顕微鏡で、高解像度かつ三次元的なイメージを得ることができる。





蚊の吸血の仕組みを解明

蚊が吸血を停止するシグナルを発見

佐久間 知佐子 (理化学研究所 生命機能科学研究センター 栄養応答研究チーム 上級研究員)



「感染症媒介蚊の吸血を制御する口吻味覚基盤の包括的理解」(2021- 最長 10 年間)

蚊が「腹八分目」で吸血を停止するシグナルを発見

佐久間知佐子理化学研究所生命機能科学研究センター栄養応答研究チーム上級研究員らの研究グループは、哺乳類の血液中に存在するフィブリノペプチドA (FPA)^{※1}が、ネッタイシマカ^{※2}の吸血を停止させる作用を持つことを発見した(図1)。

蚊は、人の体温・匂いや吐く息などに引き寄せられて皮膚に止まり、針を刺すと血を味見してから吸うかどうか決める。その決め手となるのは、血液中のアデノシン三リン酸(ATP)だ。蚊はATPを感知すると、それがシグナルとなって血を吸い始める。

しかし、吸血を開始した蚊は、満腹になる前の腹八分目で吸血を止める。一説には満腹になると動きが鈍くなり危険だからとも言われているが、ATPが吸血を促しているはずなのに、どうして腹八分目で吸血を停止することができるのか、そのメカニズムは謎だった。

佐久間上級研究員らは、ヒトや動物の体内で食中・食後に種々のホルモンが分泌され食べる量を調節するのと同様に、蚊にもある程度満腹になったところで、ストップをかけるシグナルがあるはずだと考え、研究を進め、血液の凝固に関わる物質として知られるFPAが吸血停止シグナルになっていることを突き止めた。

蚊の吸血行動を停止させる仕組みが解明できれば、人為的に蚊の吸血を制御でき、蚊が媒介する危険な感染症を防ぐことにつながると期待されている。

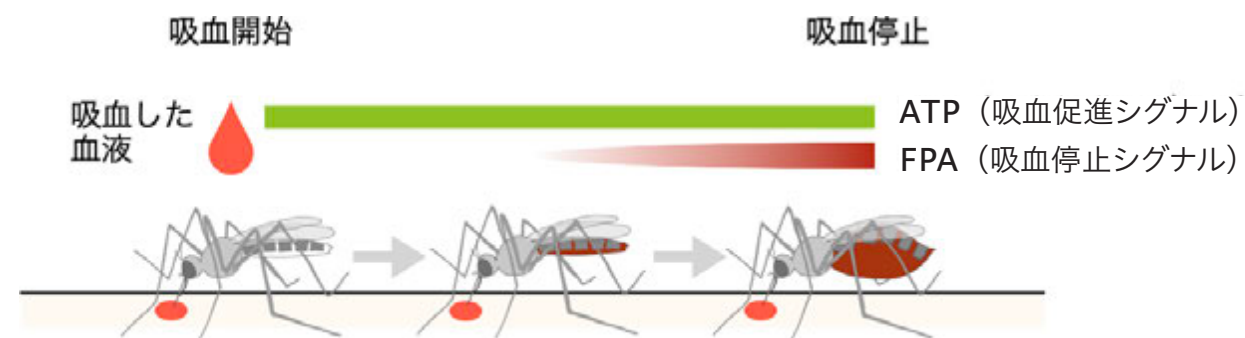


図1 蚊が吸血を停止する仕組み

吸血の進行とともに蚊の体内で吸血停止シグナル FPA が蓄積されて、それによって蚊は吸血を停止する。

蚊の吸血行動は感染症を媒介する

蚊に刺され血を吸われると、皮膚がかゆくなり、そのかゆみはしばらく続く。誰もがこうした煩わしい経験をしていると思うが、蚊の吸血被害はそれだけではない。蚊が人から人へ吸血を行うことで、日本脳炎やマラリア、デング熱などの感染症の病原体をうつす危険性がある。これらの感染症は主に熱帯・亜熱帯地域で流行しているが、日本でも海外との人や物の行き来にともなって流入する可能性がある。また温暖化による気温上昇に伴い、ヒトスジシマカの生息域が日本では北へと徐々に拡大している。こうした蚊による感染症の病原体伝播を防ぐために、蚊の吸血行動の仕組みを理解し、人為的に吸血を抑制する方法を探る研究が進められている。

ネッタイシマカの吸血停止に関わる物質の探索

佐久間上級研究員らの研究グループは、ヤブカの仲間であるネッタイシマカのメスを用いて、吸血停止に関わる物質の探索を進めた。メスを用いるのは吸血を行うのは蚊のメスだからである。

まず、血液中に吸血を停止する物質が含まれているのかを調べるため、マウスの血液と、蚊の吸血を促進するATP溶液を使って、それぞれの吸血行動を比較した。すると、マウスから直接血液を吸血した蚊に比べて、ATP溶液を吸血した蚊の方が、摂取量が多いことが分かった。つまり、血液に含まれる何らかの成分に、蚊の吸血を抑制する働きがあると予想された。さらに、吸血停止は満腹に至る前に起こることから、この物質は、吸血の後半で急速に増加あるいは活性化すると考えられた(図2)。

次に、佐久間上級研究員らは、吸血を抑制する物質を突き止めるために、血液を血清と赤血球に分けて、吸血行動を検証した。血清にはATPがほぼ含まれていないため、血清を単独で与えても蚊は摂取しない。そこでATP溶液に血清を加えて与えた。すると、ATP溶液を単独で与えたときに比べ、満腹になるまで吸血する蚊の割合が顕著に減少した。このことから、血清に吸血停止効果があることが明らかになった(図3)。そこで、血清をさらに高速液体クロマトグラフィー法で区画分け、質量分析計で分析して、吸血停止効果を持つ成分がフィブリノペプチドAであることを突き止めた。フィブリノペプチドAは、血液が凝固するときには作られる物質である。吸血中および吸血後の蚊の体内を調べたところ、吸血完了時にフィブリノペプチドAの量が高く、吸血とともに蚊の体内のフィブリノペプチドA量が増加していることが明らかとなった。

さらに蚊に人工合成したフィブリノペプチドAを加えたATP溶液と、血液凝固を阻害する薬剤(ヘパリン)で処理したマウスの血液を与えたところ、フィブリノペプチドAが存在すると蚊は満腹になる前に吸血を止めるのに対し、フィブリノペプチドAが存在しない血液では吸血が満腹まで促進された。

また、吸血後の蚊の体内を、時間を追って調べたところ、体内で血液が徐々に黒ずみドロリとし始め、最終的に黒い血の塊になることが分かった。

これらの結果から、フィブリノペプチドAが蚊の吸血を止めるシグナルであることが明らかとなった。蚊が吸血を開始すると、宿主の血管から蚊の体内に取り入れられた血液が凝固し始め、フィブリノペプチドAが作られ始める。吸血の進行に伴ってその量は上昇し、あるレベルに到達したことを感知して、蚊が腹八分目で吸血を止めると考えられる。

※1 フィブリノペプチドA (FPA)、フィブリン、フィブリノーゲン

血液の凝固に関わる物質。前駆体タンパク質フィブリノーゲンからフィブリノペプチドA (FPA) が切り出されることにより不安定なフィブリンが作られる。さらにフィブリノペプチドB が切り出されてフィブリン同士が集まることで不溶化し血塊が作られる。FPA は全長が16 アミノ酸から成る短いアミノ酸重合体(ペプチド)。

※2 ネッタイシマカ

吸血性のヤブカ属の一種。学名 Aedes aegypti。熱帯・亜熱帯地域に広く分布し、デング熱やジカ熱などの原因ウイルスを媒介する。



摂取した液体量

人工吸血法で
ATPを摂取



➤ マウスから吸血

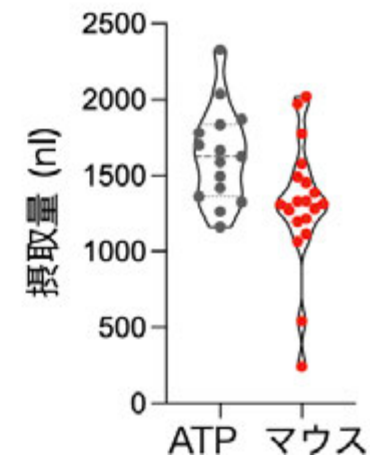


図2 ATP溶液とマウス血液を吸血した際の摂取量の比較

ネッタイシマカは、マウスから直接吸血させたときに比べて、人工吸血法でATP溶液（緑色の液体）を摂取させたときに、より多くの液量を摂取した。グラフ中の点は、実験を行った個体を示す。摂取量の単位nl（ナノリットル）は10億分の1リットル。



※ ATP: アデノシン三リン酸

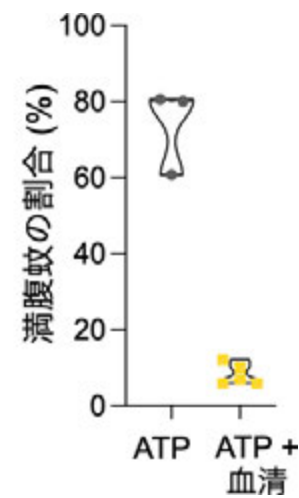


図3 ATP溶液に血清を添加したときの満腹蚊の割合

左) ネッタイシマカの吸血行動におけるATP溶液摂取量の解析。緑色に着色したATP溶液を摂取させることで、満腹（ATP溶液で腹部が膨満）、少量摂取（腹部が着色し部分的に膨張）、未摂取（腹部の着色・膨張なし）の3段階に摂取状態を分類した。
右) ATP溶液の摂取に対する血清の効果。ATP溶液単独の摂取では大半のネッタイシマカは満腹になるが、血清を添加した際は、満腹になる個体の割合が減少する。

蚊が媒介する感染症制御の応用へ期待

本研究から、血液中に蚊の吸血停止シグナルが存在することが明らかとなった。この成果により、血液中に吸血促進シグナルが存在するにも関わらず、蚊が腹八分目で吸血を停止するメカニズムの一端が解明された。

本研究で発見されたフィブリノペプチドAが、蚊の体内でどのように働き、吸血を停止させるのか、さらに詳しいメカニズムが解明されれば、人為的に吸血停止を誘導する手法の開発や、蚊が媒介する感染症制御への応用が期待されます。古くから人々は蚊に刺されないように、蚊帳や殺虫剤などさまざまな工夫をしてきたが、その戦いに新たな戦略が加わった。





グリーン水素の大規模導入に貢献

水電解のための新規イリジウム触媒を開発

高鍋 和広（東京大学 大学院工学系研究科 教授）



「グリーン水素製造用革新的水電解システムの開発」 チームリーダー
(2023-2027)

中村 龍平（理化学研究所 環境資源科学研究センター チームディレクター）



「グリーン水素製造用革新的水電解システムの開発」 グループリーダー
(2023-2027)



グリーン水素製造技術であるPEM型水電解の新規触媒を開発

日本はエネルギーの大半を海外から輸入する化石燃料に頼っており、安全保障の面から、これに代わるエネルギー源の確保が課題となっている。そうした中、次世代エネルギーシステムとして、再生可能エネルギーを利用して製造されたグリーン水素を介したエネルギー供給プロセスが注目されている。水素は利用するときにCO₂を排出しないことから、環境にやさしいエネルギーキャリアであり、再生可能エネルギー発電とうまく組み合わせるとエネルギー安全保障にも役立つ重要なエネルギープロセスの核となる可能性を秘めている。

高鍋和広東京大学大学院工学系研究科教授、中村龍平理化学研究所環境資源科学研究センターチームディレクターらの研究グループは、グリーン水素の製造技術として注目されているプロトン交換膜（PEM）水電解（PEM水電解）^{※1}の課題解決に取り組んできた。

今回、本研究グループはPEM水電解の触媒として、マンガン（Mn）とイリジウムの特異な相互作用を活用することで、高酸化数（+6）を持つ新たなイリジウム触媒として、6価イリジウム酸化物が生成していることを突き止めた。この新規イリジウム触媒は、原子レベルでイリジウムを分散したことにより、高い活性と安定性を維持しつつ、イリジウムの使用量を従来の2～4mgIr/cm²に対して95%以上削減することができた。

本研究では新規イリジウム触媒の生成過程を大型放射光施設「SPring-8」^{※2}で追跡しており、電極触媒の基礎的な理解と水素製造技術の実用化の双方につながる成果となっている。

※ 1 プロトン交換膜（PEM）水電解（PEM水電解）

工業的な水の電気分解を行う方法の1つ。液体状態の水を電気分解するのではなく、固体高分子と呼ばれる膜に水を染み込ませ、その水を分解することが特徴である。膜の両側に電極触媒を塗布することで電極同士を極限まで近づけることにより、電気抵抗が抑制されるだけでなく、反応物の供給も促進され、水素製造効率上がる。

※ 2 大型放射光施設「SPring-8」

兵庫県播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す理化学研究所の実験施設。

※ 3 陽極

正の電圧がかかっている電極を陽極、負の電圧がかかっている電極を陰極と呼ぶ。水の電気分解では、陽極で酸素が、陰極で水素がそれぞれ発生する。

※ 4 貴金属触媒

白金やイリジウムなど、地球上にわずかにしか存在しない貴金属元素を含む触媒。貴金属触媒を使えば、水を効率よく電気分解することが可能であるが、埋蔵量や価格の問題から、水の電気分解を社会全体に普及させるには、より豊富な材料を用いることが必要である。

腐食性の高いイリジウム触媒の使用量削減が課題

再生エネを利用した水の電気分解（水電解：2H₂O → 2H₂ + O₂）は、二酸化炭素を排出しない環境負荷の低い水素製造技術として注目されている。中でも、負荷変動追従性の高いPEM水電解は、太陽光発電など、発電量が変動する再生可能エネルギーによるグリーン水素製造に適した技術として注目されている。しかし、酸素が発生する陽極^{※3}は高電位と強酸性環境にさらされるため、活性と安定性を兼ね備えた貴金属触媒^{※4}として酸化イリジウム（IrO₂）が使われている。

イリジウムの原子利用効率は低く、現在のPEM水電解では、1キロワット当たり、おおよそ1グラムのイリジウムが必要となる。一方、イリジウムは世界の年間生産量が7～8トン。2050年までにカーボンニュートラル^{※5}を達成するためには、おおよそ2000ギガワット（1ギガワットは10億ワット）程度の電解槽設置規模が必要であり、これはPEM水電解のみで操業した時の150年分以上のイリジウム生産量に相当する。そのため、イリジウムの希少性の課題を解消するためには、イリジウム使用量の大幅な削減が急務であった。

これまでの知見を活かし新規触媒の合成

本研究グループはこれまで、PEM水電解の触媒材料として酸化マンガン（MnO₂）を開発してきた。この過程で、酸化マンガンがイリジウムを特異的に吸着し、その結果得られる材料に優れた酸素発生触媒活性があることを発見した（図1A）。この知見を踏まえ、本研究では、新たな触媒材料の電子状態と構造解析に挑戦した。

まずMnO₂電極を、電析法^{※6}で作製し、得られた電極（MnO₂/PTL）をK₂IrCl₆前駆体溶液に95度で6時間以上浸漬した（図1BのIr吸着過程）。その後、450度で焼成することで新たな触媒材料を合成した（図1Bの熱処理過程）。合成過程において、MnO₂の表面にイリジウムが吸着されたと同時に、K₂IrCl₆と酸化マンガンの配位子交換反応が進行した。

具体的には、大型放射光施設「SPring-8」においてX線吸収分光法（XAS）^{※7}を行い、イリジウムのX線吸収スペクトルを測定した結果、高エネルギー側にシフトしたL₃吸収端（図1C）から、イリジウム原子が酸化されていることがわかった。また、隣接配位子への結合距離の短縮（図1D）から、イリジウムの配位子^{※8}が塩化物イオンから酸化物イオンに交換されたことが明らかとなった。

以上の合成手法で得られた触媒の状態を評価したところ、合成した触媒が原子状に分散された+6価のイリジウム酸化物（atomically-dispersed oxide）であることが分かったため、新規触媒はIr^{VI}-*ado*触媒と名付けられた。

※ 5 カーボンニュートラル

現在の産業活動では二酸化炭素などの温室効果ガスが排出されている。これらの排出量を抑制し、植林などによる温室効果ガスの吸収量が釣り合った状態、すなわち人類活動から排出される温室効果ガスの正味量を実質的にゼロにした状態をカーボンニュートラルと呼ぶ。

※ 6 電析法

電圧を印加することで固体材料を析出させる手法。今回はマンガン（Mn）イオンを含む水溶液に電圧を印加することで、ガンマ型酸化マンガン析出させた。

※ 7 X線吸収分光法（XAS）

物質の電子状態や局所構造を求める手法。測定対象となる物質は、気体、固体、液体、溶液などと幅広い。測定精度を高めるため、強力なX線が得られるシンクロトロン放射光施設を光源として行われる場合が多い。

※ 8 配位子

中心原子に結合しているイオンまたは分子などを総称して配位子と呼ぶ。



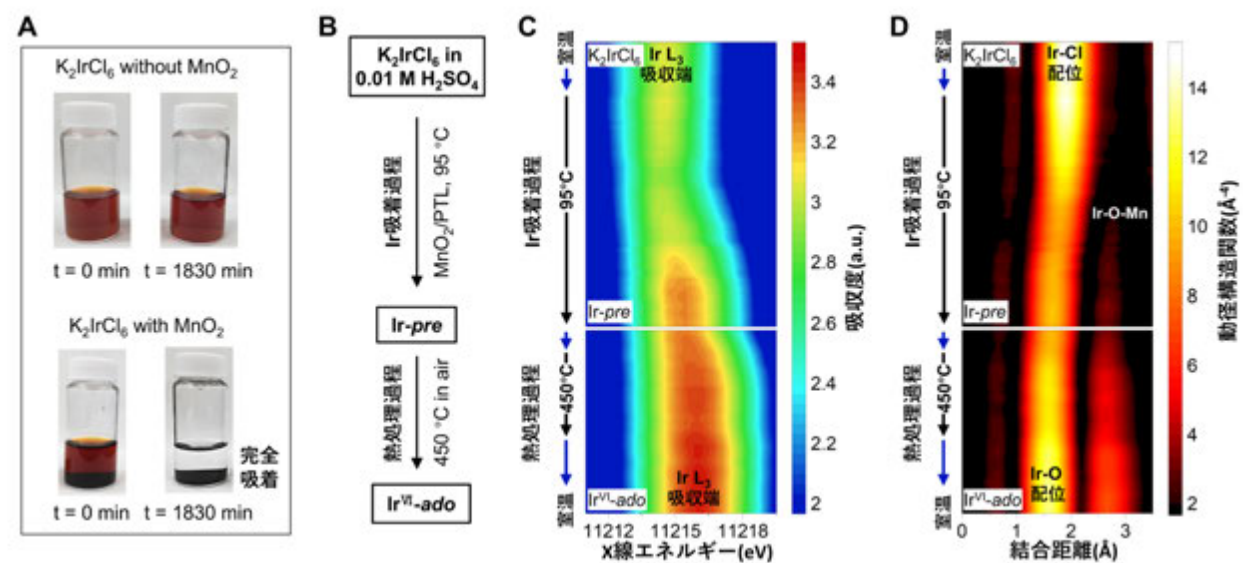


図1 新規イリジウム触媒 (Ir^{VI}-ado 触媒) の合成および X 線吸収分光法 (XAS) 解析

- (A) 酸化マンガン (MnO₂) がイリジウムを吸着する様子。MnO₂ 共存下では、K₂IrCl₆ 由来の赤褐色な溶液が無色透明に変化した(下)。
- (B) Ir^{VI}-ado 触媒の合成過程は、電析法で作製した (MnO₂/PTL) 電極を K₂IrCl₆ 前駆体溶液に 95 度で 6 時間以上浸漬 (しんせき) する Ir 吸着過程と、その後 450 度で焼成する熱処理過程から成る。
- (C) Ir L₃ 吸収端の X 線吸収スペクトルの経時変化を示した 2 次元カラーマップ。L₃ 吸収端が高エネルギー側にシフトしたため、Ir の酸化数が高くなったことがわかる。
- (D) Ir L₃ 吸収端の動径構造関数の経時変化を示した 2 次元カラーマップ。結合距離の短縮から、Ir の配位子が塩化物イオンから酸化物イオンに交換されたことがわかる。
- (C) および (D) の左側に示されている青矢印は加熱もしくは冷却プロセスを表し、黒矢印は定温プロセスを表す。

2050年カーボンニュートラル実現に期待

本研究で開発された高酸化数 (+6) を持つ新規イリジウム触媒は、イリジウム使用量を 95% 以上削減 (2~4 mg Ir/cm² から 0.02~0.08 mg Ir/cm²) できるとともに、活性と安定性の両側面において優れた性能を発揮する。これは、PEM 型水電解を展開する上で課題だった貴金属使用量を軽減し、2050 年までに温室効果ガスの排出量を全体として実質ゼロにすることを目標とする 2050 年カーボンニュートラルの実現に大きく貢献することが期待される。





細胞移植医療の社会実装へ大きく前進

細胞培養を自動化するヒューマノイドロボット用の クリーンルームユニットを開発

高橋 恒一（理化学研究所 生命機能科学研究センター チームリーダー）



探索加速型「共通基盤」領域「ロボティックバイオロジーによる生命科学の加速」
研究開発代表者（探索：2018-2020、本格：2020-2024）

高橋 政代（神戸市立神戸アイセンター病院 顧問）



探索加速型「共通基盤」領域「ロボティックバイオロジーによる生命科学の加速」
主たる共同研究者（本格：2020-2024）



ロボット用細胞培養加工施設(R-CPF)を世界で初めて開発

生命科学実験プロセスを自動化する研究を進めてきた本研究グループは、これまでにヒューマノイドロボットと人工知能(AI)を組み合わせた新しい生命科学のありかたを開発・実証してきた。例えばこれまでに、人間の介在なしにiPS細胞(人工多能性幹細胞)^{※1}から網膜色素上皮細胞(RPE細胞)^{※2}を効率的に作成させることに成功している。

今回、このヒューマノイドロボットを実際の網膜再生医療の臨床研究で利用するために、移植用の細胞を調整に必要とされる実験空間の清浄度の条件をクリアしたロボット用細胞培養加工施設^{※3}(R-CPF: Robotic Cell Processing Facility)を世界で初めて開発した(図1)。

ヒューマノイドロボットの臨床現場での活用は、再生医療の大幅な進展に寄与するものと期待される。

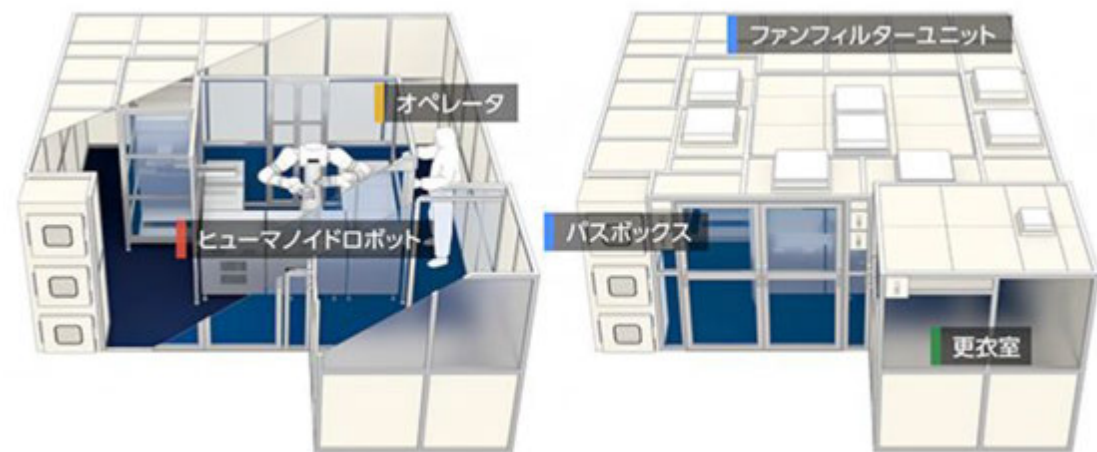


図1 ロボット用細胞培養加工施設(R-CPF)の全体像

※1 iPS細胞(人工多能性幹細胞)

成人の皮膚細胞などの体細胞にOct3、Sox2、Klf4遺伝子などを導入して初期化し多能性を持たせ、人工的に作製した多能性幹細胞(体を構成する、すべての組織細胞や生殖細胞に分化できる、未分化な幹細胞)。

※2 網膜色素上皮細胞(RPE細胞)

網膜を構成する細胞の1つ。理化学研究所や神戸市立神戸アイセンター病院などにより、iPS細胞由来RPE(retinal pigment epithelium)細胞を用いた再生医療の臨床研究が行われている。

※3 細胞培養加工施設(Cell Processing Facility: CPF)

細胞を培養するために必要な清浄度が保たれている専用のクリーンルーム。

細胞製造工程の自動化を実現するための課題

細胞培養など生命科学の実験では、単純作業に多くの労力と時間が費やされる。また、作業をする人によって作業のスピードや手技の熟練度が異なるため、生産性や再現性にばらつきが出るなどの課題があった。これらの課題を解決するために、本研究グループは、ロボットとAIを使って生命科学系実験の完全自動化を目指して、ヒューマノイドロボットを用いた実験自動化の研究を進めてきた。

一方、このロボットを再生医療の臨床現場で実際に用いるためには、細胞製造工程を無菌環境に保つことが求められる。人間が手動で細胞の製造や調整をする場合には、細胞培養加工施設(CPF: Cell Processing Facility)と呼ばれる清浄度の高い施設で行われるが、ロボット用に無菌環境を実現した施設はこれまでになかった。

細胞調整の自動化を無菌環境で行える施設を開発

本研究では、高精度な生命科学実験動作が可能な汎用ヒト型ロボットLabDroid「まほろ」^{※4}と、コンパクトなクリーンルームユニットAll-in-One CP Unit^{※5}を組み合わせたシステムを設計し、臨床研究に必要な清浄度レベルでの細胞調製の自動化に取り組んだ。

まず本研究グループは、R-CPFの施設のレイアウトを検討して、ロボットが細胞を直接操作するロボットエリアと、それを囲う形で、オペレータがロボットを操作するエリア、オペレータエリアへ通じる更衣室の3つのエリア構造とした(図2左)。それぞれのエリアの清浄度レベルは、日本再生医療学会の「再生医療等安全性確保法における細胞培養加工施設での無菌操作に関する考え方」に記載の構造設備基準を参考に(図2中)、無菌操作区域であるロボットエリアは清浄度レベル グレードA、清浄度管理区域のオペレータエリアは清浄度レベル グレードB、清浄度管理区域の更衣室を清浄度レベル グレードCと設定し、これらの基準を達成するための換気設備(ファンフィルターユニット:FFU)を設置した。

次に、レイアウトした施設が必要な清浄度を達成できる空調環境となっているかを、コンピュータにより検証した(図2右)。その結果、各エリアにおいて、清浄度の基準を達成することが予測できた。

こうした検証を経て、本研究グループは神戸市立神戸アイセンター病院にR-CPFを設置した。実際にロボットを使って細胞培養を行い、各エリアの清浄度レベルが達成されているかを、R-CPF内外の33地点で浮遊菌、落下菌、表面付着菌のモニタリングを実施、検証した(図3)。同時に本施設はこれまでのCPFと異なるため、清浄度に影響を与えるオペレータの動線や作業手順(SOP: Standard Operating Procedure)を検討した。その結果、全ての地点で清浄度レベルを満たしていることを確認し、モニタリング方法を含むSOPも確立した。

さらに、過去の臨床研究で使用されたものと同じ細胞、同じプロトコル、人間の作業者と同一操作に相当するロボットの動作、同じ細胞の品質管理試験で、iPS細胞の培養を10日間行ったところ、全ての地点における清浄度レベルが基準値内と判定された。これらの結果から、R-CPFが臨床研究において細胞調製に利用可能であることが実証された。

※4 汎用ヒト型ロボットLabDroid「まほろ」

ロボティック・バイオロジー・インスティテュート株式会社(株式会社安川電機の子会社)により開発された生命科学実験用のヒューマノイドロボットシステム。株式会社安川電機の産業用7軸双腕ロボットの周辺に、人間が実験で用いるものと同じ実験器具を配置している。ビペット操作やインキュベーターの扉の開け閉めなど、人間が手で行っていた実験操作がロボットでも実行可能になった。

※5 All-in-One CP Unit

ダイダゲン株式会社により開発されたクリーンルームユニット。細胞培養加工施設に求められる更衣室や細胞調製室などの機能をユニット化することで省スペースに簡易に設置が可能。



WEB <https://www.jst.go.jp/seika/bt2025-11.html>

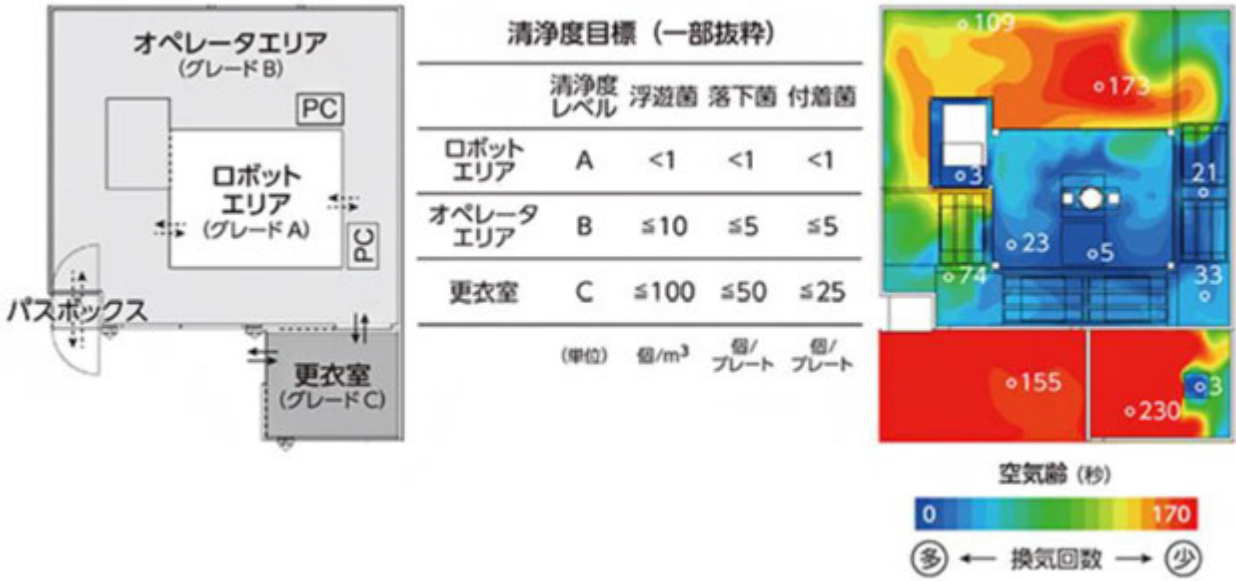


図2 R-CPFのレイアウトと空調シミュレーション
(左)施設の平面図。ロボットエリア、オペレータエリア、更衣室により構成される。実線の矢印は人の動線を示し、点線矢印は細胞・試薬・消耗品などの動線を示す。ロボットは正面が下側になるように設置。施設の清浄度レベルはロボットエリアがグレードA、オペレータエリアがグレードB、更衣室がグレードCに設定された。
(中)清浄度レベルの目標値。日本再生医療学会の「再生医療等安全性確保法における細胞培養加工施設での無菌操作に関する考え方」から抜粋。菌の個数は、培地上でコロニーを形成できた数(Colony Forming Unit:CFU)として測定した。
(右)気流の数値流体力学(CFD)シミュレーション結果。床からの高さ1m地点における空気齢(単位は秒)。無菌操作等区域であるロボットエリアは、ロボット背面を含めて空気齢の値が小さく(ヒートマップの寒色系で表現)、この空間が頻繁に換気されていることを示す。



図3 浮遊菌、落下菌、表面付着菌のモニタリングポイント
R-CPF内外の33地点において浮遊菌・落下菌・表面付着菌のモニタリングを実施した。表面付着菌の検出はスタンプ法(寒天培地に表面を接触させる方法)とスワブ法(表面を拭いとる方法)の2種類を用いた。

高速・高感度に加え、低コストの自動検出装置を目指す

本研究の成果は、これまで作業環境が整わず実現できなかった臨床研究での細胞培養工程におけるロボットの導入を可能とした。これにより、これまで人の手で行われていた研究工程の単純作業の負担軽減、作業者の手技などの教育コストの低減、作業の再現性の向上につながる。その結果、再生医療・細胞治療コストの低減が期待できる。

また、基礎研究の成果を臨床研究に応用する場合、研究成果の各工程の担当者が異なる場合が多く、技術面で基礎から臨床への橋渡しがうまく進まない場合もある。本研究でR-CPFに用いたロボットは、基礎研究で用いているものと同じヒューマノイドロボットを採用しているため、基礎研究でロボットが発見・確立した培養条件をそのまま臨床現場で実行することができる。そのため、人間を介した技術移転の必要がなくなり、基礎研究から臨床研究への橋渡しが容易となる。今後、AIとロボットによる生命科学実験の自動化を促進させ、再生医療の治療開発をさらに加速させることが期待できる。





次世代情報通信インフラを担う超高速磁気デバイス実現に道

高周波でも安定なスピントルクダイオード効果を発見

中辻 知（東京大学 大学院理学系研究科 教授）



大規模プロジェクト型「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」研究開発代表者（2020-2029）

カイラル反強磁性体を用いて新たな高周波スピントルクダイオード効果を発見

中辻知東京大学大学院理学系研究科教授を研究代表者とする研究グループは、次世代の情報通信を担う超高速磁気デバイスを実現する基盤技術に取り組んでおり、これまでにカイラル反強磁性体^{※1}のトポロジカル物性^{※2}を活かした超高速・低消費電力の磁気シフトレジスタなどの成果をあげている。

今回、研究グループはカイラル反強磁性体を採用することで、従来の強磁性体^{※3}よりも高い周波数で安定動作が可能なスピントルクダイオード効果^{※4}を発見した。カイラル反強磁性体のマンガン化合物^{※5}を厚さ10ナノメートル（ナノ：10億分の1）以下まで薄くし、マイクロ波電流を印加すると直流電圧が出現した（図1）。交流電流が直流電圧を生む現象はダイオード効果と呼ばれ、半導体を使った整流ダイオードが普及している。これに対し、スピントルクダイオード効果では、電子スピンの首振り（歳差）運動が整流効果を生み出し、半導体ダイオードと同様の効果をもたらす。

これまで強磁性体を用いたスピントルクダイオードでは、周波数が高くなるのに反比例して信号（電圧）の強さが急激に減少するという問題があった。これに対し、カイラル反強磁性体を採用したスピントルクダイオードでは、交換相互作用^{※6}という高いエネルギーが顕在化する反強磁性体の特性により、周波数が高くなっても強磁性体に対して10～100倍ほどの信号の強度を安定して維持できるダイオード効果を確認した。この新しいスピントルクダイオードの実現により、次世代のスピントロニクスと高速通信の発展につながると期待される。

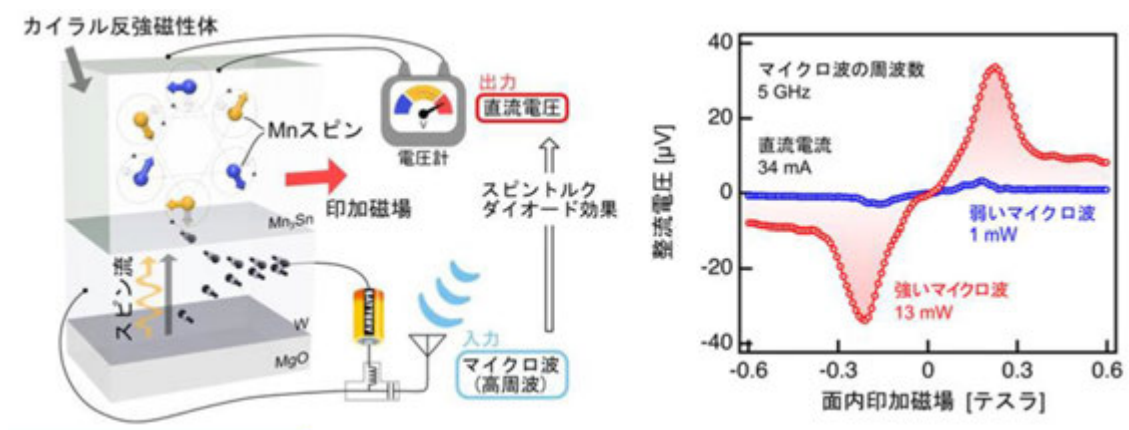


図1 研究内容の模式図（左）と得られた整流電圧信号（右）

- （左）マンガン合金とタングステンとの二層膜に直流電流とマイクロ波電流を印加すると、マイクロ波の印加に応じた横方向の直流電圧が現れる。
- （右）実際のデータ。マイクロ波を印加すると、マイクロ波のパワーに比例した特徴的なピーク構造を持つ電圧信号が現れる。

※1 反強磁性体・カイラル反強磁性体

反強磁性体は、隣り合う原子ごとに電子スピンの逆方向にそろった物質。これによりスピンの打ち消し合い、ほとんど磁場を生成しない。反強磁性体にはマンガン酸化物やニッケル酸化物などがある。カイラル（らせん状）反強磁性体は、隣り合う原子のスピンの向きが異なる方向を向いているながらも、いくつかのスピンの作用しあうことで全体としてスピンの打ち消し合いがなくなり、ほとんど磁場を生成しない。

※2 トポロジカル物性

物体への連続変形に対する不変な性質を研究する数理分野をトポロジーという。トポロジカル物質とは、トポロジーにより電子状態が特徴づけられる物質のことであり、その性質をトポロジカル物性と呼ぶ。

※3 強磁性体

電子スピンの向きが原子ごとに同じ方向にそろい、強い磁場を生成する物質。磁石や磁石にくっつく物質。強磁性体には鉄、コバルト、ニッケルなどがある。

次世代超高速磁気デバイス実現の基礎技術として

近年、インターネットの普及による社会のIT化は著しく、爆発的に増加する情報を低消費電力で処理するための新たなデバイスが求められている。これまでの半導体を中心としたエレクトロニクスは、電子の電気的な性質を巧みに利用することで発展してきた。これに対し、近年では、電子スピンと呼ばれる磁石の性質を活用するスピントロニクスの研究が盛んに行われており、データの維持に電力を必要としない不揮発性メモリとして強磁性体を用いたMRAM（磁気抵抗メモリ）の実用化が進んでいる。このMRAMのさらなる高速化・高密度化につながる次世代技術として大きく注目を集めているのが反強磁性体の活用である。

従来のスピントロニクスでは磁化の大きさに比例して電気や光などに大きな応答を示す強磁性体が活用されてきた。例えば、強磁性体で絶縁体を挟んだ磁気トンネル接合^{※7}素子において、マイクロ波電流を印加すると直流電圧が発生する「スピントルクダイオード効果」が広く知られている。しかし、強磁性体を用いた場合、ダイオード信号の強さは周波数が高くなるとそれに反比例して大幅に減少するという問題があった。

反強磁性体を用いたデバイスで高周波スピントルクダイオード効果が発現

研究チームは、高周波数でのダイオード信号の減衰を解決するため反強磁性体に着目した。反強磁性体では、交換相互作用という高いエネルギーが顕在化するため、強磁性体に比べ格段に大きな共鳴周波数を持ち、高い周波数帯においても安定したダイオード動作が期待されていた。一方で、反強磁性体は磁化がないため、強磁性体のような大きな応答が得られないのが課題だった。

本研究では、カイラル反強磁性体であるマンガン・スズ合金（ Mn_3Sn ）を用いた。この物質は特殊な（トポロジカルな）電子構造から反強磁性体にもかかわらず強磁性体のような応答を示すため、低消費不揮発メモリ、光電融合や熱電変換センサーなど、近年さまざまな分野で注目を集めている。研究チームは、まずマンガン・スズ合金薄膜をタングステン薄膜の上に作製し、厚みを7ナノメートルという極限まで薄くした。この二層膜に電流を流すと、タングステン層において電流がスピンの流れであるスピン流に変換されてマンガン・スズ合金中に注入され、スピンの運動が誘起される。次に、作製した薄膜をデバイスに加工し、磁場をかけながら5ギガヘルツ（GHz）のマイクロ波電流と直流電流を同時に印加する実験を行った。すると、マイクロ波電流の印加に応じて、パワーに比例する特徴的なピーク構造を持つ直流電圧が現れることを発見した（図1右）。この結果は、反強磁性体を用いたデバイスでもスピントルクダイオード効果が発現したことを示している。さらに、印加するマイクロ波の周波数を30ギガヘルツまで変えながら実験を行い、ピークの大きさがその範囲でほとんど変化しないことを見いだした（図2）。この振る舞いは、強磁性体におけるダイオード信号が周波数に反比例して減少することと本質的に異なる現象である。

この振る舞いを理解するため、反強磁性体に特有の交換相互作用を考慮した詳細な数値シミュレーションを行った。シミュレーションは実験結果を美しく再現し、直流電流が駆動するスピンの運動が磁場によって抑制される際に、効率的にマイクロ波と相互作用して整流作用を生み出すことがわかった。これにより、実験で観測された周波数に対し安定な動作が、強い交換相互作用によるものであることが明らかになった。

※4 スピントルクダイオード効果

強磁性体 / 絶縁体 / 強磁性体からなる磁気トンネル接合にマイクロ波電流を印加すると、交流電圧が整流され直流の電圧が生じる。周波数可変性や感度において半導体ダイオードを大きく上回る可能性を秘めている。

※5 マンガン化合物

今回研究に使用したマンガン化合物（マンガン・スズ合金： Mn_3Sn ）は、マンガン原子がカゴメ格子状に並んでおり、各マンガン原子の磁気モーメントが120度ずつ回転しながら配置されている。このマンガン化合物は、磁石の性質を持たないにもかかわらず、強磁性体と同等程度に大きな外場応答を示すことが知られ、注目されている。

※6 交換相互作用

隣り合う原子のスピンを平行あるいは反平行に揃えようとするエネルギーのこと。

※7 磁気トンネル接合

2つの磁性層の間に薄い絶縁層を挟んだ構造。磁性層のスピンの向きが同じか反対かによって、電子が絶縁層を通過しやすくなるかどうかが変わり、電気抵抗が大きく変化する。この特性を利用して、情報を記録する磁気メモリや磁場を感知するセンサーに応用されている。



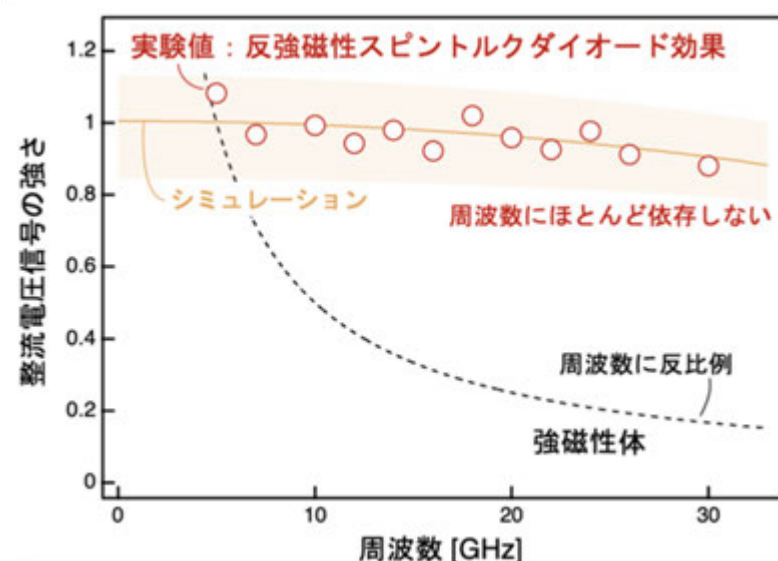


図 2 反強磁性体と強磁性体の整流効果の違い

Beyond 5G超高速磁気デバイスの実現に道

本研究成果は、高周波電流を直流電圧に変換する「スピントルクダイオード効果」を反強磁性体で初めて実証した。反強磁性体を用いることで、これまでにない広い周波数範囲での動作が可能となった。これにより、スピントルクダイオードはテラヘルツ (THz) 波に至る高周波数領域での応用が見込まれ、次世代スピントロニクス、次世代通信技術であるBeyond 5G^{※8}の発展に貢献することが期待される。また、本研究で使われたマンガン・スズ合金は、そのトポロジカルな電子構造から、低消費電力・高速動作する不揮発メモリ・光電変換素子への応用も見込まれており、AIやデータ利活用によって増大する電力消費の問題へも貢献が期待されている。

※ 8 Beyond 5G
5Gに続く、2030年代に導入される次世代の情報通信インフラ（6G）。





光格子時計の高精度化に必須の連続原子源を開発

交差する光ベルトコンベアで 原子の運動方向を変えて輸送

香取 秀俊（東京大学 大学院工学系研究科 教授）



大規模プロジェクト型「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」研究開発代表者（2018-2027）

世界初のレーザー冷却と量子計測を同時に行う連続原子源

香取秀俊東京大学大学院工学系研究科教授を研究開発代表者とする研究チームは、レーザー冷却された原子を光ベルトコンベアで引き出し、さらに交差する光ベルトコンベアに原子を乗せ換えて出力する連続原子源を世界で初めて開発した。本技術は、香取教授が2001年に発明した光格子時計の精度をさらに向上させ、次世代通信システムの実現や衛星測位システム（GNSS）に代わる高精度測位システムなどの革新技术に貢献することが期待される。

レーザー冷却法は、量子センシング、量子コンピューティングなどにおける量子計測に欠かせない極低温原子を生成する手法である。しかし、冷却の過程で発生する光が原子の量子状態を乱すことから、レーザー冷却と量子計測を同時に行うことはできなかった。研究チームは、原子のベルトコンベアの働きをする移動光格子^{※1}を使って、レーザー冷却された極低温のストロンチウム原子を引き出し、第二の光ベルトコンベアに原子を移して直交する方向に輸送する技術を開発した。これによりレーザー冷却部で発生した光のみを衝立で遮ることができ、第二の光ベルトコンベアの領域では高精度な量子計測を連続して行うことが可能になった（図1）。これは「無駄時間なし測定^{※2}」と呼ばれる高精度な量子計測手法の導入を可能にするものであり、光格子時計^{※3}の飛躍的な精度向上につながる技術となる。

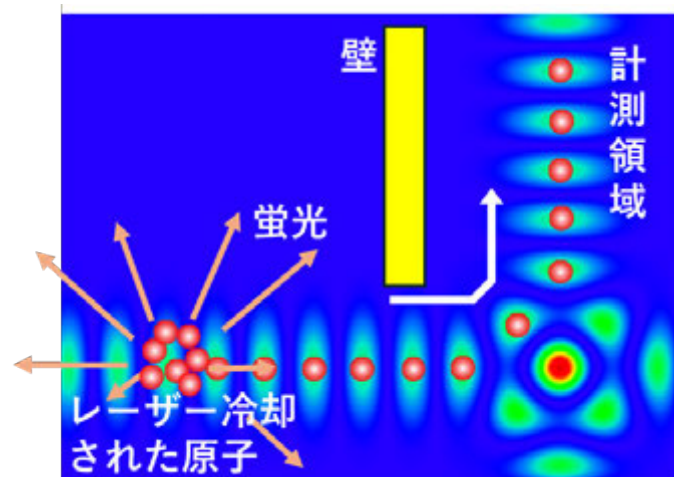


図1 実験の模式図

第一のベルトコンベアでレーザー冷却された原子を右方向に引き出し、第二のベルトコンベアで原子を上方向に輸送する（白抜き矢印は、原子の運動の方向）。第二のベルトコンベア中の原子はレーザー冷却で発生する光の影響を受けないため、高精度な量子計測を実現できる。

※1 移動光格子

周波数（波長）が等しい2本のレーザービームを対向させると、レーザー光は干渉して定在波（波形がその場に止まって振動しているようにみえる波）を作る。定在波では、光強度が極大になる「腹」と極小になる「節」が半波長ごとに形成される。レーザー光の周波数を原子の共鳴周波数より低くすると、定在波の腹の位置に原子を周期的に閉じ込める光格子ができる。その後、2本のレーザー光にわずかに周波数差をつけると、周波数差に比例する速度で定在波の腹の位置が移動する。これにより、光格子に閉じ込められた原子を移動させることができる。

※2 無駄時間なし測定

測定時間を Δt とすると、周波数の測定精度 $\Delta \nu$ は $\Delta \nu = 1 / \Delta t$ で向上する。長時間 Δt にわたって、レーザー光の周波数を原子の共鳴周波数と比較することで、より高精度にレーザーの周波数を測定できる。

※3 光格子時計

「魔法波長」^{※4}と呼ばれる特別な波長の光格子に捕獲した多数の原子を参照し、高精度な光周波数の基準を実現する原子時計の手法。

※4 魔法波長

特定の波長のレーザー光を使って原子を閉じ込めると、原子が吸収する光の振動数は閉じ込めによる影響を受けない。このような波長を魔法波長と呼ぶ。

光格子時計の高精度化・小型軽量化に必須の「連続原子源」

光格子時計は、2001年に香取教授によって発明され、2002年からJSTのさががけ、CREST、ERATO、未来社会創造事業が支援してきた。その間、光格子時計の精度は、現行で最も精度の高いセシウム原子時計の約1000倍に相当する小数点以下18桁（2014年時点）にまで達している。その精度は300億年で1秒しか狂わない。

この光格子時計のさらなる高精度化のために必須の技術が「連続原子源」の開発である。レーザー冷却され光格子に閉じ込められた極低温原子は、原子の熱運動に由来するドップラー効果^{※5}が抑制されて長いコヒーレンス時間^{※6}をもつため、光格子時計などの量子計測の分野で重要な役割を果たす。ところが、レーザー冷却の過程で発生する光は、被測定原子の量子状態を乱すため、レーザー冷却と量子計測を同時に行うことが困難だった。

そのため、レーザー冷却と量子計測の操作を時間的に区切って2つの操作を交互に繰り返す測定が行われてきた。つまり、レーザー冷却している間は「無駄時間」となるため高精度化の足かせとなっていた。「無駄時間」を挟まずに連続して観測する「無駄時間なし測定」が可能となれば、量子計測の飛躍的な高精度化が期待されていた。

「連続原子源」の開発で「無駄時間なし測定」を実現

本研究で取り組んだレーザー冷却された原子を、交差する2つの光ベルトコンベアで原子を乗せ換えて出力する連続原子源の開発は、「無駄時間なし測定」を可能にするための不可欠な技術要素となる。

その実験セットアップが図2である。最初のステップでは、棒磁石などで作られる異方性の大きな四重極磁場中で、磁気光学トラップによってストロンチウム原子を1ミリK（ケルビン）程度までレーザー冷却して捕獲する。この冷却サイクルを繰り返す間に、原子は約100秒の寿命をもつ準安定状態になる。この状態の原子は磁気モーメントをもつため、四重極磁場により捕捉される（図3）。

第2のステップでは、原子をレーザー光でさらに10マイクロK程度まで冷却し、光格子に捕獲する。この2段階冷却により熱原子を連続的に冷却し、光格子に捕獲することができる。

今回の研究では、移動光格子を原子のベルトコンベアとして使い、レーザー冷却された極低温原子を連続的に引き出し、交差する移動光格子に乗り換えることで、原子の運動方向を変えることに成功した。レーザー冷却部から運ばれてきた極低温原子が直交する移動光格子に乗り換えて、運動の向きを変える様子を図4（左）に示す。この交差領域では、直交する移動光格子の干渉で形成される「斜め45度の方向に動く」移動光格子に捕獲されて原子が移動する様子が観測されている。

こうした移動光格子に捕獲された原子に対して、原子の進行方向からレーザーを導入し、原子分光を行う縦励起分光法と、これを利用した「無駄時間なし測定制御」による光格子時計の高精度化の手法が提案されている。本研究成果は、この縦励起分光法を実装して光格子時計の高精度化・小型・軽量化、安定動作を図るための重要な技術基盤となる。

※5 ドップラー効果

運動する物体が波源に近づく（遠ざかる）ときには、振動の周波数を高く（低く）観測する。このような物体の運動に起因する振動数の変化がドップラー効果。原子は熱運動によりさまざまな速度をもつため、ドップラー効果によりスペクトルが広がり、分光精度が低下する。レーザー冷却によりドップラー効果を低減できるが、完全には除去できない。光格子時計では、原子を光格子に捕獲し、原子の運動を量子化（離散化）することで除去する。

※6 コヒーレンス時間

擾乱を受けずに量子状態が時間発展できる時間をコヒーレンス時間という。周囲の環境からの擾乱を受けるとコヒーレンス時間は短くなり、量子計測の精度が低下する。



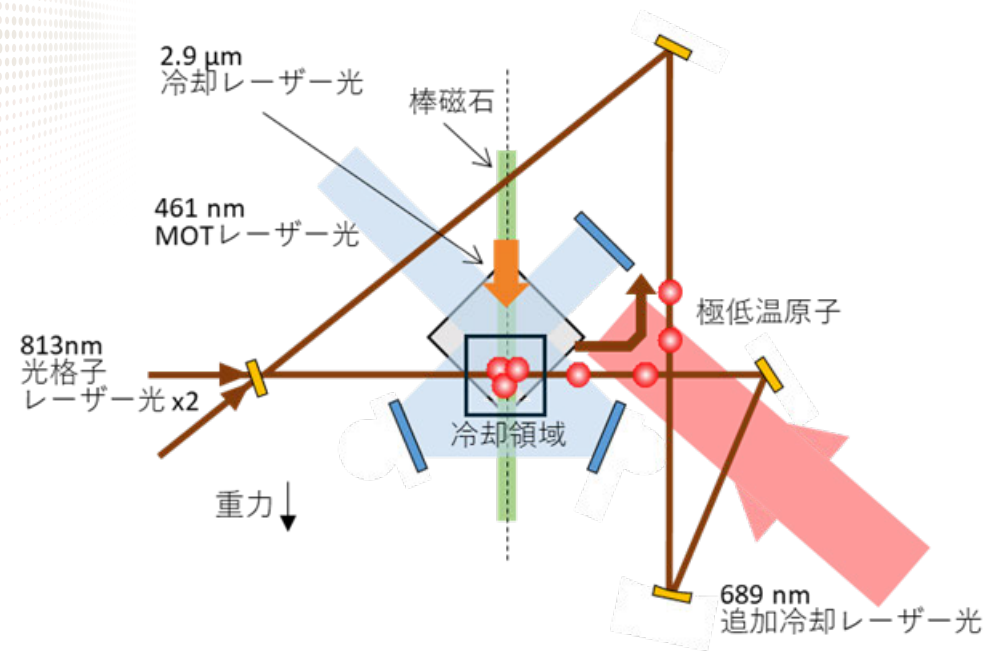


図2 実験のセットアップ

棒磁石などで作られた異方性の強い四重極磁場中で、原子はレーザー冷却、磁気光学トラップされる。この磁気光学トラップの過程で、原子は磁気モーメントをもつ準安定状態に緩和し、四重極磁場によって磁気トラップされる。この磁気トラップ中で、狭線幅の遷移を使って原子のレーザー冷却を行う。原子は重力とレーザー冷却光の輻射圧により約5ミリメートル程度下方に移動する。この原子を移動光格子で引き出し、さらに交差する移動光格子に載せて運動の方向を変えた。

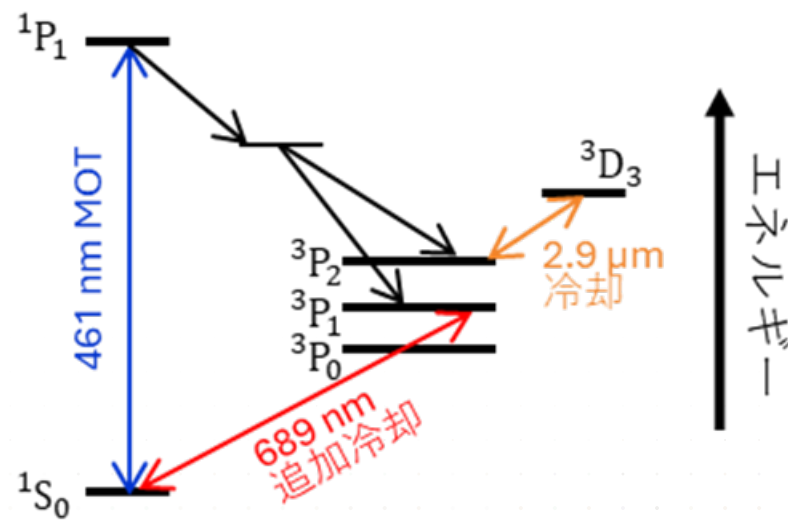


図3 ストロンチウムのエネルギー準位図

基底状態 ($1S_0$) からの遷移 (波長 461 ナノメートル) を使って磁気光学トラップを行う。約 10 万回の光の吸収・放出を繰り返すと、原子は準安定状態に緩和し、磁気トラップされる。この原子をさらにレーザー冷却 (波長 2.9 マイクロメートル) し、光格子に捕獲する。

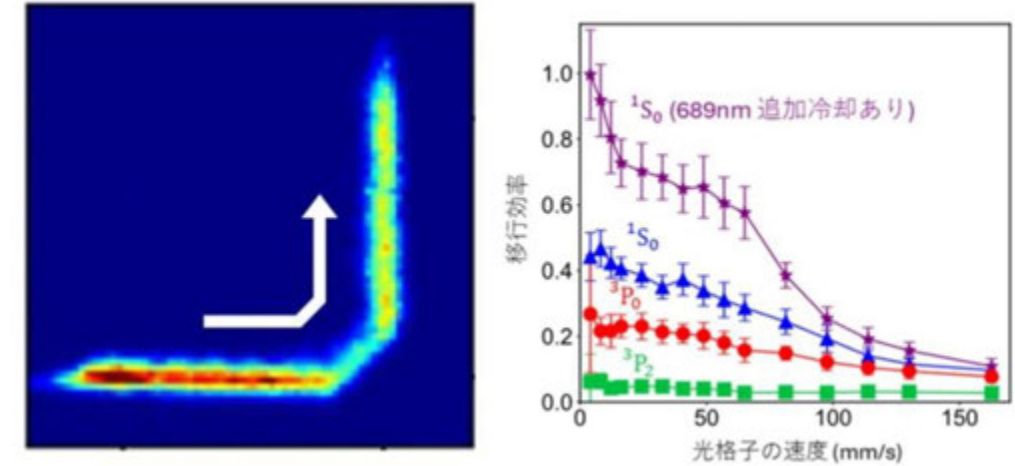


図4 移動光格子で輸送され、運動方向を変える極低温原子 (左) と直交する移動光格子間の移行効率の速度依存性、電子状態依存性 (右)

右のグラフは、2本の移動光格子間での原子の移行効率の速度依存性を示す。移動速度が低いほど移行効率が向上する。特に、交差領域でレーザー冷却を行うことで、移行効率は100%近くまで向上した。

光格子時計は2025年度にも商用化へ

光格子時計は2025年度にも商用機が市場投入される計画だが、地球上の多地点に設置して長距離間で時間を共有する配信技術を確認して超高精度時間インフラを広く社会に提供することにより、次世代通信システムやGPSに替わる高精度測位システムなどにも活用されるようになるだろう。実際に、2022年に情報通信研究機構が光格子時計を用いた標準時の生成に成功している。また、国際度量衡委員会により2030年までに予定されている1秒の定義の変更においても、光格子時計は有力な候補にのぼっている。

こうした光格子時計の社会実装に向けて、今回の研究成果によるさらなる高精度化が期待されている。





誤り耐性型汎用光量子コンピュータ実現に大きな一歩

「誤り耐性」に必要な GKP 論理量子ビットを光で生成

古澤 明 (東京大学 大学院工学系研究科 教授／理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 副センター長)



ムーンショット目標 6：2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現
「誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発」 プロジェクトマネージャー (2020-2025)

GKP量子ビットを世界で初めて光で生成

古澤明東京大学大学院工学系研究科教授・理化学研究所量子コンピュータ研究センター副センター長を研究代表者とする研究グループは、光方式の誤り耐性型大規模量子コンピュータ^{※1}の開発・実用化に取り組んでいる。その一環として、2024年1月に、伝搬する光の論理量子ビット^{※2}として GKP量子ビット^{※3}を世界で初めて生成したと発表した。

量子コンピュータの特性として、「誤り(計算エラー)」が起きやすいという課題がある。従来のコンピュータは誤りを「訂正」する機能をもっているが、量子コンピュータは原理的に「訂正」が難しいため、誤りが生じてでも対処できる「耐性」をもつ誤り耐性型量子コンピュータが志向されている。その耐性を可能とする論理量子ビットとしてGKP量子ビットが有力視されているものの、光では実現に至っていなかった。

研究グループは、東京大学と情報通信研究機構(NICT)が共同開発した超伝導性光子検出器(図1)を用いて、光方式によるGKP量子ビットの生成に成功した。このGKP量子ビットは、研究グループが開発した大規模光量子プロセッサ(演算装置)と相性がよく、大規模な誤り耐性型光量子コンピュータの誤り耐性機能の実現につながると期待されている。

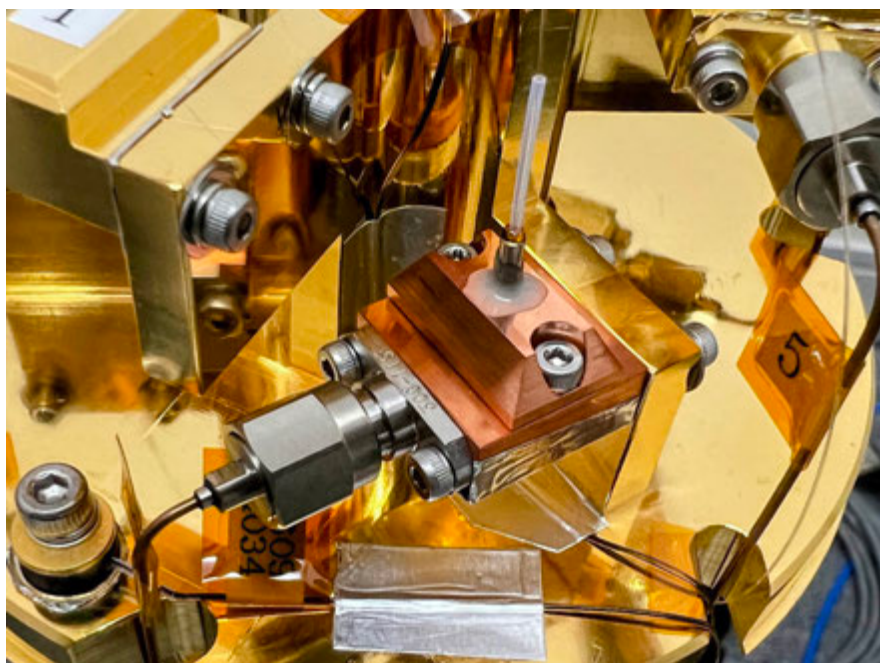


図 1 東京大学と NICT が共同開発した超伝導光子検出器

※ 1 誤り耐性型量子コンピュータ

量子コンピュータでは、量子計算の過程で生じた誤りが蓄積することで情報の信頼度が失われやすい。そうした誤りの下でも最終的な量子計算結果が正しくなるように対応できるのが「誤り耐性型量子コンピュータ」である。

※ 2 論理量子ビット

量子情報処理で基本となるのが「量子ビット」。現行コンピュータでは「0」か「1」の値を取る「ビット」が基本となるのに対し、量子ビットは「0」と「1」の重ね合わせを取ることができるので、現行コンピュータにはできない情報処理が可能となる。しかし、電磁波や熱などの外乱などにより誤りが起きると量子情報を保持できなくなる。これを防ぐのが「論理量子ビット」で、「0」「1」の重ね合わせを保持したまま、計算過程で蓄積しはじめた誤りを検知・除去していくことで、正しい計算結果にたどり着ける。

※ 3 GKP 量子ビット

従来手法では非常に多数の量子ビットを用いて 1 つの論理量子ビットを構成するのにに対し、GKP (Gottesman-Kitaev-Preskill) 量子ビットは、1 つの光パルスを用いて 1 つの論理量子ビットを実現する。これにより光量子コンピュータの大規模・高速化が可能となる。

誤り耐性量子コンピュータ開発のカギとなる「GKP量子ビット」

AIの活用など高度な情報処理に応えるため、コンピュータにはさらなる大容量・高速化が求められている。現行のコンピュータの進歩が限界を迎えつつあるなかで、新たに期待されているのが量子コンピュータである。量子コンピュータには、超伝導式、半導体方式、イオントラップ方式、冷却原子方式、光方式などがある。

いずれの方式の量子コンピュータにおいても、大きな課題の1つが「計算結果の信頼性」の確保である。現行コンピュータは、計算の誤りを検出して再計算を行う「誤り訂正機能」を有するため高い信頼性を得ている。これに対し、量子コンピュータが扱う量子情報は電磁波や熱などの影響を受けて誤りが生じやすいうえ、誤り訂正を行う仕組みを導入するのも困難である。そこで、誤りが生じて、それを乗り越えて正しい計算結果を得ることができる「誤り耐性」が求められている。その役割を果たすのが、計算過程で蓄積しはじめた誤りを検知・除去する論理量子ビットである。従来は、多数の量子ビットを用いて1つの論理量子ビットを構成することが考えられてきた。しかし、この方法では膨大な量子ビットが必要となるため、実用的な量子コンピュータ実現の最大の障壁となっていた。この問題を克服するために注目されているのが1つの量子ビットで1つの論理量子ビットを可能とするGKP量子ビットである。

新開発の光子検出器を用いてGKP状態を生成

研究グループは光量子コンピュータの研究を行っており、2019 年に大規模でどのような量子操作も実現可能な量子計算プラットフォームの実証に成功している。これは、光の伝搬波の量子システム^{※4}の性質が大規模化や相互作用の容易さにつながることを立証したものの。このプラットフォームに十分な「誤り耐性」機能を持った論理量子ビットを注入することにより、実用的な誤り耐性型光量子コンピュータが可能となる。

その論理量子ビットとして、1つの光パルスで1つの論理量子ビットを実現できるGKP量子ビットが有力視されてきた。GKP量子ビットの構造を実現するには強い非線形性^{※5}を使う必要がある。しかし、超伝導やイオントラップのような定在波(静止したシステム)と違い、光の伝搬する波では非線形性の増幅が難しく、光量子コンピュータにおけるGKP論理量子ビットの実現が大きな課題の1つとなっていた。

そこで、研究グループは東京大学とNICTが共同で開発した超伝導光子検出器(図1)を用いて、GKP 状態を光で生成することに成功した(図2)。その生成手法は、最初に「シュレディンガーの猫状態^{※6}」を生成した。このシュレディンガーの猫状態は量子性の高い状態ではあるもののGKP状態とは異なる構造を持つため、線形光学素子を用いて構造の整形を行った。その結果が、図3に表したピーク構造である。ピークの数と鋭さがGKP状態の質を特徴づけている。

今回は構造の整形を1ステップで行ったが、この方法の優れた点は同じ方法を反復することでピークの数が増えて質の高いGKP状態を実現できることにあり、将来の拡張性が期待される。

※ 4 伝搬波の量子システム

量子情報処理を実現するさまざまなシステムは、定在波(静止したシステム)が伝搬波に分けられる。定在波の代表例は超伝導やイオントラップが挙げられ、伝搬波の代表例は光である。定在波のシステムでは量子ビットそのものが静止しているため、その制御や操作、非線形操作を容易に実装できるが、空間上に量子ビットを配置する必要があるため配線や結合、大規模化などの課題が多くある。それに対して、伝搬波は伝搬する性質から量子通信や大規模ネットワークに向いている一方、操作、非線形操作は工夫が必要となる。

※ 5 非線形性

量子計算での操作は、線形操作と非線形操作がある。作用する物理的な量に対して線形(比例や足し算)なのか、非線形(乗数など)なのかで分類している。大まかには定在波のシステムは強い非線形性を有するシステムや非線形性を定在波で増強できるのに対して、線形操作が不得意な場合が多い。一方、光の伝搬波では線形操作は既存の光学素子で実現できるので大規模化しやすい一方、非線形性をほとんど有していないので、論理量子ビットの生成に必要な非線形性を工夫して導入する必要がある。

※ 6 シュレディンガーの猫状態

有名なシュレディンガーの思考実験(箱の中の猫が生きているか死んでいるかは、箱を開けてみないとわからない)に因んだ量子状態のこと。光分野では、位相の異なる2つの古典光を生きた猫と死んだ猫になぞらえ、それらの重ね合わせをシュレディンガーの猫状態と呼ぶ。シュレディンガーの猫状態の特徴は量子干渉による干渉縞を有しており、非常に高い量子性を併せ持っているが、その構造は GKP 量子ビットとは異なる。



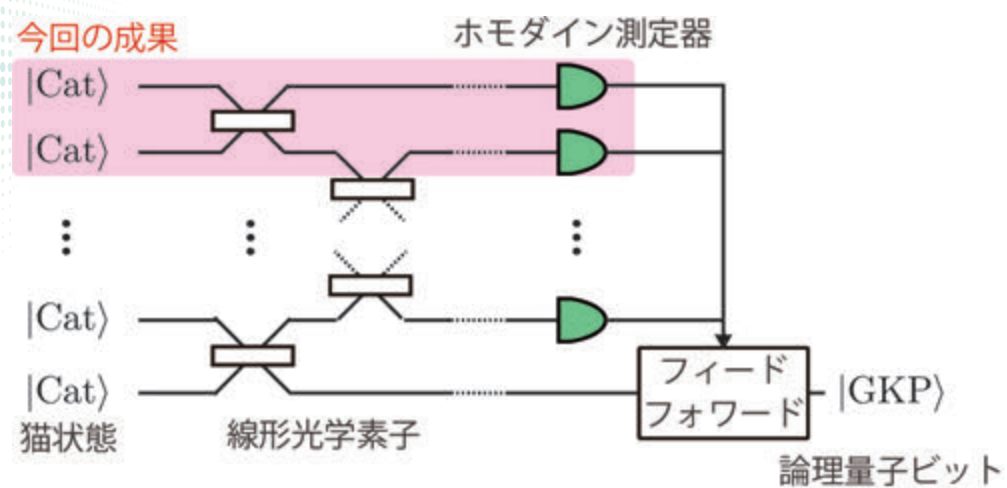


図2 実験システムの概念図

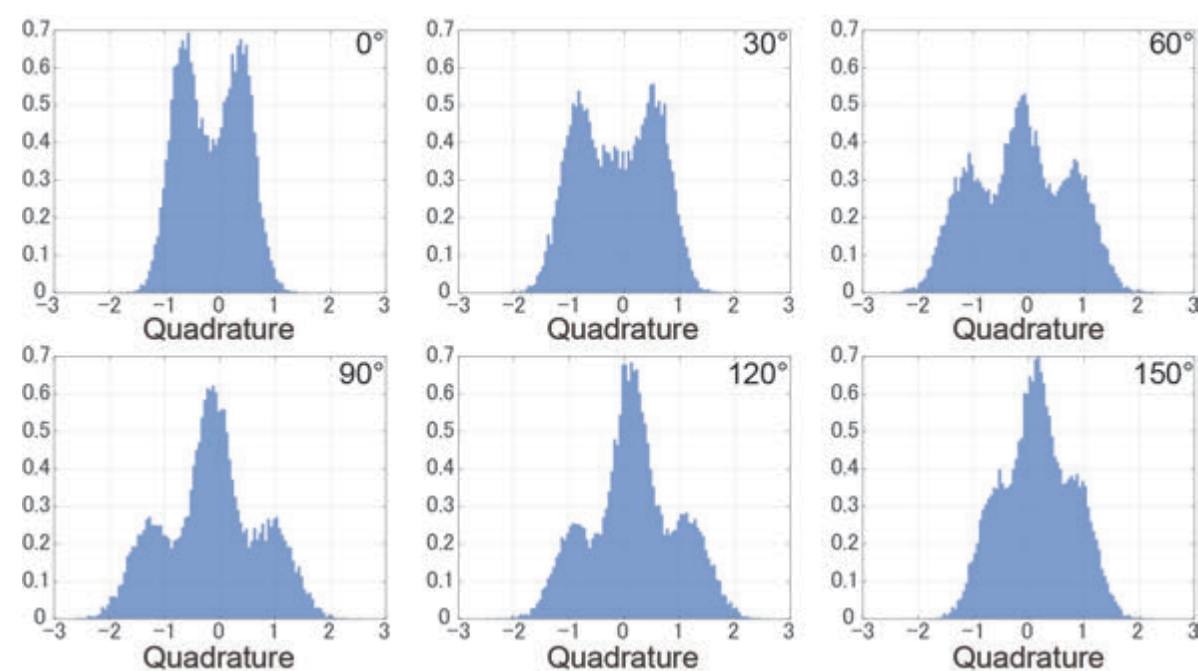


図3 生成した誤り訂正のための電磁場の分布構造の観測結果

2050年を目標に、誤り耐性型汎用光量子コンピュータの実現へ

光量子コンピュータの研究は大規模化や高速化の側面が注目されてきたが、今回の成果により、超高速大規模誤り耐性型光量子コンピュータの実現への道に踏み出すことができた。

2024年11月には強い量子状態を持つ光量子状態の生成レートを従来の1000倍高速化することに成功したことを発表するなど、画期的な基盤技術の開発を通じて光量子コンピュータの社会実装に向けた研究を深化させている(図4)。

なお、これまでの成果をもとに、2024年9月に「OptQC株式会社」が設立された。2026年度には商用機の提供も予定している。

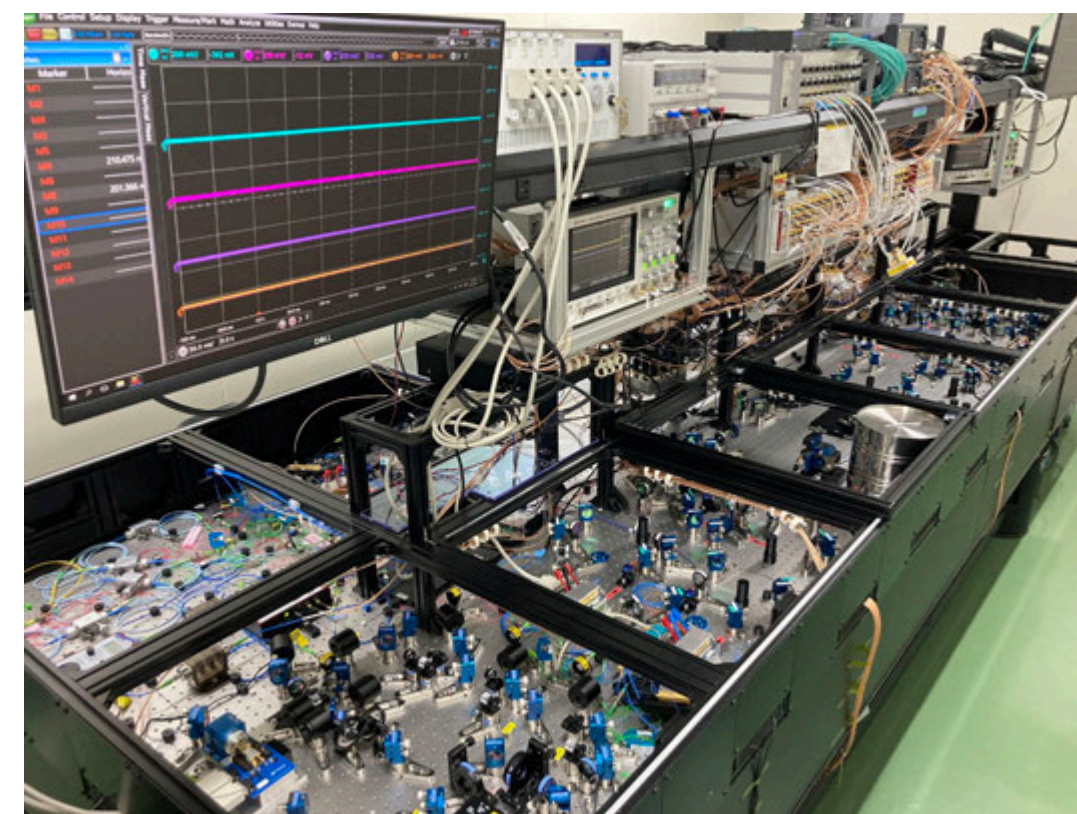


図4 研究チームが開発した光量子コンピュータの汎用機





日本初の新規放射性治療薬の実用化へ

国産初のがん放射性治療薬を開発し、事業化に挑む

吉井 幸恵（リンクメッド株式会社 代表取締役社長／
量子科学技術研究開発機構 量子医科学研究所 上席研究員（2023 年 12 月まで））



START プロジェクト支援型「革新的がん放射性治療薬の事業化に向けた技術開発」研究代表者（2020-2022）

次世代型放射性医薬品の実用化へ前進

量子科学技術研究開発機構量子医科学研究所の吉井幸恵上席研究員らは、銅の放射性同位体⁶⁴Cuを用いて、悪性腫瘍等に対して治療効果が高く、さらにがんの診断と治療が同時に行える次世代型放射性医薬品を開発してきた。

この次世代型放射性医薬品の実用化を目指して、吉井上席研究員は2022年7月1日に、次世代型放射性医薬品の開発、販売に特化したベンチャー企業「リンクメッド株式会社」をJSTの大学発新産業創出プログラム(START)の支援で立ち上げた。

同社が開発する放射性医薬品の中で、再発・難治性悪性脳腫瘍に対する放射性治療薬⁶⁴Cu-ATSMは、治験の最終段階である第Ⅲ相比較試験まで進めており、日本発の放射性治療薬として初めての承認が期待されている。

⁶⁴Cuの特性を活かした「見える」がん治療の実現を目指す

これまでのがんに対する放射線治療や化学療法は、治療効果が十分でない、正常細胞に対するダメージで副作用が起るといった問題があった。吉井上席研究員らは、銅の放射性同位体である⁶⁴Cuが、こうした問題を克服しようと考え、⁶⁴Cuを用いた放射性医薬品の開発に取り組んできた。

⁶⁴Cuからは、従来の放射性治療薬で使用されてきた核種から放出されるベータ線のほかに、オージェ電子という特殊な放射線を出している※1。オージェ電子はがん細胞を高いエネルギーで効果的に治療できるという優れた特徴を持っている。また、⁶⁴Cuは陽電子も放出するため、陽電子放射断層撮影(positron emission tomography; PET)診断に用いることができる。これらの特性を活かし、がん細胞に集積する薬剤に⁶⁴Cuを結合させることによって、非侵襲的にがんへの薬剤集積を確認しながら治療（見ながら治療）することが可能となる（図1）。

同社は、⁶⁴Cuのすぐれた特性を活かした次世代型放射性医薬品により、『革新的な「見える」がん治療』の一日も早い実用化を目指している。これが実現すれば、他に効果的な治療法がない難治がんの克服や、患者さん一人ひとりのがんの状態に合わせた治療、副作用を評価しながらの最適な医療を提供することが可能となる。

Copper-64 (⁶⁴Cu)を使用した「見える」がん治療薬で 最先端科学と患者をつなぐ

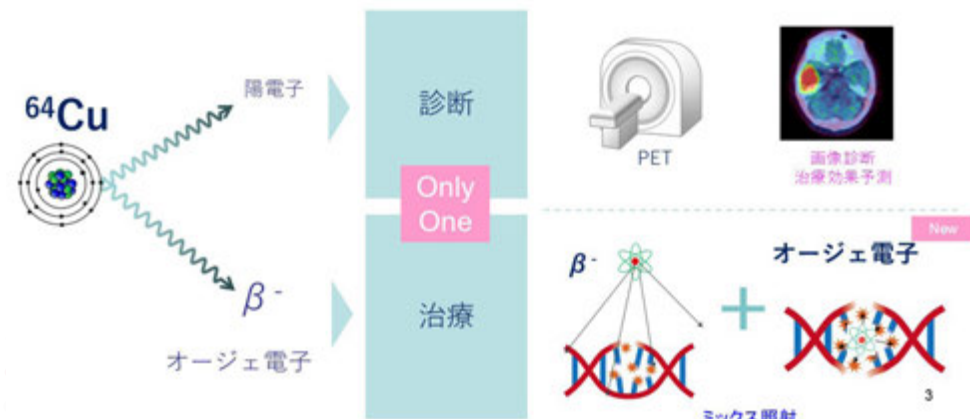


図1 ⁶⁴Cuを用いた次世代放射性医薬品による「見える」がん治療

がんは死因第一位の疾患で、他に治療法のない難治がん克服には革新的診断治療法が必要である。同社は診断と治療の両方に使える放射性核種⁶⁴Cuを用いた「見える」がん治療薬で効率的で最適な医療の提供を目指している。

国産の放射性治療薬として初の国内臨床試験を実施

同社が開発中の⁶⁴Cu-ATSMは、再発・難治性悪性脳腫瘍に対する放射線治療薬として、第Ⅲ相比較試験まで治験を進めている（図2）。

悪性脳腫瘍は、既存の治療法では十分な効果が得られず、新規治療法の開発が強く望まれてきた。その原因は腫瘍内部が低酸素環境になることだ。放射線治療では、放射線ががん細胞に当たると活性酸素が生成され、がん細胞のDNAを損傷させて細胞死を促進する。しかし、悪性脳腫瘍での再発例では、低酸素化が起り、活性酸素が発生しにくいいため、放射線治療が効きにくい。

これに対し吉井上席研究員らは、低酸素環境にある腫瘍細胞に集積し高い治療効果を発揮する⁶⁴Cu-ATSMを開発した。吉井上席研究員らは、⁶⁴Cu-ATSMが、がん細胞株移植モデル等を用いた非臨床試験で低酸素状態にある悪性脳腫瘍の増殖を抑制し、生存率を改善することを確認したことから、治療薬になることが期待され、開発が進められた。一日も早い実用化が期待される。



図2 ⁶⁴Cu-ATSMの実用化に向けて

悪性腫瘍をはじめとする難治性がんが低酸素化することに着目し、低酸素化難治性腫瘍を、見ながら治療できる新しい放射性医薬品⁶⁴Cu-ATSMを開発。⁶⁴Cu 医薬品として一日も早い実用化が期待される。

革新的な「見える」がん治療に挑む

がんは、わが国の死亡原因の第一位の疾患で、診断や治療法の開発は急務の課題である。同社は、銅の放射性同位体⁶⁴Cuを用い、がんの診断と治療の両目的に使える次世代型放射性医薬品を開発してきた。

再発・難治性悪性脳腫瘍をターゲットとした⁶⁴Cu-ATSMの他にも、膵がんの診断薬や治療薬、固形がん、胆管がんをターゲットとして創薬も進めている。⁶⁴Cuを基盤とし、多彩な放射性医薬品を持続的に創成し、日本の技術イノベーションを生み出すことに挑み続けている。

※1 ベータ線、オージェ電子

ベータ線は、一般に最大飛程がミリメートルオーダーで従来の放射性治療薬に使用される。オージェ電子は、一般に最大飛程がナノメートルオーダーと短いため薬剤の近傍に高いエネルギーを付与することができ、治療効果が高いと言われている。



WEB <https://www.jst.go.jp/seika/bt2025-15.html>



光合成細菌を窒素肥料に

空気中から窒素を固定する細菌を 無機肥料の代替として利用

沼田 圭司（京都大学 大学院工学研究科 教授）



「ゼロカーボンバイオ産業創出による資源循環共創拠点」 プロジェクトリーダー（2023-2032）



光合成細菌を利用した持続可能な窒素肥料開発

沼田圭司京都大学大学院工学研究科教授(理化学研究所環境資源科学研究センターチームリーダー)らの研究グループは、海洋性の非硫黄紅色光合成細菌(*Rhodovulum sulfidophilum*)のバイオマス^{※1}が作物栽培の窒素肥料として利用可能であることを明らかにした。

海洋性の非硫黄紅色光合成細菌は空気中の窒素と二酸化炭素の固定が可能であり、これを破碎・乾燥処理したバイオマスは11% (重量比)もの窒素を含有していた。このバイオマスを肥料として利用し、植物がバイオマス由来の窒素を直接的に取り込んでいることを確認した(図1)。このバイオマスを無機肥料^{※2}の4倍に相当する量を施肥しても、植物の発芽や生育に悪影響が見られなかった。

本研究成果は、既存の窒素肥料に替わる持続可能な窒素肥料開発に貢献することが期待される。

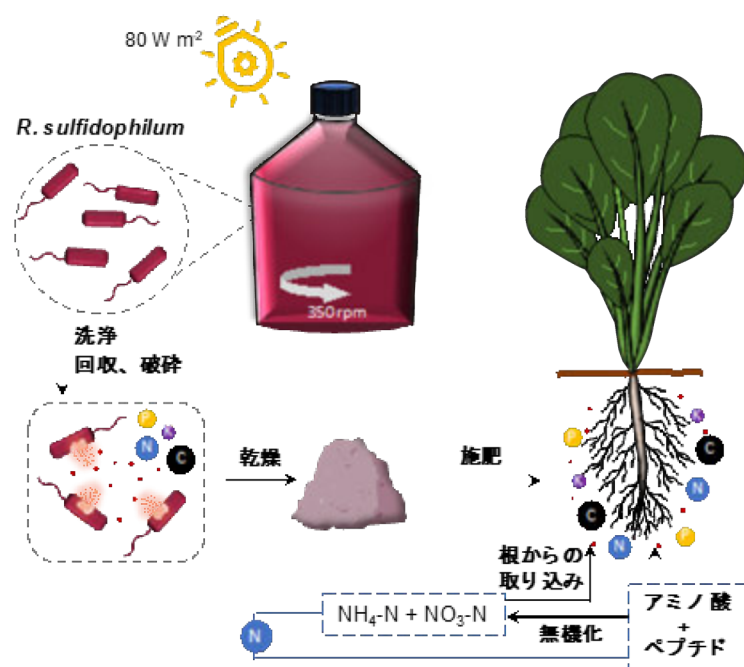


図1 肥料として用いる光合成細菌の破碎・乾燥処理と植物への取り込み

※1 バイオマス

微生物、植物、動物の成長によって生産される再生可能な有機物。

※2 無機肥料

土壌に施用され、植物への吸収を促進し、作物の品質を向上させる必須栄養素から成る無機物質。

現在の農業用肥料に関する問題点

植物の成長には窒素が不可欠だが、空気の約78%を占める窒素を直接利用できる植物は少ない。空気中の窒素を利用しやすい分子へと変換するプロセスは窒素固定と呼ばれ、マメ科の植物の根には窒素固定できる細菌(根粒菌)が共生していることから、古くはマメ科であるレンゲソウを育て、それを田畑へすき込むことで肥料にする緑肥という手法も行われていた。

現在の農業では、大量の作物を作るため、化学合成された無機肥料に大きく依存している。しかし、無機肥料の製造と使用は環境へ多大な負荷をかけることが問題となっている。例えば、無機肥料の過度の利用によって土壌に無機窒素が流出すると、土壌の質が損なわれることが分かっている。また、土壌中の余剰な窒素は一酸化二窒素(N₂O)へ変換され、温室効果ガス排出の一因となる。

堆肥などの有機肥料^{※3}は、植物に栄養を補給し土壌構造を向上させるが、その効率は炭素(C)と窒素(N)の比(CN比=C/N)に依存しており、一般的に用いられる有機肥料は窒素含有量の低い場合が多いため、大量の肥料を用いる必要がある。そのため肥料に含まれる塩分などで土壌塩分^{※4}や栄養毒性^{※5}の問題が生じる。一方、CN比が高い有機肥料は土壌中に一酸化二窒素の排出を増加させる可能性がある。こうした問題点から、無機肥料の代替として、窒素含有量が高く、CN比が低い有機肥料が求められてきた。

非硫黄紅色光合成細菌バイオマスの有機肥料としての利用可能性を実証

本研究グループは、破碎と乾燥処理を施した非硫黄紅色光合成細菌のバイオマスを肥料として利用できるか検討するために、コマツナを用いて植物の発芽と生育における影響を調べた。その結果、無機肥料の4倍量に相当する量を用いても発芽(図2a)と生育(図2b)に悪影響がないことが明らかとなった。

また、無機肥料と比較して非硫黄紅色光合成細菌のバイオマスからは窒素がゆっくりと放出されるため、低温・高温いずれの栽培条件でも、無機肥料の2倍の施肥により無機肥料と同等の生育を示すことがわかった。

本研究ではさらに、植物が含有する窒素量と土壌に加えられた窒素量の相関解析を行い(図3)、低温高温いずれの条件においてもコマツナが非硫黄紅色光合成細菌のバイオマスから窒素を取り込んでいることを明らかにした。

これらの結果から、非硫黄紅色光合成細菌のバイオマスは、無機肥料に代わる有機肥料として利用可能であることを明らかにした。

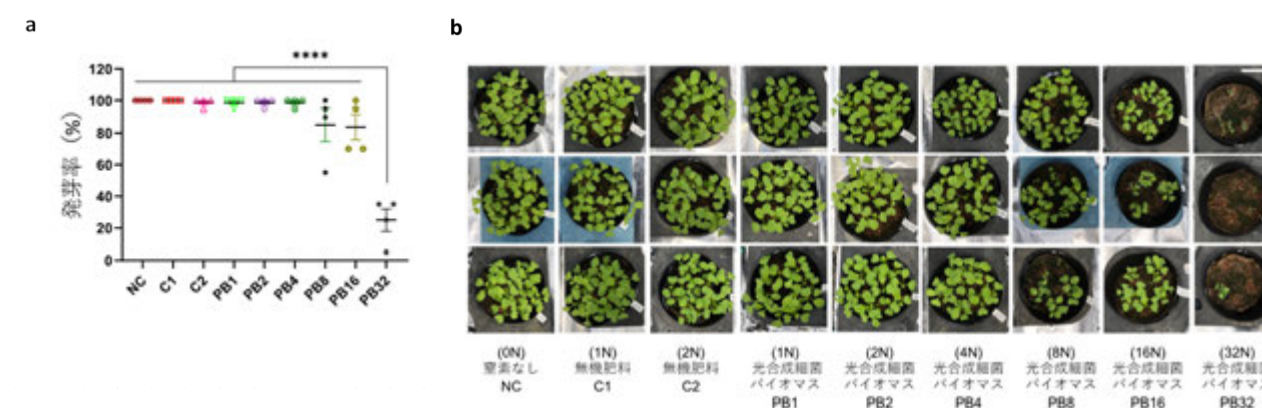


図2 コマツナの発芽と生育における非硫黄紅色光合成細菌バイオマスの影響

種まき後7日におけるコマツナの発芽率(a)と生育(b)。NC:無窒素肥料、C1-2:無機肥料、PB1-32:非硫黄紅色光合成細菌バイオマス(1、2、4、8、16、32は施肥された肥料の量を無機肥料の窒素量に対する相対値で表している)。**はPB32とそれ以外の肥料における発芽率の統計的有意差を表している。PBはProcessed Biomassの略。

※3 有機肥料

微生物や動植物などの生物、またはそれらの排泄物に由来する肥料。

※4 土壌塩分

土壌中の塩分含有量のこと、土壌中に可溶性塩類が過剰に蓄積すると植物の生育に支障を来す。

※5 栄養毒性

植物が必要とする以上の元素や栄養素が過剰に存在し、成長や品質の低下を引き起こすこと。



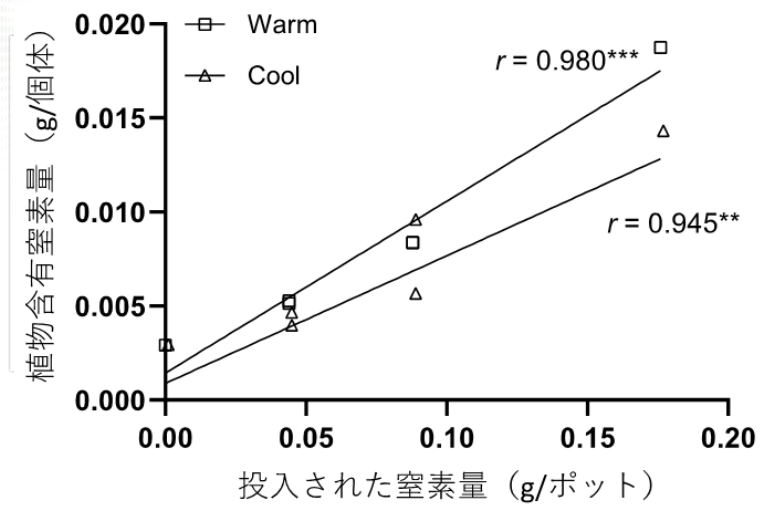


図3 植物含有の窒素量と非硫黄紅色光合成細菌バイオマスとして投入された窒素量の相関
グラフでは高温（22～32度）の場合（上の線）と低温（15～25度）の場合（下の線）を示している。
縦軸は植物（コマツナ）に含有される窒素量、横軸はバイオマスとして投入された窒素量。

ゼロカーボン農業に貢献する窒素肥料創出に期待

本研究成果から、非硫黄紅色光合成細菌の窒素固定能力を利用した肥料は、持続可能な代替手段として、環境と食料安全保障の両面の懸念に対処する上で、有望であると考えられる。この肥料は、従来使用されてきた堆肥などの有機肥料に比べて、 N_2O と CO_2 の排出量が少なくと予想されており、長期的には農業が環境に与える影響を軽減する可能性が期待される。

本研究グループは今後、非硫黄紅色光合成細菌のバイオマスを、無機肥料の商業的代替物としての適正と経済性を評価するため、培養規模の拡大、汚染のリスクと保存可能期間の評価、異なる温度下での効果のばらつきなどの潜在的な課題に取り組む。

また現在、京都大学発スタートアップのSymbiobe株式会社が非硫黄紅色光合成細菌の量産技術の確立に取り組んでいる。

こうした取り組みから、化学肥料に代わる新たな選択肢として、持続可能な窒素肥料を創出し、ゼロカーボン農業の普及・発展に貢献することが期待される。

