

JST news

未 来 を ひ ら く 科 学 技 術

2022

11

November

従来の概念を覆す物理法則を発見
丈夫で強靱なゲルの開発に挑む

強度特性を保つ金属同士の「低温接合」
省電力、廃棄物削減につながる新技術

03 — 特集1

従来の概念を覆す物理法則を発見
丈夫で強靱なゲルの開発に挑む



08 — 特集2

強度特性を保つ金属同士の「低温接合」
省電力、廃棄物削減につながる新技術



12 — 連載 どうやって実現する？
明るく豊かなゼロエミッション社会
第5回 電力貯蔵システムとしての
「新揚水発電」



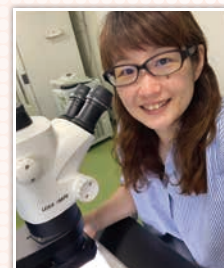
14 — NEWS & TOPICS

- ◆ 雄の蚊の「耳」を操る物質を発見
- ◆ 実験データを電子ノートで記録しAI解析
ほか

16 — さきがける科学人

「非モデル生物」研究を
盛り上げたい

筑波大学 生存ダイナミクス研究センター 助教
島田 裕子



JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標(SDGs)の達成に積極的に貢献していきます。



▶ P.14上



▶ P.12



▶ P.8、P.12



▶ P.8



▶ P.8、P.12、P.14上



▶ P.14上



▶ P.8

編集長：安孫子 満広

科学技術振興機構(JST)広報課

制作：株式会社エフビーアイ・コミュニケーションズ

印刷・製本：株式会社丸井工文社

従来の概念を覆す物理法則を発見 丈夫で強靱なゲルの開発に挑む

酒井 崇匡 Sakai Takamasa

東京大学 大学院工学系研究科 教授
2019年よりCREST研究代表者

特集 1

OVERVIEW ■

人体との親和性が高いことから、生体材料として大きな注目を集めているハイドロゲル。ソフトコンタクトレンズなどでも実用化されているが、力学的には脆^{もろ}いため、強度と耐久性を併せ持ったゲルが求められている。これに対し、東京大学大学院工学系研究科の酒井崇匡教授は、ゲルの性質を根本から突き詰め、従来の概念を覆す物理法則を次々に発見している。さらに、こうした学理を基盤に人工腱^{けん}や靱帯^{じんたい}の材料にもなり得る、丈夫で強靱なゲルの開発に挑む。

伸縮性や弾性に富む材料 ヘテロな集団で共創を目指す

ゼリーやこんにゃく、ヨーグルトに代表されるゲルは、多くの人にとって身近な物質だ。ゼリーを作る際に、温かい溶液を冷やすと固まるという状態変化もよく知られているだろう。化学的には、高分子や微粒子が溶液中に溶解・分散したコロイド溶液が、流動性を失って固化したものをゲルという。高分子やコロイド粒子が互いに絡み合って網目状の構造を作り、その中に水などの液体を包み閉じ込めている。その程度に応じて、粘性のある液体状のゾルから固体状のゲルにまで変化し、伸縮性や弾性に富むなどの特性を生み出している。

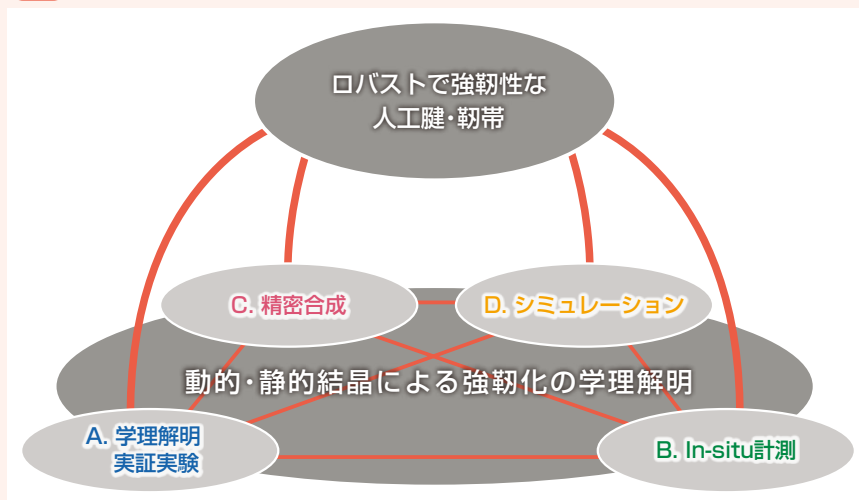
こうした特性を活用し、現在、食品や工業用品から、化学、農業、医療、宇宙科学に至る幅広い分野で高分子ゲルが利用されている。中でも、水を内部に含んだハイドロゲルは、生体軟組織と似た構造を持ち、人体との親和性が高いことから、医療用バイオマテリアルとして期待されている(図1)。すでに縫合糸、人工血管、人工皮膚、細胞培養、止血剤、ドラッグ・デリバリー・システムなどの最先端医療材料として研究され、一部実用化が進んでいるが、耐久性などの観点から大きなシェアを獲得しているのは、コンタクトレンズのみにとどまる。

また、強度と耐久性が要求される人工腱や靱帯も、現在使われている

図1 ハイドロゲル



図2 CRESTの体制図



のはプラスチック製だ。しかし、生体内における長期的な強度維持に問題を抱えており、新たな素材が求められている。「強度と耐久性を併せ持ったゲルが開発できれば、人工腱や靱帯へも応用できますが、ゲルは脆いという弱点に加え、生体内では水分を吸収して膨張してしまいます。そのため、元の形状を維持できないという大きな問題を抱えていました」と東京大学大学院工学系研究科の酒井崇匡教授は語る。

そこで酒井さんはこれらの難題を解決し、強度と耐久性があり、かつ生体内で膨張しない人工腱・靱帯の開発を目指し、CREST「ゲルのロバスト強靱化機構の解明と人工腱・靱帯の開発」を立ち上げ、研究代表者として開発を推し進めている。狙い通りの高分子ゲルを合成して構造解析・物性測定を行い、シミュレーションの解析結果と比較するという一連の流れをCREST内で行うために、学理・合成・計測・シミュレーションの4つの研究グループを組織している(図2)。

酒井さん自身は学理の解明やゲルの設計・実証を担い、In-situ計測は東京大学物性研究所の眞弓

皓一准教授、精密合成は東京工業大学物質理工学院の佐藤浩太郎教授、シミュレーションは名古屋大学大学院工学研究科の増淵雄一教授がそれぞれ担当している。「私はこの研究体制を『ヘテロな集団による共創』と呼んでいます。分野は異なりますが、第一線で活躍する唯一無二のスペシャリストが密に連携することで、成果につながっています」と語る。

ゲル化中の浸透圧変化の謎 世界初・普遍法則で解明

酒井さんには、医療用のハイドロゲルをデザインする基本的なスタンスがある。生体内におけるハイドロゲルのライフサイクルを理解し、材料を設計することだ。「科学者は生体内に埋め込んだ後、材料に手を加えることはできません。だからこそ、作るだけでなく、生体内でどのように振る舞い、最終的には分解する、あるいは何年使えるといったことを、設計の段階で全て考えておく必要があるのです」と説明する。

そこで、酒井さんは従来の固定概念を取り払い、ゲルの本質を改めて探求していった。その1つとして、保水力の元となる浸透圧の変化に着目した。一般的には、浸透圧とは溶液の濃度が高い方に水分が移動する圧力

のことを指し、希薄溶液であれば溶質のモル濃度に比例するというファン・ト・ホッフの法則に従うことが知られている。一方、ゲルは液体状態のゾルからゲルになる過程で、浸透圧が大幅に低下することが知られているが、どのような物理法則に従っているのかは謎のままだった。

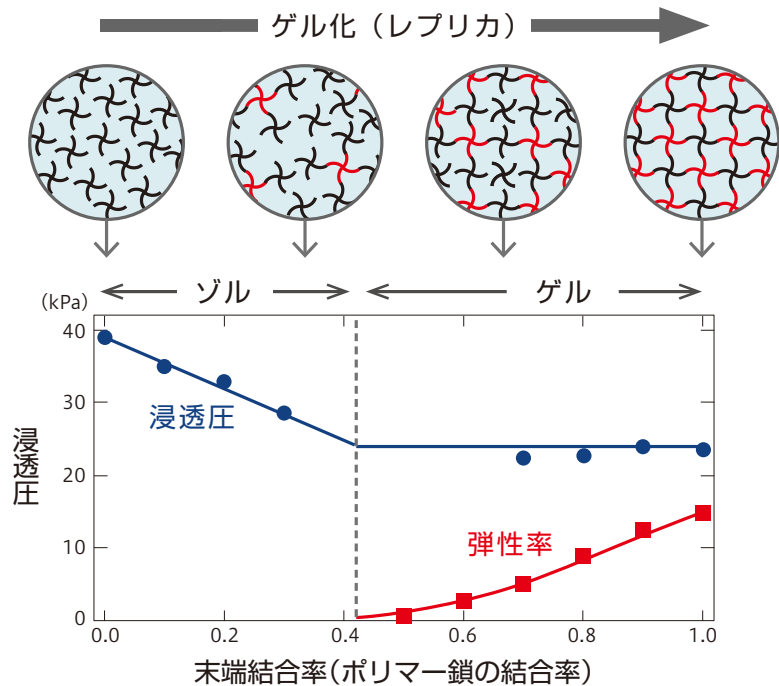
酒井さんは高分子鎖のネットワーク構造を均一に制御できる「テトラゲル」を使い、ゾルからゲルになるまでの過程をモデル化したサンプルを作り、正確な浸透圧を計測していった。すると、ゾルのときは高分子の結合度が高くなるにつれてモル濃度が減少するので、浸透圧は予想通り減少するが、ゲルになると結合度合いによらず浸透圧が一定であることを示し、世界で初めてゲル化過程の普遍法則を解明した(図3)。

この研究は、ノーベル物理学賞を受賞したフランスの物理学者ドゥジェンヌ博士が1972年に発見した「鉄が磁石に変わる現象とポリマー溶液の共通点」に基づいており、ゲルも高分子の溶液と同様の共通点を持つことも新たに発見された。これにより、ゲルの保水力を数学的な普遍法則に基づいてコントロールできるようになり、やわらかくウェットな新規ゲル開発への道を拓いた。

「負のエネルギー弾性」発見 やわらかさの温度変化を解明

続いて、ゲルのやわらかさを表す物理法則の解明に取り組んだ。従来、熱力学第二法則であるエントロピー増大の法則に基づくエントロピー弾性で、ゲルのやわらかさはおおむね説明できると100年近く信じられてきた。しかし、実際には温度との相関にずれが見られることも多かったため、酒井さんはこの定説が正しいのかを徹底的に検証した。50種類以上の異なる高分子網目構造を持つゲルを正確に作り分け、やわらかさの温度変化の測定と熱力学に基づく解析

図3 ゲル化の進行と保水力の関係



4分岐ポリマーの末端同士が化学反応によって結合し、ゲル化が進行する。末端間結合の割合が小さいときは液体状の「ゾル」となり、ある閾値以上になると固体状の「ゲル」となる。保水力(浸透圧)はゾル状態ではゲル化の進行とともに低下し続け、ゲル状態では一定となる。(図中のkPaはキロパスカル)

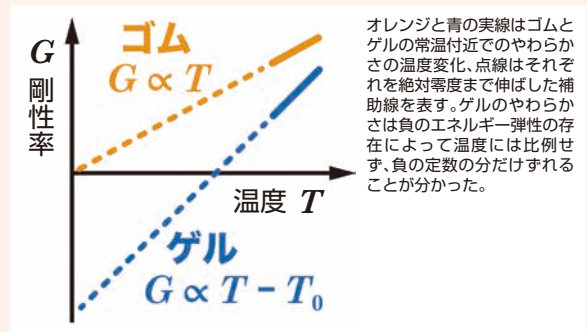
を行ったのである。

その結果、ゲルに外力を加えて変形する時に元の形に戻ろうとするエントロピー弾性の力とは反対向きの力、すなわち「負のエネルギー弾性」が同時に働いていることを世界で初めて発見した(図4)。「これ

までゲルの弾性はゴムと基本的には同じだと思われてきましたが、本質的に異なることを示しました。また、温度変化が従来の想定よりもかなり大きいこともわかりましたので、材料開発や使い方にも大きな影響を与えることになるでしょう」と成果を強調する。

さらに酒井さんは、これらの成果を土台に、ゲルが吸水・膨張する際の物理法則の解明にも取り組んだ。日常でも乾燥ワカメや紙おむつの吸水剤など、水に浸したゲルが吸水し

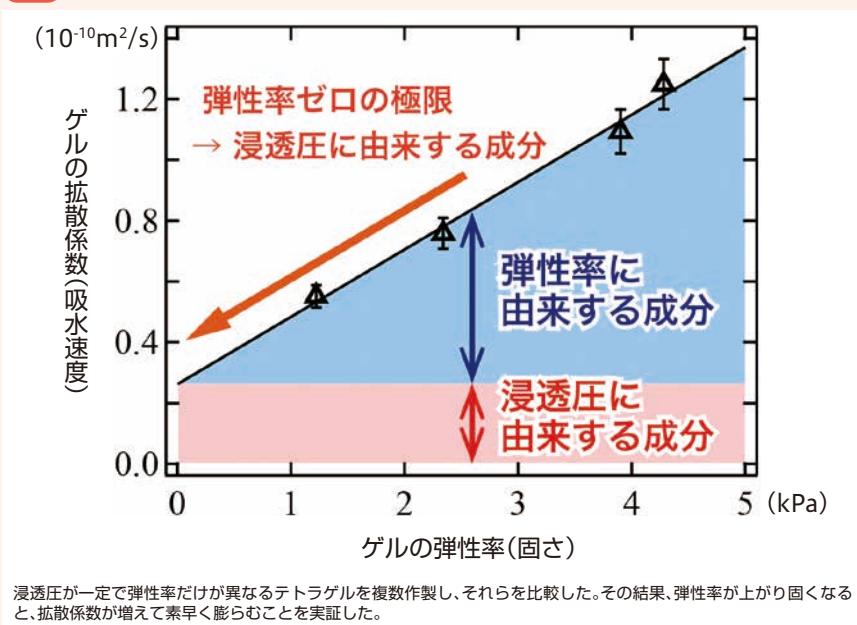
図4 「負のエネルギー弾性」の概念図



て膨らむ現象は広く利用されているが、ゲルの膨らむ速度の温度変化を決める法則は明らかになっていなかった。そこで、先ほど浸透圧の変化を調べる際に用いたテトラゲルを使い、架橋点間分子量・高分子濃度・網目の結合率を独立に制御した約20種類のゲルを作成し、これらのゲルが吸水して膨らむ速度の温度変化を測定した。

その結果、ゲルの膨らむ速度の温度変化は、負のエネルギー弾性とブラウン運動におけるアインシュタイン

図5 ゲルの拡散係数(ゲルが吸水して膨らむ速度)と弾性率(固さ)の関係



ンの関係式を組み合わせた新しい法則で決まることを世界で初めて導きだした(図5)。「測定しただけではこの法則は見えてこなかったのですが、ゲルの吸水が高分子ネットワークの不規則な熱運動によって起こる点が、水中の微粒子の不規則な熱運動であるブラウン運動に通じることに着目して解析し、シンプルな法則にたどり着きました」と語る。

引き算発想で3分岐ゲル開発 4分岐の30倍以上も延伸

こうして、ゲルの基本的な特性を明らかにしていく中で、ある学生が3分岐のゲルが異常に伸びることを発見した。この結果は、これまでの理論からは予測できない結果であったため、何度も検証を行い、その理由を追求した(図6)。「直感的には分岐が減ることで弱くなると考えていたの、驚きました。何度もテストするうちに、3分岐ゲルは30倍以上もの伸びを示すことがわかりました」と振り返る(図7, 8)。

この3分岐ゲルの網目構造を小角・広角X線散乱測定で観察したところ、高い強靱性は「伸張誘起結晶化」に由

来することが明らかになった。伸張誘起結晶化とは、強く引き伸ばされた高分子のひもが互いに寄り合ってナノスケールの微結晶を形成する現象だ。一般的にゲルの破壊は網目の弱いところに力が集中してクラックと呼ばれる小さな破れが生じ、それが伝播することで起こる。「伸張誘起結晶化はこのクラックの発生を抑え、強靱化します。実験では、繰り返し負荷を加えても常に一定の強靱性を保つロバスト強靱性を有することもわかりました」。

3分岐構造の作製・実証では、構造を制御しやすいポリエチレングリコール(PEG)から作

製したゲルを用い、予想通り望ましい結果を得ることができた。しかし、このままでは画期的なゲルの開発には至らないと酒井さんは指摘する。「想像通りの結果が出るということは、想像通りの結果しか出ないということでもあります。私たちが求める性能、あるいはそれ以上の性能を作り出すには、理論から少しはみ出したようなポテンシャルを持ったゲルが必要なのです」。

腱・靱帯の10倍の強度を実現 人生100年時代の医療に貢献

PEGは水中での結晶の安定性が不足しているという問題があったことから、酒井さんはより結晶性の高いポリビニルアルコール(PVA)を材料に選択した(図9)。PVAは生体適合性が高く、すでにバイオマテリアルとしての使用実績もあることから、人工腱・靱帯の開発に最適だった。残る阻害要因は生体内における「膨潤」

図6 3分岐ゲルの延伸実験の様子

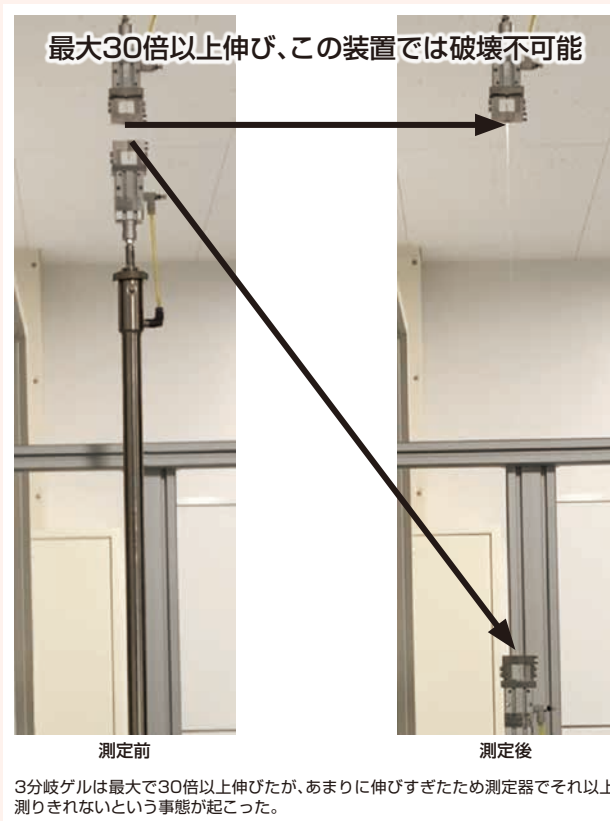
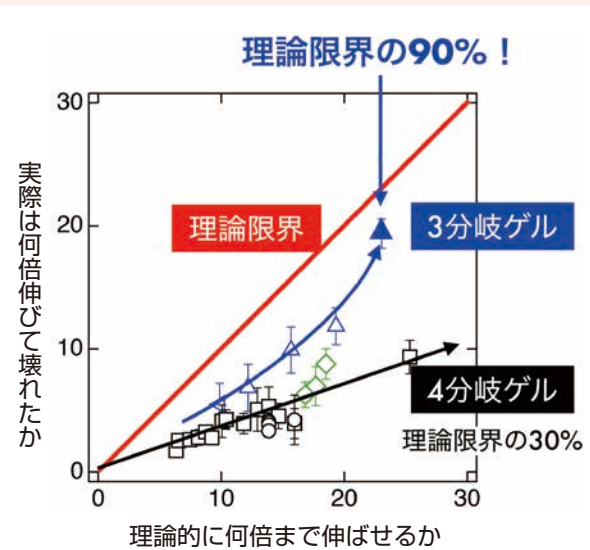
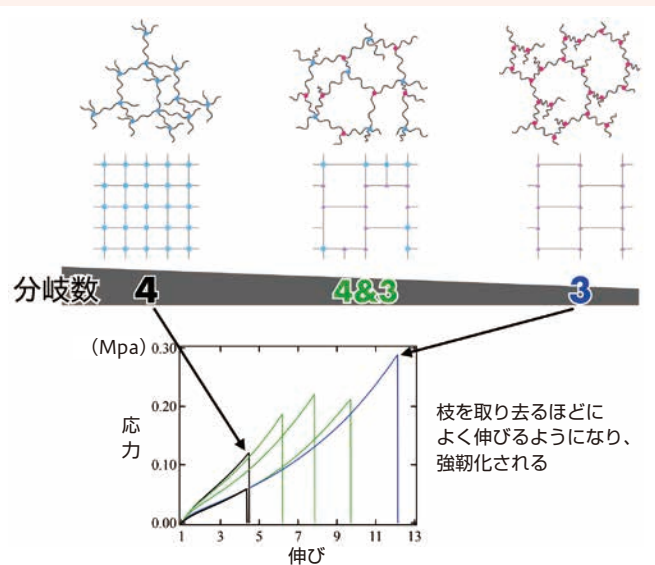


図7 理論限界近くまで伸びた3分岐ゲル



あえて伸びないゲルを作製して正確な測定を行ったところ、通常の4分岐ゲルは理論限界の30パーセントで破断するのに対して、3分岐ゲルは理論限界近くまで伸びることが明らかになった。

図8 分岐ごとの強靱化の比較



4分岐ゲルと3分岐ゲル、その中間的な分岐数を持つゲルを複数作製し、比較を行った。その結果、4分岐ゲルから枝を取り去って3分岐ゲルに近づけることにより伸びるようになり、強靱化することが示された。(図中のMPaはメガ(メガは100万)パスカル)

だ。膨潤とは、ハイドロゲルが体内の水分を吸収し、膨らんでふやけてしまうことを指す。膨潤するとハイドロゲルは元の形状を維持できないばかりか、力学特性も大きく損なわれてしまうのだ。

これに対し、PVAの結晶性を網目の設計や製造工程で自在に制御することで、水分を吸収して膨張しようとするハイドロゲルの変形を制御することに成功した。作製したゲルは、靱帯と同様に繊維軸方向に配向しており、高い結晶性を有していた。

こうして、生体内でも水分を吸収する前の初期の形状を維持しつつ、人体の腱・靱帯の約5倍となる100メガパスカルを超える高い破断強度を達成した。作製したプロトタイプでマウス皮下埋植試験を行ったところ、炎症反応が極めて軽微で、PVA結

晶が生体に対して大きな毒性を生じないこともわかった。

「当初予定していたものと同等かそれ以上の強靱さを持つゲルを開発することができましたし、安全性も確認できました。これからは実際に人体の腱や靱帯として使えるのかどうかをしっかりと確かめたいと思います。同時に、この材料はこれまでに存在しなかった力学特性を持つ可能性もあるので、その特性についても追究していきたいと考えています」と酒井さんは今後の展望を語る。

人生100年時代を迎える中、腱や靱帯、関節などが関連する運動器の障害は介護の主な要因とされており、さらに

これらの損傷や機能低下が他の障害につながることも多い。生体軟部組織の中で最も強く丈夫な人工腱や靱帯が実現すれば、軟骨や半月板、筋肉などの運動器、さらには人工硬膜や血管、皮膚への応用も見えてくる。健康寿命を延ばす効果が大きいと期待できる(図10)。「今後は医療だけでなく、海洋プラスチックなどの社会課題も視野に、研究を展開していきたいですね」。酒井さんは新たな目標に向け、これからも歩み続ける。

(TEXT:片柳和之、PHOTO:石原秀樹)

図9 ポリエチレングリコール(PEG)とポリビニルアルコール(PVA)の構造式

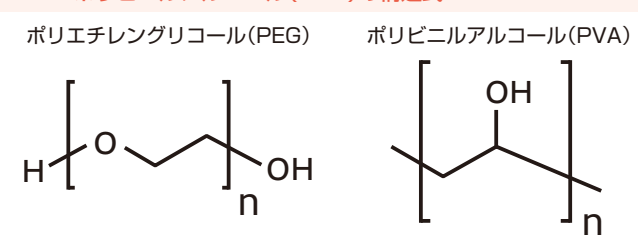
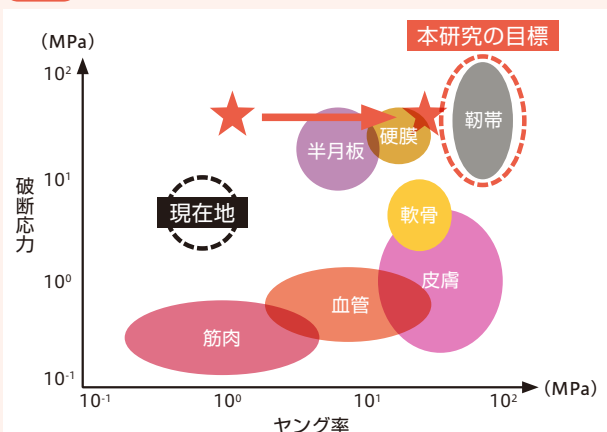


図10 従来のハイドロゲルと生体組織の強度比較



生体軟部組織の中で最も強く丈夫な人工腱や靱帯が実現すれば、破断応力を弱めたり、弾性方向のひずみと応力の比例定数であるヤング率を小さくしたりすることで、あらゆる生体材料に適用できる。

特集2

OVERVIEW ■

自動車の重量は燃費に直結するため、より軽くて丈夫な材料の開発が進んでいる。しかし、組み立てる際の接合は非常に困難で、材料によっては溶接時に本来の強度特性を損なうこともあるという。この課題に対し、大阪大学接合科学研究所の藤井英俊教授は、高い圧力をかけながら電流を流すことで、強度特性を変えずに低温で金属同士を接合する「固相抵抗スポット接合技術」を開発した。従来は困難とされた金属同士の接合が可能になるだけでなく、省電力や廃棄物削減など、脱炭素化をはじめとするさまざまな社会課題の解決につながる技術としても大いに期待される。

強度特性を保つ金属同士の「低温接合」 省電力、廃棄物削減につながる新技術

左 藤井 英俊 Fujii Hidetoshi

大阪大学 接合科学研究所 副所長・教授
2019年より未来社会創造事業 研究開発代表者

右 相原 巧 Aibara Takumi

大阪大学 接合科学研究所 博士後期課程

中央 上山 智之 Ueyama Tomoyuki

ダイヘン 常務執行役員 技術開発本部長 兼 接合技術開発部長

大手企業との共同研究 1つの動画がつないだ縁

2021年5月、大阪大学接合科学研究所の藤井英俊教授は、自身が研究開発代表者を務める未来社会創造事業での成果を携え、「新技術説明会」に登壇した。この説明会は、産学連携を狙う企業と大学のマッチングの場としてJSTが主催しているものだ。新型コロナウイルス感染症のまん延後は、オンラインで開催が続いている。この日も多くの企業関係者が聴講する中、藤井さんは新しい接合技術を紹介し、社会実装に向けた共同研究のパートナーを募った。

念頭にあったのは、自動車や鉄道

の車両製造企業だ。「従来の溶接技術では接合が難しい材料にも対応し、生産性も遜色はない」と特徴を強く訴えた。後日、講演のアーカイブ動画を見て手を挙げたのが、大阪に本社を構える溶接機・産業用ロボットの大手、ダイヘンの上山智之常務執行役員である。藤井さんのことは以前から知っていたものの、それまでは食指が伸びなかったという。

「今回は違いましたよ。オリジナリティーも高く、これはいけると直感しましたね。装置開発には自社の技術も活用できます。まさに1つの動画がつないだ縁でした」と上山さんは当時の衝撃を語る。折しも、ダイヘンは次世代の画期的な接合技術を求め

ていた。また藤井さんのいる大阪大学接合科学研究所内に、産学連携の拠点をっており、共同研究に迅速に乗り出せる環境も整っていた。

大手からの申し入れに、当時の藤井さんは快哉を叫んだという。「私たちが自動車メーカーに直接呼び掛けでも、実用化への懸念を示されるのが落ちでした。しかしダイヘンが装置開発を受け持ってくれるなら、話は180度変わってきます」。上山さんが動画を見てからわずか2カ月後に共同研究を開始。22年7月開催の国内最大の溶接・接合、切断技術を専門とする技術展示会「国際ウエルディングショー」に試作機を出展することが、当面の目標となった。

攪拌するほど再結晶温度が低下 相変態しない700度で鋼を接合

藤井さんの接合技術の最大の特徴は、接合が難しいとされている材料にも対応できる点だ。従来の技術では、炭素量の多い鋼を溶融させて接合すると割れが発生する。裏を返せば、炭素量の多い高炭素鋼がうまく接合できれば、材料の選択肢が広がる。また製鋼の過程では、鉄鉱石をコークス(石炭)により還元した銑鉄^{せんてつ}と呼ばれる生成物を精錬し、含有している炭素を二酸化炭素(CO_2)として排出させるため、高炭素鋼の製造時にその工程を省ければ、 CO_2 排出量の大幅な削減にもつながる(図1)。

ポイントは、金属を溶融させずに、低温で接合する点だ。発想の原点は、アルミニウムの接合技術として使われている「摩擦攪拌接合(FSW)」^{かくはん}だ

(図2)。左右に並べたアルミニウム板に、先端に突起を持つ円筒状の鋼製工具を押し付け、回転させながら接合部全体をなぞると、2枚の板は接合されて1枚の板になる。「工具の摩擦と突起の攪拌によって、アルミの融点の7～8割程度まで温度が上がります。この熱と工具の攪拌で結晶構造がゆがんだ後、再結晶することで、接合できるのです」と藤井さんは説明する。

このFSWを鋼にも適用するには、工具の材料が大きな課題となる。アルミ同士ならそれより硬い鋼製で良いが、鋼同士の場合は、さらに硬い材料を選ぶ必要がある。試行錯誤の末に藤井さんが採用したのは、切削工具にも利用される超硬合金だった。摩擦攪拌接合に至る鋼の温度は、計算では1000～1200度だ。しかしその温度では、超硬合金のように比較的安価な材料では硬度不足になる。

そこで、より低い温度での摩擦攪拌接合の可能性を探っていた。その結果、攪拌すればするほど再結晶温度が下がり、鋼の場合、300度という低温でも再結晶することを見いだした。直感的には攪拌すれば当然温度が上がるように思うが、藤井さんは工具の回転速度を下げ、移動速度を速くすることで、

局所的な温度上昇を抑えながら、結晶構造をゆがませて再結晶化を促したのだ。

ついに、それまで常識とされていた1000～1200度より低い約700度での接合を実現した。「鋼は同じ固体の状態でも、結晶の構造が異なる3つの相を持っています。温度変化によって、これらの相が変わる『変態』が生じると、硬度は高いものの脆い状態になってしまいます。しかし、700度程度であれば、鋼もアルミのように相変態なしに接合できるのです」。低温へのこだわりは、ここから生まれた。

温度制御の条件は圧力 実験という師が教える

低温摩擦攪拌接合はまさに画期的な技術だったが、容易には普及しなかった。「現在主流となっているアーク溶接と比べると、コスト面で課題がありました。攪拌用の工具は消耗品なので、生産ラインで何百メートルも接合するとなると、かなりのコストになってしまいます」と藤井さんは語る。そこで、さらに効率的な接合技術の開発に取りかかった。次に藤井さんらが目を付けたのは、「線形摩擦接合(LFW)」と呼ばれる旧来の接合技術だ。

LFWは、左右に並べた2枚の金属板を外側から押さえ付けるように圧力を加え、片方を上下に水平移動させ摩擦を生じさせて接合するものだ

図1 革新的接合技術の実用化による低炭素社会の実現

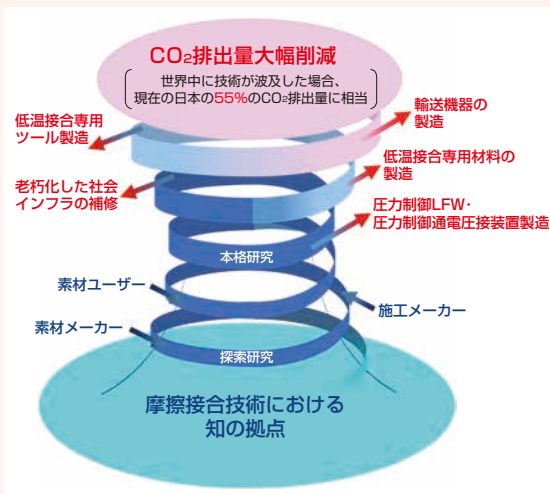
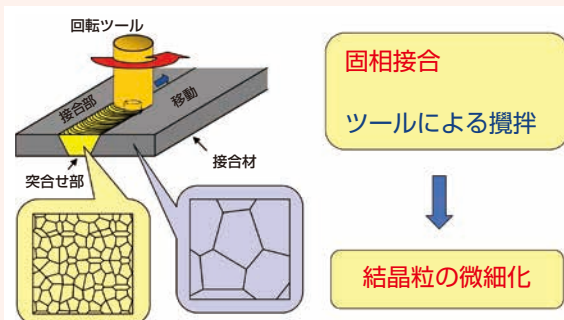


図2 摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding)



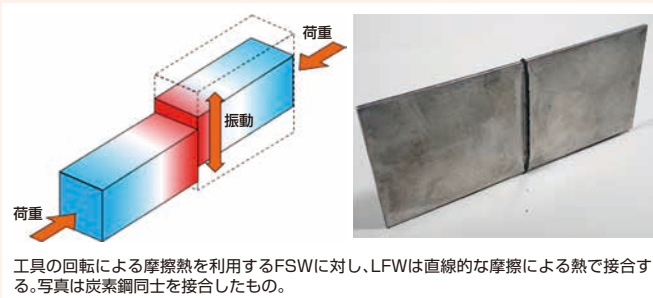
工具と接合部



接合部の裏面

FSWは、先端に突起のある円筒状の工具を回転させながら強い力で押し付けることで突起部を貫入させ、摩擦熱と工具の回転力によって部材を接合する。鉄道車両や航空機のアルミニウムなどの接合に採用されている。工具を押し当てた面には後が残る(写真左)。一方、裏面は境目がわからないほど、きれいに接合できる(写真右)。

図3 線形摩擦接合 (Linear Friction Welding)



(図3)。原理はFSWと似ているが工具は不要で、技術そのものもFSWより古い。また、FSWはアルミ板の移動速度と工具の回転速度で温度が決まることもわかっていた。それならば、LFWで温度を制御する変数は、金属板を振動させる周波数と振幅、外側から加える圧力の3つとなる。

普通、圧力が上がると温度も上がるように思うが、実験したところ、圧力を上げたら温度が下がってしまったのだ。予想を裏切る結果に困惑する学生に、藤井さんはやり直しを指示したが、再び同じ結果が出た。この奇妙な結果について数時間は議論したという藤井さん。「私たちの分野では『実験』という師が正解を教えてください。どんなに偉い先生がもっともらしい理論を唱えても、それが誤っていれば、実験が教えてくれます。今回も、実験結果を尊重し『温度が下がっているという結果が真実』という結論に達しました」。

注目したのは、圧力を上げることによって接合面からはみ出す、いわゆるバリが存在だ。「圧力を上げると、それだけ早

くバリがはみ出します。それによって熱が放出され、温度が引き下げられるのです」と藤井さんは温度変化の原因を分析した。温度を

制御する条件として圧力の存在を確認した藤井さんは、装置をコンパクト化して「圧力制御通電圧接法」という独自の接合技術を確認した(図4)。

面で接合する画期的手法 鉄道車両を見てひらめく

FSWやLFWでは摩擦で接合面の温度を上げているので、装置はどうしても大掛かりになる。そこで藤井さんが考案したのが、摩擦熱の代わりにジュール発熱、つまり、電気を利用する方法だ。2つの金属を突き合わせ、その外側から圧力を加えながら通電すると、接合面はジュール熱で温度が上がり、FSWやLFWと同じ状態を作ることができる。圧力を上げるほど温度が下がるのはLFWと共通で、鋼でも相変態なしに接合可能だ。

藤井さんらは、未来社会創造事業を活用した新しい接合技術の確立に乗り出した。圧力制御通電圧接法を軸に難接合材の接合を実現し、脱炭素社会に貢献できる接合技術の開発を提案したが、結果は不採択だった。

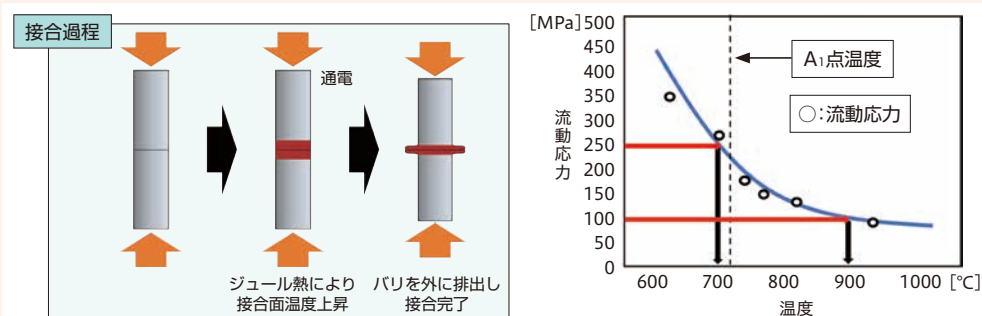
肝心の自動車産業で利用できないのではないか、と審査で指摘されたのだ。というのも、LFWも圧力制御通電圧接法も、線材や面材の端部を突き合わせる接合技術だが、自動車産業で必要とされているのは、面と面で接合する技術だったからだ。

従来、面材と面材を重ね合わせには、「抵抗スポット溶接」と呼ばれる接合法が利用されてきた。2枚の金属を重ねて銅製の電極で加圧しながら大電流を流す。すると、金属に抵抗発熱が生じて溶融部が形成され、面材が点で溶接できる。この接合技術は、鉄道車両の製造にも利用されているが、藤井さんが改善のヒントを得たのもまさに、鉄道車両だった。「ずっと考え続けていたせいか、ふと目の前に来た車両を見て、突如アイデアがひらめきました」。

それは、抵抗スポット溶接を土台に圧力制御通電圧接法として結実した接合技術の要素を組み込んだものだった。アイデアが実り、無事審査を通過した。「3回目での採択に喜んだのもつかの間、毎年厳しい審査が続きました。運営会議の先生方から多くの有益なコメントをいただきながら、必死にアイデアを絞り、研究しました」と藤井さんは振り返る。

その結果、通電用の電極とは別に加圧用の金属軸を設けることで、これまで追い求めてきた低温接合を実現した。従来の抵抗スポット溶接を土台にしながらも、接合面を溶融させずに固相のまま接合する技術で

図4 大荷重通電圧接法と接合温度低下の原理



被接合材の端部を突き合わせ、加圧しながら通電することで得られるジュール熱による発熱を熱源とする。高圧力を付与することにより、接合温度を炭素鋼の焼き入れできる臨界温度である723度(A1点温度)以下にすることができる。写真は実際に、圧力制御通電圧接法で接合した鋼棒材。中央の出っ張った部分がバリだ。(図中のMPaはメガ(メガは100万)パスカル)



図5 固相抵抗スポット接合法

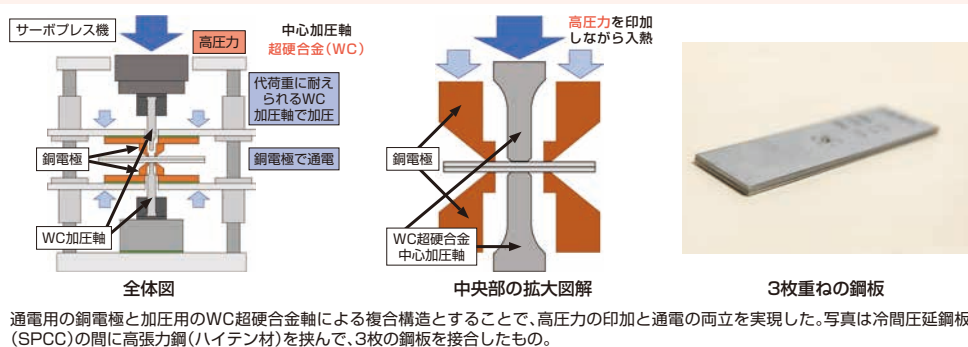
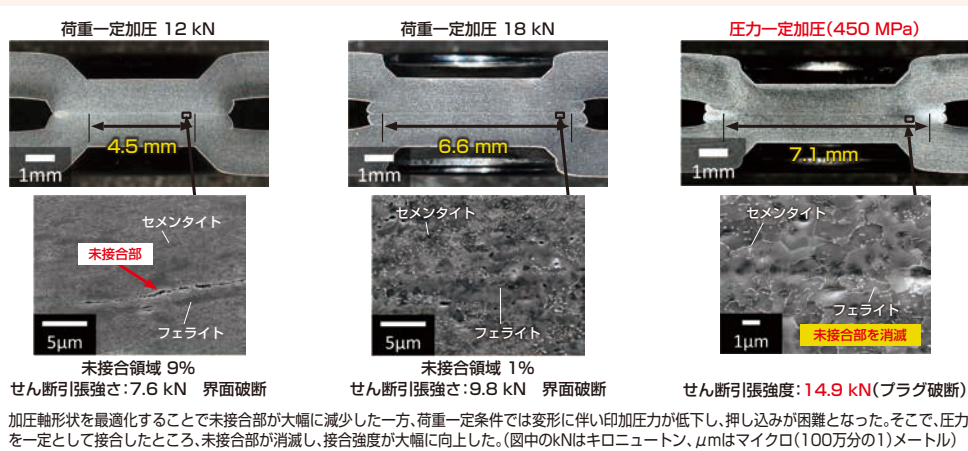


図6 固相抵抗スポット接合法の高圧力・一定加圧の検証



あることから、「固相抵抗スポット接合」と名づけた(図5, 6)。これが、ダイヘンの心をつかんだ画期的な接合技術の正体である。

大学は新しい成果を生み続ける 企業は実用化を支え社会に貢献

大阪大学接合科学研究所博士後期課程の相原巧さんが作り上げたプロトタイプを基にダイヘンが開発した試作機は、国際ウエルディングショーでも大きな反響を呼んだ(図7)。「従来の抵抗スポット溶接に比べ、環境、電力、コストの面で圧倒的なメリットがあります。国内外の自動車メーカーからも、声が掛かりました」と上山さんは語る。環境面では、接合の過程で出る溶融された鉄の酸化物である「スパッタ」が、発生しない。スパッタは品質向上の観点から後処理での除去が必要となるだけでなく、産業廃棄物として処理が必要であるため、ス

パッタの発生を抑えることは生産効率化とコストダウンにつながる。

電力については、抵抗スポット溶接では瞬間的に約8000アンペアの電流が必要だが、固相抵抗スポット接合はその半分程度だ。「確実に電気代も抑えられますから、機器の置き換えも十分に見込めます。接合品質も保証できれば、世界中の自動車産業に広がっていくと確信しています」と上山さんは展望を語る。

とはいえ、これほどの短期間で試作機が国際展示会に出品できるケースはまれだろう。「社内でも『こんな面白い技術があるのか』と、初めから皆がやる気を見せてくれました。溶接・接合に関わる事業部の協力を得られたのも、大きいですね。全員野球で取り組み、試作機の基本設計は1カ月で完了させ、さらにデザインにもかなりこだわりました」と上山さんは笑顔を見せる。まさに、企業と大学の産学連携への姿勢がしっかりかみ合った結果だ。

一方で、大学のリソースを踏まえれば、研究者だけでは社会実装を実現するのは難しい、とも指摘する。「企業は大学の研究成果をリスペクトし、優れた技術の社会実装をサポートしようという姿勢がないと、うまくいかないでしょう。良い技術を実用化し、社会に貢献することが私たちの使命でもあります」と自社の姿勢を説く。

対して大学人の藤井さんは、常に新しい研究成果を生み出し続けることこそ、自らの使命だと訴える。その目線は、研究者というより教育者のそれを思わせる。「学生に楽しく学んでもらい、卒業後も楽しく人生を送ってもらいたいと思っています。そのために常に新しいものを生み出そうとする『心』を、学生に植え付けるのが、大学で教育すべきことです」。

わくわく感を味わわせ、モチベーションを高めてもらうには、教育者として何をすればいいのか。その点を常に心掛けてきたからこそ、固相抵抗スポット接合という新技術の開発に至るさまざまな発見や成果を得ることができた。藤井さんの目は、接合技術が変革する社会と、その先を担う次代の研究者たちを見据えている。(TEXT: 茂木俊輔、PHOTO: 石原秀樹)

図7 国際ウエルディングショーで展示された固相抵抗スポット接合



近年、産業用機械でも機能性とデザイン性が求められる。この試作機も、ダイヘンの企業カラーの青が映える美しいデザインだ。展示会場で行われたプレゼンテーションの様子は、ウェブ上で公開している(<https://daihen.oatnd.com/weldingshow2022-jp>)。(画像提供: ダイヘン)

どうやって
実現する？

明るく豊かな ゼロエミッション 社会

連載
【第5回】

浅田 龍造 Asada Ryuzo

低炭素社会戦略センター 主任研究員

河原崎 里子

Kawarasaki Satoko

低炭素社会戦略センター 研究員

電力貯蔵システムとしての 「新揚水発電」



若手商社員・皆川豊を主人公としたストーリー仕立てで、低炭素社会戦略センター(LCS)が発行する提案書を読み解く連載の第5回。前回、LCSの井上智弘客員研究員と古木真研究員から2050年の電源構成シナリオを学んだ皆川。今回はLCSで電力貯蔵システムとしての新揚水発電について研究している浅田龍造主任研究員、河原崎里子研究員に再生可能エネルギーへの転換について聞いた。

再エネの拡大に不可欠 電力貯蔵機能と調整機能

皆川：今回は「新揚水発電」という新しい提案があると紹介いただき、お話を伺いに来ました。

浅田：興味を持ってきてくれてありがとうございます。本題に入る前に、揚水発電そのものは知っていますか？

皆川：もちろんです。余った電気を下池から上池へ水を吸い上げておいて、電気が足りなくなったら水を下

池に落下させてタービンを回し、発電することですね。

浅田：その通り。電気を貯めておく、いわば「蓄電池」として、日本では昭和の初め頃から使われてきました。石炭火力発電や原子力発電は簡単には止められないので、夜中の余剰電力で揚水して、必要な時に発電する。これで全体の燃料費を下げています。今は再生可能エネルギーが増えてきて、例えば太陽光発電は天気

間がかかります。そこで、比較的小さなものができないか検討しました。それが小規模分散型の「新揚水発電」です。

既存の多目的ダムを活用 小型安価で環境負荷も低減

浅田：揚水発電は上池と下池のペアが必要ですが、既存の多目的ダムを下池として使えば、追加で上池を建設するだけで済むので、環境への負荷は少なく建設費用も抑えられると考えました(図2)。

皆川：なるほど！ゼロから発電所を作るのではなく、既存のダムを活用するわけですね。

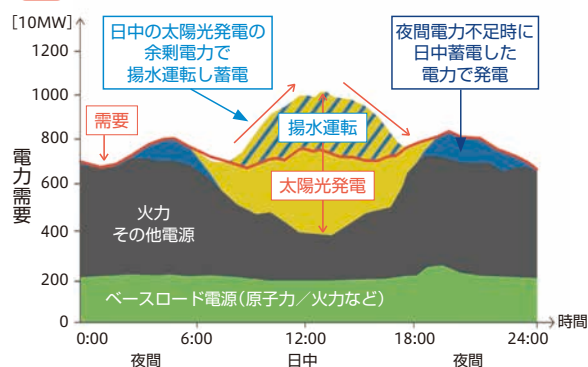
浅田：日本に多目的ダムは2700カ所もあり、全国に分散して作ることができます。上池は直径100メートルの小型サイズで、下池から高さ200メートル以上の場所に作ります。条件に当てはまる多目的ダムを調べたら、全国で1000カ所弱ありました。

皆川：そんなに！山地が多い日本の地形に合っているということですね。ちなみに、どうやって調べたのですか？まさか、全てのダムを見に行ったとか？

浅田：いやいや、候補地の洗い出しは地図を使って、河原崎さんと一緒に東日本と西日本に分かれて行いました。それでも2〜3カ月はかかりましたよ。

河原崎：日本ダム協会が出している「ダム便覧」で位置を調べ、そこに国土地理院の地図を重ねて、落差200

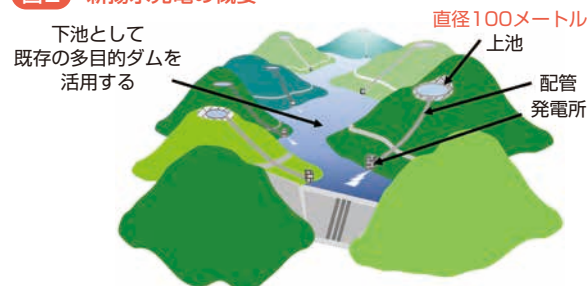
図1 今後の揚水発電活用例



太陽光発電の過剰発電時に揚水し、電力不足時に発電する。

出典：2022年度 ウェビナー「2050年 ゼロエミッションの社会像 ～シナリオとプラン～」
新揚水発電の提案－日本における電力貯蔵システムとして－(https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/webinar20220624-7.pdf) 図2より筆者編集

図2 新揚水発電の概要



基本仕様 落差:200m 最大出力:12MW
流量:7.3m³/s 上池貯水量:131,000m³

出典：日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト(Vol.4)
－気候変動に対応した提案－(fy2021-pp-04 表1・図1)より筆者編集

メートルの場所が周りにあるか、下池からの距離が1500メートル以内か、直径100メートルの上池が置けるかを検討しました。自然公園がある場所や、土砂崩れが起きやすい地域も避けて選びました。

皆川：ずいぶん地道な作業でしたね。良い場所があったとして、実際に造るとなると、どんな工事を行うのですか？

浅田：上池は深さ10メートルで造成します。そこから下池に配管を通して、発電所を建てて発電機を置く。上池1つで1万キロワット級の発電所が作れます。1基の建設費は最も安くても21～22億円、平均でも27億円と想定しています。

皆川：ダムを造るには数千億円かかると聞いたことがあるので、それと比べると、小型でコストもかなり抑えられますね。ただ、自然の中に新たな設備を作ること、環境破壊との批判も出るのではないですか。

浅田：当然あると思います。ただ、その規模は極端に少ないですし、水害対策や、ダム管理用の道路を林業用道路と兼用することで荒れた山の管理ができる点も含めたら、むしろ環境を良くするという話もできます。

皆川：他のメリットも示して提案するということですね。ところで、水害対策というと？

災害時の防水や渇水対策にも有効 技術以外の「調整」が普及のカギ

浅田：多目的ダムでは、洪水が来る前に、貯めていた水の一部を事前放流します。予報通り雨が降ればいいですが、降らなければ、流した水を無駄にしまいます。

皆川：水を巡って争いが起こるくらいですから、無駄にしたら利権者さんは怒るでしょうね。

浅田：その点、新揚水発電だと、洪水が来るとわかればあらかじめポンプで上池に水を吸い上げておいて、終わってからゆっくりと下池に流せばいい。上げ下げするだけなので、水を

無駄にすることはありません。また、上池を20メートルとさらに深くすれば、渇水用の水を貯めることもできます(図3)。

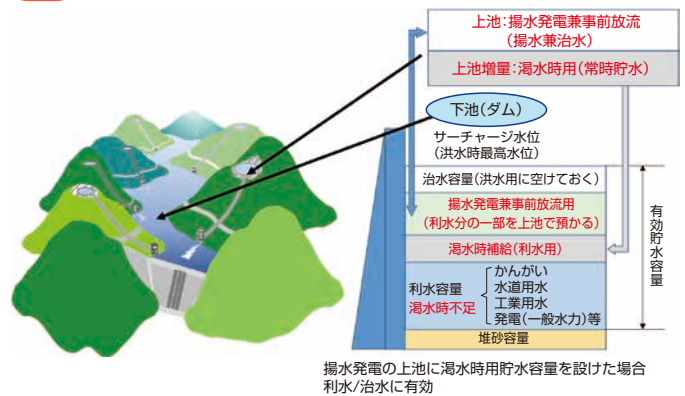
皆川：水を無駄にせずに防水や渇水対策ができる点でも魅力的です。この提案に興味を持っている方も、多いのではないですか？

浅田：そうですね、企業などからの問い合わせもいくつかありますが、理想は市や県などの自治体に動いてもらうことです。ダムには水の利権者がたくさんいるので、その調整ができるのはダムを管理している自治体などですね。また、上池を作る土地の所有者との調整もあります。配管の先々で所有者が違ったり、すでに所有者がわからなくなっている場所もあり、自治体が土地を預かる形にするなど、法律を改正する必要も出てきています。

河原崎：太陽光パネルの設置にしても、地熱発電にしても、土地所有の問題で行き詰まってしまうのは同じなので、大きく見直す必要があり、今がその時期だと思います。

浅田：自治体が取り組む場合は、まず脱炭素の実現を地域全体としてどう目指したいかの青写真を描いて、太陽光や風力発電を増やすならおのずと蓄電機能が必要だと。そのうえ、自分の地域にはダムがあると。新揚水

図3 貯水量の容量配分例



上池の深さをさらに10メートル増し、渇水時の水を貯める。

出典：日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト(Vol.4)
—気候変動に対応した提案—(fy2021-pp-04 図3)より筆者編集

発電の適地であれば、技術的に難しいことはないの、後はどう予算化し、実現できるかです。

皆川：今、多くの自治体が2050年脱炭素の実現を目指しているの、ビジョンにマッチして、制度面での調整や予算化がうまくできれば、広がりそうですね。

浅田：再エネを主力化しようとするれば、電力調整機能は必ず要ります。モデルケースがうまくできて、それを全国に水平展開できれば、我々も出てくるかもしれません。地域をネットワークで結べば、天候に応じて余った電力を融通し合って揚水の電力にすることもできます。太陽光発電と風力発電のポテンシャルも全国に散らばっているの、理論上は実現可能です。

皆川：技術以外の面でうまく調整ができれば、実現への期待も膨らみますね！今後の動向をわが社も注目しています。

—なお、物語は取材を元にしたフィクションである。

(TEXT:岩崎茜、PHOTO:石原秀樹)

ワンポイントアドバイス

電力中央研究所 GI研究本部 ネットワーク技術研究部門 研究部門長

永田 真幸

再エネの主力電源化にはさまざまな調整力が必要であり、新揚水発電はこれに資するポテンシャルを持つ技術と考えられます。今後、費用と便益をより精緻なものとすると共に、パイロットプラントなどの取り組みを通じて、運用面の深掘りや制度面の改善を図っていくことが期待されます。

研究成果

創発的研究支援事業

研究課題「昆虫の求愛コミュニケーションを担う聴覚機構の解明と制御」

雄の蚊の「耳」を操る物質を発見

繁殖を抑制する新たな方法論の開発に期待

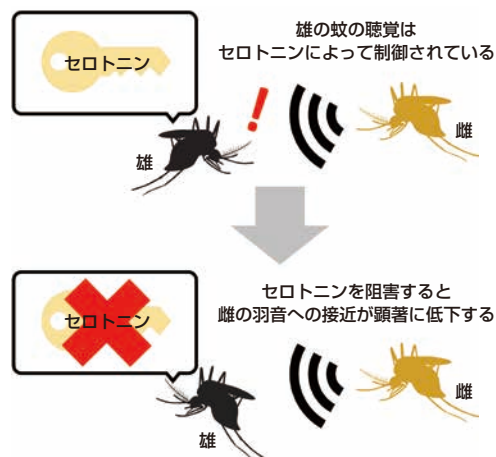
蚊はデング熱などの感染症を媒介することにより、人間を世界で最も死に至らしめている生き物です。雄の蚊は配偶パートナーを見つけるために「蚊柱」と呼ばれる集団を作って雌が飛んでくるのを待ちます。蚊柱に雌が紛れ込むと、雄が卓越した聴覚で雌の羽音を聞きつけて接近し、交尾を行います。名古屋大学大学院理学研究科の上川内あづさ教授らの研究チームはこの接近行動に着目し、聴覚を標的とした繁殖の制御法の確立を目指しています。

今回、研究チームは、吸血する蚊の一種である「ネッタイシマカ」の聴覚機構に、代表的な神経伝達物質である「セロトニン」がどのような影響を与えるか調べました。まず、蚊の聴覚器で強く発現するセロトニン受容体を同定したところ「5-HT₇」と呼ばれるタイプの受容体を介して、セロトニンが蚊の聴覚器の機能を制御する可能性が示されました。これは世界初の発見です。次に、セロトニン関連の化合物を注入した雄の蚊の聴覚機能を解析しました。レーザードップラー振動計で蚊の聴覚器の振動の様子を測定したところ、聴覚器の振動周波数が大きく変化することがわかりました。さらにセロトニン合成阻害薬を経口投与した雄の蚊で

は、雌の羽音を模した音への接近行動が顕著に低下しました。以上の結果は、ネッタイシマカにおいて、雄の聴覚器の機能がセロトニンによって制御されることを示しています。

今後、セロトニンに着目した研究が進み、ネッタイシマカの「耳」を介した蚊の繁殖を抑制する新たな方法論の開発につながることが期待されます。最近では殺虫剤への耐性を持つ蚊が増えているため、野外での応用も視野に入れた研究チームの研究開発から引き続き目が離せません。

雄の蚊の聴覚とセロトニンの関係



研究成果

戦略的創造研究推進事業さきがけ

研究領域「持続可能な材料設計に向けた確実な結合とやさしい分解」

研究課題「光安定材料への酸添加による協働的光分解技術の創成」

酸があるときだけ分解する光分解性材料

環境にも産業にも有益な材料の創成に道

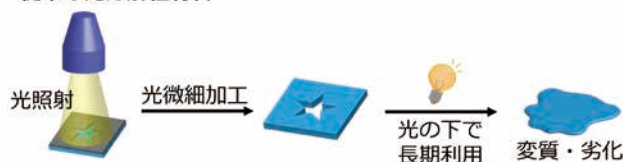
環境調和型材料の1つとして、人工光・自然光により分解する「光分解性材料」が注目を集めています。医療・電子などのさまざまな産業で利用されていますが、皮肉なことに分解しやすいことが、光分解性材料を身の回りで長期間利用する上で大きな制約となっていました。例えば、ブラックライトの光を当てることで鮮やかに光る発光材料は、光を照らすことが前提のため、光分解技術との融合が困難とされてきました。

東京大学大学院総合文化研究科の正井宏助教らの研究チームは、光に対して長期間安定でありながら、光と酸を同時に作用させると分解できる、安定性と分解性を併せ持った新材料の開発に成功しました。具体的には、高分子材料の1つであるポリメタクリル酸メチルに、架橋材となる白金錯体を少量加えたゲル材料を作製しました。この白金錯体は、波長365ナノ(ナノは10億分の1)メートルの紫外光と酸の塩化水素がそろったときのみ、白金-炭素結合の分解反応が進行します。これにより、安定性・分解性を持つゲル材料であることが確認できました。また、これらの性質を利用

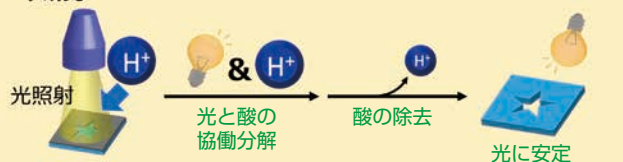
することで、光を用いた制御が発光材料に対しても可能になりました。

光と酸による協働分解技術は、微細性や遠隔制御に優れた光加工技術を、発光材料を含むさまざまな「光の下で利用する機能性材料」に付与できることを意味しています。光の下でも長期的に使用可能かつ、使用者が意図したタイミングで光分解できるプラスチック材料など、環境にも産業にも有益な材料の創成に貢献すると考えられます。

従来の光分解性材料



本研究

従来の光分解性材料と本成果の材料における光安定性の差を示す概念図(H⁺:酸)

研究成果

創発的研究支援事業

研究課題「プロセスに強いMIの創出と複合機能材料での実践」

実験データを電子ノートで記録しAI解析 研究DXやオープンサイエンスの促進に貢献

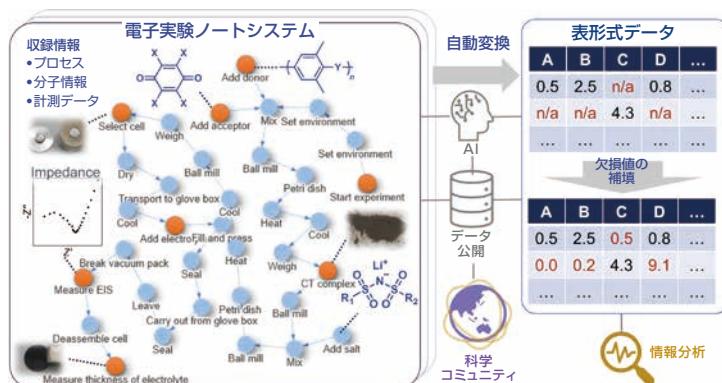
科学研究の成果を記録した研究者の実験ノートは、膨大な情報量となるため、データ解析には非常に多くの作業量と時間を要します。一方、学術論文や特許などの公知文献では、実験時の気温や湿度、試薬の合成日といった条件、失敗の結果などは割愛されることが多く、実験の結果が網羅されているとは言い切れません。そのため、科学研究に関わる全ての情報を統合的に管理・展開するデータベースの確立が望まれていました。

早稲田大学理工学術院の畠山敬講師らの研究グループは、日々の化学・材料実験の操作と結果を電子実験ノートとして記録し、それらを自動で解析する人工知能(AI)システムを構築しました。このシステムは、情報間の関係性を点と線でつなぐ「グラフ構造」で記録します。このデータ形式は研究者になじみ深いフローチャートに似ており、AIによる処理も容易なため、AIと研究者双方にとって適した形式といえます。グラフデータの分析には、特定の実験操作の有無を判定できるアルゴリズムの「Fingerprint」を採用し、人間が理解しやすい形で

データベースを数値化できる仕組みになっています。

また、今回構築した電子実験ノートシステムを用いて「高分子固体電解質の実験研究」を行い、有効性を評価しました。その結果、室温で液体に近い伝導度を示す高分子固体電解質の最適な製法や、高性能の鍵となるメカニズムの解明に至りました。今後、さまざまな材料研究への展開、研究DX(デジタルトランスフォーメーション)やオープンサイエンスへの貢献に注目が集まります。

電子実験ノートとデータ解析のスキーム



日々の材料実験の様子をグラフ構造で記録。AIの自動解析によって、新材料の発見につながる構造・実験因子を抽出した。

研究成果

ムーンショット型研究開発事業

ムーンショット目標2「2050年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現」

研究開発プロジェクト「臓器連関の包括的理解に基づく認知症関連疾患の克服に向けて」

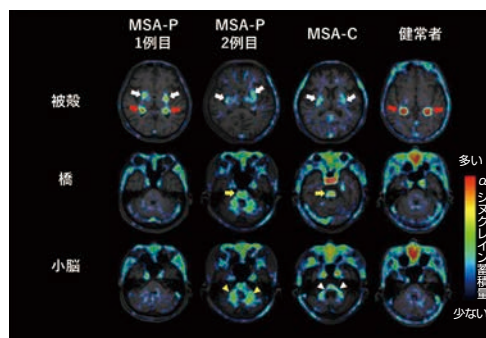
異常たんぱく質を生体脳で画像化 パーキンソン病などの予防・治療薬開発に光

アルツハイマー病やパーキンソン病などの脳の病気は、異常たんぱく質が脳内に蓄積することで発症し、運動障害や認知機能の低下などの症状を引き起こすと考えられています。このうちアルツハイマー病の中核病体をなすタウたんぱく質の病変は画像化の技術が確立していますが、パーキンソン病を引き起こす異常たんぱく質「 α シヌクレイン」は、タウ病変よりも脳内での蓄積量が少なく、生体脳で可視化する技術はいまだに確立されていません。

量子科学技術研究開発機構量子生命・医学部門の樋口真人部長らの研究グループは、エーザイ、小野薬品工業、武田薬品工業の製薬3社と共同で、脳内の α シヌクレインの蓄積や分布を高いコントラストで可視化する放射性薬剤「 ^{18}F -SPAL-T-06」を開発しました。研究では、パーキンソン症状などがみられる多系統萎縮症の患者3人と健常高齢者1人を対象に、開発した薬剤を用いた脳の画像診断検査を行いました。その結果、患者の脳深部に ^{18}F -SPAL-T-06の高集積が認められ、その部位と蓄積量が過去の研究で報告されている α シヌクレイン病変の分布と一致することがわかりました。

さらに、多系統萎縮症患者と健常高齢者の脳標本を比較したところ、 ^{18}F -SPAL-T-06が α シヌクレイン病変に強く結合したことが確認されたことから、この薬剤が α シヌクレイン病変を検出できることを実証しました。今回の研究で実現した異常たんぱく質の脳内蓄積画像化は、パーキンソン病や関連認知症などの病態解明や治療薬開発にも役立つと考えられ、認知症の発症予測・予防にもつながると期待されます。

多系統萎縮症患者と健常高齢者における α シヌクレイン蓄積画像の比較



パーキンソン症状優位型(MSA-P)ならびに小脳失調症優位型(MSA-C)多系統萎縮症の患者において、 α シヌクレインの蓄積を示す ^{18}F -SPAL-T-06の集積が確認された(黄色と白の矢印・三角部分)。赤矢印は、 α シヌクレイン蓄積とは無関係と考えられる脳実質外の脈絡叢(脳室に存在する血管に富んだ組織)での ^{18}F -SPAL-T-06の集積を示す。

さがける 科学人

vol.121

島田 裕子 Shimada Yuko

筑波大学 生存ダイナミクス研究センター 助教

Profile

和歌山県出身。2006年京都大学大学院生命科学研究科統合生命科学専攻博士課程修了。博士(生命科学)。マイエール大学にてHFSP長期フェロー、筑波大学生命領域学際研究センター研究員などを経て、14年より現職。19年よりさがけ研究者。



爪の上のニホンアソバラコマユバチ。ショウジョウバエを乗っ取る巧みな生存戦略には本当に驚かされます。

Q1. 研究者の道へ進むきっかけは？

A1. 昆虫標本の美しさが原体験 細胞のメカニズムを研究

小学生の時、博物館の体験教室で昆虫標本の作り方を習いました。展翅板の上で広げたチョウの翅の模様や付属肢の形が美しく、その思い出が強烈な原体験となって、今に至ります。大学では分子生物学に興味を持ち、ショウジョウバエを用いた研究で、遺伝子についての知識を深めました。

大学院では、上皮平面上の非対称性(平面内細胞極性)を決めるメカニズムを研究しました。研究開始当時は、昆虫の体表の毛の向きを調べるというマイナーな研究分野でしたが、後に脊椎動物の原腸陥入時の細胞運動や神経発生にも関与することがわかり、今では発生過程の重要なシグナル伝達経路の1つとして広く認識されています。

学位取得後は、発生プログラムの柔軟性を支える分子機構を知りたいという思いから、生殖細胞やステロイドホルモンの研究に従事しました。そんな中で、偶然出会ったのが、ショウジョウバエを宿主とする寄生蜂です。

Q2. 具体的な研究内容を教えてください

A2. 「飼育殺し型」寄生蜂で 毒の作用の組織選択性を発見

昆虫は、気温・光・栄養条件などのさまざまな外環境を感知し、神経を介してホルモン合成のタイミングを調整しています。そこで、昆虫の体内環境を攪乱する因子の1つとして、寄生蜂ニホンアソバラ

コマユバチを飼育し始めました。

当初は、寄生によって宿主のホルモン合成が抑制されるのではないかと予想していました。ところが、宿主が正常に蛹化したことから、ホルモン合成は正常に行われたことが示唆されました。予想が外れたことにはがっかりしつつも、いつもの習慣で宿主幼虫を解剖したところ、将来の成虫組織(成虫原基)がどうしても見つかりませんでした。

解剖を失敗したかもしれないと思って、同じ実験を何回繰り返しても同じ結果でした。結局、寄生蜂の毒の作用には組織選択性があり、宿主ショウジョウバエ幼虫の脳神経系や内分泌系には作用しない一方、成虫原基だけを溶かすことによって、飼育殺し寄生の成立に寄与することが、初めて明らかになりました。

Q3. 今後はどんな研究に取り組みたいですか？

A3. 未知の世界に感じる可能性 分子生物学の新機軸を開く

現在の地球上に、寄生蜂は約20万種類生息すると推定されていますが、どのよ

うにして宿主の体に乗っ取るのか、寄生の分子機構はほとんど明らかにされていません。ニホンアソバラコマユバチ1種でさえ、毒腺内に約200種類ものたんぱく質成分を持ち、そのほとんどが機能未知であることが、これまでの研究からわかりつつあります。

既存のドメイン予測アルゴリズムでは機能を特定できない新規分子がまだまだたくさんあるという事実、大きな可能性を感じています。今後は、複数の寄生蜂種間の比較ゲノム解析やゲノム編集技術を用いた変異体作製などを通じて、寄生蜂の宿主特異性について、研究を深めていきたいです。

これまではモデル生物・ショウジョウバエを用いた研究を中心に行ってきましたが、今後は寄生蜂のように、多様で知られていない生態を持つ「非モデル生物」を使って、モデル生物と遜色のない分子生物学・発生生物学の新機軸を開く

ことを目標に、研究を盛り上げていきたいと思っています。

(TEXT: JST広報課 小倉一恵)



実験対象を解剖している様子。失敗を糧に、自身が納得するまで研究を繰り返すことで、新たな発見が得られます。

「非モデル生物」研究を
盛り上げたい!!

