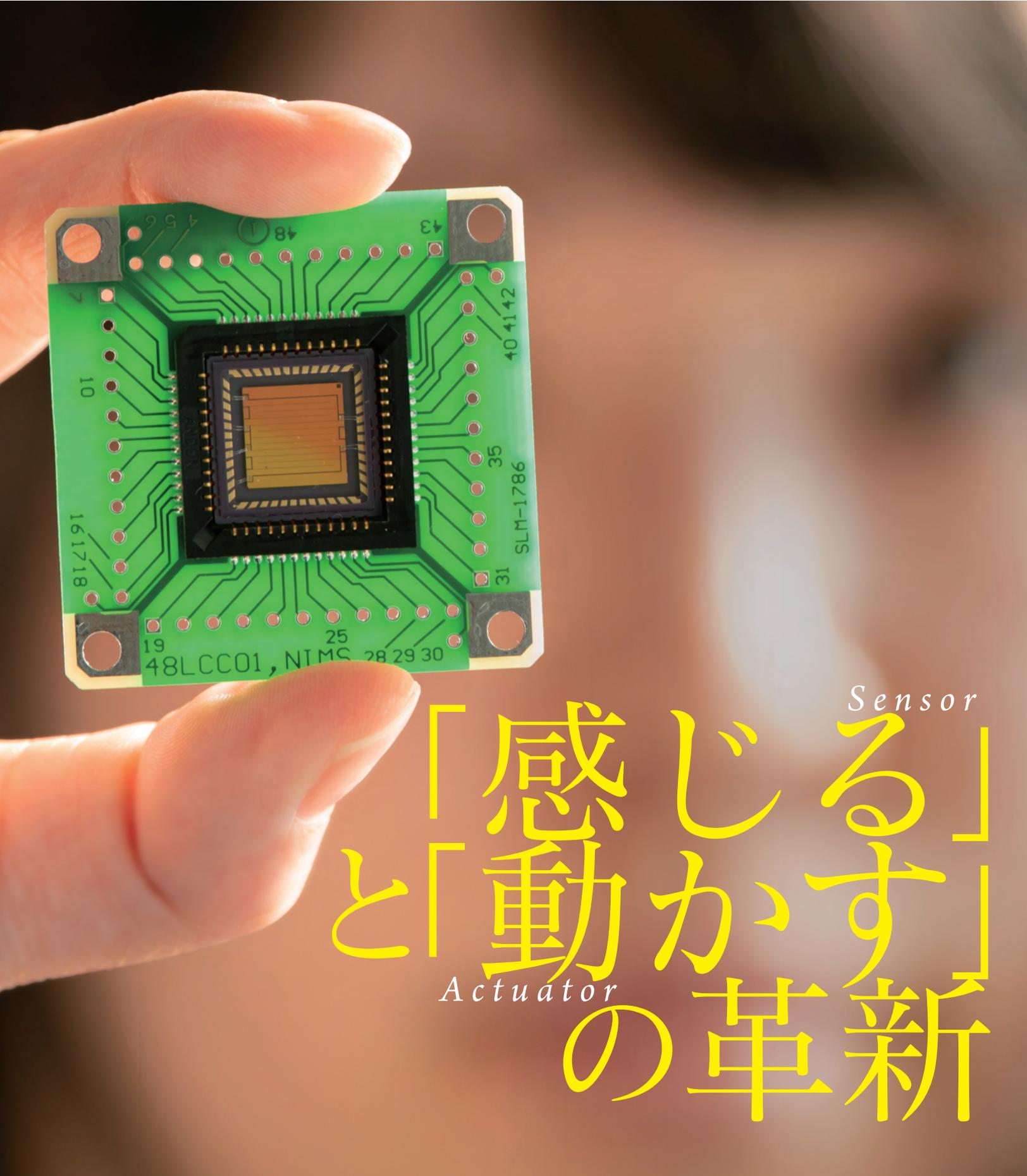


# NIMS NOW No. 1

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE



Sensor

# 「感じる」と「動かす」の革新

Actuator

狩猟社会、農耕社会、工業社会、情報社会に続く新たな社会——Society 5.0。

フィジカル空間(現実空間)をサイバー空間(仮想空間)に投影し、

AIやIoT、ロボット、ビッグデータなどの先端技術を用いて

社会的課題の解決を目指す。

ただし、フィジカル空間の様々な情報をサイバー空間に送るには

情報を捉えて電気信号に変えるセンサが必要だ。

そして、サイバー空間で得られた最適解をフィジカル空間で実現するには

電気信号を実際の動きに変えるアクチュエータが必要だ。

Society 5.0の実現のために、

今後どのようなセンサとアクチュエータが求められるのか。

NIMSの研究者たちは、この大きな課題と向き合っている。



Sensor  
「感じる」  
と「動かす」  
Actuator  
の革新



竹内 正之

Masayuki Takeuchi  
機能性材料研究拠点  
ポリマー・バイオ分野  
分野長

川喜多 仁

Jin Kawakita  
機能性材料研究拠点  
電気・電子機能分野  
電気化学センサグループ  
グループリーダー

研究者  
に聞く

# Society 5.0 の必須アイテム センサとアクチュエータ

2018年に始まったセンサとアクチュエータの開発プロジェクト。  
Society 5.0の実現に欠かせないデバイスやシステムをNIMS独自の視点で生み出すことを目指している。  
プロジェクトリーダーであり、センサ開発領域を率いる川喜多 仁と、  
アクチュエータ開発領域を束ねる竹内正之にプロジェクトの現在と今後を聞いた。

これまでにない  
センサとアクチュエータをつくりたい

——プロジェクトの背景と目指すところは？

**川喜多**：Society 5.0の概念は、フィジカル空間（現実の世界）で大量に集めた情報をサイバー空間（コンピュータやサーバの中）で解析し、問題の解決法や提案をまたフィジカル空間に戻すというものです。そのため多様な情報を集めたいというニーズがあるのですが、情報の中には、既存のセンサでは能力が足らなくて十分に捉えられな

いものや、そもそも捉えるためのセンサがないものもあります。そうした情報を捉え、サイバー空間に送るセンサをつくるのが、このプロジェクトのセンサ研究の目標です。  
一方、サイバー空間での解析結果をフィジカル空間に戻すためには、モノや人に働きかけるアクチュエータが必要です。特に、人に働きかけるアクチュエータは、柔らかい材料で柔らかい動きをすることが求められますが、そういうアクチュエータは世の中に普及していませんから、その実現がアクチュエータ研究の大きな目標となっています。

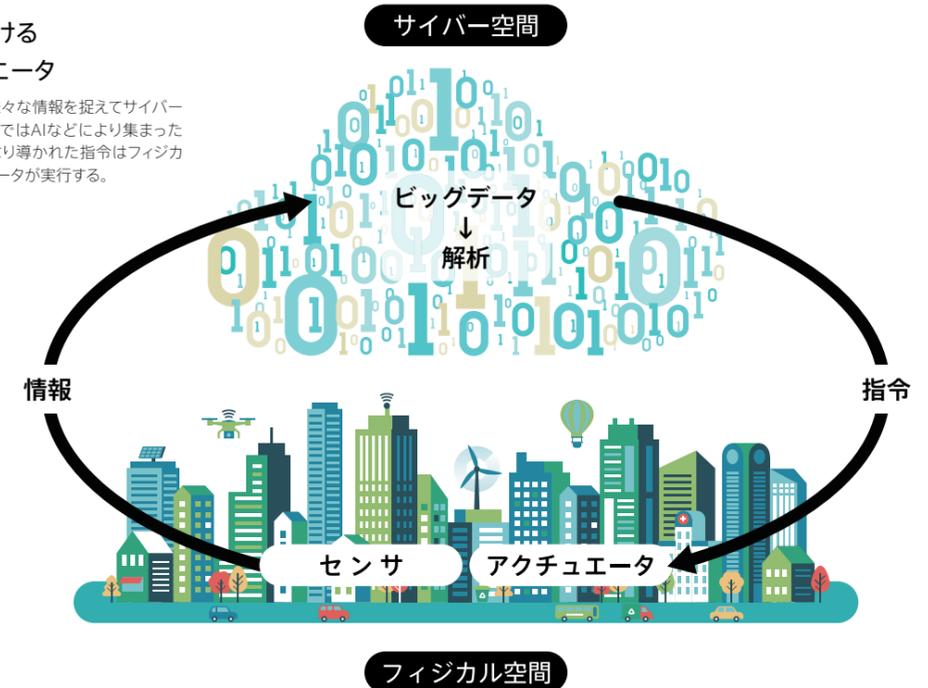
——どちらもチャレンジングな目標ですね。

**竹内**：はい。Society 5.0では、センサは計測結果を電気信号に変えるものでなければ、捉えた情報をサイバー空間に送れません。そこが難しいのだと思います。このプロジェクトでは、たとえば、ガスの流れや空気中の微細な水滴の量など、これまで電気信号に変換できなかったものを変換しようと、研究者が知恵を絞っています。

**川喜多**：そうした「知恵」を具現化できるのは、NIMSが得意とする材料や微細加工の技術があるからです。たとえば、材料

## Society 5.0における センサとアクチュエータ

センサでフィジカル空間の様々な情報を捉えてサイバー空間に送り、サイバー空間ではAIなどにより集まったデータを解析する。解析により導かれた指令はフィジカル空間に送られ、アクチュエータが実行する。



に微細なパターンをつくりこむことで新たな機能を発揮させる「メタマテリアル」を使うことで、ガスや生体分子の検出感度を飛躍的に上げるといった成果が上がっています（ガスについてp10参照）。

**竹内**：アクチュエータのほうは、金属や無機材料をおもな研究対象としてきたNIMSにはシーズがほとんどなかったのですが、プロジェクトが始まり研究者がテーマを持ち寄ることで、柔らかいアクチュエータという領域の目標が定まりました。テーマは大きく二つあり、一つはイオンを含む高分子の膜に電圧をかけると曲がるというもの、もう一つは形状記憶高分子(p14参照)です。

**川喜多**：曲がる高分子の膜は、触感を再現する「ハプティクス」への利用が期待されていますね(p12参照)。たとえば、リモートでの触診が可能になりますから。

**竹内**：その通りです。ただし、柔らかいアクチュエータには課題もあります。それは、柔らかい材料に力を出させるのが難しいことです。膜状の材料に力を出させるにはたくさん積み重ねる必要がありますが、積み重ねると動きが遅くなってしまいます。この課題の解決に向けて、現在研究中の材料の改良を進める一方で、新しい原理のアクチュエータの基礎研究にも取り組んでいます。

躍動するプロジェクトで  
開発をスピードアップ

——このプロジェクトの進め方の特徴は？

**川喜多**：トップダウンでテーマが決まる「チーム型」と、NIMS内からテーマを公募する「個人型」の両輪で動いていることです。さらに、毎年、センサやアクチュエータ、IoTやAIなどの各分野のトップレベルの有識者の方々にテーマの進捗を説明し、進捗度合いや方向性を評価していただいています。公募でどんどん新しいテーマが加わる一方、きびしい評価によってプロジェクトから外れるものもあり、毎年テーマが入れ替わっています。非常に躍動的なプロジェクトだと思います。

**竹内**：私自身はチーム型のテーマに参加しており、新しい原理のアクチュエータの可能性を探っていますが、同じチームにはセルロースを研究している人や、電極を開発する人もいます。そういうメンバーが共同作業を通じてチームとしてチャレンジングな研究ができるところが、チーム型のよさだと思います。一方、個人型は、一人ひとりの研究者がチャレンジングなテーマを提案することで、プロジェクトに力を与えていると感じます。

——今後の展開は？

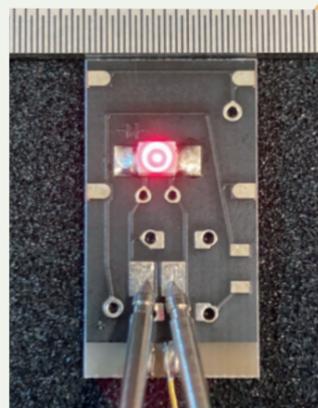
**竹内**：Society 5.0が大きな後押しとなって、NIMSの有機材料・高分子研究者がアクチュエータという目標に向けて結束しました。ほぼゼロからのスタートでしたが、材料開発だけでなく、実際に動かすところまで比較的短期間で到達できたことは大きな自信になりましたね。まだ、課題はいろいろありますが、アクチュエータを実際にどういう場面で使うかまで提案できるように皆でがんばっていきます。

**川喜多**：センサもアクチュエータも、このプロジェクトを通じて、材料からデバイスやシステムをつくるまでのノウハウやチャンネルが蓄積され、開発期間が短くなったことがこれまでの大きな成果です。そうした蓄積を生かすことで、今後は、新しい材料が見つかったときに、素早くデバイス化できると期待しています。また、NIMSはもともと材料や素材メーカーとの連携がさかんですが、このプロジェクトでは、さらに出口寄りの製品をつくる企業との連携も多いのが特徴です。そういう企業の力も借りながら、開発したデバイスの社会実装を進めていければと思っています。

# 研究テーマ紹介

センサ・アクチュエータプロジェクトでは、ヘルスケアや農業に加え、環境計測なども含めた幅広い応用を目指してデバイスやシステムを開発しています。ここでは、現在進行中の研究テーマを紹介します。

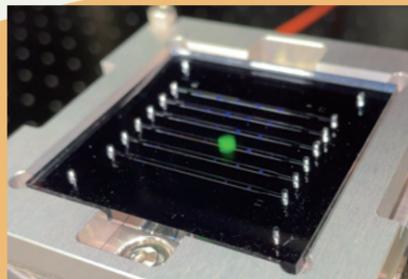
## ヘルスケア



### 光センシング光源

担当者: 中西 貴之  
グループ: 蛍光体グループ  
応用分野: ヘルスケア

NIMS独自の蛍光体を用いて、これまでなかった近赤外光の小型高出力光源を開発。既存検出器と組み合わせればバイタルや農業・食品分析が可能。



### 生体分子センサ

担当者: 岩長 祐伸  
グループ: プラズモニクスグループ  
応用分野: ヘルスケア

メタマテリアル表面を用いることで、DNAやタンパク質の高感度検出を可能にした汎用的バイオセンサ。早期疾患診断への応用が可能。



### 触覚アクチュエータ

担当者: 吉尾 正史  
グループ: 分子メカトロニクスグループ  
応用分野: ヘルスケア  
p12参照



### 歯周病菌センサ

担当者: 岡本 章玄  
グループ: 電気化学ナノバイオテクノロジーグループ  
応用分野: ヘルスケア

発電量が少ない歯周病菌の量を電気で測れるように工夫したセンサ。歯周病を簡便に検知できるので、介護施設などでの利用に期待。



### 形状記憶縫合糸

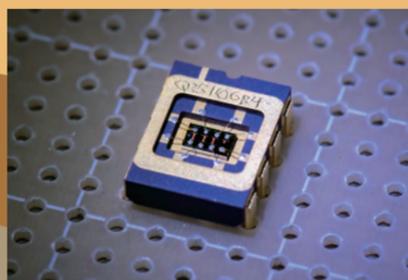
担当者: 荏原 充宏  
グループ: スマートポリマーグループ  
応用分野: ヘルスケア  
p14参照



### 嗅覚センサ

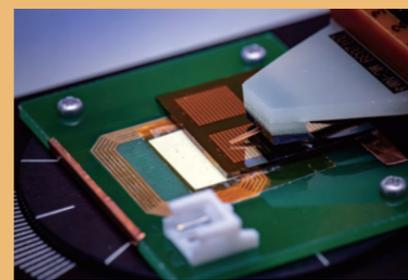
担当者: 吉川 元起  
グループ: 嗅覚センサグループ  
応用分野: 農業/ヘルスケア

複雑なニオイを複数のセンサで計測し、ニオイのパターンをAIで解析。農畜産業や医療・ヘルスケアなど様々な分野への適用を研究中。



### 環境ガス可視化

担当者: 宮崎 英樹  
グループ: プラズモニクスグループ  
応用分野: 農業/環境/その他  
p10参照



### 磁気センサ

担当者: 中谷 友也  
グループ: 磁性材料グループ  
応用分野: ヘルスケア/環境/その他  
p8参照



### ペーパーアクチュエータ

担当者: 相見 順子  
グループ: 分子メカトロニクスグループ  
応用分野: 環境/その他

セルロースのナノファイバーにイオンを含ませた「紙」。電圧をかけると、イオンの動きで曲がる。

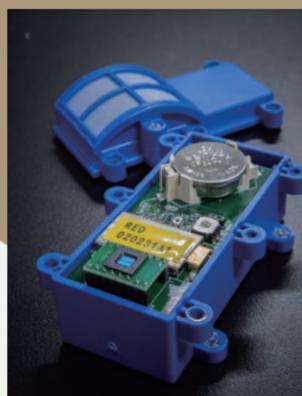


### 水素センサ

担当者: 鈴木 拓  
グループ: セラミックス表面・界面グループ  
応用分野: 環境/その他

表面と電極界面での反応を組み合わせることで、水素だけを高感度に計測できるようにしたセンサ。水素ステーションの漏れ検知などに適用可能。

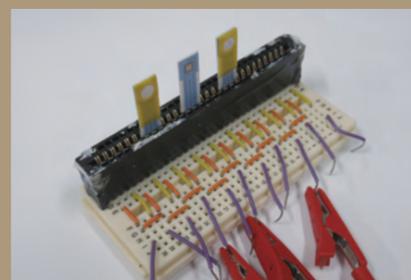
## 農業



### 湿潤センサ

担当者: 川喜多 仁  
グループ: 電気化学センサグループ  
応用分野: 農業/ヘルスケア

空気中の微小な水滴の量を高精度検出。植物の病気の原因となる結露をごく初期に発見できる。指先の発汗量計測で熱中症予防にも。



### アルデヒドセンサ

担当者: 石原 伸輔  
グループ: フロンティア分子グループ  
応用分野: 農業/環境/その他

化学反応を応用したセンサ。シックハウス症候群の原因となるホルムアルデヒドの計測や、果物の熟成を促進するエチレンの検出にも。



### マイクロポンプ

担当者: 池田 太一  
グループ: 電子機能高分子グループ  
応用分野: ヘルスケア/環境/その他

電気で動く高分子アクチュエータによるマイクロポンプのプロトタイプ。インスリン投与を制御するようなウェアラブルデバイスへの応用を目指す。



### 熱流センサ

担当者: 桜庭 裕弥  
グループ: 磁性材料グループ  
応用分野: 環境/その他

温度が変わる前に「熱の移動」を高速に測るセンサ。熱エネルギーのロスを高速に感知し、省エネルギー化に貢献することなどが期待。

## 環境・その他

# 生体センシングや超高密度磁気記録を実現する磁気センサの研究

磁場をかけたときに物質やデバイスの電気抵抗が変化する現象を「磁気抵抗効果」という。1856年に発見されて以来、「巨大磁気抵抗効果 (GMR) 」や「トンネル磁気抵抗効果 (TMR) 」といった様々な磁気抵抗効果が見いだされ、磁気センサやメモリーなどに応用されてきた。中谷友也は現在、2種類の次世代磁気センサの研究開発に取り組んでいる。一つは生体センシングへの応用が期待される“超高感度”磁気センサ、もう一つは、超高密度ハードディスクドライブ (HDD) の読み取りに必要な“超高分解能”磁気センサだ。

## 生体センサへの応用が期待される超高感度磁気センサの研究

まず、超高感度磁気センサの研究から紹介しよう。心臓や脳は非常に微小な磁場を発生させているため、その磁場を計測できれば、心臓や脳・神経系の疾患の診断に利用できる。しかし、心臓や脳が発する磁場はピコ ( $10^{-12}$ ) ~ フェムト ( $10^{-15}$ ) テスラと極めて小さい。現在のところ、このような微小な磁場を計測できるセンサは超伝導量子干渉計 (SQUID) しかない。SQUIDは超伝導を利用するため、極低温に冷やす必要があり、装置が巨大かつ高価で、導入先は大病院や研究機関に限られる。そこで中谷は、SQUIDに代わる小型で安価な心磁・脳磁センサの開発に取り組んでいる。

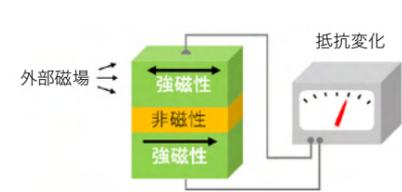
「特に求められているのが、胎児の心磁図の測定です。現在、心疾患の診断と治療には、心臓が発する電気信号を計測する心電図が使われていますが、胎児は体全体

が絶縁体である胎脂 (脂肪の膜) で覆われているため、心電図の計測は困難です。これに対し、磁場は、胎脂に覆われていても計測可能なので、胎児の心磁図を計測することで、出産前に胎児の心臓疾患などを発見できるというわけです。また、念じるだけでロボットなどの機械を動かすブレイン・マシン・インターフェイス (BMI) も、現在は脳の電気信号を使っていますが、電気信号だけでなく磁場も計測することで、脳の活動をより高感度でモニタリングでき、繊細な操作が可能になると考えられます。こうした背景から、小型で安価な心磁・脳磁センサの登場が期待されているのです」と中谷は説明する。

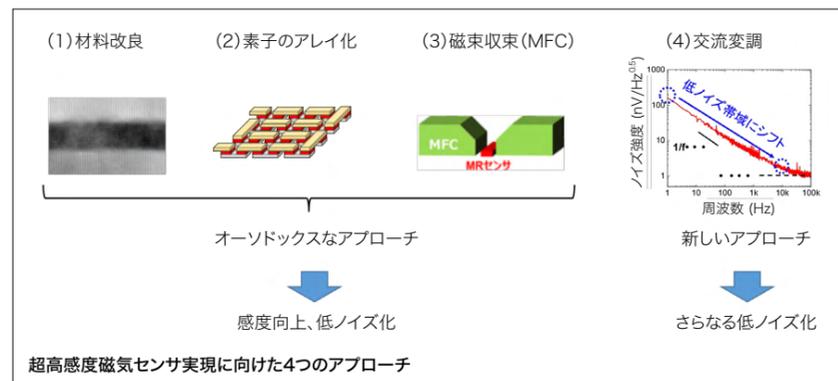
超高感度磁気センサ開発は、世界的に (1) 材料の改良、(2) 磁気抵抗素子のアレイ化、(3) 磁束収束 (MFC) の3つのアプローチの「かけ算」で行われている。(2) は、複数個の素子を接続することで、個々の素子のノイズを平均化し、ノイズの低減を図るもので、(3) は、計測したい磁場を集める

(収束する) ことによって、磁気センサの感度を高めるものだ。中谷は小型の超高感度磁気センサの実現を目指して、強磁性体/絶縁体/強磁性体という基本構造をもつ TMRセンサの材料を改良するとともに(2)や(3)の設計と加工法の最適化を進めている。

さらに、新しいアプローチとして、(4) 交流変調を用いたノイズの低減にも取り組んでいる。一般に、磁気抵抗素子のノイズは、周波数が低いほど大きくなる ( $1/f$ ノイズ)。このノイズは、材料を改良することでも低減できるが、限界がある。それに対し、中谷は、センサの動作周波数をより高い周波数帯に変調することでノイズを実質的に低減できる技術の開発を進めている。「交流変調法を含む4つの手法により、プロジェクトが終了する2022年度末までにピコテスラという超高感度を実現したいと考えています」と中谷はチャレンジングな目標を掲げる。



**磁気抵抗センサの仕組み**  
強磁性体/非磁性体/強磁性体の3層構造が基本。外部の磁場により、一方の強磁性体層 (図では上の層) の磁化の向きが変わると、3層構造の抵抗が変化する。これを磁気抵抗効果と呼び、抵抗変化から外部磁場を計測できる。非磁性体が金属の場合が巨大磁気抵抗 (GMR) センサ、絶縁体の場合がトンネル磁気抵抗 (TMR) センサ。

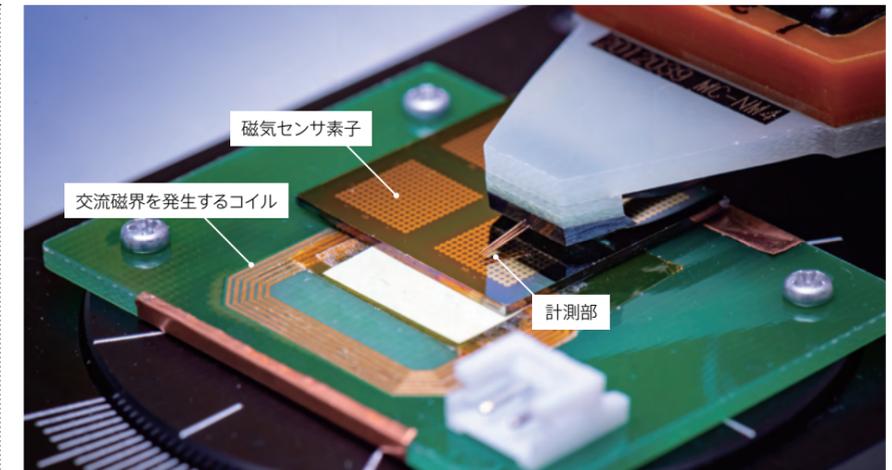


## 超高密度HDD向け再生ヘッド用次世代磁気センサの開発

一方、中谷は超高密度HDDのデータを読み出すための磁気センサの研究開発にも取り組んでいる。

デジタルデータの飛躍的な増加に伴い、HDDの記録密度も上がり続けている。HDDが世界で初めて実用化された1956年に2キロビット/平方インチだった面記録密度 (ディスク面積当たりの容量) は、現在では5億倍以上の1テラビット (テラは $10^{12}$ ) 超/平方インチに達しており、究極の目標は5テラビット/平方インチとされている。こうした超高密度のデータの読み出しには、微小でS/N比の高い次世代磁気センサ (再生ヘッド) が必要だ。

再生ヘッドには2005年頃まで、強磁性金属/非磁性金属/強磁性金属の基本構造をもつGMRセンサが使われていたが、現在は、TMRセンサが使われている。しかし、次世代の再生ヘッドに必要な「センサ膜 (3層構造) の抵抗の軽減」と「磁気抵抗比の増大」の両立は、MgO層を絶縁体とするTMRセンサでは限界に達している。そこで、中谷が長年にわたり研究しているのが、面直電流巨大磁気抵抗 (CPP-GMR) センサだ。CPP-GMRセンサは、電流をセンサ膜に垂直に流すもので、センサ膜に平行に電流を流す従来のGMRセンサよりも大きな磁気抵抗効果が得られる。また、すべて金属膜で構成されているため、TMRセンサに比べ、抵抗が小さく低ノイズである



交流変調の実験

という利点がある。しかし、コバルトや鉄などからなる従来の強磁性体を使ったCPP-GMRセンサでは出力に相当する磁気抵抗比が小さく、実用化の目途は立っていなかった。

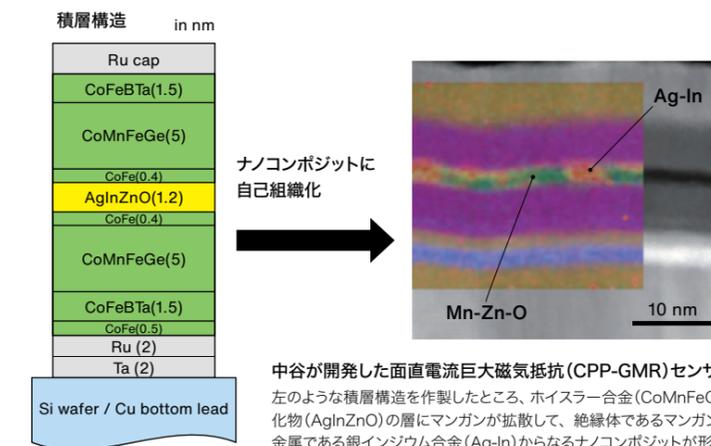
そうした中で、中谷は、強磁性体としてコバルトマンガン鉄ゲルマニウム合金であるホイスラー合金を用い、間に金属と酸化物のハイブリッド材料である銀インジウム亜鉛酸化物をはさむことにより、2019年に、2テラビット/平方インチの読み出しに必要な性能を達成した。

体系的な実験によって材料の最適な組成を割り出していた中谷だったが、実は、なぜ性能を達成できたのかはわからなかった。しかし、すぐに走査透過電子顕微鏡 (STEM) で構造解析をしてもらうことで、理由が判明した。「ホイスラー合金の層か

ら銀インジウム亜鉛酸化物の層にマンガンが拡散することで、絶縁体であるマンガン亜鉛酸化物と金属である銀インジウム合金からなる“ナノコンポジット”が自己組織的に形成されていたのです。銀インジウム合金のみに電流が流れることにより、センサ膜の抵抗の低減と磁気抵抗比の増大の両立が実現されたというわけです。NIMS内に世界トップレベルの構造解析技術があることで、研究開発を迅速かつ大きく前進させることができました」

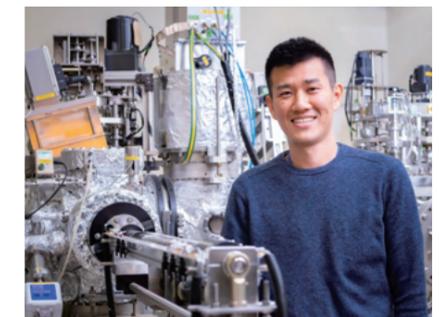
この中谷の成果を受け、CPP-GMRの研究開発を一時休止していた企業も研究開発再開の動きを見せている。「実用化に向けてはまだ乗り越えるべき課題がありますが、企業などと連携して1日も早い実用化を目指します」と中谷は意気込む。

(文・山田久美)



### 中谷が開発した面直電流巨大磁気抵抗 (CPP-GMR) センサの構造

左のような積層構造を作製したところ、ホイスラー合金 (CoMnFeGe) から銀インジウム亜鉛酸化物 (AgInZnO) の層にマンガンが拡散して、絶縁体であるマンガン亜鉛酸化物 (Mn-Zn-O) と金属である銀インジウム合金 (Ag-In) からなるナノコンポジットが形成された。



### 中谷友也

Tomoya Nakatani

磁性・スピントロニクス材料研究拠点  
磁性材料グループ 主任研究員

# 空気中の特定のガスを高感度／高速に検出できる センサの開発

「中赤外」と呼ばれる波長領域の赤外光には、NO<sub>x</sub>（窒素酸化物）やSO<sub>x</sub>（硫黄酸化物）などのガス分子固有の吸収スペクトルが現れる。この特徴はガスセンサなどに利用されているが、既存の高感度赤外線検出器には毒性の高い水銀やカドミウムが使われていることが課題だ。そこで、宮崎英樹は、毒性の低い元素を使った「メタマテリアル赤外線検出器」の開発に取り組んでいる。広い空間のガス分布を映像化できるカメラへの搭載も視野に入れ、環境計測への応用を目指している。

量子井戸とメタマテリアルの  
組み合わせで  
高感度に赤外光を検出

量子井戸とは、原子1層レベルの精度で2種類の半導体結晶を交互に積層して作る人工材料のことだ。宮崎らが開発した量子井戸赤外線検出器は、厚さわずか4ナノメートル（ナノは10<sup>-9</sup>）のガリウムヒ素量子井戸層とアルミニウムガリウムヒ素バリア層で構成されている。

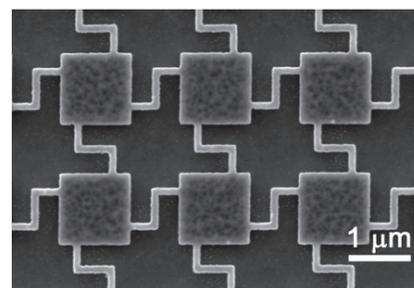
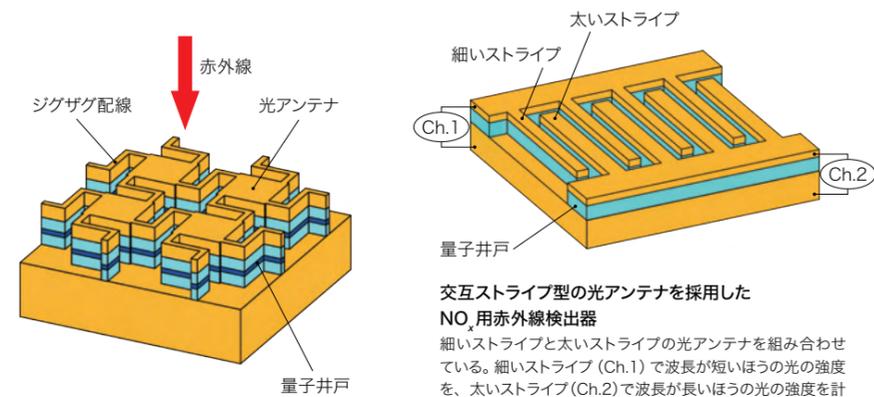
実は、量子井戸赤外線検出器は20～30年前にさかんに研究されていたが、感度が低く、実用化された例はほとんどない。それに対し、宮崎は、量子井戸と「メタマテリアル」を組み合わせることで、感度の劇的な向上を図った。

メタマテリアルとは、微細構造の幾何学的な形状を利用して新たな機能を発現させた材料のことだ。宮崎が設計したのは、赤外光の波長よりも小さい正方形の「光アンテナ」を、金属基板の表面に無数かつ周期的に敷き詰めたメタマテリアルだ。コンピュータシミュレーションにより設計し、ナノ加工技術を駆使して緻密に形成したこのメタマテリアルは、個々のアンテナが共鳴することで、入射光を高効率に集める。量子井戸がその強い光にさらされるので、感度が高まるというわけだ。実際、宮崎は2020年2月、波長6.7マイクロメートルの赤外光に対して、感度をメタマテリアルを使わない場合の800倍に増強することに成功した。

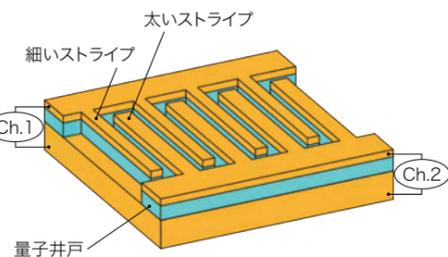
「光アンテナ同士をつないでいるジグザグ

の細い配線も重要な役割を果たしています。曲げ方や各部の長さを最適に調整することで、目的の波長が入射したときに、すべての光アンテナがタイミングを揃えて一斉に共鳴します。それにより、高い感度を実現して

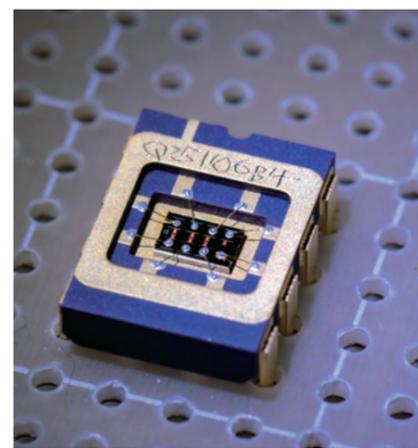
いるのです。検出波長は、光アンテナの形状や大きさ、配線の形状など設計を変えることで自由に変更できます。この自在さがメタマテリアルの醍醐味です」と宮崎は語る。



宮崎が開発したメタマテリアル赤外線検出器  
上は構造の説明図、下は走査顕微鏡写真。量子井戸層（濃い青）をバリア層など（薄い青）ではさんだ量子井戸赤外線検出器を、さらに金の層（黄色）ではさみ、パターンニングした。赤外光の波長よりも小さい四角形の「光アンテナ」が無数かつ周期的につくり込まれており、集めた光を量子井戸に送る。光アンテナの形状や大きさ、配線の形状を適切に設計することで、検出波長を自由に変えられる。



交互ストライプ型の光アンテナを採用した  
NO<sub>x</sub>用赤外線検出器  
細いストライプと太いストライプの光アンテナを組み合わせている。細いストライプ（Ch.1）で波長が短いほうの光の強度を、太いストライプ（Ch.2）で波長が長いほうの光の強度を計測する。



ストライプ型光アンテナを備えた赤外線検出器の試作例

ガスの濃度を  
高速に計測することも可能

宮崎は光アンテナの形状を変えることで、ガス濃度を計測するためのメタマテリアル赤外線検出器も開発している。ガス濃度を計測するには、二つの波長の信号が必要だ。一方はガスの吸収波長に一致させ、もう一方はガスの吸収の影響を受けない波長を選ぶ。ガスを透過してきた二つの波長の光の強度を計測し、比較することでガスの濃度を求めることができる。

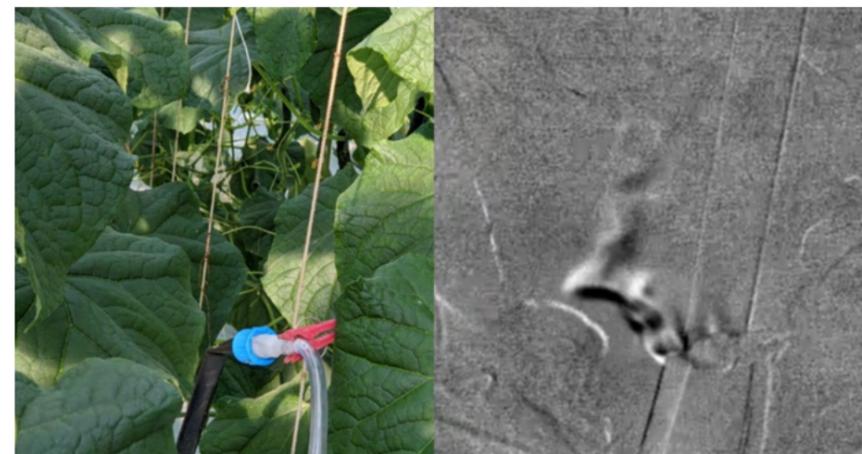
二つの波長の光を一度に計測するため、宮崎は、細いストライプと太いストライプという2種類の形状の光アンテナを交互に配列した。細いほうは短い波長、太いほうは長い波長でそれぞれ共鳴するように設計されている。

「この交互ストライプ型の光アンテナを、二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）の吸収波長である6.25マイクロメートルに合わせて設計することで、NO<sub>x</sub>の濃度の計測に成功しました。量子井戸赤外線検出器は応答が高速なので、自動車の開発現場で、エンジンが1回転する間にどのタイミングでどのくらいの濃度のNO<sub>x</sub>が排出されたかを1ミリ秒単位で追跡することにも応用できます」

赤外線検出器を環境計測に応用  
ガスの動きをリアルタイムに可視化

宮崎は、赤外線検出器の開発と並行して、赤外光を使った環境計測の実証実験も進めている。従来のガスセンサはある1点のガスの濃度しか計測できない。そのため、広い空間の濃度分布を調べるには、多数のセンサを配置する必要がある。

「しかし、ガスの濃度分布を映像としてとらえることができれば、空気中でガスがどのように分布し、流れていくかという一連の挙動がわかるようになります。このような情報はシミュレーションによって再現するしかありませんでした。ただし、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）については、既存の技術を組み合わせることで実現できます。そこで、『官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）』という国の



CO<sub>2</sub>を可視化する世界最高性能のカメラの実証実験  
左は普通のカメラによる画像。右はCO<sub>2</sub>可視化カメラによる画像（動画からのキャプチャ）。配管からハウス内に供給されるCO<sub>2</sub>の流れをリアルタイムに可視化できることが確認された。

研究開発推進事業の一環として、CO<sub>2</sub>の動きを可視化する世界最高性能のカメラメーカーに依頼して製作しました」

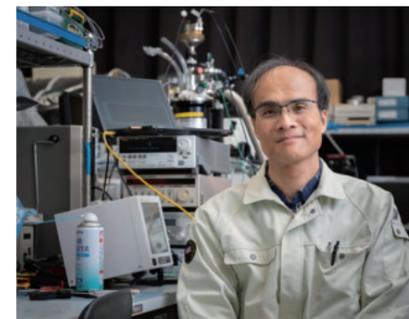
CO<sub>2</sub>はインジウムアンチモン（InSb）の半導体素子を搭載した市販の赤外線カメラで検知できる。宮崎はこのカメラにCO<sub>2</sub>の吸収波長である4.26マイクロメートルの光だけを透過するフィルタを取り付けることにした。また、フィルタ自体が発する赤外光を抑えるため、フィルタを-195℃という極低温に冷却することにした。それにより、高いコントラストでCO<sub>2</sub>を映像化できるカメラが完成した。そして、このカメラを使い、2021年11月、愛知県の農業用ハウスで実証試験を実施した（愛媛大学、豊橋技術科学大学、JA西三河との共同研究）。

この農業用ハウスには、最近注目されている「CO<sub>2</sub>施用」という農法が導入されている。光合成に必要なCO<sub>2</sub>の濃度を大気よりも高めることで、作物の収穫量を大幅に増やそうという農法だが、配管からハウス内に供給されるCO<sub>2</sub>の分布や流れを確かめる方法はこれまでなかった。実証試験では、開発したカメラでCO<sub>2</sub>の供給や拡散の様子を可視化することに成功した。今後は、この成果を基に効率のよいCO<sub>2</sub>の供給方法などを提案していくという。

また、このカメラは、人の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>も可視化できるので、コロナ禍で注目されるマスクの効果や室内の換気状態などの検証にも利用できる。

ただし、宮崎の目標はもっと先にある。「既存の赤外線カメラでは、5～8マイクロメートルの領域に吸収波長をもつNO<sub>x</sub>やSO<sub>x</sub>などの大気汚染ガスは可視化できません。私が開発中のメタマテリアル赤外線検出器なら観察波長を自由に選べますから、それをカメラに組み込むことでこうしたガスを可視化し、環境保全に役立てていきたいと考えています」と宮崎は語る。今回の実証実験の成功は、この目標達成に向けた一歩となった。

（文・山田久美）



宮崎英樹  
Hideki Miyazaki  
機能性材料研究拠点 光材料分野  
プラスモニクスグループ グループリーダー

# 液晶のカラム構造がイオンのハイウェイとなる 柔らかく安価な高分子アクチュエータ

いまここにはないものに触れている感覚を提示する技術、ハプティクス。触ったときの力や振動などを、センサでとらえたりコンピュータでつくったりして離れた場所に送り、そこで再現する。遠隔診療や仮想現実など様々な応用が可能のため、Society 5.0に不可欠な技術として注目されている。ただし、ダイナミックな動きに加えて、繊細な手触りを再現するためには柔らかいアクチュエータが必要だ。吉尾正史は液晶を利用して新しいタイプの高分子ソフトアクチュエータを生み出した。

## カラム構造はイオンのハイウェイ

液体と結晶の中間的な性質をもつ液晶。液晶の構造には様々な種類があるが、吉尾がおもに研究しているのは筒状のカラム構造をもつ液晶だ。カラム構造を自発的につくる液晶分子を設計し、カラム構造をつくらせたあとで重合するとその構造が固定される。この方法で、たとえば、海水を真水にする膜、ウイルスをほぼ100%除去できるフィルムなどのユニークな材料を開発してきた。

本プロジェクトでアクチュエータ開発に取り組むことになった吉尾は、これまで研究してきたカラム構造を生かそうと考えた。目指したのは、新しいタイプのイオン導電性高分子アクチュエータだ。

イオン導電性高分子とは、高分子の中をイオンが動き回れるものを指す。大きさに差のある陽イオンと陰イオンを含むイオン導電性高分子の膜を電極ではさみ、電圧をかけるとイオンが移動し、大きい方のイオンが集まった側が伸びる。この原理で膜を曲げることができるため、アクチュエータとして

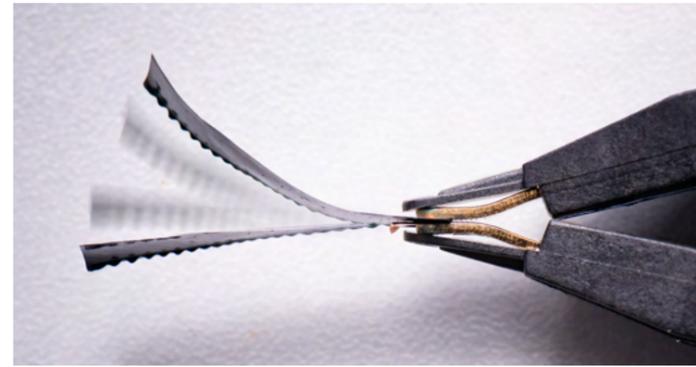
使える。

吉尾は、「カラム構造の中にイオンを通したい」と考えた。従来のイオン導電性高分子は高分子がグニャグニャと絡まったもので、その中をイオンがあちこちぶつかりながら動いていく。一方、カラム構造の中ならイオンはまっすぐに移動する。その結果として、速く、大きく曲がるアクチュエータを実現できるのではないかと予想したのだ。

さっそく吉尾はこのアイデアを実行に移した。まず、正負のイオンからなる「イオン性液晶」と、正負のイオンからなる「イオン液体」を混ぜる。これをガラス基板にはさんで50℃程度まで加温し、液体状にする。すると、混合物が冷えていく際に、自発的にイオン性液晶のカラム構造ができる。その際、液晶分子の電荷をもつ部分は内側になり、その中にイオン液体が入る。ここに紫外線を照射し、液晶分子を重合させて膜とする。この膜をポリチオフェン系導電性高分子ではさみ、電圧をかけると、膜は予想通り曲がった(右上写真、p2も参照)。

しかし、イオンはほんとうにカラムを通り抜けているのだろうか。それを確かめるため、吉尾はイオン性液晶とイオン液体の混合物を50℃に加温した液体に紫外線をあてて重合し、膜をつくった。液体のまま重合した膜にはイオンの通り道となるカラム構造がないため、電圧をかけたときのイオンの動きは遅くなり、曲がりの大きさ(変位)は小さくなるはずだ。

液晶からつくった膜と液体からつくった膜の変位を比べたところ、液体からつくった膜



電圧をかけると曲がる膜  
この実験では交流電圧をかけているため、膜は上下に振動する。



カラム構造の有無による膜の変位の違い  
カラム構造をもつ液晶状態で重合した膜(上)は、液体状態で重合した膜より変位が大きかった。

のほうが小さかった。「ねらい通りにカラム構造ができ、イオンの通り道となっていたのです。さらに変位を大きく、応答を速くするには、電極に対して垂直方向にカラムを並べることが重要です」と吉尾は説明する。

## 材料として利点の多い液晶高分子

こうして、液晶の構造を利用する新しいタイプのイオン導電性高分子アクチュエータが誕生した。このアクチュエータは、自重の20倍の物を持ち上げるだけのパワーと、2,000回動かしても性能を保つ耐久性をもつ。

実は、従来のイオン導電性高分子では、秩序構造をもたないイオンゲルという種類の高分子が多く研究されてきた。「しかし、イオンゲルにはイオン液体が重量で80%程度も含まれています。私の開発した材料では、8%と少量ですみます。これもカラム構造でイオンが効率よく動くからです」。イオン液体は高価な上、含有量が多くなると浸出などのリスクも高まる。幅広い用途への実用化を考えたときイオン液体が少量でも機能するのは大きな強みとなる。

また、吉尾の液晶高分子は、水がなくても機能し、従来材料よりも耐熱性が高いため、100℃以上の環境でも機能する可能性がある。「まだ、低温や真空など特殊な環境下での評価装置が整備できていないのですが、素材が安定だと使用環境の幅がぐっと広がります。人工衛星の表面にコーティングしておき、交流電圧をかけて振動させ

れば、塵を取り除いてくれるかもしれません」と、吉尾は利点と応用のアイデアを語る。

## 液晶高分子アクチュエータがつくる未来

ただし、「離れた場所の感触を伝えられる手袋をつくりたい」という吉尾の夢を実現するには、液晶高分子アクチュエータの性能はまだ足りない。

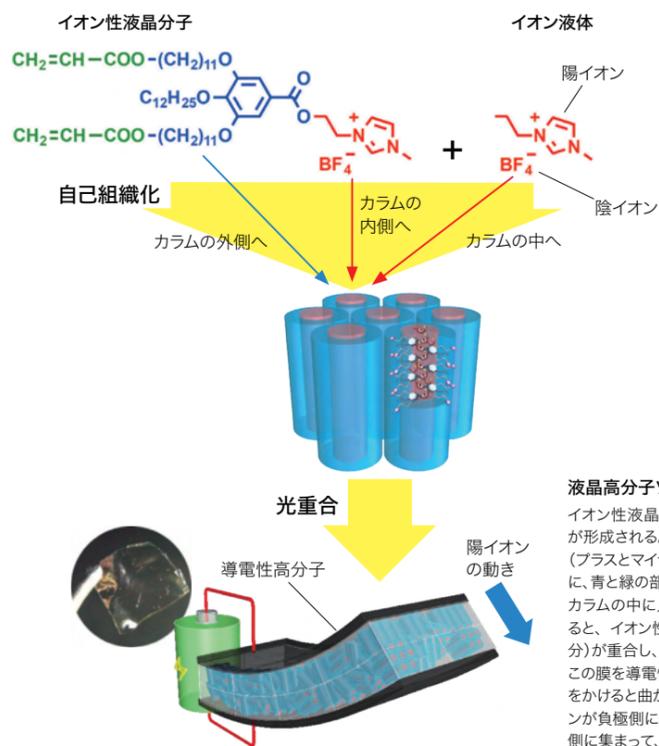
ヒトの皮膚は皮膚表面のマイスナー小体と深部のパチニ小体で刺激を感知する。マイスナー小体は50ヘルツ以下の振動の振幅が10マイクロメートル以上であれば刺激を感じ、パチニ小体は、200ヘルツ付近の1マイクロメートル振幅で最高感度に達する。皮膚を10マイクロメートル変位するには0.3ミリニュートンの力が必要だと推定されているが、液晶高分子のアクチュエータでは、数ヘルツ駆動、直流電圧2ボルトで0.3~1.0ミリニュートン程度の力を出せるという段階なのでこれからは高い周波数で力を発生させる必要がある。

「高周波で強い力を出すには膜を厚くする必要がありますが、厚くすると垂直方向に並ぶカラムの割合が減ってしまうという課題があります。そこで現在は、磁場を使ってカラムの方向を揃えることを試んでいます」。

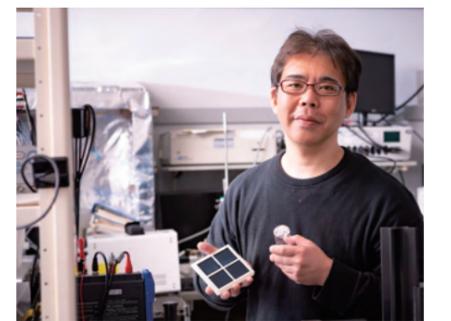
また、吉尾の材料は、液晶分子の設計によって液晶の構造を変化させることができ、様々なタイプのものを生み出せるのも特徴だ。実際に、カラムやミセル(球状の構造体)の外側をイオンが通るものや、カラムが

3次元的な網目のようにつながったジャイロイド構造などを開発している。「そうしたなかで、手応えを感じる材料もいくつか出てきています。さらに、材料だけで解決するのではなく、アクチュエータに針状の突起をつけるといった方法も検討しています」と吉尾。柔らかな発想で、実用化に向けて着実に前進を続ける。

(文・大石かおり)



液晶高分子ソフトアクチュエータ  
イオン性液晶とイオン液体から、カラム構造が形成される。イオン性液晶分子の赤色部分(プラスとマイナスの電荷をもつ部分)が内側に、青と緑の部分が外側になる。イオン液体はカラムの中に入る。この状態で紫外線をあてると、イオン性液晶分子のアクリル基(緑の部分)が重合し、カラム構造をもった膜ができる。この膜を導電性高分子の電極ではさみ、電圧をかけると曲がる。イオン液体の大きい陽イオンが負極側に集まり、小さい陰イオンが正極側に集まって、負極側が伸びるためだ。



吉尾正史  
Masafumi Yoshio  
機能性材料研究拠点  
ポリマー・バイオ分野 分子メカトロニクスグループ  
グループリーダー

# 柔らかなアクチュエータ 温度応答性の形状記憶ポリマーで、胎児に安全な治療を

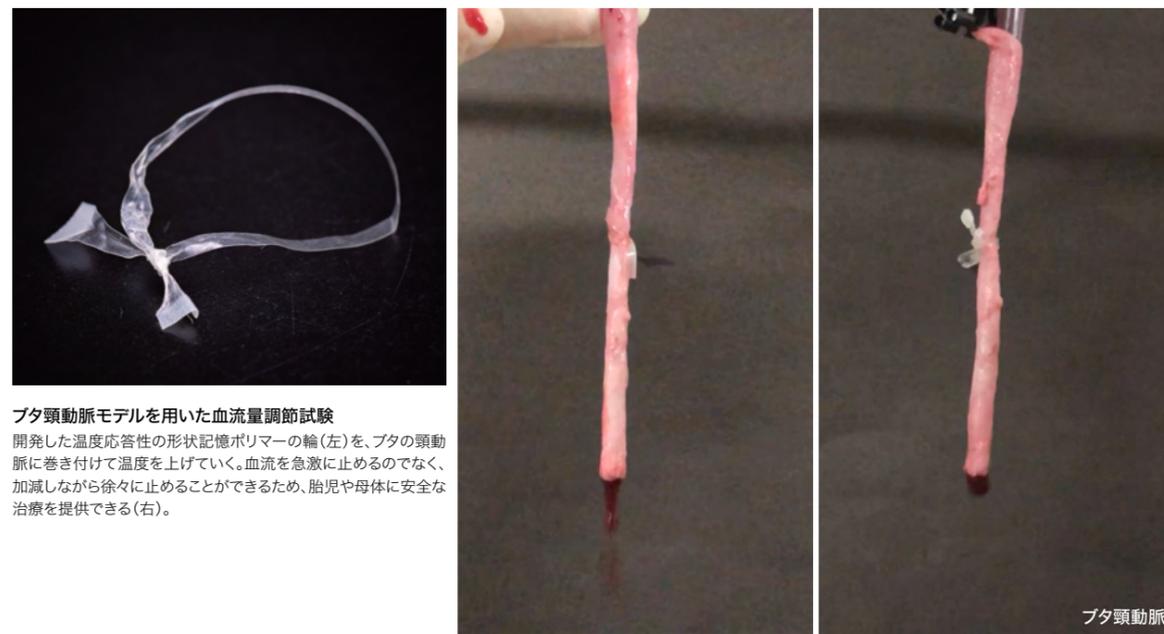
胎児の肛門に大きな腫瘍ができる「仙尾部奇形腫」という疾患がある。腫瘍は良性だが、赤ちゃんは腫瘍に血液を奪われ成長を妨げられる。最悪の場合には死に至ることから、有効な治療法が求められている。荏原充宏が研究する温度応答性の形状記憶ポリマーは、腫瘍への血流を徐々に止めて壊死させることができ、胎児にも母体にも優しい治療を提供できるという。プロジェクトでは、治療に最適なポリマーの開発が進められている。

## 刺激に反応して変化する材料 「スマートポリマー」

基本単位の分子がたくさん連なった物質を、ポリマーと呼ぶ。代表的なものはゴムやプラスチックだが、荏原が研究するのは、熱や光などの刺激に反応して変化する「スマートポリマー」だ。プロジェクトでは、特に温度応答性の形状記憶ポリマーの研究を進めている。「センサとかアクチュエータ」という機械的なものを想像されるかもしれませんが、“刺

激”を捉えて“動作”する点では、スマートポリマーは“センサ”と“アクチュエータ”の両機能を併せ持っているといえます」と荏原。温度応答性の形状記憶ポリマーは、引っ張って伸ばすといったんはその状態で止まるが、温度を上げると刺激によって元の状態に戻る。伸ばしてもすぐに元に戻ってしまうゴムや、逆に伸びたままとなるプラスチックとは違う。この特有の性質は、ポリマー分子とポリマー分子の間に橋をかけるようにして連結する「架橋」によって生み出される。架橋し

ないポリマーは一般的な物質と同様に、温度を上げていくと融点を境に固体から液体へと変化し、分子が自由に動き回れるようになるが、架橋を施すと分子の動きが制限される。その結果、架橋されたポリマーの温度を融点以上に上げると、この制限の中でエネルギー的にもっとも安定な形に戻る。この仕組みにより、このポリマーはいったん変形させても、温度が上がると分子が一定程度自由に動き回れるようになると、元の形に戻る。



**ブタ頸動脈モデルを用いた血流量調節試験**  
開発した温度応答性の形状記憶ポリマーの輪(左)を、ブタの頸動脈に巻き付けて温度を上げていく。血流を急激に止めるのではなく、加減しながら徐々に止めることができるため、胎児や母体に安全な治療を提供できる(右)。

## 赤ちゃんの 仙尾部奇形腫の治療に応用

荏原は、この温度応答性形状記憶ポリマーの医療への応用に取り組んできた。たとえば、温度を上げて柔らかくなったところに空気を入れて膨らませるバルーンは、骨粗鬆症などで潰れてしまった骨に、人工骨を入れる空洞をつくるために使われている。また、脳腫瘍の放射線治療の際に頭を固定するためのシールド材料としてもこのポリマーが使われ始めている。

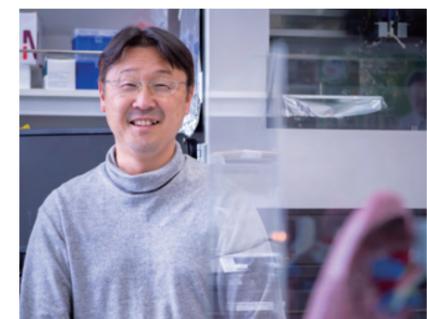
そんな荏原が、当プロジェクトで新たに開発しているのは、このポリマーを使った「仙尾部奇形腫」という胎児の肛門にできる腫瘍の治療法だ。「赤ちゃんのためには、早期治療という意味でも、また、その後の回復を考えると、お腹の中にいるうちに治療してあげるのがいいのです。しかし、メスなどで切除すると、腫瘍からの大量出血を引き起こす可能性があり、胎盤や卵膜を傷つけないようにするため、医師には高度な手技が求められます。このため、ほとんどの場合、出産後に手術が行われるのです」と荏原は治療の現状を話す。

医師の負担が少なく、母子ともに安全な治療法として、荏原は温度応答性の形状記憶ポリマーを使って徐々に腫瘍への血流を止め、壊死させることを考えている。まず、ひも状の形状記憶ポリマーを伸ばしておき、仙尾部奇形腫の根元に巻き付ける。この状態で、医療用レーザーなどを用いて温度を上げると、形状記憶ポリマーは元の形に縮みながら腫瘍の血管を締めつけていく。

「理想は、私たちの形状記憶ポリマーと、ほかのグループで開発された脳磁場センサを組み合わせて、母子の健康状態を脳磁場で確かめながら、母子の状態が良ければ徐々に血流を止め、良くなければ血流を止めるのをやめるような、自動的な仕組みをつくることです。そのために、母体の外からの電気刺激によって腫瘍に巻き付けられた形状記憶ポリマーの温度を上げられるような仕組みも考えています」。

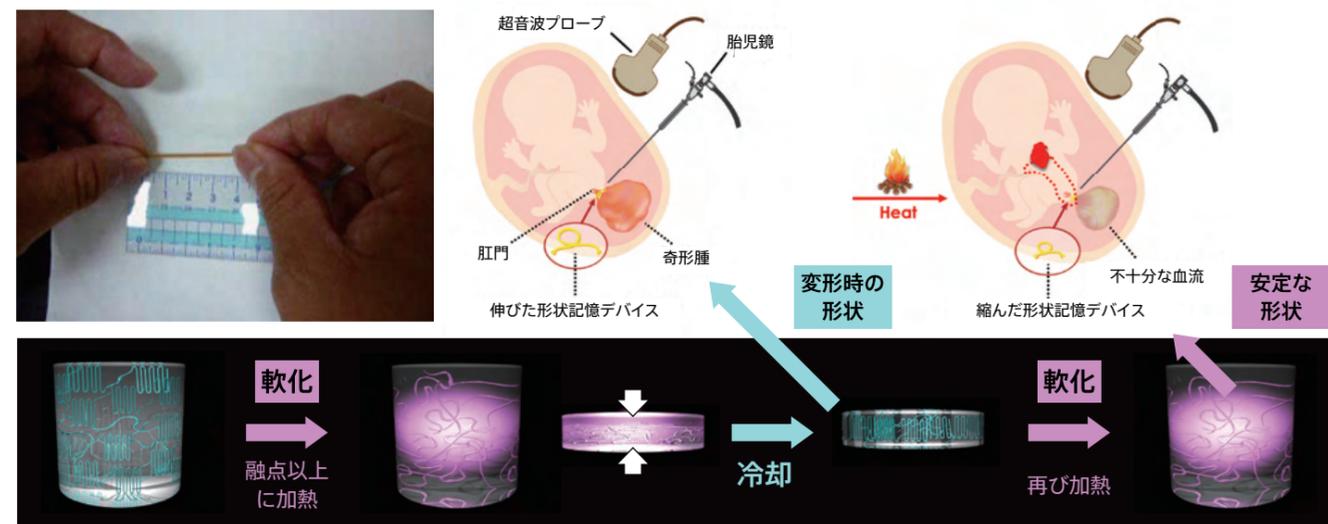
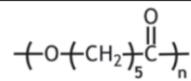
荏原はこれまでに病院で医療材料の開発に従事した経験から、医療現場が本当に必要としているものを届けたいという思いが強い。その一方で、「医療応用では、企業との共同開発が始まってから、安全性や有効性を評価するための臨床試験を行う

ので、世の中に出るまでにゆうに10年はかかってしまいます」と話し、技術の実用化が簡単でないことも承知している。一人でも多くの胎児を救うため、荏原の開発はこれから正念場を迎える。  
(文・池田亜希子)



**荏原充宏**  
Mitsuhiro Ebara  
機能性材料研究拠点 ポリマー・バイオ分野  
スマートポリマーグループ  
グループリーダー

## ポリ(ε-カプロラクトン)



仙尾部奇形腫治療への形状記憶ポリマーの適用法(上)と、ポリマーの動作メカニズム(下)  
形状記憶ポリマーは、融点以上に温めて軟化させ、望む形にしてから冷やすとその形に固定される。成形した後に再び温めると最初に温めたときの形に戻る。この性質を利用して、ひも状のポリマーを伸ばしておき、仙尾部奇形腫の根元に巻き付ける。その後、温度を上げるとポリマーは縮み、腫瘍への血流を徐々に止める。

材料研究の旬な情報をいち早くお届け!

# 使える! メールマガジン

NIMSのメールマガジンをご存知ですか?

材料研究の最新ニュースはもちろん、スペシャル・コンテンツや研究ウラ話など、メルマガでしか手に入らない情報満載で配信中です! 一般公開やNIMS WEEKなど大型イベント前には、いち早く耳寄り情報をお届け。材料研究の最先端をお楽しみください!

こんな情報が載っています

## 今月の一枚

材料ってキレイ、物理現象って不思議……科学の魅力を写真からご堪能ください。

ご登録は下記に空メールを送るだけ

[nims.mailmag@fofa.jp](mailto:nims.mailmag@fofa.jp)

- ★定期配信号: 毎月第二水曜日(月1回)  
※諸事情により前後する場合があります。
- ★臨時増刊号: イベント前に随時

## HOT TOPICS

読めば材料研究の最先端が丸わかり! 最新ニュースやプレスリリース、イベント情報、公開講座などなどNIMSのホットで役に立つ情報をギュギュっとまとめてお伝えします。

## NIMS装置図鑑

装置は材料開発における縁の下の力持ち。世界に一つしかない装置、その研究のためだけにカスタマイズされた装置、巨大でド迫力な装置、何十年も愛用されている年季の入った装置——NIMSが誇るさまざまな装置を、美しいビジュアルとともにお届けします。

新コンテンツが続々スタート!

トレンドの材料を分かりやすく解説する(いま、この材料がアツい!)、読者参加型イベントなど、新規企画中!



←バックナンバーはこちら  
※第104号以降をご覧ください

## オトナの科学本

本を通してサイエンスの世界にどっぷり浸ってみませんか? といっても、難解な専門書ではありません。科学好きの知識欲をくすぐる一冊を、NIMS広報部員が厳選してご紹介します。

※内容は月によって変わります



NIMS NOW vol.22 No.1 通巻192号 2022年1月発行  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構



古紙配合率 70% 再生紙を使用しています



植物油インキを使用しています