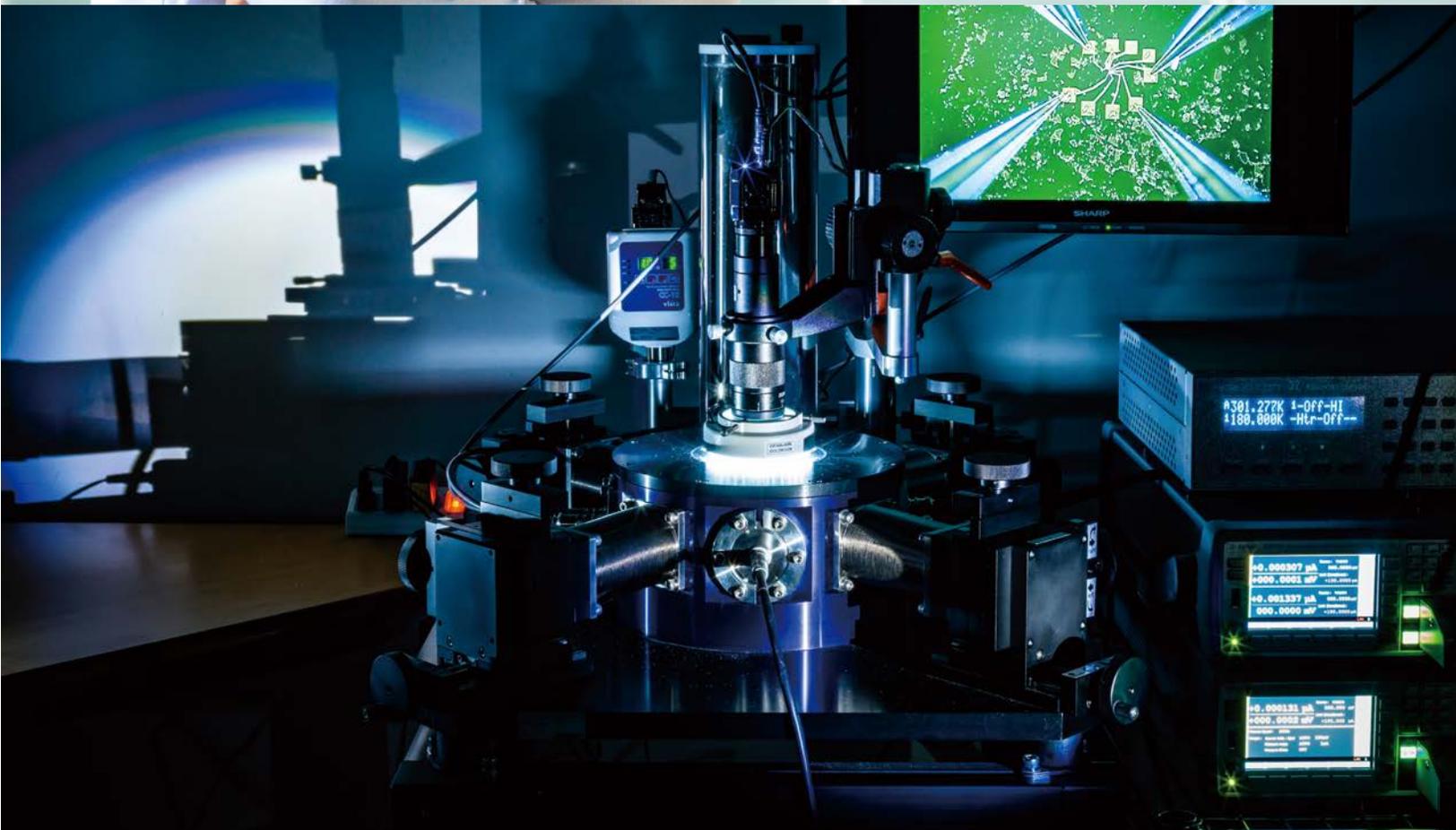


国際ナノアーキテククス研究拠点 (WPI-MANA)

## ナノの 秩序を操れ

ナノからマクロをつなぐ建築学



ナノの

# 秩序を操れ

ナノからマクロをつなぐ建築学

ナノ粒子、ナノシート、ナノチューブ——。

1ミリの10億分の1という原子レベルの直径や厚みを持ち、  
“ナノマテリアル”と総称される物質の数々。

それらのふるまいに目を凝らすと、ナノスケール特有の現象が立ち現れる。

ナノの特性が人々の探求心を呼びおこし、ナノテクノロジーは急速に発展。

その一翼を担ってきたのが、2007年に創設された

NIMS 国際ナノアーキテクニクス研究拠点 (WPI-MANA、以下MANA)だ。

MANAは10年計画を経て、ナノテクノロジー・材料分野における世界的な地位を確立。

幾多の成果を世に送り出し、今、さらなる高みを目指して挑戦を続けている。

MANAの理念は、なお揺るぎない。

ナノマテリアルをパーツとして能動的に集積、接合し、機能豊かなナノ建築を生み出すこと。

既知の物理の延長にない新たな知見を、基礎から確立すること。

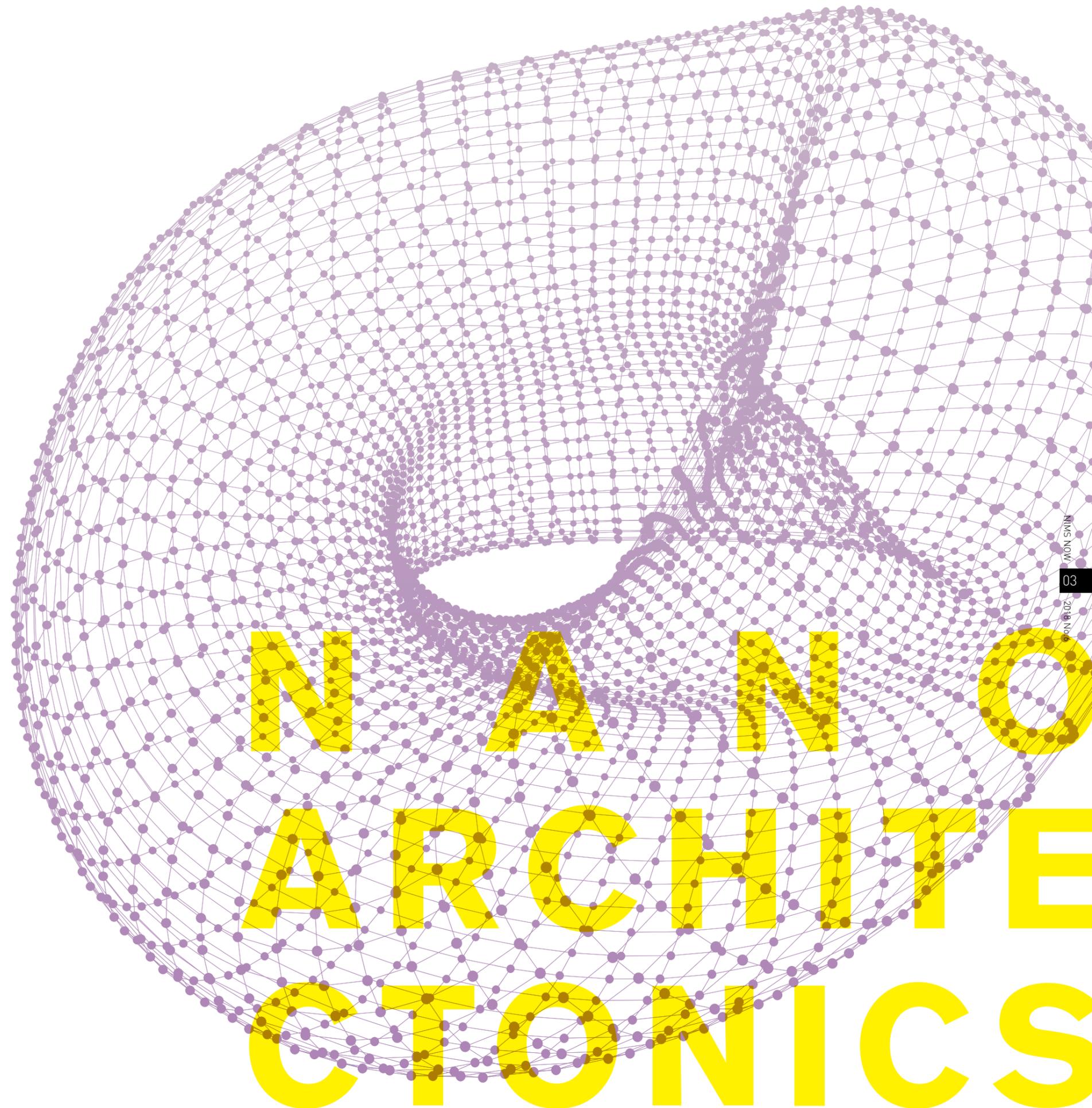
これがMANAの使命である。

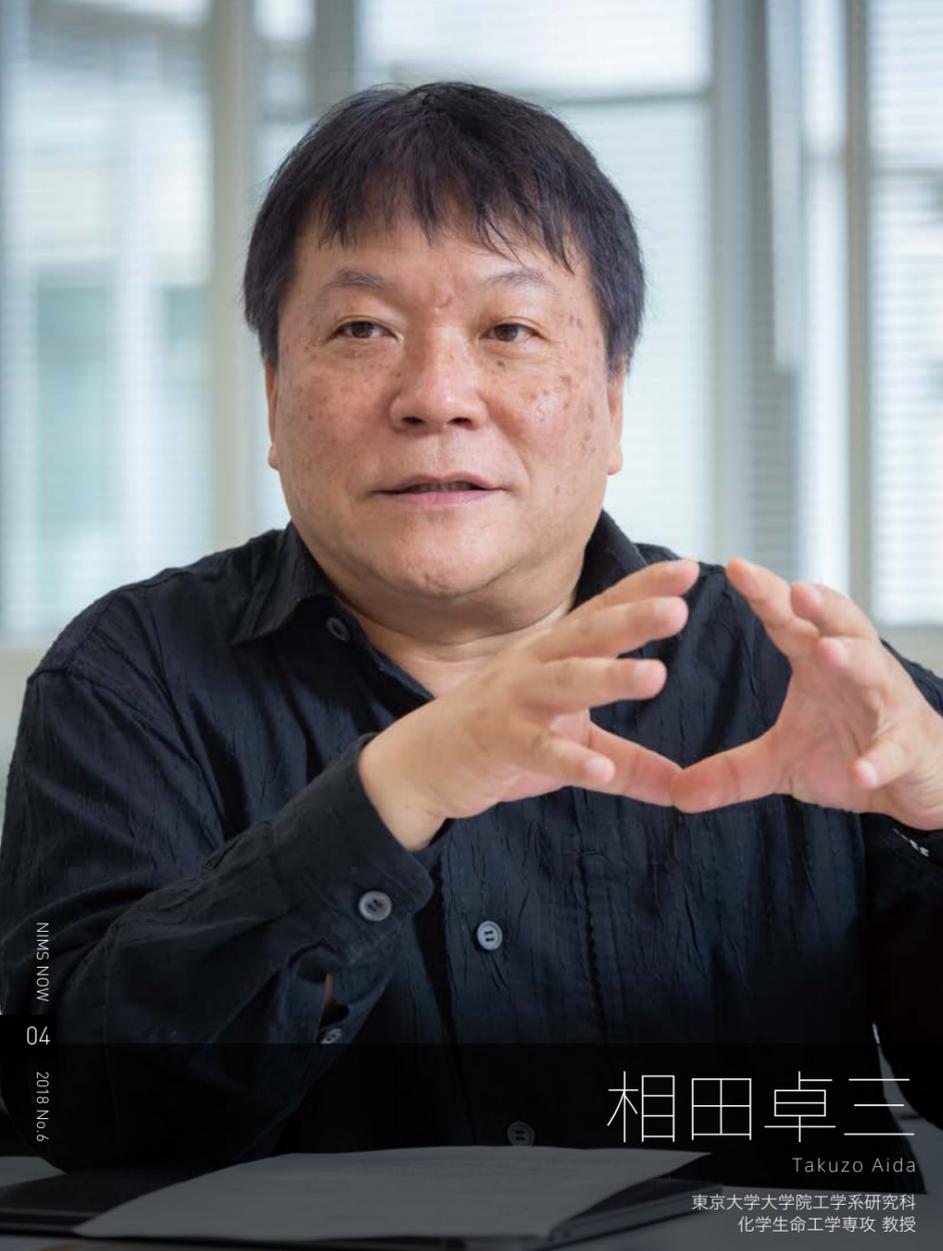
ナノパーツの組み合わせ方や重ね方、

さらには、数学的概念で説明される特異な安定性——。

ナノの世界における秩序のかたちは無数にあり、

その数と等しく、未知の機能創出の可能性にあふれている。





相田卓三

Takuzo Aida

東京大学大学院工学系研究科  
化学生命工学専攻 教授

# 特別対談

## 拡張する ナノの建築学

NANO ARCHITECTONICS



佐々木高義

Takayoshi Sasaki

物質・材料研究機構 (NIMS)  
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA) 拠点長

2007年に文部科学省「世界トップレベル研究拠点 (WPI) プログラム」の拠点としてスタートした「国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA)」。さらなる発展に向け、2017年より佐々木高義拠点長のもと、新たなスタートを切った。今回、MANAが提唱する“ナノアーキテクトニクス”の現在と未来について、日本の高分子化学を先導してきた東京大学の相田卓三教授と佐々木拠点長が語り合った。

### ナノから マクロをつなぐもの

**佐々木** NIMSは7つの研究拠点、部門で構成されており、その中で唯一、基礎研究を担っているのがMANAです。“ナノアーキテクトニクス”とはMANAが提唱している概念で、ナノサイズの材料であるナノマテリアルをパーツとしてとらえ、配列させたり連結させたりすることで、単体では発現し得ない新たな機能を実現させようというものです。

年々、エレクトロニクス、情報・通信技術が急速な発展を見せる一方、環境・エネルギー問題が深刻化し、我々の身の回り

のデバイスはますますの小型・軽量化、高性能化が追求されています。その構成要素である材料は、小さくて高機能であることや、ひとつで複数の機能を発揮することが求められます。そこにMANAが推進している基礎研究が貢献できると考えています。

**相田** 無機材料とは異なり有機材料の分野では、ナノサイエンスの発展により、ナノマテリアルを作ることは比較的容易になってきています。しかし、ナノとマクロとの間のメゾ (中間) 領域を制御する技術が手つかずで、私が専門とする高分子化学分野でもこの隔たりをどのようにして埋めていくかが現状の課題です。

**佐々木** ナノマテリアルの研究は、1980年代から90年代にかけて発見されたフラーレンやカーボンナノチューブを皮切りに、酸化物や窒化物、金属、有機物など、あらゆる種類に広がっていますよね。また、カーボンナノチューブのような1次元物質やナノ粒子のような3次元物質から、グラフェンに代表される2次元物質が盛んに研究されるようになってきました。

相田先生がおっしゃるとおり、ナノアーキテクトニクスにおいて重要かつ最も難しいのが、どのようにナノマテリアルの形や大きさを一定に揃えて合成するか、さらには、それらをどのように秩序よく配列させるか、という点です。そこに、ナノアーキテ

クトニクスの真髄と未知の機能発現の可能性があるとさえいえるわけです。

そうした中で、私が長年研究を続けてきた「酸化チタンナノシート (p12に関連研究)」を相田先生が組みあげ実現した新材料は、ナノアーキテクトニクスのひとつの実践例だといえますね。

**相田** 2015年に開発した「ヒドロゲル」ですね。これは非常にユニークな材料です。垂直方向に押しでもほとんど変形しないのに、水平方向に押しと大きく変形するのであります。

この異方的ヒドロゲルは、先立って2010年に開発した「アクアマテリアル」という材料が元になっています。98%以

上が水であるにもかかわらず力学強度が非常に高いという特性を持ちます。水に天然粘土鉱物と2種類の高分子を混ぜて作りますが、粘土鉱物はシート状で、これを酸化チタンナノシートに置きかえれば画期的な新材料ができるのではないかと、佐々木先生に共同研究を申し込みました。

折しも研究室に超伝導マグネットを導入していて、研究室のポスドクが、酸化チタンナノシートを分散した水を入れて磁場をかけたところ、すべてのナノシートが磁束に対してきれいに垂直 (ナノシート同士は平行) に配列しました。しかも、静電反発力によりナノシート同士が接触すること

は決してありません。この状態のままコンニャクのようにゲル状に固めることで、ナノシートが横方向のみスライドする新材料が誕生しました。これは、メゾ領域を制御する新たな技術の創出だと感じましたね。

**佐々木** その後も、相田研究室の力量から、多様な材料が生まれつつけています。水中のナノシートの向きや間隔を、熱などの力で制御すると水の色が変わる「フォトニックウォーター」など、思いがけないものばかりです。

**相田** こうした想定外の発見があるので、私の研究室では、「失敗した」という言葉は禁句にしています。常々学生たちには、実験中に予想と違う結果が出た場合には、「一体、何が起きているのだろう」という疑問や好奇心を抱くこと、そして、それを突き詰める力を養うことの大切さを説いています。

**佐々木** そのお考えに深く同意します。MANAのような新材料、新機

能、新現象の発見を追求している組織では、やはりサプライズが重要で、サプライズなくして革新的な物質・材料は生まれません。思いもかけない偶然の出来事があったとき、それを面白いと感じ、突き詰める力が必要ですね。また、異分野との融合も大切で、相田先生との共同研究は、まさにその典型例だったと実感しています。

**相田** 基礎研究においては、何もないと、つまりゼロから1を生み出すような“迫力ある科学”が必要で、常に目標とするべきですよ。

### 計算科学の力、人間の力

**相田** NIMSでは、新物質や新材料の探索に計算科学を積極的に活用されているようですが、成果のほどはいかがでしょうか。

**佐々木** 実験ではアプローチできない領域に迫れるという点で、非常に

重要なツールと位置づけています。MANAは創設以来、「ナノマテリアル分野」と「ナノシステム分野」を中心とした分野体制を取ってきていますが、3年前に新しく「ナノセオリー分野」を設置しました。NIMSの計算科学者の大部分を結集し、理論と実験の融合に注力しています。特に新しい物性や材料を予測し実験で実現することを目標としており、今はその好例をひとつでも多く出していきたいと思っています。

私は囲碁が趣味で、コンピュータ囲碁プログラムの「アルファ碁」がプロ囲碁棋士を負かしたというニュースを感慨深く見ていました。いずれ材料の分野でも、計算科学、機械学習によって我々が想像もしていなかったような発見につなげたいですね。

**相田** 私の研究室でも計算科学を一部導入していますが、今のところ、実験結果を論理的に保証するためのツールにとどまっています。いずれは新材料探索に生かしたいと思いつ

つも、私はまだまだ人間の力を信じていますね。確かにプログラムは、囲碁というルールを与えれば高度に学習しますが、囲碁そのものを発明したのは人間なので。

だからこそ、人材育成も非常に重要な責務だと感じています。特に自分で考え行動する人材を育成しない限り、日本の未来はありません。

**佐々木** 教育機関である大学はもちろん、NIMSや理研など国の研究機関も協同して取り組まなければならない課題ですね。日本が魅力ある科学大国でありつづけられるのか。今、その岐路にいることを認識しなくてはなりません。

### ナノアーキテクニクスの未来

**相田** MANAはWPI拠点としての活動を経て、ナノテクノロジー・材料分野における国際的な地位を確立しましたね。私もMANAの評価委

員として、多くの成果を見せてもらいました。

**佐々木** ありがとうございます。現在、MANAには、NIMS全体の約4分の1にあたる約200名の研究者が在籍しています。研究分野は極めて多岐にわたっており、ものづくりでは、次世代エレクトロニクスやエネルギー分野への応用が期待されるナノワイヤー、ナノシート、ナノ多孔体、超分子材料など。さらにデバイス関係では、原子スイッチやおいセンサなど、挙げればキリがありません。

さらに、ナノレベルでの解析技術の開発でも成果が上がっています。たとえば、透過型電子顕微鏡と走査型プローブ顕微鏡を組み合わせ、ナノマテリアル単体を原子解像度で観察しながら機械的特性や電気的特性を測定できるようにし、多くの思わぬ発見につながっています。

応用が明確化されたテーマは、NIMS内のミッション指向型拠点に移動し、応用研究を発展させる流れ

をとっています。2018年7月に新設された「センサ・アクチュエータ研究開発センター」には、MANAで育った研究者が多数参加しています。これは、NIMS内でのMANAの役割を示す好例といえるでしょう。

**相田** 材料が見いだされてから社会に出るまでには20年、30年と長い時間がかかります。基礎の中にこそ大きな応用の種があるということを実証できるか、ここからが本当に試される時ですね。今後の展開に大いに期待しています。

(文・山田久美)

特別対談  
拡張する  
ナノの建築学  
NANO ARCHITECTONICS





Architectonics : 設計図を描く

# “トポロジー”、 材料を語る 新たな言語

田中秋広  
Akihiro Tanaka

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA)  
ナノセオリー分野 機能創成理論グループ グループリーダー

物質の性質の源は、原子が並び電子が飛び回る量子力学というマイクロな法則が支配する世界にある。

田中秋広らのグループは、電子の振る舞いを理論的に理解し、

発現する機能を数値計算によって予測することで、

新しい性質を持つ物質の設計図を描こうとしている。

## 数学で物質を解く

「2016年のノーベル物理学賞は、『トポジカル相転移と物質のトポジカル相の理論的発見』に対して贈られました。そのとき、テレビ局の取材に対応したのですが、まず聞かれたのが『トポジカルとは?』でした」と田中。

トポジカルは、数学の一分野「トポロジー」の形容詞だ。トポロジーは、図形の位置関係などの位相的な性質を研究対象とする分野だが、次第にこれを物性科学に導入しようという動きが生まれしてきた。

「トポロジーが物性科学に導入され始めたのは、1980年代です。物質に現れる特異な性質の中にはトポロジーの概念に

よって説明できるものがあることが明らかになりました。そうした性質を持つ物質は“トポロジー的に安定である”といわれ、結晶中に不純物が混じったり原子が抜けた欠陥があったりしても、別の状態に容易には変化できません。こうしたノイズに対する強さは、応用を考えたときに非常に魅力的で、今、材料科学分野で大きな注目を浴びています」

では“トポロジー的に安定”とは何か、簡単な例で説明しよう。まず、1本の柱があるとする。柱にゴムを1回巻きつけ、ゴムの両端を結ぶ。ゴムを引っ張ると伸びるが、巻きついている回数は変わらない。2回巻きついたら状態にするには、はさみでゴムを一度切らなければならない。2回巻きを1回巻きに変える場合も同様

だ。このように、大きな変化を加えない限り変わることがない性質（この場合は巻き付いた回数）を、トポロジー的に安定であるという。

## 金属でも絶縁体でもない物質

トポロジーが物性科学に導入されると、物質の性質を支配する電子集団にもトポロジー的に安定な状態があることが分かってきた。そうした状態を持つ物質の代表例が、内部は絶縁体でありながら表面は金属という「トポジカル絶縁体」である。2005年に理論研究によって提唱された2年後、実験によって存在が確認された。

「トポジカル絶縁体は外部環境の影響

をほとんど受けずに、常に決まった強さの電気を物質の表面に流せるのが、他にはない特徴です。先の例で、柱の周りに巻いたゴムが1回、2回と決まった値を取って簡単には変わらないのと同様、トポジカル絶縁体の表面が電流を流す能力（電気伝導度）も決まった値を取って、少々の環境の変化では変わらないのです」

さらに田中は続ける。「トポジカル絶縁体の例に倣い、新しい機能を持つトポジカル物質を理論研究によって見つけることが、私たちのグループの目標のひとつです。たとえば、電子は電荷のほかにも、磁性の元となる『スピン』という性質を持っています。電子集団がとるスピン配列が特殊で、しかもトポロジー的に安定な状態の物質があれば新しい機能を示すに違いありません。そう考えて、私たちは今回、ガリウム・バナジウム・硫黄（GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>）という物質に着目しました。“マルチフェロイック”という特異な性質を持つ上、実験によって“スカーミオン”（スキルミオンとも呼ぶ）というトポロジー的に安定なスピン配列を持つとの報告がなされていた物質です」

## トポジカル物質を探せ

マルチフェロイック物質は、磁石の性質と強誘電体（電場をかけると電荷の偏りを生じる物質）の性質を併せもつ。この二面性を使うと、電場によって磁化を変化させたり、磁場によって電荷を制御したりできることから、超省エネルギー型の次世代デバイスなどへの応用が期待されている。

一方、スカーミオンとは、スピンが形成する放射状のパターンのこと（図1）。“ヘッジホッグ（はりねずみ）”とも称される。このスカーミオンがトポロジー的に安定な状態であることは、すでに知られていた。しかし、GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>においてスカーミオンが生じるメカニズムや、スカーミオンとマルチフェロイック機能との関連性は分かっていなかった。

そこで、田中らのグループのセルゲイ・ニコラエフ博士研究員とイゴール・ソロビョフ主幹研究員はまず、第一原理に基づく精密な数値計算によって、磁場をかけた状態におけるGaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>の磁化分布を求めた。その結果、ある一定の磁場のもとでGaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>はいくつものスカーミオンを形成し、格子状に並ぶことが明らかになった（図2）。

さらに、同グループは一步踏みこんで、GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>のスカーミオンにおける電荷の偏りを計算。すると、スカーミオンの外側に比べて内側がマイナスの電荷を帯びて、電荷の偏りを生じていることが明らかになった（図3）。これは、電圧によってスカーミオンを集団移動させると電流が発生することを意味する。

この結果について田中はこう解説する。「GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>は通常、磁場をかけない状態では磁化を持たず、絶縁体です。しかし今回、GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>に磁場をかけると、なんとか強磁性体になろうとスピンが部分的に反転しスカーミオンが発生すること、しかも、スカーミオンが電荷を運ぶ担い手であることを立証できました。つまり、適切な強さの磁場のもとで発現するスカーミオンこそが、GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>のマルチフェロイック機能の源となることを、数値計

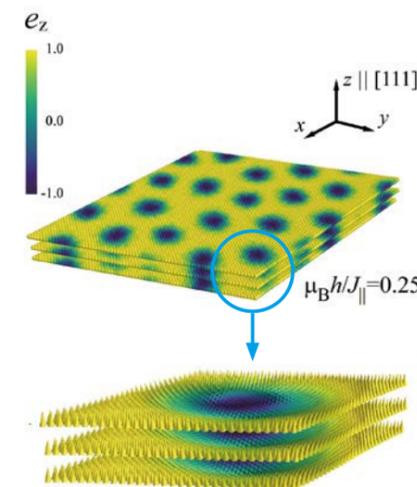


図2 GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>の磁化分布に現れたスカーミオン  
GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>は層状物質であり、磁化の分布パターンが面内に格子状に並んでいる。

算から示すことに世界で初めて成功した大きな成果です」。スカーミオンを電場や磁場で集団移動させることで、電荷を輸送する新方式（電荷ポンプ）へ応用することも考えられるという。

トポジカル物質の多くでは、多数の電子が互いに強く影響し合う結果として個々の電子が持つ性質とは違う新しい性質が現れる。「私たちのグループでもバックグラウンドの異なる研究者が影響し合うことで、トポジカル絶縁体のように、理論研究が先導して新機能を持つ物質を提示できればうれしい」と田中は期待する。

（文・鈴木志乃/フォトンクリエイト）

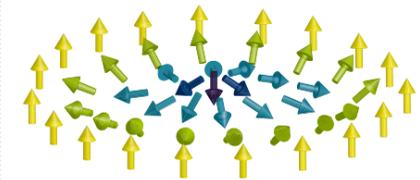


図1 スカーミオンの電子スピン配列  
外側は上向きスピン、内側は下向きスピンのスピンが全体として放射状に並ぶ。スカーミオンを構成するスピンの向きを集計してみると、全方位をちょうど“1回”網羅していることが分かる。柱の周りに巻いたゴムの場合と同様、“1回”を“1.1回”などへ少しずつつ変える術がなく、状態を変えるには大きな変化を起こさなければならない。このため一旦形成されたスカーミオンは安定で崩れにくい。

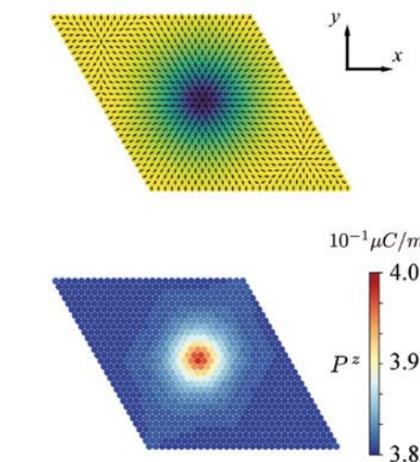


図3 GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>の磁化分布(上)と電気分極(下)  
スカーミオンの外側に比べて内側がマイナスの電荷を帯びて、電荷の偏り（電気分極）を生じている。

Sergey Nikolaev and I. Solovyev, arXiv: 1808.08008

Architectonics : 機能を引きだす

# シート状物質が織りなす機能を探求する

厚みはわずか、原子1個から数個分。シート状の2次元物質は、異なる種類を重ねたり、同じ種類でも重ねる数や角度を変えたりすると、特異な性質が現れる。中払周と森山悟士は、そこに隠された機能や物理を探求している。

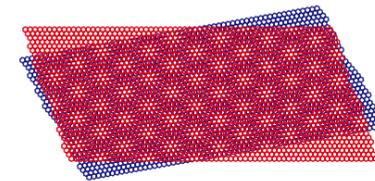
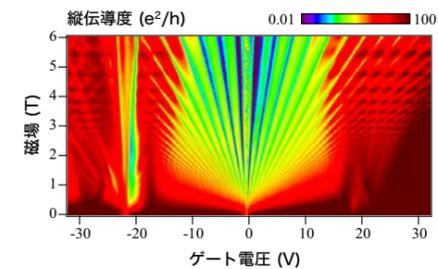


中払周  
Shu Nakaharai

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA) ナノシステム分野 量子デバイス工学グループ 主幹研究員

森山悟士  
Satoshi Moriyama

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA) ナノシステム分野 量子デバイス工学グループ 主任研究員



グラフェン / hBN  
モアレ超格子構造

図3 量子ホール効果とモアレ超格子構造に対応する“チョウ”

上は磁場下での電気伝導度 (縦伝導度、単位  $e^2/h$ 、 $e$  は素電荷、 $h$  はプランク定数) のカラースケールプロット。現れたパターンから、電気伝導度が高いこと、ハチの巣構造が1度以下で重ねられていることを読み取れる。このパターンは“ホフスタッターのチョウ”とも呼ばれる。下はモアレ超格子構造の模式図。図は、モアレ構造が分かりやすいよう2つのシートを10度ずらして重ね合わせて描いた。

## 2次元物質、探求のはじまり

黒鉛の薄片に粘着テープを押しつけ、表層を剥がす。剥がれた層にさらにテープを貼って剥がす作業を繰り返せば、原子1個分という限界の薄さにたどりつく。そうして得られた物質が、2次元物質が注目されるきっかけとなったグラフェンだ。グラフェンは炭素原子がハチの巣状に連なる。強度が高いにもかかわらず柔軟で、電気と熱を非常によく伝えるという特異な性質ゆえ、さまざまな用途が期待されている。「そのひとつがトランジスタ、電子回路において電気の流れを制御する半導体部品です。主にシリコンが使われてき

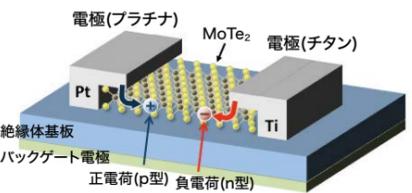


図1 MoTe<sub>2</sub>のトランジスタ構造  
MoTe<sub>2</sub>では、プラチナ電極から正電荷を持つ正孔を注入し(p型)、チタン電極から負電荷を持つ電子を注入できる(n型)。

ましたが、薄くて電荷の移動度(電気の流しやすさ)が高いグラフェンに換えれば、高集積化・省電力化を実現できます」と中払は説明する。

## ポスト・グラフェンの登場

グラフェンが登場した当時、電機メーカーでトランジスタ開発に取り組んでいた中払もグラフェンに興味を持った。しかし、応用は難航。グラフェンはとても良い導体であるものの、トランジスタに使うには半導体にならなければならない。「ヘリウムイオンを照射しグラフェンの結晶構造に欠陥を入れると半導体になることを発見しましたが、今度は電荷の移動度が下がり、グラフェンの利点が失われてしまいました」頭を悩ませていた最中、新たな報告が飛び込んできた。遷移金属元素とカルコゲン元素から成るシートが積層した遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)と呼ばれる物質群でも、粘着テープで単層を取り出せるという。「TMDCのシートは原子数個程度の薄さのうえ、半導体です。

その後 NIMS に移ってから、トランジスタへの応用研究に着手しました」

ところが、ひとつ壁があった。トランジスタにはp型とn型があり、集積回路にはそれら2種類を組み合わせる必要がある。しかし、TMDCはp型とn型の制御が難しかったのだ。

TMDCは、元素の組み合わせによって性質が大きく異なる。さまざまな組み合わせの検討が進む中、中払は二テル化モリブデン(MoTe<sub>2</sub>)に着目。「MoTe<sub>2</sub>は取り扱いが難しかったこともあり、あまり研究されていませんでした。しかし高品質な単結晶の入手が可能になり、面白い物理が見つかるのでは、と挑戦することにしたのです」と中払。

今回、中払が目にしたのは、金属電極と半導体の接触部分で生じる「ショットキー障壁」だ。これは、正孔や電子の移動を妨げるものだ。二硫化モリブデンなど他のTMDCの場合とは異なり、MoTe<sub>2</sub>ではこの障壁を取り除きやすいという兆候が現れていることを、中払は見逃さなかった。障壁を取り除けば、金属電極か

らMoTe<sub>2</sub>へ正孔や電子を注入できるため、p型・n型制御の可能性が見えてくる。さまざまな金属との組み合わせを探索し、2015年、MoTe<sub>2</sub>と接合する金属をプラチナにするとp型に、チタンにするとn型になることを発見(図1)。2次元物質のトランジスタ応用に一歩近づいた。中払はグラフェンやTMDCをセンサに応用する研究も進めている。

## 2種類のハチの巣構造を重ねると

「積層すると新しい性質が現れるのが、2次元物質のさらに面白いところ」。そう語る森山は、グラフェンと六方晶窒化ホウ素(hBN)のシートを積層し、両側に電極を付けたデバイスを作製した(図2)。hBNは、ホウ素原子と窒素原子がハチの巣状に並んだ物質で、NIMSの谷口尚フェロー、渡邊賢司主席研究員らが作製した超高品質な結晶の提供をうけている。

電気伝導度を測定した結果、電荷の移動度が世界最高レベルであること、量子ホール効果という特異な現象が現れてい

ることなどが確認できた。測定データの解析から、2種類のハチの巣構造は1度以下の角度で揃い、モアレ超格子という構造を形成していることも分かった(図3)。「モアレ超格子構造を持つ物質では、“バレー流”が発生することが予測されていました」と森山。固体結晶中の電子は、電荷とスピンに加え、“バレー”という隠れた自由度を持っている。バレー流を利用すると、電荷の流れを伴わずに情報を運ぶことができるため、超低消費電力エレクトロニクスであるバレートロンクスの実現につながる。しかし、これまでは応用に至らないほどの非常に小さなシグナルしか捉えられていなかった。

森山は、作製したデバイスにおいて、電気的な信号をバレー流に変換。伝送の後に逆の変換を行い、バレー流を巨大なシグナルとして検出することに成功した。高品質なデバイスをつくり上げたからこそ実現した大成果だ。「検証が必要ですが」と断り森山は続ける。「今回捉えたのは、バレー流の中でも特異な、“量子バレー流”ではないかと考えています。量子バレー流

の観測は世界初で、量子コンピュータの素子など応用の範囲がさらに広がります」

最近、アメリカのグループから、グラフェンを1.1度だけ角度をずらして2層重ねると超伝導体になるという報告があった。「組み合わせ、数、角度など、2次元物質の組み方はたくさんあり、その秩序を操ることで次はどんな未知の機能にあえるのだろうか、実験が楽しい」と森山。中払が続ける。「2次元物質の機能と物理を明らかにし、次世代のエレクトロニクスにつなげていきます」

(文・鈴木志乃/フォトンクリエイト)

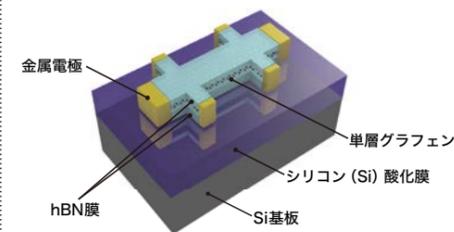


図2 グラフェン超格子デバイス  
hBN膜とグラフェンを重ね、さらに汚染防止のためにhBN膜を乗せ、電気伝導を測定するための電極を取り付けた。



Architectonics : 組みあげる

# 材料の “ミルフィーユ”で 高機能材料を

**馬 仁志**  
Renzhi MA

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA)  
ナノマテリアル分野 機能性ナノマテリアルグループ グループリーダー

層状物質には、結合が強固で容易に単層に剥がせないものがある。

馬仁志らは、これを化学的手法によって簡単に剥離する技術を誇る。

しかも、多種類の分子一層分の薄い材料を狙い通りの順番に組みあげられるという。

設計図通りに組みあげた人工材料は、単一物質では出せない機能を発揮し始める。

## 世界随一の 剥がす技術、重ねる技術

液体の入ったフラスコを馬がゆすると、ゆらめく物質が光を乱反射する。その物質こそが“ナノシート”——究極に薄い材料である。厚さは原子1個から数個分、水平方向にはその数千倍の広さに連なる2次元物質で、ナノスケール独特の性質を持つ。

自然界においては、シート状の物質が単一物質として存在することはほとんどなく、何層にも重なった固体(層状物質)として存在する。層同士の結合が弱ければ粘着テープを使ってはがしていくことが可能だが、強固に結合している物質では容易ではない。

MANA では世界に先駆けて、そうした層状物質をナノシートにまで剥離する技術を確立してきた。酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)や酸化マンガン(MnO<sub>2</sub>)といった酸化物質、遷移金属や希土類元素を含む水酸化物など、材料に応じて最適な剥離方法がある。

異なる種類のナノシートを積層させた人工格子材料を作る技術も、MANA が誇るオリジナルの技術だ。世界最小の高性能コンデンサ素子や、秒単位の短い時間で大きなエネルギーの蓄積・放出が可能なスーパーキャパシタ、白金などの貴金属を一切使わず世界最高水準の効率を発揮する電極触媒など、さまざまな材料においてブレークスルーをもたらす可能性を秘めている。

## 設計と制御の妙で エネルギー材料を

ナノシート人工格子材料の数ある応用先の中から、馬らが着目したのは蓄電池材料だ。電気自動車の充電1回あたりの走行距離を考えると、蓄電池の性能は満足のゆくものとは言い難く、高容量化が不可欠だ。また、充放電を繰り返しても劣化しない、つまりサイクル寿命が長くなくてはならない。

蓄電池の代表格、リチウムイオン二次電池は、電解質と正極と負極で構成されている。各材料の性質や組み合わせが、蓄電池の容量を左右する。今回、馬らは負極材料の改良に取り組んだ。現在、負極には炭素材料が使われているが、高容

量化に向けた候補のひとつが MnO<sub>2</sub> である。理論容量は炭素材料の3倍以上だ。たとえば、これを分子1層分の薄さにまで剥離して使えば、電極液との接触面積が増えるため反応効率が上がるはずだ。

MnO<sub>2</sub>の理論容量が高いのは、MnO<sub>2</sub>がマンガン(Mn)にまで還元されることに起因する。しかし、それは同時に、還元時に酸素(O)が抜けるため結晶構造が崩れやすくなる要因でもある。2、3回充放電をただけでも初期の結晶構造は破壊され、容量が激減してしまうのだ。薄層にするとなおさら崩れやすくなり、団子状に凝集してしまう。“高容量だが短寿命”が MnO<sub>2</sub> ナノシートという材料の悩みどころだった。

解決策として馬らが着目したのが、グラフェン(炭素原子がハチの巣状に連なるシート状の物質)だ。グラフェンで MnO<sub>2</sub> ナノシートを挟みミルフィーユのような構造にすれば、MnO<sub>2</sub> から O が抜けて結晶構造が変化しても凝集をグラフェンが防いでくれると考えた。

しかし、設計図どおりに組みあげるには問題があった。グラフェンは、グラファイトを酸化処理して剥離する化学的手法を使えば、安価かつ大量に合成できる。ただし、それだけではグラフェンに欠陥が入り物性が変化してしまうため、さらに電子を与える(還元する)ことで欠陥を修復し、元の物性に近づける。そうして得られた還元型酸化グラフェン(rGO)は、表面が負に帯電しているため、同じく負に帯電した MnO<sub>2</sub> ナノシートと、互いに離れようと反発する力が働いてしまう。そこで馬らは、さらに、このグラフェンに処理を施すことにした。PDDA と呼ばれる高分子を結合させたグラフェンは正に帯電するため、負に帯電した MnO<sub>2</sub> ナノシートに引き寄せられるようになる(図1)。

三角フラスコの中で MnO<sub>2</sub> ナノシートを攪拌しているところへ、グラフェンを少量ずつ滴下すると、自然とミルフィーユ構造の複合材料ができる。「高い温度

にしたり、強い圧力をかけたりといった条件を必要としません。この製造方法では、層の数は厳密にコントロールできませんが、おおむね5から20層の複合材料が得られました(図2)。

電極として評価してみると、面積比で MnO<sub>2</sub> ナノシートとグラフェンが1:1のとき、高容量で長寿命な負極材料となることが分かった。市販のリチウムイオン二次電池と比較すると、負極容量は2倍以上。5000 サイクル充放電しても1サイクル当たりの容量減少はわずか0.004%にとどまった。

## 応用広がるナノシート

「実はグラフェンを選んだのには、もうひとつ理由があります。もともと、MnO<sub>2</sub> を電極とした蓄電池では、電子の出入りを活性化させるために導電性カーボン微粒子が添加されていました。その導電性

カーボン微粒子の役割を、グラフェンに担わせようと考えたのです。そのねらい通り、電池としての性能が確認できたときは一番うれしかったですね。今回の値は、これまで報告されてきた金属酸化物負極材料の中でもっとも優れています。スーパーキャパシタや電極触媒などの開発を鋭意進めており、実現すればエネルギー貯蔵効率は大幅に改善されるでしょう」と馬。

ナノシートを積層する手法には、今回の方法以外にも一層一層、段階的に積みあげる手法もある。馬は「レゴブロックのように、層の順番も積みあげる数も、その秩序は自在にコントロールできます。ナノシートを積層して得られる材料の組み合わせには限りがありません。電極材料だけでなく、新しい機能材料をこれからも研究していきます」と意欲を語る。(文・大石かおり)

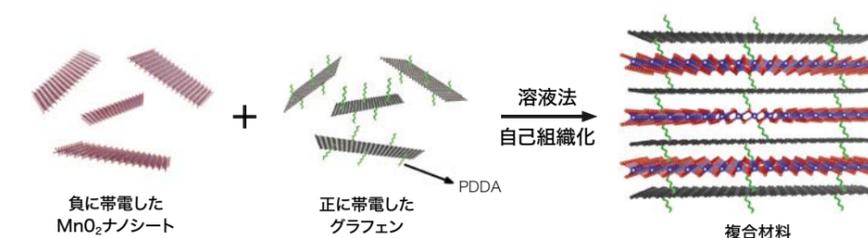


図1 MnO<sub>2</sub> ナノシートとグラフェンが複合する仕組み  
還元型酸化グラフェン(rGO)にポリ塩化シアリルジメチルアンモニウム(PDDA)ポリマーをつけることで、グラフェンを正に帯電させる。すると溶液中で軽く攪拌するだけで、負に帯電した MnO<sub>2</sub> ナノシートと交互に積層させることができる。

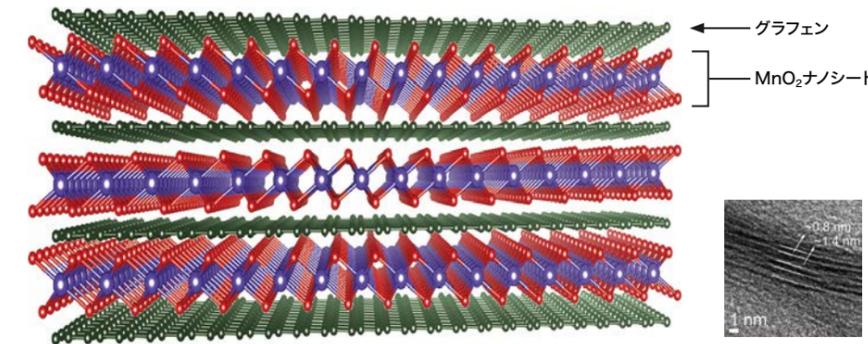


図2 MnO<sub>2</sub> ナノシートとグラフェンをミルフィーユ構造に積層した負極材料  
MnO<sub>2</sub> ナノシートは0.8nm厚、PDDA修飾した還元型酸化グラフェン(rGO)は1.4nm厚。右は透過型電子顕微鏡写真。馬は「負極容量は0.1A/gの電流密度で1325mAh/g。サイクル寿命も大幅に伸びました」と語る。

# ポリマーで輝くSmart Beauty

世界最大の化粧品会社の日本法人、日本ロレアル株式会社と NIMS が 2018 年 7 月に共同研究センターを立ち上げた。化粧品への応用を見据え、まず白羽の矢が立ったのは「スマートポリマー」だ。紫外線、温度、湿度……環境からの刺激で自らの性質を変化させるスマートポリマー。次世代の“賢い”化粧品への期待が高まっている。



**荻原充宏** Mitsuhiro Ebara  
マテリアルイノベーションセンター 責任者/  
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)  
メカノバイオロジーグループ 准主任研究者

引き伸ばされたポリマーが、お湯で温めると瞬間に元の形に戻る。このように外部から受ける刺激に呼応して、性質を変えたり元に戻したり、自在に制御ができるのが「スマートポリマー」だ。一般的にポリマーの性質を変えるには、反応釜の中で試薬を混ぜ合わせ化学反応させる。ところが、スマートポリマーは、紫外線、湿度、温度、pHといった環境の変化で性質が変わる。荻原はこう説明する。「分子をいかに組み合わせ、秩序良く並べるかによって多様な機能を発揮します。刺激で透明度が変化したり、水をはじくように変化したり……。機能性材料として大きな可能性を持っているの

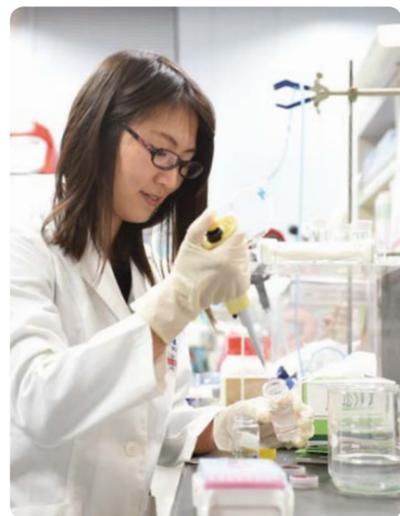
です。また、フィルム・ジェル・液体などの形状も必要に応じて設計できます。しかも安価なので、途上国や被災地などで使う高度医療材料にだってなり得ます」。そんな“賢い”変幻自在のポリマーが、化粧品と出会った。

2018年7月、日本ロレアルとNIMSは共同で「マテリアルイノベーションセンター」を設立。形状記憶するヘアスタイリング製品や、しわ、たるみ対策用スキンケア製品など、さまざまな国の環境や状況に臨機応変に対応できる製品の開発を進めていく計画だ。

「MANAは新しいナノマテリアルを生みだすのに最適な土壌です」と荻原。「私は“ナノアーキテクトニクス”の理念に基づき、精密な分子設計と、設計図に忠実なポリマー合成技術の確立に力を注いできました。MANAには同じ理念を共有するあらゆる分野の専門家が集います。合成したポリマーの評価方法を解析の専門家に相談すれば、オリジナルの装置が組みあがることもあります」と誇らしげに語る。一方、ロレアルには化粧品科学の専門家が集い、それに特化した試験設備がそろそろなど、スピーディに製品化するためのインフラが整う。

これまで医薬品への応用研究を進めてきた荻原。「スマートポリマーをがん細胞に直接はって治療するシートに応用し1人でも多くの命を救いたいと、研究に邁進してきました。一方、美容は人の生死には直結しません。しかし、人々の“クオリティー・オブ・ライフ”を支えることに変わりはない——。この連携は、私自身の視野を大きく広げてくれました。人々を笑顔にする製品開発に挑戦していきます」

(文・大石かおり)



ロレアルにとって、世界トップレベルの材料研究機関であり数多くの技術を産業界と実用化してきたNIMSは、「世界中の人々に最高の美を届ける」という使命を果たすための重要なパートナーです。最初の商品化を目指している材料「スマートポリマー」は、革新的な化粧品のコンセプトを実現するための夢の材料であると考えてい

ます。ここマテリアルイノベーションセンターは、材料科学と化粧品科学が融合するメルティングポットとして新奇アイデアを生み出し、美に関する消費者の要求に応えるための材料として具現化します。ここで生まれた材料をロレアルの製品に応用することで、イノベーションを実現していきたいと思ひます。



日本ロレアル株式会社  
**菅井 淳** センター長

きみが思っているより  
科学はもっとおもしろい  
かもしれない



## ナノ磁石をつくる微生物

文・えとりあきお  
イラスト・岡田 丈 (vision track)

私たちのまわりには、無数の微生物がいます。もちろん、大きさが数ミクロンとあまりにも小さいので、肉眼ではみることができません(肉眼でみえる大きさは0.1ミリ=100ミクロンくらいまで)

ある推定によると、地球上にいる動物の総量は数十億トン、植物が1兆トンから2兆トン、それに対して微生物は2000億から3000億トンというのですから、大変な量です(微生物はそのほか、地下にも相当量が存在するという説があります)。

実は、人間1人のからだの中にも、およそ100兆個の微生物が存在するそうです。特に微生物がたくさんいるのは腸のなかで、1人の腸に大体1.5キログラムの細菌がいるそうです。

こうした微生物を、私たち人類はそれと気づかずに昔から利用してきました。パンの酵母や、味噌をつくるこうじ菌、ヨーグルトの乳酸菌など……。

やがて、顕微鏡が発明されて小さいものがみえるようになると、微生物のはたらきがしたいに明らかになり、応用先も大きく広がっていきました。病気の原因となる微生物の働きを抑えるペニシリンのような抗生物質は、医薬品として多くの人の命を救いました。

いまや私たちのくらしと切っても切れない



い微生物ですが、実は現在知られている種はほんのひと握りで、数えきれないほどの新種が隠れているといわれています。たとえば2015年にノーベル賞を受賞した大村智先生は、人々の命を救う「イベルメクチン」という偉大な薬を開発しましたが、それを実現させたのは各地から集めた土のなかにいた新種の微生物でした。身近なところにいる微生物が今後、人間の生活のなかで大活躍する可能性を秘めているのです。

いま、世界中の池や沼、湖などに生息する、ある微生物が大きな注目を集めています。自分のからだのなかに小さな磁石をつくる、そんな面白い性質を持つ微生物が存在するのです。「磁性細菌」と呼ばれています。

どうして磁石を持つのかは、自らの移動のためという説が有力です。地球は北極をS極、南極をN極とした磁石で、しかも

地軸が傾いています。磁性細菌は体内の磁石をコンパスのように使い、地磁気の傾きに沿って北半球では北へ、南半球では南へと、自らの生育に適した水底を目指して移動すると考えられています。

磁性細菌は、からだのなかに鉄イオンをとりこんでそれをマグネタイト(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)と呼ばれる磁性微粒子に合成していきます。つまり、大がかりな装置を使うことなく、省エネルギーかつ大量にナノ磁石をつくり出すことができるわけですから、これまでさまざまな微生物の産業応用を試みてきた人々がこれを放っておくはずがありません。いまでは専門の国際学会ができ、基礎から産業応用にいたるまで、盛んに研究が進められているそうです。

最近では、磁性細菌において磁性微粒子の合成に関わるタンパク質(酵素)が見いだされ、磁性微粒子の結晶の形を制御するしくみが明らかになりました。また、東京農工大学では磁性細菌のゲノム解読に世界で初めて成功し、磁石をつくる微生物に共通する遺伝子のセットを明らかにしたという報告もあります。

将来、磁性細菌の遺伝子操作によって、さまざまな形のナノ磁石を自在に合成できるようになれば、その活用先は相当な広範囲に及ぶことでしょう。また、磁性細菌の中に薬を取りこませ、外部から与える磁力によって目的の場所へと誘導するドラッグデリバリーシステムにも、磁性細菌はきっと活躍することでしょう。

これからも微生物と人間の蜜月関係が、つづくことには、疑う余地がありません。

# MANA INTERNATIONAL SYMPOSIUM 2019 Jointly with ICYS

3/4~6  
mon wed

開催日：平成31年3月4日(月)～6日(水)  
懇親会(banquet)：3月5日(火)18:30～20:30  
会場：つくば国際会議場(エポカルつくば)  
参加費：入場無料(懇親会費：一般3,000円、学生1,500円)  
主催：国立研究開発法人 物質・材料研究機構(NIMS)  
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)

参加登録：事前の登録が必要です。下記よりお申し込みください。

<http://www.nims.go.jp/mana/2019/index.html>

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)は、革新的ナノテクノロジーを活用した材料科学の新しいパラダイム、“ナノアーキテクトニクス”の創出を推進しています。毎年開催しているMANA国際シンポジウムでは、最先端のナノテクノロジーに立脚した材料科学の現状と将来を、多くの著名な科学者や若い研究者と議論する機会を提供しています。

第12回目となるMANA国際シンポジウム2019では、

NIMS 若手国際研究拠点(ICYS)と協力し、ナノスケール知覚材料、知覚デバイス、知覚システムについて議論する予定です。さまざまな分野で目覚ましい活躍をされている招待講演者、MANA、ICYSの研究者らによる講演を通じ、将来を見据えた活発な議論を行います。材料科学に関心ある多くの皆さまにご参加いただき、斬新なアイデアの着想を得る機会としていただければ幸いです。

主な  
講演者

**Prof. DECHER, Gero** (University of Strasbourg, France)

"Bioinspired nano-composite materials with complex anisotropies"

**Prof. IWASA, Yoshihiro** (The University of Tokyo, Japan)

"Emergent Iontronics"

**Prof. MALLOUK, Thomas E.** (The Pennsylvania State University, USA)

"How Do You Make a Micro-Robot?"

※講演はすべて英語で行われます。  
※プログラムは予告なく変更になる場合があります。



NIMS NOW vol.18 No.6 通巻173号 平成30年11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印刷しています