

科学技術の近未来を拓く 東北大WPIの若手研究者



研究者が交流する場のティータイム 親密で熱い議論が「融合研究」を生む

東北大学が2007年10月に設立した原子分子材料科学高等研究機構（WPI-AIMR）では、毎週金曜日の午後5時から約1時間、研究者同士の懇親会である「Friday Tea Time」（通称はティータイム）と呼ぶ交流会が開催されている。このティータイムには、参加者が守るべき厳格なルールがある。

「参加者は、自分が所属する研究グループではない

研究者と顔見知りになるきっかけとしてまず名刺交換する」「自分の研究グループの参加者と話してはならない。他の研究グループの参加者と3人以上話をする」「融合研究を行うために、他の研究グループの研究者と顔見知りになり、親しくなる」——というものだ。

このルールは、WPI機構長の山本嘉則教授が決めたものだ。「材料科学を指向する研究者が世界中から本拠地に集結する研究センターを構築する」ためには、研究者同士が親しくなる場がまず必要になる。自分が現在取り組んでいる研究内容を親しい研究者と多面的に議論し

検証する中から、研究を進める方向のアイデアや難問を解くきっかけが生まれ、独創的な研究成果が誕生することが多いからだ。優秀な研究者同士が雰囲気は親密で気さくに、しかし内容は熱く話し合う場は優れた研究拠点として不可欠なものである。

ティータイムでの会話は英語が基本

東北大のWPIは現在、研究者が約150人在籍し、研究活動に励んでいる。研究者の国籍もさまざまで、外国人の研究者は半数を超えている。

この結果、ティータイムでの会話は英語が基本になる。実際には「話を始める時に外国人の方が相手だと自然と英語で話し始める」と、水上成美助教は説明する。相手が日本人同士の場合は日本語で話すことになるが、その場合にも、外国人の方が話の輪に加わった時には、英語に切り替える。

つまり、WPIの公用語は英語なのである。研究者だけではなく、WPIの事務局の職員も英語を話すことが求められている。研究用にさまざまな提出書類に加えて、仙台市で住むために行政などに提出する書類作成の支援などでも、英語が必要になる。事務職員はティータイムに積極的に参加し、研究者と顔見知りになるように努めている。

融合研究を推進する 相手を探す場として機能

ティータイムのルールに示された「融合研究」（Fusion Research）という言葉は学際などの融合領域での研究を意味する。最近では、単純な研究領域だけでは説明が進まず、いくつかの研究領域を融合する必要性が高まってきた。こうした融合研究を実際に進めるには「専門領域を持つ研究者同士がプロジェクトチームを組むなど、研究者同士の協力が不可欠になっている」（秋山琴音助教）。このため、研究者同士が交流する場として、山本機構長はティータイムを設けた。

この交流の場は、特に若手研究者の育成に役立って

（注）

*インパクトファクター（impact factor, IF）とは、自然科学・社会科学分野で発行されている学術誌が学術面で与える影響度を示す指標である。大まかにいえば、当該学術誌に掲載された学術論文の被引用回数の1年間分の平均値（3年分のデータから算出）であり、同じ研究分野の学術誌同士を相対的に

いる。WPIの若手研究者は日本や海外の大学や研究機関から志願し、選抜を経て採用されただけに、元々はほとんどが知らない者同士だ。自分の研究内容を多面的に検討するには、まず他の研究者と知り合い、どの分野の専門家なのかを知る必要がある。このため「出張中でない限りは、できるだけ参加している」と、多くの若手研究者は異口同音にいう。そして「自分の研究内容を拡充するきっかけをつかむために、他の研究グループの研究者と積極的に話し、融合研究をいくつか具体的に始めたところだ」と、上野和紀助教は語る。

WPIの研究者の使命は 優れた研究成果を上げること

WPIの若手研究者は材料科学の優れた研究成果を上げることが使命になっている。WPIの研究者は、大学での授業などの教育ミッションが免除されるなどの“特権”が与えられている。「入学試験などの大学教員としての仕事が免除され、研究に専念できる点では恵まれている身分だ」（一杉太郎准教授）が、その半面、雇用条件の方はかなり厳しい。

WPIに採用された若手研究者は採用期間を定めた“任期付き”雇用になる。給与は年俸制だ。准教授と助教は、任期は最長5年間で（更新あり）、2年ごとに研究成果を評価するレビューを受けなくてはならない。ポストドクター（博士研究員）は任期は1年間（更新あり）であるため、毎年レビューを受けることになる。

優れた研究成果を上げ、優秀な研究者としての名前が世界中に知れ渡ると、東北大を含めて他の大学や研究機関からの就職要請（オファー）が殺到するだろう。逆に、任期期間内に優れた研究成果を上げないと、プロとしての洗礼を受けるという厳しい現実が待っていることになる。

WPIの研究者は、インパクトファクター*が高い海外の一流の学術誌に自分の研究成果を投稿する。学術の世界で、一流の研究者として認められる王道としての手段だからだ。

任期付き雇用や年俸制などの雇用条件は、世界の

比較する尺度である。現在は毎年、米国の大手情報企業のトムソン・ロイター（Thomson Reuters）が作成する引用文献データベース「Web of Science」に収録されるデータを基に、インパクトファクターが算出される。

トップレベルの研究拠点では多くが採用しているものである。東北大のWPIなど現在5拠点あるWPIでは、研究環境や雇用条件などが世界的な基準を持つ“特区”として機能している。

若手研究者は、現在、“主任研究者”である「世界トップレベルの研究者」30数人の研究室にそれぞれ所属している。この「世界トップレベルの研究者」とは、学術論文の被引用数が非常に多い、国際会議などの招待講演が相次ぐなどの国際的な名声の持ち主である、大型の競争的資金を獲得できる——などの実力者を意味する。世界トップレベルの研究者の下で、研究の進め方などを直接学ぶことで、世界トップレベルの研究者を育成する仕組みになっている。

文部科学省は、WPIの在り方を説明した「世界トップレベル国際研究拠点形成促進プログラム」では、世界トップレベルの研究者がぜひそこで研究したいと、世界中から集まってくるような、優れた研究環境と極めて高い研究水準を誇る拠点になってほしいと考えている。



水上成美 助教



秋山琴音 助教



山本嘉則 機構長・教授





「金属ガラスの本質に迫りたい」 原子配列構造の不均一性を発見

藤田武志 助教

“金属ガラス”*と呼ばれる不思議な合金がある。簡単にいえば液体がそのまま固まったものだ。普通の合金は加熱して溶かした後に冷却して固まらせると、合金を構成する各原子が整然と規則正しく並ぶ結晶構造をつくる。これに対して、金属ガラスと呼ばれる合金は、溶けた液体状態がそのまま凍結して固まる。

このため、金属ガラスは合金を構成する各原子が結晶構造のように規則正しく並ばず、液相を構成する各原子がバラバラな配列のままで固まる——と、これまででは考えられてきた。

ところが、金属ガラスの原子配列構造をよく調べると、原子は均一にバラバラではなく、不均一に片寄ってバラバラに並んでいることが分かってきた。“不均一にバラバラに並んでいる”という難解な原子配列構造を見出した中心人物の一人が藤田武志助教である。この難解な現象の正体は「構成元素がそれぞれのクラスターをつくっていることである」と藤田助教はいう。

大きな金属ガラスをどうつくる 構造解析で成形成を解明

東北大学WPIの陳明偉教授と藤田助教の研究グループは、銅・ジルコニウム (Cu・Zr) 系の金属ガラスに銀 (Ag) を添加すると、なぜか金属ガラスができ

やすくなる現象の解明に着手していた。この現象は「金属ガラス成形成が高まる」と表現され、金属ガラスができる本質にかかわる重要なものだった。

金属ガラスは液体が過冷却現象によって固まったものなので、金属ガラスとして固まる大きさには限界があった。組成にもよるが、一般的には直径が数10mm程度の大きさが限界になっている。つまり、大きな金属ガラスをつくるためには、金属ガラス成形成を高める機構を解明することが重要になる。

藤田助教はX線吸収分光法の一つであるEXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) 法を用いて精密な構造解析をするために、大型放射光施設「SPring-8*」を利用して計測・解析した。EXAFS法は試料を構成する原子の微視的構造の情報を得ることができる。得られた金属ガラスの微視的な構造解析は仙台高等専門学校の研究者と共同で実施した。

この結果、銅・ジルコニウム・銀系合金の金属ガラスは銀原子が4個つながり、その周囲をジルコニウム原子が囲っているクラスターと銅原子とジルコニウム原子を多く含むクラスターで構成される原子配列構造を見出した。隣接するクラスター同士はそれぞれ原子を共有する構造になっている (図1)。

このことから原子レベルでは不均一な原子配置が金属ガラス成形成を高めることがみえてきた。大きな金属ガラス製の部品をつくる指針が分かってきたということになる。科学面での発見が工業面での応用に役立つ典型的な事例に成長しそうな研究開発成果である。

東北大金研が 金属ガラスの研究開発をリード

特異な性質を持つ金属ガラスは、東北大学金属材料研究所 (金研) が1980年代後半に見出し、その後も金研が研究開発の中心的な役目を担ってきた。2007年10月1日に、東北大にWPIの原子分子材料科学高等研究機構 (Advanced Institute for Materials

(注)

*金属ガラス (Metallic Glass) は、合金組成によっても左右されるが、高強度、低ヤング率、高耐食性、高透磁率などが優れているとの特異な性質を持つ。特に、液体がそのまま固まるために、固相になる時に体積収縮が起こらず、ニアネットシェイプ成形ができるという工業面で重要な性質を持つ。この結果、一般の鋳物と異なり、後工程での仕上げ加工がほとんど必要ないなどの利点が生じる。

Research) が設置され、金属ガラス分野でも金研と連携する態勢をとった。WPI側では、陳教授がシバルク金属ガラスの研究開発のリーダーを務める。

陳教授が金研の教授として金属ガラスの研究開発を推進している時に、藤田助教は金研助教に採用された。陳教授がWPIに異動した2008年に、藤田助教もWPIへの異動を志願し、同年7月に無事採用された。WPIに異動した後も「金属ガラスの本質を解明する姿勢は変わらない」という。

球面収差が大幅に小さいTEMで 金属ガラスの構造を精密解析

最近、藤田助教は新しい計測装置を整備し終わり、研究開発を加速し始めた。2009年3月に設置した新しい透過型電子顕微鏡 (TEM) の活用に余念がない。ダブル球面収差補正レンズ付きTEM (加速電圧200kV) という、現時点では世界でも数台しかない高分解能な電子顕微鏡だ (図2)。

電子顕微鏡は電子を試料に透過させ、磁界でつくったレンズで透過電子線を収束させて像をつくる。ところが厳密には透過した電子線が1点に収束しない“収差”という現象がわずかだが起こり、透過した電子線がつくる像が少しぼやけ、その分だけ分解能が落ちる。

藤田助教は収差の中で球面収差を抑制する装置をTEMに組み込んだ。この球面収差補正レンズ付きの高分解能TEMは価格が2億円程度もかかった高価なものだ。藤田助教は新しいTEMの操作方法や性能限界を見極めるために、いくつかの試料を観察した。

たとえば、ケイ素 (Si) の単結晶の (110) 面を観察し原子の大きさの 10^{-10}m (0.1nm) の識別ができることを確認した。また「加速電圧を120kVに低速化してポリマーなどの有機材料を観察できることも確認できた」という。低加速化したことで、有機材料に電子線を照射しても損傷が小さくなったため、観察可能となった。

金 (Au) のナノ微粒子も観察し、粒子内部の原子配列を鮮明に見ることも可能になった。こうした観察実験を重ね、いわゆる装置固有の「装置定数をつかんだ

*SPring-8は、独立行政法人理化学研究所が運営する世界最高性能の放射光を利用できる大型放射光施設。兵庫県の佐用町 (播磨科学公園都市と呼ぶ地域) にある。SPring-8の運転・管理は財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) が担当している。

ところ」と藤田助教はいう。

ここまで高分解能なTEMは、日本の他の大学や公的研究機関などにはないため「既に共同研究の申し込みが来ている」という。もちろん、WPI内での他の研究グループとの融合研究的な共同研究も増やす構えだ。

金属ガラスの研究開発に加えて、いろいろな材料を観察してみたいという。たとえば、量子ドットの構造やナノ空隙を持つ多孔質金属などの微細な構造を観察してみたいと抱負を語る。

電子顕微鏡のプロとして 本質に迫る構造解析を続ける

藤田助教は、九州大学大学院の博士課程で透過型電子顕微鏡を利用して材料科学を研究した。このため、元々、電子顕微鏡の扱いに慣れ、その計測・解析装置としての能力を最大限引き出すプロである。学生時代は当然、共用の電子顕微鏡を使っていた。その藤田助教は自分が自由に使いこなせる電子顕微鏡を手に入れたことを素直に喜ぶ。独自の有力な研究ツールを入手することは、プロの研究者として独創的な研究成果を得ることの必要条件になるからだ。

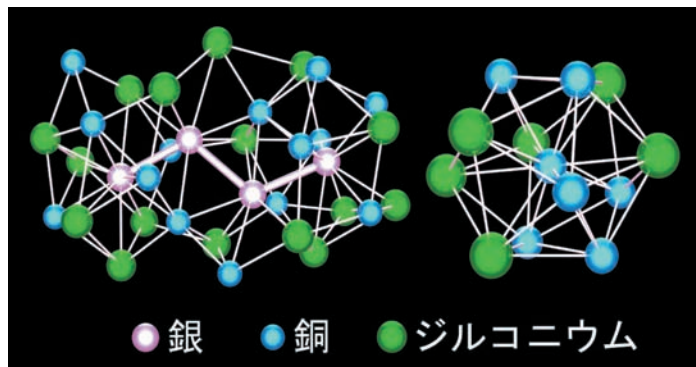


図1 ●銅・ジルコニウム・銀系合金の金属ガラスは、銀原子が中心部で4個つながっている構造のクラスターと、銅原子とジルコニウム原子を多く含むクラスターの2種類で構成されている



図2 ●ダブル球面収差補正レンズ付きの透過型電子顕微鏡 (加速電圧は200kV)



「新しいナノワイヤーができました」 すべての金属ガラスに適用可能に

中山幸仁 准教授

直径が髪の毛の千分の一と極めて細い繊維「ナノファイバー」は、ナノサイズの微細構造からくる特徴によって、通常の繊維とはひと味もふた味も異なる特異な性質を発揮する。このため、さまざまな応用が考えられることから研究開発が近年活発化しており、日本ではナノファイバー研究会やナノファイバー学会などが相次いで設立された。

2009年6月に東京工業大学は「国際ナノファイバーシンポジウム2009」を東京都目黒区の大岡山キャンパスで開催した。ナノファイバーの第一線の研究開発者が世界中から集まった同シンポジウムでは、最新の研究開発成果が報告された。東北大学WPIの中山幸仁准教授はセッション「ナノ材料の今後の展開はどうあるべきか」の中で「金属ガラスナノワイヤの最前線」を発表し、大きな注目を集めた。金属ガラスという新しいアモルファス合金材料の中から、「金属ガラスナノワイヤー」(図1)という新しい1次元ナノ構造を誕生させた報告だったからだ。

金属ガラスの溶融部から 鉛を引っ張るように作製

中山准教授は直径が最小で数10nmの金属ガラス製

のワイヤーができることを、円柱形状の金属ガラスの圧縮変形時に見い出した。金属ガラスの力学的な性質などを解明するために、ジルコニウム (Zr) 系金属ガラス製の円柱状試料を上下から加圧する圧縮試験を行った際だった。金属ガラスは液体がそのまま凍結したものであるため、構成する各原子はバラバラに配置している。通常の金属は結晶構造を持ち、構成元素が規則正しく並んでいるために、整列した原子が集団で、ある面で滑るような変形をする。これに対して、金属ガラスは構成原子がバラバラに配置しているために、せん断応力によって円柱を斜めに切ったような面状に溶融層ができ、溶融した液体が引きはがされるように、部分的に糸状に引っ張られたり、丸くカールしたりするような“橋”状の構造の破面が生じた。

この破面を走査型電子顕微鏡で詳細に観察したところ、糸状に引っ張られた部分には直径が10nm～1μm程度のワイヤーができていた。また、カールした部分にはチューブ状のものができていた。これが金属ガラスのナノワイヤーが発見された時の経緯だ。2008年1月の研究成果だった。

ジルコニウム系に続いてパラジウム (Pd) 系などでも金属ガラス製のナノワイヤーができることを確認した。「数百種類もの多くの組成の金属ガラスでナノワイヤーができる」と、中山准教授は考えている。最近では「長さ1cm程度の鉛^{あめ}を引っ張ったような長いナノワイヤーをつくれるようになった」という。

金属ガラス箔中央部を加熱する 効果的な作製手法を考案

金属ガラスナノワイヤーを発見した中山准教授は、ナノワイヤーを効率的に作製する方法を考えた(図2)。考案した作製法は、金属ガラス製のリボン^{あめ}を上下にピンと引っ張り、その真ん中付近を局部的に加熱して、水平方向の線状に溶融した状態をつくり出す。リボンを上下に引っ張って溶融した部分が鉛状に伸びる際に、

ナノワイヤーができる仕掛けだ。作製装置は、真空容器内部に金属ガラスリボンをつるす。リボンの下側に重りとなる治具をつるす。この上下に張った状態で固定し、加熱したタングステンフィラメントをリボンの中央に近づけ、リボンの真ん中で直線上に溶融させ、リボンを上下に引っ張るものだ。このナノワイヤー作製法は細部にかなりのノウハウがあり、「作製法に関して特許を出願中」という。中山准教授は、「この方法はすべての金属ガラスに適用できる」という。

最近、金属ガラス製のナノワイヤーは高い曲げ性能を持ち柔軟性に優れていることが見い出されたり、ヤング率が大幅に高いなどの特異な性質が発見され、こうした特性を生かした応用分野の検討が始まった。

金属ガラス製ナノワイヤーがその“実力”を発揮できそうな応用分野は、「磁気センサー」だという。100兆分の1T(テスラ)という微細な磁場を計測できる可能性がある。これが実現すると、現在超伝導量子干渉素子(SQUID)などで計測している「脳磁界計測などの最先端医療分野に適用できるだろう」と期待を膨らませる。

手づくりの実験装置に こだわりを持つ

現在、中山准教授が所属する東北大WPIは最新鋭

の実験装置が並ぶ最適な研究環境を誇る。中山准教授も自分の研究費を獲得し、自分の実験装置として、金属ガラスナノワイヤー作製装置を組み立てた。これを武器としてさまざまな研究開発に応用し、成果を上げている。

中山准教授は横浜国立大学大学院で博士号を取得してから、米国のミネソタ大学、東京大学、東北大学、米国イリノイ大学で研究^{さんまい}三昧の生活を送った。博士課程の学生やポストドクター(博士研究員)として過ごした武者修行時代に身に付けた習慣は、「廃棄された実験機器を譲り受けて再活用すること」と中山准教授は苦笑する。

潤沢な研究開発費がいつもあるとは限らない博士課程の学生やポストドクター時代に、手づくりの実験装置で研究成果を上げた経験から、「独創的な実験装置を手づくりすることにこだわりがある」という。自分で工夫した実験装置でないと、優れた研究成果が得られないことを痛感している。

実は、WPIの母体である東北大金属材料研究所には、手づくりの実験装置から独創的な研究成果が生まれるという“神話”がある。この金属材料研究所に二度、在籍したことがある中山准教授は、この伝統をしっかり受け継いでいる。



図1●金属ガラスナノワイヤーの走査型電子顕微鏡像。中央部の細長い線がナノワイヤー。金属ガラスナノワイヤー作製装置で作製

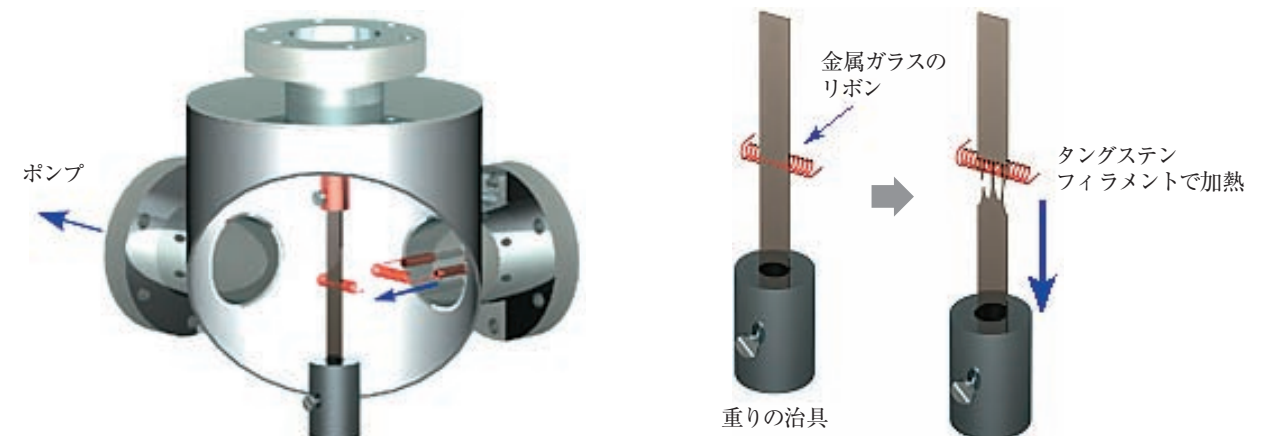


図2●金属ガラスナノワイヤー作製装置



「役に立つ新酸化物を創りたい」 究極の分解性能の実験装置を駆使

一杉太郎 准教授

「新しい実験装置向けに特別な基礎工事を施しても良かった」と、一杉太郎准教授は語る。同氏が今いる実験室がある東北大学のWPIインテグレーションラボ棟を建てた時のことだ。

新実験装置は原子レベルの微妙な測定を行うために、原子レベルのわずかな揺れが厳禁となる。このため、実験装置を支える基礎部分は、建物の基礎に固定するのではなく、地中の岩盤に直接打ち込む究極の防振工事となった。「この基礎工事だけで数1000万円もかかったが、建物の下の地層に頑丈な岩盤があったことは本当に幸運だった」と笑う。

究極の防振工事ができなければ、高精度な実験そのものができない。費用がかかっても実現できたことを、一杉准教授は素直に喜ぶ。かかった費用は、新物質の発見によって報いられれば済むと考えているからだ。

これまでにない最新鋭STMで 極低温・高磁場環境を実現

一杉准教授は、これまでにない新しい物質をつくらせて、新しい性質を発見するために、高性能な走査トン

ネル顕微鏡 (STM) *とパルスレーザー蒸着 (PLD) *装置を組み合わせた実験装置を用意した (図1)。

新物質をつくるために、PLDによって原子や分子を1層ずつ精密に積み上げていく。その際に、原子や分子を1個単位の 10^{-10} mレベルで操作することもケースによっては必要になる。新物質をつくり出すことが、新しい性能を発見する出発点になるからだ。

このように作製した物質の特徴を原子レベルで調べるため、原子の大きさの微少な振動を防ぐことが不可欠になる。基礎部分に加えて、実験装置内にも当然、最新の防振装置のアクティブダンパーを組み込んでいる。また、実験装置全体は防音室に収められている。振動厳禁なため、「良い成果を得る実験は気合いを入れないとできない」と真顔で語る。

新実験装置の中心となるSTMは新しい顕微鏡としてはある程度普及している。しかし、一杉准教授が今回組み上げたSTMは観測装置部分に電界イオン顕微鏡や電子線回折などの別の観察装置を組み合わせた独自のSTMに仕上げる工夫を施した。

観察する試料室の環境も極低温・高磁場をつくり出せる独自のものに仕上げた。極低温は0.4Kを達成できるように液体ヘリウムを用いる冷凍機を組み込んだ。高磁場は磁束密度7Tをつくり出せる超伝導マグネットを組み込んである。極低温・高磁場の環境でないと、姿を現さない物質の性質もあるからだ。

「これまでにない実験装置をつくり上げて研究開発することが新発見のカギになる」と一杉氏は説明する。

透明性と導電性を兼ね備えた 2酸化チタンを発見

一杉准教授の名前を材料科学分野で一躍有名にした研究開発成果は、2酸化チタン (TiO_2) の透明導電材料を見出したことだった。2003年10月に東京大学大学院の理学系研究科の助教に就任し、長谷川哲也教授の研究開発グループの一員に加わった。その研

(注)

* STM (Scanning Tunneling Microscope) は走査トンネル顕微鏡と呼ばれる精密な計測機器。一般に電気伝導性を持つ試料表面に、針状のプロブ (探針) を限りなく近づけた時に流れるトンネル電流を測定する。探針と試料表面の距離を一定に保つように計測するなどの測定法を利用する。

究開発の中で、2酸化チタンにニオブ (Nb) を添加すると、透明性と導電性を両立させる組成があることを見出した (図2)。2005年のことだった。

酸化物では透明性と導電性を兼ね備えることは一般的には相反する性質なので、実用性のある物質では4種類しか見い出されていない。中でも2酸化チタンは、液晶パネルなどの透明電極材料の有力候補として注目を集めている。現在、透明電極として利用されているインジウム・スズ酸化物 (ITO) の代替材料として注目され、研究開発が盛んになっている。

こうした研究開発の先駆けとなったのが一杉氏の研究開発成果だった。発見できたポイントは、結晶がきちんと成長した高品質な薄膜をつくる技術だった。ガラス基板の上に2酸化チタンとニオブの混合物を原子の並び方がバラバラなアモルファス (非晶質) 状態の薄膜をつくり、これを加熱して微細な結晶で構成される薄膜にする。

このつくり方が発見の基となった高品質な酸化物の薄膜づくりは大学院生だった当時に、高温超伝導で話題を集めた酸化物超伝導体の研究で会得した技術だった。こうした幸運なセレンディピティーは、運を引き寄せる努力の上に花開く見本のようだ。

企業勤務の経験を生かし 研究成果を応用開発につなげたい

2007年12月に東北大のWPIに異動した一杉准教授は、現在の研究開発目標を三つに絞っている。第一はSTMベースの新実験装置を用いた酸化物薄膜の研究開発だ。チタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) などの古くて新しい酸化物を相手に精密に測定することで新しい性質を見出し、有用材料であることを示す。第二は電気自動車などで最近事業化が一気に進み始めたリチウムイオン2次電池の電極となるリチウム (Li) イオン酸化物の研究開発テーマだ。この分野は新しい正極材料の開発が活発化しているホットな分野だ。

第三は、東京大学と連携している2酸化チタンの透明導電材料としての研究開発テーマだ。「透明性と導

* PLD (Pulsed Laser Deposition) 装置はパルスレーザー蒸着装置と呼ばれ、真空室内に置いたターゲット材料表面に強力なパルスレーザー光を照射すると、アブレーションと呼ばれる急激な蒸発現象が起こり、蒸発した原子群が向かい合う基板表面に蒸着して堆積 (たいせき) し薄膜をつくる。何回もパルスレーザーを照射し、堆積層の厚さを増やす。また、蒸発させるターゲットを複数にすると、異なる元素 (分子) などを層状に堆積させることができる

電性を両立させた新物質を見出したい」という。文部科学省・科学技術振興機構 (JST) が現在進めている元素戦略プログラムの一つとして東大の長谷川教授の研究提案が選ばれ、透明電極材料としての可能性を追究しているからだ。

一杉氏は東大大学院工学系研究科で博士号を得て修了した1999年4月にソニーに就職した。この時の経験から、「大学と企業をつなぐ研究開発を実践したい」という。たとえば、2酸化チタン系の透明導電材料でも、単なるインジウム・スズ酸化物の代替材料を狙うのではなく、2酸化チタン系の特徴である屈折率が高い点や、還元雰囲気で劣化しない、耐薬品性に優れているなどの「独特な性質を生かす用途開発を手がけたい」という。

企業人の考え方が分かる大学の研究者としてインターフェース役を務めることも、自分の独自性を発揮する強みと信じているようだ。

大学と企業の研究者の違いは、大学の研究者は自分の責任で研究テーマを選び、自分の責任で研究開発計画を立てて実行し、その成果を論文などのかたちで公表する。すべて自分の責任で行い、その記録が個人名で残る。独自の発想でどれだけ工夫したかなどが、かなりオープンになるだけに、やりがいがある仕事だと語る。

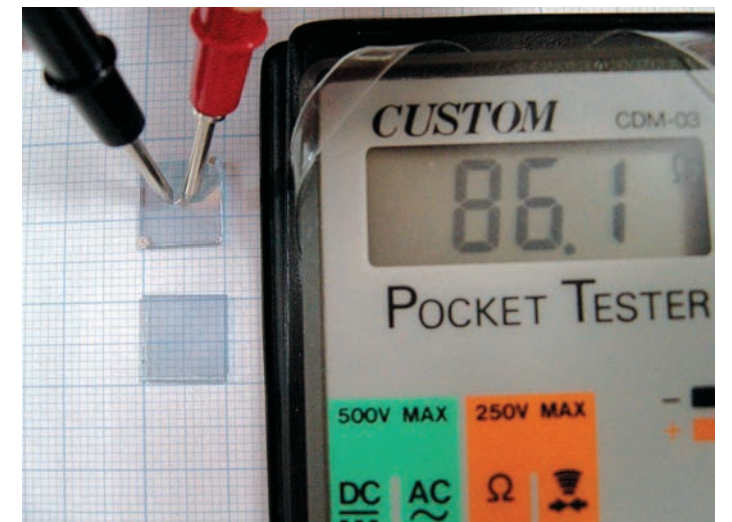


図2●透明性と導電性を持つ TiO_2 膜



「超伝導を電界効果で起こします」 電気二重層トランジスタを活用

上野和紀 助教

電気抵抗がゼロになる超伝導現象を使うと、電流がほとんど損失しないで電気を流すことができる。この魅力的な特徴を生かして、伝送損失がほとんどない電力送電ケーブルや高効率な超伝導モーターなどの応用開発が活発に続けられている。

超伝導現象が画期的なイノベーションをもたらすと多くの人に期待されるようになったのは、1986年から始まった“高温超伝導フィーバー”からだろう。

ランタン (La) 系酸化物が超伝導を示すことが見出されてから、液体窒素温度 77K (−196℃) の“高温”で超伝導となる高温超伝導体*が次々と見出された。この高温超伝導体を研究開発する手法の主演は、銅酸化物に不純物元素を添加する“不純物ドーピング”という手法だった。不純物ドーピング手法によって見出された高温超伝導体の代表格であるイットリウム (Y) 系やビスマス (Bi) 系の銅酸化物の実用化検討が活発化している。

電界効果によって 超伝導を発現

これに対して、東北大学 WPI の上野和紀助教は電界効果によって酸化物内に電気を通す“伝導キャリア”

(電子やホール) を大幅に増やすという新しい手法によって超伝導体をつくる研究を精力的に進めている(図1)。「電圧を変えるなどの電界効果によって超伝導現象を起こす方が使いやすい用途があると考えているからだ」という。電圧をかけると超伝導状態になり、電圧かけると通常の絶縁状態に戻るといったオン・オフできる点が使いやすいとみている。

従来の不純物を添加する手法では、超伝導を引き起こしている伝導キャリアである電子の動きを、その不純物原子自身が邪魔するケースもあると考えられている。この点でも、「電界効果によって超伝導を起こす手法は有利な場合がある」と、上野助教は推測している。

電気二重層を利用した 新デバイスを試作

「電界効果」という言葉は、現在は電界効果トランジスタ*という言葉で目にすることが多い。この電界効果トランジスタは、集積回路 (IC) の論理回路などに活用されており、現在ではなくてはならない存在になっている。

上野助教は、酸化物に超伝導現象を起こさせるためには電界効果トランジスタで作り出せる伝導キャリア量では不足すると判断し、「電気二重層トランジスタ」という新しいデバイスを活用する手法にたどり着いた。

「電気二重層トランジスタはトランジスタの絶縁体層の代わりに電解液を用いることで、イオンと電子が正と負の電荷を蓄積するコンデンサーとなり、桁違いに多い正と負の電荷を蓄えられる点に着目した」と説明する。

上野助教は、研究開発対象とする酸化物として、酸化物エレクトロニクスとして標準的に用いられているチタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) を選択した。チタン酸ストロンチウム単結晶の上に固体電解質を用いた電気二重層トランジスタを組み込んだデバイスを試作し、

(注)

* 高温超伝導体とは、1986年にスイスのIBMチューリヒ研究所がランタン・バリウム・銅・酸素 (La-Ba-Cu-O) 系が超伝導を示すことを発見したのを契機に、液体窒素温度 77K (−196℃) 以上の温度で超伝導を起こす銅酸化物が相次いで発見された材料群を意味する。実用化面ではイットリウム (Y) 系やビスマス (Bi) 系の銅酸化物が先行しているが、銅酸化物系ではない新しい超伝導材料も発見され、物性面からも超伝導が起こる機構の解明が進んでいる。

ゲート電圧を加えるとデバイスが稼働することを確認した(図2)。

このチタン酸ストロンチウムを利用した電気二重層トランジスタのデバイスを極低温に冷却し、0.4K で超伝導を起こすことを確認した。電界効果によって、酸化物のチタン酸ストロンチウムが超伝導になることを初めて示した実験結果だった。

高温超伝導の研究開発時に対象となった酸化物の中には、伝導キャリアを多く導入できない酸化物もあった。上野助教が見出した電界効果による超伝導化の手法を適用すると、超伝導を示す新しい酸化物が発見される可能性が高まった。たとえば、上野助教の研究グループはタンタル酸カリウム (KTaO_3) が超伝導現象を起こすことも確認した。

「高温超伝導材料をはじめとする新しい電子機能を引き出す可能性を見出した点に意味がある」という。上野助教は「炭素の結晶体であるダイヤモンドに2次元性の超伝導現象や、化合物半導体である窒化アルミニウム (AlN) を超伝導体に変える研究開発の端緒をつかみたいと考えている」という。

* 電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor, FET) は、ゲート電極に電圧をかけることで、ソース・ドレイン端子間の電流を制御するトランジスタ。FET を利用した金属・酸化物半導体膜型 (Metal Oxide Semiconductor FET: MOSFET) は現在の集積回路 (IC) の論理回路などに多く利用されている半導体素子である。CMOS 型 (Complementary MOS: 相補型 MOS) の形で利用されるケースが多い。

融合的な共同研究を目指し 多様な人脈を築く

東京大学大学院で博士課程を修了した上野助教は、学生時代から産業技術総合研究所と連携して研究開発を実施するなど、自分の研究開発テーマを最大限に生かす人脈づくりを心がけてきた。東北大にも多種多様な研究開発を手がける研究者・教員が多いため、大学内の共同研究に力を入れている。

チタン酸ストロンチウムの電界効果による超伝導化の研究開発では、「極低温科学センターや金属材料研究所の方々にお世話になった」という。最近では WPI 内の若手研究者との融合的な研究開発を進めるため、毎週金曜日の夕方に開催される“ティータイム”というネットワーキングの集まりには、「出張中でない限りは参加するように心がけている」と語る。多種多様な研究者と刺激し合うことが独創的な発想を生み出すと上野助教は考えているのである。

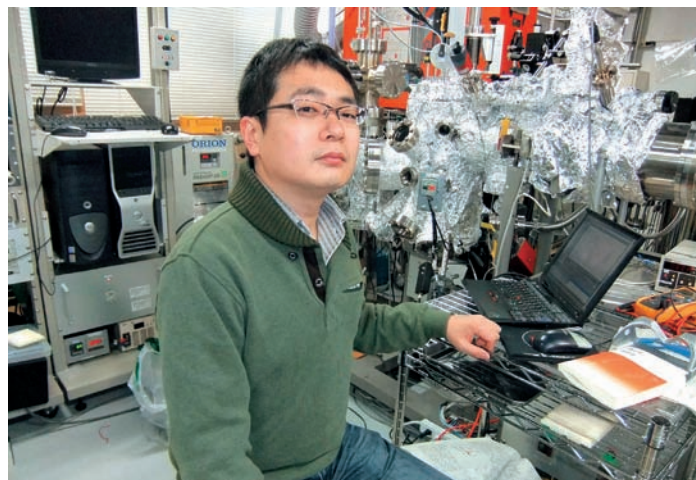


図1 ●超伝導を引き起こす新しい酸化物をつくる実験装置群の一部

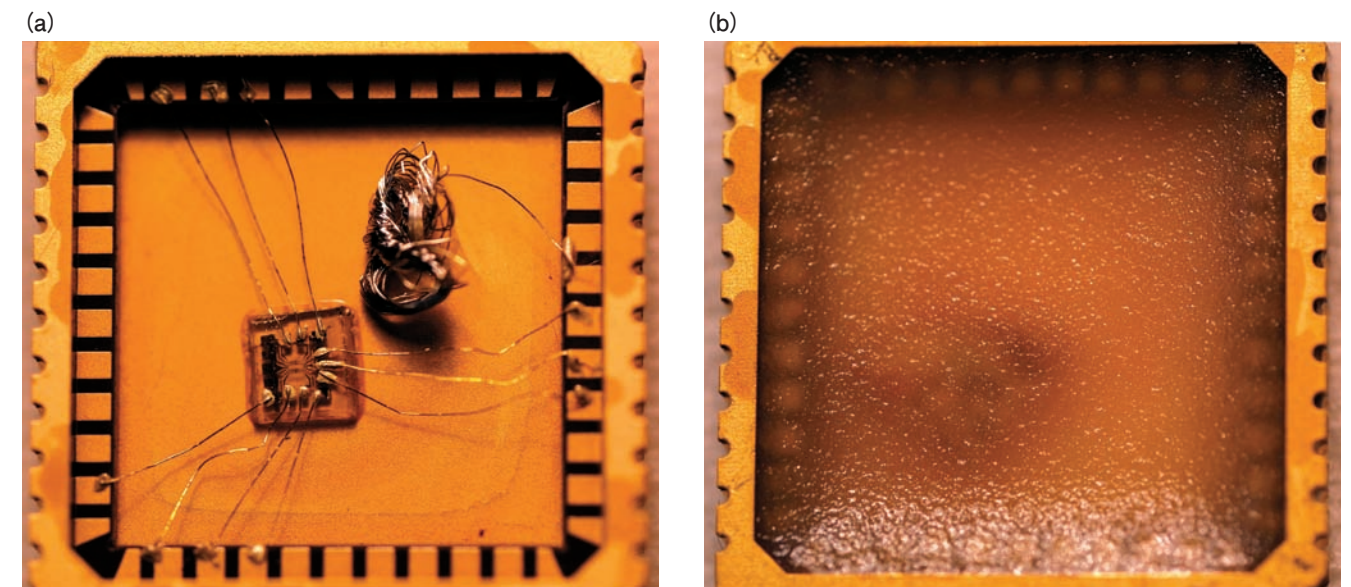


図2 ●チタン酸ストロンチウム単結晶の上に電気二重層トランジスタを組み込んだデバイス試作品。
(a) 固体電解質を流し込む前のデバイス構造、(b) 固体電解質を流し込んだ後のデバイス試作品



「生体が持つ機能を引き出します」 ナノテクで親水・撥水表面を実現

石井大佑 助教

蓮の葉の上^{ハス}にできる無数の水滴が風に揺られて微妙に動く…。蓮の葉の表面は^{はっすい}撥水性が高いために、水滴が生じて、ころがる。この水滴のように、小さな“液滴”を精密に1滴ずつ移動させる研究開発に、東北大学WPIの石井大佑助教は没頭中だ。図1に示した「ハイブリッド表面」は親水性と撥水性をナノテクノロジーによって精密に制御した表面である。ハイブリッド表面の吸着力を精密に制御することで、液滴1滴を移動させる仕組みだ。

液滴を精密に輸送するといった微細操作は、直接的には血液検査などへの応用が考えられる。さらに「MEMS (Micro Electro Mechanical Systems、微小電子機械システム) デバイスや電池をつくる際の精密加工や、ある表面にセルフクリーニングする機能を持たせるなどの親水・撥水加工などへの応用も見込まれている」と石井助教は説明する。

意外と大きな市場が期待できそうなのが、空気中の蒸気を水分として捕捉する用途だ。石井助教の恩師である下村政嗣教授は「砂漠などの昼と夜の気温差を利用し、湿気を含む空気から水分を捕捉する用途を考えている」という。実用化が近いと見込まれているようだ。

生体の高機能性を目指し 親水性と撥水性を高度に利用

石井助教の研究開発テーマはバイオミメティクス

(生体模倣技術)だ。生物が持つ優れた機能や構造などのデザインを高度に模倣し、人間に役立つものを実現するのが狙いだ。たとえば、昆虫の蛾^ガの目は光の反射を少なくするために、微細な突起が規則正しく並び、小さな波形が続く構造をとる。この微細波形構造を太陽電池の表面に適用すれば、発電効率が高まると考えられ、応用開発が進められている。

生物はそれぞれ独特の機能を持っている。このため「応用を考えるネタには困らない」という。石井助教は水に対する表面の超撥水性という点は、蓮の葉や蝶の羽の表面構造から学んだ。この表面は“表面自由エネルギー”という表面が他のものと作用する力(正確にはエネルギー)が小さい特殊な表面構造になっており、水滴をはじく。

「ゴミムシダマシ」という昆虫の背中にも着目した。この昆虫の背中に生えた微細な毛は親水性と超撥水性の部分が混在し、超撥水性部分で水滴をつくり、親水部分で水滴を捕獲する機能を持つことで有名だ。同様に、両生類のヤモリの手足裏側にも注目した。微細な突起物が複雑に生えた、親水性と超撥水性の部分が混在する構造を備え、水滴を移動させる機能を持っている。

石井助教は撥水性を示す疎水性の微細構造に、親水性の微細な部分を組み合わせ、その親水性の機能の強弱を外部からの刺激で制御させる研究開発に取り組

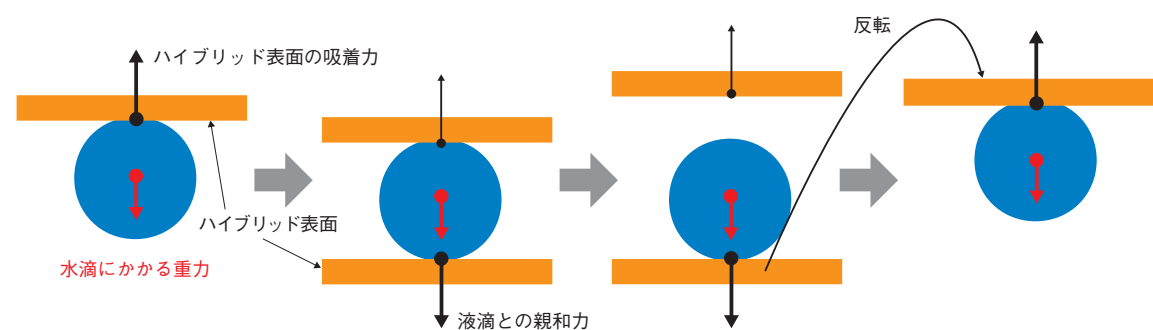


図1 ● 「ハイブリッド表面」の親水性と撥水性を制御し、液滴を精密に操作する模式図

んでいる。表面自由エネルギーを部分ごとに最適制御し、撥水(疎水)性と親水性を巧みに組み合わせることを目指した。

自己組織化ハニカム膜を基に 独自の工夫でハイブリッド膜に

こうしたバイオミメティクスの研究にあたって石井助教は、下村教授の研究成果を基盤とした。下村教授は直径数 μm の球状の穴が整然と並んだ高分子膜を実用化した実績を持つ。見た目は蜂の巣状の高分子膜は「自己組織化*ハニカム膜」と名付けられた。つくり方は、空中の蒸気を高分子溶液表面に結露させ、小さな水滴が規則正しく並んだ状態のままで高分子を固まらせた後に、水滴を蒸発させると、水滴の跡として微細な球状の穴が並ぶハニカム膜に仕上がる。現在、富士フイルムがこの自己組織化ハニカム膜の実用化を図っている。

石井助教は微細な球状の穴が並ぶ自己組織化ハニカム膜を水平面で上下半分ずつに割り、その下側半分の膜にさまざまなメッキを施した。メッキという加工法を選んだ理由は「確立され、広く普及された基盤技術なので加工コストが安いなどの利点が多いから」という。

自己組織化ハニカム膜にいろいろな精密メッキを施し、多くの応用技術を確認した。球状の穴内部に薄いメッキ層をつくり、この上下を逆さまにすると、小さな金属ドームが並んだ微細構造ができ上がる(図2)。この金属ドーム表面は親水性や吸着性を示す。さらに、金属ドームの間にできた高分子の突起ピラー表面に疎水性・撥水性の機能を付与した。最先端のナノテクノロジーを高度に駆使し、微細な構造を持つ表面をつくり上げることに成功した。

金属ドームと突起ピラーのそれぞれの表面に親水性や疎水性を与えた微細構造をつくり上げた石井助教は、電気エネルギーを与えることで水滴などの吸着力を精密に制御する技術を確認した。これが液滴を精密に操作する技術の基本になった。

(注)
*自己組織化(Self-organization、Self-assembly)は他からの制御なしに自分自身で組織や構造をつくり出す性質を意味する。生物は自己組織化で生体をつくり上げる。

優れた研究環境を求め 東北大WPIに異動

通常、研究開発者は優れた研究環境を求めて異動し、研究実績を積み上げていく。石井助教も出身校の東京工業大学大学院から理化学研究所を経て、東北大WPIに移籍した。石井助教は、「どの移籍のタイミングでも企業と研究機関への就職を並行して考えた」という。その結果、「自分のやりたい研究開発ができそうな環境を選び続けた」と語る。自己実現の舞台としてWPIは最適な研究環境を与えると判断したのである。

石井助教は、WPIは研究開発設備が整い、優れた研究開発環境を備えていることに満足している。ただし、WPIには厳しい決まりもある。助教という若手研究者といえども、自分の研究開発テーマ向けの研究費は自分で獲得しなければならないルールだ。このため、WPIの若手研究者は文部科学省傘下の独立行政法人日本学術振興会(JSPS)の科学研究費補助金をはじめとする研究費の申請に余念がない。この研究費獲得は研究者として避けては通れない試練の場である。この競争環境によって鍛えられていく。

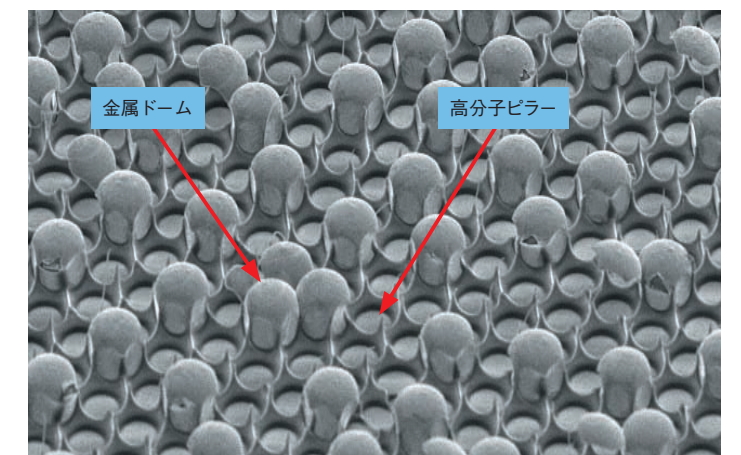


図2 ● ハイブリッド表面の一例。金属ドーム(直径数 μm)に親水性・吸着性の機能を持たせ、突起ピラーに疎水性・撥水性の機能を持たせた



「高分子の本質を解明します」 原子間力顕微鏡の工夫がカギ

中嶋健 准教授

「ゴム弾性」という言葉で直感的に分かるように、ゴムはよく伸び縮みする。一見、当たり前のことのように思えるが、ではそもそもゴムはなぜ伸縮するのだろうか。実はそこには深い謎がある。

ゴムは大まかにいえば、微細な細長い高分子が“束状”に集まったものだが、この構成要素の高分子1本に着目すると、「ゴムはもっと伸び縮みをしてもよさそうなものだが」と、東北大学WPIの中嶋健准教授はいう。ゴムは、ある程度の大きさの“巨視的な”動きの解明と、ゴムを構成する高分子レベルの“微視的な”動きの解明はそれぞれ進んでいるが、「両者をつなぐ部分があり解明されていないのが実情」（中嶋准教授）なのである。

中嶋准教授の研究テーマは「高分子のナノ力学物性の評価」である。プラスチックやゴムなどの有機材料のヤング率や変形する時の挙動などを解明し、有機材料を構成する高分子とは本質的に何かを追究するものだ。

マッサージ師のような “ナノ触診”で軟らかい表面を観察

中嶋准教授の研究スタイルの特徴は、原子間力顕微鏡*（Atomic Force Microscope, AFM）を用いて

ナノ力学物性を解明している点にある。原子間力顕微鏡は、針形状のプローブを試料表面に接触させる。原理的には、接触した試料表面の接触部分の一番近くて上にある原子1個と針の先端の原子1個とが“原子間力”で引き合う時の力を計測し、その表面の微視的な性質を調べる計測機器である。

最も多く観察されているのは、試料表面の原子レベルでの凹凸の地図だ。このため、原子間力顕微鏡で観察する試料は、硬くて弾性変形しないものが適していることになる。これに対して、中嶋准教授は表面が軟らかい高分子を試料に選んだ。このため、プローブの針が当たった高分子表面は弾性変形してしまい「本当の表面の凹凸は分からなくなる可能性が高い」という。

しかし、プローブの針の先がまるでマッサージ師の指先のように触診として接しているとも考えるとこの問題は打開できる。中嶋准教授は、原子間力顕微鏡のプローブで試料表面が軟らかいものを“ナノ触診”として観察すると、硬い部分と軟らかい部分の地図がつけられるなどの活用ができると考えた。

さまざまなゴムやプラスチックなどの有機材料を試料として観察した。たとえば、ポリスチレン・ポリイソブチレン（PS/PIB）やアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン（ABS）などの硬い相と軟らかい相が混じったポリマーアロイの表面を観察すると、硬い部分と軟らかい部分の地図が描けた。この結果、そのポリマーアロイのみかけの凹凸、変形量、弾性率（ヤング率）、凝着エネルギーなどのナノ構造の地図（像）を多数観察することに成功した。

中でも興味深かったのは、非粘弾性を示すポリアミド（PA、ナイロン）の中にポリオレフィン系が混じったポリマーアロイだ。原子間力顕微鏡で観察した結果、軟らかいゴム状の高分子がしみ出してできた“中間相”がネットワークをつくっていることを見出したのだ（図2）。このポリマーアロイは、高速で変形させると、軟らかくなる不思議な現象を示す。その不思議

な現象が起こるメカニズムを解くことができそうになってきた。これは原子間力顕微鏡によって、高分子のナノ力学物性を観察したからこそできた大きな研究成果である。

試料やプローブを工夫し 高分子1本を釣り上げる

中嶋准教授は有機材料を構成する鎖状の高分子そのものを直接観察したいと考えた。これを実現するには、試料やプローブの針先端にさまざまな工夫を施すことが必要になった。まず、高分子の鎖の両端にある化学基を変化させる工夫を加え、基板やプローブ先端に“結合”する“加工”を施す。

たとえば、ポリスチレンの高分子鎖の両端に「チオール基」を結合させる化学反応の操作を行う。この加工した高分子鎖を基板の上に吸着させる。高分子鎖の逆側の端のチオール基を狙ってプローブを近づけ、プローブ先端にチオール基を吸着させることができれば、基板とプローブの間に張った高分子鎖1本の力学物性を直接測定できる。基板とプローブ先端に高分子鎖の端を吸着させているので、プローブをゆっくり引き上げれば、高分子鎖の弾性などの動きを測定できる。

プローブで高分子鎖の端の化学基を吸着させる行為

（注）

*原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope; AFM）は、先端が鋭い針状のプローブ（探針）を試料表面に沿って平行に動かす走査型プローブ顕微鏡（SPM）の一種。プローブを試料表面に接触させるコンタクトタイプでは、プローブ先端の原子と表面の原子との微小な引力による変形を測定する。この引力が一定になるようにプローブを上下し、一定値を保つように水平方向にプローブを動かすように制御する。制御信号値から像を作成する。非コンタクトタイプもある。

は、“釣り”に似ている。このため、この計測実験を「ナノフィッシング」と名付けている。「実験を1日やっても、1本も釣れない時もある」と中嶋准教授は苦笑する。この計測実験は「高分子物理学の基礎となる高分子鎖1本の統計力学を検証できる実験手法を手に入れたことになる」と説明する。計測する高分子鎖によっては、プローブを化学修飾したり、基板を金にしたりと、さまざまな工夫を施した実験手法が必要になっている。

学生時代は 原子間力顕微鏡を手づくり

中嶋准教授は2008年4月に東北大WPIに異動を志願し、採用された。その前は、2003年から東京工業大学の助教として研究していた。この東工大時代から、高分子のナノ力学物性の研究を本格的に始めている。「博士課程まで在籍した東京大学大学院工学系研究科の時には、原子間力顕微鏡を手づくりし、ナノフィッシングの実験をしたことがあった」と懐かしむ。あの当時に比べれば、「最新の高性能な実験装置を使えるWPIは優れた研究環境と感じている」という。その分、高分子の本質に迫る独創的な研究開発に精力を傾けている。

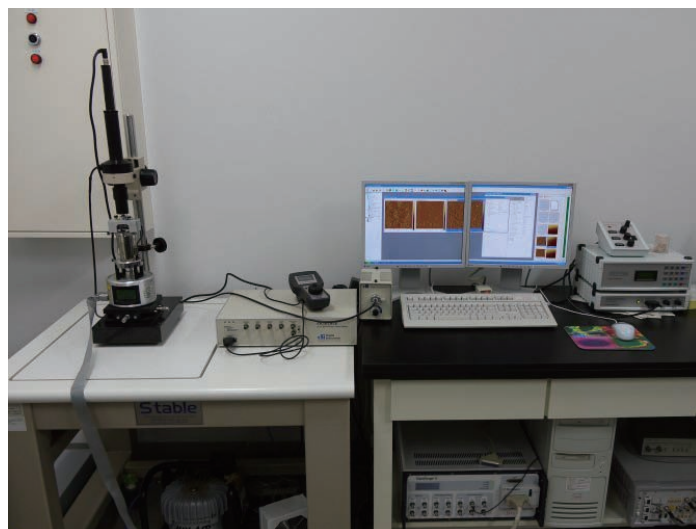


図1 ●主力の計測機器の原子間力顕微鏡（AFM）

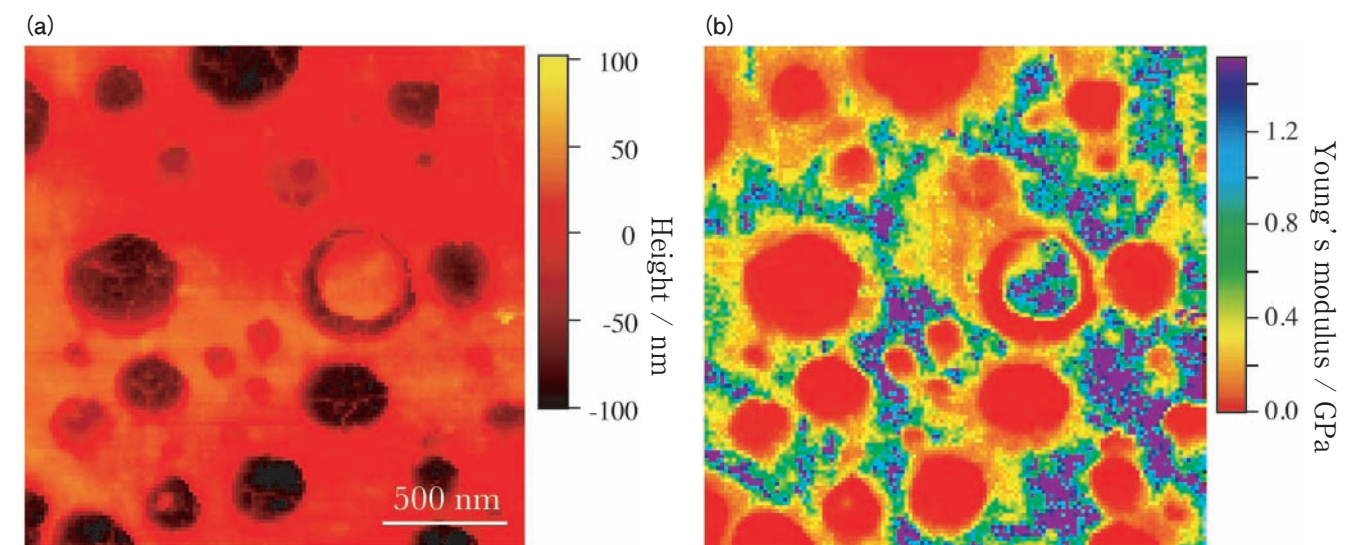


図2 ●ポリアミド／ポリオレフィン系のポリマーアロイの観察像。(a) 高さ像、(b) ヤング率像



東北大学 原子分子材料科学高等研究機構
WPI-AIMR
(World Premier International Research Center Initiative
Advanced Institute for Materials Research)
〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1
電話＝022-217-5922(代表)
URL＝<http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jp/index.php>

小冊子「科学技術の近未来を拓く 東北大WPIの若手研究者」

2010年3月発行

発行●東北大学原子分子材料科学高等研究機構

企画・編集●日経BP（丸山正明、藤堂安人）

デザイン・制作●クニメディア

印刷●大日本印刷