

TAGEN FOREFRONT 07

多元研

KITAKAMI, Osamu

TAKAHASHI, Satoshi

SHIBATA, Hiroyuki

KANO, Junya

TAKATA, Masaki

JINNAI, Hiroshi

SHIBATA, Etsuro



最前線

いま持続可能な社会づくりへ IMRAM-東北大学多元物質科学研究所

環境問題、エネルギー問題、地球温暖化…。我々は今、地球規模で解決しなければいけない問題に直面しています。東北大学多元物質科学研究所は、まさにこれらの問題を解決し、持続可能な社会を実現することを目指しています。将来世代へ負の遺産を残さない「持続可能な社会(Sustainable Society)」の実現。積み重ねる様々な研究により、少しずつ未来へ歩みを進めていきたいと考えています。

Processing

Sustainable Science and Engineering
Process and System Engineering



東北大学 多元物質科学研究所

IMRAM
INSTITUTE OF MULTIDISCIPLINARY RESEARCH
FOR ADVANCED MATERIALS TOHOKU UNIVERSITY

Materials

Inorganic Material
Organic- and
Bio-materials

Measurements

Advanced Microscopy
and Spectroscopy



CONTENTS

東北大学多元物質科学研究所 所長あいさつ

03

FOREFRONT REVIEW

04

01 ナノサイズ磁性体の物性を究め
先端磁気メモリーデバイスへ展開

北上 修 教授

05

02 さまざまな観測手法の開発により
タンパク質の未知の領域に迫る

高橋 聡 教授

11

03 高温での“その場”観察から
斬新な素材製造プロセスシーズを

柴田 浩幸 教授

17

04 低炭素・資源循環型社会に向けて
機能性粉体プロセスの可能性に挑む

加納 純也 教授

23

05 放射光X線による
ナノ可視化技術の開発と応用

高田 昌樹 教授

29

06 高分子による自己組織化の
電子顕微鏡による構造研究

陣内 浩司 教授

35

07 非鉄金属製錬技術を駆使した
未来のための金属資源循環への挑戦

柴田 悦郎 教授

41

多元物質科学研究所が推進する研究

47

編集後記

50



多元の可能性が 新しい世界を拓く



東北大学多元物質科学研究所 所長

村松 淳司

MURAMATSU, Atsushi

東北大学・多元物質科学研究所(以下、多元研。)が誕生して15年目を迎えます。従来の区別にとらわれない、物質、材料を含む、あらゆる“もの”を多元的に研究する、特徴ある研究所として2001年4月に誕生し、おかげさまで、一般社会にも次第に認知されつつあります。その礎は、創立1941年以来受け継がれる、選鉱製錬研究所(素材工学研究所)、科学計測研究所、非水溶液化学研究所(反応化学研究所)のスピリットであり、今年で75年目を迎える伝統の力を、ひしひしと感じます。先人たちが切り開いてきた多くの研究分野と、輝かしい研究成果が、漏れることなく、多元研に引き継がれており、過去から未来への時間軸の中で、研究所のあちらこちらで、時空を超えて融合していく姿を見ることができます。

東北大学の学内での部局間交流も非常に活発であり、昨年にはその象徴ともいえる、独立した産学連携先端材料研究開発センターが設置されました。従来の研究所連携に加えて、理学研究科、工学研究科、生命科学研究科、環境科学研究科などすべての学内部局との密接な連携から、新たな物質材料研究が日々誕生してきています。

日々刻々と成長していく、多元研では、資源から最先端材料までの垂直方向、そして無機、有機、バイオなどあらゆる物質材料を含む水平方向の両機軸を、ハイブリッドにカバーした、独創的で斬新な研究が、数多く行われています。そうした多元研の研究者の横顔をシリーズ化して紹介する「TAGEN FOREFRONT」で、今回も最先端研究の一端に触れていただきます。

2011年3月の東日本大震災から4年が経過し、多元研は物質材料における東北復興への貢献と、未来を背負う新進気鋭の優秀な研究者の輩出を、今後も積極的に担っていきます。

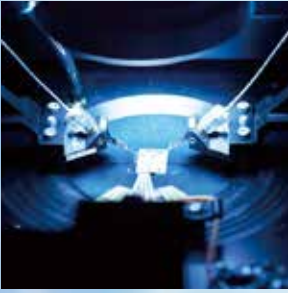
そして今年は多元研は在籍する教職員、学生、研究生、研究者らが一丸となって、多元研ブランドの浸透を目指して「TEAM TAGEN」を展開します。

今後とも、変わらぬご支援を賜りますようお願いいたします。



FOREFRONT REVIEW

01



02



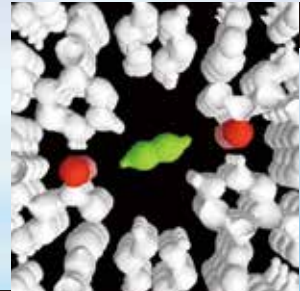
03



04



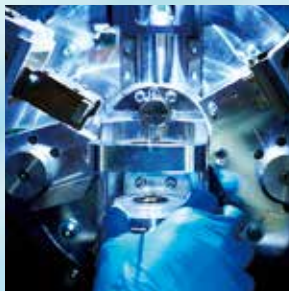
05

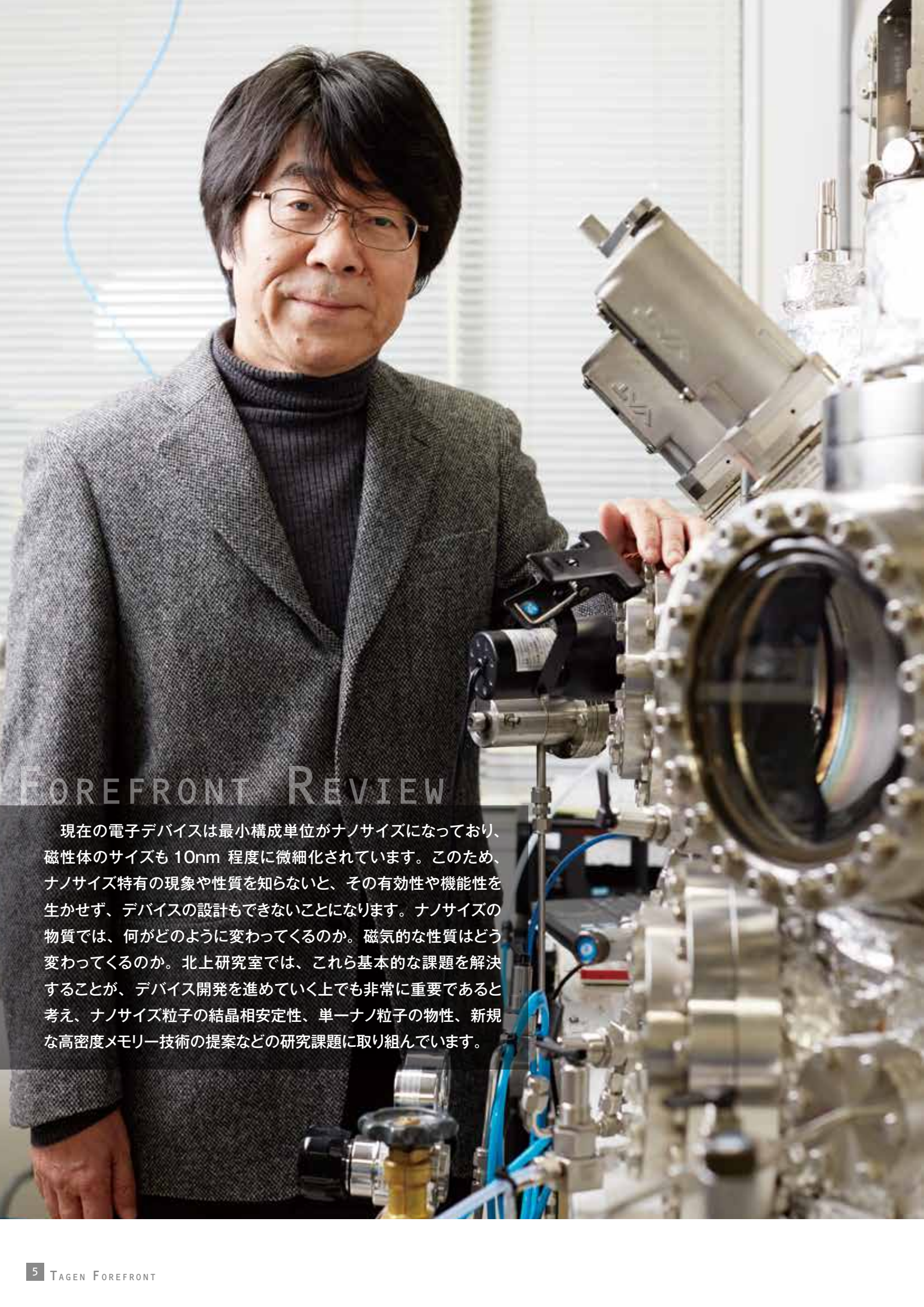


06



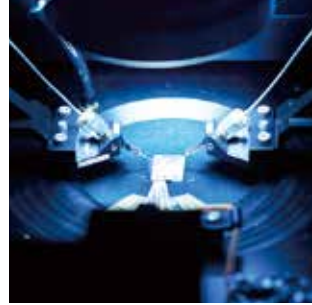
07





FOREFRONT REVIEW

現在の電子デバイスは最小構成単位がナノサイズになっており、磁性体のサイズも10nm程度に微細化されています。このため、ナノサイズ特有の現象や性質を知らないと、その有効性や機能性を生かせず、デバイスの設計もできないことになります。ナノサイズの物質では、何がどのように変わってくるのか。磁気的な性質はどう変わってくるのか。北上研究室では、これら基本的な課題を解決することが、デバイス開発を進めていく上でも非常に重要であると考え、ナノサイズ粒子の結晶相安定性、単一ナノ粒子の物性、新規な高密度メモリー技術の提案などの研究課題に取り組んでいます。



ナノサイズ磁性体の物性を究め 先端磁気メモリーデバイスへ展開

私たちの日常生活をよく見渡してみると、いわゆる磁性体が重要な役割を果たしているものが非常に多いことに気づきます。例えば発電に使われるモーターやタービンは、すべて磁石の固まり。国内電力消費量の約6割近くがモーターを使って発電されています。磁性体の性能を仮に1パーセントでも向上させることができれば、相当量の低炭素化に役立つことができます。もう1つ、磁性体が使われている重要なものがメモリーです。パソコンなどに使われているハードディスクドライブ(HDD)は、電源をオフにしても記録が残ります。半導体は電源をオフにすると記録が消えますが、磁気は電源を切っても記録残り、半導体に比べて電力消費を大幅に削減できることになります。半導体を磁気に置き換えて、消費電力の低減を図るのが、一つの流れになっています。このように、磁性体をどのように改良していくか、どれぐらい性能をよくできるか研究することは、社会生活基盤における重要なテーマとなっています。

情報社会と言っているものを記憶容量という観点で見ると、2010年の情報データ量は約400EB(エクサバイト/エクサ=10の18乗=100京)と言われます。これから情報量はさらに増えていくと予想されています。2018年のデータ量は6,000EBを越すとのもあります。大事なものは、記憶媒体の主力はHDDであり、これら膨大なデータの90パーセント以上がHDDに記録されているという事実です。

HDDの性能向上を実現させていくことができれば、これから情報量がさらに増えていく社会の動きにも対応していけますし、それができなければ、他の記録技術が急速に進化でもしない限り、情報社会が停滞してしまうということにもなりかねません。

ナノサイズにおいて磁性体の物性を解明するという、基礎的な分野の研究に携わる北上研究室は、このような技術開発の出口を強く意識しており、超高密度磁気記録、新規な磁性材料・デバイス構造の探索などを視野に入れ、先端的な取り組みを進めています。

多元物質科学研究所
無機材料部門
ナノスケール磁気デバイス分野 教授

北上 修

KITAKAMI, Osamu

1954年新潟県生まれ。1980年東北大学大学院工学研究科修士課程修了(工学博士)。1980年株式会社日立マクセル入社、1993年同社退社。1993年東北大学科学計測研究所助教授、2001年東北大学多元物質科学研究所助教授(組織再編による変更)、2005年東北大学多元物質科学研究所教授、現在に至る。所属団体/日本磁気学会、日本物理学会、日本金属学会、IEEE

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=30>

作製したナノ磁性体試料に対し様々な構造解析や物性評価を行う。特に磁気特性評価にあたっては、研究目的に応じ研究室所有の装置を用い試料を適宜調整する。



1個のナノサイズ粒子に着目して物質の構造や物性を探索する

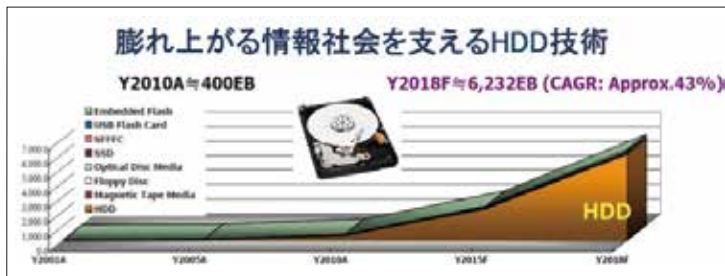
ナノサイズの物質は構造や性質がどう変わるのか

「ナノメートルサイズの物質では、それを構成する原子の数はただだか10万個程度。この世界では、われわれがふだん見ている物質とはまったく異なる構造や性質を示す場合があります」。しかし実際には、何がどのように変わるかについては明らかにされていないと言います。「それを少なくとも磁気をキーワードにして明らかにしたいというのが、われわれのミッションです」と北上教授は話します。

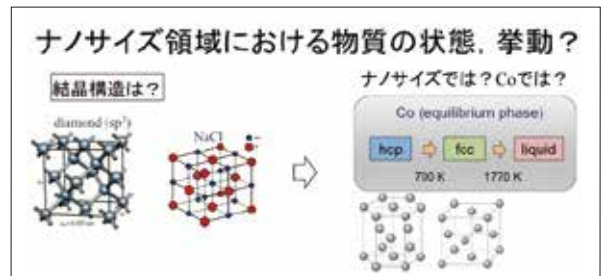
「周期表の中で室温で磁性を示す元素は3つしかありません。自然界に100種類

程度もの元素があるけれども、われわれが磁石と知っているものは、これしかない。鉄・コバルト・ニッケル。こういう磁性体を対象に、それを小さくナノサイズにした時にどういふ変化が生じるのか。ふだん、われわれが目にする物質は、ダイヤモンドでも食塩でも、原子が規則正しく並んだ結晶構造を取っています。しかし、物質をドンドン小さくしていった場合、その構造や性質は日常生活で目にするものと果たして同じなんだろうか。北上教授は、そう問題提起します。実は物質のサイズに依存し、物性のみならず構造までも変化することが明らかになってきました。

たとえばコバルトは、六方最密構造(hcp)という結晶構造をとります。コバルト原子が六角柱状に配置したこの構造が最もエネルギー的に安定だからです。温度を上げると、面心の立方構造(fcc)に変わります。「半世紀以上前から、コバルトは小さくすると安定な六方最密構造から面心立方構造に変化するらしいことがわかっていた。ただシステムティックに研究する動きもなかったし、分析手段もなかった」。要するに、サイズに依存した結晶構造の変化の様子や理由は明らかにされていませんでした。「そこをきちんと磁性体に対して調べようというのが、基本的な課題です」。



磁気ディスクをはじめとする磁気メモリーは、電源供給なしに情報保存でき、高密度記録、高速記録、低コストなどの優れた特徴を持っているため、急速に情報化が進む現代社会において、ますます重要性を増しているキーデバイスとなっている。2010年の情報データ量400EBの約90パーセント以上はHDDに記録された。出典:テクノシステムリサーチ(2011)



物質は一般に原子が周期的に配列した結晶構造から成る。ダイヤモンドしかり、食塩しかり。しかし物質をどんどん小さくしていくと構造に変化が生じる場合がある。たとえばコバルトは六方最密構造(hcp)構造が最もエネルギー的に安定だが、温度を上げると面心立方構造(fcc)に変化する。

音楽も読書も、あまり1つのものに固まらず、好きなものがたくさんあります

読書は以前からずっと好きです。学生の頃はドストエフスキーなど海外のものを読むことが多かったのですが、その後はだんだん日本の小説が好きになって、永井荷風、谷崎潤一郎、三島由紀夫などを読むようになりました。今でもけっこう古い小説を中心に読んでますね。

あと音楽は、ロック、ジャズ、クラシックと幅広く聴きます。ロックで気に入っているのは、Nirvana。アメリカのバンドで、バンド名は「涅槃」という意味です。ジャズは、主にハードバップと言われるジャズの黄金期のものが好きですね。以前はLPレコードを200枚ほど持っていました。クラシックはいろいろ、バロックや古楽まで聴きます。仕事をする時はバッハを聴くことが多いです。今夜は、電力ホールにベートーヴェンの4大ピアノソナタのコンサートを聴きにいきます。

MY FAVORITE



ナノサイズ

ここではナノメートル (nm) スケールのサイズという意味で使っています。ナノ (nano) は10億分の1を表わす単位で、したがってナノメートルは10億分の1メートル (あるいは100万分の1ミリ) です。この程度のサイズになると、量子効果や表面効果が顕著に現われ、我々が日常眼にする物質とは異なる性質が現われてきます。現在の先端電子・磁気デバイスの構成要素もこのサイズ領域に入りつつあります。

磁性体

磁性体には様々な種類がありますが、一般に磁性体あるいは磁石と呼ばれるものは強磁性体やフェリ磁性体で、それらは様々な形で私達の日常生活において利用されています。強磁性体では、粗っぽい言い方をすれば、物質を構成する各原子が磁気モーメントを有し隣接原子と相互作用して平行に並びます。その結果、全体の磁気モーメントが揃い、非常に強い磁力 (磁場) を生み出します。

SQUID

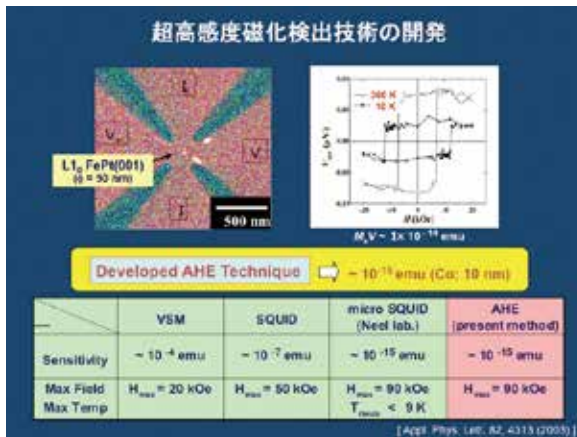
Superconducting QUantum Interference Deviceの略であり、超伝導量子干渉素子と呼ばれます。SQUIDは、弱く結合させた2つの超伝導体ジョセフソン接合と呼ばれる素子を用いた磁気センサであり、微小磁場の検出に利用されます。

超高感度磁化検出技術

まさに非常に高い感度で磁気情報を検出する技術です。一般的な磁気測定法としては磁気天秤、振動試料型磁力計、あるいは光磁気効果や磁気抵抗効果などを利用した様々な方法があります。しかし1個のナノ磁性粒子を高感度に検出することは決して容易ではありません。私達の方法では、磁性体に電流を流すと直交方向に電圧が生じる異常ホール効果を原理としています。この電気的手法は従来法に比べ非常に高感度で、かつ微細加工技術と組み合わせることにより1粒子の磁気計測が可能となります。

高速磁化ダイナミクス計測技術

磁性体の磁化の振舞いを理解するには、非常に短い時間スケール (1兆分の1秒~10億分の1秒) での磁気計測技術が必要になります。一般的にはポンププローブ法と呼ばれる時間分解計測を、磁気光学効果と組み合わせることにより磁化ダイナミクスが計測されています。しかし1粒子計測への適用は容易ではありません。私達は、異常ホール効果を原理とする磁化検出技術と、独自に開発した大振幅パルス磁場発生装置を組み合わせ、微小磁性体の磁化ダイナミクス計測に取り組んでいます。



左の画面の中央部にあるのが、L10構造の単結晶の粒子1個。四方から電極をつけて微弱な電流を流すと、この磁石の性質を反映した電圧が観測される。この電圧検出により極めて高感度に1粒子の磁化挙動を測定することができる。

1個のナノサイズ磁性体に着目して計測する技術はないか

北上教授の研究のもう1つのアプローチは、磁性体をナノサイズまで小さくし、その1個の粒子を調べることです。「たとえば1個のナノ磁性体の磁気強さ (磁気モーメント) は 10^{-14} emu 程度。一方、最も高感度な SQUID 磁力計でさえ、その感度は 10^{-8} emu 程度。これをどうやって測るか。非常に難しい課題だった」。この計測技術を確認するために、学生を含む若手が中心となり長期にわたり研究を進めました。そして最終的に1粒子検出が可能な「超高感度磁化検出技術」が開発されました。

「さらに、こういったナノ磁性粒子に磁場を加えた場合、ピコ・ナノ秒スケールで粒子の振る舞いはどうなるのか」。この課題からは「高速磁化ダイナミクス計測技術」が必要であるとの方向性が定まってきました。

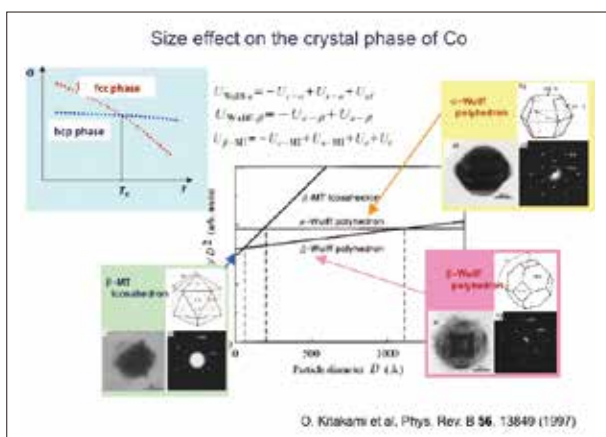
これらの目的に特化した独自の技術開発があって初めて、ナノサイズ磁性体の物性も少しずつ明らかになってきています。計測技術の開発と、その技術を駆

使した物性の探索。「それら一連の動きは、非常に困難な課題がいくつも連なっているような、先が見えない状態。答えがどこにあるのか、わからない状態で模索しなければいけないのは、研究のいちばん苦しくもワクワクする面ですね」と北上教授は話す。

サイズによって変化する結晶構造理論と実験で実証

「われわれはコバルトのナノ粒子を作りました。そしてサイズによって原子の並び方が変わるのかどうか。それを実証したのが、このデータです」(下図「コバルトの結晶構造におけるサイズ効果」参照)と北上教授は説明します。

1個の粒子に電子線をあてて回折パターンを観測すると、サイズが大きい時には、明瞭な6回対称のパターンが得られています。「これは、原子の並び方、つまり結晶構造を反映したパターンで、この粒子がバルク結晶と同じ六方最密構造を有することがわかります。粒子がもうちょっと小さくなるとどうなるか。回折パターンは4回対称に変わり、結晶構造が面心立方構造になっていることがわかります。さらに小さくなるともっと複雑な形になる。このように、サイズに応じて原子の並び方が違うということを理論と実験で示したというのが、われわれの一つの成果です」と北上教授は話します。



コバルト粒子の結晶構造に及ぼすサイズ効果

実験・理論両面からの追求により 未解明な難題の突破口を開く

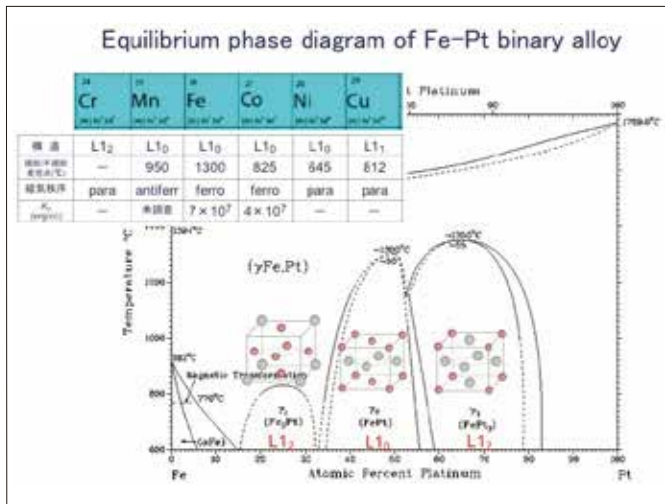
鉄白金の規則合金で 次世代磁気デバイスを探る

「次のステップとしてわれわれが研究しているのは、L1₀構造のFePt(鉄-白金の合金)です。いまメモリーの世界でいちばん注目を集めている材料です」と北上教授。L1₀構造FePtは、FeとPtが交互に1原子層ずつ積層した層状規則構造を有します。

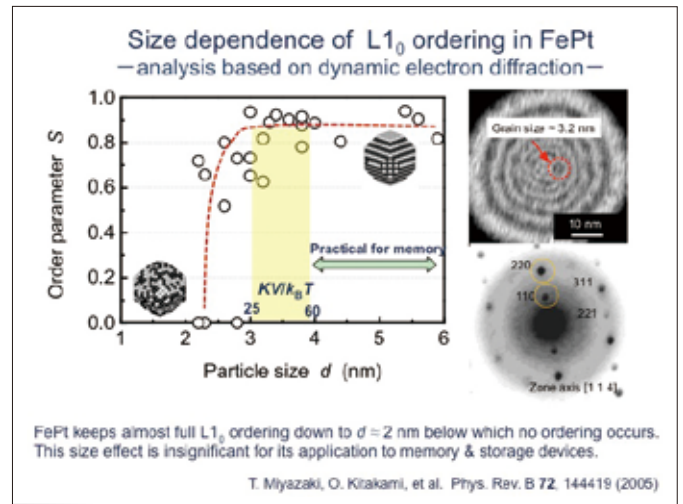
ある1個の原子に着目すると、上記積層方向とそれに直交する方向では原子の並び方が全く違ってきます。この異方的な原子配列を反映し、積層面に対して垂直方向に強い磁気異方性を示します。磁気異方性が大きければ、微小サイズ領域でも熱による磁化の揺らぎが抑制され、安定な磁化状態(磁気情報)を保持することができます。こうした事情から、L1₀

構造FePtは、微細化が求められる現在の磁気デバイスの世界において非常に注目されていて、少なくともメモリー・ストレージデバイス分野で用いられている磁性材料の多くは、近い将来、この材料に置き換わるかもしれないと言われています。

「問題なのはこの物質を小さくしていった時に、われわれが日常生活で扱うような巨視的なサイズで見られるL1₀構造がほんとうに実現できるのかということです」。北上研究室ではそれを実験により調べています。それによれば、サイズが約2ナノメートル以下ではL1₀構造に規則化しないものの、それ以上ではほぼ理想的に規則化することが実証されました。ナノサイズの結晶構造を調べるという非



図の中央部のエリアがL1₀構造のFePtの結晶構造を示している。一方方向に鉄と白金が1原子層ずつ層状に配列された構造で、層状規則合金とも言われる。積層面に対して垂直に強い磁性を発現し、次世代磁気デバイスとして期待されている。



L1₀構造FePt粒子の規則度の粒子サイズ依存性。規則度(S)とは規則構造の完成度を表わし、縦軸のS=1は完全な規則化、S=0はランダム。実験の結果、粒子が約2ナノメートル以下では規則化しないが、それ以上ではほぼ理想的なL1₀構造をとることが確かめられた。

若い頃に出会った和辻哲郎「古寺巡礼」の世界にあこがれて

大和の古寺で仏像を見るのが好きで、年に一度は奈良に旅します。きっかけは、大学生の時に和辻哲郎の「古寺巡礼」を読んだことでした。戦前に書かれた古い本です。和辻がまだ20代の頃に唐招提寺、薬師寺、法隆寺、中宮寺など大和の古寺を巡って溢れるような若い感性で書いた本なので、自然に共感できるものがありました。それ以来ずっと奈良の寺々や古道を独りでぶらつくのが習慣になっています。私が好きな仏像は、法隆寺に隣接する中宮寺の菩薩半跏像です。和辻はこの仏像をながめた後の心境を「心の奥でしめやかに静かにとどめもなく涙が流れるというような気持ち」と書いています。仏像を観る旅はだいたい独りで気の向くままにブラブラしますが、ここ何年かは、大学の同期や後輩が住む街を巡る旅もしています。写真は、一昨年金沢に行った時のもの。

OFF TIME





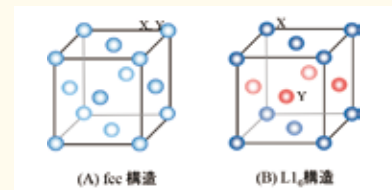
TERM INFORMATION

回折パターン (P8)

光、電子などの波は物質中の原子により散乱される。それらの散乱波には原子位置に係る位相情報が含まれ、多くの散乱波が干渉し結晶構造を反映した特定の方向に強いビームを生み出す。これが回折パターンであり、その解析により物質の結晶構造を知ることができる。

L1₀構造

等量の元素X、Yからなる合金XYを考える。図Aの面心立方構造(fcc)では、各位置を原子X、Yが占める確率は同じである。これに対し図BのL1₀構造では、頂面と底面をX(あるいはY)、中間の面心位置をY(あるいはX)が占有し、一方向にXとYが一原子層毎に交互に積層された配置をとる。このような層状に規則化した合金を層状規則合金とも呼ぶ。



Brown

William Fuller Brown, Jr. (1904–1983)。米国の物理学者。磁気およびそれに係る様々な諸問題に関する理論研究を行った。特に磁化機構、磁区構造、磁化の熱揺らぎに関する理論に加え、現代の磁性学の発展に決定的な影響を与えたマイクロマグネティクス理論を創始。代表的な著書として、Magnetostatic Principles in Ferromagnetism (North-Holland, Amsterdam, 1962)、Micromagnetics (Interscience, New York, 1963)が挙げられる。

マイクロ波アシスト記録

将来の超高密度磁気記録の一方。磁化は有効磁場の周りで才差運動し、その周波数は磁場にも依存するが凡そマイクロ波帯にある。一般に、この磁化の運動エネルギーは格子系に散逸し遂には磁化は磁場方向に揃う。しかし、才差運動の周波数近傍の交流磁場を加えることにより才差運動が誘起され、磁化反転(記録)に必要な磁場を低減することができる。

試料などを微細加工する際に使うマスクアライナーは、試料に光をあてて微細なパターンを転写するための装置。この転写されたパターンをもとに微細加工を行う。感光材は日光で変質するため、イエロールームで作業する。

振動試料型磁力計による磁気特性評価。試料はホルダーにセットし、それを一定の周波数で振動させると磁性体試料からの磁束が時間変化する。その結果、試料に近接する検出コイルに誘導起電力が発生し、それにより試料の磁気特性を評価できる。

常に難しい実験で、高度な構造解析技術が必要でした。

理論と実験がなぜ違うのか パラドクスへの飽くなき挑戦

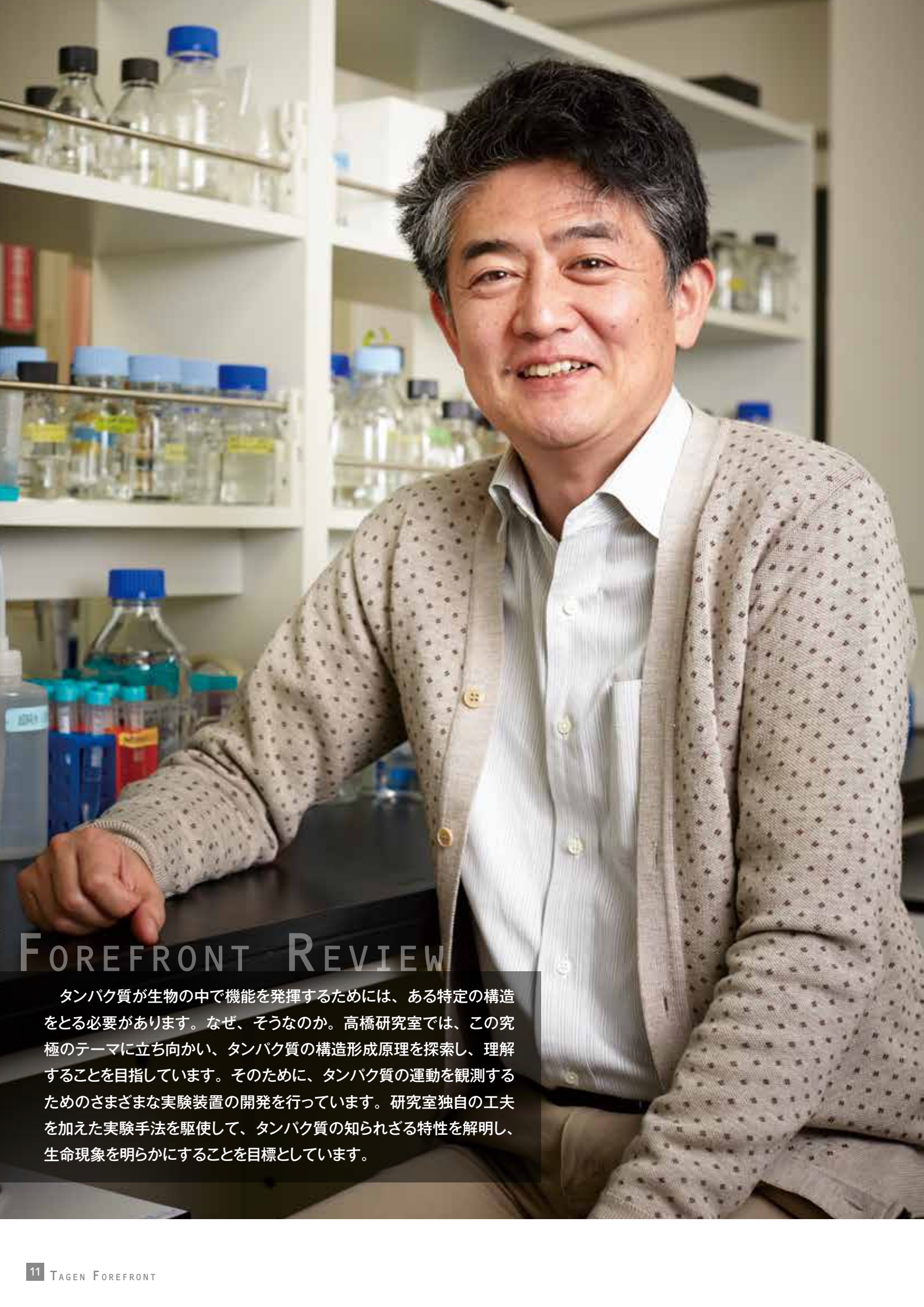
「これからわれわれが挑戦したいのは、Brownパラドクスです。これを触ってみてください」と北上教授が手渡したのは磁石でした。離したり、近づけてみたりすると、驚異的な磁力を感じるものでした。世界最強と言われる磁石で、ハードディスクドライブやハイブリッドカーの中に使われています。「例えばこの磁石が上向きの磁化を持つものと考えます。これを下向きに反転させるには、その方向に強い磁場を加えなければなりません。問題はどれぐらいの強い磁場をかけると反転するか。実際の臨界の磁場を測ると理論よりひと桁ほど小さいんです」。これがBrownパラドクスの一例です。理論値が実現されないのはなぜなのか、わかっていません。北上研究室でずっと研究してきました。解決できてない問題の一つです。北上教授は、超高感度の磁場検出技術を使うことによって突破口を開けないかと研究しています。

3つの相反する課題 電子デバイスのトリレンマ

もう1つ北上研究室が目指しているのは「Trilemma(トリレンマ)への挑戦」で

す。電子デバイスの世界での次の3つの相反する要求があると言います。HDDなど電子デバイスをつくるにはまず記録が可能であること。できるだけ小さいものに大量のデータを保存する高分解能記録が必要であること。いったん記録した情報を長期保存するために熱的に安定であること。これらの条件を満たそうとするとすべて相反する要件となるため、トリレンマと言われます。「突破口を開くにはいくつかアイデアがあって、われわれが取り組んでいるのはマイクロ波アシスト記録というもの」と北上教授。「磁場下において磁化はコマのように固有の周波数で才差運動し、その周波数はおよそマイクロ波帯に相当するギガヘルツ台。その固有周波数と同程度の微小交流磁場の印加により才差運動を誘起し、記録の書き込み(磁化の反転)を容易にしようという研究です」。このアプローチがこれからの磁気記録技術の本流の1つになるかもしれないと北上研究室では考え、実験と理論の両面から課題を追求しています。

このように、北上研究室の研究は少なくとも磁性体を使う電子デバイスのすべてに関わることであり、北上研究室におけるさまざまな成果、さらに国内外のメーカーとの共同研究、国のプロジェクトへの参画における研究開発の進展が、電子デバイス産業界の新たな技術開発への重要な布石となることが期待されています。



FOREFRONT REVIEW

タンパク質が生物の中で機能を発揮するためには、ある特定の構造をとる必要があります。なぜ、そうなのか。高橋研究室では、この究極のテーマに立ち向かい、タンパク質の構造形成原理を探索し、理解することを目指しています。そのために、タンパク質の運動を観測するためのさまざまな実験装置の開発を行っています。研究室独自の工夫を加えた実験手法を駆使して、タンパク質の知られざる特性を解明し、生命現象を明らかにすることを目標としています。



さまざまな観測手法の開発により タンパク質の未知の領域に迫る

人の顔が写っている写真を見せて「何が見えますか」と質問し、しばらく待った後に「ここに見えるのはタンパク質です」と解説することで、高橋聡教授は高校生向けの講義を始めるそうです。髪の毛はケラチンというタンパク質です。皮膚はコラーゲンというタンパク質、眼のレンズもタンパク質、歯もカルシウムの中にタンパク質が挟まれた非常に硬い物質です。このように聞くと、非常に身近な存在としてのタンパク質を感じるすることができます。また、タンパク質が生物の中でさまざまな働きを持つことも認識できます。

それでは、そのタンパク質とは何でしょうか？ また、タンパク質は、なぜ様々な働きを持つのでしょうか？ これらの問いに対して、「タンパク質とは、生物にとっての大事な構成成分の1つであり、生物が必要とするさまざまな機能を発揮する多様な機能性分子の総称である」と答えることができます。また、タンパク質は、種類ごとに特定の形を作り、その形をもとに独特の運動を行うために、多様な機能を持つのだと答えることもできます。

高橋教授は、修士2年生のころに生体分子の研究を志し、その後アメリカに渡り生体分子の構造と動きの研究に没頭しました。さまざまな関連分野の勉強も重ねながら、最終的に自身の研究テーマとして選んだのはタンパク質の構造形成の原理の探求でした。これは、物質科学の立場から生命とは何かを問う重要なテーマであると高橋教授は考えました。タンパク質が一定の形をとるという「ありえないほど不思議な現象」の解明のために、全力を傾ける価値があると確信したと言います。

この研究分野は、事実、世界の第一線研究者がアイデアを競う場となっています。高橋教授は、新しい実験手法を開発することで、タンパク質の構造形成と機能発現を観察するアプローチにて研究を続けています。さらには、新しいタンパク質デザインの可能性を探ろうとしています。

東北大学多元物質科学研究所
有機・生命科学部
生命分子ダイナミクス研究分野 教授

高橋 聡

TAKAHASHI, Satoshi

1964年宮城県生まれ。1983年東北大学理学部化学専攻入学、1987年同卒業、1989年同大学院理学研究科化学専攻修士課程修了。1992年総合研究大学院大学(分子研)博士課程修了・博士(理学)、1993年米国AT&Tベル研究所・博士研究員、1995年理化学研究所・博士研究員、1996年京都大学大学院工学研究科・助手、2003年大阪大学蛋白質研究所・助教授、2009年東北大学多元物質科学研究所教授。所属学会／日本生物物理学会、日本蛋白質科学会、日本化学会、アメリカ生物物理学会

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=34>

高橋研究室では、生物にとっての重要な構成要素であるタンパク質を扱う研究を行っている。



長い歴史のその先に目指すこと タンパク質、生命科学の謎の解明

20種のアミノ酸がつながって タンパク質ができる

数多くのタンパク質が、人の体の中でさまざまな機能を発揮しています。また、個々のタンパク質が果たす機能は大変精密で、効率が高いという特徴があります。そのため、タンパク質はナノレベルで働く分子機械、すなわち、ナノマシンであると言われることもあります。

タンパク質は、アミノ酸が1次元的につながった1本の鎖と見なすことができます。アミノ酸は分子量が100程度の小さな分子で、たった20種類しかありません。このアミノ酸がつながった鎖がタンパク質の実体であることがわかったのは1900年代初めごろです。さらに、アミノ酸がつながる時に特定の配列を持つことが証明され

たのが1950年代です。「私が尊敬する研究者の1人で、フレデリック・サンガーというイギリスの生化学者の功績です。タンパク質の1つであるインシュリンのアミノ酸配列を、10年以上の時間をかけた研究により解明して1955年に発表し、1958年にノーベル化学賞を受賞しました」。

皮膚の形成やエネルギー生産などの役割を果たすタンパク質

人の体には2万種類以上のタンパク質が存在し、皮膚や骨の形成、刺激の感知、筋肉の収縮、食物の消化など、さまざまな役割を果たしています。たとえば生物の皮膚・靭帯・腱などを構成するタンパク質の1つであるコラーゲンは、3本の長いタンパク質の鎖が絡み合った3重らせ

ん構造であることが知られています。その1本を詳しく見ると、アミノ酸のグリシン、ヒドロキシプロリン、プロリンなどが何度も繰り返す配列を持つことがわかります。この繰り返し配列が、コラーゲンのらせん構造を決めています。コラーゲンは、さまざまな組織に力学的な強度を与えています。また、弾力性があり、湿度を通したり、空気を通したりできる特性があり、皮膚などの機能性をつくりだしています。このように、コラーゲンは生物の素材や形をつくるタンパク質と言うことができます。

また、体の中で化学反応を起こすことで働くタンパク質もたくさんあります。例えば、シトクロム酸化酵素は、呼吸で吸った酸素を水に変換することで、生物が生きるために必要なエネルギーの生産に関わる膜タンパク質です。シトクロム酸化酵素が働く過程で、酸素を水に変換するだけでなく、水素イオンの汲み出しを行うこ

Phe-Val-Asn-Gln-His-Leu-Cys-Gly-Ser-His-Leu-Val-Glu-Ala-Leu-Tyr-Leu-Val-Cys-Gly-Glu-Arg-Gly-Phe-Phe-Tyr-Thr-Pro-Lys-Thr

Gly-Ile-Val-Glu-Gln-Cys-Cys-Thr-Ser-Ile-Cys-Ser-Leu-Tyr-Gln-Leu-Glu-Asn-Tyr-Cys-Asn

インシュリンのアミノ酸配列。Serはセリン、Ileはイソロイシン、Gluはグルタミン酸など、三文字が一つのアミノ酸に対応する。インシュリンは、A鎖とB鎖の二種類のアミノ酸の鎖により構成されるタンパク質である。インシュリンのアミノ酸配列は、イギリスのサンガーによる10年以上の研究により解明された。

外国人学部学生の教育に全力で取り組んでいます

多元研では、理学部化学専攻などと協力して、外国人学部コースの教育に取り組んでいます。このコースでは、アジアを中心とした世界中の優秀な学生に学部から入学していただき、すべて英語にて先進的な化学と物質科学を教えます。私は、二年半このコースのコース長を務めました。学生実験の1つ1つを英語で立ち上げるなど、苦労も実に多かったのですが、昨年9月に4年間いっしょに頑張ってきた第一期の卒業生たちを送り出したときは、感無量でした。



MY FAVORITE

TERM INFORMATION

アミノ酸配列

タンパク質は20種類のアミノ酸がつながってできた鎖状の高分子です。異なるタンパク質は、異なるアミノ酸の順番を持っています。あるタンパク質を構成するアミノ酸の順番をアミノ酸配列といい、タンパク質の機能や構造を決める大切な情報です。

コラーゲン

健康食品などとしても知られるコラーゲンですが、生物の皮膚や軟骨などを作るタンパク質です。線維状のコラーゲンが絡み合うことにより、弾力性を持ちながら、適度に湿度を透過させる皮膚の特性が生まれます。

シトクロム酸化酵素

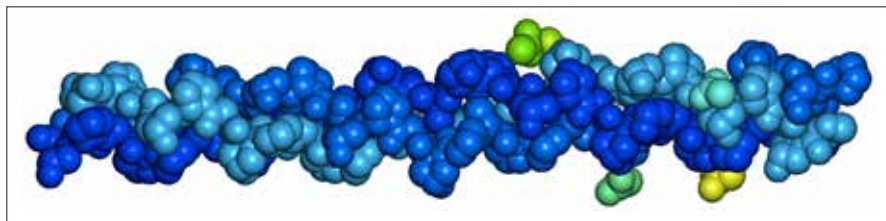
細胞の中の小器官であるミトコンドリア内膜などに存在するタンパク質であり、呼吸で取り込んだ酸素を水に還元する反応を常時行うことで、細胞活動に必要なエネルギー産生に関与しています。この酵素の発見は1920年代です。この酵素の構造は、1995年に日本とドイツの研究者により解明されました。

タンパク質の種類

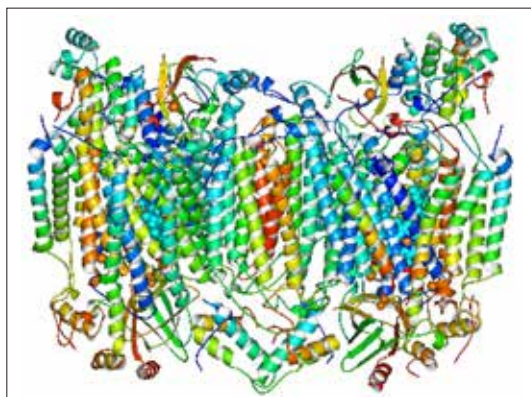
タンパク質は数万個あるとされます。それに応じて多数の形をもち、ときには数々の種類が存在し、その機能は多岐にわたります。インシュリンは、小さな球形の形状を持つタンパク質です。コラーゲンは、分子量が大きく線維状のタンパク質です。また、シトクロム酸化酵素は生体膜の中に取り込まれており、膜タンパク質とも呼ばれます。

タンパク質の折り畳み

アミノ酸が一本の鎖のようにつながってできたタンパク質は、体のなかでコンパクトな形を保っています。しかし、高温にしたり、溶液のpHを極端な酸性にしたりすると、この形が崩れた「変性した」状態になります。変性したタンパク質は、特定の構造を持たず、揺らいだひものような振る舞いを示します。しかし、温度を室温に戻したり、pHを中性に調整したりすると、変性したタンパク質は最初の形に自発的に構造を変化させます。タンパク質が、溶液の条件等を変えることに応じて、構造を作ったり変性したりする過程を、タンパク質の折り畳み(フォールディング)と呼びます。



皮膚を構成するタンパク質の1つコラーゲンの構造。皮膚は、線維状のコラーゲンが複雑に入り乱れた構造体である。コラーゲン線維の一本は、図に示すように、3本の長い鎖がらせん状に絡み合った構造を持っている(青、水色、濃青)。個々の鎖は、グリシン、ヒドロキシプロリン、プロリンなどのアミノ酸が繰り返した配列を持っている。



シトクロム酸化酵素の構造。シトクロム酸化酵素は、分子量が20万の巨大なタンパク質である。この図では、アミノ酸が並んだ鎖をリボンの形状で表現している。

列からタンパク質の形を予測することは大変困難です。「あるアミノ酸を並べるとある特定の形になる、という発見は、アメリカのアンフィンセンという研究者によ

てなされ、アンフィンセンに1972年のノーベル化学賞をもらいました。この発見をきっかけとして、多くの研究者が、あるアミノ酸配列がどのような形のタンパク質に対応するのかを予測しようと研究を続けています。しかし、長い研究の歴史があるにも関わらず、この予測は現在でも大変難しい課題です。これが、われわれが挑戦し続けているテーマです」と高橋教授。この問題は「タンパク質の折りたたみの問題」と呼ばれ、生命科学の分野における未解決の難題の一つとされます。

とが知られています。シトクロム酸化酵素は、分子量が20万の巨大なタンパク質で、アミノ酸がつながった鎖が複雑な形に折り畳まれています。

「これまでに、さまざまなタンパク質の形が解明されています。さらに、この10年くらいの研究で、それらがどんなふうに関わるのか、動きまでわかるようになってきました」と言います。

いまだに解けていないタンパク質の難問

ここまで、タンパク質は特定のアミノ酸配列を持つ鎖のような分子であること、また、この鎖が折り畳まれて、特定の形と機能を持つことを確認しました。「ここから先が、我々が本当に関心のあるところ」と高橋教授は説明を続けます。高橋教授が強調するのは、タンパク質が特定の機能を果たすためには、特定の形(構造)を持たなければならない、ということです。タンパク質の特性や機能は、その構造によって決まります。不思議なことに、細胞内でアミノ酸がつながられて鎖が作られると、アミノ酸配列に応じてタンパク質は特定の形を作ります。これをタンパク質のフォールディング(折り畳み)と言います。

タンパク質の形は、アミノ酸の配列によって決まります。しかし、逆に、アミノ酸配



高橋研究室におけるさまざまな研究では、各種試料サンプルを作成したり、調整したりする作業とともに、実験装置の開発や自作のソフトウェアによるデータ解析など、なんでも自分でやる研究姿勢が欠かせない。

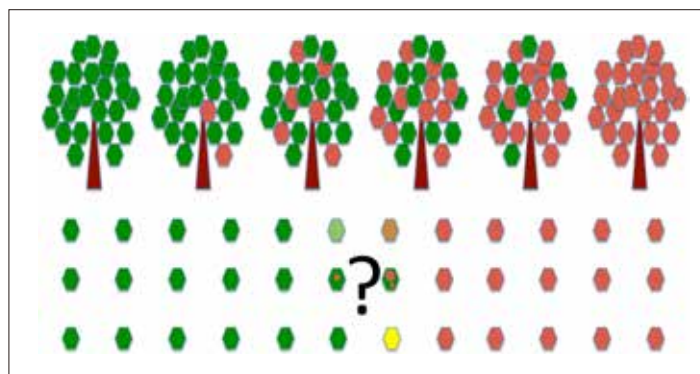
観察手法の開発、進化により タンパク質の動きを解き明かす

タンパク質が形になる過程を リアルタイムに観察したい

タンパク質はアミノ酸配列に応じて別の形を持つため、タンパク質の種類は無数にあり得ると言えます。しかし「20種類のアミノ酸を適当に並べて新しいタンパク質をつくらうとしても、特定の形に折り畳ませることはできません。むしろ、形を作らずに変な凝集体になることがほとんどです。これはよく文字と文章の関係にたとえられます。文字を適当に並べても意味のわ

かる文章にはなりません。文法を理解し、言葉の意味を理解して文字を並べる必要があります。人間はまだタンパク質について文法を理解していないということです」。

それでは、タンパク質の文法を理解するにはどうしたらいいのでしょうか?この質問に答えるために、高橋教授はタンパク質を折り紙にたとえます。「できあがった形だけわかって、四角い紙からどうやって折るのか理解しないと折り紙はできない。同じように、タンパク質が形になっていく過



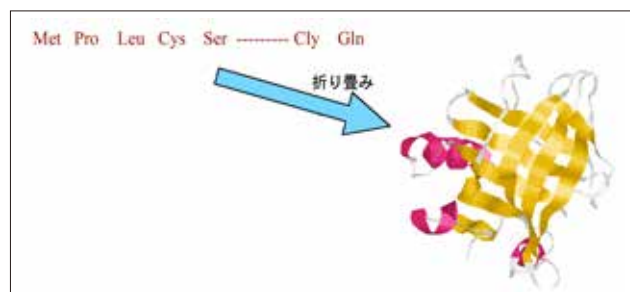
タンパク質の一分子観測手法の考え方。木全体を見ていると次第に紅葉していくことはわかるが、いったい何が変化したことによって紅葉したのか見えてこない。しかし、一枚一枚の葉を観察すると、緑が薄くなり徐々に赤くなるのか、緑の葉に赤い部分が発生して拡大していくのか、あるいは、緑から別の色に変化してから赤くなるのか、などの違いを区別することができる。ここで、1枚の葉に注目するように、1分子に着目してタンパク質を観測するというアプローチ。

程をリアルタイムに観察したいというのが我々の実験の目標」であると話します。

実験家の立場から「タンパク質の折り畳み問題」に取り組むために、形を持たないアミノ酸配列の状態から、ある一定の構造にタンパク質が折り畳まれる運動を観察し、この過程を理解すること、それが高橋教授の実験の目標です。

タンパク質の運動を 一分子レベルで検出する

高橋教授がこうした目標を追求するために、継続的に取り組んでいる実験手法があります。それは独自に開発した装置により、タンパク質の運動を一分子レベルで検出しようという試みです。なぜ、一分子なのか。従来、分光学的な手法でタンパク質からの平均値の変化を観測し平均的な描像を捉えるという手法はありましたが、それはあくまでも平均値でした。高橋教授は「紅葉を調べようとする時に木全体を見ていても、いったい何がどう変化して赤くなるのか、よくわからない。1枚1枚の葉っぱが、どのように変化しているのか観測したい」と話します。つまり



タンパク質は、アミノ酸がつながった鎖の状態から、特定の構造に折り畳まれる運動を行う。この運動は大変高速に起きる。タンパク質は、折り畳まれた後に、それぞれの機能を発揮できる。しかし、なぜ機能を持つ特定の構造がつくられるのか、解明されていない。

訪れた外国のスーパーで買い物を楽しむ

外国人英語コースの立ち上げのために外国に行く機会が増え、これまでに、中国、韓国、インドネシア、タイ、シンガポール、バングラデッシュ、カザフスタンなどを訪れました。研究室の本棚には、気がついたら10カ国以上のガイドブックが並んでいました。外国に行ったら、空き時間を見つけて、現地のデパートやスーパーマーケットに寄ってみます。現地の人が好きそうな、現地の生活が見えるようなもの、お菓子や食べ物を買ってみることが多いです。買ってきたお土産に対して研究室の学生さんが見せる反応も楽しみの一つです。



タンパク質の一分子観察

変性したタンパク質は、構造を持つタンパク質の状態に折り畳まれる運動を示します。変性したタンパク質はさまざまな形を持つ揺らいだひも状の分子の集合体です。しかし、折り畳まれたタンパク質は一つの構造しか持ちません。従って、タンパク質の折り畳み過程は、さまざまな形を持つ分子が次第に整った形に変わる過程だと考えられます。このような、タンパク質の折り畳み過程の理解のためには、タンパク質の形を個別に調べ、形の違いがどのように変化して行くのかを知る必要があります。このための最も直接的な手段が、タンパク質の一分子観察です。

蛍光観察装置

タンパク質の一分子観察を行うために用いられる手法の一つです。蛍光色素と呼ばれる分子に、レーザー光を照射すると、入射したレーザーと波長の異なる光を發します。この光のことを蛍光と呼びます。タンパク質に蛍光色素を付着させ、色素が發する蛍光を観察することで、タンパク質の形についての情報をえることができます。

時間分解能

タンパク質が折り畳まれる形の変化は、さまざまな時間スケールで起こります。一ミリ秒以内という高速で折り畳むタンパク質や、数十秒以上の時間をかけて折り畳むタンパク質もあります。これらの過程を追跡するためには、折り畳まれる時間よりも十分に短い間隔で、タンパク質の構造の測定を行う必要があります。この間隔を時間分解能と呼びます。一ミリ秒以内に折り畳まれるタンパク質の観察のためには、100マイクロ秒以下の時間分解能を持つ観測が望まれます。

p53

p53はがん抑制タンパク質とも呼ばれます。p53は、細胞にストレスがかかり細胞の中のDNAが痛んだ場合に活性化され、DNAのなかのターゲット配列に結合します。その結果、痛んだDNAの修復を行うタンパク質の合成をスタートさせます。ターゲットに結合する能力が欠損したp53を持つと、がんになりやすということが知られています。p53が機能するためには、膨大な長さを持つDNAの中から、ターゲット配列を短時間内に選び出す必要があります。

タンパク質の一分子の紐の状態が構造形成していく様子を観測するアプローチ、ということです。

高橋教授は、タンパク質一分子の運動観測技術の開発に10年ほど前から取り組み、研究室で自作した装置に基づいたさまざまな実験技術をつくってきました。「現在でも、我々の実験手法は進化し続けています」と高橋教授。タンパク質一分子の運動観測の基本は、蛍光色素をタンパク質に付け、蛍光顕微鏡で運動全体を観測します。従来の手法でこの測定を行う場合、基板にタンパク質を固定する必要があり、そのためタンパク質が基板に吸着してしまい、本来の運動が観察できないという不具合がありました。われわれの研究室では、タンパク質を基板に固定せずガラス製毛細管の中を通すことによって、基板の影響を受けない蛍光強度を観測できる装置を開発しました。

高速なタンパク質の動きを観測して機能の謎を解明

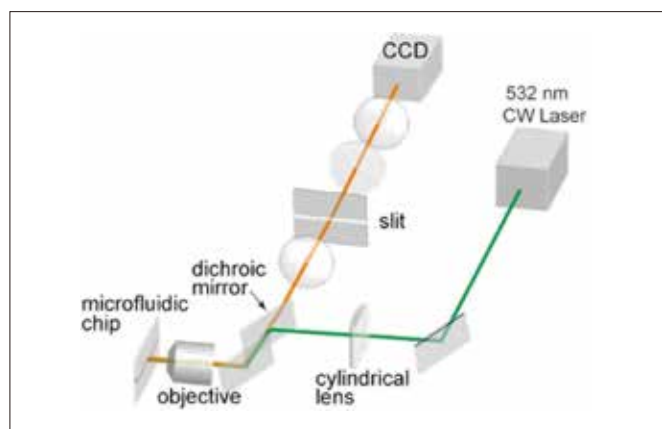
タンパク質が特定の形に折り畳まれる運動は、大変短い時間内に起こります。したがって、その高速運動に追いつける観測装置がないと実験も成り立ちません。高橋研究室では、数十マイクロ秒の時間分解能で、一分子の蛍光強度変化を観察する装置を開発し、タンパク質の高速

ダイナミクス解明に応用しています。「われわれのアイデアは、タンパク質を速く流せる“高速フローセル”を導入したことです。この方法により、測定の時間分解能は10マイクロ秒となり、従来法より2桁向上しました」と高橋教授は説明します。

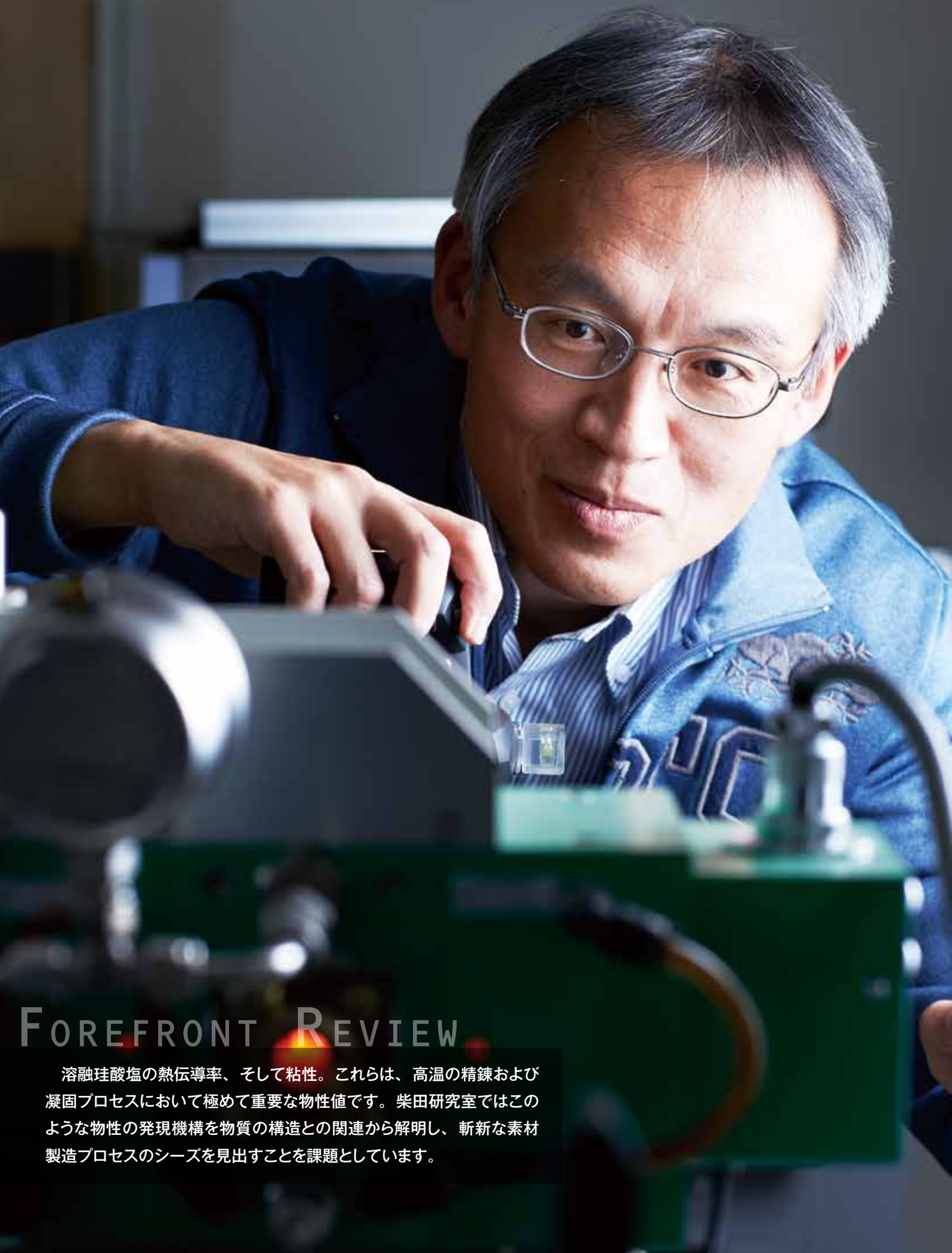
高橋研究室では、「一分子ソーター」と言われる分子を選ぶ装置の開発にも取り組んでいます。さまざまなタンパク質を流し、いちばん明るく光るタンパク質があったら選別する手法を確立することで、タンパク質のデザイン方法への応用を目指しています。

がん抑制タンパク質として知られるp53は、細胞の動きを調整する重要なタンパク質ですが、その機能を発現するためには、DNA上のターゲット配列を探し出してそこに結合する必要があります。この過程は驚くほど短時間内に起きることが知られていますが、そのメカニズムは明らかにされていません。「われわれは、自作の蛍光顕微鏡を用いて、蛍光色素を付けたp53がDNAの上を動く過程を直接観察することで、p53の機能の解明を目指しています」と高橋教授。実際に長いDNAの上を1次元的に運動するp53の粒子の観測に成功しています。

このように高橋教授は、タンパク質はなぜ折り畳まれるのかという基本課題に真摯に向き合い、さまざまな実験アプローチによって、タンパク質と生命科学の未知の領域を少しずつ明らかにしていこうという試みを続けています。



10マイクロ秒の時間分解能で、一分子を連続追跡する観測を可能にした装置。従来に比べて能力が飛躍的に向上したため、非常に高速で運動するタンパク質を観察できる可能性を開いた。



FOREFRONT REVIEW

熔融珪酸塩の熱伝導率、そして粘性。これらは、高温の精錬および凝固プロセスにおいて極めて重要な物性値です。柴田研究室ではこのような物性の発現機構を物質の構造との関連から解明し、斬新な素材製造プロセスのシーズを見出すことを課題としています。



高温での“その場”観察から 斬新な素材製造プロセスシーズを

すべての工業製品はその製品を構成する材料からできており、その材料は鉄のような素材から造られています。素材を得るための素材の精錬プロセス、製造プロセス、リサイクルプロセス等の原理を理解するには、異相間の化学的、物理的分離過程を詳細に理解することが必要です。このようなプロセスは多くの場合高温において実行されます。したがって、高温における各相の物性値が重要となってきます。さらに、高温酸化物融体の物性値(熱伝導度、粘度、表面張力、密度)は、金属製錬や廃棄物の溶媒処理、ガラス製造など工業プロセスでの高温液体材料の制御や地球内部のマグマの挙動を推測する上でも重要となります。

柴田研究室では、ミクロ的な視点からの物性の発現に関わる研究を基礎として、素材が最終プロダクトとして機能を発現させることまでを考慮した高効率な素材製造プロセスの構築を目指しています。例えば熔融珪酸塩の「熱伝導率」「粘性」。これらの物性値はその物質の構造に敏感な性質なので、物性の発現機構を物質の構造との関連から解明する研究を行っています。

プロセス全体の理解、その要素になる個々のプロセスの詳細な理解、各プロセスを構成する要素の物性の理解の研究を踏まえて、素過程の現象を追跡し、解析する研究が必要です。そのために「プロセス研究と物性研究の融合」を図り、総合的な研究を展開していくことを行っています。柴田研究室が進める高温における素材の生産のプロセスの研究・解明は、最終的な材料の特性を決定づける材料の誕生に関わる部分の研究ということが出来ます。

<研究テーマ>

- ・ 熔融珪酸塩中の伝熱機構
- ・ 熔融珪酸塩の粘性と構造
- ・ Fe 基合金における包晶反応・変態の速度論
- ・ 固体鋼中の非金属介在物の反応
- ・ レアメタルのリサイクルと凝固
- ・ 高温下での固液界面現象の解明とその応用
- ・ 次世代材料シリコンカーバイドの溶液成長

多元物質科学研究所
材料分離プロセス研究分野 教授

柴田 浩幸

SHIBATA, Hiroyuki

1964年宮城県生まれ、1987年東北大学工学部金属加工学科卒業、1993年同大学院金属工学専攻修了、博士(工学)、1991年～1993年日本学術振興会特別研究員、1993年素材工学研究所助手、2002年Carnegie Mellon University, visiting scholar、2003年多元物質科学研究所講師、2006年同研究所助教授、2012年同研究所教授 / 1996年日本金属学会論文賞、1997年原田研究奨励賞、沢村論文賞、1999年John Chipman Award、ISS、2001年村上奨励賞、2008年功績賞、2011年西山記念賞。所属学会 / 日本鉄鋼協会、日本金属学会、Iron&Steel Society.

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=85>

素材を得るための様々なプロセスの原理を理解するには、異相間の化学的・物理的分離過程を詳細に理解する必要があります。柴田研究室では、高温における各種物性値の観察を行っています。



熔融珪酸塩の熱伝導率、粘性を物質の構造との関連から解明

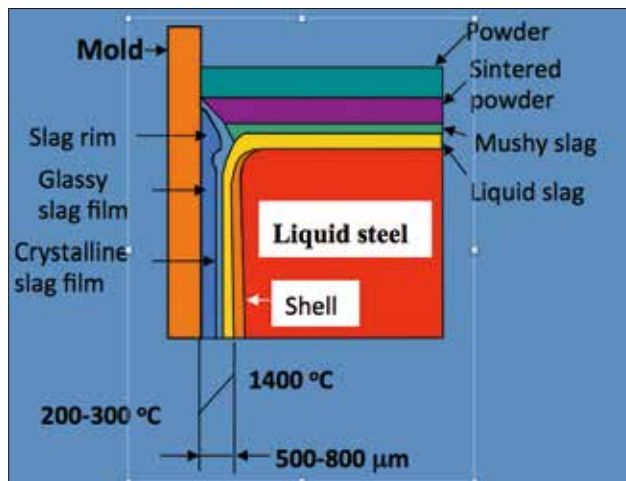
製鋼プロセスにおける高温酸化物融体の物性値測定

鉄の原材料である鉄鉱石の中に、鉄は酸化鉄の状態に含まれています。鉄鋼石から鉄を生み出すために高炉を使いますが、その過程は、高炉の上部から鉄鋼石と石炭を蒸し焼きしたコークスを投入し、一酸化炭素ガスと反応させ酸素を取り除くことにより、鉄鋼製品の源となる「鉄鉄」が生まれます。次の製鋼プロセスでは転炉で炭素やりん、硫黄などの不純物が取り除かれ、できた鋼は連続鋳造機の鋳型に

流し込まれ、外側から冷却されて、凝固した部分が鋼材として製品になります。

柴田教授は、この製鋼プロセスにおける高温酸化物融体の物性に興味があると言います。「我々の研究室では、高温融体物性の観点からこれらの基盤材料の製造プロセスを科学し、高い機能性を持つ材料を低エネルギーで創りだすことを目指しています。また、これらの高温プロセス設計の指針を与える熔融金属や酸化物の物理化学的性質(粘度、密度、表面張力、濡れ性など)を高精度に測定し、

世界に基礎データを発信しています」。



連続鋳造プロセスにおいて、鋳型の中ではモールドフラックスなど様々な層ができています。この層がどのように潤滑剤として機能するか、どのように熱を伝導するか、どのように不純物を取り除くかなど、その詳細機能の解明を柴田研究室では行っています。

現在中心で進めているのは、鋼の連続鋳造法プロセスにとって、どんな物性が大事かを見定める研究。鉄鋼の連続鋳造プロセスあるいは凝固過程における変態機構の解明、珪酸塩融体の粘性および熱伝導率と構造の関係などが研究課題となっています。

製鋼プロセスでは、鋼の品質を高めたり、鋳造の安定的な操業を図るためにモールドフラックスという物質が鋼鋳造時に散布されます。製鋼過程で溶鋼と直接接触するモールドフラックスは、潤滑剤として機能したり、不純物を取り除くなどの重要な役割を果たします。

「このモールドフラックスがどういう元素がいいのか? どういう構造がいいのか? これについて社会的な提言をしていくことが我々のミッションだと考えています。製鋼プロセスを少しでも効率良くすることができれば、社会全体の省エネにも貢献できると考えています」。

珪酸塩系融体および過冷却液体の熱伝導度と構造に関する研究

熔融状態のスラグの伝熱特性は、溶鉄の温度など製鋼プロセスの状態を支配する重要な要因です。また、鋼の連続鋳造プロセスにおいて溶鋼の上面に供給されるモールドフラックスの伝熱特性は、溶鋼の保温や抜熱に関係する重要な要因で

年甲斐もなくアイスクャンディが好きで、毎晩食べています

アイスクャンディが好きで、毎晩食べています。妻が買ってくるので冷蔵庫にいつも入っています。1日2本までと言われてはいますが。

子どもたちには、「私が食べる前にお父さんが食べてしまう」と不評を買っています。お酒を飲んで帰る時でも、無意識のうちにコンビニでアイスクリームを買ってから帰りますね。

韓国に学生たちと行った時も、辛いものを食べた後に「韓国のアイスを食べよう」と言ったことが思い出されます。

海外の濃厚なチョコレートも好きなので、かなり甘いもの好きなのです。

MY FAVORITE



ハワイで食べたチョコレートシロップのかかったかき氷

TERM INFORMATION

連続鋳造プロセス

化学的な成分を調整した融けた鋼を連続的に固めるためのプロセス。1980年代から急速に連続鋳造の割合が増加している。分塊圧延工程が省略できるので、省エネルギーである。現在はほとんどの鋼が連続鋳造により製造されている。

モールドフラックス

モールドフラックスは酸化物とフッ化物で構成されている。連続鋳造鋳型内において、溶鋼上に散布される。散布されたモールドフラックスは溶鋼からの熱で溶け、鋳型と鋼の初期凝固シェル間に流れ込む。モールドフラックスの化学成分を調整することによって、鋳型と鋼の初期凝固シェル間の伝熱と潤滑を制御している。

スラグ

スラグは日本語では鉱滓。鉱石から有用金属を取り出した残り、あるいは精錬プロセスにおいて不純物を取り除くために使用されるもので多成分の酸化物。鋼の製造では必ず発生し、副生成物とも呼ばれる。

雰囲気制御

取り扱う試料の周辺の気体相の状態を制御することをいう。高温での実験では金属は容易に酸化してしまうので、それを防止するためにアルゴンガスなどを流すこと。

接触角測定装置

接触角とは、例えば水滴を板の上などに置いた時に丸くなり、板の表面と水滴と気体相が共存する3重点において観察される角度のことで、水滴の表面の状態に依存する。これを高温において、酸化物融体と金属基板、あるいは金属融体と無機固体基板の間で観察できるようにした観察装置。

共焦点走査型レーザー顕微鏡

光学顕微鏡であるが、試料表面をレーザーで走査して観察できる顕微鏡。共焦点光学系を採用していることから、高温において試料から出る輻射光を除外することができる。1600℃においても室温をほぼ変わらないイメージを得ることができる。



柴田研究室では高温における無機物質(金属、酸化物)の性質や反応性を明らかにするために高温におけるその場観察および計測が可能な実験装置を配備しています。

す。スラグとモールドフラックスはともに、シリコン、カルシウムなどを基本組成とする溶融珪酸塩です。

「珪酸塩スラグは製鉄プロセスで広く使われています。特に連続鋳造時モールドフラックスには鋳型と溶鋼の間で熱を伝達し、最終製品の表面性質を決めるなど大変重要な役割があります。さらに、最近スラグの再利用のために熱伝導度のような熱的や物理的なデータが必要になってきます」。

高温の精錬プロセスでは極めて重要な物性値である「熱伝導率」と「粘性」。しかし、測定上の困難さで正確なデータ測定は現在不十分です。「そこで、高温におけるその場観察および計測が可能な実験装置の開発が必要になります」。

分子間の組成が

熱伝導度に大きく寄与している

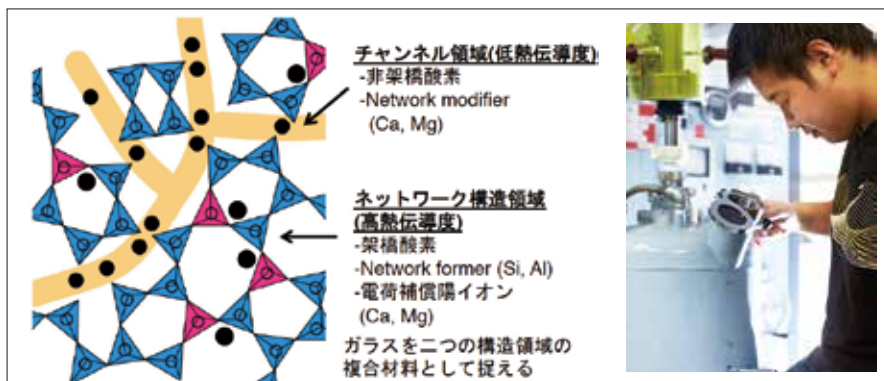
柴田研究室では高温における無機物質(金属、酸化物)の性質や反応性を明らかにするために、様々な高温におけるその場観察・計測が可能な実験装置を揃えています。

「1600℃の基板材料上で無機物質を融解し、基板材料との濡れ性や反応性を評価する接触角測定装置、室温から2000℃の温度範囲において、無機物質の熱拡散率を固体あるいは融体の状態で計測するレーザーフラッシュ型熱拡散率測定装置、1600℃を超える温度において物質の状態のその場観察を行う共焦点走査型レーザー顕微鏡、酸化あるいは還元雰囲気において、酸化物融体の粘性を測定する雰囲気制御型粘度測定装置などを装備しています。さらに学内の施設を使い、粘度を支配する原子構造について分光的手法(NMR, Raman)により調査を進めています。珪酸塩融液の各種金属基板への濡れ性とその結晶化挙動への影響なども調べています」。

柴田研究室では、過冷却液体状態(600~800℃付近)の粘度測定技術を有するレンヌ第一大学の研究グループと共同研究を実施。幅広い温度範囲での粘度データの収集を行っています。

このような精力的な高温におけるその場観察・計測実験により研究成果もあがっています。

「実測した結果、珪酸塩融体の熱伝導率には温度依存性はみられませんでした。一方で、珪酸塩融体の網目構造の構成している架橋酸素と非架橋酸素の熱伝導率に及ぼす影響が明らかになってきています」。この関係について、珪酸塩融体構造をモデル化して熱伝導率を導出する手法を考え、その有効性を示しました。また、熱伝導率の実測に基づく熱伝導率の推算式も導出しました。



珪酸塩融体の熱伝導率、粘性など、製鋼プロセスにおける物性を実測している柴田研究室。「架橋酸素と非架橋酸素では熱伝導度が違うらしく、非架橋酸素数が増大すると熱伝導率は低下する」という実測結果も出ています。

柴田研究室は高温現象を直接観察することが大切であると考えています。共焦点走査型レーザー顕微鏡はこれを具現化する重要なツールです。まさに、百聞は一見に如かず、Seeing is believing.



鋼の包晶変態には冷却速度が影響することが判明

包晶反応は冷却されて温度が低下する場合に、ある固体とある液体が反応して別の固体を形成する反応のことです。柴田研究室では、鋼の包晶反応についての研究を進めています。「鋼の凝固時に凝固殻に気泡や介在物が取り込まれる仕組みや相変態の機構を明らかにすることは、超清淨鋼を製造すること、そして介在物を均一に分散させ鋼の特性を向上することにおいてとても重要です」。

鋼の包晶変態では高温からの冷却時に δ 相：体心立方(bcc)から γ 相：面心立方(fcc)への相変態が起こります。この変態は炭素の拡散が影響すると考えられてきましたが、近年、炭素の拡散では説明ができない高速の変態が起こることが、高温その場観察から指摘されてきています。柴田研究室では、共焦点走査型レーザー顕微鏡により、高温その場観察を実施しています。

この観察装置は日本オリジナルの技術からできています。若い時にこの装置に出会えたことは大変な幸運でした。当時はどのように利用できるのかが分からずに

素材製造プロセスの高効率化や新規プロセスの開発

低レベル放射性廃棄物安定化用ガラスマトリックスの開発

柴田研究室では、これらの基礎研究を基に実際の素材製造プロセスの高効率化や新規プロセスの開発に取り組んでいます。そのいくつかをご紹介します。

そのひとつに、低レベル放射性廃棄物のガラス固化体による処理プロセスの基礎研究があります。

「ガラス固化とは放射性廃棄物とガラスを混ぜて一体化して固定化することで



す。使用済み燃料の再処理プロセスから排出される低レベル放射性廃棄物としてはナトリウム系廃液等が挙げられます。これらの廃液を安定に保管するため、廃液成分を高温(1200℃程度)で酸化物ガラスマトリックスに溶解し、ガラス固化体中に安定化させるプロセスが提案されています。ガラス固化体になると水に接触しても溶けにくくなります」。

ガラスは水に溶けにくく、化学的に安定であるため、放射性物質を長期間にわたって安定して閉じ込めるのに優れています。また、地下水がしみ込みにくく、地層処分に適していると言われてしています。

柴田研究室では、ナトリウム成分を安定化させるために適したガラスマトリックスの開発を目指して、ナトリウム珪酸塩ガラスのガラス形成能および化学的安定性に及ぼすシリカおよびアルミナ成分の影響について調査を行っています。

1400℃を超えるような融液を金属板上で急冷し、ガラスを作製します。このようにして作製した試料を用いて、熱伝導率、粘性、結晶化、構造などの評価を行っています。

真夜中にひとり海外ドラマを見るのが日課になっています

趣味と言われてもなかなか浮かばないので、妻に聞いてみたら「あなたはテレビ好きよ」と言われました。そう言えば海外ドラマを良く見ますね。

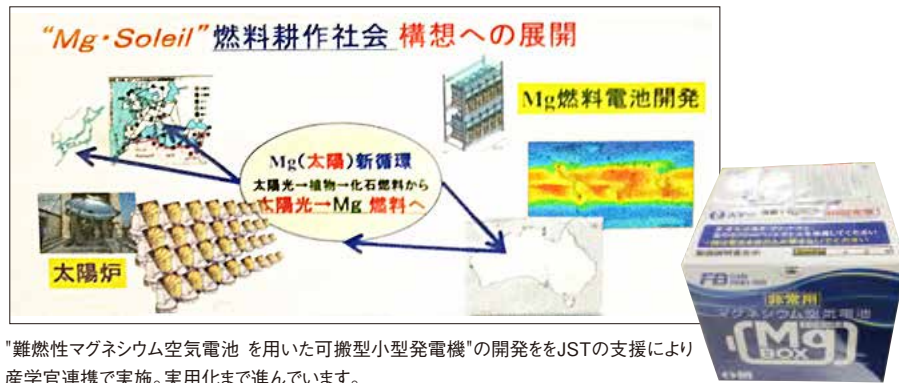
最近だと、科学捜査班が凶悪犯罪に最新科学で挑む『CSI』や、特別捜査班『FIVE-0』が凶悪事件に挑むアクション『HAWAII FIVE-0』など。そう考えると小さい頃から好きでしたね。刑事コロンボやチャリーズエンジェル、バイオニックジェニーなど。

家族には呆れられていますね。しょうがないので夜中にひとりで見えています。

日本のドラマとの違いは、スピード感や展開の速さでしょうか？ お酒が弱いので晩酌もしないで見えています。

OFF TIME





"難燃性マグネシウム空気電池を用いた可搬型小型発電機"の開発をJSTの支援により産学官連携で実施。実用化まで進んでいます。

苦勞いたしました。高温の鋼の凝固現象や非金属存在物の挙動の観察に世界で初めて成功し、この観察手法は高温の冶金科学の分野に非常に大きなインパクトを与えました。現在では、日本国内はもとより世界中の高温プロセスを研究する機関でこの観察装置が利用されるようになってきました。これから多くの研究成果が出てくるのが期待されています。

難燃性マグネシウム空気電池を用いた可搬型小規模非常用電源の開発

東日本大震災の経験から、電力会社からの電力に全面的に依存するのではなく、各家庭などに非常用電源の準備が必要だということが叫ばれています。「今後、電力会社からの電力が途絶えても数日間はテレビやラジオから情報を得ることができるような安価な電力システムの構築が必要になります」と語る柴田教授。

研究室では、東北大学・小濱泰昭名誉教授と共同で、「難燃性マグネシウム空気電池を用いた可搬型小型発電機」の開発を科学技術振興機構(略称JST)の支援により産学官連携で実施しています。

従来、安価な電力システムの候補としてあげられていたのは「水素燃料電池」。「水素」と空気中の「酸素」を反応させて

電気を起こし、排出されるのは「水」だけの、未来を担う、クリーンな電源です。しかし、水素燃料電池は、高価な白金触媒を必要とすることや危険な水素ガスを大量に生産・供給・貯蔵するという問題があります。

それに対し、「マグネシウム燃料電池」は、「空気中の酸素を使う」という発電原理は、水素燃料電池と同じですが、空気極は炭素でできており、また、電解液も塩水であるので環境に良い電池となっております。仙台市の場合には使用後に一般ごみとして廃棄も可能です。さらに、原料のマグネシウムは海水中にニガリとして0.13%含まれており資源量はほぼ無尽蔵といえます。

マグネシウム燃料電池は使用を始めるときに電解液として塩水を入れます。使用しないときは乾燥した状態で長期間の保存ができるので、非常用の電源に大変向いています。発電後は、水酸化マグネシウムに変わりますが、経済的かつ環境負荷が低い方法で金属マグネシウムに還元する技術が確立すれば大規模な発電に利用できる可能性があります。小濱名誉教授と協力してこの構想を推進しています。

柴田研究室では、このように、素材製造プロセスの高効率化や新規プロセスの開発を通して、素材・材料開発のイノベーションを起こしたいと考えています。

柴田研究室では、プロセス全体の理解、その要素になる個々のプロセスの詳細な理解、各プロセスを構成する要素の物性の理解を通して、新たな素材・材料の開発シーズを生み出しています。



TERM INFORMATION

酸化ガラスマトリックス

長期的に保存したい物質を安定に保存するためのガラス相のこと。このガラス相にできるだけ多くの目標物質を溶かし込み、安定なガラスにすることが重要である。

包晶変態

2元系合金の変態の一種である。溶けた状態から冷却した時に一つの固相と一つの液相から新しい固相が生成すること。鉄と炭素の合金場合は炭素濃度が0.09%~0.53%の場合には融体の状態から冷却したときにδ相が凝固し、残りの液相と反応してγ相が生じる。

δ相、γ相

鉄は室温ではα相(bcc)であり、温度を上げると910°Cでγ相(fcc)に変化し、1392°Cでδ相(bcc)となる。炭素を添加するγ相が安定になる温度領域が広がる。

体心立方、面心立方

いずれも原子の配列の仕方を表す。面心立方はface-centered cubicでfccと表記することもある。中心の一つの原子をそれと同じ12個の原子が取り囲む配置。体心立方はbody-centered cubicでbccと表記することがある。中心にある一つの原子が立方体の各隅にある8個の同種原子と接触している配置。

固液界面

固体と液体の接触している面のこと。化学反応、高温冶金反応、凝固などのすべてのことが固液界面の特性によって左右される。界面の特性は物質の組み合わせで異なる。

難燃性マグネシウム

純粋なマグネシウムは空気中では着火すると燃焼する。一方、カルシウムやアルミニウムを添加されたマグネシウムは空気中において燃焼しないという特性を持っている。このような特性をもつマグネシウム合金のこと。



FOREFRONT REVIEW

粉体を原料とする高機能性材料の開発・製造においては、要求される粒子、あるいは機能を発現させるために、混合・成形・充填などの粉体プロセスを自在に制御することが重要になってきます。加納研究室では、粉体プロセスを自在に制御するためのツールとしてコンピュータ・シミュレーションを開発し、それぞれの目的に最適な粉体プロセスを創成しています。こうした研究開発を進めながら、環境やエネルギーという現代的なテーマに対して粉体工学の領域からの新たなアプローチを試みています。



低炭素・資源循環型社会に向けて 機能性粉体プロセスの可能性に挑む

工学部の学生だった時、ある粉状の物質の試験で容器に充填しようとしていて「目一杯充填しようとしても湿度が高い日はまとわりついて出てこない、逆に乾いていても静電気で付着したりして、なかなか自在に操れないですね」とマスターの先輩に話したところ、「粉の挙動はまだまだ検証されていないことが多い」ということだった。それが、加納教授が「粉体」に興味を覚えたきっかけだったと言います。「身近にある、たとえばコーヒーの粉が、どのようにすりつぶした時に、熱湯で抽出して、どのような味になるのか、統一的に粉の物性がこうだからこうなるというメカニズムが明らかにされているわけではない」そんなことを研究する領域なら面白いと思った、というわけです。

実際、私たちの身近には、小麦粉・カレー粉など食品のほか、医薬品や化粧品など、粉状のものが数多くあります。さらに粉体が原料になっているものを考えてみると、鉄鋼業、セラミックス、化学工業、電子部品、そしてエネルギー分野と、あらゆる産業分野に関わっていることがわかります。粉体というと、確かに馴染みのない用語ですが、粉体の特性や挙動・現象を探索・解明し、材料の製造プロセスを創成する「粉体工学」は、産業の基盤を横断的に支える、極めて重要な研究分野であると言えます。

さらに近年は、微小なサイズを扱うナノテクノロジーの進展や、低炭素社会・資源循環型社会に向けた取り組みが行われている中で、粉体が関わる高機能性材料の開発・製造が盛んに進められ、粉体工学はいつそう注目度を増しています。

学生時代から着目した粉体工学を基盤として、加納教授はいま地球環境保全への貢献という明確なテーマ設定とコンピュータシミュレーションによるアプローチで、新たな可能性への挑戦を続けています。

多元物質科学研究所
プロセスシステム工学研究部門
機能性粉体プロセス研究分野 教授

加納 純也

KANO, Junya

1967年岐阜県生まれ。1990年同志社大学工学部化学工学科卒業、1990年同大学院工学研究科工業化学専攻博士課程入学、1995年同大学院工学研究科工業化学専攻博士課程単位取得退学、1997年博士(工学)、1995年東北大学素材工学研究所助手、2005年東北大学多元物質科学研究所講師、2008年同准教授、2012年同教授。2012年度化学工学会粒子・流体プロセス部会技術賞、2013年日本鉄鋼協会俵論文賞、2014年粉体工学会技術賞。所属学会／粉体工学会、化学工学会、日本鉄鋼協会、資源・素材学会、日本エネルギー学会。

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=84>

加納研究室の研究アプローチにはコンピュータシミュレーションが欠かせない。そのシミュレーションのためのデータ計算を行うサーバーラックを研究室内に備えている。



新たな粉体プロセス提案で 省エネルギー、省化石燃料化

エネルギー、環境、資源を 強く意識した環境粉体工学へ

加納研究室の大きな特徴は、粉体工学を基盤としてさまざまな研究開発を進めている中で、その視線の先に環境やエネルギーの問題を見据え、目的意識をもって立ち向かっていること、と言えます。

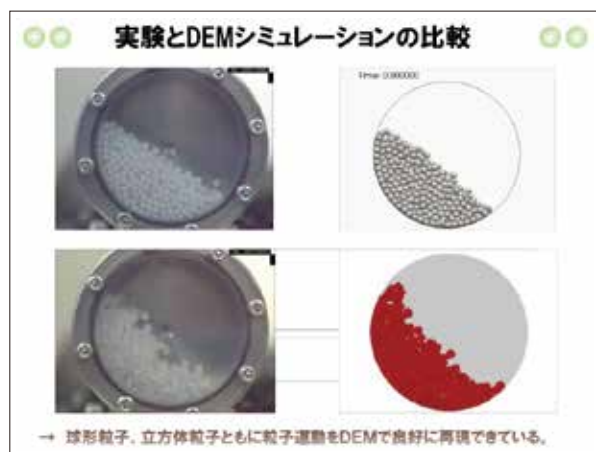
こうした研究アプローチの方向性を定めたのは、東日本大震災が大きなきっかけになったと言います。「避難した先で電気がない生活を11日間体験しました。ほぼ何もできないエネルギーのない生活をする中で、なんとかして自分の立場からエネルギーに不安を感じないようなものをつくれな

いかと考え始めた」。エネルギーは大きく化石燃料に頼っていて、二酸化炭素排出の問題はずっと継続しています。一方で二酸化炭素を出さないからと、人間がコントロールできないシステムだけに頼ることに問題が残ります。「エネルギー、環境、資源というものに、今まで取り組んできた粉体工学の面から何か少しでも貢献できる研究をしていこう」。こうして新しい視点を持った加納研究室における「環境粉体工学」が始まりました。

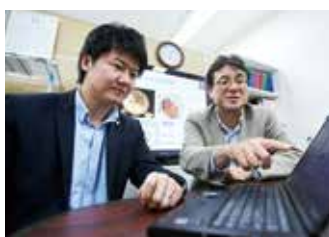
最適な粉体プロセス提案で 省エネルギー化を実現

加納教授が推進する環境粉体工学には、4つの柱が立てられています。1つめは、「省エネルギー化」です。「いま費やしているエネルギーをいかに減らすか。同じつくるなら100のエネルギーをかけるのではなく90にも80にも減らす方法があるのではないか。この発想を粉体工学にあてはめると、粉を自在に操れるようにしないといけないということ」。これには、ツールとしてコンピュータシミュレーションが重要なキーになります。加納教授は、大学院時代の1990年からコンピュータシミュレーションに取り組んでいます。当時はまだ、粉体工学分野でコンピュータシミュレーションを使おうという動きはなかった時代で、加納教授が始めた段階ではまだ2次元計算でした。その後、粉体工学における3次元シミュレーションを確立したのは、加納教授です。

環境粉体工学における省エネルギー化は、粉体と粉体プロセスを設計する時に、より効率的により速やかに対応できるように、コンピュータシミュレーションを活用します。たとえば「粉を混ぜる」という場面1つ



実験とシミュレーションの比較。左側が実際に回転するドラム内の粒子の挙動を実験した様子。右側がシミュレーション(DEMによる)。シミュレーションによって粒子の運動が良好に再現されている。写真はシミュレーションについて検証する加納教授と石原真吾助教(左)。



季節の移り変わりを感じながら、庭で野菜づくり

わが家の庭で野菜づくりをしています。トマト、キュウリ、ナス、枝豆、トウモロコシ、ジャガイモ、アスパラガス、ニンジン、タマネギ、ニンニク、イチゴ…。ありとあらゆるものを育てています。朝キュウリをもぎ取ってそのまま食べると、最高においしいですね。あ、キュウリってほんとにこんな味だったんだと感激します。枝豆やアスパラも採ってすぐ茹でて食べると最高です。

畑仕事は子どもの頃父母に手伝えと言われて嫌だったんですが、いまはわが家のささやかな庭で土をいじって、種を蒔いて育てるのが楽しくてしょうがない。野菜を見ていると気持ちが落ち着くし、すべてを忘れて暗くなるまでやっています。ほぼ1年中、何かが採れますね。何より季節を感じる。いつ植えていつ収穫するのかわからない体で感じています。これからはイチゴが楽しみです。

MY FAVORITE



TERM INFORMATION

粉体プロセス

固体粒子の集合体である粉体を粉砕する、分級する、混合するなど粉体粒子を加工する工程のことであり、これらの工程を組み合わせ、各種材料や製品が作られる。

DEM

Distinct (Discrete) Element Methodの略称であり、日本語では、個別要素法または離散要素法と呼ばれる。構成粒子一つ一つを追跡し、粉体全体の挙動をシミュレーションする代表的な方法である。

コンピュータシミュレーション

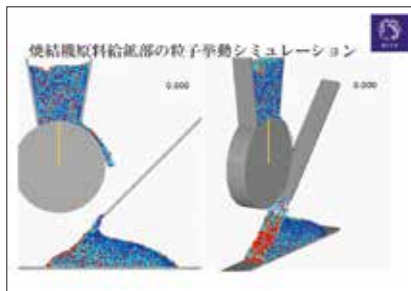
コンピュータを使用して、複雑な事象を模擬的に計算すること。パラメータを変化させ、事象に与える影響等を詳細に検討することができ、理論や実験では得られない成果を生み出すことが可能である。

造粒

粉体の凝集や成形、固体粒子表面の被覆、溶液の乾燥などによって粒状の粒子を造る操作である。身近なところでは、錠剤や細粒などの医薬品、粉ミルク、インスタントコーヒー、パスタなどの食品、ペットフードなどの飼料の他、肥料、セラミックス、製鉄など多岐にわたる産業で行われている。

混合

混合は、一般には固体と固体あるいは固体と液体など2種類以上の異なる物質を混ぜ合わせることをいう。ただし、ここでは主に2種類以上の異なる粉体の混合を対象とする。混合の目的は、異なる粉体を混ぜ合わせてそれらを均一に分布させることであり、医薬品、化粧品、食品など多岐にわたる分野で粉体混合が行われている。



鉄鉱石の高炉投入前段階の焼結機原料給鉱部の粒子挙動シミュレーション。ホッパーに充填された粒子が回転するドラム上に落下し、防護板にぶつかってパレット上に堆積していく様子が再現されている。赤色の粒子は径30mm、緑色は18mm、青色は12mmをそれぞれ示している。

でも、そこには混ぜるためのさまざまな装置が考えられます。「粉体の特性に合わせて装置を選ばないといけない。選んだとしても速やかに求められる状態にするまで混合するにはどうしたらいいか。やってみなければわからない、誰もわからない。こんな時にこの装置を選んだら、こういう条件で、こうやると効率的にできますよ、ということをシミュレーションで探してあげる」と。これが粉体プロセスの最適化だと、加納教授は説明します。

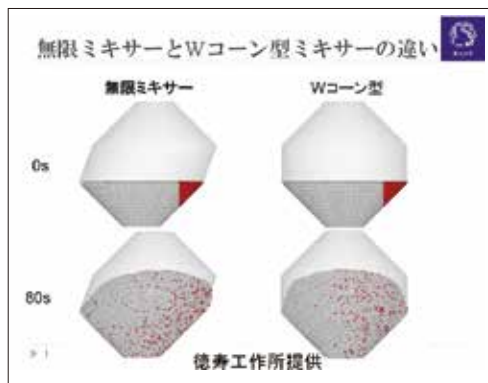
粉体プロセスの設計において、とりわけ粉体を混ぜ合わせる機能を果たす混合機をどうつくるか、が重要になります。「ふつうはアイデアを出して、設計して試作し、実験をして、評価をするという流れ。目標とした水準に達しなければ、また条件を変えてやってみる。作り直す必要があればまた作って、実験してと繰り返さなければいけない。これをコンピュータシミュレーションに置き換えることによって、最適な条件と設計をすみやかに提案することができ

る」。実際に加納教授は、大手粉体混合機メーカーの製品などを実用化しています。粉体プロセスの最適化は、装置の製作段階での効率化とともに、装置を動かす電気料金や製造コストの低減にも貢献するもので多くの業界における全体としての省エネルギー化にも結びつくものと言えます。

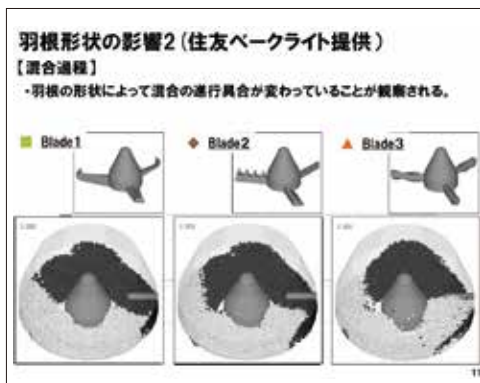
高温粉体プロセスを見直し、 二酸化炭素排出削減を目指す

2つめは、化石燃料の使用をいかに減らせるか、という課題です。日本でいま最も二酸化炭素を排出している産業は鉄鋼業です。製鉄には、原料の鉄鉱石とともに、副原料としてコークス、石灰石が使われます。コークスは、石炭を蒸し焼きにして硫黄、コールタールなど不純物を除去し、炭素の純度を高くして石炭よりも燃焼時の発熱量を高くしたものです。高炉下から目的の溶銑を取り出すまでの過程は、鉄鉱石、コークス、石灰石が粒体・粉体の状態で、高温下で反応するため、高温粉体プロセスと言われます。

高炉に投入する前段階から高温粉体プロセスまで、これら粉体・粒体をいかに混ぜるか、いかに造粒するか、いかに焼結するか、などプロセス全体を細かく見直し、新たに効率化、最適化したプロセスシステムを構築していくことが、このテーマにおける目標です。これによって、化石燃料である石炭、コークスの使用量を減らし、二酸化炭素の排出削減に貢献しようという取り組みです。



加納教授が実用化した混合機の例。従来メーカーが製作していた右側の混合機では周辺部の粒子が十分な混合結果が得られなかったが、垂直だった胴体部を傾斜させた形状としたシミュレーションによって、十分な混合結果を得ることになり、混合時間も約30分の1に短縮した。



これは混合機のハネ形状の違いによって、混合度合が変化することをコンピュータシミュレーションによって検証した実例。右側のブレード3のハネ形状は、単純な平板ではなく捻りを加えたもので、これによって外側の粒子が内側に巻き込まれてくることになり、効果的に異種類の粒子が混合される結果となった。

加納研究室で粉体や粒体の実験を行う際にはガラスビーズや異なる素材の試料などを使って、混合の様子などを検証する。



新たなエネルギーを創り出し、 貴重な資源を再資源化する取り組み

バイオマスから水素を 創り出す試み

加納研究室における環境粉体工学3つめの柱は、創エネルギーということです。1つめと2つめの柱は、エネルギーや燃料を少しでも削減しようという狙いでしたが、3つめは新しいエネルギーを創り出そ

うという動きです。具体的には、積極的に、カーボンニュートラルであるバイオマスから水素エネルギーを取り出そうということです。「水素はなぜいいかというと、貯められる、運べる。水素を燃やしてエネルギーとして使ったとしても、水しか排出しない」と加納教授は説明します。この



加納研究室では環境粉体工学の立場からバイオマスからの水素の製造を目指す。そのため、さまざまな合成によって水素を創り出し、分析して検証する研究を行っている。製造装置や分析装置を研究室のノウハウでオリジナルに製作することも多い。

ようなメリットがあるため、水素はいま最も注目されているエネルギーの存在形態の1つとなっています。

「ただし、現状の水素は97パーセント化石燃料からつくられているので、燃料電池自動車走らせることが必ずしもガソリン車を走らせることより低炭素社会のために優位とは言えない。バイオマスから水素をつくってこそ、本来の目的にも添うものとなる」と加納教授は話します。そのなかでも、あまり使われていないものをターゲットにしたいと加納教授は考えています。バイオマスというと、主に草木、間伐材、森林資源などをイメージすることが多いと思います。しかし加納教授は「そういうものは、集めるだけで、バイオマスが持っているエネルギーを使ってしまう。集めなくても必然的に集まってくるものを使うことを考えた方がいい。われわれは下水汚泥に注目している」と指摘します。

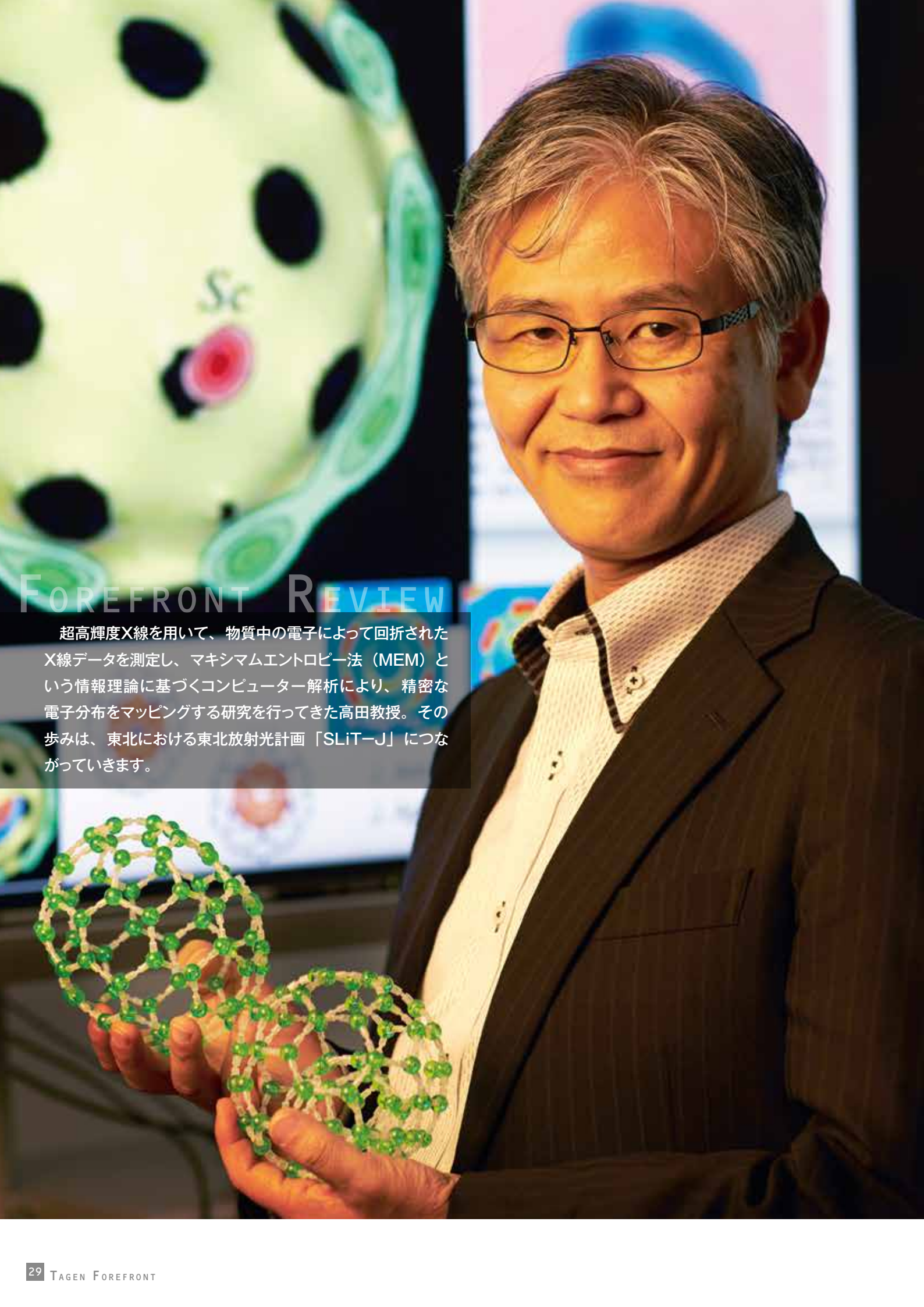
下水汚泥を活用した 水素エネルギーの回収

日本は社会インフラが整っていて下水汚泥処理場がいま約2200カ所あると言います。下水汚泥は、エネルギーとなる有機成分が8割、使えない無機成分が2

休みの日は、子どもたちと楽しく遊ぶことが多いですね

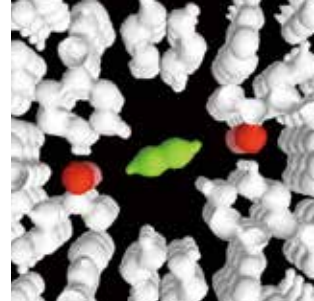
小学3年生の、男の子と女の子の双子の子どもがいる、というのがわが家の特徴でしょうか。いま子どもたちが、けっこう夢中でやっているのが、サッカー、野球、空手。それから書道もやっていますね。子どもには、スポーツはやってほしかった。とくに球技です。武道は、礼儀を身につけてほしい、ということで。書道は、きれいな字を書く人になってほしいと、1年生のときから始めました。休日は、キャッチボールをして体を動かしたり、2人の行動に合わせるが多いですね。わが家の双子は、同じように育てて、食べるものも同じなのに、2人の性格がまったく違って、面白いというか、楽しい生活になっています。毎年2人の誕生日の時に家族写真を撮ることにして、今回はそれを誌上公開します。





FOREFRONT REVIEW

超高輝度X線を用いて、物質中の電子によって回折されたX線データを測定し、マキシマムエントロピー法（MEM）という情報理論に基づくコンピューター解析により、精密な電子分布をマッピングする研究を行ってきた高田教授。その歩みは、東北における東北放射光計画「SLiT-J」につながっていきます。



放射光X線による ナノ可視化技術の開発と応用

放射光は物質中の電子を調べるためのプローブ(探針)です。高田教授のグループはこの放射光の特徴を活用して、物質科学と放射光科学を橋渡しするような新しい構造科学の構築を目指しています。電気伝導や磁性などの物質の様々な機能を知る上で、物質の原子配列などの構造情報はとても重要なものになります。そのために、先端計測手法と計測データの解析手法の開発と応用研究を行ってきました。

先端計測手法の開発では、SPring-8の光源特性である、高輝度性、高指向性を活用し、高精度のX線回折データ計測、反応現象のその場観測、物性同時測定などの手法を開発し、ハードからソフトウェアまで新機能性材料へ応用を展開しています。

データ解析にはマキシマムエントロピー法(MEM)という情報理論に基づくコンピューター解析手法を開発。結晶材料の電子密度マッピング、静電ポテンシャルの可視化のための独自の解析手法を開発し、精密な電子分布をマッピングする研究を行っています。さらに、放射光のパルス特性とナノビームを活かした時分割X線回折実験「X線ピンポイント構造計測」の開発も2008年に成功し、DVDの光記録の研究に応用されています。

現在、放射光施設はSPring-8、SACLAが、高エネルギー光科学分野での、X線可視化技術に革新をもたらし、海外では、3GeVクラスの低エミッタンス放射光施設が次々と建設され、研究の国際競争が激化しています。

これに対し、高田研究室では、東北放射光計画「SLiT-J」を推進。これまで開発してきた、高性能軟X線顕微鏡や光学技術、マキシマムエントロピー法などの画像再構成の解析技術を基に、SLiT-J計画が実現する先端軟X線光源を活用し、ナノ構造を可視化する科学の構築を目指しています。生命科学から、物質・材料科学、デバイス科学まで広い分野にわたり、軽元素戦略など新産業創成などへの展開も期待されています。

多元物質科学研究所
放射光ナノ構造可視化研究分野 教授

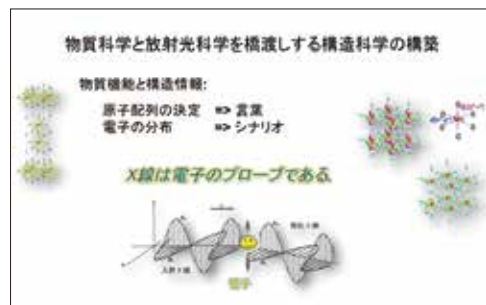
高田 昌樹

TAKATA, Masaki

1959年、広島県生まれ。広島大学大学院理学研究科修了。理学博士。名古屋大学工学部応用物理学科助手、島根大学総合理工学部助教授、名古屋大学大学院工学研究科助教授、(財)高輝度光科学研究センター(SPring-8/JASRI)利用研究促進部門部門長、(独)理化学研究所放射光科学総合研究センター主任研究員、東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻教授、理化学研究所放射光科学総合研究センター副センター、2015年より現職。1998年日本結晶学会賞、2001年日本物理学会論文賞、2013年文部科学大臣賞科学技術賞

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=43>

「電子を見ることが究極的に物質の性質を見るためのカギとなる」。そしてこの電子を調べるためのプローブ(探針)が放射光です。高田教授のグループは放射光の特徴を活用して、電子の分布を可視化することにより物質科学の研究に革新をもたらそうとしています。



物質を電子レベルで可視化し 新しい機能を創発する設計図づくり

電子を見ると 物性が見えてくる

現在まで、(財)高輝度光科学研究センター (SPring-8/JASRI) 利用研究促進部門 部門長、(独)理化学研究所放射光科学総合研究センター主任研究員、(独)理化学研究所放射光科学総合研究センター副センター長と放射光施設の要職を担ってきた高田教授。わが国における放射光開発に尽力してきました。

高田教授は語ります。「学生時代で電子顕微鏡を使って結晶の電子線回折を観察したときに、自然が作り出す美しい世界に魅了されました。その後、電子線から放射光という最先端の光を使うようになりました」。

「電気が流れる」「温度があがる」など、電場と磁場が変動して物質の性質は決定されます。すべては電子の動き・分布で決まると言えます。したがって分子・原子の結合形態・電荷整列・電荷移動などを電子レベルで観察することが物質の特性を見極めるために大切になると高田教授は考えます。

「電子を観察するためのプローブとなるのはX線です。X線は原子に含まれる電子によって散乱しますが、このX線の分布を逆算すると電子の密度分布を見ることができ、その結果をもとに原子の特定ができるわけです。原子の外にさまよっている電子は密度が薄いので、明るい光が必要です。それが放射光と言われるもので、太陽の10億倍の明るさです」。

光には赤外線、可視光線、紫外線、X線などがあります。放射光とは、高エネルギーの電子などの荷電粒子が磁場で曲げられたときに発生する強力なX線(シンクロトロン放射光)です。放射光は、物質中の電子と相互作用します。極めて明るいX線の光である放射光を使って、物質を観測すると、物質の機能を電子のレベルで可視化することができるようになります。「それにより、物質の新しい機能を創り出す電子の設計図を作成することができます。より詳細な電子のMAPをつくることを目指しています」。

ナノの可視化に挑戦する 新しい実験・解析法を開発

「X線の回折データで電子の分布を見る仕組みは、光でものを見るカメラと同じ原理です。ただし、ひとつ大きな違いは、レンズのかわりにデータ解析で結像する点です。この仮想的な結像レンズの役割を、従来ではフーリエ変換で行っていましたが、打ち切り効果が出るため精密度に限界がありました。そこで、我々のグループでは新しい解析方法を開発しました。

フーリエ変換による結像理論に代り導入したのは、マキシマムエントロピー法(Maximum Entropy Method: MEM)という情報エントロピーの概念。(1)与えられた情報を満足し、(2)得られていな



マキシマムエントロピー法はX線回折によって得られたデータを、画像に結像するレンズのような役割を、コンピューター解析により担います。そのためには、精度の高いデータが必要です。それを可能とするには、明るい高輝度のX線の光が必要です。放射光施設は、その様な高輝度X線を創り出す施設なのです。

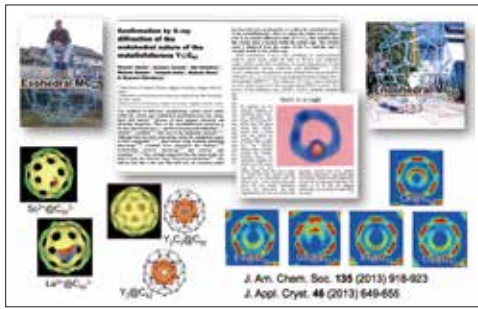
幸せの度合いが全然ちがう、デンマークという国のあり方

デンマークは、共同研究で23年にわたり毎年のように訪れる国です。潤いのある生活スタイル、食べ物の美味しさが、「豊かさ」について、日本人として考えさせられます。一方で、国民は高い税金で、手厚い福祉サービス、町中がセントラルヒーティングで快適なインフラ整備、ホームレースもない責任ある社会を支えています。

天文学者ティコ・ブラーエや物理学者ニールス・ボーアを輩出した、サイエンスやアカデミズムの歴史を大きな誇りとする国です。原子力発電の導入にも100%に近い投票率の国民投票でNoとし、自然エネルギーである風力発電を輸出産業にまで育成しました。環境問題に対する高い意識と哲学を持つ国で、私の第2の故郷でもあります。

MY FAVORITE





い情報に関しては最もバイアスの小さい解を推定するために、情報エントロピーが最も大きい、画像を選ぶ方法です。「このMEMによって原子間の結合や電子の分布をノイズのない鮮明な画像で可視化することができるようになりました。

さらに、放射光粉末回折実験によるデータ測定が、この解析法の特長を生かせる一つの手段であることがわかりました。粉末データを取り扱うために、既存の粉末構造解析法であるRietveld解析法と組み合わせたMEM/Rietveld法を開発し、金属内包フラーレンや集積型金属錯体などの新規ナノマテリアルの電子密度イメージングによる構造決定に成功しています。

「世界に先駆けて金属内包フラーレン $Y@C_{82}$ と $Sc_2@C_{84}$ の構造解析を実現しました。この研究成果はNature誌上に発表され、社会の関心を集め幾多の新聞紙上ににぎわすことになりました」。

X線のピンポイント構造計測 DVD記録のその場観察を可能に

様々なナノレベルの反応現象をより精緻に観察するために何が必要でしょうか？高田教授はピンポイントで動的に観測できる仕組みが必要だと考えます。「我々のグループでは、40ピコ秒・100ナノメートル

MEM/Rietveld法の開発により、 $Y@C_{82}$ の放射光粉末回折データを解析し、得られた電子密度分布からY原子が実際に C_{82} ケージに内包されている様子を直接観察することに世界で初めて成功しています。

という短い時間で局所的な観察ができるX線によるピンポイント構造計測システムの開発を行ってきました。これによりナノレベルの反応現象の解明が進むと考えます」。

ここで言う「ピンポイント」とは、①空間的に限られた領域②時間的に限られた領域③デバイスの動作状態でのその場観察を含む様々な環境下であることを意味します。つまり、短時間・極小空間・極限環境(強光励起下、電場下、高圧下、デバイスの動作時など)、そのすべてを同時に満たす構造計測技術を指します。SPRING-8の高輝度放射光源を最大限に活用し、ナノ物質・材料の研究・開発分野におけるさまざまな環境下での動的応答の構造評価手法として開発が進められています。

「この計測システムは、DVD/RAMの光記録における結晶-アモルファス高速相変化の可視化にも応用されています。アモルファス相は室温では数10年以上も安定であるという優れたメモリ特性を有することからDVD-RAMの基本材料として使われてきましたが、その速度、とくに消去速度を支配する因子は原子レベルでは明らかにされていませんでした。DVDは情報の記録再生、書き換えを、結晶→液体→アモルファス→結晶の相変化のサイクルを繰り返すことにより実現しています」。

不明だったDVD-RAMの反応現象を、X線のピンポイント構造計測により精緻に観察することが可能になりました。アモルファスの構造は、得られたデータに対して逆モンテカルロ法と呼ばれるコンピュータシミュレーションを適用して3次元構造を決定し、詳細な解析を実現しています。

「X線のピンポイント構造計測システムは、このような局所的で高速度の反応の解明の可能性を広げると期待されています。さらに高精度時分割データの測定により、ガス吸着現象、光誘起現象などの電子密度レベルでの機構解明に挑戦しています」。

反応現象を鮮明に捉えるためには時間と場所でピンポイントに観測できる計測技術が必要になります。40ピコ秒・100ナノメートルというピンポイントな計測技術を開発したことにより、DVD/RAMの光記録の瞬間を可視化し、原子レベルでの超高速の相変化現象の解明に成功しています。

TERM INFORMATION

放射光

リング状に電磁石を並べた加速器で、電子を光のスピード近くまで加速し、その中で電子の運動の向きを曲げるときに電子から非常に強い光が発せられる。このX線の光を放射光と呼ぶ。その明るさは太陽の10億倍にもおぼろ、強い指向性を持つ。この放射光を発生させるための放射光施設が、世界中に50近く建設されている。日本では世界最大の放射光実験施設スプリングエイトのほか9つの施設が稼働中。

マキシマムエントロピー法

1948年、米国の数学者シャノンが創成した情報理論。曖昧さの指標を情報エントロピー概念で定義することで、初めて、情報という考え方を数量として扱えるようにしたもの。この考え方は、画像の再構成や信号ノイズの除去など、不完全な情報を扱う技術に広く応用されている。

Smart Crystallography

Crystallography(結晶学)は様々な物質やタンパク質の結晶中の原子の配列を明らかにしてきた。その後、放射光などの明るいX線、マキシマムエントロピー法など登場により、原子の配列だけでなく、物質の機能を担う電子の分布を観察できるように進化した先端的な結晶学。

MEM/Rietveld法

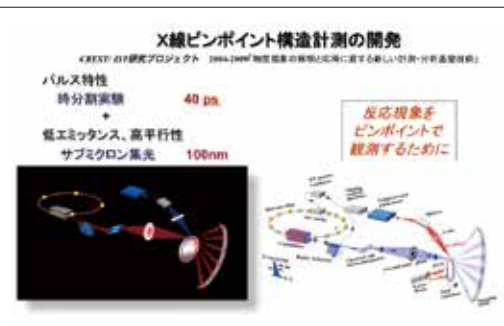
マキシマムエントロピー法(MEM)を結晶学に適用して、結晶の中の電子の分布を明らかにするための方法。微量の結晶粉末にX線をあてて測定したデータを用いるため、粉末X線データを解析する方法、Rietveld法と組み合わせ電子密度を可視化する方法。

フラーレン分子

1985年、英国の科学者ハロルド・クロトー、米国の科学者リチャード・スモーリー、ロバート・カールらによって初めて発見された60個の炭素原子がサッカーボール型に並んで形作る籠状の分子。この発見により、三人は、1996年度のノーベル化学賞を受賞。その後、多彩な形状をした籠状の分子が次々と発見された。六角形と五角形を組み合わせて作るドーム状の建築で知られる建築家バックミンスター・フラーの名前をとってフラーレン分子と総称される。

高速相変化現象

物質の原子配列が、規則正しく並び結晶相と不規則なアモルファス相の間で、変化する現象。相変化がナノ秒の高速で行われる材料がDVDの光記録メディアなどに使われている。



日本が有する世界最大の放射光施設SPring-8が貢献した産業技術や製品。学术研究のみならず産業技術開発を支える重要な先端基盤施設であることは、これらの数々の成果により実証され、国際的な共通認識となっています。



放射光の可能性が描く未来地図 東北放射光施設(SLiT-J)のチャレンジ

イノベーションを生み出す放射光施設 世界的に広がる建設ラッシュ

高田教授が長年にわたり関わってきたSPring-8。利用者14,000人/年、産業利用20%（産学利用はそれを上回る）、利用企業約180社2,600人、投資企業約50社という高い利用度が示すように、世界最高性能の放射光を発生することができる大型の研究施設として利用されてきました。SPring-8がけん引してきた放射光施設は、さらに「より高輝度へ、より低エミッタンスへ、ピコ秒パルス、より高エネルギーへ」というスローガンのもと、世界的な開発競争が激化しています。

「国家レベルの戦略的な研究施設として運営される大型放射光施設は、スイスのSLS、フランスのSOLEIL、英国のDIAMOND、中国上海のSSRF、オーストラリアのVICTORIA、スペインのALBAなど、3GeVクラスの高輝度光源、とくに、リング型光源の建設が積極的に行われています。さらに台湾のTPS、米国のNLS-II、スウェーデンのMAX-VIの計画も進行中であり、中型リング光源の建設ラッシュと言えます」。

この建設ラッシュの理由は、物質・材料、生命・バイオ、エレクトロニクス、エネルギーなど、広範な分野における新たなイノベ-

ションを生み出すために不可欠な「最先端解析ツール」として、先端リング型光源が認知されたからだといえます。今では多様な課題に対する利用ニーズに、一度に多数の機会を提供できる研究施設としての認識が、世界の常識になっています。

「それに対し国内では、先端高輝度軟X線光源として軟X線ナノアプリケーション利用環境の整備が大幅に遅れている、大型放射光施設が関東および関西に集中している、などの問題があります。この状況を放置すれば、我が国のナノの国際競争力低下を招くことは必至です。このような状況の中で、今我々が進めているのが、東北放射光施設(SLiT-J)プロジェクトです」と高田教授は力説します。

国際競争力の回復を目指し 東北放射光施設(SLiT-J)の建設へ

「我々が進める東北放射光施設は、高輝度軟X線のための最先端施設です。硬X線領域に重点を置いている既存の放射光施設(SPring-8、SPring-8IIなど)では難しい様々な研究テーマを実施することができます」と語る高田教授。

東北放射光施設はX線から真空紫外領域に至る幅広いスペクトル領域をカバーする光源であり、SPring-8と相互補完し



世界中に3GeVクラスの先端リング型光源の建設が積極的に行われています。スイス、フランス、英国、さらに台湾のTPS、米国のNLS-IIは共用が始まり、スウェーデンのMAX-VIの建設も順調に進行中で、それぞれ産業活用を目指しています。

自分で撮った写真をもとに、クリスマスカードやゲーティングカードに

20代からカメラが趣味ですね。カメラ自体も好きですし、撮ることも好きです。昔は撮った写真を現像まで自分でするほど、徹底していました。海外に行くとフォトジェニックな風景や空気感が魅力なので必ずカメラを持っていきます。仲の良い研究者の家族の写真を撮って、大切な思い出にもしています。

自分で撮った写真をもとにゲーティングカードを作るということも「まめ」にやっています。その当時に思い出して自分自身楽しいひとときですし、送った方にも喜んでもらっています。



TERM INFORMATION

低エミッタンス

放射光は、電子がリング状の加速器の中を光に近いスピードで運動するときに発生する強力なX線。放射光の光源の大きさを小さくするため、電子の加速器の中での運動の発散を低く抑えること。

中型リング光源

加速器の周長が300m程度の放射光施設のことを指す。

軽元素

水素、ヘリウム、リチウム、酸素、窒素、リン、炭素等の原子量の小さい元素のこと。

ビームライン

放射光施設などで、取り出した光を用いて実験を行うための、光学装置や、計測装置が設置してある、実験室。



東北放射光施設(SLiT-J)はカーボン、窒素、リン、硫黄、カルシウムなど私たちの生活を支える必須元素である「軽元素」をターゲットにします。スマートアグリ、スマートセラピー、スマートグリッドなどのスマートテクノロジーを先導することが期待されています。

況変化の中でも、持続的に高い生産性を保つ世界初の「新時代中型高輝度放射光施設」としていきたいと考えています」。科学技術立国らしい新たなイノベーションの創出につなげていきたいと、高田教授は語ります。

つつ、世界トップクラスにある我が国のこの分野での地位をさらに向上させるものと期待されています。

高輝度軟X線を活用するとどのような研究ができるようになるかという、例えば、「新機能炭素材料・デバイスの開発」「細胞内部の三次元的かつ経時的変化の直接観察」「たんぱく質の酵素反応解析」「光電子顕微鏡(PEEM)を用いた酸素・窒素を含む材料の磁区構造解析」「軽元素の高分解能原子分子分光」などの研究テーマがあげられます。

「東北放射光が主にターゲットとするのが軽元素です。軽元素はカーボン、窒素、リン、硫黄、カルシウムなど、私たちの生活を支え、農業にも食料産業にも関係してくる必須元素で、ここから未来へのイノベーションが生まれてくるものと期待しています。スマートアグリ、スマートセラピー、スマートグリッドなどのスマートテクノロジーを先導していきたいと考えています」。

「徹底的な省エネルギー技術の追求により、今後の国際的なエネルギー資源状

復興を超えて、東北を世界の研究開発の中心に創り変える

「放射光施設の建設は、大企業から町工場までの総力戦です。東北放射光施設(SLiT-J)は、建設企業、システム開発企業、計測サービス企業、学術研究者、大学、研究機関、プロジェクトが基金を拠出して、イノベーション・エコシステムの構築を目指します」。

10本の異なる計測手法のビームラインを設置。産学連合体方式でコウリション(連合・合同)を形成し経営します。パートナー企業に成果を効率的にもたらすことを目指し、研究成果は、研究コミュニティや政府、産業界に公開・共有されます。これにより、さらに優秀な研究者を惹きつけ、絶えず新しい研究分野を先取りする好循環を生みだすことが期待されます。持続可能なイノベーションを創出できる「イノベーション・エコシステム」が産と学と施設の間で構築されます。

「東北放射光施設による経済波及効果は10年間で生産誘発額 3,000億円、誘発雇用者数は13,000人以上を想定しています。高輝度放射光を利用した産学連携プロジェクトの範囲は材料科学、生命科学から農水産業まで及んでおり、東北地方における既存産業の強化と、新産業の創成が期待されています」。

日本の技術の粋を集めて創る放射光施設は、学術研究と産業技術開発を支え、国際競争力を高める重要な研究開発の基盤施設です。東北放射光を通して高田教授は、東北で学んだ若者が、東北で世界を相手に働き、東北を誇りとする時代を創りたいと考えています。



利用企業、建設企業、システム開発企業、計測サービス企業、学術研究者、大学、研究機関、プロジェクトが基金を拠出。産学による実用化加速から、イノベーション・リーダーの育成まで、イノベーション・エコシステムの構築を目指します。

FOREFRONT REVIEW

歴史は浅いものの、ナノスケールの微細構造制御により、単体では発現しない物性や機能を持つ新規材料として注目が高まっている高分子材料。陣内研究室では、ブロック共重合体の自己組織化や無機充填物との複合化などのプロセス開発と、新規材料が持つマクロ物性の発現機構を解析するための手法開発を行っています。





高分子による自己組織化の 電子顕微鏡による構造研究

時代とともに我々の暮らしで使われる材料は変わってきました。BC 8000年代には土器・陶器などのセラミクスが使われ、BC1500年あたりには青銅器などの金属材料、時代が進むに連れ、皮革・天然繊維・紙・樹脂というように進化してきました。1926年シュタウディングが高分子説を発表した後、20世紀中盤から合成繊維・合成樹脂・合成ゴム、ソフトマター（ゲル・分子組織体・液晶・膜）など、高分子を使った材料が急速に発展してきました。そして現在、高分子短繊維系繊維強化プラスチック、ポリマーアロイ、ブロック共重合体、ナノコンポジットなど多様に展開し、構造材料だけでなく機能材料としても使われるようになってきました。

陣内研究室では、これら高分子材料の中でも（後述する）ブロック共重合体に注目しています。溶媒成膜法という簡単な方法で生み出されるブロック共重合体の自己組織化構造は、ナノテクノロジーのボトムアッププロセスにおいて非常に重要であり、同時に、高分子統計力学の本質的現象の一つでもあります。1980年代に最も単純な2成分ブロック共重合体の相挙動が明らかにされ、その後、スター型・ブラシ型などの興味深い形態を持つ分子、また、3種類以上の構成分子からなる多成分ブロック共重合体が重合されるようになり、現在はこれらの相挙動・相分離構造に興味の中心が移ってきています。さらに、ブロック共重合体が形成するナノ構造に金属ナノ粒子を含有させ、特異な機能を発現させるというような研究も盛んになってきています。

このようなブロック共重合体の自己組織化によって生まれる新規材料が持つマクロ物性の発現機構を理解するためには、その3次元構造をナノスケールで定量的に解析することが必要不可欠です。陣内研究室では、自己組織化の仕組みを観察する手法として、透過型電子顕微鏡法（TEM）と計算機トモグラフィー（CT）を組み合わせ、材料の内部構造をナノスケールで3次元可視化できる「電子線トモグラフィ法」の開発を行っています。材料の変形状態下や水を含む環境下など様々な環境下での観察技術の開発も行っており、環境下・動的・3次元構造観察を可能にし、より実際の現場で活用できる技術の開発を進めています。

多元物質科学研究所
自己組織化高分子材料研究分野 教授

陣内 浩司

JINNAI, Hiroshi

1965年、大阪生まれ。京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。京都工芸繊維大学講師、同准教授を経て、科学技術振興機構高次元ソフト界面プロジェクト技術参事、九州大学先端物質化学研究所特任教授、2015年より現職。2009年より2012まで東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR)連携教授(兼任)。「電子顕微鏡の基礎研究と開発の業績」でノーベル物理学賞を受けたエルンスト・ルスカ博士の名を冠しドイツ顕微鏡学会から授与される国際賞「Ernst-Ruska-Preis」を2007年に日本人として初めて受賞。米国物理学会フェロー。

<http://etomo.tagen.tohoku.ac.jp/php/jinnailab/>

陣内研究室では、高分子の中でもブロック共重合体に注目しています。ブロック共重合体とは化学が創り出した全く新しい物理的性質を示す高分子で、ナノテクノロジーへの応用の研究が加速されています。



ブロック共重合体の自己組織化から新規機能材料の創成へ

ブロック比率を数%変えるだけで自在に未知のナノ構造を創成

ナノテクノロジーにはトップダウンとボトムアップという基本的な考え方があります。トップダウンは、物体を微細加工によりナノスケールレベルにまで持っていく技術。それに対してボトムアップというのは、原子や分子を組み立ててナノスケールの物質を作り出す技術です。ボトムアップによると、トップダウンでは難しい微細な物質を作り出すことが可能ということで現在注目されている技術です。

「2種類以上の高分子鎖が1本の鎖の

中に結合している分子をブロック共重合体といいます。このブロック共重合体の自己組織化構造は、ナノテクノロジーのボトムアッププロセスにおいて非常に重要であると考えています。溶媒成膜法という簡単な方法でナノスケールの周期的な自己組織構造を作ることができます」と語る陣内教授。

ブロック共重合体を有機溶媒に溶解し、溶媒を蒸発させるという溶媒成膜法。この手法を使い簡単にナノスケールの3次元構造をつくり上げることができるといいます。面白いのは、各成分の体積分率(ブ

ロック比率)やその間の斥力相互作用を数%変えるだけで、全く新しい3次元ナノ構造が自己組織化することです。

「これまでは2成分の高分子からなるダイブロック共重合体から生まれる3次元ナノ構造には球とシリンダーとラメラの3つしか知られていなかったのですが、我々の研究で、2つのネットワークが入り子に入っているナノスケールの3次元構造(ダブル・ジャイロイド)が生まれることがわかりました」。

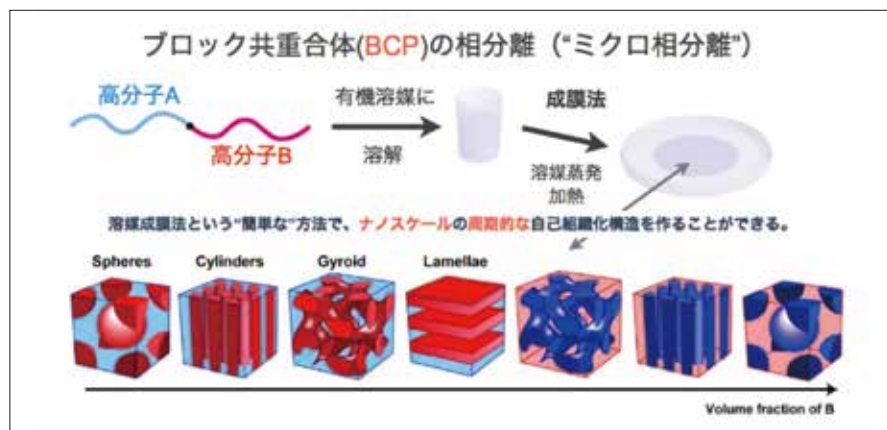
この新しい構造はネットワークの部分だけを取り除けば、細菌除去フィルタや最先端材料などいろいろな用途に使える可能性があります。

3成分のトリブロック共重合体で作る特異で複雑な3次元ナノ構造

ダイブロックの共重合体で、これだけのユニークな自己組織化を行うのであれば、成分が3つになるとどうなるのでしょうか？

「3成分のトリブロック共重合体はダイブロック共重合体とは比較にならないほど多種多様で複雑な構造が発現すると予想されます」と語るように、陣内研究室では、PS(ポリスチレン)、PB(ポリブタジエン)、PMMA(ポリメチルクリル酸メチル樹脂)のトリブロック共重合体から、2重らせん構造が発現することを発見しました。

「この構造は、PMMA成分のマトリック



溶媒成膜法により、ブロック共重合体は相分離を起こし、ナノスケールの周期的な自己組織化構造を作り出します。ブロック比率により、球とシリンダーとラメラという構造が生まれます。

時速200kmでコーナーに入る。最高にスリリングですね!

大学のころ自動車部にいたのですが、それ以来サーキットを走るなどして、車を自在に操ることができるになりたいと思っています。ランチアというイタリアのメーカーのオフ会に出席する機会がありますが、世界ラリー選手権に出場した実車を間近に見ることができると興奮しますね。いつかはこういう車に乗りたくて夢みながら...

最近義理の弟と関西で行われたラリーに出場しました。途中まで一位だったのですが、最後に逆転されて悔しい思いをしました。またチャレンジして、次は勝ちたいと思っています。

仙台には「スポーツランドSUGO」という国際格式の立派なレーシングコースがあります。時速200kmからブレーキングしてコーナーに入る興奮。日頃のストレスを晴らす良い機会です。



MY FAVORITE



TERM INFORMATION

ブロック共重合体

複数のモノマー（繰り返し構造単位）が重合反応に関与した結果として生じるポリマーを共重合体（コポリマー）といい、単独のモノマーからなるホモポリマーと区別される。共重合体のうち、化学構造が異なる複数のポリマー鎖が線状に結合したものをブロックコポリマー（ブロック共重合体）という。その他、化学構造が異なる複数のポリマー鎖がポリマー鎖の側鎖として結合しているグラフト共重合体などもある。

一番簡単な構造を持つブロック共重合体は、高分子Aと高分子Bが共有結合で連結した「ABダイブロック共重合体」であり、この分子はAB間の偏析により相分離構造を形成する。相分離の際、AB間の結合のため凝集相の広がりは制限され、熱力学的平衡状態では球状、シリンダー状、ダブル・ジャイロイド状、ラメラなどのドメイン形態を持つ「マイクロ相分離構造」と呼ばれるnmオーダーの周期構造を形成することが知られている。

自己組織化

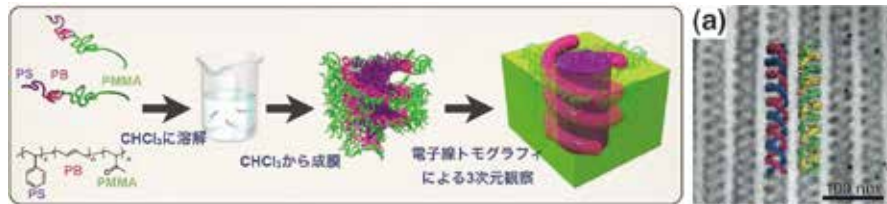
物質（原子や分子等）が直接人為操作によらず、自発的に秩序構造を形成する現象。必然であれ偶然であれ、形成した秩序構造は安定であり、簡単には崩壊したり、元の状態に戻ったりしない。自然界に普遍的にある現象であり、細胞を取り囲む脂質二分子膜の形成やタンパク質のフォールディングも自己組織化である。

ブロック比率とマイクロ相分離構造

ダイブロック共重合体が自己組織化で作成されるマイクロ相分離構造は、上記のように（基本的に）4つのパターンがある。強い偏析下で相分離した一本のABダイブロック共重合体の界面は、その体積分率（ブロック比率）に依存した界面曲率を持つ。AとBの体積分率が等しい場合（対称の場合）、界面の曲率は0となり平面となる。この時に最も安定な構造は平面の界面を持つラメラ状マイクロ相分離構造である。ブロック比率が非対称となると、ブロック共重合体分子を空間中に均一に充填しなくてはならないという制約のもと、ブロック鎖の形状と界面に生じるエネルギーの競合が起こり、曲面を界面とするマイクロ相分離構造の方が安定となる。その結果、ダブル・ジャイロイド状・シリンダー状などのラメラとは異なった形態のマイクロ相分離構造が出現する。

電磁波吸収体

入射した電磁波（マイクロ波、ラジオ波等）を、熱エネルギーに変換することで吸収し、反射波を減少させる物質。電磁波の吸収原理はいくつかあるが、ここでは入射した電磁波によって発生する電流を材料内部の抵抗によって吸収するものを指す。



PS（ポリスチレン）、PB（ポリブタジエン）、PMMA（ポリメチルアクリル酸メチル樹脂）のABCトリブロック共重合体から、2重らせん構造が発現することを発見しました。右巻きと左巻きの2重のらせん構造が共存しています。

スの中に、PS成分により成るシリンダーが六方格子状に充填し、このPSシリンダーの周りにPB成分からなる2重らせん相が存在するという非常に特異かつ興味深い構造です。2重らせん構造は自己組織化により形成するため、らせんピッチや直径などは材料のどこでも揃っています。私たちはブロック共重合体が人為を加えなくとも自然に規則性の高いナノ構造を作り出すメカニズムに興味を持っています。

さらに、研究室ではこの「2重らせんシリンダー構造」をベースとして、薄膜中でこの構造を基板に対して完全に垂直配向させる実験も行っています。その結果、らせん構造の垂直配向状態や基板に水平な配向状態（水平方向）を再現よく実現できることが分かりました。「この2重らせん構造のピッチや配向を精密に制御できれば工業的なインパクトは大きいですし、ナノ構造の中での高分子のバックギングなど学術的にも非常に興味深いものです」。

この2重らせん構造は高性能ウイルスろ過膜やソフトナノクッション材料・高周波電磁波吸収体などの新規機能材料への活用が期待されています。現在研究室ではその工業的な制御を可能にする基礎研究を進めています。

この構造がなぜ、どのように生じるのか？ 分子論的に明らかにすることが「学理」

上記のように数%のブロック比によって、違う構造が自己組織化されるブロック共重合体。陣内教授は、分子が「何を考えて3次元構造を作っているのか？」が分かれば全く新しいナノ構造を作りだすことも可能だと言います。

「まるで分子に“考え”があるかのように自在にそして特異な規則構造を自己組織化してくれます。きっちりとブロック共重

合体を分子設計すれば、さらに新しい構造体を生み出すことができると考えています。そのために必要なことは、非常に複雑な構造が、なぜ、どのように生じるのか？ということ分子論的に明らかにすることです。それが研究室に与えられたミッションでありモチベーションです」と陣内教授は強調します。

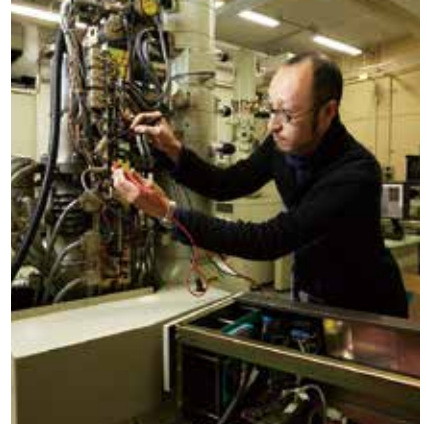
この分子論的解明を行う際に問題となるのは、3次元ナノ構造をいかに適切に詳しく観察できるかということです。これまでナノ構造の解析は3次元構造の2次元透過像情報から元の3次元構造を想像するというカタチで行ってきましたが、この方法では真の3次元構造を実験的に確定することができません。

「透過型電子顕微鏡（TEM）で得られる2次元透過像や電子線回折パターンから真の3次元形態を正確に把握することは非常に困難であり、その上材料が異方性を持つとなれば、材料の3次元形態と特性を関連づけることはほとんど不可能です。また、多くの実用材料は多元素からなる多層膜や多結晶といった複雑な形態や構造を有していますので、ナノスケールの空間分解能で材料内部の複雑な立体的情報を解析する手法が望まれています」。



複雑な構造が、なぜ、どのように生じるのか？ポイントとなるのは、3次元ナノ構造をいかに適切に観察できるかということ。陣内研究室では、ナノスケールの空間分解能で内部の複雑な立体的情報を解析する手法を追求してきました。

2次元透過像や電子線回折パターンから、真の3次元形態を正確に把握することは非常に困難。様々な方向からの投影画像を再構成するCTスキャンをヒントに、ナノレベルで内部の複雑な立体的情報を解析することが可能にする先端計測法を開発しています。



“百聞は一見に如かず” 環境下・動的・3次元構造観察へ

電子線トモグラフィーによる 3次元構造観察

単なる平面的な2次元情報からいかに3次元構造を類推するかではなく、よりリアルなカタチで3次元の構造を捉えるか?そこで開発されたのが、TEMと計算機トモグラフィー(CT)を組み合わせ、材料の内部構造をナノスケールで3次元可視化できる電子線トモグラフィー(Transmission Electron Microtomography, TEMT)です。

「仕組みは、人間のいろんな方向から

の投影画像を撮って断面を再構成するCTスキャンと一緒に。試料を傾斜させながら、連続的にTEM像を撮影し、得られた一連の連続傾斜像からその切片の3次元情報を再構成します」。

この電子線トモグラフィーにより、ナノレベルで内部の複雑な立体的情報を解析することが可能になりました。それにより、具体的な工業製品を評価するという活用事例も生まれています。タイヤのゴムの性能評価もその一例です。

「カーボンブラックやシリカ粒子などの充填剤を配合したゴム

材料が補強性などの点からタイヤに使用されてきましたが、ゴム材料中の充填剤の分散性はゴム強度だけでなくグリップ性能や耐磨耗などの特性に

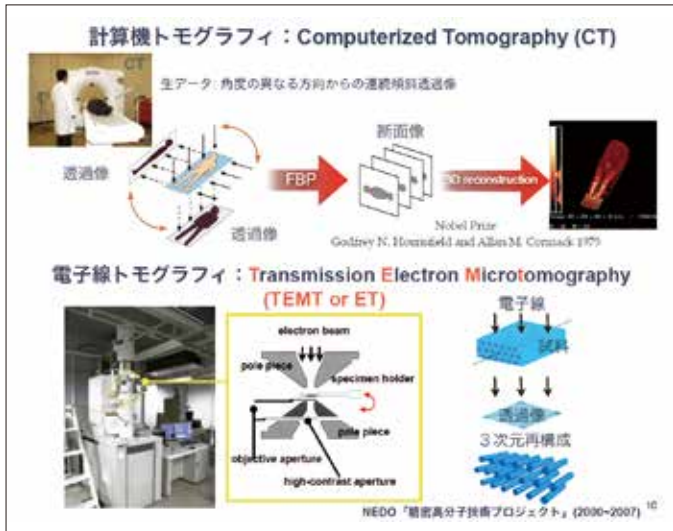
新たに開発した電子線トモグラフィーによる3次元構造観察。試料を傾斜させて連続的にTEM像や走査TEM像を撮影し、得られた一連のデータから3次元情報を再構成します。

大きく影響します。ですから、充填剤の分散状態を正確に観察できる方法の確立が望まれていました。そこで威力を発揮したのが、電子線トモグラフィーです」。

電子線トモグラフィーで定量的な3次元画像の取得を行い、ゴム材料中の各部材の空間配置をナノサイズで最適化する「3次元ナノ階層構造制御技術」を開発。超微細の架橋系網目分布(nmスケール)・充填剤の分布(数百nmスケール)・ゴムブレンドの形態(μm スケール)という様々な階層の3次元構造を制御・解析することで、同時に、諸物性計測の基礎となる画像処理アルゴリズムの開発も行いました。「力学的な解析を行うことによりゴム材料・構造の最適化を行うことが可能となりました。結果的にエネルギーロス低減、耐磨耗性能向上させることに成功しています」。

計算方法自体が正しいかどうか? 力学特性をリアルに測定

「このように、3次元構造情報をもとに計算科学によりコンピュータで材料の力学特性を予想します。しかし、突き詰めると本当に計算科学(有限要素法)は正しいのかという疑問も出てきます。この問題を解決したいという想いも持つようになりました」と語る陣内教授。

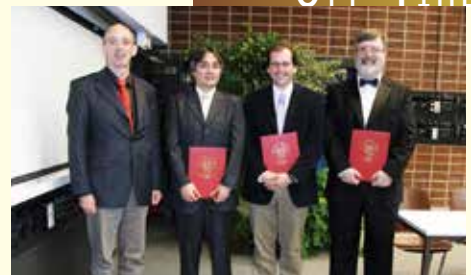


海外の研究者とも話ができるような、文化・素養をつけたいもの

オフタイムには、映画を観ることが多いです。ホラー以外はどんなものも観ますし、映画館にもよく行きます。

歴史には昔から興味があり、お城めぐりもよくしました。最も興味深いのはやはり戦国時代ですが、明治から昭和の歴史なども勉強する必要を強く感じます。海外に行くと研究者同士で歴史の話をする機会もあります。その時、自国の歴史について話ができないというのは恥ずかしいことです。グローバルな視点を持つことの重要性が叫ばれていますが、まず自国のアイデンティティをしっかりと見つめる必要があるのではないのでしょうか。

OFF TIME



エルンストルスカ賞授賞式にて、ドイツ・イギリス・アメリカからの受賞者とともに。

電子線トモグラフィー

nmスケールの構造の透過像を観察することのできる透過型電子顕微鏡(TEM)に計算機トモグラフィ(CT)を組み合わせ、nmスケールでの3次元構造の可視化を可能とする最先端の顕微鏡法。医用に用いられるCTスキャンと原理的には同じ。本手法の萌芽は1980年代後半に遡るが、本格的な発展は計算機のメモリと記憶媒体が発達した2000年ごろから。試料をTEM内で傾斜させながら数十枚の透過像を撮影し、CTに基づいて再構成を行う。近年、原子分解能での3次元可視化が可能となっている。

有限要素法

複雑な形状や性質を持つ物体を、単純な形状・性質を持つ小部分(要素)に分割し、各々の要素を方程式で近似表現し組み合わせた後、全ての方程式が成立する解を求めることで全体の性質を予測する方法。解析的に解くことが難しい偏微分方程式を解く際に用いられる数値解析手法の一つで、構造力学を含む工学の多くの分野で用いられる。

3次元構造情報

電子線トモグラフィーなどの3次元可視化法を用いると、当然のことながら、得られるデータは物質の不均一構造(ブロック共重合体のマイクロ相分離構造はその一つ)の3次元形態を表したものとなる。この3次元データから構造を特徴づける物理量を計測し、その量を(構造を含む)材料の諸特性と関連づけることでマテリアルの性質を理解することが可能となる。計測の対象となる構造情報は材料の種類により異なるが、本文で取り上げた充填材配合ゴム材料では、充填材の体積分率・表面積・分散状態・連結状態などが重要となる。また、ブロック共重合体のマイクロ相分離構造の理解のためには、界面の曲率分布が重要となる。このような3次元データの解析法は、まだまだ発展途上であり、今後の進展が期待される。

環境下・動的・3次元構造観察

通常、電子顕微鏡観察では試料は超高真空下に置かれる。そのため、例えば水を含む試料のナノ観察はこれまで非常に難しかった。近年、顕微鏡の改良や特殊な試料ホルダーの導入により、含水状態・溶液中・ガス雰囲気下にある試料の電子顕微鏡観察が可能となってきている。この他、試料に変形させた状態や加熱した状態でのナノ観察も一般的になってきた。このような「環境下」での電子顕微鏡観察は、まだ2次元的イメージングに留まっているのが現状であり、まずは、電子線トモグラフィー的な手法を取り入れた環境下での3次元イメージングの開発が急務である。本文でも紹介したように材料の変形時の「動的な構造変化」は、材料設計の上で非常に重要な知見であるから、このような構造変化を3次元的に捉えることはナノイメージングの究極の目標である。

3次元構造観察』の方向に進むと考えています」。

環境下・動的・3次元構造観察へ
実用材料の研究で社会貢献

「実用材料の研究も行い、社会にも貢献したいと思っています。エネルギー分野でも3次元構造観察が有効になると考えています」と語る陣内教授。

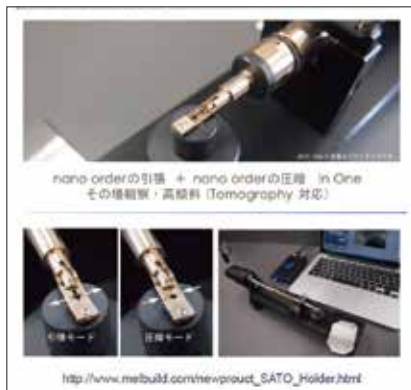
例えば、燃料電池の電極の構造観察もそのひとつ。白金粒子と炭素担持体からなる燃料電池電極は、燃料電池の性能の鍵を握る重要な要素です。「燃料電池の最大の問題の一つは、電極の劣化です。劣化機構の解明のためには、電極の詳細な構造観察が必要であり、電子線トモグラフィーにより3次元構造を観察しています」。

性能が良いと言われる電極を構造観察した結果、白金ナノ粒子が炭素担持体の表面に付着しているというそれまでの常識に反して、白金ナノ粒子の一部が炭素担持体の内部に存在することが分かりました。観察した電極の優れた電気化学特性を考慮に入れると、この結果は、炭素担持体の内部にある白金粒子でも触媒反応をすることを示唆しています。内部に入っている白金ナノ粒子は劣化しにくいので、この知見は電極の長寿命化の可能性を広げられることを示しています。

「今回の結果から分かるように、ナノレベルの実環境下での構造解析ができれば、エネルギー問題に貢献できるような成果が生まれるかも知れません。粒子をどのように配列するとエネルギー効率が良くなるかなどの基礎の構造解明が研究室の使命です」。



実際に使われている条件で材料のナノ構造を可視化していくことの必要性。「環境下・動的・3次元構造観察」を実現化し、新しい実用材料の研究開発を行い、社会にも貢献したいと考えています。



計算方法自体が正しいかということを実験するために、リアルに引っ張り実験ができるサンプルホルダーを開発。電子顕微鏡の中で力学特性を測定し、計算科学が正しいか判断しています。

物体を構成する物質の力学的特性は「構成方程式」という数理的表現で表され、この方程式が正しいかどうかを検証する方法はありませんでした。しかし、「コンピュータの計算ばかりに頼っているのでは無く、リアルに力学特性を調べたい。この想いで、特殊な電子顕微鏡用の試料ホルダーを開発し、試料を延伸しながら3次元ナノ観察を実施することを考えています」と陣内教授は言います。

独自に開発したサンプルホルダーは、試料の引っ張り実験を行いながら、試料を傾斜させてトモグラフィーを行うことで、変形途中の3次元構造の観察が可能となります。変形状態での3次元構造を計算機が予想する構造と比べることで、初めて計算科学が正しいかどうか検証できるのです。ナノスケールの引っ張り実験は技術的に難しいですが、いろいろ試行錯誤しながら解決を試みています。計算科学と実験科学のコラボは、今後の材料科学においてとても重要になると考えられます。「従来2次元でしか構造解析ができなかった引っ張り実験などが、我々の研究で3次元でもできるようになっており、ここに大きな意義があると自負しています」。

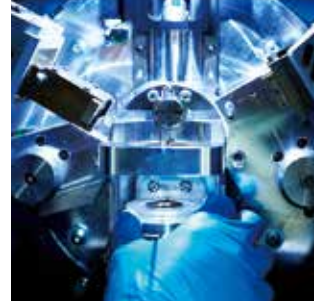
陣内研究室では、さらにサンプルホルダーに気体や液体を充填して傾斜実験を行うような、様々な環境下での動的な実験を行い、よりリアルなナノスケールでの構造解析したいと考えています。

「実際に材料が使われている条件下でナノ構造を3次元的に可視化していくことが大切です。これからは『環境下・動的・



FOREFRONT REVIEW

「金属リサイクル」という言葉をご存知でしょうか。柴田研究室では、非鉄金属製錬を土台に不要になった金属製品を国内で回収・処理し、再び金属素材として提供することを目指しています。「金属資源循環システム」の構築こそが責務」。二次原料の種類に応じた様々なアプローチで、課題解決型研究や新規プロセス技術開発を行います。



非鉄金属製錬技術を駆使した 未来のための金属資源循環への挑戦

銅や鉛、亜鉛といったベースメタルを中心に、マイナーメタルや貴金属など世の中の金属の大半を生成している非鉄製錬業ですが、日本は原料となる鉱石を採掘する鉱山がほとんど閉山しており、原料の入手を輸入に頼らなければならない状態にあります。また世界的に見ても、中国の進出や鉱物資源の低品位化により資源確保が難しいのが現状です。

一方、今後は人口増加と相俟って、携帯電話やPC、蓄電設備、ハイブリッド自動車や電気自動車など、電気・電子機器の利用が加速的に増加することが予想されます。金属資源を継続的に確保していくため、このように様々な製品に使用されている金属を循環利用していく必要があることは、言うまでもありません。

柴田研究室では非鉄製錬技術を基盤とした金属資源循環システムの実現に向けて研究・開発を行っています。さらに学術的な新機軸として「金属資源循環工学」を提唱。金属元素を含む多種多様な二次資源の前処理から主要製錬技術、製錬副産物の処理、環境負荷元素の安定固定化など、金属資源循環に向けた研究・技術開発に関して、課題解決型研究や新規プロセス技術開発など包括的に取り組んでいます。

<研究テーマ>

- ・海底鉱物資源の乾式製錬プロセスの開発
- ・廃電気・電子機器中の臭素系難燃プラスチックの熱分解機構の解明と金属分の臭素化揮発反応に関する研究
- ・銅スラグからのマグネタイトの析出と分離による鉄源化に関する研究
- ・バグフィルタにおける脱ハロゲン機構に関する基礎的研究
- ・スコロダイト合成によるヒ素の安定固定化技術の開発
- ・溶媒抽出法等を用いたレアアース回収技術開発の基礎研究
- ・超音波照射下のマイクロバブルの挙動を利用した新規物理洗浄法
- ・小径ショット状アノードを用いた新規的な銅電解精製技術の開発など

多元物質科学研究所
サステナブル理工学研究センター
金属資源循環システム研究分野 教授

柴田 悦郎

SHIBATA, Etsuro

1971年、福岡県生まれ。九州大学工学部卒業。博士(工学)。1999年東北大学素材工学研究所助手。以降、同大学多元物質科学研究所助手、助教、准教授を経て今に至る。資源・素材学会、日本鉄鋼協会、日本金属学会に所属。第29回資源・素材学会奨励賞、原田研究奨励賞、トーキン科学技術振興財団奨励賞受賞。

http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/e_shibata/index.html

製錬過程で発生する中間生成物にはマイナーメタルや貴金属が濃縮されているが、同時にヒ素やカドミウム、水銀といった環境負荷元素を含む場合もある。また回収できない活性金属などをどのように回収していくかも重要な研究テーマのひとつになっている。



資源循環型社会の実現と環境負荷元素の制御を目指して

鉱物資源確保の難しさ 資源循環システムで解消

資源そのものの低品位化による影響は著しく、成熟した文明・文化が今後も持続するとしたら、鉱物資源から新たな金属を生成することはますます難しくなるでしょう」

柴田悦郎教授は非鉄製錬業が置かれている現状について、資源確保の難しさを指摘します。特に日本は年々環境規制が厳しくなっており、それに伴い環境負荷元素を含む輸入鉱物の扱いが難しくなっていることも、問題に拍車をかけています。

日本が誇るハイテク産業には欠かせない金属資源。その原料をどのように確保していけばよいのでしょうか。

「廃金属製品を回収し、二次原料としてさらに製錬することで、金属資源を継続的に他産業に供給していく。そうした“金属資源循環システム”の構築が求められるでしょう」。

廃金属製品だけでなく金属製錬ダストや排水スラッジなどの産業廃棄物も、二次原料としての可能性を持っています。例えば関連するテーマとして、銅製錬で発

生するスラグ中に酸化鉄 FeO が含まれていることに着目し、銅製錬スラグから鉄鋼製錬の原料になるマグネタイトを抽出する研究が挙げられます。

非鉄製錬には金属資源循環システムの実現を通じ、資源循環型社会の一翼を担うという重要な役割があるのです。

さらにもうひとつ重要な役割として、環境負荷元素の管理制御が挙げられます。現在問題となっている鉱物資源の低品位化に対応するため、従来の非鉄金属製錬技術を応用し、環境規制や社会状況に合わせて改良・開発。これにより、資源に含まれている環境に悪影響を及ぼす物質を安定固定化しつつ、目的の金属を抽出します。

二次原料の処理方法がシステム実現の鍵を握る

金属資源循環システムを実現する上で重要なのは、二次原料の処理の問題です。鉱石に含まれる不純物とはその種類も数も異なるため、不純物に応じた前処理の技術の開発、従来の製錬技術の改



鉱石以外の金属を含む二次原料には種々雑多なものがある。これらを、環境規制や社会状況に合わせて適した方法で処理するため、柴田教授は研究を続けている。

考えや人生観に影響を与えた読書体験

仙台に来ることになったとき、初めに思い浮かんだのが、支倉常長をモチーフにした主人公が出る、遠藤周作の時代小説『侍』でした。青葉山にある常長像を見たときは思わず感動してしまいました。

本を読むことがずっと好きだったんです。遠藤周作や隆慶一郎など、理系とは思えないようなものばかり読んでいました。学生時代に読んだ昭和を代表する禅僧・澤木興道の講話内容を著したものは、今の自分の考え方や人生観を形作っているかもしれません。本だけでなく映画も好きでよく見ましたが、若いころに良いものに出会えたことは、一生残る財産と思っています。



MY FAVORITE

TERM INFORMATION

非鉄金属製錬 (乾式製錬、湿式製錬、電解精錬)

いわゆる鉄以外の金属の製錬に関する総称。ここでは、特に銅、鉛、亜鉛製錬を指す。銅、鉛、亜鉛製錬では、高温を利用した乾式製錬技術、水溶液中での反応を利用した湿式製錬技術、電気化学反応を利用した電解精錬技術などを用いて、貴金属(Au、Ag、Pt、Pdなど)も含め、その他多数の金属(Se、Te、Ni、Sb、Bi、In、Gaなど)を回収している。

ミネラルプロセッシング

製錬に装入する鉱石の選鉱(破碎、浮選など)、いわゆる前処理技術の総称。現在、その技術はスクラップなどの二次原料の物理的な分離への応用が進められている。

環境負荷元素

砒素や水銀など環境中へ拡散すると環境汚染など環境に負荷を与える恐れがある元素。

金属製錬ダスト

金属を高温で乾式製錬する際に排ガス中から分離されたダスト。

廃水スラッジ

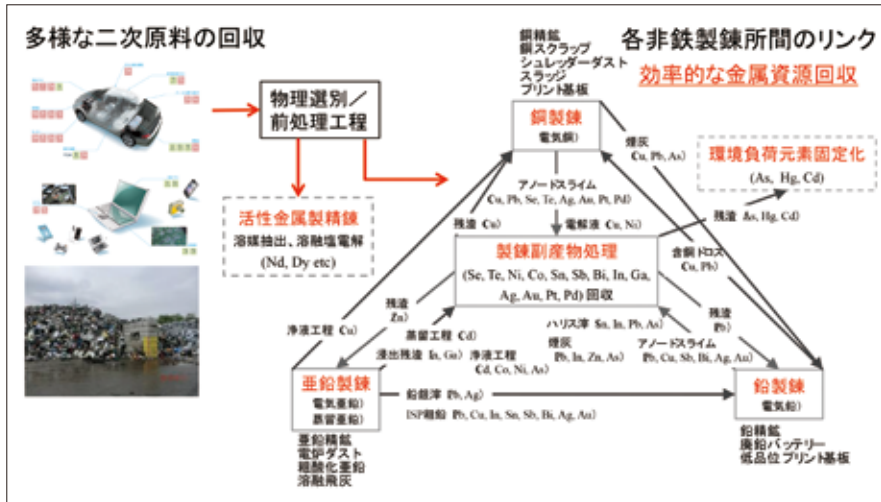
工場等で排出された廃水を処理する際に、発生する汚泥状のもの。重金属などを含有。

スラグ

金属を高温で乾式製錬する際に、不純物として分離された主に酸化物で形成されたもの。

製錬副産物(中間生成物)

金属製錬の際に副次的に発生するもの。例えば、銅、鉛、亜鉛製錬では貴金属やその他の貴重な金属が副産物中に濃縮される。



金属資源を効率的に回収するためには要素技術開発とともに金属資源循環システムの中心となる各非鉄製錬所間の有機的なつながりが重要になる。

良、中間生成物の種類の変化に伴う効率的な処理方法の開発などが必要になります。この問題について柴田教授は、「中間生成物にはマイナーメタルや貴金属が濃縮されているほか、非鉄製錬の中心をなす銅、鉛、亜鉛それぞれを含んでいます。そのため、銅、鉛、亜鉛の各製錬所間の有機的なつながりが必要になります。また中間生成物や製錬副産物の中には有価な金属だけでなく環境負荷元素を含む場合もあるため、これらを効率的に処理することに特化した施設や設備も非常に重要になってきます」と語り、研究の指針を提示します。

「金属資源循環工学」の確立と新たな基礎研究の積み重ね

従来の非鉄金属製錬技術には、物理選別技術も含めた「ミネラルプロセッシング」、高温で処理する「乾式製錬」、水溶液中で酸に溶かして処理する「湿式製錬」、水溶液中に電気を流して金属を析出させる「電解精錬」などがあります。二次原料処理の問題を解決するためにはこれらを応用し包括的に取り組まなければなりません。そこで柴田教授が提唱したのが「金属資源循環工学」の確立です。これにより二次原料による非鉄製錬を新たな工学の枠組みとして捉えることが可能になります。

「当分野は人材の枯渇が進んでおり、一昔に比べ今は大学での基礎研究の土

台がしっかりしたものではありません。そのため数少ない大学の人間が、非鉄製錬の現場で発生する様々な問題を洞察し、問題を引き起こす普遍的な因果関係を学問的な視点から解き明かす必要があります。これが、非鉄製錬研究の学術的な意義でもあります」

柴田研究室ではこのような考えに基づき、課題解決型・プロセス開発型研究として、金属製錬過程で起こる化学反応のメカニズムを解析し、解明してきました。より効率的かつ環境保全的な製錬プロセスの研究・開発を行っています。

「非鉄製錬業は、以前に比べれば研究者の数もぐっと少なくなりました。研究分野ではありますが、二次原料を利活用した金属資源循環システムの構築や環境負荷元素を安定固定化する技術の開発など、資源循環型社会の実現に向けて必要不可欠な分野であることは間違いありません」。



非鉄製錬は従来の枠組みを越えた包括的なアプローチが必要な分野で、研究テーマも多岐に渡る。現在は海底鉱物資源から金属を製錬する研究も行っている。

かつては亜硫酸や防錆剤としての用途があったヒ素。環境規制の強化によってそのような利用が不可能になってしまった一方、鉱、資源として利用される銅鉱石中のヒ素濃度は増加傾向にある。このような環境負荷元素を新しい方法で処理していくため、柴田教授は研究を続けている。



金属資源循環システムの構築は個々の包括的な研究で実を結ぶ

様々な細かい技術を積み上げることによって成り立つ金属資源循環システム。そのため研究テーマも多岐にわたり、従来の非鉄製錬の枠組みを越えてアプローチがなされています。

スコロダイト合成によるヒ素の安定固定化

ヒ素は原料の中に不純物として含まれていますが、ヒ素を効率的に分離回収して環境中に溶出しないう形に安定化して保管する決め手の技術とシステムが無い状況です。決め手となる技術の候補の一つ

として、スコロダイト($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)を合成し、保管する方法が挙げられます。

スコロダイトは鉄とヒ素の酸化物の結晶。元来、結晶の生成にはオートクレーブによる高温・高圧処理が必要でした。しかし高エネルギーを消費することや、析出したものが配管にくっついてしまうなど問題も多く、これを解決する方法が模索されてきました。

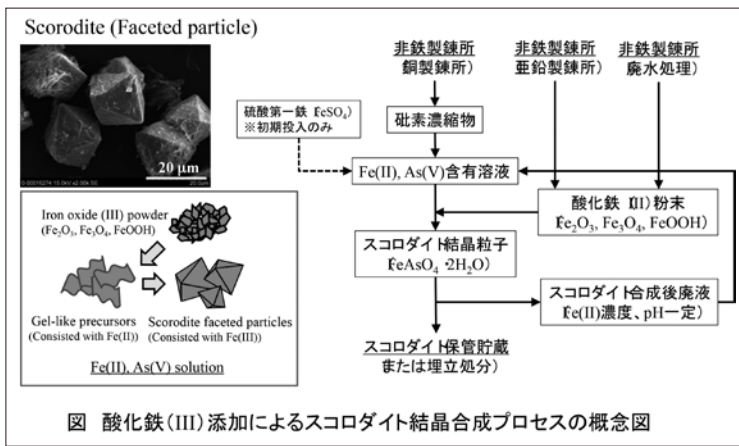
そこで開発されたのが、大気圧化でスコロダイトを合成する方法です。Fe(II)とヒ素(As(V))を含む硫酸第一鉄(FeSO_4)溶液に酸素ガスを吹き込み、Fe(II)をFe(III)

に酸化。これによりファセット状の単結晶のスコロダイトが合成されます。

「私たちは反応初期にFe(II)を主体としたゲル状の前駆体が生成され、スコロダイト粒子の成長とともに消失していくことを発見。この前駆体にはFe(III)が少量含まれています。前駆体の形態変化によってスコロダイトが生成されるのであれば、Fe(II)とヒ素(As(V))を含む溶液中に直接Fe(III)を含む化合物であるヘマタイト Fe_2O_3 を添加し、反応させることによって、溶液のpHを低下させずにさらに効率的にファセット状のスコロダイトが合成されるのではないかと可能性を導き出しました」と、柴田教授。これにより、より効率的に非鉄製錬のヒ素問題を解決することができるようになります。

臭素系難燃樹脂の熱分解メカニズム解明と資源化へ

金属リサイクルに代表される廃電気・電子機器。その外装には、製品を燃えにくくするための臭素系難燃樹脂が含まれたプラスチックが使用されている場合が多くあります。そのためリサイクルも容易ではありません。そこで研究室では、臭素系難燃樹脂を燃やした際の熱分解のメカニズム、及び燃やした際に発生する臭化水素ガスによる重金属化合物の臭素化反応を調査・解明しました。「重金属は臭化水素ガスと反応すると臭化金属にな



スコロダイト結晶の生成・成長機構を解析することで、溶液を循環利用する連続方式のスコロダイト合成プロセスを開発を目指す。

自然に溶け込めるサーフィンが、クセになります。

学生の頃からサーフィンを続けていて、今も休日は大抵海に入ります。場所は仙台新港がほとんど。ここは日本で数本の指に入るほど有名で、プロサーファーも多く利用するような場所です。仙台、と聞いてまず思い浮かべたのは、My Favoriteでも触れた遠藤周作の小説と、この仙台新港でした。仕事とは全く関係のない世界で、時々身が引き締まるようなコンディションの中で海に入ることは自分にとってかけがえのないものです。もう中年ですが、まだ上達したい気持ちはあるので、チャンピオンシップツアーを見て研究したりしています。それくらいハマってしまうほど、サーフィンは魅力のあるスポーツですね。



ファセット状スコロダイト

スコロダイト(FeAsO₄·2H₂O)は砒酸と酸化鉄で構成された化合物の一種。当研究室で取り組んでいる技術により多角形(ファセット)の形状の結晶性の高いスコロダイトの合成が可能。

オートクレーブ

湿式製錬などで、水溶液中の反応を高温・高圧で行いたい場合に用いられる耐圧反応容器。

重金属

鉛など比重が比較的高い金属の総称。

ウェルツキルン法

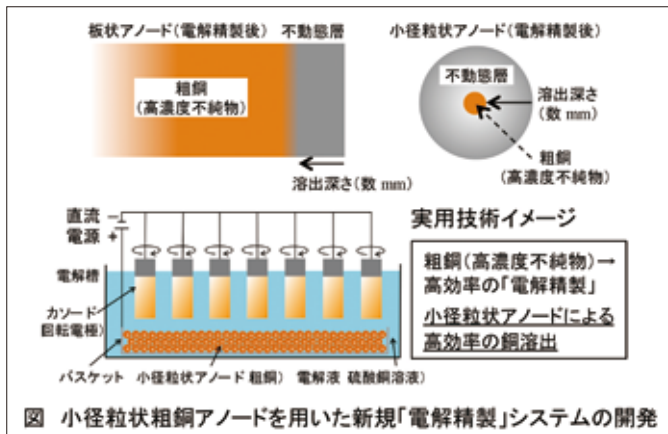
亜鉛を含有した電炉ダストから亜鉛を回収する方法の一つ。電炉ダストとコークスを混合して、ロータリーキルン(回転炉の一種)を用いて加熱し、亜鉛を揮発する。揮発した亜鉛は再酸化して粗酸化亜鉛(不純物を含有した酸化亜鉛)として回収される。

アノード電極

電解液中に電極を二つ挿入して電流を流す場合、導線を通して対極へ向かって電子が流れ出る側の電極を指す。アノード表面では酸化反応が起こり、例えば銅の電解精製では電解液中への銅の溶出が進行する。

不動態化

例えば銅の電解精製では、銅アノード中に電解液に溶けにくい不純物が多量に含有されている場合、電解液中への銅の溶出が進んだ際に表面を不溶性の不純物(不動態層)が覆い、それ以上銅の溶出が進まなくなる。



小径ショット状アノード電解では、アノードの三次元的形状に着目し、新規技術の開発を行っている。

ります。揮発性も高く、高温状態の中ではすぐに気化するという特徴があります」。

ところで、鉄スクラップをリサイクルする際に、副次的に亜鉛を含有した電炉ダストが発生します。電炉ダストは、コークスと混ぜ合わせて1200℃の高温で加熱することにより亜鉛が分離回収されます(ウェルツキルン法)。

このような高温でのプロセスの省エネルギー化と、廃プラスチックの処理を同時に行う試みとして、「電炉ダストに臭素系難燃プラスチックを混合し、加熱することで発生した臭化水素ガスがダスト中の亜鉛と反応し、600~700℃付近で揮発して亜鉛が回収されます。さらに熱分解後のプラスチックはカーボンになるため、コークスの代わりになるという点でも資源循環的な役割を担うことができます」。

小径ショット状アノードを利用した新規電解精製技術の開発

非鉄金属製錬の中心である銅製錬の最終工程として、銅の高純度化のためにやっているのが銅の電解精製です。

本来、電解精製では鉱物資源から製錬されて得られた粗銅をアノード電極とし、種板(カソード)と一緒に硫酸銅水溶液の中に入れて電気を流すことで、粗銅から溶け出したCu²⁺がカソードに析出し、純度の高い銅を回収されます。

しかし二次原料の場合、従来の粗銅に比べて貴金属や不純物の含有量が多く、電気を流すとCu²⁺が溶け出す前に不純物が粗銅の表面を覆ってしまい、銅が溶け出せない「アノードの不動態化」現象が起こるようになります。

対処法としては、硫酸に粗銅を溶かして硫酸銅水溶液をつくり、溶けずに残った不純物の一部を物理的に除去。その後、電解採取をおこなうことで高純度の銅を生産しています。この方法の問題点は電力消費量が増加すること、粗銅を硫酸に溶かすというプロセスが必要になるということ。そこで新たな方法として開発されたのが、小径ショット状アノードを使用した新規電解精製技術です。

従来のアノードは板状で、そのために溶出率が低いという問題がありました。これを複数の小径ショット(粒状)にすることで、不動態化する前に内部まで溶出が進行。安定的にCu²⁺を取り出すことができます。またショットの数を増やした場合でも電流効率や溶出率は維持されるため、これを利用し大規模な電解も可能になると考えられ、将来的なスケールアップを見据えたさらなる研究開発を行っています。

「国内で効率的な金属資源循環システムを実現することは、金属資源循環工学の大きな目標になります。私たちは、非鉄製錬業がこれまで積み上げてきた技術の粋を集め、プロセス技術開発を中心に個々の普遍的なメカニズムをしっかりと解明し、包括的な研究を進めています」。



多元物質科学研究所が推進する研究

研究室(教授)/研究分野	主な研究テーマ
有機・生命科学研究部門	
ナカツギ フミ 永次 史 生命機能分子合成化学研究分野	効率的遺伝子発現制御を目指した新規架橋反応の開発 遺伝子選択的的化学修飾を目指した低分子プローブの開発 遺伝子高次構造の制御を目指した方法論の開発 新規核酸医薬開発に向けた方法論の開発
ワダ タケヒコ 和田 健彦 生命機能制御物質化学研究分野	がん細胞特異的核酸医薬の開発 生体高分子を不斉反応場とする環境調和型光不斉光化学反応反応系の創製 高感度・高時間分解能を有する円二色(CD)スペクトル測定装置の開発 酵素活性などの細胞内in situ&in vivo検出系構築に向けた分割型蛍光タンパク質システムの開発
イナバ ケンジ 稲葉 謙次 生体分子構造研究分野	細胞におけるタンパク質品質管理機構の分子基盤の解明 タンパク質の高次構造形成に関わるジスルフィド結合形成酵素群のX線結晶構造解析 小胞体に張り巡らされたレドックスネットワークの網羅的解析 細胞内カルシウム恒常性維持機構の構造基盤の確立
タカハシ サトシ 高橋 聡 生命分子ダイナミクス研究分野	タンパク質フォールディング機構の解明 人工タンパク質の新デザイン戦略の開発 がん抑制タンパク質p53のDNA認識機構の解明
無機材料研究部門	
オオタニ ヒロシ 大谷 博司 計算材料熱力学研究分野	クラスター法を用いたFe基侵入型合金における原子間相互作用の理論的研究 Fe基磁性材料の電子論的探索法の開発と試作 金属固溶体や液体、粒界、積層欠陥などの熱力学物性の電子論計算 不純物を効率的に除去できるプロセスを用いた高純度金属の作製
スズキ シゲル 鈴木 茂 機能材料微細制御研究分野	多様な水酸化鉄と酸化鉄の構造解析と制御 酸化物や金属・合金のナノ粒子の合成と評価 形状記憶効果などの特異な変形挙動を示す各種合金の構造評価 放射光を用いた機能性化合物中の金属の酸化還元挙動の解析
サトウ タツ 佐藤 卓 スピン量子物性研究分野	遍歴電子系、特に鉄系超伝導体における反強磁性と超伝導の研究 低次元フラストレート量子スピン系における巨視的量子現象の研究 トポロジカルスピントクスチャーのスローダイナミクス研究 中性子非弾性散乱分光法および解析法の開発
キタカミ オサム 北上 修 ナノスケール磁気デバイス研究分野	単一磁性ナノ粒子の物性・スピンダイナミクス 巨大磁気異方性材料の設計・開発 新規超高密度磁性メモリー技術の提案・開発 永久磁石の保磁力決定機構
ヨコヤマ チアキ 横山 千昭 超臨界流体・反応研究分野	アモナーナル法による窒化物半導体結晶の作製 超臨界アンモニア中への窒化物半導体の溶解度 イオン液体と超臨界二酸化炭素を用いた化学プロセスの開発 糖類からの有用化学原料製造プロセスの開発
フクヤマ ヒロユキ 福山 博之 高温材料物理化学研究分野	高温化学反応場における機能材料プロセスの創製 窒化物半導体結晶成長の物理化学とプロセス創製 高温融体の高精度熱物性計測システムの開発と高温融体の科学 強磁場形状記憶合金の薄膜化とマイクロアクチュエータの開発
プロセスシステム工学研究部門	
キタムラ シンヤ 北村 信也 基盤素材プロセス研究分野	製鋼スラグを利用した津波で被災した田園地帯の復興 反応界面積の極大化による超高速精錬プロセスの追求 鉄鋼副産物からの有価金属元素の高純度分離回収
カノウ ジュンヤ 加納 純也 機能性粉体プロセス研究分野	コンピュータシミュレーションによる粉体プロセスの最適化 メカノケミカル法による機能性粉体の創成と希少金属の回収 バイオマスおよび樹脂廃棄物からの水素製造プロセスの創成
アジリ タダフミ 阿尻 雅文 超臨界ナノ工学研究分野	超臨界ナノ粒子連続合成プロセスの開発 超ハイブリッドナノ粒子系の科学 超臨界法による結晶面制御・メソポーラスナノ触媒の創製 数学との連携による構造化・機能性ナノ材料の設計基盤の確立
サトウ シュンイチ 佐藤 俊一 光物質科学研究分野	高強度光の場における物質変換・ナノ合金粒子合成プロセス 新奇レーザーナノプロセス開発 ベクトルビームの開発と新分野への応用技術開発 ベクトルレーザービームを用いたナノイメージング
ムラマツ アツシ 村松 淳司 ハイブリッドナノ粒子研究分野	有機-無機ハイブリッドナノ粒子の合成 シングルナノサイズ金属粒子の合成と機能性材料への応用 部分硫化による可視光応答性光触媒材料の開発 液相還元法による新規触媒材料

研究室(教授)/研究分野	主な研究テーマ
プロセスシステム工学研究部門(つづき)	
サトウ ノブアキ 佐藤 修彰 エネルギーシステム研究分野	アクチノイド化合物の固体および溶液化学の研究 核燃料サイクルにおけるフロントおよびバックエンド化学の研究 原発事故に関わる環境修復および放射性廃棄物の処理・処分に関する研究 放射性物質を含むレアメタル資源のグリーンプロセス開発

計測部門	
ウエダ キヨシ 上田 潔 電子分子動力学研究分野	光電子回折を用いた分子の自己ダイナミックイメージング 分子集合体における分子間電子緩和ダイナミクス FELパルスと物質との相互作用 X線FELパルスを用いたダイナミックイメージング
タカハシ マサヒコ 高橋 正彦 量子電子科学研究分野	時間分解電子運動量分光の開発による化学反応の電子レベルでの可視化 分子座標系電子運動量分光による分子軌道の運動量空間イメージング 多次元同時計測分光の開発による電子・分子衝突の立体ダイナミクスの研究
モモセ アツシ 百生 敦 量子ビーム計測研究分野	X線干渉光学に基づく高感度計測技術研究 X線・中性子位相イメージング技術の開拓 実用化高度X線位相撮像装置の開発
キムラ ヒロユキ 木村 宏之 構造材料物性研究分野	多重極限下(高圧・極低温・強磁場・高電場)におけるX線・中性子回折手法の開発 強誘電体・磁性体・有機伝導体・高温超伝導体などの新奇機能性物質の構造物性研究 超精密X線単結晶構造解析による遷移金属酸化物の価電子の可視化 中性子回折装置とその応用法の開発(JAEA東海研究用原子炉にあるFONDERと2D-PSD)
クリハラ カズエ 栗原 和枝 ナノ界面化学研究分野	表面力測定による分子間・表面間の相互作用の研究 固-液界面、閉じ込め空間の液体の研究 ナノトライボロジー 電気化学表面力装置による電気化学反応の研究
タカクワ ユウジ 高桑 雄二 表面物理プロセス研究分野	リアルタイム光電子分光による表面反応キネティクスの研究 ストリークカメラ反射高速電子回折による表面構造ダイナミクスの研究 光電子制御プラズマによるナノ炭素材料合成プロセスの開発 CMOSゲートスタックの極薄誘電体膜形成機構の解明
チチブ シゲフサ 秩父 重英 量子光エレクトロニクス研究分野	(Al,In,Ga)Nおよび(Mg,Zn)O系ワイドバンドギャップ半導体を用い新規なコヒーレント光源の研究 フェムト秒レーザおよびフェムト秒電子線を用いた半導体量子ナノ構造の時間空間分解スペクトロスコピー 有機金属化学気相エピタキシーおよび分子線エピタキシーによる量子 ナノ構造形成と深紫外線発光デバイス形成 (Mg,Zn)O系酸化物半導体のヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシーと機能性酸化物薄膜形成

サステナブル理工学研究センター	
ホンマ イタル 本間 格 エネルギーデバイス化学研究分野	次世代リチウムイオン電池・高容量キャパシタ グラフェン量産化技術 太陽電池化合物半導体薄膜の安価大面積プロセス開発 ナノテクノロジーの資源エネルギー技術への応用技術開発
アメザワ コウジ 雨澤 浩史 固体イオニクス・デバイス研究分野	固体酸化物燃料電池/リチウムイオン二次電池の高性能化・高信頼性化 電気化学エネルギー変換用デバイス・材料評価のための高度その場分析技術の開発 ヘテロ界面における電気化学現象に関する基礎研究 新規固体イオニクス材料の設計と創製
カワムラ ジュンイチ 河村 純一 固体イオン物理研究部門	核磁気共鳴法による革新電池の高度解析技術開発 リチウムイオン電池のin situ劣化診断技術の開発 固体電解質を用いた全固体薄膜電池の研究 超イオン伝導体・ガラス・過冷却液体のイオンダイナミクス
ノガミ ヒロシ 桒上 洋 環境適合素材プロセス研究分野	素材製造プロセスの多相反応シミュレーション技術 新規エネルギー変換・貯蔵・回収プロセスの開発 反応・伝熱高効率化のための境膜制御技術開発 高温混相流動系内の物質の変形と相変化
シバタ ヒロユキ 柴田 浩幸 材料分離プロセス研究分野	溶融ケイ酸塩の熱物性と構造 Fe基合金における包晶反応・変態の速度論 レアメタルのリサイクルに関わる溶融塩の構造と物性 難燃性マグネシウム合金空気電池を用いた非常用電源開発
シバタ エツロウ 柴田 悦郎 金属資源循環システム研究分野	鉱物資源、二次原料ならびに製錬副産物の資源化処理・製錬技術の開発 砒素の安定固定化に向けたスロコライト結晶の生成機構の解明と合成プロセスの構築 銅スラグからのマグネタイト析出と分離による鉄源化プロセス 高貴金属・不純物含有銅アノードの電解精製技術の開発

研究室(教授)/研究分野	主な研究テーマ
先端計測開発センター	
テノウチ マサミ 寺内 正己 電子回折・分光計測研究分野	高分解能EELSによるナノマテリアルの光学物性評価法の開発と応用 分光収束電子回折法によるナノ領域の精密結晶構造解析法の開発と応用 ナノスケール軟X線発光分析システムの開発と材料研究への応用
シンドウ ダイスケ 進藤 大輔 電子線干渉計測研究分野	電子線ホログラフィーによるナノスケール電磁場計測の高精度化 電磁場制御と伝導性評価のための電顕内探針操作技術の開発 電場解析による帯電・電子放出機構の解明 先端磁性材料、高温超伝導体、強相関電子系新物質の磁束イメージング
コメダ タダヒロ 米田 忠弘 走査プローブ計測技術研究分野	走査プローブ顕微鏡の高度化により、原子レベルで物質を化学分析できる顕微鏡の開発 電子が持つスピンをより明確に可視化し、操作する技術の開発 省エネルギーと量子コンピューター等の高度情報処理の両方から期待される、分子を材料とし、スピンを利用するエレクトロニクス=分子スピントロニクスの開発
タカタ マサキ 高田 昌樹 放射光ナノ構造可視化研究分野	物質機能を可視化する放射光構造科学の構築 X線回折データによる物質中の精密電子密度解析法の開発 マキシマムエントロピー法による静電ポテンシャル解析法の開発
高分子ハイブリッド材料研究開発センター	
ミツイシ マサヤ 三ツ石 方也 高分子ハイブリッドナノ材料研究分野	高分子ハイブリッドナノ材料の開発 高分子ナノ材料の配向・配列構造制御技術の開発 高分子ハイブリッドナノ構造を利用した光電子機能発現 高分子ハイブリッドナノ材料からなるソフト系表面・界面の特性解明
オイカワ ヒデトシ 及川 英俊 有機ハイブリッドナノ結晶材料研究分野	新規有機ナノ結晶(フォトクロミックナノ結晶、錯体ナノ結晶、 dendroliマーナノ粒子など)の創出と物性評価 次世代フォトニック材料を目指した有機ハイブリッドナノ結晶の集積・階層化プロセスの構築と光機能発現 多孔質および逆オパール周期構造を有する高分子薄膜の作製と光・電子(誘電)特性 生理活性物質のナノ結晶粒子化とナノ純薬の創製
キョウタニ タカシ 京谷 隆 ハイブリッド炭素ナノ材料研究分野	均一なナノ空間を反応場としたハイブリッドナノカーボンの合成 ナノカーボン材料および複合材料を用いたエネルギー貯蔵デバイスの開発 炭素被覆メソポーラス構造体を用いたバイオ燃料電池の開発 実用炭素材料の超精密分析とそれによる性能向上
アキタガワ トモユキ 芥川 智行 ハイブリッド材料創製研究分野	多重機能を有する分子性材料の創成 有機強誘電体薄膜メモリーの開発 n型有機半導体材料の開発 有機-無機ハイブリッド型ポリオキサメタレート材料の材料化
ナカガワ マサル 中川 勝 光機能材料化学研究分野	ナノインプリントリソグラフィに資する光硬化性樹脂とレジスト材料の開発 孔版印刷塗布、エッチング、気相化学逐次堆積、アラメント、積層等のリソグラフィプロセスの開発 極限ナノ造形・構造物性の研究
ジンナイ ヒロシ 陣内 浩司 自己組織化高分子材料研究分野	相分離構造を有する高分子微粒子の自己組織化的作製と構造制御 結露した水滴を鋳型として形成されるハニカム状多孔質膜の作製技術開発 電子線トモグラフィによる高分子ハイブリッド材料の3次元観察と解析 ソフトマテリアルに対する電子顕微鏡観察技術の開発
新機能無機物質探索研究センター	
ヤマネ ヒサノリ 山根 久典 無機固体材料合成研究分野	多元系酸化物や窒化物の新規物質探索と構造解析および結晶化学的研究 活性金属を利用した非酸化物系セラミックスの新規合成プロセスの開拓 ナトリウムを用いた金属間化合物の低温合成と構造解析および特性評価
サイ アンボウ 蔡 安邦 金属機能設計研究分野	準結晶の創製と高比強度Mg材料への応用 準結晶の構造解析と数値モデル 金属組織制御による触媒の調製 価電子構造制御による新触媒の探索
サトウ ツギオ 佐藤 次雄 環境無機材料化学研究分野	ソルボサーマル反応によるセラミックスのバノスコピック形態制御と環境調和機能 可視光応答性光触媒の合成と環境浄化機能 無機紫外線・赤外線遮蔽剤の開発 革新的自動車排ガス浄化触媒の開発
カキハナ マサト 垣花 真人 無機材料創製プロセス研究分野	白色LEDへの応用を目指した高機能な新規蛍光体の開発 太陽光エネルギー変換を目指した新規光触媒の構築 金属錯体をビルディングブロックとして利用した特異構造の金属酸化物および無機-有機ハイブリッドの創製

編集
後記

TAGEN FOREFRONT第7号。これで49名の教授を紹介してきました。多元研の教授定員は48名なので一回りした計算です。第1号以来、多くの若い先生方が赴任され、益々活気あふれる研究所になってきました。そんな賑わいが紙面から良くわかるような構成になっていますので、改めて、是非1~7号までお読みいただければ、と思います。次の8号発行に向けて、準備を進めたいと思います。(A.M)

広報委員会

委員長 加納 純也
高橋 聡
米田 忠弘
雨澤 浩史
蟹江 澄志
篠田 弘造
矢代 航
丸岡 伸洋



■編集・発行

国立大学法人東北大学
多元物質科学研究所 広報委員会
〒980-8577
宮城県仙台市青葉区片平2丁目1番1号
TEL 022-217-5204
FAX 022-217-5211
www.tagen.tohoku.ac.jp
2016年2月17日発行

取材を終えて

取材で先生方とお話をして思うことは、学会に、共同研究に、本当によく海外に行ってらっしゃるな、ということ。最先端の研究というものが、日本国内だけでクローズしてできるものではなく、広く世界とつながってこそできるものなんだ、と改めて痛感している今日この頃です。

そんな世界を飛び回り活躍されている先生方のぎっしりのスケジュールの合間を縫って取材させていただいているこの冊子。海外の人にも読んでいただけるようになればなーなどと、思っています。



この冊子は、環境にやさしい「水なし印刷」
「植物油インキ」を使用しています。

