

## 各務記念材料技術研究所とともに

1990年4月に兼任研究員としてお世話になって以来、来年2023年3月に定年を迎えるまでの32年間、(一年残ってはいますが)、大学での生活の拠点として、各務記念材料技術研究所(材研)で過ごさせていただきました。まずは、材研に関わる多くの方々に心からのお礼を申し上げます。ご存じのように、材研は理工の西早稲田キャンパスから少し離れた場所で、かつ住宅に囲まれた閑静な環境の中にあります。また研究施設・設備が充実し、技術職員さんの手厚い支援を受けられるという、研究者にとって非常に恵まれた環境です。このような環境の中、学生たちと有意義かつ楽しい研究生活を送れましたことに大変感謝しております。

入所した当時の材研には、鋳物研究に携わっていた先生が多くおられました。その時の所長であった加藤栄一先生を始めとして先生方が、分野の異なる私を快く受け入れてくださったこともあり、材研での研究生活を問題なく開始することができました。私が入所した後は、物理系や電気・電子系等の先生方も研究員になられ、材研内の雰囲気も少しずつ変わっていったように感じています。そんな中、2004年9月、材研にとって衝撃的な出来事が起こりました。それは、早稲田大学の附置研であった材研が、理工研とともに、新たに設置された理工学総合研究所の下部組織となったことです。このことは、独自の研究展開を可能としていた、材研自身での決定権が失われることを意味しており、この時の材研内での混乱は今でも頭の中に深く刻まれています。そこで、私が所長となった際、材研独自の研究展開が可能な組織とは何か、研究展開には何が必要なのかを考え、私が文部科学省研究振興局の科学官であったこともあり、現在、我が国での研究展開の主流となっている共同利用・共同研究拠点への認可が不可欠であること、さらに材研の独自性を生かした研究テーマの中で、拠点認可には何が必要かを考え始

めました。そして、材研で行われてきたこれまでの研究を振り返った時、鋳造技術をリサイクル技術として、材料劣化の阻止技術を長寿命化技術として、また省エネルギーと言う視点からの機能性材料の開発、さらにこれら技術・開発とAIや機械学習等を用いた解析技術を結びつけることにより、持続可能な社会の構築、すなわち材料工学からのSDGsの実現に向けた拠点として、展開が可能であると言う結論に達しました。加えて、学内で材研独自の研究展開を行うため、箇所化の必要性も強く感じるようになりました。理工学総合研究所木野所長の全面協力の下、箇所化を大学本部にお願いしました。結果として、多くの先生方および職員さんの協力もあり、2017年9月に理工学術院に直属する附置研究所として箇所化、2018年4月に「環境整合材料基盤技術共同研究拠点」としての認可が得られ、材研の基盤固めができたと感じています。

私の材研での研究室名は相転移研究室で、その内容は固体物理に関わるもので。ここで固体物理、特に結晶物理は空間群と言う対称操作群の既約表現に基づく学問で、多くの数学的要素を含んでいます。具体的に、既約表現は逆格子ベクトルだけ異なる既約表現と同値であり、このため結晶運動量保存則と言う一種の選択則が成立します。そこで、この保存則に関係した成果について簡単にお話しすると、実は、この保存則は固体における不整合構造、特にディスコメンシュレート構造を理解する上での糸口で、実際我々は様々な物質での不整合構造がこの保存則を通して理解できることを明らかにしてきました。実を申しますと、この研究において結晶特有の保存則に出会えたこと、このことは私の研究活動において大変幸運なことだと思っています。

現在の材研には、研究所として大きく飛躍するための土壌がすでに整っていると感じています。そこで、今後の更なる発展を期待し、この辺で私の話を終えることにします。

早稲田大学 理工学術院 教授 小山泰正





早稲田大学 理工学術院教授

下嶋 敦

Atsushi Shimojima

■profile ■

1995年早稲田大学理工学部応用化学科卒業、1997年同大学大学院理工学研究科修士課程修了、1997年昭和電工入社、2002年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了(博士(工学))、2002年日本学術振興会特別研究員(PD)、2004年~2005年米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校訪問研究員、2006年東京大学大学院工学系研究科助手、2008年同大学大学院工学系研究科准教授、2013年早稲田大学理工学術院准教授、2017年同大学理工学術院教授。2006年日本セラミックス協会進歩賞、2017年度早稲田大学リサーチアワード(国際研究発信力)

# 分子レベルからナノレベルの精密構造制御により 従来にない高度な機能材料を創出する

2021年度より黒田・下嶋・和田研究室が下嶋研究室として新たに発足した。

早稲田大学の中でも100年を超える歴史を持つ応用化学科において、研究内容や指導体制の特徴と現状を聞いた。

## ありふれた化合物から新材料を創出する

—— 下嶋研究室の研究の内容と特徴は何でしょうか。

無機骨格を精密に組み上げて、新しい機能を持つ無機材料や無機有機複合材料を創出することに取り組んでいます。無機固体材料の合成に一般的に用いられる液相プロセスを主軸に、分子レベルからナノ・メソスケールまで組成と構造を階層的に制御することによって、目的とする機能を持った材料を作ります。無機の酸化物を中心として様々な材料を扱っていて、求める機能も多様です。無機合成化学の研究室ですが、有機化合物も積極的に利用するというのも大きな特徴のひとつです。

—— その中で近年、特に注力しているテーマは何でしょうか。

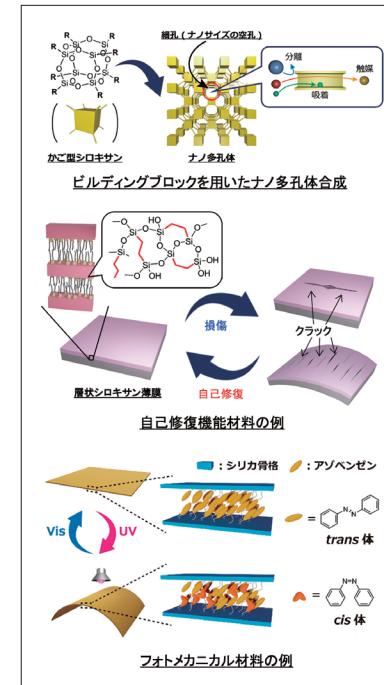
最も多く扱っているのが、Si-O-Si結合を骨格とするシロキサン系材料です。ありふれた化合物である二酸化ケイ素( $\text{SiO}_2$ )も、分子レベルから組成や構造を精密制御すれば、新しい機能材料を生み出すことができるのです。その代表例が、ナノサイズの細孔を有する多孔質材料で、触媒や吸着材、断熱材、低屈折率材料など幅広い応用があります。

最近の研究例としては、かご状のSi-O-Si骨格を有するシロキサン化合物をビルディングブロックとして用い、ゼオライト類似の新しい結晶性ミクロ多孔質材料や、高密度に金属活性点を有する新しい多孔質触媒材料を生み出しています。また、メソスケールの規則的な細孔構造を有するゼオライトの新規合成ルートの開拓にも成功しています。さらに、細孔の形状やサイズを自由に変化させることのできる、ゴムのような弾性を持つユニークなナノ多孔体の合成も行っています。

多孔質材料のほかに近年力を入れている研究ターゲットとして、自己修復機能材料と光応答性材料があります。

まず自己修復機能材料とは、ヒビ割れなどの損傷を自発的に修復するという夢の材料です。ここ10年で世界的に論文数が急増していますが、有機材料がほとんどで、ガラスのような無機材料ではありません。私たちは、Si-O-Si結合が、切っても元に戻せる可逆性を有することに注目し、シロキサン系材料の構造を制御することで、自己修復性が発現することを発見しました。

たとえば、クラックを自己修復するシロキサン系コーティングの開発では、



3次元的な骨格ではなく、ナノレベルの薄いシートが積み重なった層状構造に制御することで、クラックが自発的に閉じるための膨張性と、閉じた後にSi-O-Si骨格が再構築される自由度、この二つの相乗効果で実際に修復できるこことを報告しています。このほかにも、シロキサン系材料の分子レベルやナノレベルでの構造制御に基づくさまざまな修復メカニズムを考案・実証しています。

—— もう一つの光応答性材料とはどのようなものでしょうか。

私たちが研究しているのは光を照射することで形やサイズが可逆的に変化する材料で、フォトメカニカル材料ともいわれています。センサーやアクチュエータ等への応用が期待されており、国内外で

盛んに研究されています。ただし、これも多くの有機化合物によるもので、私たちは無機化合物をベースとした新たな材料設計に挑戦しています。具体的には、従来使われてきた光応答性の有機化合物とシロキサン化合物を分子レベルでハイブリッド化しそれらを集積させることで、光で可逆的に屈曲する材料が得られています。これらの材料は、高い耐熱性など無機成分由来の優れた性質を示すことが明らかとなっています。

以上の研究の多くは、分子間に働く弱い相互作用を使って分子を規則的に並べる、いわゆる自己組織化プロセスによるものです。分子を作り込む技術と、それをうまく並べて機能を創出する技術、それを両方できることが研究室の強みだと思っています。

—— ほかにはどんな研究テーマがありますか。



黒田・下嶋・和田研究室でのテーマを継続して、多岐にわたる研究を行っています。たとえば、層状ケイ酸塩の層間縮合や層表面修飾による各種ナノ材料の合成や、界面活性剤ミセルやコロイド結晶を鋳型として用いたメソポーラス材料の合成では、最近新たな展開が見られています。骨格組成を酸化ゲルマニウムや遷移金属酸化物に拡張することで、ケイ素—酸素系では実現できない多様な機能を追求しています。



下嶋研究室の様子

## 20代半ばでの3年を悔いのないように

—— 下嶋先生の経験では修士を卒業していったん民間の化学企業に就職し、その後、当大学の博士課程に戻っていますね。

配属先の研究所での業務には満足していましたが、研究者としてグローバルに活躍するには学位が必要だと感じていました。就職後、修士論文の成果が論文として学術誌に掲載されたことが後押しとなり、約2年の在職期間を経て出身研究室に戻りました。企業での研究を経験して大学での研究の面白さが再確認できたこと、また指導教員であった黒田一幸先生が受け入れてくださったことも大きかったといえます。

—— 珍しいケースではないでしょうか。

それほど珍しいことでもなく、実は、研究室の松野敬成博士も修士修了後に化学系企業に3年ほど勤めています。企業には迷惑をかけるので声高にはいえませんが、元々博士課程に進学すべきだった人が就職したところ、やはり思い直したというケースはあっていいと思います。修士課程在学中に本人がそのことに気づくか、あるいは周囲が気づかせてあげるのが一番なのかもしれません、企業での実務経験は決して無駄ではなく、新たな切り口で学術研究に取り組むうえで大いに役立ちます。

—— ドクターになるべき人とは具体的にはどんな人でしょう。

研究者を志すのであれば学位を取得すべきと考えています。研究室の学生は皆優秀で十分その能力があると思っていますが、研究が好きで、朝から晩まで研究に没頭しているような学生には特に薦めたいです。もちろん、修士課程を修了して、企業人として活躍するのも大切なですが、入社後10年、20年して、学位をとらなかったことを後悔してほしくないですね。学生として学術研究に集中できる20代半ばでの3年というのは、その後の会社人生の3年よりもずっと自由でありながら濃密で、かつ頑張りも利くのではないかでしょうか。

—— ポストドク時代は訪問研究員として米国の大学に行かれました。

論文を読んで興味を持った教授のいるカリフォルニア大学サンタバーバラ校に行きました。多孔質材料の研究をするつもりでしたが、ひょんなことから、NASAのプロジェクトに関連して自己修復材料の開発に取り組みました。その経験をずっと温めてきて、5-6年前に自らの視点で研究を開始したのです。

## 先輩が後輩を指導する研究室の伝統

—— 下嶋研究室の概要や特徴を教えてください。

研究室には毎年7~8人くらい4年生が配属され、ほとんどの学生が修士課程に進学します。今年度は博士課程の学生4人を含めておよそ30人の構成で、そのうち3分の2の学生は西早稲田キャンパスに机があり、3分の1の学生は材研に机があります。私たちの研究では電子顕微鏡やX線回折だけでなく、NMRや質量分析などさまざまな分析装置を用いますので、多くの学生は西早稲田キャンパス（65号館の研究室、物性計測センター、環境保全センター）と材研を行き来しながら日々研究活動を行っています。

学生数が多く、1人1人にまで十分に目が行き届かないこともあります。それが逆に、学生の自立と協調を促していると感じます。研究室のすべての装置は、学生同士で相談して担当者を決め、責任をもって管理していますし、研究テーマの比較的近い学生達が自主的に集まって、グループミーティングを定期的に開催しています。学生同士の活発なディスカッションから研究の突破口や新たなアイデアが見えてくることがあります。実は研究テーマも教員からトップダウンで一方的に割り当てるのではなく、学生からボトムアップで生まれたテーマが数多くあります。

当研究室では、M2の学生がB4の学生をマンツーマンで指導する体制をとっています。それによって、B4学生は実験のやり方、報告書の書き方、プレゼンテーションの仕方などを学び、半年後には自分で考えて研究が進められるようになります。また、M2の学生も、後輩を指導することで自分のテーマとは異なる分野の知識を吸収するだけでなく、人間的にも成長することができます。博士課程の学生には、自らの研究を遂行するだけでなく、関連するテーマの後輩学生の指導、さらには研究室全体を管理するスタッフとしての役割も担ってもらっています。

—— 研究室として心掛けていることはありますか。

学生が主体的に楽しんで研究に取り組めるような、自由闊達な雰囲気作りを心掛けています。また、修士課程の学生には、学会に積極的に参加するだけでなく、できるだけ在学中に研究成果を学術論文としてまとめるように指導しています。自分の名前で論文が出版されれば誰しも嬉しいでしょうし、なによりも大きな自信となり、博士号取得も近い距離に感じるようになるかもしれません。もちろん、タイトなスケジュールになりますが、論理的な思考力や英語力なども含めて、大きく成長できるからです。

—— 研究室で大切にしている理念のようなものはありますか。

どの研究室でも同じだと思いますが、学術的新規性とオリジナリティを大切にしています。二番煎じにならないよう、徹底的に文献調査をして、今までなかった着眼点で研究を展開するようにしています。チャレンジングなテーマですと、思っていたような成果がなかなか得られないこともあります。その過程で試行錯誤しながら深く考えることを重視しています。

—— これからの研究の展望はいかがでしょうか。

学術的な研究として、自分たちの信じていることを貫き通し、高度な無機合成化学を確立する、という使命を忘れてはならないと思います。その一方で、研究のための研究とならないよう常に実用化を意識して、社会に役立つ材料を数多く創出したいと考えています。

◎ 2021年度 第8回 ZAIKEN Festa 受賞者紹介 ◎

各務記念材料技術研究所（以下 材研）では所内研究者・研究室間の相互理解の深化、異分野交流の促進、研究情報発信の推進を趣旨としてZAIKEN Festa（ポスターセッション）を2014年度より開催しております。2018年度からは文部科学省共同利用・共同研究拠点として認定されたことに伴い、参加枠を共同研究・共同利用機関の若手研究者へも拡充し、若手研究者の涵養、奨励を一層推進しております。

昨年度に引き続き、2021年度もオンライン開催となりましたが、第8回ZAIKEN Festaでは、計34名の所内および共同研究・共同利用機関の若手研究者が研究発表を行い、活発な議論や交流が行われました。



最優秀賞

吉田研究室 修士1年 土屋 苍さん



この度は、2021年度第8回ZAIKEN Festaにおきまして最優秀賞を頂き、大変光栄に存じます。吉田研究室では、主に輸送機器部品を対象とした製造プロセスの開発を行っています。私の研究では、自動車車体部品への適用を目指した鋳造用合金の開発を行っています。本研究の成果は、車体の大規模な軽量化に伴うEV車の航続距離延長や、ガソリン車のCO<sub>2</sub>排出量削減を可能にします。自動車業界の発展に貢献ができるよう今後も研究に励みます。日頃からご指導いただいた吉田先生や共同研究者の皆様、実験やディスカッションにご協力いただいた研究室の皆様に、深く御礼申し上げます。

優秀賞

下嶋研究室 修士2年 宮本 佳明さん



この度は第8回 ZAIKEN Festa にて優秀賞を頂き、大変光栄に思います。私が所属する下嶋研究室では無機骨格を精密に組み上げて新しい機能を創出する研究を行っています。私の研究は層状メソ構造の制御を利用した自己修復材料の開発を目標しており、層間設計により高い機械的特性と自己修復性の両立に成功した成果に関して発表しました。これまで交流のなかった異分野の方々から様々な視点からご質問いただき、今後の研究活動に向けて大変有意義な機会となりました。日頃より実験環境を整備し、本発表の場を企画運営いただいた材研職員の方々、及び研究にあたって指導して下さった先生や先輩方、研究室の皆様に感謝を申し上げます。

鈴木研究室 博士1年 澤田 万尋さん



この度は優秀賞を頂くことができ大変嬉しく思っています。本年度は材研のリサーチアシスタントとして研究を行っており、今回の結果もひとえにご支援の賜物であります。ご関係の皆様に改めて感謝申し上げます。また、日々非常に熱心にご指導頂きました鈴木進補先生に深く御礼申し上げます。ZAIKEN Festaでは普段あまり触ることのない研究テーマも沢山勉強させて頂き、自分の研究へのヒントも得た貴重な機会となりました。材料という共通項を持ちつつ多様な研究が行われている、材研の素晴らしいを改めて実感した次第です。今回反省点も見つかりましたので、次回は最優秀賞を目指してこれからも日々精進いたします。