

 2026

Science Tokyo

東京科学大学 物質理工学院

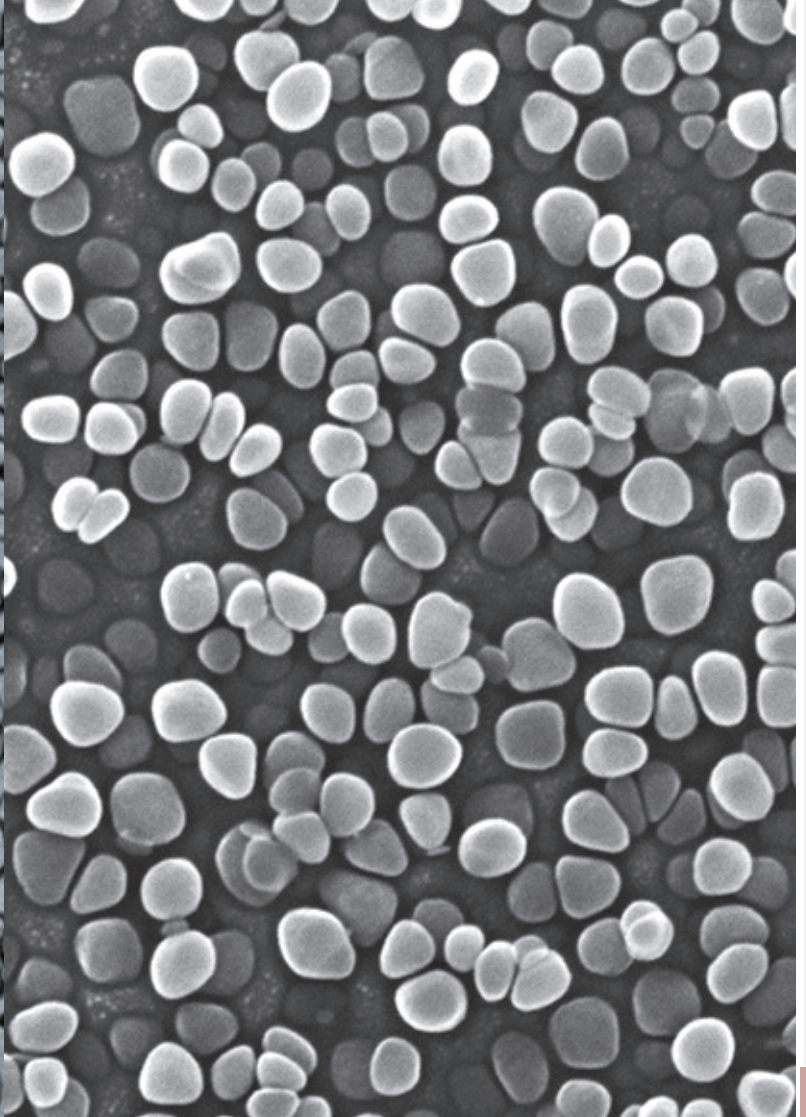
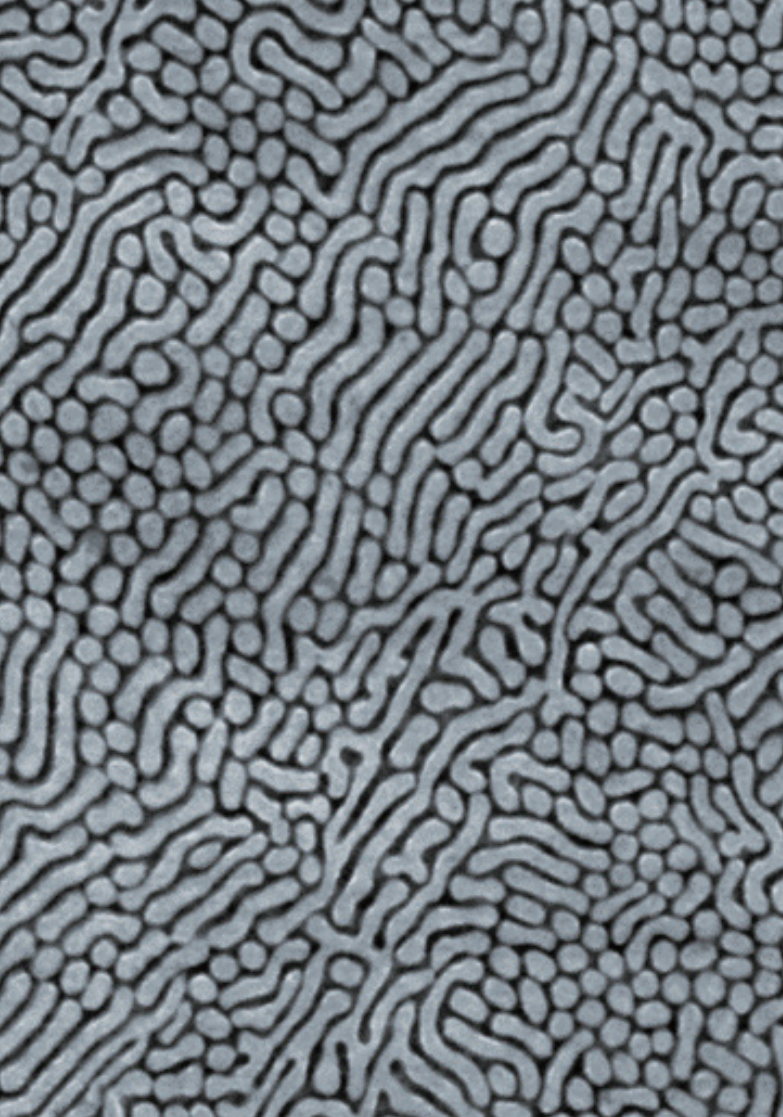
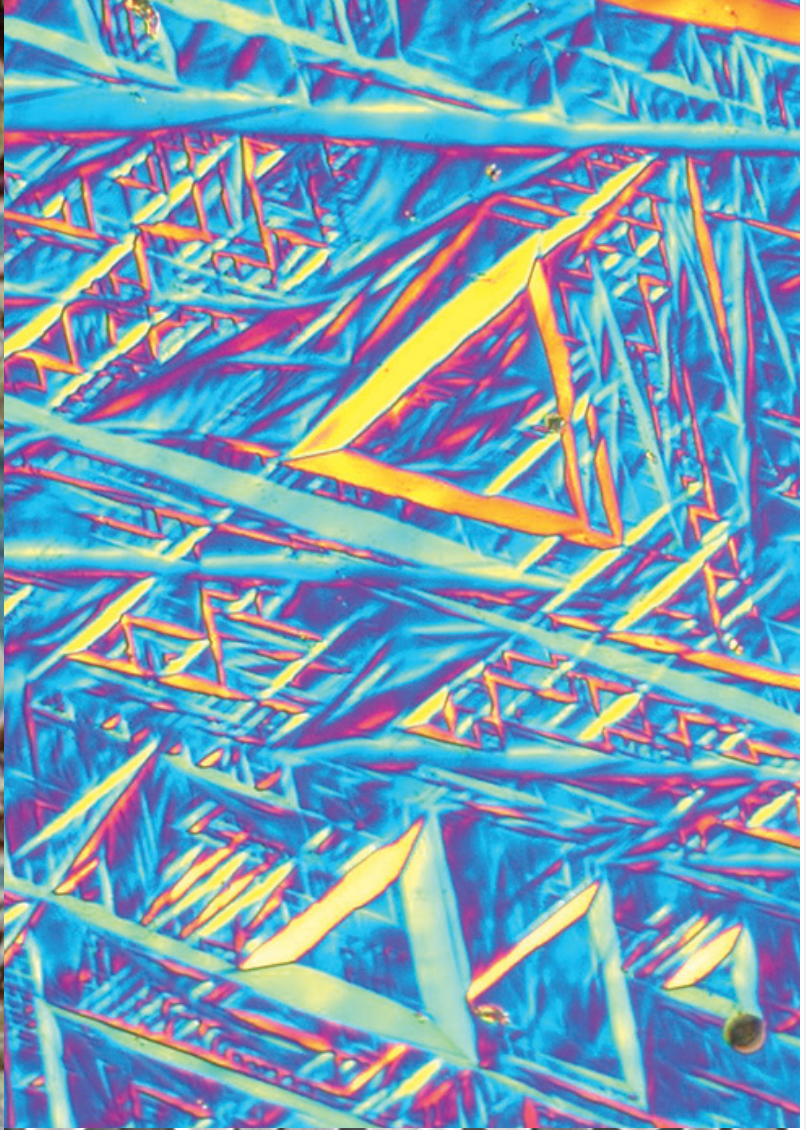
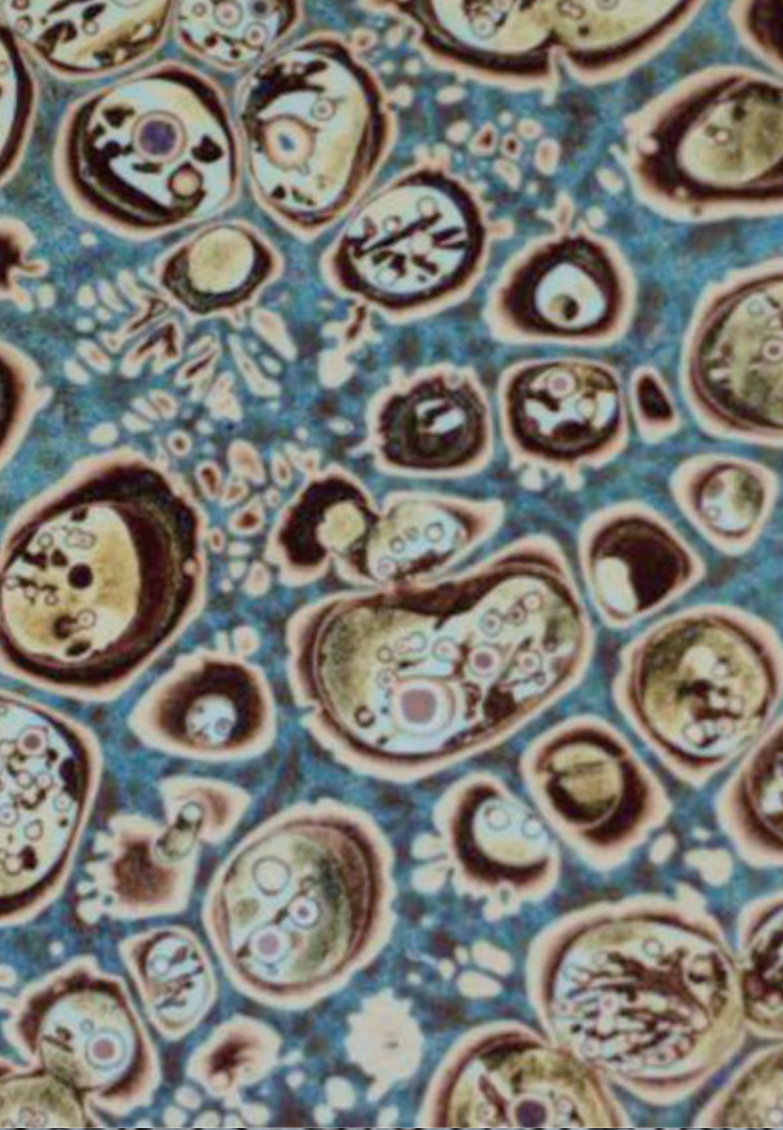
# 材料系(金属分野)

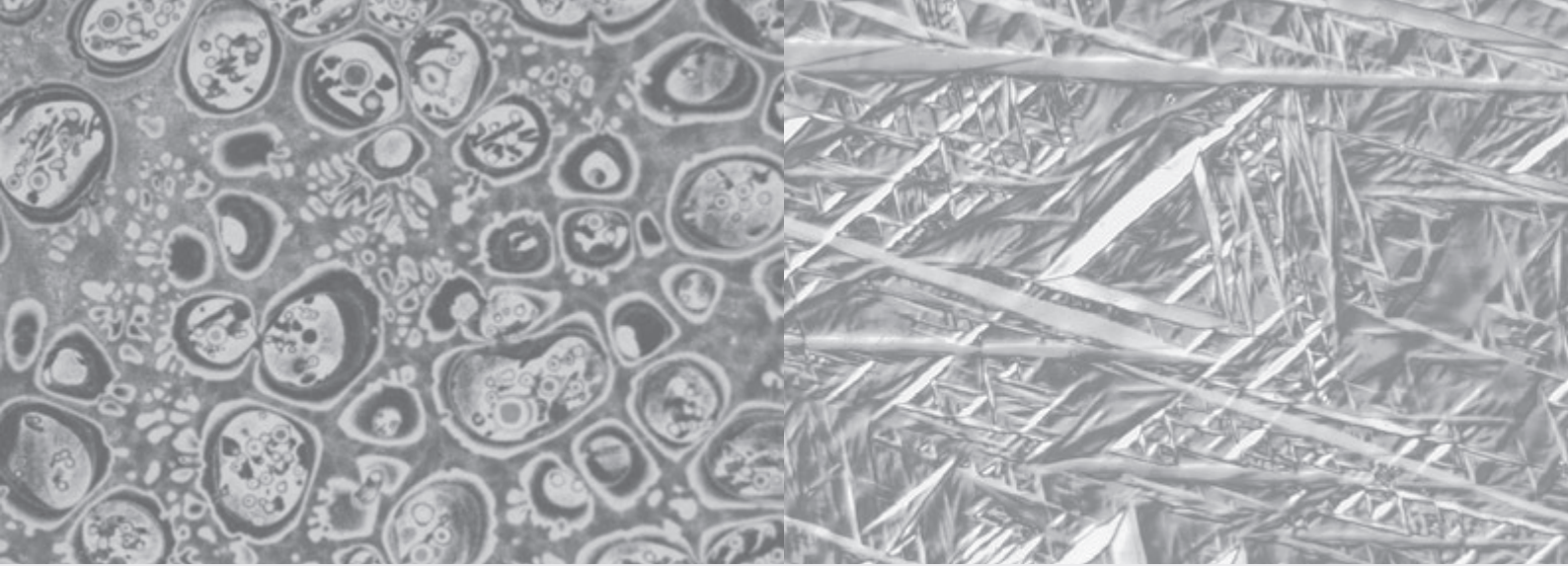
---

**Department of Materials Science and Engineering**

School of Materials and Chemical Technology

Tokyo Institute of Technology





我々、物質理工学院・材料系金属分野では、金属物理学、金属化学、金属材料学、および広く材料科学に関する世界的水準の教育と研究を行っています。金属材料は、社会基盤を支える構造材料から電子デバイスや医療デバイスを支える機能性材料まで、最も重要な工業材料としてあらゆる産業分野における科学技術の根幹を支えています。さらに、地球温暖化やエネルギー問題など、地球環境が直面する様々な課題に対して、それらを解決するような革新的な科学技術の実現は、金属材料をはじめとする材料研究やその関連技術開発が鍵を握っています。我々は、原子レベルからマクロスケールまで様々な視点をもって、計算科学による理論研究、新材料・新技術の開発、新規機能性の発現研究など、広範囲な材料研究を展開しています。

金属分野では、学部時代の専門によらず、果敢に金属をはじめとする材料研究に挑戦したいと志す皆さんに対して、材料科学の基礎力と応用力を身につけられるように、独自の系統的な教育システムを構築しています。さらに、国際的なコミュニケーション能力、研究者・技術者としての素養を磨く教育にも力を入れています。ぜひ、我々とともに学び、楽しく材料研究をしましょう！

物質理工学院・材料系 金属分野主任 多田 英司

入試情報および募集要項は右の QR コードをご覧ください。



物質理工学院 大学院説明会の日程情報は右の QR コードをご覧ください。



# 金属分野研究室リスト

(あいうえお順)

頁	役職	氏名	主コース	研究内容		居室	電話番号	QRコード
			副コース	キャンパス	ホームページアドレス	e-mail		
07	教授	稲邑 朋也	材料コース	無拡散相変態組織の構造と数理, 超長寿命形状記憶合金, 長周期 Mg 合金のキンク強化, 鉄鋼のマルテンサイト組織		J3 棟 1116 号室	045-924-5058	
			エネルギー・情報コース	横浜	<a href="http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura_tit/">http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura_tit/</a>	inamura.t.aa@m.titech.ac.jp		
08	准教授	大井 梓	人間医療科学技術コース	エネルギー材料, 生体材料, 構造材料, 電気化学, 腐食科学, 材料の環境劣化, 材料の劣化評価手法の構築		R2 棟 804 号室	045-924-5218	
			材料コース	横浜	<a href="http://www.ooi-mat.mac.titech.ac.jp/">http://www.ooi-mat.mac.titech.ac.jp/</a>	ohi.a.aa@m.titech.ac.jp		
09	准教授	河村 憲一	材料コース	固体イオニクス, 高温耐環境材料, 金属の高温酸化, センサー材料, 固体間反応, イオン伝導性材料, 固体酸化物形燃料電池		南 8 号館 305 号室	03-5734-3137	
				大岡山	<a href="http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/">http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/</a>	kawamura@mtl.titech.ac.jp		
10	教授	木村 好里	エネルギー・情報コース	廃熱から発電～熱電材料の性能と耐久性向上, 強さ・しなやかさ～耐熱合金と鉄鋼材料の強靱化, 状態図に基づく組織と格子欠陥制御による材料設計		J3 棟 1516 号室	045-924-5157	
			材料コース	横浜	<a href="http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/">http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/</a>	kimura.y.ac@m.titech.ac.jp		
11	准教授	きゅう おんてい 邱 琬婷	材料コース	金属をベースにした複合材料の設計と創成, 複合材料の表面科学, アクチュエータ・センサー材料, 機能性複合材料		南 8 号館 409 号室	03-5734-3809	
				大岡山	<a href="https://sites.google.com/view/q-research">https://sites.google.com/view/q-research</a>	chiu.w.aa@m.titech.ac.jp		
12	教授	こうだ 義弘 合田 義弘	エネルギー・情報コース	物性理論, 第一原理電子論, 磁性金属材料, 自由エネルギー, 相平衡, ナノサイエンス, 量子力学, 統計力学, スーパーコンピューター		J2 棟 1407 号室	045-924-5636	
			材料コース	横浜	<a href="http://www.cms.materia.titech.ac.jp/">http://www.cms.materia.titech.ac.jp/</a>	gohda@mct.isct.ac.jp		
13	准教授	小林 郁夫	材料コース	非鉄金属材料の材料設計と特性評価, 生体材料の開発と評価, 機能性材料の特性評価, チタン合金, アルミニウム合金, マグネシウム合金, 銅合金, 複合材料, 多孔質材料, 粉末冶金, 医療機器の国際標準化		南 8 号館 207 号室	03-5734-3139	
			人間医療科学技術コース	大岡山	<a href="http://www.satokobayashi.mtl.titech.ac.jp/">http://www.satokobayashi.mtl.titech.ac.jp/</a>	equo@mtl.titech.ac.jp		

# 金属分野研究室リスト

頁	役職	氏名	主コース	研究内容		居室	電話番号	QRコード
			副コース	キャンパス	ホームページアドレス	e-mail		
14	准教授	小林 覚	材料コース	新規耐熱鋼・耐熱合金の組織設計・高強度化, 相変態, 鉄鋼材料学, コンビナトリアル組織制御		南8号館 505号室	03-5734-3585	
				大岡山	<a href="http://steel.mtl.titech.ac.jp/">http://steel.mtl.titech.ac.jp/</a>	kobayashi.s.6b4d@m.isct.ac.jp		
22	教授	小林 能直	原子核工学コース	金属製精錬, 高温反応熱力学, 高温反応速度論, リサイクルプロセス, 不純物制御・有効活用鉄製造プロセス, 原子力安全金属工学, 材料信頼性・健全性, 過酷環境材料挙動		北2号館 328号室	03-5734-3075	
			材料コース	大岡山	<a href="https://kobayashi.zc.iir.titech.ac.jp/ja/">https://kobayashi.zc.iir.titech.ac.jp/ja/</a>	kobayashi.y.at@m.titech.ac.jp		
15	教授	三宮 工	材料コース	透過型電子顕微鏡法, カソードルミネセンス, プラズモニック材料, 光学材料, 金属ナノ材料, 収差補正, バイオセンサ		J2棟 1502号室	045-924-5674	
			エネルギー・情報コース 人間医療科学技術コース	横浜	<a href="http://www.sannomiya.iem.titech.ac.jp/">http://www.sannomiya.iem.titech.ac.jp/</a>	sannomiya.t.aa@m.titech.ac.jp		
24	教授	史 蹟	エネルギー・情報コース	薄膜工学 (物性・構造解析), 材料物性, ナノヘテロ材料		南8号館 212号室	03-5734-3145	
			材料コース	大岡山	<a href="http://www.shi-harumoto.mtl.titech.ac.jp/">http://www.shi-harumoto.mtl.titech.ac.jp/</a>	shi.j.aa@m.titech.ac.jp		
26	教授	曾根 正人	人間医療科学技術コース	マイクロ・ナノマテリアルの新規創製技術の開発および材料評価		R2棟 920号室	045-924-5043	
			材料コース	横浜	<a href="http://www.ames.pi.titech.ac.jp/">http://www.ames.pi.titech.ac.jp/</a>	sone.m.aa@m.titech.ac.jp		
16	教授	多田 英司	材料コース	材料電気化学, 腐食防食工学, 表面工学, 金属材料の環境強度評価, 電気化学反応モデリング, 電気化学センサ		南8号館 404号室	03-5734-2296	
				大岡山	<a href="http://www.elechemcorr.mtl.titech.ac.jp/">http://www.elechemcorr.mtl.titech.ac.jp/</a>	tada.e.6703@m.isct.ac.jp		
30	准教授	田原 正樹	材料コース	形状記憶合金, 無拡散構造相変態, 金属組織学, 電子顕微鏡, 医療用機能性チタン合金, 高温形状記憶合金, 金属3Dプリンティング		R2棟 916号室	045-924-5475	
			人間医療科学技術コース	横浜	<a href="http://www.mater.pi.titech.ac.jp/">http://www.mater.pi.titech.ac.jp/</a>	tahara.m.aa@m.titech.ac.jp		

# 金属分野研究室リスト

頁	役職	氏名	主コース	研究内容		居室	電話番号	QRコード
			副コース	キャンパス	ホームページアドレス	e-mail		
26	准教授	Tso-Fu Mark Chang	人間医療科学技術コース	横浜	医用センサ材料, ウェアラブルデバイス材料, 電解めっき, 金属触媒材料, 金属系複合光触媒	R2 棟 918 号室	045-924-5044	
			材料コース			<a href="http://www.ames.pi.titech.ac.jp/">http://www.ames.pi.titech.ac.jp/</a>	chang.m.aa@m.titech.ac.jp	
17	准教授	寺田 芳弘	材料コース	横浜	高温材料強度学, 金属組織制御学, 高温構造用材料, ニッケル基超合金, 耐熱マグネシウム合金, 電子顕微鏡, 高温変形, 高温材料強化機構	J2 棟 1404 号室	045-924-5630	
						<a href="http://www.terada.mat.mac.titech.ac.jp/">http://www.terada.mat.mac.titech.ac.jp/</a>	terada.y.ab@m.titech.ac.jp	
18	教授	中田 伸生	材料コース	横浜	鉄鋼材料の組織と力学特性, 相変態・析出, 強度・延索性, マルチスケール組織制御, 熱力学, 速度論, 結晶学, 転位論, マイクロメカニクス	J3 棟 1521 号室	045-924-5622	
						<a href="http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/top.html">http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/top.html</a>	nakada.n.6543@m.isct.ac.jp	
19	准教授	中辻 寛	材料コース	横浜	金属表面界面電子状態, 表面界面構造, 低次元電子物性, ナノ構造, 表面磁性, 光電子分光, 放射光, 走査トンネル顕微鏡	J1 棟 411 号室	045-924-5619	
						<a href="http://nakatsuji.mat.mac.titech.ac.jp/">http://nakatsuji.mat.mac.titech.ac.jp/</a>	nakatsuji.k@mct.isct.ac.jp	
20	教授	林 幸	エネルギー・情報コース	大岡山	溶融スラグ及び液体金属の熱物性・熱力学物性と構造, 焼結鉱の還元・溶融機構, マイクロ波加熱の高温プロセスへの利用	南 8 号館 312 号室	03-5734-3586	
			材料コース			<a href="http://hayashilab.mtl.titech.ac.jp">http://hayashilab.mtl.titech.ac.jp</a>	hayashi.m.28eb@m.isct.ac.jp	
24	准教授	春本 高志	材料コース	大岡山	水素エネルギー関連材料 (水素吸蔵合金, 水素センサ材), 薄膜工学, 相変態, 電気抵抗, 磁性薄膜, 回折結晶学	南 8 号館 213 号室	03-5734-3862	
						<a href="http://www.shi-harumoto.mtl.titech.ac.jp/">http://www.shi-harumoto.mtl.titech.ac.jp/</a>	harumoto.t.aa@m.titech.ac.jp	
28	教授	藤居 俊之	材料コース	大岡山	材料組織学, 結晶学, 材料強度学, 金属疲労, 相変態, ナノ粒子, 電子顕微鏡, 転位組織, 配線用銅合金, 超微細粒材料, 小角 X 線散乱, 放射光 X 線	南 8 号館 410 号室	03-5734-3143	
						<a href="http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/">http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/</a>	fujii.t.af@m.titech.ac.jp	

# 金属分野研究室リスト

頁	役職	氏名	主コース	研究内容		居室	電話番号	QRコード
			副コース	キャンパス	ホームページアドレス	e-mail		
30	教授	細田 秀樹	材料コース	医用・エネルギー用形状記憶・超弾性合金, チタン合金, センサー・アクチュエータとしての磁性複合材料, AIによる材料評価, 精密鋳造や3Dプリンターによる材料開発, 超臨界相変態		R2棟 914号室	045-924-5057	
			エネルギー・情報コース 人間医療科学技術コース	横浜	<a href="http://www.mater.pi.titech.ac.jp/">http://www.mater.pi.titech.ac.jp/</a>	hosoda.h.aa@m.titech.ac.jp		
21	教授	村石 信二	エネルギー・情報コース	金属の力学特性と組織, マイクロメカニクス, 非鉄金属材料, 機能性薄膜材料, Insitu-TEM 観察		南8号館 211号室	03-5734-3131	
			材料コース	大岡山	<a href="http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/">http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/</a>	muraishi.s.aa@m.titech.ac.jp		
22	准教授	安井 伸太郎	原子核工学コース	エネルギー材料, Liイオン電池, イオン伝導体, 強誘電体, 圧電体, マルチフェロイクス, 金属酸化物, セラミックス, 高品質薄膜成長, コンビナトリアル薄膜		北実験棟 2A-20号室	03-5734-3060	
			材料コース	大岡山	<a href="https://shintaroyasui.com/">https://shintaroyasui.com/</a>	yasui.s.6818@m.isct.ac.jp		
28	准教授	らい 雷 しょうぶん 霄雲	材料コース	計算材料科学, ナノ機能設計学, 格子欠陥の数理解析, マルチスケール材料応用力学		南8号館 405号室	03-5734-3260	
				大岡山	<a href="http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/">http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/</a>	lei.x.ac@m.titech.ac.jp		

材料系（金属系）研究室紹介動画もご覧ください。



# 金属分野研究室リスト

頁	役職	氏名	主コース	研究内容		居室	電話番号	QRコード
			副コース	キャンパス	ホームページアドレス	e-mail		
30	教授	細田 秀樹	材料コース	医用・エネルギー用形状記憶・超弾性合金, チタン合金, センサー・アクチュエータとしての磁性複合材料, AIによる材料評価, 精密鋳造や3Dプリンターによる材料開発, 超臨界相変態		R2棟 914号室	045-924-5057	
			エネルギー・情報コース 人間医療科学技術コース	横浜	<a href="http://www.mater.pi.titech.ac.jp/">http://www.mater.pi.titech.ac.jp/</a>	hosoda.h.aa@m.titech.ac.jp		
21	教授	村石 信二	エネルギー・情報コース	金属の力学特性と組織, マイクロメカニクス, 非鉄金属材料, 機能性薄膜材料, Insitu-TEM観察		南8号館 211号室	03-5734-3131	
			材料コース	大岡山	<a href="http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/">http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/</a>	muraishi.s.aa@m.titech.ac.jp		
22	准教授	安井 伸太郎	原子核工学コース	エネルギー材料, Liイオン電池, イオン伝導体, 強誘電体, 圧電体, マルチフェロイクス, 金属酸化物, セラミックス, 高品質薄膜成長, コンビナトリアル薄膜		北実験棟 2A-20号室	03-5734-3060	
			材料コース	大岡山	<a href="https://shintaroyasui.com/">https://shintaroyasui.com/</a>	yasui.s.6818@m.isct.ac.jp		
28	准教授	らい 雷 しょうぶん 霄雲	材料コース	計算材料科学, ナノ機能設計学, 格子欠陥の数理解析, マルチスケール材料応用力学		南8号館 405号室	03-5734-3260	
				大岡山	<a href="http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/">http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/</a>	lei.x.ac@m.titech.ac.jp		

材料系（金属系）研究室紹介動画もご覧ください。



# 物質理工学院の構成

		大学院課程（修士・博士課程）			
物質理工学院	材料系	材料コース	エネルギー・情報コース	人間医療科学技術コース	原子核工学コース
	応用化学系	応用化学コース	エネルギー・情報コース	人間医療科学技術コース	原子核工学コース

## 材料コース

### 材料が変われば世界が変わる，世界を変えるのはあなたです

これまでには存在しなかった全く新しい機能を持つ材料が見つかること、科学技術に飛躍的進歩をもたらすことができます。それが材料を研究することの魅力の1つです。材料コースでは、多様な分野から大きな夢を抱く学生を受け入れ、世界で活躍できる材料のプロフェッショナルを育てます。

## エネルギー・情報コース

### “エネルギー × 情報” の学理融合によるカーボンニュートラルとスマート社会の実現

複雑に発展したエネルギー関連技術を各系の基礎と専門性に基づいて再構造化した学問領域“多元的エネルギー学理”，さらに、多角的に発展する情報科学技術と融合させた“エネルギービッグデータ科学”の知識とスキルを修得します。常に激変する環境エネルギー問題の解決を目指し、本質を見抜く俯瞰力と洞察力、自立的な課題抽出解決力、迅速な実行力を兼ね備え、国際的リーダーシップを発揮してイノベーションを牽引できる人材を養成します。基礎となる材料系の専門分野についても深く学びます。

## 人間医療科学技術コース

### ひとの健康を守り，ひとに優しい持続的な社会の実現のために科学技術の発展に貢献する

本コースでは、地球上の全ての人々の豊かな暮らしを実現するために、人の健康や医療に関する最先端の融合的な研究開発を推進します。人に関する科学、すなわち、理工学、医歯学、看護学、医療技術学、健康科学などの専門分野を機能的に融合し、世界中の人々が持続的に発展できる安心・安全な生活基盤の構築を志向した、未来に向けた新たな学問分野の創出とその分野を担うグローバル人材を養成します。

## 原子核工学コース

### 原子核エネルギーと放射線の有効利用でカーボンニュートラル・健康社会に貢献する

カーボンニュートラル社会実現に向けたゼロカーボンエネルギーの活用、また科学の進歩で人々が健康で幸せに暮らせる社会の実現が望まれています。原子核工学コースでは、安全で安心な原子核エネルギー活用とそのシステム構築、そして放射線の活用などによりこの実現を目指し、これを支える科学・工学を研究対象とした原子核工学を体系的に学修し、また研究に取り組むことで、これらの課題に答えていきます。

# 稲邑朋也 研究室

組織の幾何学で拓く次世代金属材料

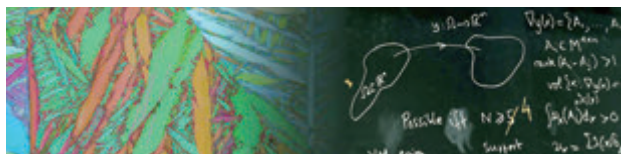


教授  
稲邑朋也



助教  
松村隆太郎

[http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura\\_tit/](http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura_tit/)



## はじめに

「Seeing is believing (百聞は一見に如かず)」——新しい事実を目の当たりにすることで得られる理解は計り知れません。一方で、「Believing is seeing」という言葉もあります。信じているからこそ見えるものがあるのです。

稲邑研究室では、電子顕微鏡など金属研究においてオーソドックスな実験手法を用いて「見る (Seeing)」を深める一方で、「信じる (Believing)」に数学的手法 (変形の幾何学) を取り入れています。材料の組織形成や変形に宿る数理は、物理現象の本質を明らかにし、新しい材料設計の原理や技術革新を生み出す強力な道具となります。

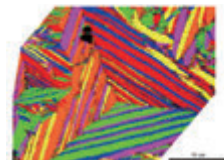
私たちの研究室では、金属物理学や金属組織学の基礎知識を土台に、数学的な理論解析、各種顕微解析、回折実験を組み合わせて、形状記憶合金、マグネシウム合金、鉄鋼を中心に研究を行っています。実験と理論のバランスは、学生の個性や興味に合わせて柔軟に調整しています。実験が得意な人、理論解析が好きな人、どちらも歓迎します。



## 研究テーマ

### 1. 超長寿命形状記憶合金 —幾何学で機能劣化を克服する—

形状記憶合金は、変形しても加熱すれば元の形状に戻る特性を持つ金属で、低侵襲医療などで広く使われています。しかし、繰り返し使用すると性能が劣化しやすいという課題があります。私たちは、機能劣化をもたらす転位が全く発生しない特殊な内部組織を実現するための「Triplet Condition」と呼ばれる新しい幾何学的条件を発見しました。この知見をもとに、超長寿命化原理を提唱すると共に、耐久性を大幅に向上させた新合金を産学共同開発しています。医療技術や環境技術の発展、新奇製品の創出を目指した研究です。

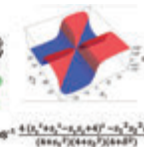
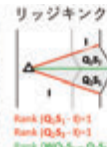
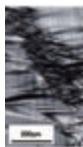


Proposition. Let  $U, V, W \in \mathbb{R}_{2 \times 3}^{3 \times 3}$  be three distinct symmetry related martensite variants and  $(\mathbf{v}, \mathbf{b}, \mathbf{m})$  is a twin between  $V$  and  $W$ . Then,  $R(V + \lambda \mathbf{b} \otimes \mathbf{m}) = U + \mathbf{a} \otimes \mathbf{n}$  has a solution  $R \in SO(3)$ , and  $\mathbf{a}, \mathbf{n} \in \mathbb{R}^3$  for each  $\lambda \in [0, 1]$  if and only if  $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b})^2 \text{col}(\mathbf{V}^2 - \mathbf{U}^2) \mathbf{m} = 0$   $\text{tr}(\mathbf{U}^2 \mathbf{V} \mathbf{V} \mathbf{U}^2) - (\mathbf{m}^T \mathbf{U}^2 \mathbf{V} \mathbf{b})^2 / |\mathbf{b}|^2 |\mathbf{U}^2 \mathbf{m}|^2 \geq 3$ .

### 2. 幾何学的強化 —キンク組織が秘める材料強化の原理—

マグネシウム合金は、比強度の高さから次世代の軽量化技術を支える重要な材料として注目されています。特に、長周期積層構造を持つマグネシウム合金は、キンク変形によって形成される特異な組織が極めて高い強度をもたらすことが知られています。しかし、その強化メカニズムは未だ十分に解明されていません。

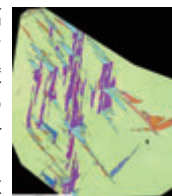
私たちは、マグネシウム合金のように塑性変形モードが限定的な材料において、変形の連続



性をもたらす拘束状態が強化機構として機能することを明らかにしつつあります。この研究では、キンク変形に伴う「回位」と呼ばれる格子欠陥が強度向上に寄与すること、さらにキンク組織がなぜ変形を妨げる障害物となるのかを、理論と実験の両面から解明します。私たちは、これらの知見を基に、キンク組織がもたらす強化機構の全貌を明らかにすることに挑戦しています。

### 3. 鉄鋼のバリエーション結合則 —次世代の高強度鋼のために—

社会基盤や環境技術に貢献する次世代高強度鋼を開発するためには、ラスマルテンサイト組織を従来以上に制御する技術が求められています。この制御を実現するためには、特定のマルテンサイト晶同士が結合する性質「バリエーション結合則」を理解し、ラス組織形成の原理を明確化することが不可欠です。私たちは、バリエーション結合で生じる幾何学的不適合性に基づいてバリエーション結合則を統一的に捉える理論的枠組みを構築し、それに基づき、ある種のバリエーション結合が、ラスマルテンサイト組織の階層構造のスケールを決めていることを明らかにしつつあります。この研究は鉄鋼メーカーと共同で進めており、未来の社会を支える高強度鋼のために、さらなる技術革新を実現することを目指しています。



## 研究室の運営体制、卒業生の就職先



当研究室は細田・田原研および菅根・Chang研と一部の設備を共有し、合同ゼミやイベントを通じて広い視野を育む環境を提供しています。2026年度は教員2名、事務支援員1名、実験補佐員1名、修士

課程6名、学部生1~2名、研究生1名で活動予定です。卒業生は産業界や学術界で活躍しています。

学会活動：日本金属学会、日本鉄鋼協会、軽金属学会など  
卒業生の就職先：

NTT、三菱重工、東京工業大学、キオクシア、大日本印刷、野村総研、日本冶金、SUBARU、JR東日本、神戸製鋼、日本製鉄、JFEスチール、三菱マテリアル、日産自動車、本田技研工業、トヨタ自動車、武蔵エンジニアリング、神戸大学、東京都庁、リクルート、博報堂、丸紅

稲邑研究室は、変形や組織の幾何学と実験を融合させた独自のアプローチで、金属材料の新しい可能性を切り拓きます。材料科学への情熱を持つ皆さんと共に、新しい知見を生み出し、未来社会を支える研究に挑戦したいと考えています。興味をお持ちの方はぜひ気軽にご連絡ください！

# 大井 梓 研究室

金属材料の溶解劣化機構解明に立脚した材料開発を目指して



准教授  
大井 梓

<http://www.ooi-mat.mac.titech.ac.jp/>

## はじめに

金属材料は、強度・延性・展性・電気伝導性・熱伝導性などに優れているため、用途に応じて様々な分野で使用されています。しかし、金属材料はその使用環境下において、材料表面で起こる溶解（腐食）反応により徐々に劣化し、優れた特性を失ってしまいます。したがって、金属材料の溶解機構を解明することは限られた資源の有効活用を可能とし、地球環境の保全につながります。

我々の研究室では、材料の種類（鉄鋼材料から非鉄材料まで）・材料の規模（ナノサイズの触媒から橋梁などの大型構造物まで）・使用される環境（エネルギー分野・インフラ分野・医療分野）を問わず研究対象としています。対象は様々ですが、溶解劣化機構の解明をキーワードに、材料が抱える様々な社会課題の解決に取り組んでいます。

## 研究室について

大井研究室は、2024年4月に発足した新しい研究室です。発足したばかりですので、今後の研究室を支えていくメンバーを募集しています。研究室では、学生が主体性・自立性および論理的思考力を養えるように、学生と教員との双方向コミュニケーションを意識しています。また、得られた研究成果の学会発表および学術誌への投稿を積極的に行います。

## 研究テーマについて

### 1. 固体高分子形燃料電池用電極触媒の耐久性に関する研究

家庭用および自動車用電源として開発が進められている固体高分子形燃料電池（図1参照、PEFC）は、究極のクリーンエネルギー変換装置として実用化が期待されています。しかし、実用化のためには、電池製造にかかるコストを下げることに、さらに電池材料の長寿命化が必要不可欠であります。特に、電極材料の製造コストは、単セルコスト全体の約40%も占めるため、安価・高触媒活性・長寿命な電極材料の開発が急務になっています。我々の研究室では、PEFCの正極触媒として使用されるPt合金触媒の溶解劣化機構の解明、電極反応機構の解明、Pt使用量を低減したPt合金触媒の開発などの基礎研究を活発に行っています。

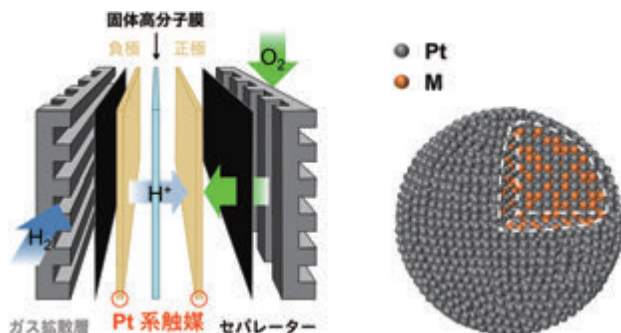


図1 固体高分子形燃料電池の模式図（左）とコアシェルPt-M合金系電極触媒の模式図（右）

### 2. ナノスケールでの金属材料の溶解機構解明に関する研究

金属材料の溶解速度を定量評価する技術は、その溶解機構解明や寿命予測を可能にするため、高耐久性を有する材料設計に有益な情報を資するものであります。しかし、溶解劣化がナノから原子レベルで進行しますと、そもそもその検出は極めて困難といえます。我々の研究室では、触媒材料・生体材料・構造材料を対象に、電気化学測定法（図2）・溶液分析法・電子顕微鏡法（図3）・数値シミュレーション技術を活用して、材料の使用環境下におけるナノスケールでの溶解劣化過程のモニタリング技術開発に取り組んでいます。また、これら技術を適用して得られた結果を基に、高耐食性材料開発指針の提案や防食技術の確立を目指しています。

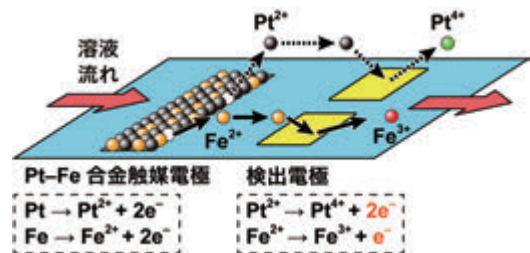


図2 チャンネルフローマルチ電極法による溶解金属イオンのin-situ検出

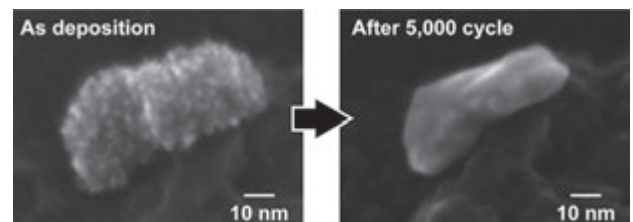


図3 走査型電子顕微鏡を用いたナノ粒子の溶解劣化前後の同一視野観察結果の一例：溶解劣化前（左）と溶解劣化後（右）

### 3. 鉄鋼材料の土壌腐食に関する研究

近年、省資源・省エネルギーの観点から鉄鋼材料の長寿命化が求められています。また、我々の社会生活を支えるインフラ構造物の老朽化も社会問題となっています。特に、土壌に埋設された鋼管杭やコンクリート内部の鉄筋は腐食により重大な事故につながる可能性があります。目視でその劣化状況を確認することは困難といえます。このように直接見えない部分に使用される材料の信頼性担保および長寿命化を実現するために、我々の研究室では電気化学測定法を駆使した、腐食モニタリング技術の開発に取り組んでいます。

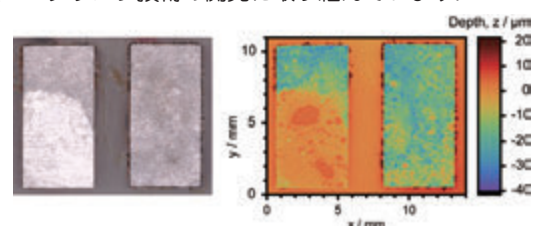


図4 土壌埋設試験後の腐食モニタリング電極の光学顕微鏡像（左）とワシショット3D形状測定機による腐食深さの解析結果（右）

# 河村憲一 研究室



准教授  
河村憲一

熱さに負けない金属の美肌の追求

<http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/>

## はじめに

暑い夏、太陽の紫外線によって人の肌は日焼けして黒くなり、日差しに対して強くなります。ところが、上手に日焼けしないと水ぶくれなどができてしまいやけどしたのと同じことになってしまいます。ところで、金属光沢のあるフライパンを空焼きすると表面がさびて色が付きます。良い「さび」を作ることができると、料理が焼き付かなくなるだけでなく、「さび」が空気を遮断して金属素地がやせ細っていくのを遅らせてくれます。高温で使われる大部分の金属材料は、エネルギー変換に関わるものなので、この「さび」を制御することがエネルギーの有効利用につながります。本研究室では、高温での「さび」の生成・成長過程を明らかにすることで、その機構解明、新材料開発を行っています。また、「さび」は金属が酸化した金属酸化物です。この金属酸化物の高温での特性を利用した機能性材料の開発も行っています。

## 研究について

当研究室では、「エネルギーと地球環境の未来のために」を標榜し、高効率なエネルギー変換に必要とされる材料や、運用に必要な基礎的データに関する研究を行っています。研究の対象は、「高温で使用される金属およびセラミックス」です。これらを高温環境で長く使用できるようにするため、金属とセラミックスの高温における機能性とその制御を高温固体化学、結晶格子欠陥などの立場から研究しています。

実験データの信頼性は、測定者が装置をどれだけ理解しているかに大きく依存します。当研究室では自分の測定装置は自分で作ることを基本とし（図1）、原理原則から自分のやっている測定を理解できるようにしています。



図1 実験室の風景。ハンドメイドの実験装置。

## 研究テーマについて

### 1. 金属の高温酸化に関する研究

金属材料は、高温の大気環境下などでは、表面が酸化され、徐々に金属としての部分が無くなっていきます。当研究室では、金属材料が高温で酸化する過程（酸化機構）をより詳細に解明し（図2）、耐酸化特性の観点から高温の大気環境下でより安定に使用できる耐熱合金の設計指針を提案しています。

### 2. 固体酸化物燃料電池に関する研究

燃料電池は、環境負荷の少ない発電システムとして注目されています。当研究室では、燃料電池の中でも最も高温で動作する固体酸化物型燃料電池(SOFC)に関する研究を行っています（図3）。SOFCにとって重要な構成部材である「合金インターコネクト」に特化し、使用環境における耐酸化特性を評価しています。

### 3. 熔融金属用酸素センサに関する研究

核燃料サイクルなどで発生する高レベル放射性廃棄物の最終処分の負荷低減のため、放加速器駆動核変換システム(ADS)の研究開発がすすめられています。ここで冷却剤として用いられる熔融金属と配管との間の反応を抑制するためには熔融金属に含まれる酸素の濃度を制御する必要があります。この制御に必要な酸素センサを高信頼性という観点から開発しています。



図2 雰囲気制御型高温酸化皮膜表面酸素ポテンシャル測定装置。高温ガス環境下における金属材料表面に形成する酸化皮膜表面の酸素の状態を観測する装置。酸化現象の本質に迫ります。

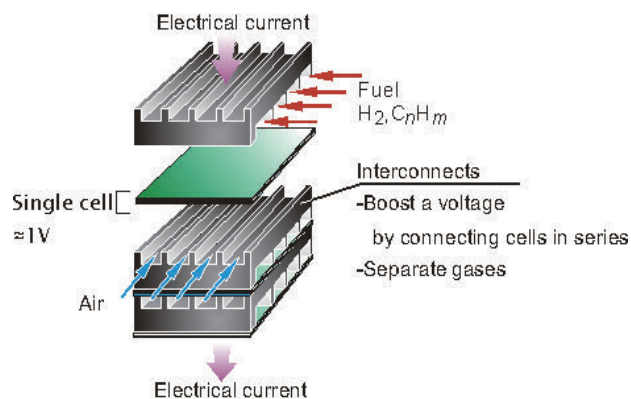


図3 固体酸化物燃料電池の概略。燃料電池の大容量化に欠かせない合金インターコネクト。高温における耐酸化性、電気伝導性など様々な特性が要求されます。

# 木村好里 研究室

地球環境に優しい金属材料の機能特性デザイン



教授  
木村好里



助教  
王 益彦

<http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/>

## はじめに

エネルギー変換材料としての金属材料にフォーカスして、材料科学と工学の分野から地球環境保全に貢献できることを研究室メンバーみんなで一緒に考え、真剣かつ楽しく研究に励んでいます。木に年輪があり織物に縦糸と横糸があるように、金属材料の内部には外見からは想像できないほど複雑な「組織＝微視的構造 (microstructure)」があります (下図：研究例)。原子が規則的に整然と並ぶ結晶構造には乱れた不完全部分として種々の格子欠陥や相界面がたくさん含まれており、組織を構成しています。機能特性に優れた金属材料を設計して創製するためには組織、相界面、格子欠陥を巧みに制御することが大切です。材料の飛躍的な性能向上を目指すことはもちろん、信頼性と耐久性の改善、環境低負荷に配慮した合金系の選択、省エネルギー型作製プロセスの開発にも挑戦しています。

## 1. 熱電材料 — 未利用の熱を電気に直接変換 —

産業活動、日常生活、自然界を通じて地球には様々な形態と規模で未利用の熱が存在します。温度差 (Seebeck 効果) で発電する熱電発電は熱を電気に変換できるクリーンな技術です。有毒元素や希少元素を含まない環境に優しい熱電材料として TiNiSn に代表される Half-Heusler 化合物、 $\beta\text{FeSi}_2$  や  $\text{Mg}_2\text{Si}$  に着目しています。例えば Half-Heusler 型規則構造の空孔サイトに元素を優先的に固溶させ、バンド構造制御により  $n-p$  特性変換を制御します。バンド構造は、材料の電子構造によって決定されるため、放射光施設 “SPring-8” での光電子分光測定も計画中です。その他、(Zr,Ti) NiSn と  $\text{Mg}_2(\text{Si},\text{Sn})$  では固相 - 固相分離を利用することで相界面を導入し、フォノン散乱源として利用することで熱伝導低減を目指しています。 $\beta\text{FeSi}_2$  では急冷凝固や酸化還元反応焼結などの作製プロセスに工夫を重ねて組織を制御します。本格的な実用化には性能だけでなく安定性と耐久性の向上が重要です。

## 2. 耐熱合金・鉄鋼材料 — 強さ、しなやかさ、信頼性 —

実用耐熱合金の改善や代替高融点材料の開発によりエネル

ギー変換効率を向上すれば、省エネルギーと環境保全に貢献できます。相反する関係にある強度と延性を組織制御により両立できれば強靱な材料が実現できます。実用 Ni 基超合金の強化相  $L_{12}$  型  $\text{Ni}_3\text{Al}$  と似て非なる  $E_2'$  型  $\text{Co}_3\text{AlC}_{1-x}$  では、C 原子を規則化させた  $E_2'$  型  $\text{Co}_3\text{AlC}_{0.5}$  に結晶構造を制御して高強度と延性が両立できます。規則化に伴い形成する逆位相領域 APD は変形能だけでなく磁気特性を制御する因子としても働きます。ステンレス鋼のように機能性を兼ね備えた構造材料の設計では、母相の回復再結晶と共存相の析出が競合する組織制御により機械的性質と機能性をバランスさせます。

## 3. 相平衡と相安定性 — 物質と材料の地図「状態図」 —

金属材料の機械特性や機能特性を決定づける組織は熱処理により制御でき、一方で組織は温度と時間に依存して変化します。材料設計において、どのような組織制御が可能であるかを把握するためには、あるいは使用中の組織変化を予測するためには、物質と材料の地図である『状態図 phase diagram』が貴重な情報源となります。実験で観察している現象は必ずしも平衡状態で進行せず、元素の拡散や界面を介する反応の速度によって律速されます。行き先を知るための平衡論と併せて、現象の経路や機構を理解するために速度論を考慮します。上述した熱電材料、耐熱合金、鉄鋼材料の設計、創製、作製プロセス開発のために、必要とあれば実験によって状態図を構築します。

## おわりに

学生が主役となって自ら考えて研究を切り拓いていくための想像力と創造力を木村研では大切にしています。コミュニケーションという心のキャッチボールを積極的に行って、研究室における信頼の強い絆を構築できればと願っています。成功を目指して、失敗を恐れず糧にして、たくさんの経験を積みましょう。木村研というチームで仲間と一緒に充実した濃密な時間を過ごしながらか成長し、社会へ、世界へ、未来へ力強く羽ばたいてください。

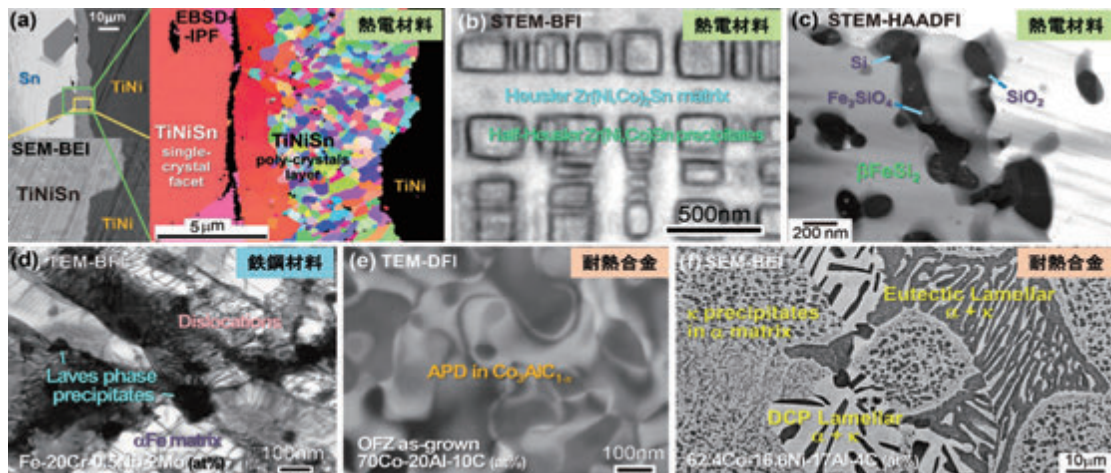


図 (a) TiNi/Sn 固液界面での Half-Heusler TiNiSn 多結晶層と単結晶 facet の形成, (b) Heusler  $\text{Zr}(\text{Ni},\text{Co})_2\text{Sn}$  母相と Half-Heusler  $\text{Zr}(\text{Ni},\text{Co})\text{Sn}$  析出, (c) 共析 Si と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の酸化還元焼結による  $\text{SiO}_2$  分散  $\beta\text{FeSi}_2$  複相組織, (d) 強加工  $\beta\text{Fe}$  母相結晶粒界と粒内に析出する Laves 相 ( $\text{Fe},\text{Cr})_2(\text{Nb},\text{Mo})$ , (e)  $E_2'$   $\text{Co}_3\text{AlC}$  単結晶の逆位相領域 APD, (f) 三形態共存の二相組織:  $\alpha\text{Co}$  母相と  $\kappa$ - $\text{Co}_3\text{AlC}$  析出, 共晶ラメラ, 不連続析出 DCP ラメラ。

# 邱琬婷 研究室

パズルを解くように材料の複合化をデザインしましょう



准教授  
Wan Ting CHIU

<https://sites.google.com/view/q-research>

## はじめに

複合材料は紀元前のエジプトから利用されており、藁と泥でピラミッドの煉瓦を作りました。現代の最先端技術では、巨大なロケット、飛行機等の機械からミクロスケールのアクチュエータ、センサー等も色んな種類の複合材料で構成されています。複合材料は遠い昔から現代まで大幅に応用されており、重要な材料といえます。

しかし、複合材料の創成には材料自身の微細構造・形、材料同士のバランス等の要素を考えないといけません。したがって、複合材料の機械特性・機能性等を向上するために、材料の設計が重要です。また、材料を組み合わせた後、材料間では界面が存在します。その界面は材料の性能に影響を与える大きな因子の一つです。さらに、ナノ材料の場合は、材料の機能性が材料表面の性質によって大きく変化します。

本研究室では、複合材料の設計・創成から材料の機械特性・機能性等の評価まで行っています。材料間のバランスをとり、材料表面特性を制御することによって、足し算ではなく掛け算のように複合材料の機械特性・機能性等を向上し、新たな複合材料を研究開発します。

## 研究テーマについて

### 1. 金属ナノワイヤー /PDMS 複合材による柔軟的電極

金属ナノワイヤー (metallic nanowires) /PDMS 複合材は、高い電気伝導性を有する金属ナノワイヤーと、優れた柔軟性・透明性を示すポリジメチルシロキサン (PDMS) を組み合わせた次世代型の透明導電材料です。本複合材料では、ナノワイヤーが形成する三次元的な導電ネットワークにより低シート抵抗と高光透過率を同時に実現できます。また、PDMS 基材の高い伸縮性により、曲げや引張といった外力が作用する状態においても導電特性の低下が抑制され、高い機械安定性を維持する点が特徴です。これらの特性から、本材料はフレキシブルディスプレイ、ウェアラブル電子デバイス、ソフトロボティクス、および皮膚貼付型デバイスなど多岐にわたる応用展開が期待されています。当研究室では、本複合材における材料設計および表面特性の解析を重点的に進めており、構造・特性相関の解明を通じ、高性能かつ信頼性に優れた次世代スマート材料の創出を目指しています。

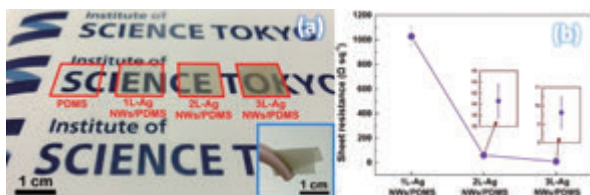


図1 金属ナノワイヤー /PDMS 薄膜複合材料の (a) 透明性と柔軟性および、(b) 導電性の評価

### 2. 磁場駆動可能な Ni-Mn-Ga 単結晶粒子で構成された複合材料

熱で形状変形する材料は良くアクチュエータ・センサー等の材料として使用されています。しかし、熱伝導が材料の動作速度を制限しているため、材料の動作速度が遅いという課題が知ら

れています。そこで、本研究では磁場で形状変形を駆動できる複合材料を開発しています。「Ni-Mn-Ga 単結晶粒子とシリコンゴム」を複合化し、さらに、材料をキュアリングするときに磁場を印加することによって、複合材料の3D微細構造を制御できました(図2)。シリコンゴムとの複合材料以外にも、「Ni-Mn-Ga 単結晶粒子とCu薄膜」の複合材料も開発しています。Cuとの複合材料はアクチュエータ材料以外にも、ヨーロッパでは盛んに研究開発している磁気冷却の材料にも適用できます。複合材料の創成後、磁場印加によって複合材料を変形させ、アクチュエータ材料として実用できるかどうか評価も行っています。

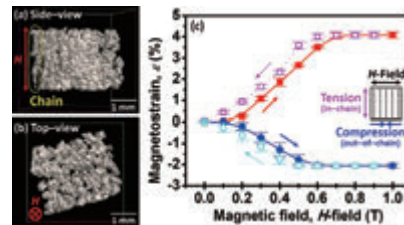


図2 Ni-Mn-Ga 単結晶粒子 /シリコンゴムの複合材料の (a) サイドと (b) トップビュー  $\mu$  CT 像、および (c) 外部磁場印加による変形挙動 (磁場  $\perp$  粒子チェーンは伸び、磁場  $\parallel$  粒子チェーンは縮み)

### 3. 磁場印加で機械特性調整可能な磁気粘弾性エラストマー複合材料

Fe 粒子または Fe 粒子をベースにした材料 (例: Carbonyl iron particles (CIPs); カルボニル鉄粉) とエラストマーとの複合材料は、磁場印加による材料の機械特性を調整できるスマート材料と知られています。その機械特性調整可能な現象は MR 効果 (Magnetorheological effect) と呼ばれています。従来、外部磁場の印加で、Fe 粒子のアライメントとしないと、MR 効果が出ないという問題点があります。カルボニルコーティング (Carbonyl coating) が MR 効果を悪化するという課題もあります。本研究では、アライメントせず、簡易な手法で、「純 Fe マイクロ粒子 /シリコンゴムの複合材料」を合成し、MR 効果を成功に観察できました。それぞれ、9%、16%、23%、および 30% 体積分率の試料を創成し、約 39% の相対 MR 効果が観察できました (図3)。

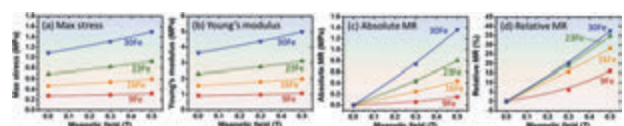


図3 Fe マイクロ粒子 /シリコンゴムで構成された複合材料がそれぞれ磁場印加した時の (a) 最大応力、(b) ヤング率、(c) 絶対 MR 効果、および (d) 相対 MR 効果

## おわりに

上でご紹介したとおり、当研究室は金属をベースにした複合材料の設計開発とそれらの表面科学を評価・分析しています。複合材料の設計・表面科学とそれらの性質の評価に興味のある学生を歓迎します。自分で新材料を設計開発したい・国際雑誌に研究成果を発表したい意欲のある学生を歓迎します。当研究室は多様な分野から学生および世界中の留学生を受け入れています。

# 合田義弘 研究室

第一原理物性理論：計算機の中に物質をつくる

<http://www.cms.materia.titech.ac.jp/>



教授  
合田義弘



特任助教  
田中友規

## はじめに

物質・材料の原子配置や特性の多くは、電子の状態によって微視的に決定されています。電子状態を、実験的・経験的パラメーターによらず、量子力学・統計力学の基本原則と素電荷や Planck 定数といった基礎物理定数のみから求める理論が第一原理電子論です。我々の研究室は、コンピューターの中で仮想的に物質を作り、その性質を調べる事により、単に実験結果を説明するだけでなく、まだ行われていない実験の結果を予測し、あるいはまだ作られていない未知の物質・材料を理論的にデザインする事を目指しています。

## 研究について

当研究室では、磁性材料・構造材料からナノテクノロジーの基礎となるナノ構造までの多彩な対象をターゲットとして、「富岳」や TSUBAME 等の学内外のスーパーコンピューターを活用した大規模な第一原理計算を実行しています。電子状態理論の適用限界を広げるための手法開発も行っており、また物質探索ではグラフニューラルネットワークや Bayes 最適化などの機械学習も活用しています。当研究室では、良い研究結果を得た学生は修士 1 年の段階からアメリカなどでの国際学会で成果を発表し、修士 2 年次では国際的な学術雑誌に結果を公表しています。

## 研究テーマについて

### 1. 磁性金属材料

ロボット用モーターや風力発電タービン等の高温環境で用いる永久磁石材料を、希少元素を使わずに開発する指針を得るために、電子論に基づく有限温度磁性の評価手法開発や、高い磁気特性と構造安定性を両立する新物質探索を行なっています。これまで、新手法によってスピンフォノン結合の効果を考慮すると、格子振動により常磁性状態が安定化し(図 1)、鉄の理論的な Curie 温度が 500 K 以上変化することを明らかにしました [npj Comput. Mater. 2020]。

現在の磁気デバイスは電流によって磁気状態を制御しており、Joule 熱によるエネルギー散逸による消費電力の増加が問題となっています。一方、マルチフェロイク界面と呼ばれるナノ界面構造では、電流によって磁性を制御することができ、その実用化が期待されています。その様なデバイスの動作効率を最大化するための、材料設計や磁気特性制御機構の解明を行なっています [npj Spintronics 2025]。

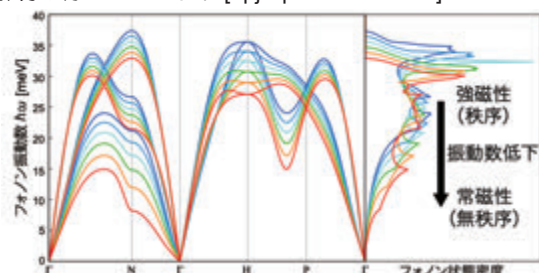


図 1：スピンフォノン結合による bcc Fe におけるフォノン振動数の磁気秩序依存性 [npj Comput. Mater. 2020]。

### 2. 自由エネルギー・相平衡と材料組織設計

構造材料と磁性材料では、結晶構造の異なる複数の相から構成される材料組織の効果が非常に重要です。材料組織の設計のためには、材料を構成する相の熱平衡を多元系状態図から理解することが必要ですが、状態図の作成は各相の自由エネルギーを評価することにより可能となります。我々は、Gibbs 自由エネルギーを第一原理電子論により定量化する手法を開発し、航空機のジェットエンジンのタービンで用いられる Ti-Al 基耐熱合金(図 2)や希土類永久磁石材料(Nd-Fe-B, Sm-Fe-Cu)など、様々な金属材料に応用しています。特に、電子スピンフォノン結合を取り入れる手法開発に取り組んでいます。

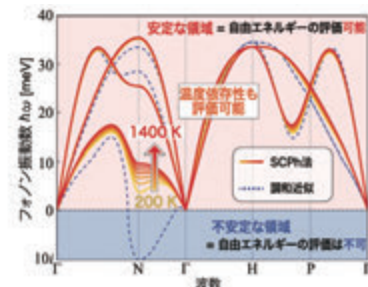


図 2：Ti-Al 合金高温相である  $\beta$  相 (bcc 不規則相)  $Ti_{0.625}Al_{0.375}$  における調和近似およびセルフコンシステントフォノン (SCPh) 法による有効フォノン分散の温度依存性。

### 3. 表面・界面におけるナノ構造物理

電子デバイスにおいて、素子のサイズがナノスケールまで微細化されると、材料内部だけでなく表面・界面の効果や量子効果が無視できなくなってきます。特に、表面・界面では物質内部には無い物性が現れる事があり、例えば Bi の様な原子番号の大きい重元素を含むナノ構造では、ポテンシャル勾配と相対論効果が組み合わさる事により、特異なスピン状態を取る事があります(図 3)。その様な新奇な物理現象に対して、第一原理計算から理解を深化させ、その背後にある普遍的な法則を見出す事を目指しています。

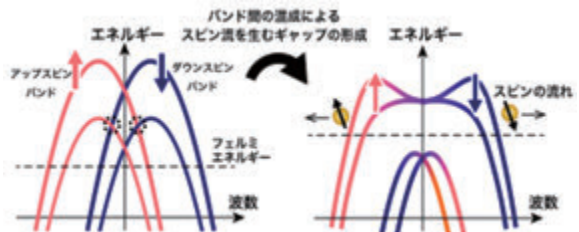


図 3：Rashba 効果を活用したスピン流生成原理の概念図 [PRB-Rapid 2018]。

## メッセージ

興味をもたれた方は気軽に合田まで詳細をお問い合わせ下さい。研究室所属の際には基礎的な量子力学・統計力学を習得している事が望ましいですが、プログラミング言語は必要になった時に身につければ良いでしょう。

# 小林郁夫 研究室

機能性材料で築く 環境と社会とくらし

<http://www.satokobayashi.mtl.titech.ac.jp/>



准教授  
小林郁夫

## はじめに

様々な特性を有する機能性金属材料は、現代社会のいろいろな場面で活躍しています。優れた機能を発揮する材料を設計するためには、相安定性、熱力学、結晶学などの材料科学の基礎的な知識の上に、形状付与や熱処理などの加工プロセス、組織制御などの技術を積み重ねて、その結果得られる種々の機能特性を評価することが必要です。当研究室では、チタン合金、アルミニウム合金、マグネシウム合金、銅合金、複合材料などを開発し、それぞれの用途に応じた特性評価を多角的に行っています。こうして生み出された新しい材料は、生体材料、輸送機器用材料、電子機器用材料などとして、豊かな現代社会の構築に貢献することが期待されています。

## 研究テーマについて

### 1. 低弾性率型生体材料の開発

骨などの硬組織に接合して用いるインプラント材料の弾性率は、骨のそれ（10～30GPa）に近いことが求められています。これは生体骨とインプラント材料の間の弾性ミスフィットに基づく応力遮蔽（stress shielding）による骨形成障害を防止するためです。多くの生体用金属材料の中で、純チタンの弾性率のもっとも低く、およそ100GPaです。これにニオブなどの元素を添加したβ型チタン合金（図1）では、その結晶構造に由来して、およそ80GPaまで低下することが知られています。当研究室では、チタンよりもさらに弾性率の低いマグネシウムの実用化に向けた取り組みを進めるとともに、チタン合金の多孔質化、単結晶化と方位制御など、様々なアプローチによって生体金属材料弾性率のさらなる低減を進めています。Ti-Zr-Nb合金単結晶ではおよそ40GPaという低弾性率を達成しました。



図1 生体用β型Ti-Zr-Nb合金中に成長したウイドマンステッテン組織。幾何学的な組織が美しい

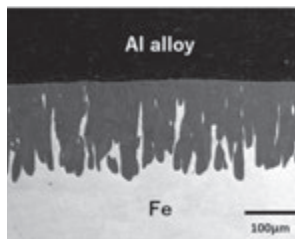


図2 固相鉄と液相Al合金の界面の組織。界面で生成している金属間化合物が固相の鉄に向かって成長するのが面白い

### 2. 異種金属間の接合と接合界面での反応拡散

CO<sub>2</sub>や排ガス規制は各国・地域で徐々に厳しくなっているため、自動車メーカーは環境規制への対応に向けて、パワートレイン技術の改良に止まらず、軽量化技術の開発も進めています。自動車軽量化に当たっては、自動車重量の約7割を占める鉄鋼材料に代替可能なアルミ合金など軽量素材の使用比率が増加する見通しであり、このようなマルチマテリアル化の過程では、単なる材料置換に止まらず、「鉄+アルミ」など複数の素材を適材適所で使い分けるための異種材料接合

技術が必要です。鉄鋼とアルミ合金などの異種金属間接合法として、反応拡散を用いた液相拡散接合法を開発し、図2のように鉄鋼とアルミ合金の固相/液相の接合界面で生成する金属間化合物の速度論的成長挙動や組織的な形成過程を実験的に観察し、化合物層の成長に対する律速過程を解明するために様々な分析や解析方法を用いて研究を行っています。また、異種金属間反応拡散による接合法は電子デバイスの実装技術から耐熱合金の接合まで幅広く応用されています。このような接合界面では、各元素の拡散速度の差によりKirkendallポイドが生成します。このようなポイドは接合部の機械的信頼性に影響を及ぼすため、理論的な計算による生成量の定量化や添加元素や組織制御により抑制する研究を行っています。

### 3. アルミニウム合金・銅合金・マグネシウム基複合材料の組織制御

航空宇宙用、高速車両用、建築用ならびに電子機器用の軽量で高強度・高靱性のアルミニウムの開発や、強度と高導電率をかねそなえた新しい銅合金の開発を進めています。これらの合金では、時効析出現象を利用して強度を高めることが有効です。時効した試料は、電子顕微鏡観察、3次元アトムプローブ、熱分析、電気伝導率測定、硬さ測定などの手段で、多角的に評価しています。

また、高強度マグネシウム合金の開発を目指し、マグネシウム粉末と遷移金属粉末を利用した粉末冶金法によってマグネシウム基複合材料（図3）を開発しています。マグネシウムと遷移金属との反応を利用して、軽量で高強度な複合材料の開発に成功しました。

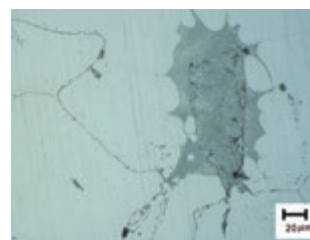


図3 マグネシウム母相（明るい色の部分）の間に生成した多相金属間化合物（暗い灰色の部分）。母相と金属間化合物との密着性が高いため、強化相としての効果が高い

### 4. 先端型医療機器材料の開発と評価

近年、次々と開発導入された新しい医療技術や医療機器には、高度な機能性をもつ新しい生体材料が求められています。新しい医療技術の一つとして、先端付近に電極のついたカテーテルを心臓内に挿入し、不整脈の原因となっている心筋組織を焼灼して不整脈を治す、カテーテルアブレーションという治療法が注目を集めています。このカテーテル電極には、強さ、延性、加工性などの力学的特性に加え、電気伝導性、X線透視下での視認性など、様々な機能性も求められています。我々の研究室ではジルコニウムとハフニウムを主成分とする新しい合金を開発し、アブレーションカテーテル電極材料に必要なとされる特性評価を行っています。

# 小林 覚 研究室

2050 年脱炭素化実現に向けた  
耐熱金属材料の信頼性評価と新材料設計

<http://steel.mtl.titech.ac.jp/>



准教授  
小林 覚

## 研究・専門分野

当研究室では、火力発電・航空機エンジン用耐熱金属材料の評価・高性能化に関する研究を行っています。2050 年脱炭素化実現に向けた最近の世界的な動向を受け、3つの方向軸を持って研究を進めていきます。一つ目は、H<sub>2</sub>・NH<sub>3</sub>等のクリーン燃料を利用する際に生じる耐熱部材の材質変化・劣化を評価し、材料設計に活かす研究です。耐熱鋼、ステンレス鋼、Ni基の材料を対象としています。二つ目は、火力発電プラントに使用される耐熱鋼のクリープ・クリープ疲労損傷評価・低減技術構築に関する研究です。変動性再生可能エネルギーの出力調整のために、火力発電では数時間から数日の間隔で起動と停止を繰り返す負荷変動運転が増加し、また、火力発電の新設が難しい状況から、発電プラント用耐熱部材の経年劣化・損傷評価が以前に増して重要となっている背景を受けた研究です。三つ目は、発電・エンジンの高効率化に必要な耐熱材料の高温化・高性能化を目指した研究です。脱炭素化を達成しても機器の効率や性能が失われてしまうと技術力・競争力が落ちてしまいますので引き続き重要な課題です。Fe、Ni基合金を対象とした研究を行っています。

当研究室の専門分野は、金属材料の機械的特性を決める微細構造（以後、組織と呼ぶ）を制御する「組織制御」という分野です。組織を中心に化学組成・プロセス・使用環境・特性との関係を、平衡論(状態図)、速度論(相変態)、結晶学(構造解析)、強度学(変形機構)に基づき追及しています。



図1 当研究室の専門分野

## 研究トピック・テーマ

### 1. 高温水素環境における耐熱金属材料の材質変化評価

脱炭素化社会の実現には、エネルギー貯蔵媒体から製造において原料としての水素利用が不可欠であり、製造から輸送・発電・内燃機関・水素製鉄等にかかる技術の成否が鍵を握ると言われています。水素技術は、供給・価格の懸念により現状では懐疑的な意見もありますが、2030年以降必要な技術となり、今から課題抽出・調査を進める必要があります。

グリーン水素製造法として期待されている固体酸化物型水電解装置やメタン直接熱分解、アンモニア分解型水素燃焼ガスタービン、水素還元製鉄等では、高温水素環境が生じます。

高温水素環境での材料損傷は「高温水素損傷」と呼ばれ、脱炭(図2参照)やクリープ変形が助長される現象が生じます。

この分野は石油精製・化学プラントで長年調査されてきましたが、上記設備で想定される高温条件と材料をカバーできていません。当研究室では、ステンレス鋼やNi基合金において高温水素環境での材質挙動を静的・クリープ試験により調べる研究に着手しています。

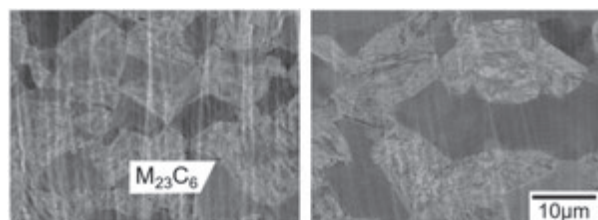


図2 高温水素環境下で生じたステンレス鋼の脱炭現象：  
試料内部(左)、試料表面(右)：炭化物が消えている

### 2. 火力発電プラント用耐熱鋼・合金のクリープ疲労損傷評価・低減技術構築

脱炭素化に向けた流れにより、変動性再生可能エネルギーが増え、その出力を調整するために火力発電は数時間から数日の間隔で起動と停止を繰り返す負荷変動運転が増加しています。このような条件で火力発電が操業されると、主蒸気管のヘッダー等の耐熱部材にはクリープ損傷に加えてクリープ疲労損傷が生じることが強く懸念されています。また、火力発電の新設が難しくなっている背景を受け、プラント・材料の経年劣化・損傷評価は以前に増して重要な課題となっています。材料は高温(融点(絶対温度)の3割以上)では、弾性変形程度の低い応力でも時間依存型の変形(クリープ)を生じます。耐熱部材の損傷は、火力発電がベースロードで運転される場合には主にクリープですが、起動・停止を繰り返す負荷変動運転ではクリープと熱疲労の両方が生じるクリープ疲労になります。このような背景を受け、耐熱鋼のクリープ変形に及ぼす応力変動の影響を調べる研究に着手しています。また、熱疲労は、材料の熱膨張・収縮に起因するため、熱膨張係数を抑えた耐熱金属材料の創製・設計にも挑戦しています。

### 3. 航空機エンジン・次世代ガスタービン用新材料創生と高性能化

ジェットエンジンや火力発電のガスタービンでは、Ni基合金が主に使用されています。ガスタービンの熱効率、その高温部の高温化により向上するため、高温部材の耐熱化が従来からの重要課題となっています。高温部材としては第一段タービンブレードに使用されている単結晶合金が目立っていますが、ブレードを支えるタービンディスク材の耐熱化も重要な課題となっています。当研究室では、ガスタービンディスク材の大半に使用されているNi基耐熱合金(Alloy 718)を対象として、その高温化・高温変形機構解明を目指した研究を実施しています。また、脱炭素化に向けて新たに注目されている水素製造装置や半導体製造装置の効率化において必要となる耐熱鋼やステンレス鋼の耐熱化を目指した研究にも取り組んでいます。

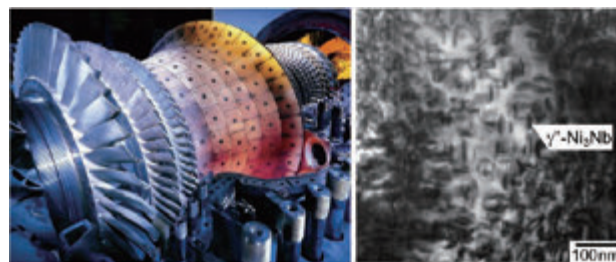


図3 ガスタービンの構造(左)とタービンディスク材(718合金)の透過型電子顕微鏡組織(右)

## 研究室情報

### 1. 共同研究

国内の大学、研究所、素材・重工メーカーとの共同研究を行っています。海外では、フランスの国立航空宇宙研究所(ONERA)との研究連携も行っていきます。

### 2. 進路・就職先

当研究室の卒業生は、鉄鋼・素材・重工・自動車・鉄道・電力など幅広い分野の企業に就職し、活躍しています。博士取得者は、国内外の大学や国立研究所等で活躍しています。

# 三宮 工 研究室

光機能ナノ材料の創造と電子線による光場の可視化



教授  
三宮 工



助教  
柳本宗達

<http://www.sannomiya.iem.titech.ac.jp/>

## はじめに

ナノスケールで光を操ることは、次世代光デバイスにおいて不可欠な技術です。一方で、波長をよりもはるかに小さいスケールでの光の制御は容易ではありません。当研究室では、ナノスケール材料を多次的（エネルギー+空間的）に制御することで、新奇な光機能を持つ材料創製を行っています。これらの材料は、環境・医療・通信・エネルギー変換など幅広く、多くの分野へ応用可能です。また、これらの材料評価手法の開発にも力を入れており、特に透過電子顕微鏡（TEM）を用いた光の計測などの装置開発、手法開発を積極的に行っています。新たな「観る」道具から、新発見は生まれます。

## 研究について ～ 創る、観る、発見する～

新材料を創り、新手法で観て、新発見をすることが我々のテーマです。新機能材料の中でも、特にナノフォトニック材料とそれらの計測手法の開発に主眼を置いています。ナノフォトニック材料はナノサイズに光を閉じ込め、高密度で省エネルギーな光回路や、高感度バイオセンサー、量子光源を実現する可能性を持っています。また、これらのナノ構造の集合体はメタマテリアルと呼ばれ、均一な材料では成しえなかった特殊な特性を持ちます。ナノ材料創製を行うとともに、計算、計測により、その特性を評価しています。電子線を用いた光計測手法の開発に力を入れており、電子線による光位相計測や量子光学計測などを行っています。企業や海外との共同研究も盛んです。

## 研究テーマ

### 1. 多機能ナノフォトニック材料の創製

金属や誘電体ナノ構造を用いると、光の波長よりもはるかに小さいナノ空間に光を閉じ込めることができます。更に吸収を持つ非エルミートな特性を活用することで、特異な光学特性も実現できます。これらを利用した高感度センサーや高効率発光素子、光回路の実現を目指して、ナノフォトニック材料を創製しています。当研究室では、自己組織やリソグラフィなど、物理的・化学的な手法を駆使して、様々な材料を組み合わせるナノ構造を作製し、電子顕微鏡法、スペクトル測定などを用いてこれら进行评估しています。解析/数値計算を用いて原理を探り、設計指針を得るなど、実験・理論の両面から総合的なアプローチで材料研究を行っています。

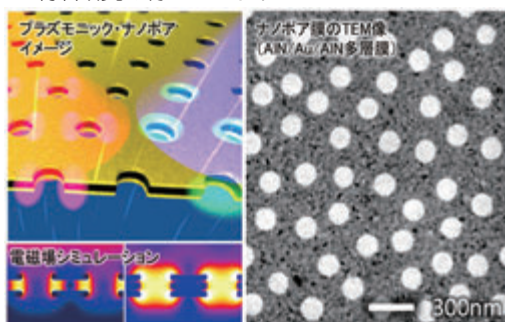


図1 光学共鳴によるセンシング機能をもつナノポア

### 2. カソードルミネセンス電子顕微鏡法による光場の観察

光速電子線を材料に照射すると、様々な波長の電磁波が発生します。特に可視光の波長を測定すれば、可視光の波長限界（数百 nm）を超えて、光の場を観ることができます。このカソードルミネセンス（CL）と呼ばれる現象と、走査型透過電子顕微鏡法（STEM）を組み合わせ、電子線分解能（～1nm）で光機能材料の光電場分布や、半導体の発光特性、蛍光体の解析などを行っています。

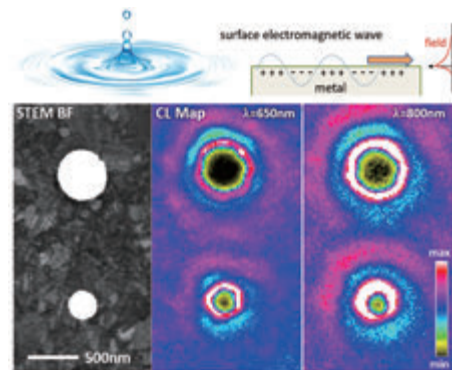


図2 金属表面の自由電子振動による電磁波（表面プラズモン）の可視化。走査型透過電子顕微鏡カソードルミネセンス法による。

### 3. 電子顕微鏡を用いた計測法の開発：

#### 材料開発の「目」を創る

材料開発において、原子スケールで物質の構造を可視化できる透過型電子顕微鏡（TEM）は必要不可欠のツールです。TEMは20世紀初頭に誕生して以来、現在も進化し続けています。我々は、TEMを基本とした新技術、新しい応用手法の開発も行っています。電子光学的な電子ビーム成形手法や、カソードルミネセンスを用いた光位相測定や、時間分解した光子相関計測、これらの組み合わせによる材料機能の可視化技術の開発などに取り組んでいます。

この「観る」技術の進歩は、材料開発の進歩そのものであり、ここから新しい科学が生まれます。これら電子顕微鏡の研究は、大学や研究機関だけでなく、企業とも共同で行っています。

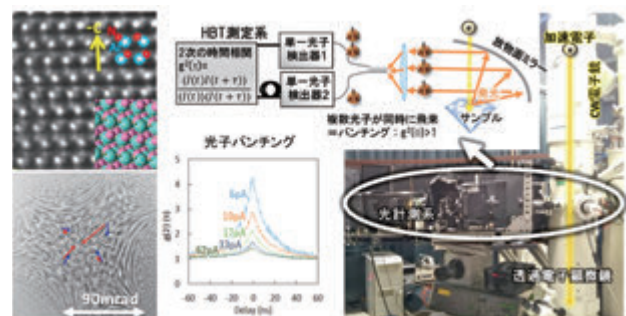


図3 左上：AlNの超高分解能電子顕微鏡写真。左下：ロンチグラムの自動中心検出トレース。右：開発中の光子相関カソードルミネセンス法

# 多田英司 研究室

材料表界面の環境性能評価と高耐久性金属材料の開発



教授  
多田英司



助教  
小鯖 匠

<http://www.elechemcorr.mtl.titech.ac.jp/>

## はじめに

金属材料は機械的性質や電気・磁気的特性、光学的特性などの様々な優れた機能性を有しています。しかし、これらの特性を長期間にわたり発揮するためには、使用環境における耐久性が極めて重要となります。材料の耐久性は、材料表面や材料と環境の界面で起こる化学、電気化学反応によって低下することが懸念されます。そのため我々の研究室では、機能性材料や構造材料に用いられる金属材料を対象に、電気化学反応メカニズムを解明し、優れた耐久性を有する材料表面を創製することで、材料機能の高度化と長寿命化につながる耐環境性材料と技術の研究開発をしています。

## 研究室について

我々の研究室では、すべての学生が個別の研究テーマに取り組んでいます。学生は、先行研究の調査によって自分の研究テーマの遂行動機と目的を明確にし、それを達成する実験手法を考案しながら、日々実験を行っています。教員は、学生のアイデアや自主性を可能な限り尊重し、様々な議論の機会を通して、実験目的の達成に協力するようなスタンスで指導にあたっています。

研究室には、本学出身の学生のみならず、国内他大学を卒業した学生、留学生、企業や海外の大学の研究者などが所属しています。出身大学や国籍のみならず、幅広い年齢層の人々が交流する研究環境となっています。自由に議論し、楽しくかつ活発に研究を進めることができる、雰囲気づくりにも教員、学生が取り組んでいます。

得られた研究成果は、日本金属学会、日本鉄鋼協会、電気化学会、腐食防食学会などで主に発表し、さらに海外で開催される米国電気化学会、国際電気化学会などの国際会議でも毎年発表を行っています。また、研究成果を国際的な学術誌で発表することを推進しています。

## 研究テーマについて

### 1. 金属材料の腐食機構解明および高耐食化に関する研究

先進各国の腐食調査では、金属材料の防食対策にかかる年間コストがGDPの数%に及んでいることを試算しています。我が国でたとえれば、消費税数%分の莫大なコストが腐食防食対策関連費として毎年費やされています。よって、金属材料の高耐食化、長寿命化は、安全・安心な社会構築のみならず、経済損失を減らすには極めて重要な課題であります。しかしながら、様々な金属材料が、様々な環境で使用されることによって、予想もしない腐食劣化が生じることがあります。我々の研究室では、金属材料を様々な環境中で使用したときに起こる腐食現象について、その機構

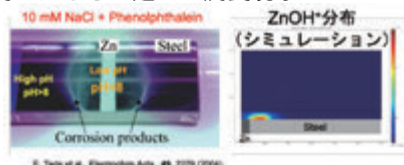


図1 Zn/Steel 対のガルバニック腐食による pH 分布の可視化と腐食生成物堆積の腐食シミュレーション

の詳細を、電気化学的手法や数値シミュレーション（図1）によりに調査し、耐食性向上の方策を提案することや防食手法の確立を試みています。

たとえば、軽量で比強度に優れたアルミニウム合金は輸送機器用構造材料としての需要が拡大していますが、不純物由来の Fe や Cu を含む金属間化合物が耐食性を著しく低下させると言われています。ところで、金属間化合物を起点としてどのようにして腐食が発生・成長していくかについての知見は未だ乏しいのが現状です。そこで、電気化学測定とその場観察手法を組み合わせ、金属組織学・溶液化学的視点から、腐食発生・成長メカニズムの解明とそれに基づく高機能性合金設計指針や表面改質技術の確立を目指しています。

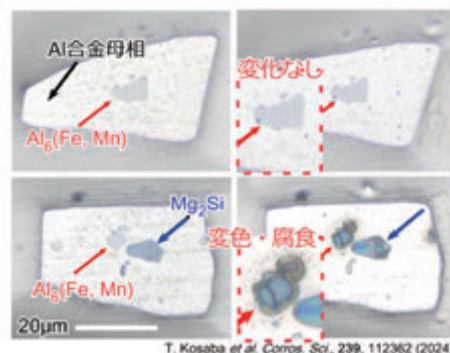


図2 AA5083 アルミニウム合金表面に作製した  $\mu\text{m}$  スケールの電極面。Mg<sub>2</sub>Si 粒子と近接することで、Al<sub>6</sub>(Fe, Mn) 粒子周囲が変色・腐食する。

### 2. 耐環境性能評価のための電気化学計測法の確立

金属材料の腐食劣化過程をモニタリングすることは、構造物等の安全と的確な管理において極めて重要となります。我々の研究室では、電気化学インピーダンス法やデータサイエンスの手法を用いて、腐食環境に応じた腐食モニタリング技術を開発し、それによって腐食寿命評価、予測法の確立を目指しています。図3に示すように、数  $10\mu\text{m}$  オーダーの微小領域や腐食劣化分布を評価するための特殊な電気化学的手法作製し、様々な腐食評価に適用しています。

### 3. 金属 / 有機体界面における液性変化に基づく機能性材料開発

金属材料の表界面は使用環境によって、微生物や生体組織などの有機体にさらされます。その際、有機体のエネルギー代謝反応と金属材料の腐食反応という異なる酸化還元反応が共役することで、それぞれの反応を促進もしくは抑制する可能性があります。そこで、金属 / 有機体界面における液性変化メカニズムを解き明かすことで、高耐食性・高抗菌性を両立するスマートマテリアルの創出や疾患検出を思考した新規バイオセンシング技術開発を目指した研究も行っています。

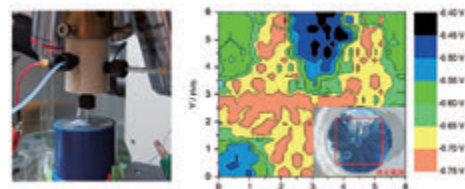


図3 特殊な電気化学測定法と測定例：微小電気化学セル（左）と走査型ケルビンプローブによる非接触表面電位測定結果（右）

# 寺田芳弘 研究室

高温変形の学理探究 & 高温構造用材料の開発



准教授  
寺田芳弘

<http://www.terada.mat.mac.titech.ac.jp/>

## 寺田芳弘研究室の時代要請

航空機、自動車、発電設備など、人類の高度な社会生活は数々の高温構造用材料に支えられています。環境負荷の低減といった時代の要請に応えるためには、材料の進歩は不可欠であり、高温材料の開発研究は、現在もその社会的重要性を増しています。本研究室では、最も基本的な循環系材料である金属材料を中心に、組織制御と力学特性の観点から、高温変形の学理探究 & 高温構造用材料の開発のための基礎的研究を行っています。金属組織制御学と高温金属強度学を重点的に学び進めることができます。

## 研究テーマ課題

寺田芳弘研究室では、金属組織を観察する目を養うことを重視しながら、(1)高温耐熱材料の合金設計、(2)組織安定性の評価、(3)高温クリープ変形特性調査、(4)高温材料強化機構の解明、に取り組んでいます。近年に実施した、代表的な研究課題を以下に紹介します。

- ・ Ni-20mass%Cr系固溶体におけるクリープ強化の原理
- ・ 鍛造Ni基超合金におけるガンマプライム相の粗大化過程
- ・ Mg-Al-Ca合金のクリープ強度に及ぼすラーベス相の影響
- ・ Mg-Ca鋳造合金における組織安定性とクリープ強度評価

研究テーマは時代と共に移り変わりますが、「高温変形の学理探究 & 高温構造用材料の開発」を通じて人類社会の健全な発展に貢献するという本研究室の**基本理念**が変わることはありません。

## 研究テーマの社会的意義

### 1. ラーベス相を利用した構造用耐熱マグネシウム合金の創成

マグネシウム合金は高い比強度を有し、自動車用構造部材として広範に使用することにより、車体の軽量化および燃費向上を実現することができます。マグネシウム合金の適用をエンジン周辺の高温部材にまで拡大するために、高強度を有する耐熱マグネシウム合金を創成することが社会的に求められています。このような背景を踏まえ、有害相であると信じられているラーベス相を強化相として利用するという逆転の発想により、高強度耐熱マグネシウム合金を設計・創成しています。高温強度を最大限に高めるために、異相界面強化という独自の高温材料強化機構のアイデアを提案し、金属組織をナノラメラ状に制御することを目指しています (図 1)。

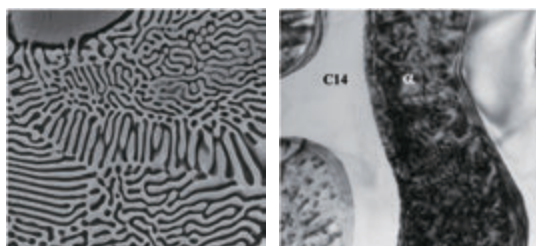


図1 異相界面強化を利用した耐熱マグネシウム合金 (左)。高温変形中において、転位の動きは $\alpha$ -Mg 内に制限される (右)。

### 2. 金属系耐熱材料における高温クリープ理論の構築

金属系多結晶材料を高温でクリープ試験を行うと、結晶粒界における回復促進により、結晶粒界近傍に転位密度の低い軟化領域が発生します。結晶粒内部と粒界近傍では変形抵抗が異なることを、ニッケル基単相合金における内部応力の綿密な計測から明らかにしました。この結果に基づいて、コアマントルモデルという独自のクリープ変形モデルを提唱しました。さらに『Enhancing core region renders a material stronger』というクリープ強化の原理を導出することに成功し、内部応力クリープ理論という**新規なクリープ理論**を創造しました (図 2)。固溶強化と析出分散強化は Core intensity を高める強化機構であるのに対し、粒界析出強化と結晶粒粗大化強化は Core fraction を高める強化機構であることを学術的に明らかにしました。

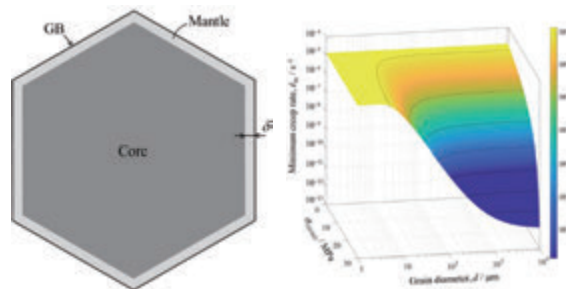


図2 コアマントルモデルの模式図 (左)。高温クリープ強度、結晶粒径、内部応力の相互関係を示す三次元的曲面図 (右)。

### 3. 特殊系ニッケル基超合金における高温クリープ特性

ニッケル基超合金は、高温強度に優れた高温構造用材料として、航空機ジェットエンジンおよび火力発電ガスタービンにおける構成部材として広く使用に供されています。ここで、結晶粒界を金属間化合物相で完全に被覆した「特殊系」合金では、遷移領域においてクリープ速度は  $-1$  の傾きで低下し続けます。高温クリープ強度に及ぼす粒内析出粒子サイズの影響などの基礎的な学理を解明すると共に、回復組織の発生を徹底的に抑制することにより、高強度な高温構造用材料を開発することを目指します。高温クリープ変形中におけるオロワン機構の発現は弱화를招くことなど、特殊系合金における実験的研究を通して新しい学術的知見が続々と明らかになっています (図 3)。

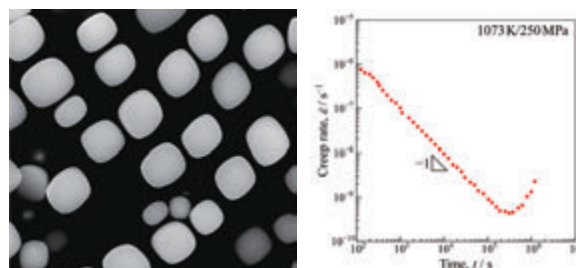


図3 ニッケル基超合金における粒内析出組織 (左)。特殊系ニッケル基超合金におけるクリープ速度と時間の関係 (右)。

# 中田伸生 研究室

金属の王様・鉄鋼材料の強靱化～最強の鉄をつくる！～



教授  
中田伸生



助教  
永島涼太

<http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/top.html>

## はじめに

私たちの身の回りにはたくさんの金属材料があります。中でも、鉄鋼材料は、自動車、鉄道、大型橋梁や超高層ビルなどの構造物に使用されており、その生産量は金属全体の95%以上を占めています。もし、この鉄鋼材料を今より少しだけ強く、そして、壊れにくくすることができればどうなるでしょうか？乗り物のスピード・燃費は改善し、建築物の安全性向上とさらなる大型化が進むことで、私たちの生活はもっと豊かになるでしょう。地味な分野と思われがちですが、その使用量が莫大であるからこそ、社会への波及効果は計りしれません。まさに、金属の王様である鉄鋼材料の小さな一歩は、人類社会の大きな前進につながっているのです。

## 研究について Macro-&Micro-structure Design ～金属組織学～

強くて壊れにくい構造物をつくる方法のひとつとして、材料力学による応力・ひずみ解析に基づいて、巨視的なスケールで物体の形状・構造 (macro-structure) をデザインするアプローチがあるでしょう。一方で、金属はミクロ・ナノという微視的なスケールでも固有の構造 (micro-structure, 金属組織) を持っており、これを制御することで強度や延靱性を大きく向上させることができます。すなわち、鉄鋼材料を始めとする構造用金属材料の性能を最大限に利用するためには、大きなスケールだけでなく、小さなスケールでの構造設計も必要なのです。そのため、私たちの研究室では、金属組織の成り立ち・形成メカニズムを科学し、鉄鋼材料の強靱化を達成するための理想的な金属組織をデザインする金属組織学を探究します (図1)。

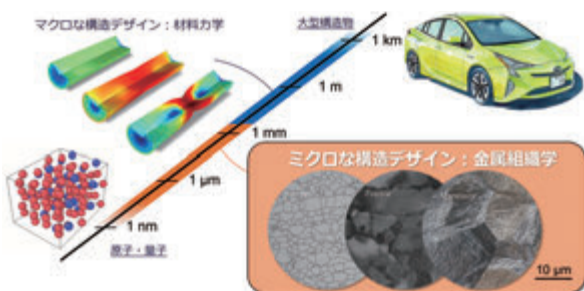


図1 微視的な金属組織を任意に制御すれば、マクロとミクロの両面で金属材料の特性を最大限に活用可能

## 研究テーマ

### 1. 鉄鋼材料の相変態と金属組織形成メカニズムの探求

多くの金属は、温度や圧力の変化によって固相状態で結晶構造が変化する「固相変態」を示します。鉄鋼材料では、高温で面心立方構造のオーステナイト (fcc-Fe)、低温で体心立方構造のフェライト (bcc-Fe) が安定であるため、冷却過程でオーステナイトからフェライトへの固相変態が自発的に生じます。中でも、急激な温度低下によって原子が拡散しない状態で変態した bcc-Fe をマルテンサイトと呼び、その強靱性から、古くは日本刀、そして、現代では自動車などの高

強度鋼に利用されています。独自の視点から、このマルテンサイト変態について系統的な研究を進めたところ、マイクロメートルオーダーでひずみが不均一に発生し、大きな内部応力を生み出すことを実験的に明らかにしました (図2)。そして、この微視的な変態ひずみが高強度鋼の強度や破壊挙動を支配する重要な因子であることを世界に先駆けて証明しました。現在は、変態ひずみを意図的に制御する技術を確立し、次世代の高強度鋼開発のための産学連携研究にも取り組んでいます。

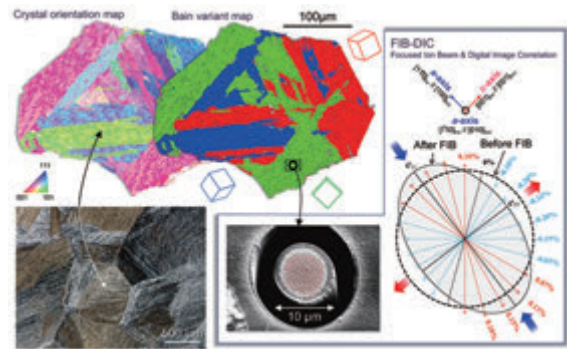


図2 鉄鋼材料の強靱性を支えるマルテンサイトにおけるミクロスケールでのひずみ解析

### 2. マルチスケールな観察と変形メカニズムの解明

じっくりと見ること、すなわち観察は新たな発見を与えてくれます。実用金属材料の表面を適切な方法で研磨すると、お城の石垣のように多数の結晶粒からなる組織が観察されます。隣接する結晶粒の方位関係や界面 (粒界) の向きは、材料の強靱化やそれに資する組織のデザインに影響を与える重要な因子の一つです。本研究室では、髪の毛の直径の約1/100のサイズの微小押し込み試験を行ない、粒界近傍での特異な変形挙動の解明に取り組んでいます (図3)。これらの高精度な計測機器による実験データと、それを計算機上に反映したモデル (デジタルツイン) を組み合わせ、多角的な金属の変形・破壊挙動の解析・解明に挑戦しています。

## おわりに

以上のように、私たちの研究室では、ミクロな金属組織制御の探究を通して、鉄鋼を中心とした構造材料の強靱化に挑戦しています。研究室の合言葉は『最強の鉄をつくる』です。伝統ある金属学・冶金学を大切にしながらも、新たな技術・学問に興味がある方を大歓迎します。

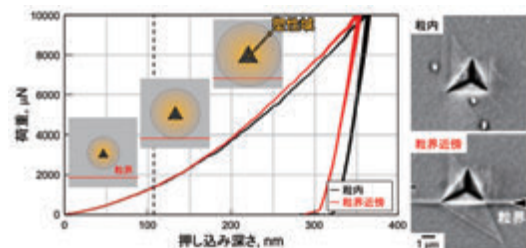


図3 Ni-Cr合金の粒界近傍でナノインデンテーション試験。

# 中辻 寛 研究室

金属・半導体表面における表面新物質創製とその電子物性



准教授  
中辻 寛

<http://nakatsuji.mat.mac.titech.ac.jp/>

## はじめに

金属や半導体の最表面は、固体内部とは異なる原子配列と電子状態を持っています。また、表面の結晶面方位と、そこに蒸着する物質の組み合わせを適切に選ぶことにより、例えば半導体基板上に単原子層厚さの金属原子を蒸着することにより、単原子層 2次元薄膜や 1次元原子鎖といった全く新しい低次元ナノ構造と、それに伴う新奇な電子状態を作り出すこともできます。これらは固体内部とは全く異なる電気的・磁気的特性を示す「表面新物質」であり、表面・界面に特有な低次元電子物性や力学的物性の発現の場となっています。私たちは「表面新物質」に特有の原子構造と電子状態を、走査トンネル顕微鏡 (STM) と光電子分光法 (ARPES, XPS) を用いて実験的に明らかにする研究を進めています。そこで得られた知見に基づき、所望の物性をもつ「表面新物質」を自由自在に作り出せるようになることが目標です。

## 研究テーマについて

現在進行中の主な研究テーマは以下のとおりです。

### 1. 金属的低次元電子系の構築とその電子物性評価

2次元あるいは1次元の「表面新物質」においては、量子閉じ込め、パイエルス不安定性による金属絶縁体転移、朝永-ラッティンジャー液体の振舞いなど、低次元系に特有な電子物性の発現が期待されます。現在私たちは、Si (111), Ge (001), Ge (111) といった半導体基板上に Au, Ag, Bi といった金属元素を 1 原子層あるいは数原子層分蒸着して金属的低次元電子系を構築し、さらに角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて価電子帯電子バンド構造を明らかにすることで、これら興味深い物性のメカニズムを電子状態の観点から明らかにしようとしています。

図 1 に示すのは Ge (001) 表面上に 1 原子層分の Au を蒸着して得られた 1 次元原子鎖構造です。大変きれいな 1 次元構造であることから金属的 1 次元電子系を持つことが期待されましたが、実際に電子バンド構造を調べてみると残念ながら、異方的 2 次元電子系であることがわかりました。「表面新物質」の真の姿を知るには、原子構造と電子状態の両方を明らかにする必要がありますがあることを示す好例といえるでしょう。今後はこの原子鎖構造をテンプレートに用いて、異種元素や分子による 1 次元電子系の構築を目指します。

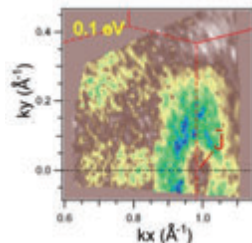
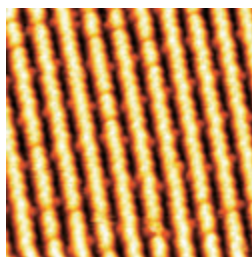


図 1 (上) Ge (001) 基板上に 1 原子層分の Au を蒸着して得られた、1.6nm 周期で配列した 1 次元原子鎖構造の STM 像。(下) 角度分解光電子分光で調べた等エネルギー面は楕円形で、この系が異方的 2 次元電子系であることを示す。

一方、固体表面では固体内部からの連続性が絶たれている、言い換えれば空間反転対称性が破れているため、特にスピン軌道相互作用の大きい重元素を蒸着すると、たとえ非磁性物質であってもスピン偏極した電子状態が発現します (ラシュバ効果)。この大変興味深い電子状態を調べるため、私たちは Bi を数原子層、Si (111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に蒸着し、図 2 に示す Bi (110) 超薄膜の原子分解能 STM 像を得ました。今後はこの超薄膜の電子状態について、スピン偏極も含めて明らかにしていきたいです。

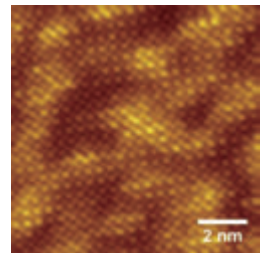


図 2 Si (111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に成長した Bi (110) 超薄膜表面の原子分解能 STM 像。1 つの輝点が Bi 原子に対応している。

### 2. 金属表面上での周期的ナノ構造の構築とその物性評価

ナノサイズの構造を固体表面上に周期的に並べる方法のひとつが、表面のステップ & テラス構造、あるいは表面における周期的な格子歪みを利用した自己集積化の手法です。例えば図 3 の STM 像のように、Cu (001) 表面上に 3.5 nm 周期で正方格子状に配列した単原子層 MnN 磁性ナノドットを、自己集積的に成長させることができます。この自己集積化は、MnN と基板 Cu との格子不整合に伴う歪みエネルギーを緩和するメカニズムによって起こります。私たちはさらに電子状態と磁性を光電子分光や X 線吸収分光で調べ、MnN が反強磁性秩序をもつことを明らかにするなど、周期的ナノ構造が示す物性を明らかにしようとしています。

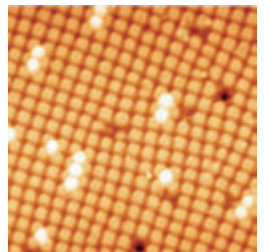


図 3 Cu(001) 基板上に 3.5 nm 周期で正方配列した単原子層厚さの MnN 磁性ナノドット配列の STM 像。

## おわりに

固体表面・界面の研究は、物理学、化学、電子工学、材料工学など、既存の学問分野をまたぐ、学際的で魅力ある分野です。私たちの研究テーマは物理学の性格が強いですが、実際に研究を進めるうえでは、他分野の知識こそが突破口を開く場面があります。是非、さまざまなバックグラウンドからこの世界に飛び込んで来られることを期待しています。

# 林 幸 研究室

カーボンニュートラル社会に向けて

<http://hayashilab.mtl.titech.ac.jp/>



教授  
林 幸



助教  
渡邊 玄

## はじめに

当研究室では鉄鋼生産プロセスを研究対象とし、カーボンニュートラル社会に向けて人類の発展に役立つ高温プロセスについて、熱力学や熱物性を基礎にアプローチしています。鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出は、我が国全体の約14%にのぼり（国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ（2019年度）」より）、そのほとんどが鉄鉱石を還元し鉄を得る工程によるものです。CO<sub>2</sub>排出量の大幅削減が可能なスクラップは世界の鉄鋼需要を賄うには不十分であり、依然として鉄鉱石から鉄を製造することは重要です。しかし、鉄鉱石の品質は徐々に低下しており、これらの原料の対策も必要です。我が国及び世界の鉄鋼業は、再生可能エネルギーで製造するグリーン水素による鉄鋼製造に取り組んでいますが、当研究室では、劣質化原料を活用しつつ、新プロセスに適したペレット・焼結鉱などの原料の作り込み・評価の研究を通じて、環境負荷や、CO<sub>2</sub>排出量の削減に貢献しています。また、カーボンニュートラルに不可欠な高級鋼製造において、様々な鋼種に適した鑄造技術も欠かせません。特に、製品の品質や歩留まりの向上に重要なものがモールドフラックス（鑄造用潤滑剤）です。当研究室では、モールドフラックスの熱物性測定や、伝熱に影響を与える組織制御の研究も行っています。さらに、鉄鋼スラグのリサイクル技術など、環境に配慮した鉄鋼製造プロセスの研究も行っています。

## 共同研究について

当研究室では国内外の企業・研究機関・大学と共同して、製鉄工程、連続鑄造及び鉄鋼スラグのリサイクルの問題に取り組んでいます。

## 研究テーマについて

### 1. 原料調整（焼結鉱や直接還元製鉄用ペレットの組織制御）

製鉄工程においてCO<sub>2</sub>排出量を削減するには、被還元性や強度などの高品質な焼結鉱やペレット等塊成鉱（鉄鉱石を焼き固めたもの）の製造が求められています。塊成鉱の品質は組織と密接に関係しており、組織制御が重要です。焼結鉱組織では針状の多成分カルシウムフェライト（SFCA）が高品質化を担っていますが、SFCAは複雑な結晶構造を持つ固

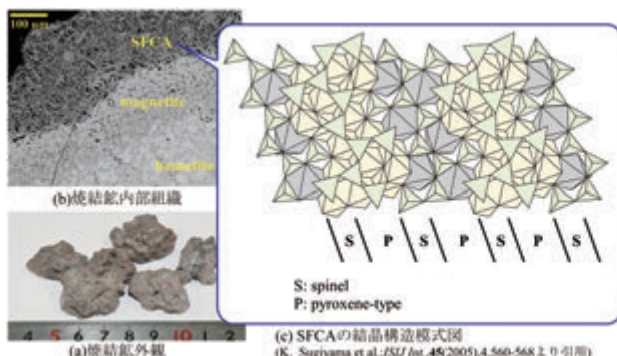


図1 焼結鉱中に生成するSFCAの組織制御に関する研究

溶体であり、組成域、結晶構造および形態との関係が解明されていません。当研究室では、以下の塊成鉱の研究に取り組んでいます。

- SFCA系鉱物を中心とした焼結鉱組成の状態図作成
- SFCA系鉱物の結晶構造、形状と被還元性との関係
- 直接還元製鉄用ペレットの組織に及ぼす脈石成分の影響

### 2. 還元プロセス～高炉内鉱石還元・溶融挙動の解明～

カーボンニュートラル製鉄として、高炉の水素利用や水素による直接還元製鉄法の開発が行われており、当研究室でも、水素による被還元性の良好な焼結鉱や劣質原料を用いたペレットの開発を行っています。また、高炉内のコークス使用量を下げることにより生じる通気の問題を解決するため、通気の妨げとなる鉱石の反応・溶融挙動を解明し高炉プロセスにおけるCO<sub>2</sub>排出量削減に取り組んでいます。

### 3. 連続鑄造～伝熱特性に着目したモールドフラックスの開発～

鉄鋼製造では精錬工程で純度を高めた溶鋼を連続鑄造工程によって凝固させます。この連続鑄造工程では、鑄片/鑄型間の潤滑性を保つためにモールドフラックスと呼ばれる合成スラグが用いられますが、このモールドフラックスは、潤滑性だけではなく鋼の冷却速度を制御し、鑄片の品質向上に貢献します。当研究室ではモールドフラックスの伝熱制御の一環として、モールドフラックスの組織制御と熱物性に関わる以下の課題に取り組んでいます。

- 結晶相、ガラス相及びスラグ融体の熱伝導率測定
- モールドフラックスの状態図作成

### 4. 鉄鋼スラグのリサイクル

製鉄工程では副産物として大量の鉄鋼スラグができます。鉄鋼スラグには大きく分けて、高炉スラグと製鋼スラグがあります。高炉スラグはセメントの原料に用いられており、製鋼スラグは路盤材や焼結鉱の原料に用いられています。特に高炉スラグのセメントは、焼成の必要がないためCO<sub>2</sub>排出量の削減に大きく貢献します。スラグのリサイクル性は、スラグの組成や組織に依存するため、鉄鋼スラグの組成と組織やスラグ構造との関係についても研究しています。

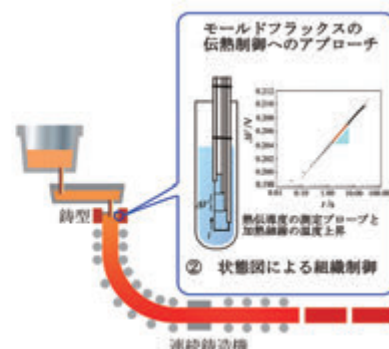


図2 連続鑄造工程での伝熱制御に関する研究

# 村石信二 研究室

強く優しい社会基盤材料を創る

<http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/>



教授  
村石信二



助教  
段野下宙志

## はじめに

世の中には実に様々な用途の材料で満ち溢れ、それら材料が日々進化を遂げることで我々の生活を豊かにしてきました。近年、更に深刻となった地球環境問題でも材料研究が果たすべき役割は大きく、我々が材料を研究する意義を見出すことができます。限られた資源で高いパフォーマンスの材料を開発すること、後世にまで持続可能な循環型社会を構築することなど、現代を生きる我々に託された命題と言っても過言ではないでしょう。

我々の研究室では、社会基盤材料であるアルミニウム合金に着目して、アップグレードリサイクルによる量産化技術の開発、既存の材料強度を大幅に向上する加工熱処理技術の開発、材料強化の原理原則を理解する為のシミュレーション技術の開発等、いずれも先進的で魅力的な教育・研究活動により社会貢献しています。

## 研究について

千里の道も一歩から、少しずつコツコツと研究を進める態度がやがて研究成果として実を結びます。思わぬところから大きな発見をすることもしばしばです。研究室の先輩・後輩の仲間とともに材料研究のエッセンスやメソッドを会得するにつれて、金属学の奥深さや魅力に気づき、自然と問題解決能力も養われるでしょう。定期的な学会活動や企業との共同研究は、自身の成果を発表することで社会と繋がる貴重な経験です。皆さん一人ひとりが独自の舌(テイスト)や物差し(スケール)の感覚を養い、未来の技術者・研究者・教育者として広く社会で活躍できるよう、我々の研究室は全力で応援します。

## 研究テーマについて

### 1. アルミニウム合金のアップグレードリサイクル

温暖化や海洋汚染など、地球規模での環境問題が深刻化しています。ゼロカーボンエミッションを達成する為には、これまでの工業的プロセスを抜本的に見直して産業化につなげる必要があります。軽量で比強度に優れたアルミニウム合金は、輸送機器に利用するだけでも大幅な燃費向上が見込まれ、またアルミ缶でお馴染みのように耐食性やリサイクル性にも優れ、まさに資源循環材料の優等生です。ただし、現状のアルミニウムの電解精錬では、新地金製造に大量の電力を必要とします。ここで一旦市場に出回ったアルミニウムを回収して再生地金からの資源循環が達成できれば(図1)、95%のCO<sub>2</sub>を削減できるとの試算があります。我々は溶湯を急速凝固させることで、再生地金に含まれる不純物元素を無害化する連続鋳造圧延プロセスを技術開発し、

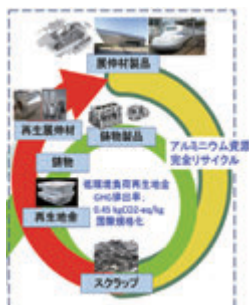


図1 アップグレードリサイクルによるアルミニウムの資源循環

アルミニウム再生地金によるアップグレードリサイクルに挑戦しています。

### 2. 析出強化型アルミニウム合金の転位強化と析出強化の両立

航空宇宙材料から自転車まで、軽さと強度が求められる主要な構造部材には析出強化型アルミニウム合金が用いられます。析出強化とは、ナノスケールで分散した原子クラスターや析出物(図2)が結晶転位のピン止め点となって材料を強化するメカニズムです。ここで転位自身も転位運動の障害物となるので、析出強化と転位強化をうまく組み合わせた加工・熱処理プロセスによって材料を更に強靱化することができます。例えば、予ひずみを加えてから熱処理を施した場合と、微細な析出物を分散させて中程度の強度としてから加工・熱処理した場合では、同じ加工量であっても後者で最大強度が増加することを見出しました(図3)。

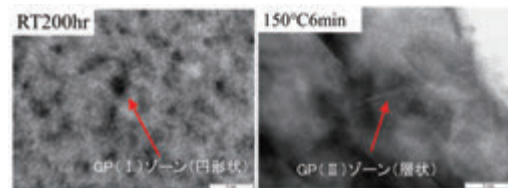


図2 アルミニウム合金中の微細析出相の電子顕微鏡像

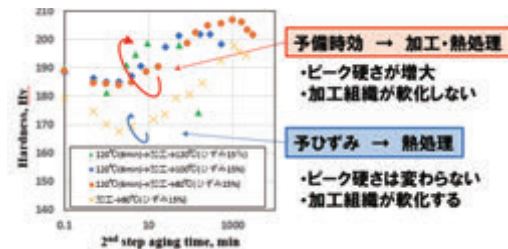


図3 転位強化と析出強化の両立による高強度化プロセス

### 3. 転位動力学シミュレーション ~内部応力場中の転位運動~

析出分散強化は金属材料の主要な強化手法です。転位は、析出物をせん断・迂回しながらすべり運動します。析出物の周囲に格子ミスマッチが存在する場合には、内部応力場によって転位に引力や斥力が作用します。ここで、どのような形状、結晶方位の析出物が分散すると析出強化に優位に働くのか、未だ明確な回答はありません。材料設計の観点で非常に興味深い問いと言えます。我々の研究室では、マイクロメカニクス・グリーン関数法の数値解析により、内部応力場中の転位運動を再現する転位動力学シミュレーションを開発し(図4)、実験結果と相補的に材料強度設計に役立てています。目には見えない転位の動きから材料強度を予測する、夢のある話とは思いませんか?

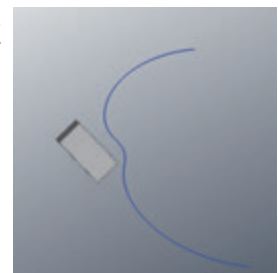


図4 転位動力学シミュレーション

# 小林能直・安井伸太郎 研究室

高度金属製造・鉄冶金・セラミックス融合技術と  
原子力安全金属工学・エネルギー工学への展開



教授  
小林能直



助教  
浦田健太郎

<http://www.zc.iir.titech.ac.jp/~ykobayashi/> (小林能直研)  
<https://shintaroyasui.com/> (安井研)

## はじめに

有史以来、人類は金属から多大な恩恵を受けてきました。その中でも特に鉄鋼は文明を進展させ、国家の礎となり、環境調和型の産業として現在も進化しています。その技術を高度に生かし、時代の要請に合った社会基盤材料を提供していくことが重要な使命です。当研究室では、鉄鋼製造技術の基礎である「鉄冶金学の発展に資する学問的研究」と、それを「応用したエネルギー産業材料」、そして「原子力安全金属工学」を展開するための基礎研究を行っています。

## 研究について

今現在、何が長期的課題で、何が喫緊の課題なのか？材料工学を推進する上で、戦略的な展望は重要です。現在の我が国の中長期的な国際競争力・環境調和力を考えたとき、高効率・低環境負荷の高度鉄鋼製造技術の開発が必要であり、さらにカーボンニュートラル製鉄プロセスの実現が最重要課題となりました。エネルギー産業に目を転じると、ゼロカーボンエネルギー技術の創出およびベースロード電源としての安全性確保を前提とした原子力材料技術、過酷事故対策技術そして、エネルギーストレージ技術が我が国が総力を挙げて取り組むべき問題としてクローズアップされています。これらの課題へのアプローチとして、鉄冶金・セラミックス・エネルギー各分野が融合できるプラットフォームを形成し、創製プロセス開発、機能特性向上、事象解明に資する総合的な材料工学を展開しています。

## 研究テーマについて (小林担当)

### 1. ゼロカーボン製鉄を目指した鉄鋼中不純物の濃度制御・影響制御・有効利用に関する研究

劣質化する鉄資源対応のための高不純物除去能精錬剤の開発を進めるとともに、喫緊の課題となったカーボンニュートラルの達成のための鉄スクラップ利用には銅などの除去困難な不純物の影響制御や逆転の発想による有効活用が重要です。影響制御法としては、銅による表面脆化の原因となる鋼表面の銅濃縮相を鉄酸化物スケール中へ吸収させる方法の開発を進めています。また、銅濃縮相の地鉄への侵入を防ぐためのバリア層のホウ素添加による形成メカニズムの解明を進めています。さらに、銅が鉄相に残留してしまった際にそれを硫化して微細な銅硫化物相として安定化させ、析出強化に役立つという研究も行っています。

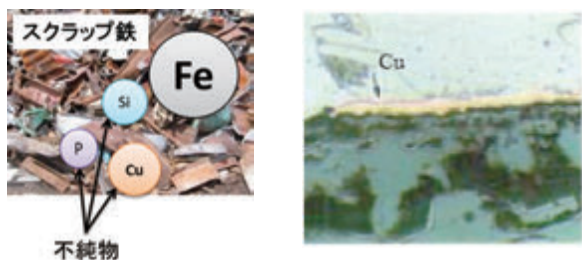


図1 ゼロカーボン製鉄を目指したスクラップ有効利用と、鋼と酸化鉄間に生じた銅濃縮液相 (実プロセス)

### 2. 構造材料および機能性材料の脱酸技術に関する研究

鋼などの構造材料の中でも高成形性が要求される場合は、欠陥の起点となる酸化物系介在物の徹底的な除去が望まれます。この介在物が生成しない脱酸プロセスとして注目されている電気脱酸について、スラグフリーの導線直接接触型の装置による基礎研究を行っています。また、高保持力磁性材料である鉄ネオジム系磁石に添加されているジスプロシウムなどの希少金属は供給が不安定になる懸念があります。そこで、これらの使用をセーブするための元素戦略としての鉄ネオジム系磁石の脱酸プロセスの熱力学を研究しています。



図2 ハイブリッドカーに使用される鉄鋼・鉄基合金材料

### 3. 原子炉における過酷事故事象解明と安全な材料処理のための研究

エネルギー産業の中でも格段に高い安全性・健全性の担保が必要な原子力安全材料の研究は中長期的課題として非常に重要です。一方で、現在我が国の喫緊の課題として、過酷事故原子炉への対応策が取り上げられています。まず炉心溶融を起こした炉から燃料溶融凝固物(デブリ)を取り出す際のアクセス性を検討するため、炉内構造物の損傷状況を把握しなくてはなりません。過酷事故時に溶融した燃料と制御棒は、ステンレス鋼製の炉心下部構造物を巻き込みながら、炉心底部に至ったものと考えられています。この解明のため、デブリ模擬体とステンレス鋼の反応機構を研究しています。また、取り出したデブリを超長期にわたり安全に保存する容器は、これまでのキャニスターより格段に高い耐食性・耐反応性が求められます。要求を満たす材料開発のため、ジルコニウム系合金とデブリ系酸化物融体の反応機構の解明を行っています。

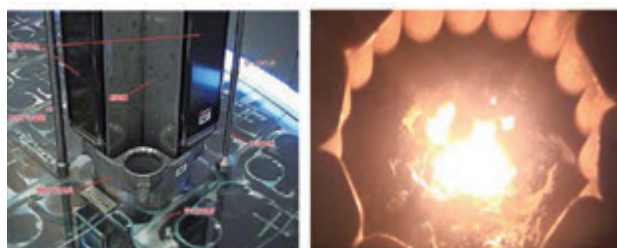


図3 原子炉芯構造物とコールドクルーシブルによるデブリ模擬溶融試験



准教授  
安井伸太郎



特任教授  
白鳥洋介

### 研究テーマについて(安井・白鳥担当)

#### 4. 金属とセラミックス技術の融合とエネルギー工学への展開

エネルギー創成は我々の生活を維持するために非常に大事なキーワードです。二酸化炭素の排出によって地球の温暖化は加速的に進んでおり、我々のエネルギー形態について根本から見直すことが急務です。我々はゼロカーボンエネルギー研究所に所属しており、研究所ミッションとして、エネルギー問題について学術を深化すると共に、カーボンニュートラルに関して答えを見つけなければなりません。

様々な技術を駆使してエネルギー材料創成を行っています。必要な場所で必要な量のエネルギーを利用するためには貯蔵技術が非常に重要です。当研究室では安全安心に使える大気下で安定に合成・使用可能な全く新しい電池創成への挑戦を行っており、企業との共同研究にて3D-SLISEと命名した準固体電解質を発見しました。3D-SLISEは水を基軸とした複合材料で構成され、これまでに開発されてきたイオン伝導体とは全く異なるコンセプトにより創成されました。この材料の良さは、大気下で作製できるためにドライルームが必要無いため、プロセスコストダウンが期待できます。さらには、使用済み電池を水にさらすと3D-SLISEが溶解して、レアメタルを含む正極をそのまま取り出し再利用できる、ダイレクトリサイクルが可能になります。このような新しい電池技術は我々の生活の質を向上させるだけではなく、持続的な地球環境への配慮にも繋がると考えます。



図4 コインセル電池(左)と最新の準固体リチウムイオン電池(右)

セラミックス技術(高品質薄膜・バルク合成)を駆使した強誘電体/圧電体の研究も行っています。強誘電体はSuicaなどに用いられている強誘電体メモリ(FeRAM)や積層セラミックスコンデンサ(MLCC)に使用されており、我々の生活には欠かせない電子部品です。近年では圧電性を用いた環境発電技術や、反強誘電性を用いた蓄エネルギーセラミックスコンデンサの開発が盛んであり、どれもカーボンニュートラルに携わることの可能な技術です。

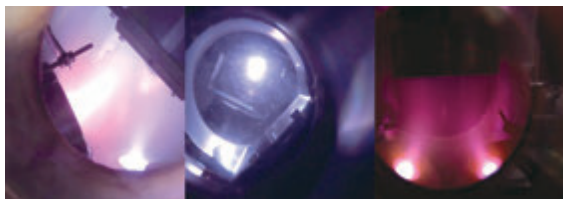


図5 研究室における高品質薄膜作製プロセス

当研究室は世界中の研究者たちと共同研究を行っています。国内では科学大内連携をはじめ、東大、東北大、北大、岡山大、広島大、防衛大他、海外はUMD、NIST(アメリカ)、UCL(イギリス)、UNSW(オーストラリア)、SICCAS(中国)他、それぞれの専門家たち連携しています。日本では0から100まですべて自分でやるジェネラリスト的な考え方が主流ですが、技術の成熟に伴って、一人ですべてやる時代は終わりつつあります。もちろん個人としてのスペシャリティは非常に重要ですが、多くの専門家と組むことで迅速かつ高品質な研究を遂行できるようマネジメントしています。測定では大型放射光施設(SPring-8やKEK)に出向き、研究室内では行えない特殊実験も行っています。



図6 SPring-8での実験風景(左)および薄膜の電気測定風景(右)

技術向上のためには常に新しい材料が必要です。これまでは思いつかなかった未踏材料発見へ挑戦を行っています。新材料の探索実験は失敗の繰り返しですが、見つけたとき(成功したとき)の喜びはこれまでの人生で味わったことのない喜びに変わると思います。日々の中でそのような楽しみや喜びを追い求めて、宝くじを当てに行くような気分で研究を進めています。

### さいごに ~メッセージ~

小林(能)・安井研は総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所に所属し、材料系材料コースおよび材料系原子核工学コースの学生が所属します。金属材料をはじめ、セラミックスや有機物など様々な材料を融合し、材料学を総合的に学ぶことの出来る研究室です。教員4名に加え、研究室をサポートしてくれるスタッフが3名、博士課程・修士課程・学士課程の学生らが一つの家族のように生活しています。少しでも興味のある方は、遠慮無くコンタクトしてください。



# 史蹟・春本 高志 研究室

薄膜の新奇な物性を探求しよう

<http://www.shi-harumoto.mtl.titech.ac.jp/>



教授  
史 蹟



准教授  
春本高志

## はじめに

史・春本研究室は、金属物理学・回折結晶学をバックグラウンドに、機能性ナノ薄膜の物性に関する研究を行っています。本研究室の特徴は、以下の通りです。

### ① 物理に近い（電子物性・量子力学を学ぶ）

材料系金属分野の所属ですが、研究室の専門とする金属物理学は、固体物理学・物性物理学に近い研究テーマのため、状態密度やスピン分極、電子の運動・電気伝導、半導体・ホール効果などの電子物性・量子力学を学ぶことができます。

### ② 留学生が多い

外国人教員2名在籍のため、研究室所属学生の約5割が留学生です。留学生とのコミュニケーションは日本語に加えて英語でも行われるため、好むと好まざるに関わらず英語力の向上を期待できます。

### ③ 就職先がバラエティ豊か

就職先の分野は、素材、自動車、分析機器、家電、半導体、資源、石油、商社、コンサル、銀行などと非常に幅広いです。この理由として、研究テーマを幅広く持っていること、機能性材料を研究対象としていること、更には、留学生が多く語学・国際交流に自信が持てるようになることなどが挙げられます。

## 研究について

ナノ材料の一つであるナノ薄膜は、一般的なバルク材料と比べて表面・界面の割合が多く、場合によっては、結晶の応力状態・対称性すら変わってしまうこともあります。このようなナノ薄膜という特殊な状態では、今までにない新しい物性・新しい機能を発現することがあります。それを目標に、結晶構造、成長形態、表面状態などを制御してナノ薄膜を作成しています。更には、電子顕微鏡・X線回折装置・電子分光装置などの評価装置・分析設備も駆使して、新物性発現のメカニズム解明にも取り組んでいます。

現在、特に積極的に取り組んでいる研究は、薄膜の電気・磁気特性、水素化特性、圧電特性です。

## 研究テーマについて

### 1. ナノヘテロ構造の磁性薄膜

材料がナノスケールになると、材料全体が界面の影響範囲内となり、材料を構成する物質と異なる新しい物性が出現します。例えば、鉄とクロムのナノスケールの多層膜は巨大磁気抵抗効果を示すことはよく知られている例です。本研究室では磁性金属と窒化物、酸化物などのナノヘテロ構造を設計・作製し、次世代の磁気記録や、磁気センサなどに応用できる優れた物性を持つ新しいナノ構造の創成を目指しています。

図1は、コバルト-白金合金と窒化アルミニウムからなる多層膜 (CoPt/AlN 多層膜) の断面電子顕微鏡写真で、コントラストの暗い層はCoPt層、明るい層はAlN層です。このような構造について、各層の厚さや熱処理温度のコントロールによって、磁気的な特性を自在に制御することができます。

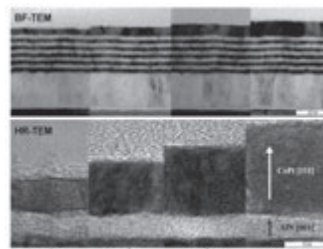


図1. CoPt/AlN 多層膜の透過電子顕微鏡写真

例えば、面内磁気異方性、垂直磁気異方性、二段階に磁化する特性など、同じ試料でも熱処理条件が違うだけで異なる特性を示します。図2には、熱処理後のそれぞれの試料の磁化曲線を示しています。全ての試料は強い垂直磁気異方性を示し、最表面のCoPt層の厚さによって、2段階磁化の各段階の磁化量も制御できることがわかります。

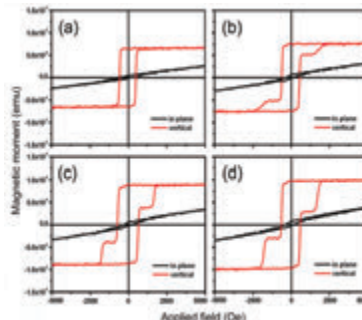


図2. CoPt/AlN 多層膜の面垂直方向の磁化曲線

現在は、こうした知見を基に、更に応用的な研究、例えば、電子データを効率的に保存するための磁気抵抗メモリ (MRAM) や、高感度磁気センサの実現に向け、

- ・電流誘起磁壁移動が可能な Mn<sub>n</sub>N 薄膜
- ・強磁性体と反強磁性体の界面で生じる交換バイアス
- ・ハイエントロピー合金薄膜の磁気特性・電気特性

・異常ホール効果・磁気光学カー効果を用いた薄膜物性の測定などの研究に取り組んでいます。更には、金属の枠にとらわれずに、絶縁体-金属相転移を示す VO<sub>2</sub> 酸化物などの新奇薄膜材料についても作成方法とその物性についても調査を進めています。今後は、これら薄膜と磁性薄膜との複合膜についても研究する予定です。これらは、IoT やニューロモルフィックコンピューティングなどの応用を目指しており、自ら考えたアイデアを形にできる点が研究の大きな魅力です。

### 2. 水素吸蔵薄膜・水素センサの開発

脱炭素・カーボンニュートラルを可能にする水素社会の実現に向け、水素化合物の物性、並びに、水素センサ材についても研究しています。

図3はパラジウム (Pd) 薄膜の水素化過程を、X線回折法により in-situ 観察した結果です。Pd の 111 ピークが、水素導入に伴って移動 (左方向へピークシフト) している事が観察されています。詳細に解析すると、水素低濃度の時には、水素の侵入固溶による格子膨張が起こり、水素濃度 4% 前後



助教  
宋 俊東

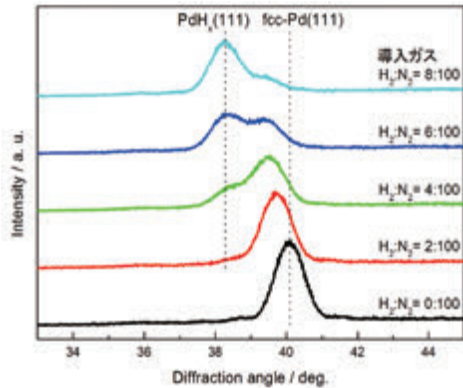


図3. X線回折法によるPd/AIN極薄膜の水素化その場観察

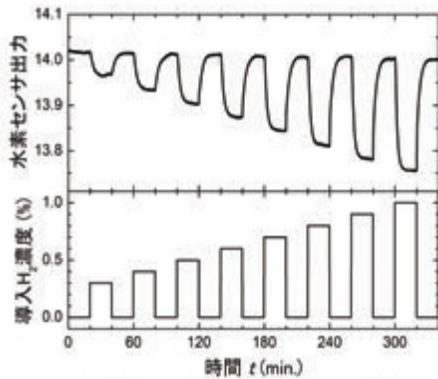


図4. 本研究室で開発された水素センサの水素検出特性

においてパラジウム水素化物 (PdH<sub>x</sub>) 相が新たに形成されるとわかります。このような測定を系統的に行うことにより、バルクとは異なる挙動を示す薄膜 (= 結晶粒のサイズが、ナノメートルオーダーと微小であり、サイズ効果などが現われる) における水素化過程について調査しています。その他、最近、水素化物では負性抵抗特性という変わった物性が現われることも明らかにしました。こちらは、現在、研究を進めておりますが、このように、水素化物には、未知の世界が多く残っており、冒険するような気持ちで研究を進めています。更に、発展的な研究として、水素センサ材の開発、並びに、水素検出方法の提案を行っています。水素ガスは、燃焼時に温室効果ガス CO<sub>2</sub> を放出しないクリーンなエネルギー源ですが、可燃性ガスであり、空気中ではわずか 4% という非常に薄い濃度であっても爆発する危険があります。そこで、水素の漏れを検出する水素センサが求められており、図4に、本研究室にて開発された水素センサの検出特性を示します。導入水素ガスのプロファイルに従って、水素センサの出カ信号も変化しており、例えば、0.3%の水素ガスを確かに検出できていることが判ります。現在は、より性能の良い水素センサを実現するべく、歪に敏感な磁性合金 (磁歪合金) であるパラジウム-コバルト (PdCo) 合金などを用いて水素吸蔵により生じた格子膨張を磁氣的に検出することを目指しています。

### 3. エネルギー変換素子・デバイスの開発

周囲の環境に存在する光や熱、振動といった自然エネルギーをエネルギー変換素子により電力に変換するエナジーハーベスティングは、IoTセンサやアクチュエータを半永久的に作動させることができる画期的な技術として期待されています。例えば、図5に示すような渦励起振動を用いた発電素子では低流速でも振動が励起され、共振現象を利用して大きな出力を得られると見込まれています。流れ場に非流線形の物体 (ブラフ体) を設置すると、その物体の背後から「カルマン渦」という現象が発生し、正弦波の圧力を引き起こします。この圧力の周期と強さは、図5(a)に示す有限要素解析によると、流体の速度とブラフ体のサイズに大きく依存します。そして、この渦は、電歪材料や磁歪材料などのエネルギー変換素子を利用して電力に変換することができます。図5(b)はエナジーハーベスタ (寸法: 3 × 3 × 0.5 mm) の構造を示します。カルマン渦はカンチレバーに付いた電歪素子に当たると、渦の周波数と一致する交流電圧が発生します。更に、マスの重さやカンチレバーのサイズを調整し、デバイスの固有周波数を渦の周波数にマッチングさせると、共振を実現する際の出力電力を大幅に増加させることが可能です。図5(c)は共振時の出力電力の理論計算結果を示します。ブラフ体とデバイス間に最適な距離を取ると、最大出力は 13.1 μW になり、Bluetoothの発信などに対して十分な電力を供給しうると考えられています。

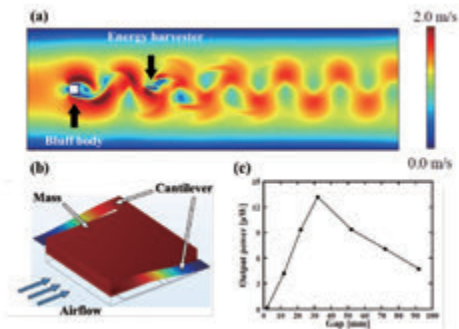


図5. カルマン渦による振動発電デバイスの有限要素解析 (a) 流れ場にカルマン渦の形成状況, (b) 圧電素子を利用したエナジーハーベスタの構造, (c) 共振時の出力特性の計算結果.

### その他

スタッフ: 4名 史教授, 春本准教授, 宋助教, 福島秘書  
学生: 17名 D × 5, M2 × 4, M1 × 4, B4 × 3  
研究員: 2名  
(以上 2025年1月現在)  
卒業後の進路: JX金属, UACJ, 三菱UFJ銀行 (2024.3)  
共同研究: 国内は東北大, 産総研等. 海外は清華大学 (北京) 等

### おわりに

自由な環境で楽しく研究することが成長につながると我々は信じて、研究室運営しています。

# 曾根正人・Tso-Fu Mark Chang 研究室



教授  
曾根正人



准教授  
Tso-Fu Mark Chang

次世代医用デバイスのための金属材料の創製及び評価

<http://www.ames.pi.titech.ac.jp/>

## はじめに

次世代の医用デバイスでは高感度化・生体適合性・高耐久性など様々な特性が要求されており、材料工学においてはそれらの特性を同時に実現するために精密な組成制御やナノメーターオーダーおよび原子レベルでの構造制御により高機能化を実現する必要があり、同時にマイクロメートルサイズの材料評価技術が重要となってきた。当研究室では、次世代高感度医用デバイス実現のために半導体配線、微小な電気機械システム (MEMS)、ウェアラブルデバイスやセンシング技術を基盤とした電気化学的な合成手法によるマイクロ・ナノ材料創製技術の開発とともにマイクロサイズレベルでの材料の機能評価技術の研究開発を行っている。

## 1. 半導体配線技術の高感度医用デバイス分野への展開

半導体産業は、45兆円以上の世界市場規模を有しており、我が国においても国家を担う重要な役割を果たしている。この発展を支えているのは半導体製造における配線回路の微細化・高密度化技術の発展である。半導体製造技術の一つである配線形成技術では、電解めっき法を用いてCu配線を形成する手法が主流であり、日本、米国、韓国および台湾がその覇権を競っている。

当研究室では、超微細な構造体の洗浄技術である超臨界二酸化炭素の洗浄技術と、二酸化炭素を反応媒体に用いる新規な表面処理手法の研究開発である超臨界ナノプレーティング (SNP) 法を用いることで超微細配線を実現した。我々が開発した SNP 方法を用いて、直径が60nm・深さ120nmの埋込孔にCuを埋め込んだサンプルを、FIBで切削加工し透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察した結果を図1に示す。この図より、このような微細な埋込孔にCuが欠陥無く埋込まれていることがわかる。注目すべき点は、埋め込まれたCuが単結晶であることである。この結果は、新規手法が、結晶成長次元を制御し、無欠陥単結晶で配線可能であることを意味している。

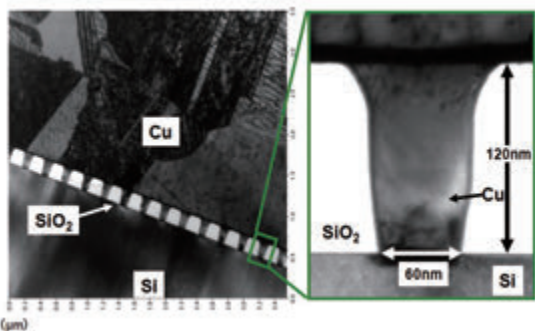


図1. 半導体テストチップ (直径60nm・深さ200nm) へ超臨界ナノプレーティング (SNP) 法による埋込んだCuのTEM像

## 2. マイクロメートルサイズ試験片の材料試験

マイクロサイズの構造を有する材料を作成した場合、その機械的性質はバルクとは異なっている。材料がマイクロス

ケールまで微小化されると降伏応力は増加する。この現象はサンプルサイズ効果と呼ばれており、サイズ現象に伴う転位あるいは転位源の欠乏が原因とされている。MEMSの構造材料はマイクロスケールであり、従って高感度MEMSセンサの構造設計においてはマイクロサイズ試験で得られるデータが必要不可欠である。当研究室は、今までに、Ni・Cu・Sn・Co・Al・Fe・Au・AuCu・AuPd・AuNiなどの金属の微小材料試験を行ってきた。微小材料試験としては、圧縮・曲げ・引張試験があり、それぞれに最適な試験片を提案してきた。図2に、集束イオンビーム加工機 (FIB) により作成した角柱圧縮試験片、カンチレバー型曲げ試験片、ダンベル型引張試験片を示している。

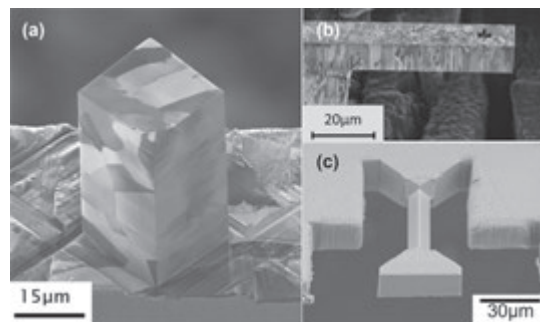


図2. マイクロ試験片：(a) 圧縮試験片，(b) 曲げ試験片，(c) 引張試験片

## 3. フレキシブル多機能材料の創製

次世代のウェアラブルデバイスを実現するためには、高い柔軟性と多様な機能を持つ材料が必要とされている。柔軟性と機能性の統合について、多くが絶縁体であるテキスタイル繊維に導電性を付与するためのメタライゼーションが必要不可欠である。しかしながら金属皮膜と繊維表面との間の弱い結合力によって引き起こされるテキスタイル繊維上に見られる剥離欠陥、クラックなどは解決すべき重要な課題がある。当研究室は植物の構造、特に根系から新たな着想を得た。植物は土壌の中に深く根を生やし地面にしっかりと固定されている。図3に示すように、超臨界二酸化炭素を用いた無電解めっきにより、繊維構造中に深く金属の根の形成が可能になると報告されている。より優れたフレキシブル多機能材料を実現するには、金属皮膜と繊維間の接着・接合のメカニズムを研究する必要がある。

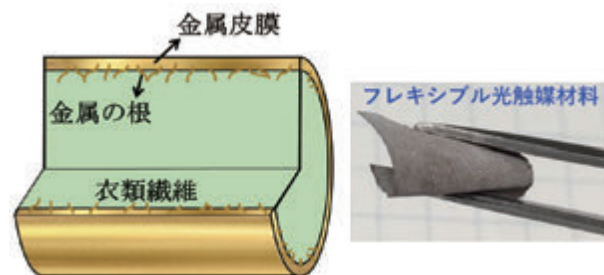


図3. フレキシブル多機能材料の例



助教  
栗岡智行



助教  
彦坂 元



特任教授  
岡本 敏



特任教授  
町田克之



特任教授  
Yung-Jung Hsu



WRH 特任教授  
Randall Lee

#### 4. 単一金属原子の電解めっきの研究

金属材料の活性は、サイズが小さくなると増加することが知られている。可能な最小のサイズは、1つの原子のみで構成されるクラスターである。活性が高いため、原子レベルの金属を作製することは非常に困難である。当研究室では、独自の単一原子電解めっきを使用して、担体材料の表面に原子レベル金属クラスターの装飾を実現した。原子レベルの金属クラスターの特性について、ユニークな偶奇効果 (Even-Odd Effect) が観察された。原子レベル金クラスターが偶数の原子で構成されている場合の触媒活性が高く、奇数の場合の触媒活性が低くなる。図4に示すように、Au<sub>2</sub>とAu<sub>4</sub>は、Au<sub>1</sub>とAu<sub>3</sub>よりもプロパノールの酸化活性が高くなっている。最も重要なことは、原子レベルの金クラスター触媒が1-プロパノールと2-プロパノールを区別する能力を持っていることが確認されている。1-プロパノールと2-プロパノールの区別は、分子量が同じで化学構造が類似しているため、困難であることが知られている。

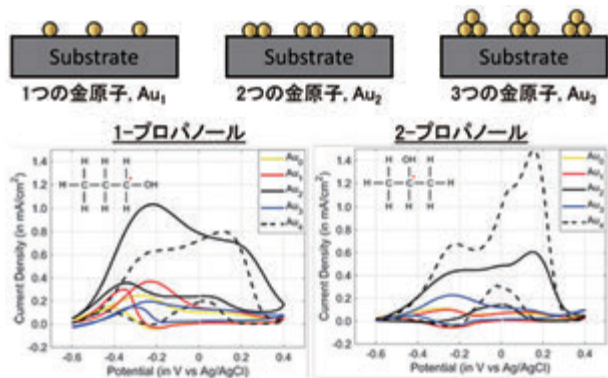


図4. 原子レベル金クラスターのイラストとプロパノールセンシングでのパフォーマンス

MEMS と触媒材料に関する研究は、電気工学と情報科学の研究グループと協力して、高感度の嗅覚センサを開発中である。原子レベル金属・光触媒・繊維の統合により致命的な感染症から私たちを守る衣服を実現することができる。応用例を図5に示す。

#### 嗅覚センサー



#### 抗ウイルス・抗菌繊維



図5. 当研究室の最新の研究によって実現可能な応用例

#### その他

スタッフ：曾根教授, Chang 准教授, 栗岡助教, 彦坂助教, 岡本特任教授, 町田特任教授, Hsu 特任教授, Lee 特任教授, 戸田秘書

学生:22名 (D3×1, D2×4, D1×2, M2×6, M1×5, B4×4)  
就職先 (直近4年間): 三菱重工業, 日産自動車, 野村総合研究所, 村田製作所, アクセンチュア, DNP, JASM, SONY, オリンパス, DISCO, 本田技研工業, Schlumberger, デルタ電子, TSMC, 国立陽明交通大学, 日本製鉄, マイクロン, 三井物産, 東芝, 村田製作所, 古河電工

学会活動: 日本応用物理学会, 日本金属学会, マイクロ・ナノエンジニアリング国際学会 (MNE), 国際電気化学会 (ISE), アメリカ電気化学会 (ECS) などを中心



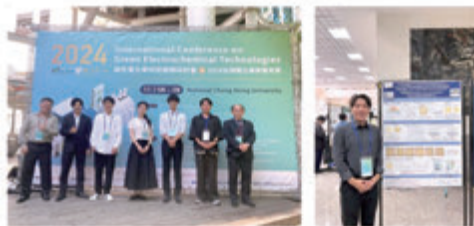
国際会議 ISE2024 イギリス・マンチェスター



国際会議 MNE2024 フランス・モゼル



国際会議 CPIT2024 チェコ・オストラバ



国際会議 ICGET-Tw2024 台湾

# 藤居俊之・雷霄雯 研究室

材料組織の形成と発達機構の解明,  
変形機構の探求と機能制御の開発

http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/



教授  
藤居俊之



准教授  
雷 霄雯

## はじめに

材料のミクロ組織や構造は必ず何らかの理由をもって形成され、その材料が持つ物性や機能と密接に結びついています。ミクロ組織や構造の発現機構が解明できれば、それは新たな材料創成につながる知見となります。藤居研究室では、環境変化に応じて生じる材料内部での組織形成と組織発達を、電子顕微鏡や放射光X線を用いて定量評価し、材料組織学的立場から材料の特性発現の源を捉える研究を行っています。また、雷研究室では、計算材料科学を基礎にして、材料のミクロ構造に起因した機能や力学特性の解析を行い、新機能を有する材料設計のための知見獲得を目指しています。

## 研究テーマについて

### 1. 金属材料の繰り返し変形に伴う転位組織の発達過程

金属材料を繰り返し変形すると、材料内部には図1のような転位組織が形成されます。これら転位組織は、材料に与える応力振幅やひずみ振幅の大きさに依存するとともに、繰り返し変形の進行に伴って発達していきます。しかし、その形成・発達機構には未解明な部分が残っています。Cu単結晶において複数のすべり系が働いた場合に形成される転位組織(図3)などはその一例です。このような転位組織の形成・発達機構の究明を目的として、最新の超高压走査透過型電子顕微鏡を用いた組織観察とその解析を進めています。

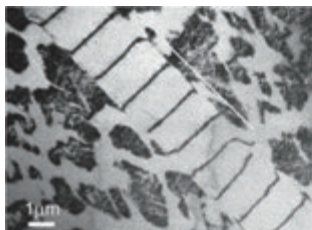


図1 Cu単結晶の疲労転位組織

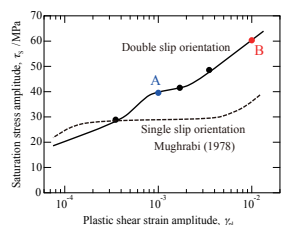


図2 Cu単結晶の繰り返し応力-ひずみ曲線

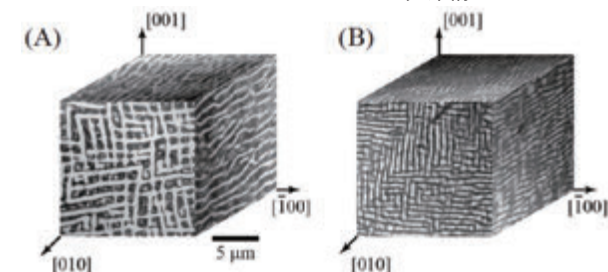


図3 超高压走査透過型電子顕微鏡観察像より作成したCuの転位組織三次元構成像 (A)  $\gamma_{pl} = 1.0 \times 10^3$ , vein-like組織と (B)  $\gamma_{pl} = 1.0 \times 10^2$ , labyrinth組織

### 2. キリガミに基づくナノ構造の形態設計に関する数理解析

材料関係の産業界において、転位や回位など格子欠陥(図4)の規則的な二次元ナノスケール構造体に部分的に導入された格子欠陥構造(回位)は、構造体全体の形を曲面に変化させる形態形成能があります。本研究では、ナノ構造の形態設計や創成の方法論にオリガミ・キリガミを応用した新しい視点を取り入

れ、図4に示すように機能性を有する曲面を設計しています。図5の構造における力学モデルと図6の形状における幾何学モデルに基づく計算機実験として、グラフェンシートを対象に、ナノ構造体の数理解析を進めています。

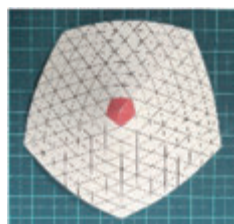


図4 紙模型

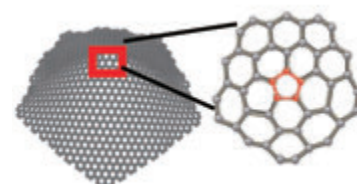


図5 力学モデル

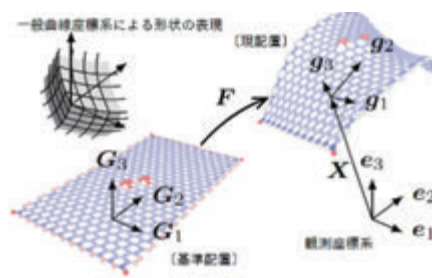


図6 幾何学モデル

### 3. 格子欠陥によるナノ機能設計

材料関係の産業界において、転位や回位など格子欠陥の制御は材料の強化または新奇な機能創出を行う場合、避けて通ることのできない重要な問題です。本研究では計算機シミュレーションにより、初めて格子欠陥をカーボンナノチューブに導入し、数理解析によりナノスプリング(図7)の精密設計手法を提案し、画期的な機能設計が成功しました。

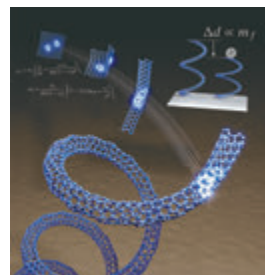


図7 ナノスプリング

### 4. 銅合金の微細組織と各種特性

スマートフォンやテレビなどの電気・電子機器に用いられる配線用銅合金には、高い強度とともに高い導電性が求められます。高強度化のためには、銅に異種元素を添加し、熱処理による析出強化を行います。しかし、一般に、材料強化のための異種元素添加は導電性低下を招きます。この問題を解決すべく、熱力学や相平衡論に基づく材料組織制御の手法を探索しています。また、巨大ひずみ加工による結晶粒超微細化に着目し、複数の強化機構の重ね合わせによる強度-延性バランスの最適化や組織の熱的安定性向上にも挑戦しています。



助教  
黄錫永

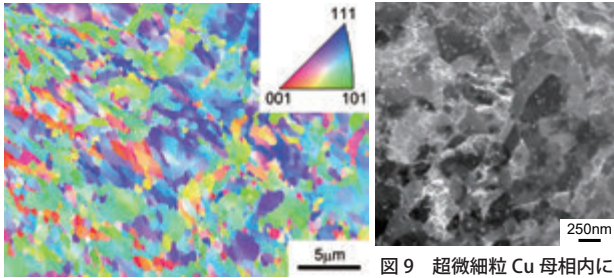


図8 Cuの超微細粒組織

図9 超微細粒Cu母相内に分散したFe粒子

### 5. マグネシウム合金のキンク形成とキンク強化

シンクロ型長周期積層構造 (LPSO) をもつマグネシウム合金は、加工によってキンク変形し、キンクの形成に伴って著しく強度が増すことが知られています。合金内でどのようにキンクが形成され、なぜキンク導入によって合金強化されるかは、ここ数年で明らかになったことがあるものの、未解明の部分も残されています。マグネシウム合金におけるキンク形成とキンク強化が実験と理論の両面で解明されれば、マグネシウム合金に限らず、他の合金、さらには、有機材料や無機材料にも応用可能な新たな材料強化手法を生み出せる可能性があります。

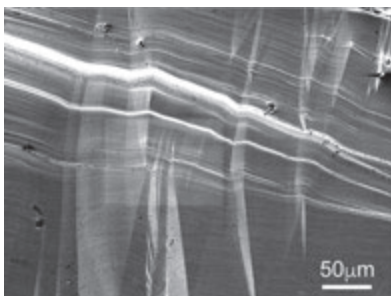


図10 LPSO相に形成されたキンクのSEM写真

### 6. ナノ積層構造体における変形メカニズムに関する分子動力学解析

ナノ積層構造体 (図11) は材料工学や物性物理学の分野で急速に注目を集めています。本研究では分子レベルにおける精緻なナノ構造、機能をマクロレベルの材料の構造、機能に繋げる方策を探るため、幾何学および分子動力学シミュレーションによる原子構造情報から、積層構造体の変形メカニズムに関する研究を進めています。

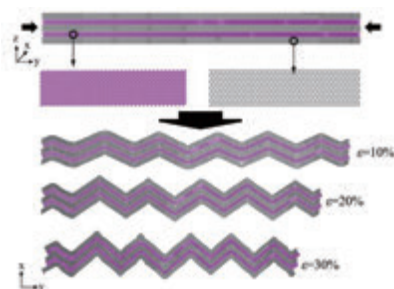


図11 ナノ積層構造体の変形シミュレーション

### 研究室からのアナウンス

- ・専門分野：材料組織学・材料強度学・金属疲労，計算材料力学・ナノ機能設計学
- ・メンバー：教員3名，秘書1名，客員研究者1名，博士5名（内留学生5名），修士8名（内留学生3名），学士2～4名（予定）
- ・2025年学生の受賞：物質理工学院 材料系 金属分野 修士論文発表会の最優秀発表賞（M2 @ 2025.2），物質理工学院 材料系修士論文中間発表会の最優秀発表賞（M2 @ 2025.8），日本材料学会関東支部 2025 学生研究交流会 支部長賞（M1 @ 2025.10），第22回ヤングメタラジスト研究交流会の優秀ポスター賞（M2 @ 2025.11），日本機械学会若手優秀講演フェロー賞（M2 @ 2025.12）など
- ・2025年学生の業績：修士学生は筆頭著者の英文学術論文はJSTにプレス発表・日本経済新聞に掲載されました，第68回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム（B4 学生ポスター発表 @ 2025.3），国際会議 The 20th International Conference on Strength of Materials（M2・D3 学生ポスター発表 @ 2024.9），日本金属学会 2025 年秋期講演大会（M1 学生ポスター発表 @ 2025.9），日本機械学会第38回計算力学講演会（M1・M2 学生ポスター発表 @ 2025.9），日本材料学会関東支部企画 2025 学生研究交流会（B4・M1 学生ポスター発表 @ 2025.10），東京科学大学 - 大連理工大学 - 清華大学ワークショップ（M1 学生口頭発表 @ 2025.10），第22回ヤングメタラジスト研究交流会（M2 学生ポスター発表 @ 2025.10）など。



2025年6月集合写真



計算力学講演会



FNTG 総合シンポジウム

藤居・雷研究室では、学生の自主性を尊重し、自らの思考力と問題解決能力が発揮できることを大切にしています。研究内容について、上記の研究テーマに限らず、学生の希望研究内容を最優先します。藤居・雷研究室では、材料学のみならず、物理や機械工学を専門分野とする学生等の大学院入学も歓迎し、研究室では多様な分野から学生を受け入れています。

# 細田秀樹・田原正樹 研究室

エネルギー・医療革新への新機能性材料創製・設計



教授  
細田秀樹



准教授  
田原正樹

<http://www.mater.pi.titech.ac.jp/>

## はじめに

人や環境に優しく、様々な社会課題の解決に貢献する、新しい機能材料の研究・開発を行っています。特に形状記憶・超弾性材料の研究に取り組んでおり、新材料の基礎物性研究から、エネルギー、医療、低炭素化などへの応用展開を見据えた研究をしています。当研究室は、材料コースとエネルギー・情報コース、人間医療科学技術コースに所属しています。

**専門分野：**材料設計、エネルギー・医療、形状記憶・超弾性合金

**キーワード：**構造・機能材料、複合材料、磁性材料、機能性チタン合金、貴金属合金、センサー・アクチュエータ、相変態、相安定性、状態図、結晶構造、組織制御、金属間化合物、医歯工連携、新材料プロセス、金属 3D プリンティング等

## 研究組織と研究について

当研究室は物質理工学院のみならず、新研究領域の創出と、人類社会の課題解決、将来の産業基盤の育成を強く意識した世界トップレベル研究の創出を使命とする総合研究院にも所属しています。このため、当研究室に配属された学生は、物質理工学院としての教育を受けるだけでなく、総合研究院の仲間として世界最先端研究やその社会実装にも携わることになります。世界を変えるかもしれない最先端材料研究とその応用に携わりたい学生を歓迎します。



図1 形状記憶合金の応用例

## 研究テーマについて

### 1. 生体用・エネルギー用新形状記憶合金（チタン、金合金）

形状記憶・超弾性合金は、エネルギーや最先端医療のための材料です。廃熱からのエネルギー回収ができ、高齢者の心臓病や脳卒中などの血管疾患の治療機器にもなります。形状記憶合金の最先端医療機器を使えば、3ヶ月の入院が必要な脳内動脈瘤治療が1日で済みます。チタンや金からなる人体に優しい形状記憶合金は我々が世界に先立ち開発した材料です。世界最先端の研究として多くの国内外大学・企業と共同研究を行っており、医療やエネルギー技術への貢献を目指して多数の新材料を発明しています。

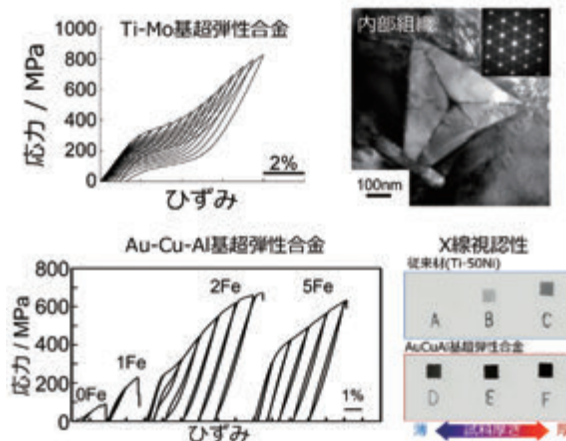


図2 当研究室で開発したTi基超弾性合金とAuCuAl基超弾性合金

### 2. 磁場駆動アクチュエータ材料・複合材料

磁場で動く磁性形状記憶合金を用い、遠隔より「磁場」で操作できる人体に優しい樹脂との複合材料を研究しています。磁場により変位を制御できることから、通常の形状記憶合金よりも高速で駆動できるアクチュエータとしても期待されています。当研究室の発明の一つで、スペインバスク大学等と国際共同研究をしています。

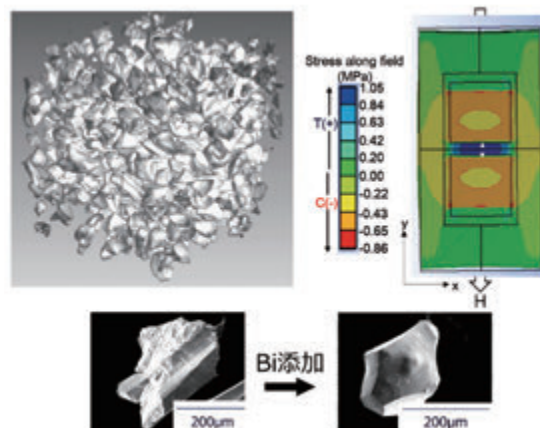


図3 磁性形状記憶合金/ポリマーコンポジット



助教  
野平直希

助教  
原島亜弥

### 3. 形状記憶合金単結晶を用いた基礎的研究

形状記憶合金の動作挙動を本質的に理解し、より優れた新合金の開発に繋がる知見を得るために、単結晶を用いた基礎的研究を行っています。形状記憶効果をもたらすマルテンサイト変態をはじめ、金属材料の変形・変態挙動を解明するためには単結晶を用いた研究が非常に強力な手段となります。当研究室で開発した新しい形状記憶合金に加え、様々な形状記憶合金の単結晶を浮遊帯域溶融法などにより作製し、マルテンサイト変態挙動や変形挙動、結晶配向性の解明に取り組んでいます。

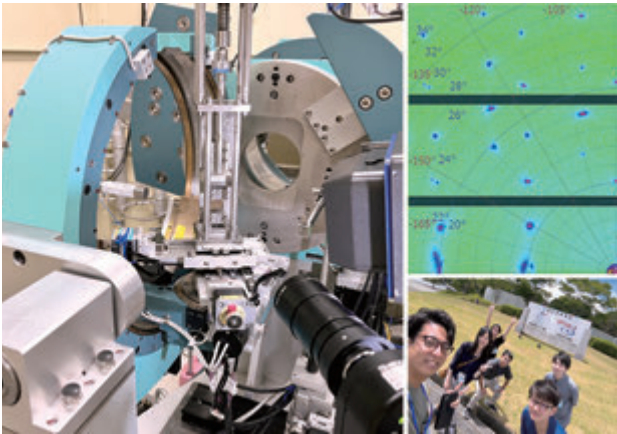


図4 形状記憶合金単結晶を使ったSPring-8での実験

### 4. AIを用いた金属組織解析

材料の理解には微細組織の解析が不可欠ですが、人による画像解析は時間がかかり、再現性にも課題があります。特に、微細組織画像の3D化に伴い、これらの問題は一層顕著になります。そこで当研究室では、AI技術を活用し、深層学習（セマンティックセグメンテーション）を用いた2Dおよび3D画像解析に取り組んでいます。単に既存のモデルを利用するだけでなく、金属学の知識を反映したモデルを開発し、相分類や結晶粒界抽出などの解析をAIによって自動化することで、効率的な材料開発手法の構築を目指しています。

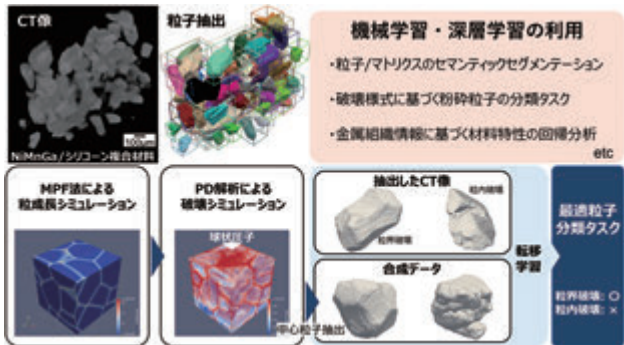


図5 AIを用いたCT画像の組織分類

### 5. 新たな形状回復原理に基づく形状記憶材料の探索

従来の形状記憶合金は原子拡散のないマルテンサイト変態によって動作していました。当研究室では、原子拡散が生じて形状回復が生じる新たな原理を発見しました。これにより、従来は不可能とされていた物質群でも形状記憶効果が得られつつあり、全く新しい形状記憶材料の探索が可能になりました。世界初の新規形状記憶材料の創出を目指して研究を行っています。

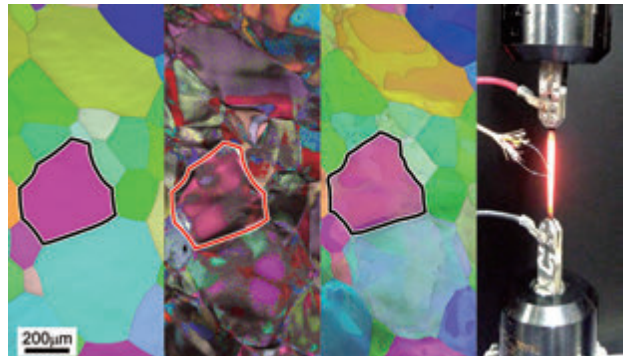


図6 拡散変態による新たな形状記憶合金の探索

### おわりに

当研究室では様々な新しい機能性材料を最先端の設備を使って研究しています。所属学生は国内外の関連学会で研究成果を発表し、多数の賞を受賞するとともに第一著者として論文発表しています。最先端材料の研究開発をしたい意欲のある学生を歓迎します！

### 1. メンバー

スタッフ：教員4名、研究員1名、秘書1名、補佐員2名  
学生：20名 D3×2, D2×2, D1×2, M2×7, M1×5, B4×2（予定）

### 2. 学生の受賞（2025年）

日本金属学会優秀ポスター賞2件、金属学会第7分野講演優秀ポスター賞2件、日本チタン学会最優秀ポスター賞1件等

### 3. 卒業後の進路

博士進学、日本製鉄、JFEスチール、トヨタ、日産、日揮、JFEエンジニアリング、東京電力、など主に材料、自動車、機械、電気、コンサル等



図7 研究室集合写真（2025年度）

# 材料系 A群 (金属分野) 教員マップ

## 大岡山キャンパス

### 南 8 号館 (1)

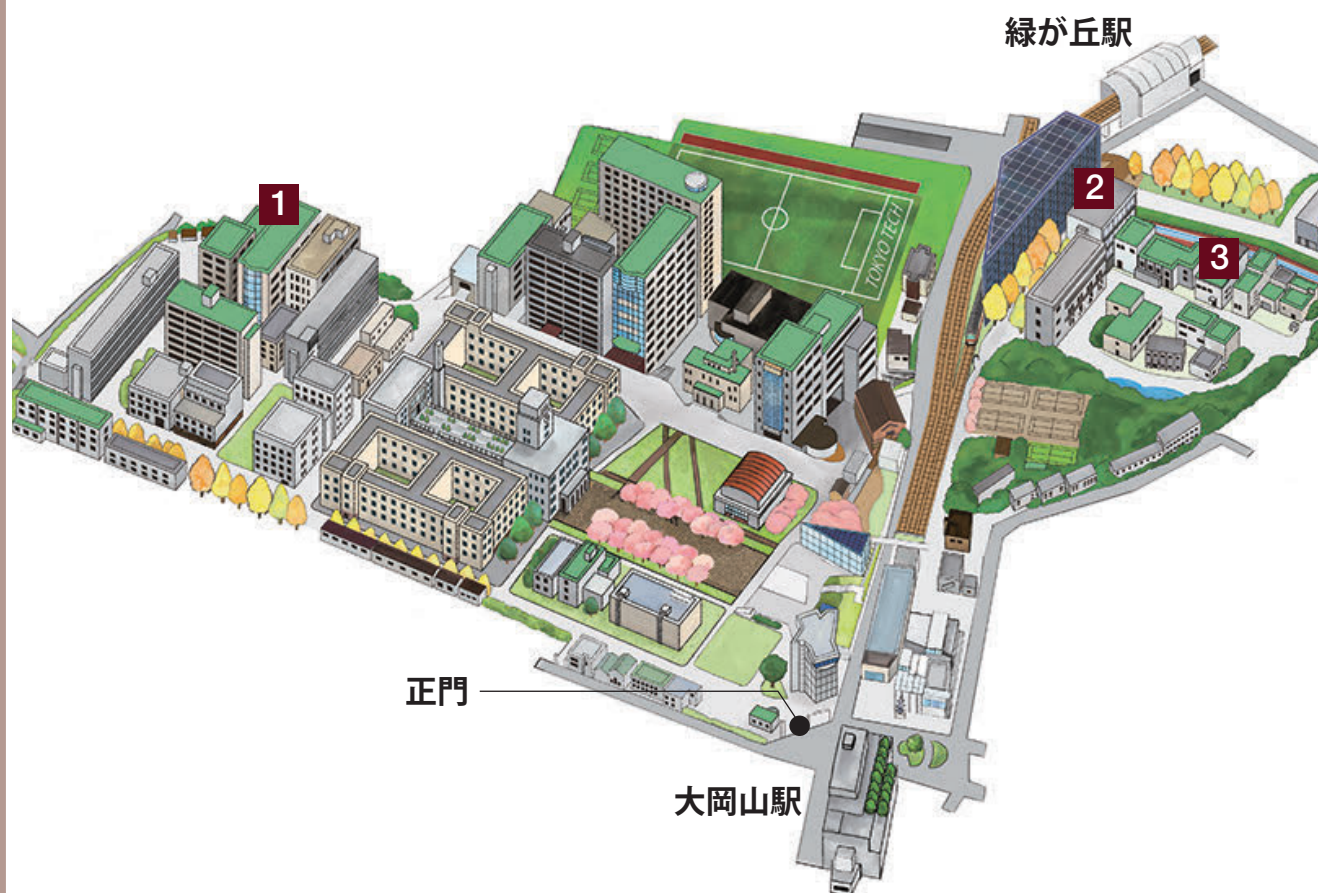
准教授	河村 憲一	305号室
准教授	邱 琬婷	409号室
准教授	小林 郁夫	207号室
准教授	小林 覚	505号室
教授	史 蹟	212号室
教授	多田 英司	404号室
教授	林 幸	312号室
准教授	春本 高志	213号室
教授	藤居 俊之	410号室
教授	村石 信二	211号室
准教授	雷 霄雯	405号室

### 北 2 号館 (2)

教授 小林 能直 328号室

### 北実験棟 2A (3)

准教授 安井 伸太郎 201号室



# 材料系 A群 (金属分野) 教員マップ

## 横浜キャンパス

### J1 棟 (1)

准教授 中 辻 寛 411号室

### J2 棟 (2)

教 授 合 田 義 弘 1407号室

教 授 三 宮 工 1502号室

准教授 寺 田 芳 弘 1404号室

### J3 棟 (3)

教 授 稲 邑 朋 也 1116号室

教 授 木 村 好 里 1516号室

教 授 中 田 伸 生 1521号室

### R2 棟 (4)

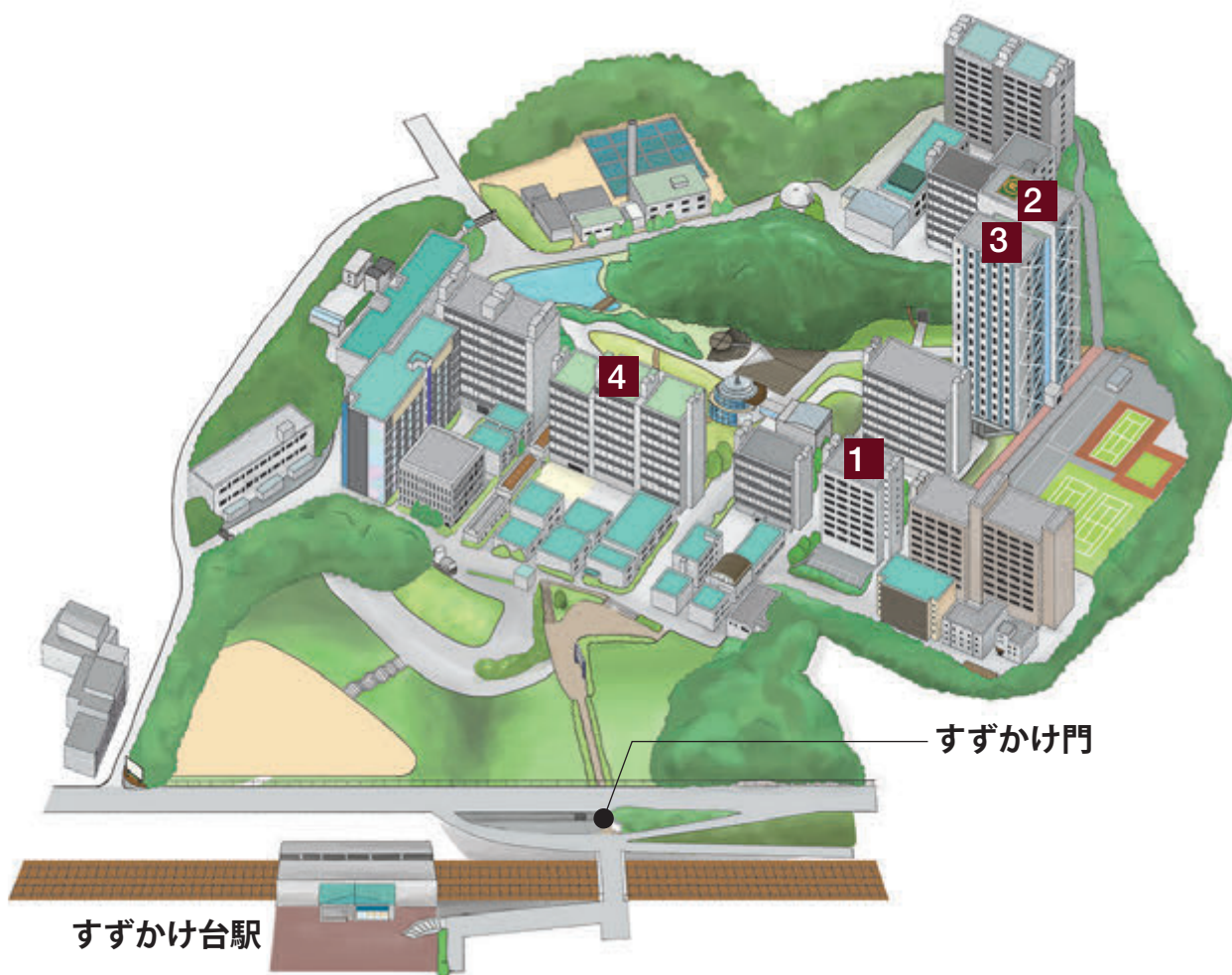
准教授 大 井 梓 804号室

教 授 曾 根 正 人 920号室

准教授 田 原 正 樹 916号室

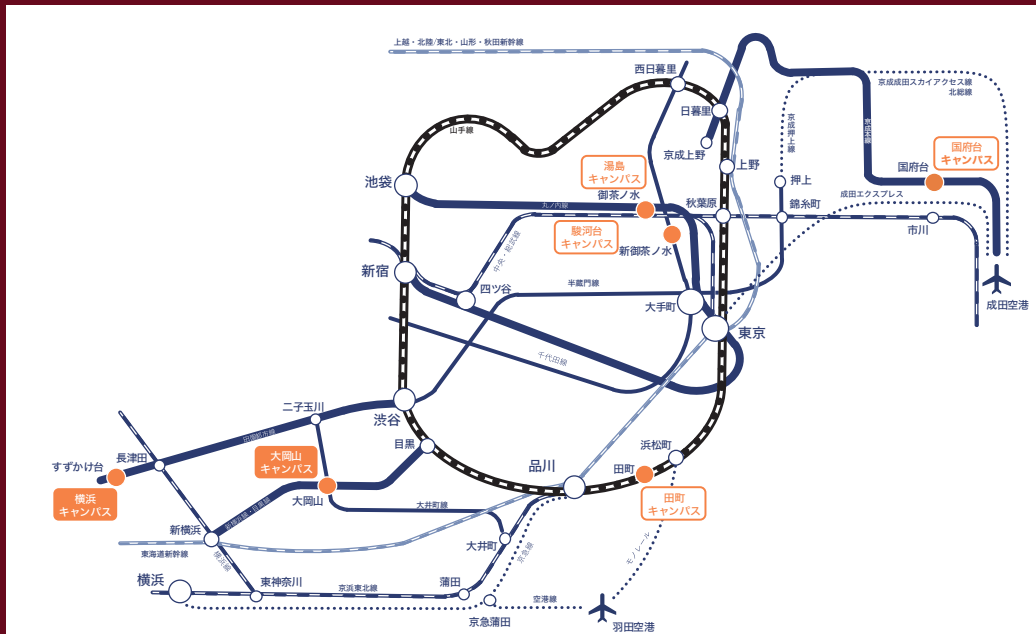
准教授 Tso-Fu Mark Chang 918号室

教 授 細 田 秀 樹 914号室



すずかけ門

すずかけ台駅



大岡山キャンパス：東急大井町線・目黒線 大岡山駅  
 横浜キャンパス：東急田園都市線 すすかけ台駅

下車徒歩 1分  
 下車徒歩 5分



<https://educ.titech.ac.jp/mat>

東京科学大学 物質理工学院  
**材料系(金属分野)**

大岡山キャンパス  
 〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1

横浜キャンパス  
 〒226-8501 横浜市緑区長津田4259

発行日 2026年4月1日

# 物質理工学院の構成

		大学院課程（修士・博士課程）			
物質理工学院	材料系	材料コース	エネルギー・情報コース	人間医療科学技術コース	原子核工学コース
	応用化学系	応用化学コース	エネルギー・情報コース	人間医療科学技術コース	原子核工学コース

## 材料コース

### 材料が変われば世界が変わる，世界を変えるのはあなたです

これまでには存在しなかった全く新しい機能を持つ材料が見つかること、科学技術に飛躍的進歩をもたらすことができます。それが材料を研究することの魅力の1つです。材料コースでは、多様な分野から大きな夢を抱く学生を受け入れ、世界で活躍できる材料のプロフェッショナルを育てます。

## エネルギー・情報コース

### “エネルギー × 情報” の学理融合によるカーボンニュートラルとスマート社会の実現

複雑に発展したエネルギー関連技術を各系の基礎と専門性に基づいて再構造化した学問領域“多元的エネルギー学理”，さらに、多角的に発展する情報科学技術と融合させた“エネルギービッグデータ科学”の知識とスキルを修得します。常に激変する環境エネルギー問題の解決を目指し、本質を見抜く俯瞰力と洞察力、自立的な課題抽出解決力、迅速な実行力を兼ね備え、国際的リーダーシップを発揮してイノベーションを牽引できる人材を養成します。基礎となる材料系の専門分野についても深く学びます。

## 人間医療科学技術コース

### ひとの健康を守り，ひとに優しい持続的な社会の実現のために科学技術の発展に貢献する

本コースでは、地球上の全ての人々の豊かな暮らしを実現するために、人の健康や医療に関する最先端の融合的な研究開発を推進します。人に関する科学、すなわち、理工学、医歯学、看護学、医療技術学、健康科学などの専門分野を機能的に融合し、世界中の人々が持続的に発展できる安心・安全な生活基盤の構築を志向した、未来に向けた新たな学問分野の創出とその分野を担うグローバル人材を養成します。

## 原子核工学コース

### 原子核エネルギーと放射線の有効利用でカーボンニュートラル・健康社会に貢献する

カーボンニュートラル社会実現に向けたゼロカーボンエネルギーの活用、また科学の進歩で人々が健康で幸せに暮らせる社会の実現が望まれています。原子核工学コースでは、安全で安心な原子核エネルギー活用とそのシステム構築、そして放射線の活用などによりこの実現を目指し、これを支える科学・工学を研究対象とした原子核工学を体系的に学修し、また研究に取り組むことで、これらの課題に答えていきます。

# 稲邑朋也 研究室

組織の幾何学で拓く次世代金属材料

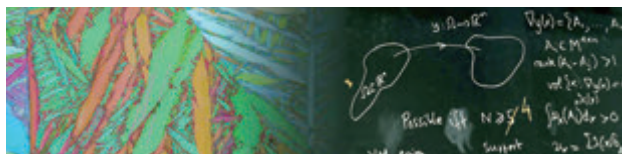


教授  
稲邑朋也



助教  
松村隆太郎

[http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura\\_tit/](http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura_tit/)



## はじめに

「Seeing is believing (百聞は一見に如かず)」——新しい事実を目の当たりにすることで得られる理解は計り知れません。一方で、「Believing is seeing」という言葉もあります。信じているからこそ見えるものがあるのです。

稲邑研究室では、電子顕微鏡など金属研究においてオーソドックスな実験手法を用いて「見る (Seeing)」を深める一方で、「信じる (Believing)」に数学的手法 (変形の幾何学) を取り入れています。材料の組織形成や変形に宿る数理は、物理現象の本質を明らかにし、新しい材料設計の原理や技術革新を生み出す強力な道具となります。

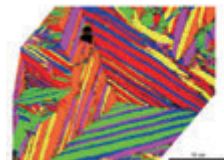
私たちの研究室では、金属物理学や金属組織学の基礎知識を土台に、数学的な理論解析、各種顕微解析、回折実験を組み合わせて、形状記憶合金、マグネシウム合金、鉄鋼を中心に研究を行っています。実験と理論のバランスは、学生の個性や興味に合わせて柔軟に調整しています。実験が得意な人、理論解析が好きな人、どちらも歓迎します。



## 研究テーマ

### 1. 超長寿命形状記憶合金 —幾何学で機能劣化を克服する—

形状記憶合金は、変形しても加熱すれば元の形状に戻る特性を持つ金属で、低侵襲医療などで広く使われています。しかし、繰り返し使用すると性能が劣化しやすいという課題があります。私たちは、機能劣化をもたらす転位が全く発生しない特殊な内部組織を実現するための「Triplet Condition」と呼ばれる新しい幾何学的条件を発見しました。この知見をもとに、超長寿命化原理を提唱すると共に、耐久性を大幅に向上させた新合金を産学共同開発しています。医療技術や環境技術の発展、新奇製品の創出を目指した研究です。

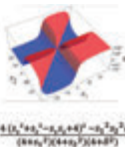
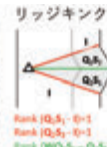
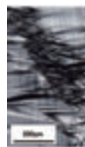


Proposition. Let  $U, V, W \in \mathbb{R}_{2 \times 3}^{3 \times 3}$  be three distinct symmetry related martensite variants and  $(\mathbf{v}, \mathbf{b}, \mathbf{m})$  is a twin between  $V$  and  $W$ . Then,  $R(V + \lambda \mathbf{b} \otimes \mathbf{m}) = U + \mathbf{a} \otimes \mathbf{n}$  has a solution  $R \in SO(3)$ , and  $\mathbf{a}, \mathbf{n} \in \mathbb{R}^3$  for each  $\lambda \in [0, 1]$  if and only if  $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b})^2 \text{col}(\mathbf{V}^2 - \mathbf{U}^2) \mathbf{m} = 0$   
 $\text{tr}(\mathbf{U}^2 \mathbf{V} \mathbf{V} \mathbf{U}^2) - (\mathbf{m}^T \mathbf{U}^2 \mathbf{V} \mathbf{b})^2 / |\mathbf{b}|^2 |\mathbf{U}^2 \mathbf{m}|^2 \geq 3$ .

### 2. 幾何学的強化 —キンク組織が秘める材料強化の原理—

マグネシウム合金は、比強度の高さから次世代の軽量化技術を支える重要な材料として注目されています。特に、長周期積層構造を持つマグネシウム合金は、キンク変形によって形成される特異な組織が極めて高い強度をもたらすことが知られています。しかし、その強化メカニズムは未だ十分に解明されていません。

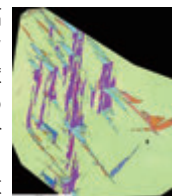
私たちは、マグネシウム合金のように塑性変形モードが限定的な材料において、変形の連続



性をもたらす拘束状態が強化機構として機能することを明らかにしつつあります。この研究では、キンク変形に伴う「回位」と呼ばれる格子欠陥が強度向上に寄与すること、さらにキンク組織がなぜ変形を妨げる障害物となるのかを、理論と実験の両面から解明します。私たちは、これらの知見を基に、キンク組織がもたらす強化機構の全貌を明らかにすることに挑戦しています。

### 3. 鉄鋼のバリエーション結合則 —次世代の高強度鋼のために—

社会基盤や環境技術に貢献する次世代高強度鋼を開発するためには、ラスマルテンサイト組織を従来以上に制御する技術が求められています。この制御を実現するためには、特定のマルテンサイト晶同士が結合する性質「バリエーション結合則」を理解し、ラス組織形成の原理を明確化することが不可欠です。私たちは、バリエーション結合で生じる幾何学的不適合性に基づいてバリエーション結合則を統一的に捉える理論的枠組みを構築し、それに基づき、ある種のバリエーション結合が、ラスマルテンサイト組織の階層構造のスケールを決めていることを明らかにしつつあります。この研究は鉄鋼メーカーと共同で進めており、未来の社会を支える高強度鋼のために、さらなる技術革新を実現することを目指しています。



## 研究室の運営体制、卒業生の就職先



当研究室は細田・田原研および菅根・Chang研と一部の設備を共有し、合同ゼミやイベントを通じて広い視野を育む環境を提供しています。2026年度は教員2名、事務支援員1名、実験補佐員1名、修士

課程6名、学部生1~2名、研究生1名で活動予定です。卒業生は産業界や学術界で活躍しています。

学会活動：日本金属学会、日本鉄鋼協会、軽金属学会など  
卒業生の就職先：

NTT, 三菱重工, 東京工業大学, キオクシア, 大日本印刷, 野村総研, 日本冶金, SUBARU, JR 東日本, 神戸製鋼, 日本製鉄, JFE スチール, 三菱マテリアル, 日産自動車, 本田技研工業, トヨタ自動車, 武蔵エンジニアリング, 神戸大学, 東京都庁, リクルート, 博報堂, 丸紅

稲邑研究室は、変形や組織の幾何学と実験を融合させた独自のアプローチで、金属材料の新しい可能性を切り拓きます。材料科学への情熱を持つ皆さんと共に、新しい知見を生み出し、未来社会を支える研究に挑戦したいと考えています。興味をお持ちの方はぜひ気軽にご連絡ください！

# 大井 梓 研究室

金属材料の溶解劣化機構解明に立脚した材料開発を目指して



准教授  
大井 梓

<http://www.ooi-mat.mac.titech.ac.jp/>

## はじめに

金属材料は、強度・延性・展性・電気伝導性・熱伝導性などに優れているため、用途に応じて様々な分野で使用されています。しかし、金属材料はその使用環境下において、材料表面で起こる溶解（腐食）反応により徐々に劣化し、優れた特性を失ってしまいます。したがって、金属材料の溶解機構を解明することは限られた資源の有効活用を可能とし、地球環境の保全につながります。

我々の研究室では、材料の種類（鉄鋼材料から非鉄材料まで）・材料の規模（ナノサイズの触媒から橋梁などの大型構造物まで）・使用される環境（エネルギー分野・インフラ分野・医療分野）を問わず研究対象としています。対象は様々ですが、溶解劣化機構の解明をキーワードに、材料が抱える様々な社会課題の解決に取り組んでいます。

## 研究室について

大井研究室は、2024年4月に発足した新しい研究室です。発足したばかりですので、今後の研究室を支えていくメンバーを募集しています。研究室では、学生が主体性・自立性および論理的思考力を養えるように、学生と教員との双方向コミュニケーションを意識しています。また、得られた研究成果の学会発表および学術誌への投稿を積極的に行います。

## 研究テーマについて

### 1. 固体高分子形燃料電池用電極触媒の耐久性に関する研究

家庭用および自動車用電源として開発が進められている固体高分子形燃料電池（図1参照）PEFCは、究極のクリーンエネルギー変換装置として実用化が期待されています。しかし、実用化のためには、電池製造にかかるコストを下げることに、さらに電池材料の長寿命化が必要不可欠であります。特に、電極材料の製造コストは、単セルコスト全体の約40%も占めるため、安価・高触媒活性・長寿命な電極材料の開発が急務になっています。我々の研究室では、PEFCの正極触媒として使用されるPt合金触媒の溶解劣化機構の解明、電極反応機構の解明、Pt使用量を低減したPt合金触媒の開発などの基礎研究を活発に行っています。

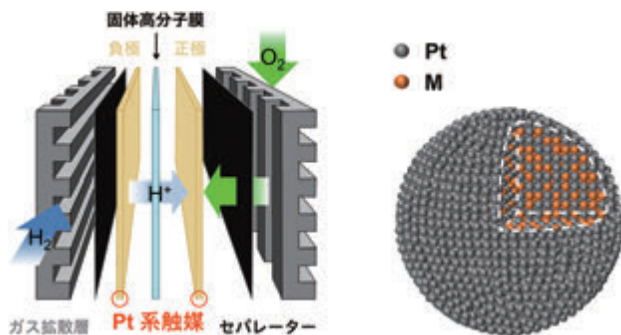


図1 固体高分子形燃料電池の模式図（左）とコアシェルPt-M合金系電極触媒の模式図（右）

### 2. ナノスケールでの金属材料の溶解機構解明に関する研究

金属材料の溶解速度を定量評価する技術は、その溶解機構解明や寿命予測を可能にするため、高耐久性を有する材料設計に有益な情報を資するものであります。しかし、溶解劣化がナノから原子レベルで進行しますと、そもそもその検出は極めて困難といえます。我々の研究室では、触媒材料・生体材料・構造材料を対象に、電気化学測定法（図2）・溶液分析法・電子顕微鏡法（図3）・数値シミュレーション技術を活用して、材料の使用環境下におけるナノスケールでの溶解劣化過程のモニタリング技術開発に取り組んでいます。また、これら技術を適用して得られた結果を基に、高耐食性材料開発指針の提案や防食技術の確立を目指しています。

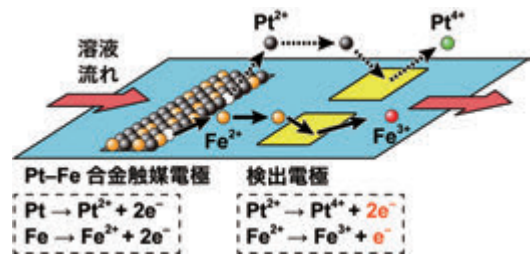


図2 チャンネルフローマルチ電極法による溶解金属イオンのin-situ検出

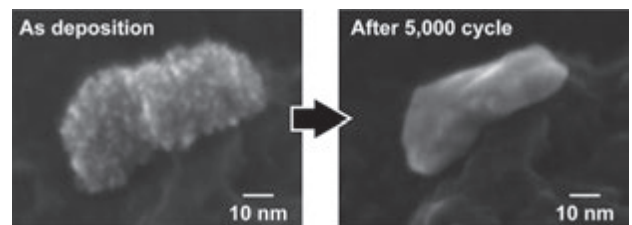


図3 走査型電子顕微鏡を用いたナノ粒子の溶解劣化前後の同一視野観察結果の一例：溶解劣化前（左）と溶解劣化後（右）

### 3. 鉄鋼材料の土壌腐食に関する研究

近年、省資源・省エネルギーの観点から鉄鋼材料の長寿命化が求められています。また、我々の社会生活を支えるインフラ構造物の老朽化も社会問題となっています。特に、土壌に埋設された鋼管杭やコンクリート内部の鉄筋は腐食により重大な事故につながる可能性があります。目視でその劣化状況を確認することは困難といえます。このように直接見えない部分に使用される材料の信頼性担保および長寿命化を実現するために、我々の研究室では電気化学測定法を駆使した、腐食モニタリング技術の開発に取り組んでいます。

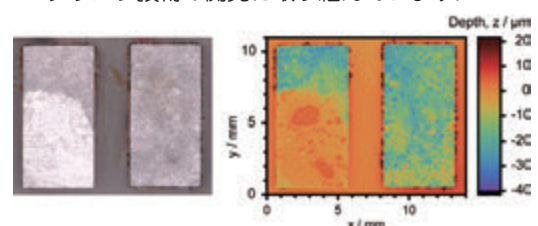


図4 土壌埋設試験後の腐食モニタリング電極の光学顕微鏡像（左）とワンショット3D形状測定機による腐食深さの解析結果（右）

# 河村憲一 研究室



准教授  
河村憲一

熱さに負けない金属の美肌の追求

<http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/>

## はじめに

暑い夏、太陽の紫外線によって人の肌は日焼けして黒くなり、日差しに対して強くなります。ところが、上手に日焼けしないと水ぶくれなどができてしまいやけどしたのと同じことになってしまいます。ところで、金属光沢のあるフライパンを空焼きすると表面がさびて色が付きます。良い「さび」を作ることができると、料理が焼き付かなくなるだけでなく、「さび」が空気を遮断して金属素地がやせ細っていくのを遅らせてくれます。高温で使われる大部分の金属材料は、エネルギー変換に関わるものなので、この「さび」を制御することがエネルギーの有効利用につながります。本研究室では、高温での「さび」の生成・成長過程を明らかにすることで、その機構解明、新材料開発を行っています。また、「さび」は金属が酸化した金属酸化物です。この金属酸化物の高温での特性を利用した機能性材料の開発も行っています。

## 研究について

当研究室では、「エネルギーと地球環境の未来のために」を標榜し、高効率なエネルギー変換に必要とされる材料や、運用に必要な基礎的データに関する研究を行っています。研究の対象は、「高温で使用される金属およびセラミックス」です。これらを高温環境で長く使用できるようにするため、金属とセラミックスの高温における機能性とその制御を高温固体化学、結晶格子欠陥などの立場から研究しています。

実験データの信頼性は、測定者が装置をどれだけ理解しているかに大きく依存します。当研究室では自分の測定装置は自分で作ることを基本とし（図1）、原理原則から自分のやっている測定を理解できるようにしています。



図1 実験室の風景。ハンドメイドの実験装置。

## 研究テーマについて

### 1. 金属の高温酸化に関する研究

金属材料は、高温の大気環境下などでは、表面が酸化され、徐々に金属としての部分が無くなっていきます。当研究室では、金属材料が高温で酸化する過程（酸化機構）をより詳細に解明し（図2）、耐酸化特性の観点から高温の大気環境下でより安定に使用できる耐熱合金の設計指針を提案しています。

### 2. 固体酸化物燃料電池に関する研究

燃料電池は、環境負荷の少ない発電システムとして注目されています。当研究室では、燃料電池の中でも最も高温で動作する固体酸化物型燃料電池(SOFC)に関する研究を行っています（図3）。SOFCにとって重要な構成部材である「合金インターコネクト」に特化し、使用環境における耐酸化特性を評価しています。

### 3. 熔融金属用酸素センサに関する研究

核燃料サイクルなどで発生する高レベル放射性廃棄物の最終処分の負荷低減のため、放加速器駆動核変換システム(ADS)の研究開発がすすめられています。ここで冷却剤として用いられる熔融金属と配管との間の反応を抑制するためには熔融金属に含まれる酸素の濃度を制御する必要があります。この制御に必要な酸素センサを高信頼性という観点から開発しています。



図2 雰囲気制御型高温酸化皮膜表面酸素ポテンシャル測定装置。高温ガス環境下における金属材料表面に形成する酸化皮膜表面の酸素の状態を観測する装置。酸化現象の本質に迫ります。

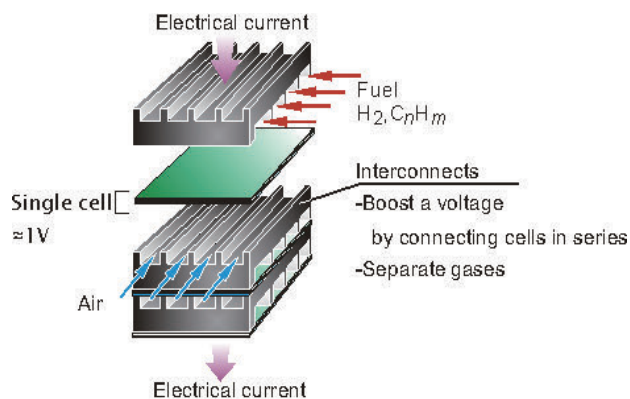


図3 固体酸化物燃料電池の概略。燃料電池の大容量化に欠かせない合金インターコネクト。高温における耐酸化性、電気伝導性など様々な特性が要求されます。

# 木村好里 研究室

地球環境に優しい金属材料の機能特性デザイン



教授  
木村好里



助教  
王 益彦

<http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/>

## はじめに

エネルギー変換材料としての金属材料にフォーカスして、材料科学と工学の分野から地球環境保全に貢献できることを研究室メンバーみんなで一緒に考え、真剣かつ楽しく研究に励んでいます。木に年輪があり織物に縦糸と横糸があるように、金属材料の内部には外見からは想像できないほど複雑な「組織＝微視的構造 (microstructure)」があります (下図：研究例)。原子が規則的に整然と並ぶ結晶構造には乱れた不完全部分として種々の格子欠陥や相界面がたくさん含まれており、組織を構成しています。機能特性に優れた金属材料を設計して創製するためには組織、相界面、格子欠陥を巧みに制御することが大切です。材料の飛躍的な性能向上を目指すことはもちろん、信頼性と耐久性の改善、環境低負荷に配慮した合金系の選択、省エネルギー型作製プロセスの開発にも挑戦しています。

## 1. 熱電材料 — 未利用の熱を電気に直接変換 —

産業活動、日常生活、自然界を通じて地球には様々な形態と規模で未利用の熱が存在します。温度差 (Seebeck 効果) で発電する熱電発電は熱を電気に変換できるクリーンな技術です。有毒元素や希少元素を含まない環境に優しい熱電材料として TiNiSn に代表される Half-Heusler 化合物、 $\beta\text{FeSi}_2$  や  $\text{Mg}_2\text{Si}$  に着目しています。例えば Half-Heusler 型規則構造の空孔サイトに元素を優先的に固溶させ、バンド構造制御により  $n-p$  特性変換を制御します。バンド構造は、材料の電子構造によって決定されるため、放射光施設 “SPring-8” での光電子分光測定も計画中です。その他、(Zr,Ti) NiSn と  $\text{Mg}_2(\text{Si},\text{Sn})$  では固相 - 固相分離を利用することで相界面を導入し、フォノン散乱源として利用することで熱伝導低減を目指しています。 $\beta\text{FeSi}_2$  では急冷凝固や酸化還元反応焼結などの作製プロセスに工夫を重ねて組織を制御します。本格的な実用化には性能だけでなく安定性と耐久性の向上が重要です。

## 2. 耐熱合金・鉄鋼材料 — 強さ、しなやかさ、信頼性 —

実用耐熱合金の改善や代替高融点材料の開発によりエネル

ギー変換効率を向上すれば、省エネルギーと環境保全に貢献できます。相反する関係にある強度と延性を組織制御により両立できれば強靱な材料が実現できます。実用 Ni 基超合金の強化相  $L_{12}$  型  $\text{Ni}_3\text{Al}$  と似て非なる  $E_2$  型  $\text{Co}_3\text{AlC}_{1-x}$  では、C 原子を規則化させた  $E_2'$  型  $\text{Co}_3\text{AlC}_{0.5}$  に結晶構造を制御して高強度と延性が両立できます。規則化に伴い形成する逆位相領域 APD は変形能だけでなく磁気特性を制御する因子としても働きます。ステンレス鋼のように機能性を兼ね備えた構造材料の設計では、母相の回復再結晶と共存相の析出が競合する組織制御により機械的性質と機能性をバランスさせます。

## 3. 相平衡と相安定性 — 物質と材料の地図「状態図」 —

金属材料の機械特性や機能特性を決定づける組織は熱処理により制御でき、一方で組織は温度と時間に依存して変化します。材料設計において、どのような組織制御が可能であるかを把握するためには、あるいは使用中の組織変化を予測するためには、物質と材料の地図である『状態図 phase diagram』が貴重な情報源となります。実験で観察している現象は必ずしも平衡状態で進行せず、元素の拡散や界面を介する反応の速度によって律速されます。行き先を知るための平衡論と併せて、現象の経路や機構を理解するために速度論を考慮します。上述した熱電材料、耐熱合金、鉄鋼材料の設計、創製、作製プロセス開発のために、必要とあれば実験によって状態図を構築します。

## おわりに

学生が主役となって自ら考えて研究を切り拓いていくための想像力と創造力を木村研では大切にしています。コミュニケーションという心のキャッチボールを積極的に行って、研究室における信頼の強い絆を構築できればと願っています。成功を目指して、失敗を恐れず糧にして、たくさんの経験を積みましょう。木村研というチームで仲間と一緒に充実した濃密な時間を過ごしながらか成長し、社会へ、世界へ、未来へ力強く羽ばたいてください。

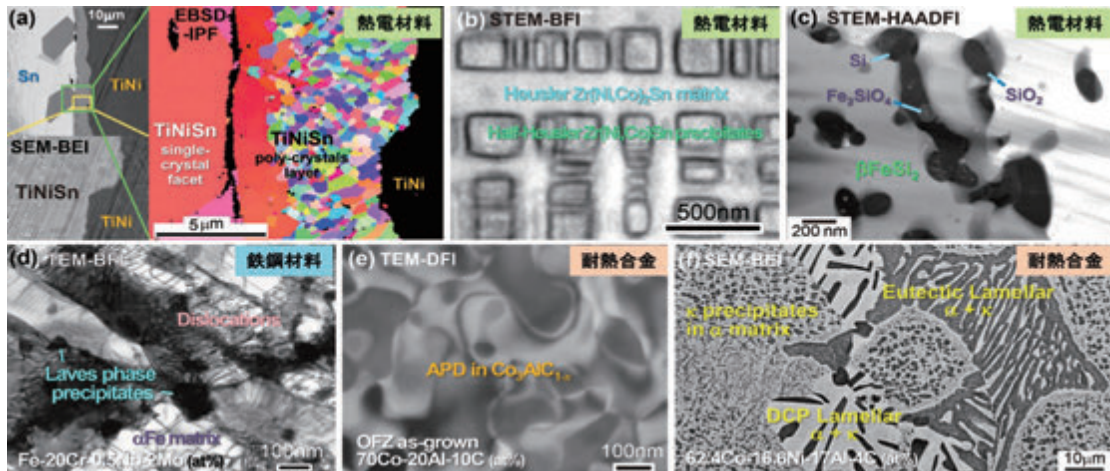


図 (a) TiNi/Sn 固液界面での Half-Heusler TiNiSn 多結晶層と単結晶 facet の形成, (b) Heusler  $\text{Zr}(\text{Ni},\text{Co})_2\text{Sn}$  母相と Half-Heusler  $\text{Zr}(\text{Ni},\text{Co})\text{Sn}$  析出, (c) 共析 Si と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の酸化還元焼結による  $\text{SiO}_2$  分散  $\beta\text{FeSi}_2$  複相組織, (d) 強加工  $\beta\text{Fe}$  母相結晶粒界と粒内に析出する Laves 相 ( $\text{Fe},\text{Cr})_2(\text{Nb},\text{Mo})$ , (e)  $E_2$   $\text{Co}_3\text{AlC}$  単結晶の逆位相領域 APD, (f) 三形態共存の二相組織:  $\alpha\text{Co}$  母相と  $\kappa$ - $\text{Co}_3\text{AlC}$  析出, 共晶ラメラ, 不連続析出 DCP ラメラ。

# 邱琬婷 研究室

パズルを解くように材料の複合化をデザインしましょう



准教授  
Wan Ting CHIU

<https://sites.google.com/view/q-research>

## はじめに

複合材料は紀元前のエジプトから利用されており、藁と泥でピラミッドの煉瓦を作りました。現代の最先端技術では、巨大なロケット、飛行機等の機械からミクロスケールのアクチュエータ、センサー等も色んな種類の複合材料で構成されています。複合材料は遠い昔から現代まで大幅に応用されており、重要な材料といえます。

しかし、複合材料の創成には材料自身の微細構造・形、材料同士のバランス等の要素を考えないといけません。したがって、複合材料の機械特性・機能性等を向上するために、材料の設計が重要です。また、材料を組み合わせた後、材料間では界面が存在します。その界面は材料の性能に影響を与える大きな因子の一つです。さらに、ナノ材料の場合は、材料の機能性が材料表面の性質によって大きく変化します。

本研究室では、複合材料の設計・創成から材料の機械特性・機能性等の評価まで行っています。材料間のバランスをとり、材料表面特性を制御することによって、足し算ではなく掛け算のように複合材料の機械特性・機能性等を向上し、新たな複合材料を研究開発します。

## 研究テーマについて

### 1. 金属ナノワイヤー /PDMS 複合材による柔軟的電極

金属ナノワイヤー (metallic nanowires) /PDMS 複合材は、高い電気伝導性を有する金属ナノワイヤーと、優れた柔軟性・透明性を示すポリジメチルシロキサン (PDMS) を組み合わせた次世代型の透明導電材料です。本複合材料では、ナノワイヤーが形成する三次元的な導電ネットワークにより低シート抵抗と高光透過率を同時に実現できます。また、PDMS 基材の高い伸縮性により、曲げや引張といった外力が作用する状態においても導電特性の低下が抑制され、高い機械安定性を維持する点が特徴です。これらの特性から、本材料はフレキシブルディスプレイ、ウェアラブル電子デバイス、ソフトロボティクス、および皮膚貼付型デバイスなど多岐にわたる応用展開が期待されています。当研究室では、本複合材における材料設計および表面特性の解析を重点的に進めており、構造・特性相関の解明を通じ、高性能かつ信頼性に優れた次世代スマート材料の創出を目指しています。

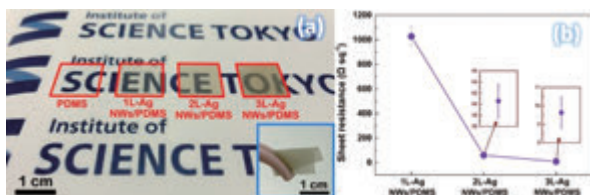


図1 金属ナノワイヤー /PDMS 薄膜複合材料の (a) 透明性と柔軟性および、(b) 導電性の評価

### 2. 磁場駆動可能な Ni-Mn-Ga 単結晶粒子で構成された複合材料

熱で形状変形する材料は良くアクチュエータ・センサー等の材料として使用されています。しかし、熱伝導が材料の動作速度を制限しているため、材料の動作速度が遅いという課題が知ら

れています。そこで、本研究では磁場で形状変形を駆動できる複合材料を開発しています。「Ni-Mn-Ga 単結晶粒子とシリコンゴム」を複合化し、さらに、材料をキュアリングするときに磁場を印加することによって、複合材料の3D微細構造を制御できました(図2)。シリコンゴムとの複合材料以外にも、「Ni-Mn-Ga 単結晶粒子とCu薄膜」の複合材料も開発しています。Cuとの複合材料はアクチュエータ材料以外にも、ヨーロッパでは盛んに研究開発している磁気冷却の材料にも適用できます。複合材料の創成後、磁場印加によって複合材料を変形させ、アクチュエータ材料として実用できるかどうか評価も行っています。

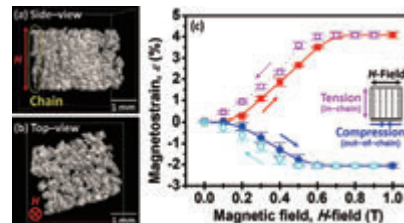


図2 Ni-Mn-Ga 単結晶粒子 /シリコンゴムの複合材料の (a) サイドと (b) トップビュー  $\mu$  CT 像、および (c) 外部磁場印加による変形挙動 (磁場  $\perp$  粒子チェーンは伸び、磁場  $\parallel$  粒子チェーンは縮み)

### 3. 磁場印加で機械特性調整可能な磁気粘弾性エラストマー複合材料

Fe 粒子または Fe 粒子をベースにした材料 (例: Carbonyl iron particles (CIPs); カルボニル鉄粉) とエラストマーとの複合材料は、磁場印加による材料の機械特性を調整できるスマート材料と知られています。その機械特性調整可能な現象は MR 効果 (Magnetorheological effect) と呼ばれています。従来、外部磁場の印加で、Fe 粒子のアライメントとしないと、MR 効果が出ないという問題点があります。カルボニルコーティング (Carbonyl coating) が MR 効果を悪化するという課題もあります。本研究では、アライメントせず、簡易な手法で、「純 Fe マイクロ粒子 /シリコンゴムの複合材料」を合成し、MR 効果を成功に観察できました。それぞれ、9%、16%、23%、および 30% 体積分率の試料を創成し、約 39% の相対 MR 効果が観察できました (図3)。

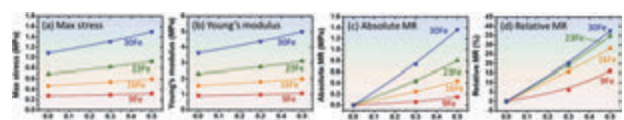


図3 Fe マイクロ粒子 /シリコンゴムで構成された複合材料がそれぞれ磁場印加した時の (a) 最大応力、(b) ヤング率、(c) 絶対 MR 効果、および (d) 相対 MR 効果

## おわりに

上でご紹介したとおり、当研究室は金属をベースにした複合材料の設計開発とそれらの表面科学を評価・分析しています。複合材料の設計・表面科学とそれらの性質の評価に興味のある学生を歓迎します。自分で新材料を設計開発したい・国際雑誌に研究成果を発表したい意欲のある学生を歓迎します。当研究室は多様な分野から学生および世界中の留学生を受け入れています。

# 合田義弘 研究室

第一原理物性理論：計算機の中に物質をつくる

<http://www.cms.materia.titech.ac.jp/>



教授  
合田義弘



特任助教  
田中友規

## はじめに

物質・材料の原子配置や特性の多くは、電子の状態によって微視的に決定されています。電子状態を、実験的・経験的パラメーターによらず、量子力学・統計力学の基本原則と素電荷や Planck 定数といった基礎物理定数のみから求める理論が第一原理電子論です。我々の研究室は、コンピューターの中で仮想的に物質を作り、その性質を調べる事により、単に実験結果を説明するだけでなく、まだ行われていない実験の結果を予測し、あるいはまだ作られていない未知の物質・材料を理論的にデザインする事を目指しています。

## 研究について

当研究室では、磁性材料・構造材料からナノテクノロジーの基礎となるナノ構造までの多彩な対象をターゲットとして、「富岳」や TSUBAME 等の学内外のスーパーコンピューターを活用した大規模な第一原理計算を実行しています。電子状態理論の適用限界を広げるための手法開発も行っており、また物質探索ではグラフニューラルネットワークや Bayes 最適化などの機械学習も活用しています。当研究室では、良い研究結果を得た学生は修士 1 年の段階からアメリカなどでの国際学会で成果を発表し、修士 2 年次では国際的な学術雑誌に結果を公表しています。

## 研究テーマについて

### 1. 磁性金属材料

ロボット用モーターや風力発電タービン等の高温環境で用いる永久磁石材料を、希少元素を使わずに開発する指針を得るために、電子論に基づく有限温度磁性の評価手法開発や、高い磁気特性と構造安定性を両立する新物質探索を行なっています。これまで、新手法によってスピンフォノン結合の効果を考慮すると、格子振動により常磁性状態が安定化し(図 1)、鉄の理論的な Curie 温度が 500 K 以上変化することを明らかにしました [npj Comput. Mater. 2020]。

現在の磁気デバイスは電流によって磁気状態を制御しており、Joule 熱によるエネルギー散逸による消費電力の増加が問題となっています。一方、マルチフェロイク界面と呼ばれるナノ界面構造では、電流によって磁性を制御することができ、その実用化が期待されています。その様なデバイスの動作効率を最大化するための、材料設計や磁気特性制御機構の解明を行なっています [npj Spintronics 2025]。

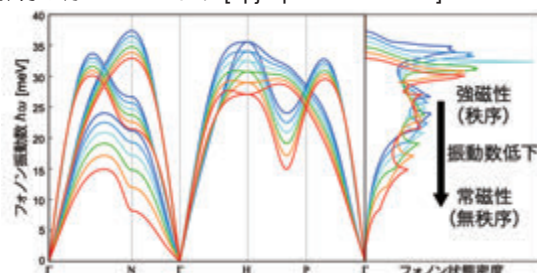


図 1：スピンフォノン結合による bcc Fe におけるフォノン振動数の磁気秩序依存性 [npj Comput. Mater. 2020]。

### 2. 自由エネルギー・相平衡と材料組織設計

構造材料と磁性材料では、結晶構造の異なる複数の相から構成される材料組織の効果が非常に重要です。材料組織の設計のためには、材料を構成する相の熱平衡を多元系状態図から理解することが必要ですが、状態図の作成は各相の自由エネルギーを評価することにより可能となります。我々は、Gibbs 自由エネルギーを第一原理電子論により定量化する手法を開発し、航空機のジェットエンジンのタービンで用いられる Ti-Al 基耐熱合金(図 2)や希土類永久磁石材料(Nd-Fe-B, Sm-Fe-Cu)など、様々な金属材料に応用しています。特に、電子スピンフォノン結合を取り入れる手法開発に取り組んでいます。

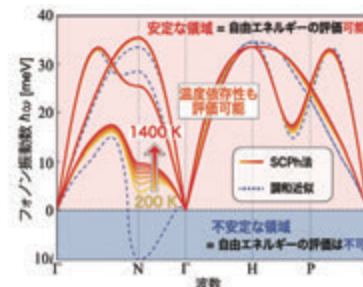


図 2：Ti-Al 合金高温相である  $\beta$  相 (bcc 不規則相)  $Ti_{0.625}Al_{0.375}$  における調和近似およびセルフ-consistent フォノン (SCPh) 法による有効フォノン分散の温度依存性。

### 3. 表面・界面におけるナノ構造物理

電子デバイスにおいて、素子のサイズがナノスケールまで微細化されると、材料内部だけでなく表面・界面の効果や量子効果が無視できなくなってきます。特に、表面・界面では物質内部には無い物性が現れる事があり、例えば Bi の様な原子番号の大きい重元素を含むナノ構造では、ポテンシャル勾配と相対論効果が組み合わさる事により、特異なスピン状態を取る事があります(図 3)。その様な新奇な物理現象に対して、第一原理計算から理解を深化させ、その背後にある普遍的な法則を見出す事を目指しています。

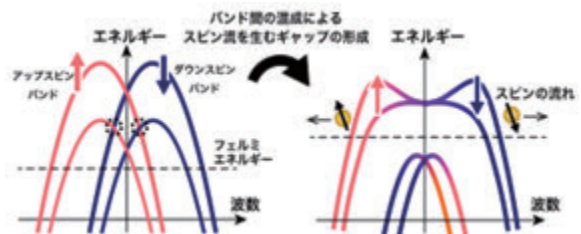


図 3：Rashba 効果を活用したスピン流生成原理の概念図 [PRB-Rapid 2018]。

## メッセージ

興味をもたれた方は気軽に合田まで詳細をお問い合わせ下さい。研究室所属の際には基礎的な量子力学・統計力学を習得している事が望ましいですが、プログラミング言語は必要になった時に身につければ良いでしょう。

# 小林郁夫 研究室

機能性材料で築く 環境と社会とくらし

<http://www.satokobayashi.mtl.titech.ac.jp/>



准教授  
小林郁夫

## はじめに

様々な特性を有する機能性金属材料は、現代社会のいろいろな場面で活躍しています。優れた機能を発揮する材料を設計するためには、相安定性、熱力学、結晶学などの材料科学の基礎的な知識の上に、形状付与や熱処理などの加工プロセス、組織制御などの技術を積み重ねて、その結果得られる種々の機能特性を評価することが必要です。当研究室では、チタン合金、アルミニウム合金、マグネシウム合金、銅合金、複合材料などを開発し、それぞれの用途に応じた特性評価を多角的に行っています。こうして生み出された新しい材料は、生体材料、輸送機器用材料、電子機器用材料などとして、豊かな現代社会の構築に貢献することが期待されています。

## 研究テーマについて

### 1. 低弾性率型生体材料の開発

骨などの硬組織に接合して用いるインプラント材料の弾性率は、骨のそれ（10～30GPa）に近いことが求められています。これは生体骨とインプラント材料の間の弾性ミスフィットに基づく応力遮蔽（stress shielding）による骨形成障害を防止するためです。多くの生体用金属材料の中で、純チタンの弾性率のもっとも低く、およそ100GPaです。これにニオブなどの元素を添加したβ型チタン合金（図1）では、その結晶構造に由来して、およそ80GPaまで低下することが知られています。当研究室では、チタンよりもさらに弾性率の低いマグネシウムの実用化に向けた取り組みを進めるとともに、チタン合金の多孔質化、単結晶化と方位制御など、様々なアプローチによって生体金属材料弾性率のさらなる低減を進めています。Ti-Zr-Nb合金単結晶ではおよそ40GPaという低弾性率を達成しました。



図1 生体用β型Ti-Zr-Nb合金中に成長したウイドマンステッテン組織。幾何学的な組織が美しい

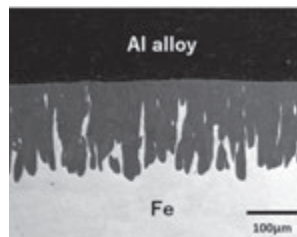


図2 固相鉄と液相Al合金の界面の組織。界面で生成している金属間化合物が固相の鉄に向かって成長するのが面白い

### 2. 異種金属間の接合と接合界面での反応拡散

CO<sub>2</sub>や排ガス規制は各国・地域で徐々に厳しくなっているため、自動車メーカーは環境規制への対応に向けて、パワートレイン技術の改良に止まらず、軽量化技術の開発も進めています。自動車軽量化に当たっては、自動車重量の約7割を占める鉄鋼材料に代替可能なアルミ合金など軽量素材の使用比率が増加する見通しであり、このようなマルチマテリアル化の過程では、単なる材料置換に止まらず、「鉄+アルミ」など複数の素材を適材適所で使い分けるための異種材料接合

技術が必要です。鉄鋼とアルミ合金などの異種金属間接合法として、反応拡散を用いた液相拡散接合法を開発し、図2のように鉄鋼とアルミ合金の固相/液相の接合界面で生成する金属間化合物の速度論的成長挙動や組織的な形成過程を実験的に観察し、化合物層の成長に対する律速過程を解明するために様々な分析や解析方法を用いて研究を行っています。また、異種金属間反応拡散による接合法は電子デバイスの実装技術から耐熱合金の接合まで幅広く応用されています。このような接合界面では、各元素の拡散速度の差によりKirkendallポイドが生成します。このようなポイドは接合部の機械的信頼性に影響を及ぼすため、理論的な計算による生成量の定量化や添加元素や組織制御により抑制する研究を行っています。

### 3. アルミニウム合金・銅合金・マグネシウム基複合材料の組織制御

航空宇宙用、高速車両用、建築用ならびに電子機器用の軽量で高強度・高靱性のアルミニウムの開発や、強度と高導電率をかねそなえた新しい銅合金の開発を進めています。これらの合金では、時効析出現象を利用して強度を高めることが有効です。時効した試料は、電子顕微鏡観察、3次元アトムプローブ、熱分析、電気伝導率測定、硬さ測定などの手段で、多角的に評価しています。

また、高強度マグネシウム合金の開発を目指し、マグネシウム粉末と遷移金属粉末を利用した粉末冶金法によってマグネシウム基複合材料（図3）を開発しています。マグネシウムと遷移金属との反応を利用して、軽量で高強度な複合材料の開発に成功しました。

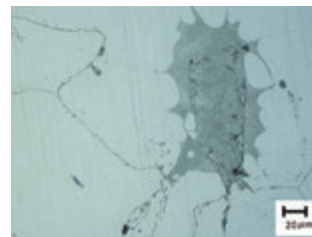


図3 マグネシウム母相（明るい色の部分）の間に生成した多相金属間化合物（暗い灰色の部分）。母相と金属間化合物との密着性が高いため、強化相としての効果が高い

### 4. 先端型医療機器材料の開発と評価

近年、次々と開発導入された新しい医療技術や医療機器には、高度な機能性をもつ新しい生体材料が求められています。新しい医療技術の一つとして、先端付近に電極のついたカテーテルを心臓内に挿入し、不整脈の原因となっている心筋組織を焼灼して不整脈を治す、カテーテルアブレーションという治療法が注目を集めています。このカテーテル電極には、強さ、延性、加工性などの力学的特性に加え、電気伝導性、X線透視下での視認性など、様々な機能性も求められています。我々の研究室ではジルコニウムとハフニウムを主成分とする新しい合金を開発し、アブレーションカテーテル電極材料に必要なとされる特性評価を行っています。

# 小林 覚 研究室

2050年脱炭素化実現に向けた  
耐熱金属材料の信頼性評価と新材料設計

<http://steel.mtl.titech.ac.jp/>



准教授  
小林 覚

## 研究・専門分野

当研究室では、火力発電・航空機エンジン用耐熱金属材料の評価・高性能化に関する研究を行っています。2050年脱炭素化実現に向けた最近の世界的な動向を受け、3つの方向軸を持って研究を進めていきます。一つ目は、H<sub>2</sub>・NH<sub>3</sub>等のクリーン燃料を利用する際に生じる耐熱部材の材質変化・劣化を評価し、材料設計に活かす研究です。耐熱鋼、ステンレス鋼、Ni基の材料を対象としています。二つ目は、火力発電プラントに使用される耐熱鋼のクリープ・クリープ疲労損傷評価・低減技術構築に関する研究です。変動性再生可能エネルギーの出力調整のために、火力発電では数時間から数日の間隔で起動と停止を繰り返す負荷変動運転が増加し、また、火力発電の新設が難しい状況から、発電プラント用耐熱部材の経年劣化・損傷評価が以前に増して重要となっている背景を受けた研究です。三つ目は、発電・エンジンの高効率化に必要な耐熱材料の高温化・高性能化を目指した研究です。脱炭素化を達成しても機器の効率や性能が失われてしまうと技術力・競争力が落ちてしまいますので引き続き重要な課題です。Fe、Ni基合金を対象とした研究を行っています。

当研究室の専門分野は、金属材料の機械的特性を決める微細構造（以後、組織と呼ぶ）を制御する「組織制御」という分野です。組織を中心に化学組成・プロセス・使用環境・特性との関係を、平衡論（状態図）、速度論（相変態）、結晶学（構造解析）、強度学（変形機構）に基づき追及しています。



## 研究トピック・テーマ

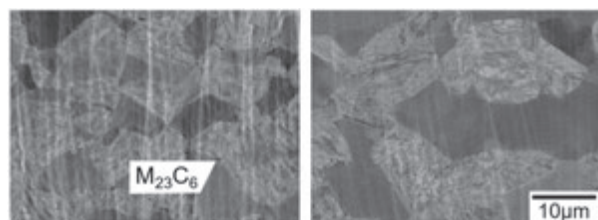
### 1. 高温水素環境における耐熱金属材料の材質変化評価

脱炭素化社会の実現には、エネルギー貯蔵媒体から製造において原料としての水素利用が不可欠であり、製造から輸送・発電・内燃機関・水素製鉄等にかかる技術の成否が鍵を握ると言われています。水素技術は、供給・価格の懸念により現状では懐疑的な意見もありますが、2030年以降必要な技術となり、今から課題抽出・調査を進める必要があります。

グリーン水素製造法として期待されている固体酸化物型水電解装置やメタン直接熱分解、アンモニア分解型水素燃焼ガスタービン、水素還元製鉄等では、高温水素環境が生じます。

高温水素環境での材料損傷は「高温水素損傷」と呼ばれ、脱炭（図2参照）やクリープ変形が助長される現象が生じます。

この分野は石油精製・化学プラントで長年調査されてきましたが、上記設備で想定される高温条件と材料をカバーできていません。当研究室では、ステンレス鋼やNi基合金において高温水素環境での材質挙動を静的・クリープ試験により調べる研究に着手しています。

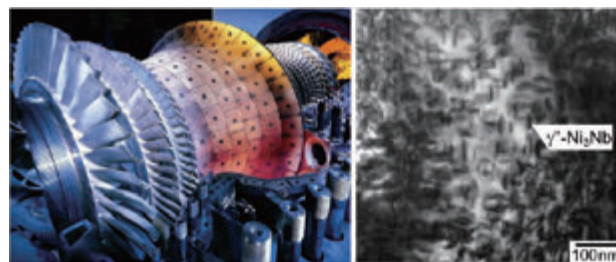


### 2. 火力発電プラント用耐熱鋼・合金のクリープ疲労損傷評価・低減技術構築

脱炭素化に向けた流れにより、変動性再生可能エネルギーが増え、その出力を調整するために火力発電は数時間から数日の間隔で起動と停止を繰り返す負荷変動運転が増加しています。このような条件で火力発電が操業されると、主蒸気管のヘッダー等の耐熱部材にはクリープ損傷に加えてクリープ疲労損傷が生じることが強く懸念されています。また、火力発電の新設が難しくなっている背景を受け、プラント・材料の経年劣化・損傷評価は以前に増して重要な課題となっています。材料は高温（融点（絶対温度）の3割以上）では、弾性変形程度の低い応力でも時間依存型の変形（クリープ）を生じます。耐熱部材の損傷は、火力発電がベースロードで運転される場合には主にクリープですが、起動・停止を繰り返す負荷変動運転ではクリープと熱疲労の両方が生じるクリープ疲労になります。このような背景を受け、耐熱鋼のクリープ変形に及ぼす応力変動の影響を調べる研究に着手しています。また、熱疲労は、材料の熱膨張・収縮に起因するため、熱膨張係数を抑えた耐熱金属材料の創製・設計にも挑戦しています。

### 3. 航空機エンジン・次世代ガスタービン用新材料創生と高性能化

ジェットエンジンや火力発電のガスタービンでは、Ni基合金が主に使用されています。ガスタービンの熱効率、その高温部の高温化により向上するため、高温部材の耐熱化が従来からの重要課題となっています。高温部材としては第一段タービンブレードに使用されている単結晶合金が目立ちますが、ブレードを支えるタービンディスク材の耐熱化も重要な課題となっています。当研究室では、ガスタービンディスク材の大半に使用されているNi基耐熱合金（Alloy 718）を対象として、その高温化・高温変形機構解明を目指した研究を実施しています。また、脱炭素化に向けて新たに注目されている水素製造装置や半導体製造装置の効率化において必要となる耐熱鋼やステンレス鋼の耐熱化を目指した研究にも取り組んでいます。



## 研究室情報

### 1. 共同研究

国内の大学、研究所、素材・重工メーカーとの共同研究を行っています。海外では、フランスの国立航空宇宙研究所(ONERA)との研究連携も行っていきます。

### 2. 進路・就職先

当研究室の卒業生は、鉄鋼・素材・重工・自動車・鉄道・電力など幅広い分野の企業に就職し、活躍しています。博士取得者は、国内外の大学や国立研究所等で活躍しています。

# 三宮 工 研究室

光機能ナノ材料の創造と電子線による光場の可視化



教授  
三宮 工



助教  
柳本宗達

<http://www.sannomiya.iem.titech.ac.jp/>

## はじめに

ナノスケールで光を操ることは、次世代光デバイスにおいて不可欠な技術です。一方で、波長をよりもはるかに小さいスケールでの光の制御は容易ではありません。当研究室では、ナノスケール材料を多次的（エネルギー+空間的）に制御することで、新奇な光機能を持つ材料創製を行っています。これらの材料は、環境・医療・通信・エネルギー変換など幅広く、多くの分野へ応用可能です。また、これらの材料評価手法の開発にも力を入れており、特に透過電子顕微鏡（TEM）を用いた光の計測などの装置開発、手法開発を積極的に行っています。新たな「観る」道具から、新発見は生まれます。

## 研究について ～ 創る、観る、発見する～

新材料を創り、新手法で観て、新発見をすることが我々のテーマです。新機能材料の中でも、特にナノフォトニック材料とそれらの計測手法の開発に主眼を置いています。ナノフォトニック材料はナノサイズに光を閉じ込め、高密度で省エネルギーな光回路や、高感度バイオセンサー、量子光源を実現する可能性を持っています。また、これらのナノ構造の集合体はメタマテリアルと呼ばれ、均一な材料では成しえなかった特殊な特性を持ちます。ナノ材料創製を行うとともに、計算、計測により、その特性を評価しています。電子線を用いた光計測手法の開発に力を入れており、電子線による光位相計測や量子光学計測などを行っています。企業や海外との共同研究も盛んです。

## 研究テーマ

### 1. 多機能ナノフォトニック材料の創製

金属や誘電体ナノ構造を用いると、光の波長よりもはるかに小さいナノ空間に光を閉じ込めることができます。更に吸収を持つ非エルミートな特性を活用することで、特異な光学特性も実現できます。これらを利用した高感度センサーや高効率発光素子、光回路の実現を目指して、ナノフォトニック材料を創製しています。当研究室では、自己組織やリソグラフィなど、物理的・化学的な手法を駆使して、様々な材料を組み合わせるナノ構造を作製し、電子顕微鏡法、スペクトル測定などを用いてこれら进行评估しています。解析/数値計算を用いて原理を探り、設計指針を得るなど、実験・理論の両面から総合的なアプローチで材料研究を行っています。

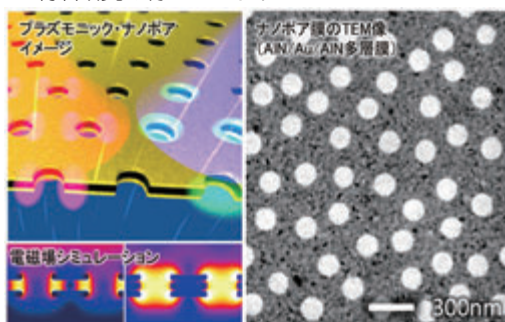


図1 光学共鳴によるセンシング機能をもつナノポア

### 2. カソードルミネセンス電子顕微鏡法による光場の観察

光速電子線を材料に照射すると、様々な波長の電磁波が発生します。特に可視光の波長を測定すれば、可視光の波長限界（数百 nm）を超えて、光の場を観ることができます。このカソードルミネセンス（CL）と呼ばれる現象と、走査型透過電子顕微鏡法（STEM）を組み合わせ、電子線分解能（～1nm）で光機能材料の光電場分布や、半導体の発光特性、蛍光体の解析などを行っています。

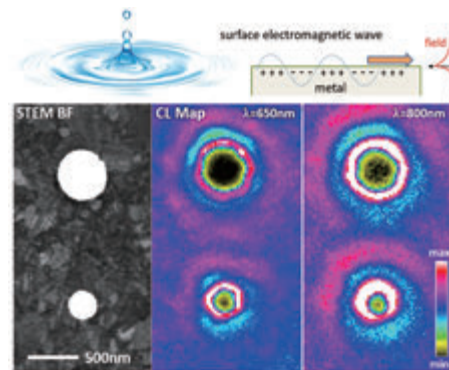


図2 金属表面の自由電子振動による電磁波（表面プラズモン）の可視化。走査型透過電子顕微鏡カソードルミネセンス法による。

### 3. 電子顕微鏡を用いた計測法の開発：

#### 材料開発の「目」を創る

材料開発において、原子スケールで物質の構造を可視化できる透過型電子顕微鏡（TEM）は必要不可欠のツールです。TEMは20世紀初頭に誕生して以来、現在も進化し続けています。我々は、TEMを基本とした新技術、新しい応用手法の開発も行っています。電子光学的な電子ビーム成形手法や、カソードルミネセンスを用いた光位相測定や、時間分解した光子相関計測、これらの組み合わせによる材料機能の可視化技術の開発などに取り組んでいます。

この「観る」技術の進歩は、材料開発の進歩そのものであり、ここから新しい科学が生まれます。これら電子顕微鏡の研究は、大学や研究機関だけでなく、企業とも共同で行っています。

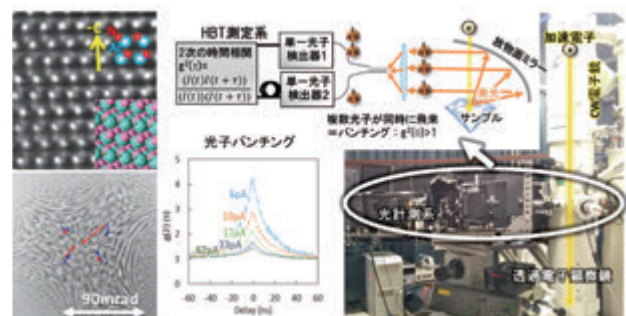


図3 左上：AINの超高分解能電子顕微鏡写真。左下：ロンチグラムの自動中心検出トレース。右：開発中の光子相関カソードルミネセンス法

# 多田英司 研究室

材料表界面の環境性能評価と高耐久性金属材料の開発



教授  
多田英司



助教  
小鯖 匠

<http://www.elechemcorr.mtl.titech.ac.jp/>

## はじめに

金属材料は機械的性質や電気・磁気的特性、光学的特性などの様々な優れた機能性を有しています。しかし、これらの特性を長期間にわたり発揮するためには、使用環境における耐久性が極めて重要となります。材料の耐久性は、材料表面や材料と環境の界面で起こる化学、電気化学反応によって低下することが懸念されます。そのため我々の研究室では、機能性材料や構造材料に用いられる金属材料を対象に、電気化学反応メカニズムを解明し、優れた耐久性を有する材料表面を創製することで、材料機能の高度化と長寿命化につながる耐環境性材料と技術の研究開発をしています。

## 研究室について

我々の研究室では、すべての学生が個別の研究テーマに取り組んでいます。学生は、先行研究の調査によって自分の研究テーマの遂行動機と目的を明確にし、それを達成する実験手法を考案しながら、日々実験を行っています。教員は、学生のアイデアや自主性を可能な限り尊重し、様々な議論の機会を通して、実験目的の達成に協力するようなスタンスで指導にあたっています。

研究室には、本学出身の学生のみならず、国内他大学を卒業した学生、留学生、企業や海外の大学の研究者などが所属しています。出身大学や国籍のみならず、幅広い年齢層の人々が交流する研究環境となっています。自由に議論し、楽しくかつ活発に研究を進めることができる、雰囲気づくりにも教員、学生が取り組んでいます。

得られた研究成果は、日本金属学会、日本鉄鋼協会、電気化学会、腐食防食学会などで主に発表し、さらに海外で開催される米国電気化学会、国際電気化学会などの国際会議でも毎年発表を行っています。また、研究成果を国際的な学術誌で発表することを推進しています。

## 研究テーマについて

### 1. 金属材料の腐食機構解明および高耐食化に関する研究

先進各国の腐食調査では、金属材料の防食対策にかかる年間コストがGDPの数%に及んでいることを試算しています。我が国でたとえれば、消費税数%分の莫大なコストが腐食防食対策関連費として毎年費やされています。よって、金属材料の高耐食化、長寿命化は、安全・安心な社会構築のみならず、経済損失を減らすには極めて重要な課題であります。しかしながら、様々な金属材料が、様々な環境で使用されることによって、予想もしない腐食劣化が生じることがあります。我々の研究室では、金属材料を様々な環境中で使用したときに起こる腐食現象について、その機構

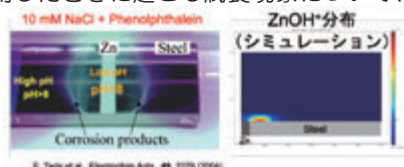


図1 Zn/Steel 対のガルバニック腐食による pH 分布の可視化と腐食生成物堆積の腐食シミュレーション

の詳細を、電気化学的手法や数値シミュレーション（図1）によりに調査し、耐食性向上の方策を提案することや防食手法の確立を試みています。

たとえば、軽量で比強度に優れたアルミニウム合金は輸送機器用構造材料としての需要が拡大していますが、不純物由来の Fe や Cu を含む金属間化合物が耐食性を著しく低下させると言われています。ところで、金属間化合物を起点としてどのようにして腐食が発生・成長していくかについての知見は未だ乏しいのが現状です。そこで、電気化学測定とその場観察手法を組み合わせ、金属組織学・溶液化学的視点から、腐食発生・成長メカニズムの解明とそれに基づく高機能性合金設計指針や表面改質技術の確立を目指しています。

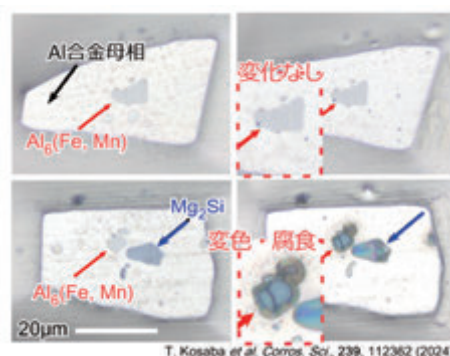


図2 AA5083 アルミニウム合金表面に作製した  $\mu\text{m}$  スケールの電極面。Mg<sub>2</sub>Si 粒子と近接することで、Al<sub>6</sub>(Fe, Mn) 粒子周囲が変色・腐食する。

### 2. 耐環境性能評価のための電気化学計測法の確立

金属材料の腐食劣化過程をモニタリングすることは、構造物等の安全と的確な管理において極めて重要となります。我々の研究室では、電気化学インピーダンス法やデータサイエンスの手法を用いて、腐食環境に応じた腐食モニタリング技術を開発し、それによって腐食寿命評価、予測法の確立を目指しています。図3に示すように、数  $10\mu\text{m}$  オーダーの微小領域や腐食劣化分布を評価するための特殊な電気化学的手法作製し、様々な腐食評価に適用しています。

### 3. 金属 / 有機体界面における液性変化に基づく機能性材料開発

金属材料の表界面は使用環境によって、微生物や生体組織などの有機体にさらされます。その際、有機体のエネルギー代謝反応と金属材料の腐食反応という異なる酸化還元反応が共役することで、それぞれの反応を促進もしくは抑制する可能性があります。そこで、金属 / 有機体界面における液性変化メカニズムを解き明かすことで、高耐食性・高抗菌性を両立するスマートマテリアルの創出や疾患検出を思考した新規バイオセンシング技術開発を目指した研究も行っています。

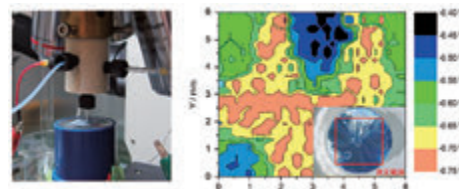


図3 特殊な電気化学測定法と測定例：微小電気化学セル（左）と走査型ケルビンプローブによる非接触表面電位測定結果（右）

# 寺田芳弘 研究室

高温変形の学理探究 & 高温構造用材料の開発



准教授  
寺田芳弘

<http://www.terada.mat.mac.titech.ac.jp/>

## 寺田芳弘研究室の時代要請

航空機、自動車、発電設備など、人類の高度な社会生活は数々の高温構造用材料に支えられています。環境負荷の低減といった時代の要請に応えるためには、材料の進歩は不可欠であり、高温材料の開発研究は、現在もその社会的重要性を増しています。本研究室では、最も基本的な循環系材料である金属材料を中心に、組織制御と力学特性の観点から、高温変形の学理探究 & 高温構造用材料の開発のための基礎的研究を行っています。金属組織制御学と高温金属強度学を重点的に学び進めることができます。

## 研究テーマ課題

寺田芳弘研究室では、金属組織を観察する目を養うことを重視しながら、(1)高温耐熱材料の合金設計、(2)組織安定性の評価、(3)高温クリープ変形特性調査、(4)高温材料強化機構の解明、に取り組んでいます。近年に実施した、代表的な研究課題を以下に紹介します。

- ・ Ni-20mass%Cr系固溶体におけるクリープ強化の原理
- ・ 鍛造Ni基超合金におけるガンマプライム相の粗大化過程
- ・ Mg-Al-Ca合金のクリープ強度に及ぼすラーベス相の影響
- ・ Mg-Ca鋳造合金における組織安定性とクリープ強度評価

研究テーマは時代と共に移り変わりますが、「高温変形の学理探究 & 高温構造用材料の開発」を通じて人類社会の健全な発展に貢献するという本研究室の**基本理念**が変わることはありません。

## 研究テーマの社会的意義

### 1. ラーベス相を利用した構造用耐熱マグネシウム合金の創成

マグネシウム合金は高い比強度を有し、自動車用構造部材として広範に使用することにより、車体の軽量化および燃費向上を実現することができます。マグネシウム合金の適用をエンジン周辺の高温部材にまで拡大するために、高強度を有する耐熱マグネシウム合金を創成することが社会的に求められています。このような背景を踏まえ、有害相であると信じられているラーベス相を強化相として利用するという逆転の発想により、高強度耐熱マグネシウム合金を設計・創成しています。高温強度を最大限に高めるために、異相界面強化という独自の高温材料強化機構のアイデアを提案し、金属組織をナノラメラ状に制御することを目指しています (図 1)。

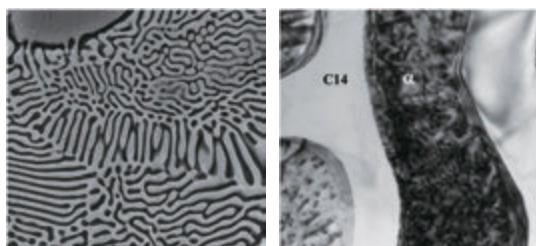


図1 異相界面強化を利用した耐熱マグネシウム合金 (左)。高温変形中において、転位の動きは $\alpha$ -Mg 内に制限される (右)。

### 2. 金属系耐熱材料における高温クリープ理論の構築

金属系多結晶材料を高温でクリープ試験を行うと、結晶粒界における回復促進により、結晶粒界近傍に転位密度の低い軟化領域が発生します。結晶粒内部と粒界近傍では変形抵抗が異なることを、ニッケル基単相合金における内部応力の綿密な計測から明らかにしました。この結果に基づいて、コアマントルモデルという独自のクリープ変形モデルを提唱しました。さらに『Enhancing core region renders a material stronger』というクリープ強化の原理を導出することに成功し、内部応力クリープ理論という**新規なクリープ理論**を創造しました (図 2)。固溶強化と析出分散強化は Core intensity を高める強化機構であるのに対し、粒界析出強化と結晶粒粗大化強化は Core fraction を高める強化機構であることを学術的に明らかにしました。

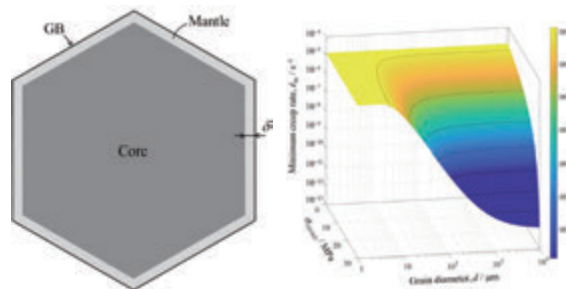


図2 コアマントルモデルの模式図 (左)。高温クリープ強度、結晶粒径、内部応力の相互関係を示す三次元的曲面図 (右)。

### 3. 特殊系ニッケル基超合金における高温クリープ特性

ニッケル基超合金は、高温強度に優れた高温構造用材料として、航空機ジェットエンジンおよび火力発電ガスタービンにおける構成部材として広く使用に供されています。ここで、結晶粒界を金属間化合物相で完全に被覆した「特殊系」合金では、遷移領域においてクリープ速度は  $-1$  の傾きで低下し続けます。高温クリープ強度に及ぼす粒内析出粒子サイズの影響などの基礎的な学理を解明すると共に、回復組織の発生を徹底的に抑制することにより、高強度な高温構造用材料を開発することを目指します。高温クリープ変形中におけるオロワン機構の発現は弱화를招くことなど、特殊系合金における実験的研究を通して新しい学術的知見が続々と明らかになっています (図 3)。

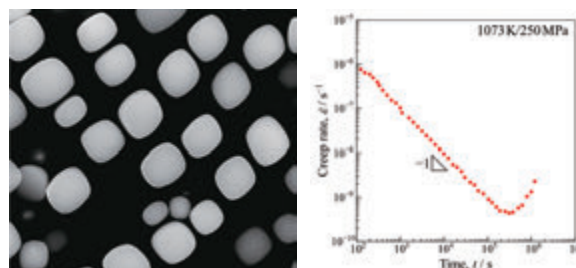


図3 ニッケル基超合金における粒内析出組織 (左)。特殊系ニッケル基超合金におけるクリープ速度と時間の関係 (右)。

# 中田伸生 研究室

金属の王様・鉄鋼材料の強靭化～最強の鉄をつくる！～



教授  
中田伸生



助教  
永島涼太

<http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/top.html>

## はじめに

私たちの身の回りにはたくさんの金属材料があります。中でも、鉄鋼材料は、自動車、鉄道、大型橋梁や超高層ビルなどの構造物に使用されており、その生産量は金属全体の95%以上を占めています。もし、この鉄鋼材料を今より少しだけ強く、そして、壊れにくくすることができればどうなるでしょうか？乗り物のスピード・燃費は改善し、建築物の安全性向上とさらなる大型化が進むことで、私たちの生活はもっと豊かになるでしょう。地味な分野と思われがちですが、その使用量が莫大であるからこそ、社会への波及効果は計りしれません。まさに、金属の王様である鉄鋼材料の小さな一歩は、人類社会の大きな前進につながっているのです。

## 研究について Macro-&Micro-structure Design ～金属組織学～

強くて壊れにくい構造物をつくる方法のひとつとして、材料力学による応力・ひずみ解析に基づいて、巨視的なスケールで物体の形状・構造 (macro-structure) をデザインするアプローチがあるでしょう。一方で、金属はミクロ・ナノという微視的なスケールでも固有の構造 (micro-structure, 金属組織) を持っており、これを制御することで強度や延靱性を大きく向上させることができます。すなわち、鉄鋼材料を始めとする構造用金属材料の性能を最大限に利用するためには、大きなスケールだけでなく、小さなスケールでの構造設計も必要なのです。そのため、私たちの研究室では、金属組織の成り立ち・形成メカニズムを科学し、鉄鋼材料の強靭化を達成するための理想的な金属組織をデザインする金属組織学を探究します (図1)。

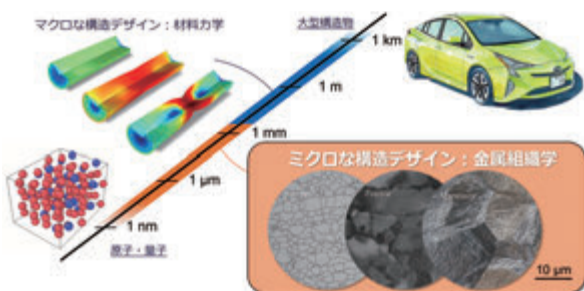


図1 微視的な金属組織を任意に制御すれば、マクロとミクロの両面で金属材料の特性を最大限に活用可能

## 研究テーマ

### 1. 鉄鋼材料の相変態と金属組織形成メカニズムの探求

多くの金属は、温度や圧力の変化によって固相状態での結晶構造が変化する「固相変態」を示します。鉄鋼材料では、高温で面心立方構造のオーステナイト (fcc-Fe)、低温で体心立方構造のフェライト (bcc-Fe) が安定であるため、冷却過程でオーステナイトからフェライトへの固相変態が自発的に生じます。中でも、急激な温度低下によって原子が拡散しない状態で変態した bcc-Fe をマルテンサイトと呼び、その強靱性から、古くは日本刀、そして、現代では自動車などの高

強度鋼に利用されています。独自の視点から、このマルテンサイト変態について系統的な研究を進めたところ、マイクロメートルオーダーでひずみが不均一に発生し、大きな内部応力を生み出すことを実験的に明らかにしました (図2)。そして、この微視的な変態ひずみが高強度鋼の強度や破壊挙動を支配する重要な因子であることを世界に先駆けて証明しました。現在は、変態ひずみを意図的に制御する技術を確立し、次世代の高強度鋼開発のための産学連携研究にも取り組んでいます。

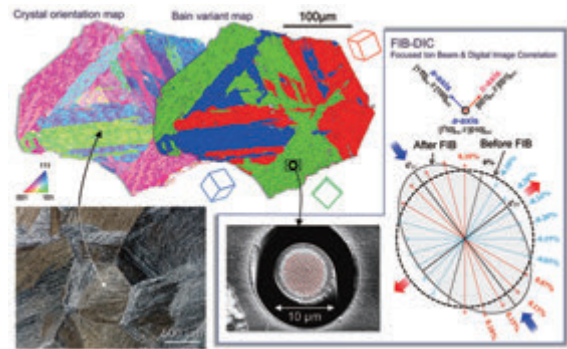


図2 鉄鋼材料の強靱性を支えるマルテンサイトにおけるミクロスケールでのひずみ解析

### 2. マルチスケールな観察と変形メカニズムの解明

じっくりと見ること、すなわち観察は新たな発見を与えてくれます。実用金属材料の表面を適切な方法で研磨すると、お城の石垣のように多数の結晶粒からなる組織が観察されます。隣接する結晶粒の方位関係や界面 (粒界) の向きは、材料の強靱化やそれに資する組織のデザインに影響を与える重要な因子の一つです。本研究室では、髪の毛の直径の約1/100のサイズの微小押し込み試験を行ない、粒界近傍での特異な変形挙動の解明に取り組んでいます (図3)。これらの高精度な計測機器による実験データと、それを計算機上に反映したモデル (デジタルツイン) を組み合わせ、多角的な金属の変形・破壊挙動の解析・解明に挑戦しています。

## おわりに

以上のように、私たちの研究室では、ミクロな金属組織制御の探究を通して、鉄鋼を中心とした構造材料の強靱化に挑戦しています。研究室の合言葉は『最強の鉄をつくる』です。伝統ある金属学・冶金学を大切にしながらも、新たな技術・学問に興味がある方を大歓迎します。

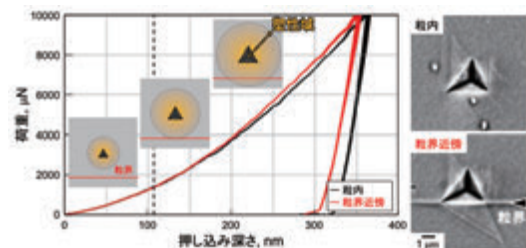


図3 Ni-Cr合金の粒界近傍でナノインデンテーション試験。

# 中辻 寛 研究室

金属・半導体表面における表面新物質創製とその電子物性



准教授  
中辻 寛

<http://nakatsuji.mat.mac.titech.ac.jp/>

## はじめに

金属や半導体の最表面は、固体内部とは異なる原子配列と電子状態を持っています。また、表面の結晶面方位と、そこに蒸着する物質の組み合わせを適切に選ぶことにより、例えば半導体基板上に単原子層厚さの金属原子を蒸着することにより、単原子層 2次元薄膜や 1次元原子鎖といった全く新しい低次元ナノ構造と、それに伴う新奇な電子状態を作り出すこともできます。これらは固体内部とは全く異なる電氣的・磁氣的特性を示す「表面新物質」であり、表面・界面に特有な低次元電子物性や力学的物性の発現の場となっています。私たちは「表面新物質」に特有の原子構造と電子状態を、走査トンネル顕微鏡 (STM) と光電子分光法 (ARPES, XPS) を用いて実験的に明らかにする研究を進めています。そこで得られた知見に基づき、所望の物性をもつ「表面新物質」を自由自在に作り出せるようになることが目標です。

## 研究テーマについて

現在進行中の主な研究テーマは以下のとおりです。

### 1. 金属的低次元電子系の構築とその電子物性評価

2次元あるいは1次元の「表面新物質」においては、量子閉じ込め、パイエルス不安定性による金属絶縁体転移、朝永-ラッティンジャー液体の振舞いなど、低次元系に特有な電子物性の発現が期待されます。現在私たちは、Si (111), Ge (001), Ge (111) といった半導体基板上に Au, Ag, Bi といった金属元素を 1原子層あるいは数原子層分蒸着して金属的低次元電子系を構築し、さらに角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて価電子帯電子バンド構造を明らかにすることで、これら興味深い物性のメカニズムを電子状態の観点から明らかにしようとしています。

図1に示すのは Ge (001) 表面上に 1原子層分の Au を蒸着して得られた 1次元原子鎖構造です。大変きれいな 1次元構造であることから金属的 1次元電子系を持つことが期待されましたが、実際に電子バンド構造を調べてみると残念ながら、異方的 2次元電子系であることがわかりました。「表面新物質」の真の姿を知るには、原子構造と電子状態の両方を明らかにする必要がありますがあることを示す好例といえるでしょう。今後はこの原子鎖構造をテンプレートに用いて、異種元素や分子による 1次元電子系の構築を目指します。

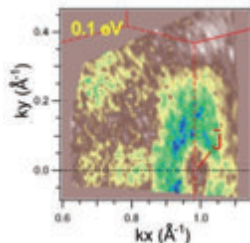
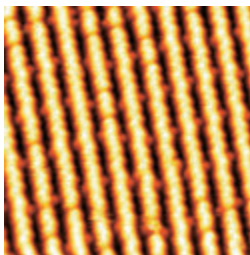


図1 (上) Ge (001) 基板上に 1原子層分の Au を蒸着して得られた、1.6nm 周期で配列した 1次元原子鎖構造の STM 像。(下) 角度分解光電子分光で調べた等エネルギー面は楕円形で、この系が異方的 2次元電子系であることを示す。

一方、固体表面では固体内部からの連続性が絶たれている、言い換えれば空間反転対称性が破れているため、特にスピン軌道相互作用の大きい重元素を蒸着すると、たとえ非磁性物質であってもスピン偏極した電子状態が発現します (ラッシュバ効果)。この大変興味深い電子状態を調べるため、私たちは Bi を数原子層、Si (111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に蒸着し、図2に示す Bi (110) 超薄膜の原子分解能 STM 像を得ました。今後はこの超薄膜の電子状態について、スピン偏極も含めて明らかにしていきたいです。

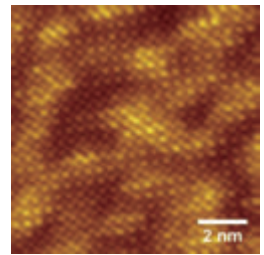


図2 Si (111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に成長した Bi (110) 超薄膜表面の原子分解能 STM 像。1つの輝点が Bi 原子に対応している。

### 2. 金属表面上での周期的ナノ構造の構築とその物性評価

ナノサイズの構造を固体表面上に周期的に並べる方法のひとつが、表面のステップ & テラス構造、あるいは表面における周期的な格子歪みを利用した自己集積化の手法です。例えば図3の STM 像のように、Cu (001) 表面上に 3.5 nm 周期で正方格子状に配列した単原子層 MnN 磁性ナノドットを、自己集積的に成長させることができます。この自己集積化は、MnN と基板 Cu との格子不整合に伴う歪みエネルギーを緩和するメカニズムによって起こります。私たちはさらに電子状態と磁性を光電子分光や X線吸収分光で調べ、MnN が反強磁性秩序をもつことを明らかにするなど、周期的ナノ構造が示す物性を明らかにしようとしています。

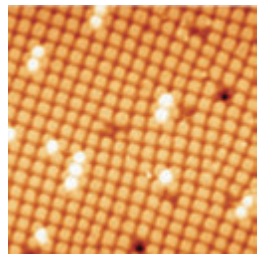


図3 Cu(001) 基板上に 3.5 nm 周期で正方配列した単原子層厚さの MnN 磁性ナノドット配列の STM 像。

## おわりに

固体表面・界面の研究は、物理学、化学、電子工学、材料工学など、既存の学問分野をまたぐ、学際的で魅力ある分野です。私たちの研究テーマは物理学の性格が強いですが、実際に研究を進めるうえでは、他分野の知識こそが突破口を開く場面があります。是非、さまざまなバックグラウンドからこの世界に飛び込んで来られることを期待しています。

# 林 幸 研究室

カーボンニュートラル社会に向けて

<http://hayashilab.mtl.titech.ac.jp/>



教授  
林 幸



助教  
渡邊 玄

## はじめに

当研究室では鉄鋼生産プロセスを研究対象とし、カーボンニュートラル社会に向けて人類の発展に役立つ高温プロセスについて、熱力学や熱物性を基礎にアプローチしています。鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出は、我が国全体の約14%にのぼり（国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ（2019年度）」より）、そのほとんどが鉄鉱石を還元し鉄を得る工程によるものです。CO<sub>2</sub>排出量の大幅削減が可能なスクラップは世界の鉄鋼需要を賄うには不十分であり、依然として鉄鉱石から鉄を製造することは重要です。しかし、鉄鉱石の品質は徐々に低下しており、これらの原料の対策も必要です。我が国及び世界の鉄鋼業は、再生可能エネルギーで製造するグリーン水素による鉄鋼製造に取り組んでいますが、当研究室では、劣質化原料を活用しつつ、新プロセスに適したペレット・焼結鉱などの原料の作り込み・評価の研究を通じて、環境負荷や、CO<sub>2</sub>排出量の削減に貢献しています。また、カーボンニュートラルに不可欠な高級鋼製造において、様々な鋼種に適した鑄造技術も欠かせません。特に、製品の品質や歩留まりの向上に重要なものがモールドフラックス（鑄造用潤滑剤）です。当研究室では、モールドフラックスの熱物性測定や、伝熱に影響を与える組織制御の研究も行っています。さらに、鉄鋼スラグのリサイクル技術など、環境に配慮した鉄鋼製造プロセスの研究も行っています。

## 共同研究について

当研究室では国内外の企業・研究機関・大学と共同して、製鉄工程、連続鑄造及び鉄鋼スラグのリサイクルの問題に取り組んでいます。

## 研究テーマについて

### 1. 原料調整（焼結鉱や直接還元製鉄用ペレットの組織制御）

製鉄工程においてCO<sub>2</sub>排出量を削減するには、被還元性や強度などの高品質な焼結鉱やペレット等塊成鉱（鉄鉱石を焼き固めたもの）の製造が求められています。塊成鉱の品質は組織と密接に関係しており、組織制御が重要です。焼結鉱組織では針状の多成分カルシウムフェライト（SFCA）が高品質化を担っていますが、SFCAは複雑な結晶構造を持つ固

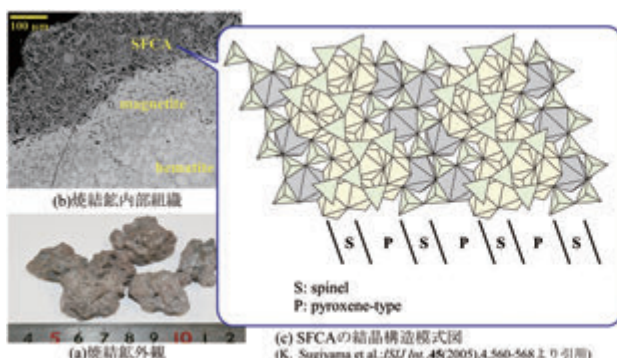


図1 焼結鉱中に生成するSFCAの組織制御に関する研究

溶体であり、組成域、結晶構造および形態との関係が解明されていません。当研究室では、以下の塊成鉱の研究に取り組んでいます。

- SFCA系鉱物を中心とした焼結鉱組成の状態図作成
- SFCA系鉱物の結晶構造、形状と被還元性との関係
- 直接還元製鉄用ペレットの組織に及ぼす脈石成分の影響

### 2. 還元プロセス～高炉内鉱石還元・熔融挙動の解明～

カーボンニュートラル製鉄として、高炉の水素利用や水素による直接還元製鉄法の開発が行われており、当研究室でも、水素による被還元性の良好な焼結鉱や劣質原料を用いたペレットの開発を行っています。また、高炉内のコークス使用量を下げることにより生じる通気の問題を解決するため、通気の妨げとなる鉱石の反応・熔融挙動を解明し高炉プロセスにおけるCO<sub>2</sub>排出量削減に取り組んでいます。

### 3. 連続鑄造～伝熱特性に着目したモールドフラックスの開発～

鉄鋼製造では精錬工程で純度を高めた溶鋼を連続鑄造工程によって凝固させます。この連続鑄造工程では、鑄片/鑄型間の潤滑性を保つためにモールドフラックスと呼ばれる合成スラグが用いられますが、このモールドフラックスは、潤滑性だけではなく鋼の冷却速度を制御し、鑄片の品質向上に貢献します。当研究室ではモールドフラックスの伝熱制御の一環として、モールドフラックスの組織制御と熱物性に関わる以下の課題に取り組んでいます。

- 結晶相、ガラス相及びスラグ融体の熱伝導率測定
- モールドフラックスの状態図作成

### 4. 鉄鋼スラグのリサイクル

製鉄工程では副産物として大量の鉄鋼スラグができます。鉄鋼スラグには大きく分けて、高炉スラグと製鋼スラグがあります。高炉スラグはセメントの原料に用いられており、製鋼スラグは路盤材や焼結鉱の原料に用いられています。特に高炉スラグのセメントは、焼成の必要がないためCO<sub>2</sub>排出量の削減に大きく貢献します。スラグのリサイクル性は、スラグの組成や組織に依存するため、鉄鋼スラグの組成と組織やスラグ構造との関係についても研究しています。

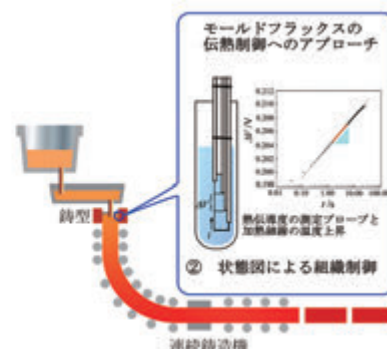


図2 連続鑄造工程での伝熱制御に関する研究

# 村石信二 研究室

強く優しい社会基盤材料を創る

<http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/>



教授  
村石信二



助教  
段野下宙志

## はじめに

世の中には実に様々な用途の材料で満ち溢れ、それら材料が日々進化を遂げることで我々の生活を豊かにしてきました。近年、更に深刻となった地球環境問題でも材料研究が果たすべき役割は大きく、我々が材料を研究する意義を見出すことができます。限られた資源で高いパフォーマンスの材料を開発すること、後世にまで持続可能な循環型社会を構築することなど、現代を生きる我々に託された命題と言っても過言ではないでしょう。

我々の研究室では、社会基盤材料であるアルミニウム合金に着目して、アップグレードリサイクルによる量産化技術の開発、既存の材料強度を大幅に向上する加工熱処理技術の開発、材料強化の原理原則を理解する為のシミュレーション技術の開発等、いずれも先進的で魅力的な教育・研究活動により社会貢献しています。

## 研究について

千里の道も一歩から、少しずつコツコツと研究を進める態度がやがて研究成果として実を結びます。思わぬところから大きな発見をすることもしばしばです。研究室の先輩・後輩の仲間とともに材料研究のエッセンスやメソッドを会得するにつれて、金属学の奥深さや魅力に気づき、自然と問題解決能力も養われるでしょう。定期的な学会活動や企業との共同研究は、自身の成果を発表することで社会と繋がる貴重な経験です。皆さん一人ひとりが独自の舌(テイスト)や物差し(スケール)の感覚を養い、未来の技術者・研究者・教育者として広く社会で活躍できるよう、我々の研究室は全力で応援します。

## 研究テーマについて

### 1. アルミニウム合金のアップグレードリサイクル

温暖化や海洋汚染など、地球規模での環境問題が深刻化しています。ゼロカーボンエミッションを達成する為には、これまでの工業的プロセスを抜本的に見直して産業化につなげる必要があります。軽量で比強度に優れたアルミニウム合金は、輸送機器に利用するだけでも大幅な燃費向上が見込まれ、またアルミ缶でお馴染みのように耐食性やリサイクル性にも優れ、まさに資源循環材料の優等生です。ただし、現状のアルミニウムの電解精錬では、新地金製造に大量の電力を必要とします。ここで一旦市場に出回ったアルミニウムを回収して再生地金からの資源循環が達成できれば(図1)、95%のCO<sub>2</sub>を削減できるとの試算があります。我々は溶湯を急速凝固させることで、再生地金に含まれる不純物元素を無害化する連続鋳造圧延プロセスを技術開発し、

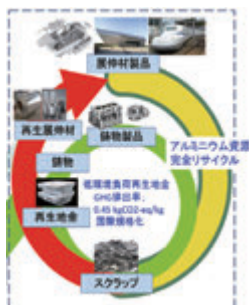


図1 アップグレードリサイクルによるアルミニウムの資源循環

アルミニウム再生地金によるアップグレードリサイクルに挑戦しています。

### 2. 析出強化型アルミニウム合金の転位強化と析出強化の両立

航空宇宙材料から自転車まで、軽さと強度が求められる主要な構造部材には析出強化型アルミニウム合金が用いられます。析出強化とは、ナノスケールで分散した原子クラスターや析出物(図2)が結晶転位のピン止め点となって材料を強化するメカニズムです。ここで転位自身も転位運動の障害物となるので、析出強化と転位強化をうまく組み合わせた加工・熱処理プロセスによって材料を更に強靱化することができます。例えば、予ひずみを加えてから熱処理を施した場合と、微細な析出物を分散させて中程度の強度としてから加工・熱処理した場合では、同じ加工量であっても後者で最大強度が増加することを見出しました(図3)。

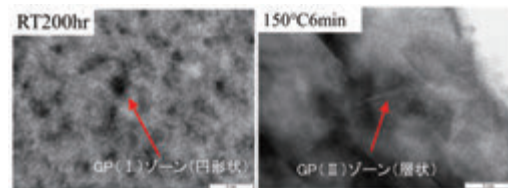


図2 アルミニウム合金中の微細析出相の電子顕微鏡像

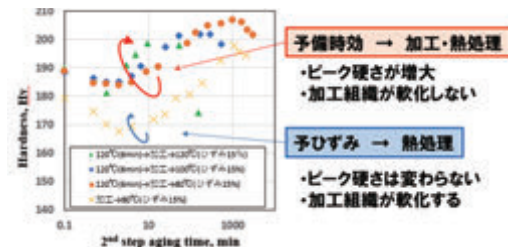


図3 転位強化と析出強化の両立による高強度化プロセス

### 3. 転位動力学シミュレーション ~内部応力場中の転位運動~

析出分散強化は金属材料の主要な強化手法です。転位は、析出物をせん断・迂回しながらすべり運動します。析出物の周囲に格子ミスマッチが存在する場合には、内部応力場によって転位に引力や斥力が作用します。ここで、どのような形状、結晶方位の析出物が分散すると析出強化に優位に働くのか、未だ明確な回答はありません。材料設計の観点で非常に興味深い問いと言えます。我々の研究室では、マイクロメカニクス・グリーン関数法の数値解析により、内部応力場中の転位運動を再現する転位動力学シミュレーションを開発し(図4)、実験結果と相補的に材料強度設計に役立てています。目には見えない転位の動きから材料強度を予測する、夢のある話とは思いませんか？

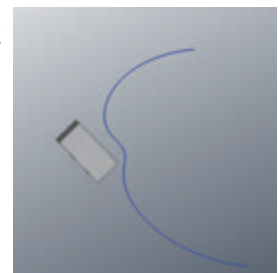


図4 転位動力学シミュレーション

# 小林能直・安井伸太郎 研究室

高度金属製造・鉄冶金・セラミックス融合技術と  
原子力安全金属工学・エネルギー工学への展開



教授  
小林能直



助教  
浦田健太郎

<http://www.zc.iir.titech.ac.jp/~ykobayashi/> (小林能直研)  
<https://shintaroyasui.com/> (安井研)

## はじめに

有史以来、人類は金属から多大な恩恵を受けてきました。その中でも特に鉄鋼は文明を進展させ、国家の礎となり、環境調和型の産業として現在も進化しています。その技術を高度に生かし、時代の要請に合った社会基盤材料を提供していくことが重要な使命です。当研究室では、鉄鋼製造技術の基礎である「鉄冶金学の発展に資する学問的研究」と、それを「応用したエネルギー産業材料」、そして「原子力安全金属工学」を展開するための基礎研究を行っています。

## 研究について

今現在、何が長期的課題で、何が喫緊の課題なのか？材料工学を推進する上で、戦略的な展望は重要です。現在の我が国の中長期的な国際競争力・環境調和力を考えたとき、高効率・低環境負荷の高度鉄鋼製造技術の開発が必要であり、さらにカーボンニュートラル製鉄プロセスの実現が最重要課題となりました。エネルギー産業に目を転じると、ゼロカーボンエネルギー技術の創出およびベースロード電源としての安全性確保を前提とした原子力材料技術、過酷事故対策技術そして、エネルギーストレージ技術が我が国が総力を挙げて取り組むべき問題としてクローズアップされています。これらの課題へのアプローチとして、鉄冶金・セラミックス・エネルギー各分野が融合できるプラットフォームを形成し、創製プロセス開発、機能特性向上、事象解明に資する総合的な材料工学を展開しています。

## 研究テーマについて (小林担当)

### 1. ゼロカーボン製鉄を目指した鉄鋼中不純物の濃度制御・影響制御・有効利用に関する研究

劣質化する鉄資源対応のための高不純物除去能精錬剤の開発を進めるとともに、喫緊の課題となったカーボンニュートラルの達成のための鉄スクラップ利用には銅などの除去困難な不純物の影響制御や逆転の発想による有効活用が重要です。影響制御法としては、銅による表面脆化の原因となる鋼表面の銅濃縮相を鉄酸化物スケール中へ吸収させる方法の開発を進めています。また、銅濃縮相の地鉄への侵入を防ぐためのバリア層のホウ素添加による形成メカニズムの解明を進めています。さらに、銅が鉄相に残留してしまった際にそれを硫化して微細な銅硫化物相として安定化させ、析出強化に役立つという研究も行っています。

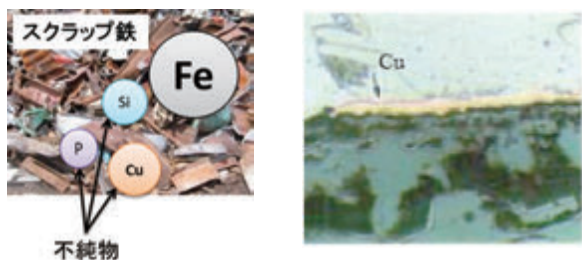


図1 ゼロカーボン製鉄を目指したスクラップ有効利用と、鋼と酸化鉄間に生じた銅濃縮液相 (実プロセス)

### 2. 構造材料および機能性材料の脱酸技術に関する研究

鋼などの構造材料の中でも高成形性が要求される場合は、欠陥の起点となる酸化物系介在物の徹底的な除去が望まれます。この介在物が生成しない脱酸プロセスとして注目されている電気脱酸について、スラグフリーの導線直接触型の装置による基礎研究を行っています。また、高保持力磁性材料である鉄ネオジム系磁石に添加されているジスプロシウムなどの希少金属は供給が不安定になる懸念があります。そこで、これらの使用をセーブするための元素戦略としての鉄ネオジム系磁石の脱酸プロセスの熱力学を研究しています。



図2 ハイブリッドカーに使用される鉄鋼・鉄基合金材料

### 3. 原子炉における過酷事故事象解明と安全な材料処理のための研究

エネルギー産業の中でも格段に高い安全性・健全性の担保が必要な原子力安全材料の研究は中長期的課題として非常に重要です。一方で、現在我が国の喫緊の課題として、過酷事故原子炉への対応策が取り上げられています。まず炉心溶融を起こした炉から燃料溶融凝固物(デブリ)を取り出す際のアクセス性を検討するため、炉内構造物の損傷状況を把握しなくてはなりません。過酷事故時に溶融した燃料と制御棒は、ステンレス鋼製の炉心下部構造物を巻き込みながら、炉心底部に至ったものと考えられています。この解明のため、デブリ模擬体とステンレス鋼の反応機構を研究しています。また、取り出したデブリを超長期にわたり安全に保存する容器は、これまでのキャニスターより格段に高い耐食性・耐反応性が求められます。要求を満たす材料開発のため、ジルコニウム系合金とデブリ系酸化物融体の反応機構の解明を行っています。

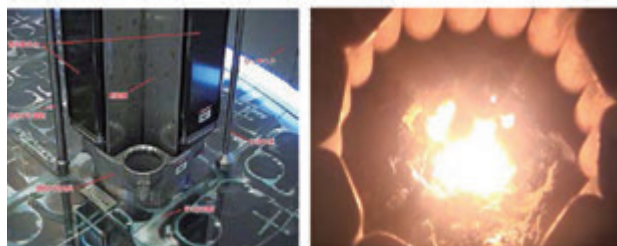


図3 原子炉芯構造物とコールドクルーシブルによるデブリ模擬溶融試験



准教授  
安井伸太郎



特任教授  
白鳥洋介

### 研究テーマについて(安井・白鳥担当)

#### 4. 金属とセラミックス技術の融合とエネルギー工学への展開

エネルギー創成は我々の生活を維持するために非常に大事なキーワードです。二酸化炭素の排出によって地球の温暖化は加速的に進んでおり、我々のエネルギー形態について根本から見直すことが急務です。我々はゼロカーボンエネルギー研究所に所属しており、研究所ミッションとして、エネルギー問題について学術を深化すると共に、カーボンニュートラルに関して答えを見つけなければなりません。

様々な技術を駆使してエネルギー材料創成を行っています。必要な場所で必要な量のエネルギーを利用するためには貯蔵技術が非常に重要です。当研究室では安全安心に使える大気下で安定に合成・使用可能な全く新しい電池創成への挑戦を行っており、企業との共同研究にて3D-SLISEと命名した準固体電解質を発見しました。3D-SLISEは水を基軸とした複合材料で構成され、これまでに開発されてきたイオン伝導体とは全く異なるコンセプトにより創成されました。この材料の良さは、大気下で作製できるためにドライルームが必要無いため、プロセスコストダウンが期待できます。さらには、使用済み電池を水にさらすと3D-SLISEが溶解して、レアメタルを含む正極をそのまま取り出し再利用できる、ダイレクトリサイクルが可能になります。このような新しい電池技術は我々の生活の質を向上させるだけではなく、持続的な地球環境への配慮にも繋がると考えます。



図4 コインセル電池(左)と最新の準固体リチウムイオン電池(右)

セラミックス技術(高品質薄膜・バルク合成)を駆使した強誘電体/圧電体の研究も行っています。強誘電体はSuicaなどに用いられている強誘電体メモリ(FeRAM)や積層セラミックスコンデンサ(MLCC)に使用されており、我々の生活には欠かせない電子部品です。近年では圧電性を用いた環境発電技術や、反強誘電性を用いた蓄エネルギーセラミックスコンデンサの開発が盛んであり、どれもカーボンニュートラルに携わることの可能な技術です。

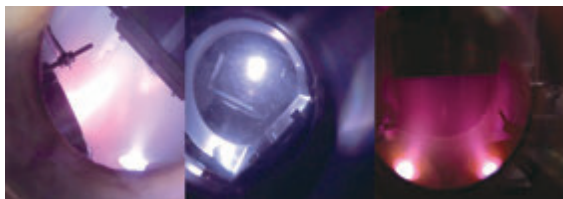


図5 研究室における高品質薄膜作製プロセス

当研究室は世界中の研究者たちと共同研究を行っています。国内では科学大内連携をはじめ、東大、東北大、北大、岡山大、広島大、防衛大他、海外はUMD、NIST(アメリカ)、UCL(イギリス)、UNSW(オーストラリア)、SICCAS(中国)他、それぞれの専門家たち連携しています。日本では0から100まですべて自分でやるジェネラリスト的な考え方が主流ですが、技術の成熟に伴って、一人ですべてやる時代は終わりつつあります。もちろん個人としてのスペシャリティは非常に重要ですが、多くの専門家と組むことで迅速かつ高品質な研究を遂行できるようマネジメントしています。測定では大型放射光施設(SPring-8やKEK)に出向き、研究室内では行えない特殊実験も行っています。



図6 SPring-8での実験風景(左)および薄膜の電気測定風景(右)

技術向上のためには常に新しい材料が必要です。これまでは思いつかなかった未踏材料発見へ挑戦を行っています。新材料の探索実験は失敗の繰り返しですが、見つけたとき(成功したとき)の喜びはこれまでの人生で味わったことのない喜びに変わると思います。日々の中でそのような楽しみや喜びを追い求めて、宝くじを当てに行くような気分で研究を進めています。

#### さいごに ~メッセージ~

小林(能)・安井研は総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所に所属し、材料系材料コースおよび材料系原子核工学コースの学生が所属します。金属材料をはじめ、セラミックスや有機物など様々な材料を融合し、材料学を総合的に学ぶことの出来る研究室です。教員4名に加え、研究室をサポートしてくれるスタッフが3名、博士課程・修士課程・学士課程の学生らが一つの家族のように生活しています。少しでも興味のある方は、遠慮無くコンタクトしてください。



# 史蹟・春本 高志 研究室

薄膜の新奇な物性を探求しよう

<http://www.shi-harumoto.mtl.titech.ac.jp/>



教授  
史 蹟



准教授  
春本高志

## はじめに

史・春本研究室は、金属物理学・回折結晶学をバックグラウンドに、機能性ナノ薄膜の物性に関する研究を行っています。本研究室の特徴は、以下の通りです。

### ① 物理に近い（電子物性・量子力学を学ぶ）

材料系金属分野の所属ですが、研究室の専門とする金属物理学は、固体物理学・物性物理学に近い研究テーマのため、状態密度やスピン分極、電子の運動・電気伝導、半導体・ホール効果などの電子物性・量子力学を学ぶことができます。

### ② 留学生が多い

外国人教員2名在籍のため、研究室所属学生の約5割が留学生です。留学生とのコミュニケーションは日本語に加えて英語でも行われるため、好むと好まざるに関わらず英語力の向上を期待できます。

### ③ 就職先がバラエティ豊か

就職先の分野は、素材、自動車、分析機器、家電、半導体、資源、石油、商社、コンサル、銀行などと非常に幅広いです。この理由として、研究テーマを幅広く持っていること、機能性材料を研究対象としていること、更には、留学生が多く語学・国際交流に自信が持てるようになることなどが挙げられます。

## 研究について

ナノ材料の一つであるナノ薄膜は、一般的なバルク材料と比べて表面・界面の割合が多く、場合によっては、結晶の応力状態・対称性すら変わってしまうこともあります。このようなナノ薄膜という特殊な状態では、今までにない新しい物性・新しい機能を発現することがあります。それを目標に、結晶構造、成長形態、表面状態などを制御してナノ薄膜を作成しています。更には、電子顕微鏡・X線回折装置・電子分光装置などの評価装置・分析設備も駆使して、新物性発現のメカニズム解明にも取り組んでいます。

現在、特に積極的に取り組んでいる研究は、薄膜の電気・磁気特性、水素化特性、圧電特性です。

## 研究テーマについて

### 1. ナノヘテロ構造の磁性薄膜

材料がナノスケールになると、材料全体が界面の影響範囲内となり、材料を構成する物質と異なる新しい物性が出現します。例えば、鉄とクロムのナノスケールの多層膜は巨大磁気抵抗効果を示すことはよく知られている例です。本研究室では磁性金属と窒化物、酸化物などのナノヘテロ構造を設計・作製し、次世代の磁気記録や、磁気センサなどに応用できる優れた物性を持つ新しいナノ構造の創成を目指しています。

図1は、コバルト-白金合金と窒化アルミニウムからなる多層膜 (CoPt/AlN 多層膜) の断面電子顕微鏡写真で、コントラストの暗い層はCoPt層、明るい層はAlN層です。このような構造について、各層の厚さや熱処理温度のコントロールによって、磁気的な特性を自在に制御することができます。

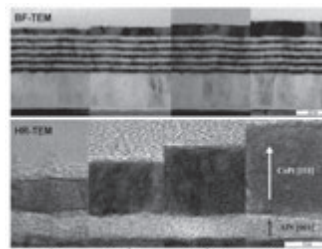


図1. CoPt/AlN 多層膜の透過電子顕微鏡写真

例えば、面内磁気異方性、垂直磁気異方性、二段階に磁化する特性など、同じ試料でも熱処理条件が違うだけで異なる特性を示します。図2には、熱処理後のそれぞれの試料の磁化曲線を示しています。全ての試料は強い垂直磁気異方性を示し、最表面のCoPt層の厚さによって、2段階磁化の各段階の磁化量も制御できることがわかります。

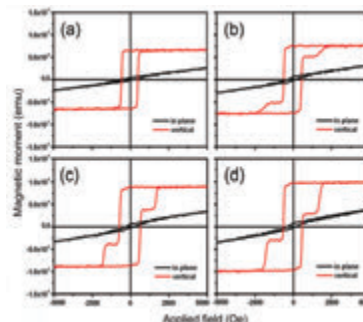


図2. CoPt/AlN 多層膜の面垂直方向の磁化曲線

現在は、こうした知見を基に、更に応用的な研究、例えば、電子データを効率的に保存するための磁気抵抗メモリ (MRAM) や、高感度磁気センサの実現に向け、

- ・電流誘起磁壁移動が可能な Mn<sub>n</sub>N 薄膜
- ・強磁性体と反強磁性体の界面で生じる交換バイアス
- ・ハイエントロピー合金薄膜の磁気特性・電気特性

・異常ホール効果・磁気光学カー効果を用いた薄膜物性の測定などの研究に取り組んでいます。更には、金属の枠にとらわれずに、絶縁体-金属相転移を示す VO<sub>2</sub> 酸化物などの新奇薄膜材料についても作成方法とその物性についても調査を進めています。今後は、これら薄膜と磁性薄膜との複合膜についても研究する予定です。これらは、IoT やニューロモルフィックコンピューティングなどの応用を目指しており、自ら考えたアイデアを形にできる点が研究の大きな魅力です。

### 2. 水素吸蔵薄膜・水素センサの開発

脱炭素・カーボンニュートラルを可能にする水素社会の実現に向け、水素化合物の物性、並びに、水素センサ材についても研究しています。

図3はパラジウム (Pd) 薄膜の水素化過程を、X線回折法により in-situ 観察した結果です。Pd の 111 ピークが、水素導入に伴って移動 (左方向へピークシフト) している事が観察されています。詳細に解析すると、水素低濃度の時には、水素の侵入固溶による格子膨張が起こり、水素濃度 4% 前後



助教  
宋 俊東

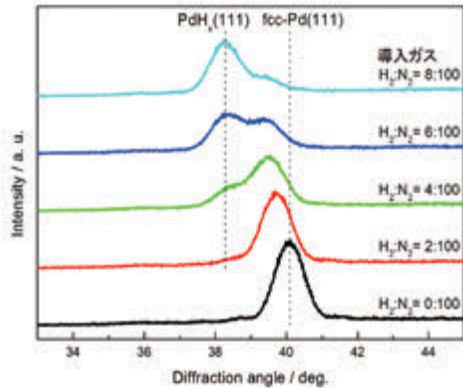


図3. X線回折法によるPd/AIN極薄膜の水素化その場観察

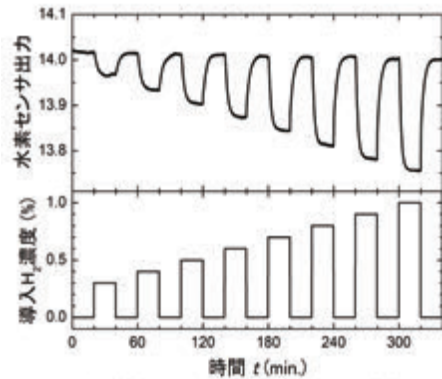


図4. 本研究室で開発された水素センサの水素検出特性

においてパラジウム水素化物 (PdH<sub>x</sub>) 相が新たに形成されるとわかります。このような測定を系統的に行うことにより、バルクとは異なる挙動を示す薄膜 (= 結晶粒のサイズが、ナノメートルオーダーと微小であり、サイズ効果などが現われる) における水素化過程について調査しています。その他、最近、水素化物では負性抵抗特性という変わった物性が現われることも明らかにしました。こちらは、現在、研究を進めておりますが、このように、水素化物には、未知の世界が多く残っており、冒険するような気持ちで研究を進めています。更に、発展的な研究として、水素センサ材の開発、並びに、水素検出方法の提案を行っています。水素ガスは、燃焼時に温室効果ガス CO<sub>2</sub> を放出しないクリーンなエネルギー源ですが、可燃性ガスであり、空気中ではわずか 4% という非常に薄い濃度であっても爆発する危険があります。そこで、水素の漏れを検出する水素センサが求められており、図4に、本研究室にて開発された水素センサの検出特性を示します。導入水素ガスのプロファイルに従って、水素センサの出カ信号も変化しており、例えば、0.3%の水素ガスを確かに検出できていることが判ります。現在は、より性能の良い水素センサを実現するべく、歪に敏感な磁性合金 (磁歪合金) であるパラジウム-コバルト (PdCo) 合金などを用いて水素吸蔵により生じた格子膨張を磁氣的に検出することを目指しています。

### 3. エネルギー変換素子・デバイスの開発

周囲の環境に存在する光や熱、振動といった自然エネルギーをエネルギー変換素子により電力に変換するエナジーハーベスティングは、IoTセンサやアクチュエータを半永久的に作動させることができる画期的な技術として期待されています。例えば、図5に示すような渦励起振動を用いた発電素子では低流速でも振動が励起され、共振現象を利用して大きな出力を得られると見込まれています。流れ場に非流線形の物体 (ブラフ体) を設置すると、その物体の背後から「カルマン渦」という現象が発生し、正弦波の圧力を引き起こします。この圧力の周期と強さは、図5(a)に示す有限要素解析によると、流体の速度とブラフ体のサイズに大きく依存します。そして、この渦は、電歪材料や磁歪材料などのエネルギー変換素子を利用して電力に変換することができます。図5(b)はエナジーハーベスタ (寸法: 3 × 3 × 0.5 mm) の構造を示します。カルマン渦はカンチレバーに付いた電歪素子に当たると、渦の周波数と一致する交流電圧が発生します。更に、マスの重さやカンチレバーのサイズを調整し、デバイスの固有周波数を渦の周波数にマッチングさせると、共振を実現する際の出力電力を大幅に増加させることが可能です。図5(c)は共振時の出力電力の理論計算結果を示します。ブラフ体とデバイス間に最適な距離を取ると、最大出力は 13.1 μW になり、Bluetoothの発信などに対して十分な電力を供給しうると考えられています。

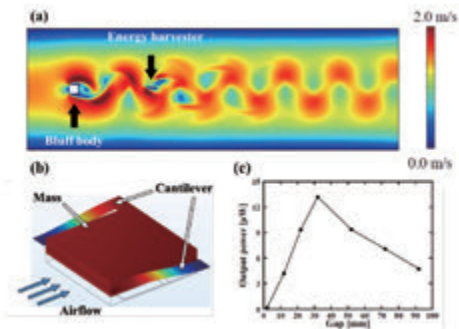


図5. カルマン渦による振動発電デバイスの有限要素解析 (a) 流れ場にカルマン渦の形成状況, (b) 圧電素子を利用したエナジーハーベスタの構造, (c) 共振時の出力特性の計算結果.

### その他

スタッフ: 4名 史教授, 春本准教授, 宋助教, 福島秘書  
学生: 17名 D × 5, M2 × 4, M1 × 4, B4 × 3  
研究員: 2名  
(以上 2025年1月現在)  
卒業後の進路: ✕ 金属, UACJ, 三菱UFJ銀行 (2024.3)  
共同研究: 国内は東北大, 産総研等. 海外は清華大学 (北京) 等

### おわりに

自由な環境で楽しく研究することが成長につながると我々は信じて、研究室運営しています。

# 曾根正人・Tso-Fu Mark Chang 研究室

次世代医用デバイスのための金属材料の創製及び評価



教授  
曾根正人



准教授  
Tso-Fu Mark Chang

<http://www.ames.pi.titech.ac.jp/>

## はじめに

次世代の医用デバイスでは高感度化・生体適合性・高耐久性など様々な特性が要求されており、材料工学においてはそれらの特性を同時に実現するために精密な組成制御やナノメーターオーダーおよび原子レベルでの構造制御により高機能化を実現する必要があり、同時にマイクロメートルサイズの材料評価技術が重要となってきた。当研究室では、次世代高感度医用デバイス実現のために半導体配線、微小な電気機械システム (MEMS)、ウェアラブルデバイスやセンシング技術を基盤とした電気化学的な合成手法によるマイクロ・ナノ材料創製技術の開発とともにマイクロサイズレベルでの材料の機能評価技術の研究開発を行っている。

## 1. 半導体配線技術の高感度医用デバイス分野への展開

半導体産業は、45兆円以上の世界市場規模を有しており、我が国においても国家を担う重要な役割を果たしている。この発展を支えているのは半導体製造における配線回路の微細化・高密度化技術の発展である。半導体製造技術の一つである配線形成技術では、電解めっき法を用いてCu配線を形成する手法が主流であり、日本、米国、韓国および台湾がその覇権を競っている。

当研究室では、超微細な構造体の洗浄技術である超臨界二酸化炭素の洗浄技術と、二酸化炭素を反応媒体に用いる新規な表面処理手法の研究開発である超臨界ナノプレーティング (SNP) 法を用いることで超微細配線を実現した。我々が開発した SNP 方法を用いて、直径が60nm・深さ120nmの埋込孔にCuを埋め込んだサンプルを、FIBで切削加工し透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察した結果を図1に示す。この図より、このような微細な埋込孔にCuが欠陥無く埋め込まれていることがわかる。注目すべき点は、埋め込まれたCuが単結晶であることである。この結果は、新規手法が、結晶成長次元を制御し、無欠陥単結晶で配線可能であることを意味している。

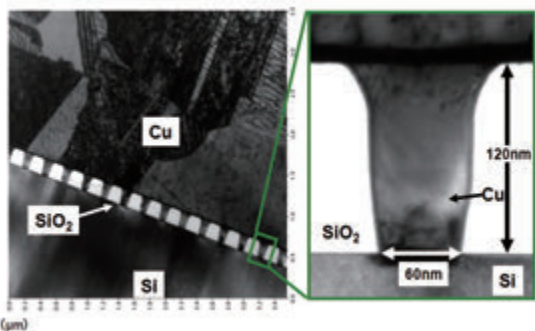


図1. 半導体テストチップ (直径60nm・深さ200nm) へ超臨界ナノプレーティング (SNP) 法による埋込んだCuのTEM像

## 2. マイクロメートルサイズ試験片の材料試験

マイクロサイズの構造を有する材料を作成した場合、その機械的性質はバルクとは異なっている。材料がマイクロス

ケールまで微小化されると降伏応力は増加する。この現象はサンプルサイズ効果と呼ばれており、サイズ現象に伴う転位あるいは転位源の欠乏が原因とされている。MEMSの構造材料はマイクロスケールであり、従って高感度MEMSセンサの構造設計においてはマイクロサイズ試験で得られるデータが必要不可欠である。当研究室は、今までに、Ni・Cu・Sn・Co・Al・Fe・Au・AuCu・AuPd・AuNiなどの金属の微小材料試験を行ってきた。微小材料試験としては、圧縮・曲げ・引張試験があり、それぞれに最適な試験片を提案してきた。図2に、集束イオンビーム加工機 (FIB) により作成した角柱圧縮試験片、カンチレバー型曲げ試験片、ダンベル型引張試験片を示している。

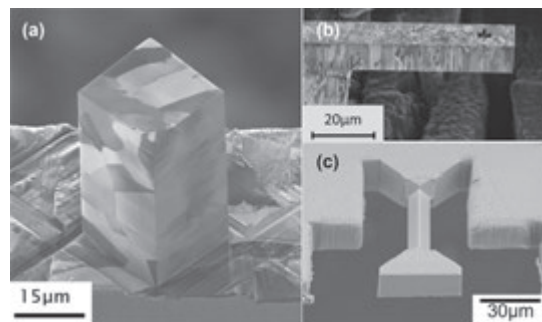


図2. マイクロ試験片: (a) 圧縮試験片, (b) 曲げ試験片, (c) 引張試験片

## 3. フレキシブル多機能材料の創製

次世代のウェアラブルデバイスを実現するためには、高い柔軟性と多様な機能を持つ材料が必要とされている。柔軟性と機能性の統合について、多くが絶縁体であるテキスタイル繊維に導電性を付与するためのメタライゼーションが必要不可欠である。しかしながら金属皮膜と繊維表面との間の弱い結合力によって引き起こされるテキスタイル繊維上に見られる剥離欠陥、クラックなどは解決すべき重要な課題がある。当研究室は植物の構造、特に根系から新たな着想を得た。植物は土壌の中に深く根を生やし地面にしっかりと固定されている。図3に示すように、超臨界二酸化炭素を用いた無電解めっきにより、繊維構造中に深く金属の根の形成が可能になると報告されている。より優れたフレキシブル多機能材料を実現するには、金属皮膜と繊維間の接着・接合のメカニズムを研究する必要がある。

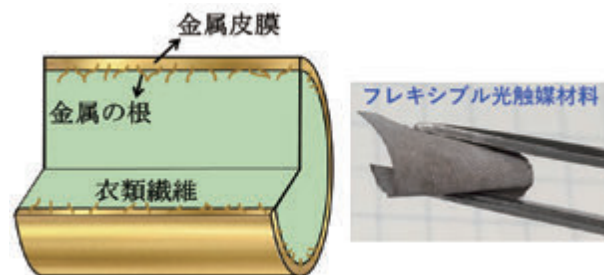


図3. フレキシブル多機能材料の例



助教  
栗岡智行



助教  
彦坂 元



特任教授  
岡本 敏



特任教授  
町田克之



特任教授  
Yung-Jung Hsu



WRH 特任教授  
Randall Lee

#### 4. 単一金属原子の電解めっきの研究

金属材料の活性は、サイズが小さくなると増加することが知られている。可能な最小のサイズは、1つの原子のみで構成されるクラスターである。活性が高いため、原子レベルの金属を作製することは非常に困難である。当研究室では、独自の単一原子電解めっきを使用して、担体材料の表面に原子レベル金属クラスターの装飾を実現した。原子レベルの金属クラスターの特性について、ユニークな偶奇効果 (Even-Odd Effect) が観察された。原子レベル金クラスターが偶数の原子で構成されている場合の触媒活性が高く、奇数の場合の触媒活性が低くなる。図4に示すように、Au<sub>2</sub>とAu<sub>4</sub>は、Au<sub>1</sub>とAu<sub>3</sub>よりもプロパノールの酸化活性が高くなっている。最も重要なことは、原子レベルの金クラスター触媒が1-プロパノールと2-プロパノールを区別する能力を持っていることが確認されている。1-プロパノールと2-プロパノールの区別は、分子量が同じで化学構造が類似しているため、困難であることが知られている。

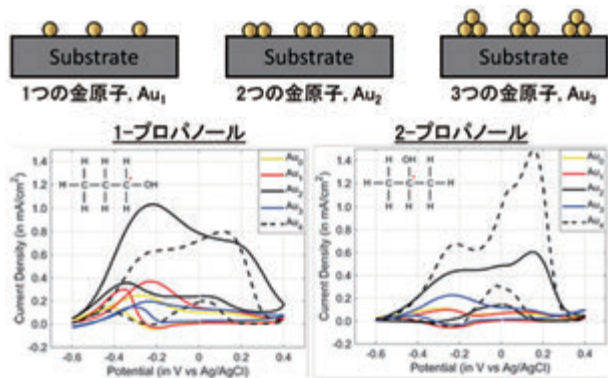


図4. 原子レベル金クラスターのイラストとプロパノールセンシングでのパフォーマンス

MEMS と触媒材料に関する研究は、電気工学と情報科学の研究グループと協力して、高感度の嗅覚センサを開発中である。原子レベル金属・光触媒・繊維の統合により致命的な感染症から私たちを守る衣服を実現することができる。応用例を図5に示す。

#### 嗅覚センサー



#### 抗ウイルス・抗菌繊維



図5. 当研究室の最新の研究によって実現可能な応用例

#### その他

スタッフ：曾根教授, Chang 准教授, 栗岡助教, 彦坂助教, 岡本特任教授, 町田特任教授, Hsu 特任教授, Lee 特任教授, 戸田秘書

学生:22名 (D3×1, D2×4, D1×2, M2×6, M1×5, B4×4)  
就職先 (直近4年間): 三菱重工業, 日産自動車, 野村総合研究所, 村田製作所, アクセンチュア, DNP, JASM, SONY, オリンパス, DISCO, 本田技研工業, Schlumberger, デルタ電子, TSMC, 国立陽明交通大学, 日本製鉄, マイクロン, 三井物産, 東芝, 村田製作所, 古河電工

学会活動: 日本応用物理学会, 日本金属学会, マイクロ・ナノエンジニアリング国際学会 (MNE), 国際電気化学会 (ISE), アメリカ電気化学会 (ECS) などを中心



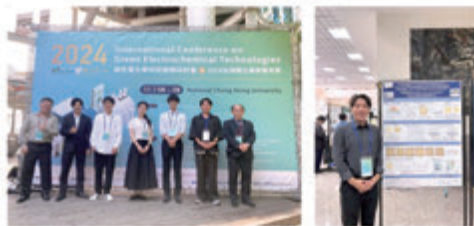
国際会議 ISE2024 イギリス・マンチェスター



国際会議 MNE2024 フランス・モゼル



国際会議 CPIT2024 チェロ・オーストラリア



国際会議 ICGET-Tw2024 台湾

# 藤居俊之・雷霄雯 研究室

材料組織の形成と発達機構の解明,  
変形機構の探求と機能制御の開発

http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/



教授  
藤居俊之



准教授  
雷 霄雯

## はじめに

材料のミクロ組織や構造は必ず何らかの理由をもって形成され、その材料が持つ物性や機能と密接に結びついています。ミクロ組織や構造の発現機構が解明できれば、それは新たな材料創成につながる知見となります。藤居研究室では、環境変化に応じて生じる材料内部での組織形成と組織発達を、電子顕微鏡や放射光 X 線を用いて定量評価し、材料組織学的立場から材料の特性発現の源を捉える研究を行っています。また、雷研究室では、計算材料科学を基礎にして、材料のミクロ構造に起因した機能や力学特性の解析を行い、新機能を有する材料設計のための知見獲得を目指しています。

## 研究テーマについて

### 1. 金属材料の繰返し変形に伴う転位組織の発達過程

金属材料を繰返し変形すると、材料内部には図 1 のような転位組織が形成されます。これら転位組織は、材料に与える応力振幅やひずみ振幅の大きさに依存するとともに、繰返し変形の進行に伴って発達していきます。しかし、その形成・発達機構には未解明な部分が残っています。Cu 単結晶において複数のすべり系が働いた場合に形成される転位組織 (図 3) などはその一例です。このような転位組織の形成・発達機構の究明を目的として、最新の超高压走査透過型電子顕微鏡を用いた組織観察とその解析を進めています。

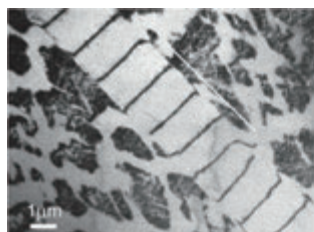


図 1 Cu 単結晶の疲労転位組織

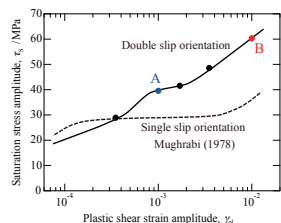


図 2 Cu 単結晶の繰返し応力-ひずみ曲線

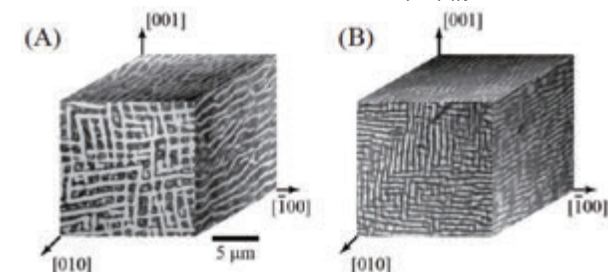


図 3 超高压走査透過型電子顕微鏡観察像より作成した Cu の転位組織三次元構成像 (A)  $\gamma_{pl} = 1.0 \times 10^3$ , vein-like 組織と (B)  $\gamma_{pl} = 1.0 \times 10^2$ , labyrinth 組織

### 2. キリガミに基づくナノ構造の形態設計に関する数理解析

材料関係の産業界において、転位や回位など格子欠陥 (図 4) の規則的な二次元ナノスケール構造体に部分的に導入された格子欠陥構造 (回位) は、構造体全体の形を曲面に変化させる形態形成能があります。本研究では、ナノ構造の形態設計や創成の方法論にオリガミ・キリガミを応用した新しい視点を取り入

れ、図 4 に示すように機能性を有する曲面を設計しています。図 5 の構造における力学モデルと図 6 の形状における幾何学モデルに基づく計算機実験として、グラフェンシートを対象に、ナノ構造体の数理解析を進めています。

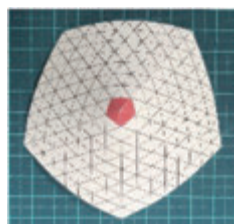


図 4 紙模型

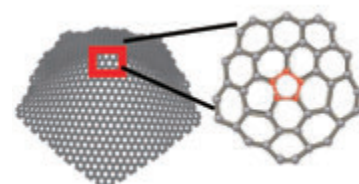


図 5 力学モデル

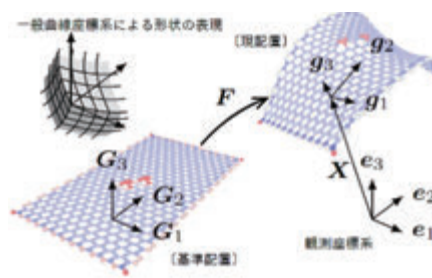


図 6 幾何学モデル

### 3. 格子欠陥によるナノ機能設計

材料関係の産業界において、転位や回位など格子欠陥の制御は材料の強化または新奇な機能創出を行う場合、避けて通ることのできない重要な問題です。本研究では計算機シミュレーションにより、初めて格子欠陥をカーボンナノチューブに導入し、数理解析によりナノスプリング (図 7) の精密設計手法を提案し、画期的な機能設計が成功しました。

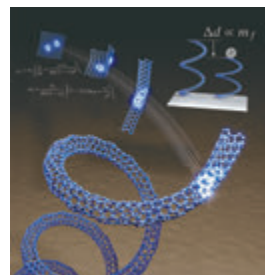


図 7 ナノスプリング

### 4. 銅合金の微細組織と各種特性

スマートフォンやテレビなどの電気・電子機器に用いられる配線用銅合金には、高い強度とともに高い導電性が求められます。高強度化のためには、銅に異種元素を添加し、熱処理による析出強化を行います。しかし、一般に、材料強化のための異種元素添加は導電性低下を招きます。この問題を解決すべく、熱力学や相平衡論に基づく材料組織制御の手法を探索しています。また、巨大ひずみ加工による結晶粒超微細化に着目し、複数の強化機構の重ね合わせによる強度-延性バランスの最適化や組織の熱的安定性向上にも挑戦しています。



助教  
黄錫永

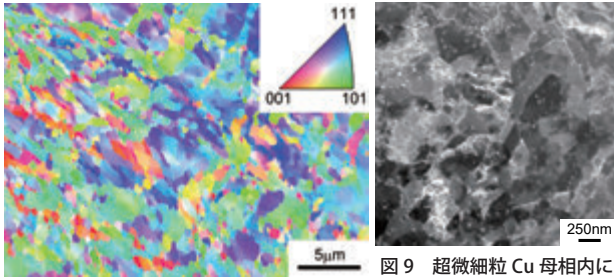


図8 Cuの超微細粒組織

図9 超微細粒Cu母相内に分散したFe粒子

### 5. マグネシウム合金のキンク形成とキンク強化

シンクロ型長周期積層構造 (LPSO) をもつマグネシウム合金は、加工によってキンク変形し、キンクの形成に伴って著しく強度が増すことが知られています。合金内でどのようにキンクが形成され、なぜキンク導入によって合金強化されるかは、ここ数年で明らかになったことがあるものの、未解明の部分も残されています。マグネシウム合金におけるキンク形成とキンク強化が実験と理論の両面で解明されれば、マグネシウム合金に限らず、他の合金、さらには、有機材料や無機材料にも応用可能な新たな材料強化手法を生み出せる可能性があります。

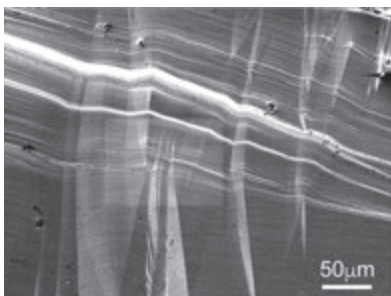


図10 LPSO相に形成されたキンクのSEM写真

### 6. ナノ積層構造体における変形メカニズムに関する分子動力学解析

ナノ積層構造体 (図11) は材料工学や物性物理学の分野で急速に注目を集めています。本研究では分子レベルにおける精緻なナノ構造、機能をマクロレベルの材料の構造、機能に繋げる方策を探るため、幾何学および分子動力学シミュレーションによる原子構造情報から、積層構造体の変形メカニズムに関する研究を進めています。

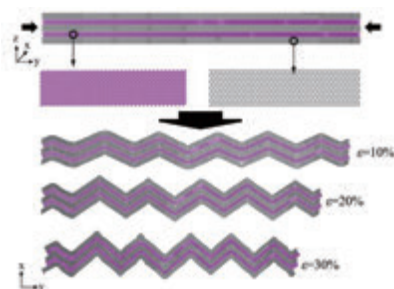


図11 ナノ積層構造体の変形シミュレーション

### 研究室からのアナウンス

- ・専門分野：材料組織学・材料強度学・金属疲労，計算材料力学・ナノ機能設計学
- ・メンバー：教員3名，秘書1名，客員研究者1名，博士5名（内留学生5名），修士8名（内留学生3名），学士2～4名（予定）
- ・2025年学生の受賞：物質理工学院 材料系 金属分野 修士論文発表会の最優秀発表賞（M2 @ 2025.2），物質理工学院 材料系修士論文中間発表会の最優秀発表賞（M2 @ 2025.8），日本材料学会関東支部 2025 学生研究交流会 支部長賞（M1 @ 2025.10），第22回ヤングメタラジスト研究交流会の優秀ポスター賞（M2 @ 2025.11），日本機械学会若手優秀講演フェロー賞（M2 @ 2025.12）など
- ・2025年学生の業績：修士学生は筆頭著者の英文学術論文はJSTにプレス発表・日本経済新聞に掲載されました，第68回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム（B4 学生ポスター発表 @ 2025.3），国際会議 The 20th International Conference on Strength of Materials（M2・D3 学生ポスター発表 @ 2024.9），日本金属学会 2025 年秋期講演大会（M1 学生ポスター発表 @ 2025.9），日本機械学会第38回計算力学講演会（M1・M2 学生ポスター発表 @ 2025.9），日本材料学会関東支部企画 2025 学生研究交流会（B4・M1 学生ポスター発表 @ 2025.10），東京科学大学 - 大連理工大学 - 清華大学ワークショップ（M1 学生口頭発表 @ 2025.10），第22回ヤングメタラジスト研究交流会（M2 学生ポスター発表 @ 2025.10）など。



2025年6月集合写真



計算力学講演会



FNTG 総合シンポジウム

藤居・雷研究室では、学生の自主性を尊重し、自らの思考力と問題解決能力が発揮できることを大切にしています。研究内容について、上記の研究テーマに限らず、学生の希望研究内容を最優先します。藤居・雷研究室では、材料学のみならず、物理や機械工学を専門分野とする学生等の大学院入学も歓迎し、研究室では多様な分野から学生を受け入れています。

# 細田秀樹・田原正樹 研究室

エネルギー・医療革新への新機能性材料創製・設計



教授  
細田秀樹



准教授  
田原正樹

<http://www.mater.pi.titech.ac.jp/>

## はじめに

人や環境に優しく、様々な社会課題の解決に貢献する、新しい機能材料の研究・開発を行っています。特に形状記憶・超弾性材料の研究に取り組んでおり、新材料の基礎物性研究から、エネルギー、医療、低炭素化などへの応用展開を見据えた研究をしています。当研究室は、材料コースとエネルギー・情報コース、人間医療科学技術コースに所属しています。

**専門分野：**材料設計、エネルギー・医療、形状記憶・超弾性合金

**キーワード：**構造・機能材料、複合材料、磁性材料、機能性チタン合金、貴金属合金、センサー・アクチュエータ、相変態、相安定性、状態図、結晶構造、組織制御、金属間化合物、医歯工連携、新材料プロセス、金属 3D プリンティング等

## 研究組織と研究について

当研究室は物質理工学院のみならず、新研究領域の創出と、人類社会の課題解決、将来の産業基盤の育成を強く意識した世界トップレベル研究の創出を使命とする総合研究院にも所属しています。このため、当研究室に配属された学生は、物質理工学院としての教育を受けるだけでなく、総合研究院の仲間として世界最先端研究やその社会実装にも携わることになります。世界を変えるかもしれない最先端材料研究とその応用に携わりたい学生を歓迎します。



図1 形状記憶合金の応用例

## 研究テーマについて

### 1. 生体用・エネルギー用新形状記憶合金（チタン、金合金）

形状記憶・超弾性合金は、エネルギーや最先端医療のための材料です。廃熱からのエネルギー回収ができ、高齢者の心臓病や脳卒中などの血管疾患の治療機器にもなります。形状記憶合金の最先端医療機器を使えば、3ヶ月の入院が必要な脳内動脈瘤治療が1日で済みます。チタンや金からなる人体に優しい形状記憶合金は我々が世界に先立ち開発した材料です。世界最先端の研究として多くの国内外大学・企業と共同研究を行っており、医療やエネルギー技術への貢献を目指して多数の新材料を発明しています。

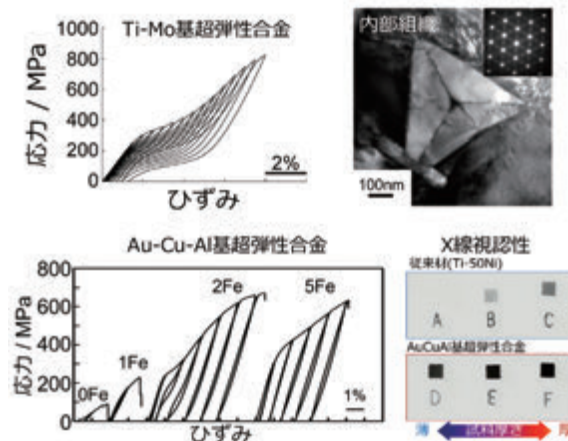


図2 当研究室で開発したTi基超弾性合金とAuCuAl基超弾性合金

### 2. 磁場駆動アクチュエータ材料・複合材料

磁場で動く磁性形状記憶合金を用い、遠隔より「磁場」で操作できる人体に優しい樹脂との複合材料を研究しています。磁場により変位を制御できることから、通常の形状記憶合金よりも高速で駆動できるアクチュエータとしても期待されています。当研究室の発明の一つで、スペインバスク大学等と国際共同研究をしています。

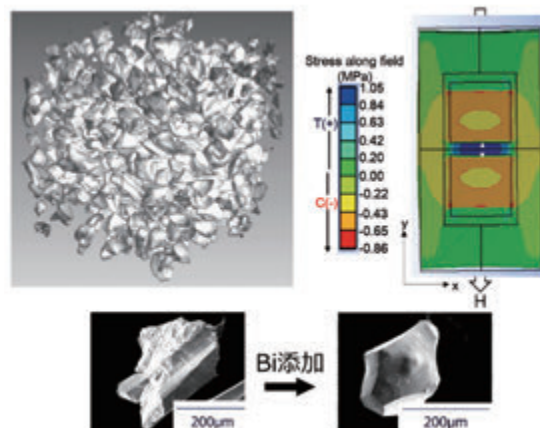


図3 磁性形状記憶合金/ポリマーコンポジット



助教  
野平直希

助教  
原島亜弥

### 3. 形状記憶合金単結晶を用いた基礎的研究

形状記憶合金の動作挙動を本質的に理解し、より優れた新合金の開発に繋がる知見を得るために、単結晶を用いた基礎的研究を行っています。形状記憶効果をもたらすマルテンサイト変態をはじめ、金属材料の変形・変態挙動を解明するためには単結晶を用いた研究が非常に強力な手段となります。当研究室で開発した新しい形状記憶合金に加え、様々な形状記憶合金の単結晶を浮遊帯域溶融法などにより作製し、マルテンサイト変態挙動や変形挙動、結晶配向性の解明に取り組んでいます。

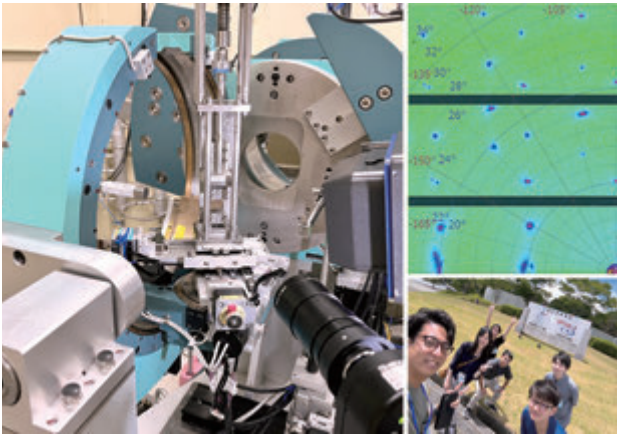


図4 形状記憶合金単結晶を使ったSPring-8での実験

### 4. AIを用いた金属組織解析

材料の理解には微細組織の解析が不可欠ですが、人による画像解析は時間がかかり、再現性にも課題があります。特に、微細組織画像の3D化に伴い、これらの問題は一層顕著になります。そこで当研究室では、AI技術を活用し、深層学習（セマンティックセグメンテーション）を用いた2Dおよび3D画像解析に取り組んでいます。単に既存のモデルを利用するだけでなく、金属学の知識を反映したモデルを開発し、相分類や結晶粒界抽出などの解析をAIによって自動化することで、効率的な材料開発手法の構築を目指しています。

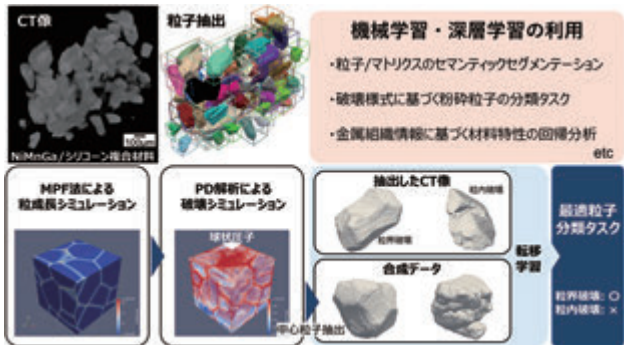


図5 AIを用いたCT画像の組織分類

### 5. 新たな形状回復原理に基づく形状記憶材料の探索

従来の形状記憶合金は原子拡散のないマルテンサイト変態によって動作していました。当研究室では、原子拡散が生じて形状回復が生じる新たな原理を発見しました。これにより、従来は不可能とされていた物質群でも形状記憶効果が得られつつあり、全く新しい形状記憶材料の探索が可能になりました。世界初の新規形状記憶材料の創出を目指して研究を行っています。

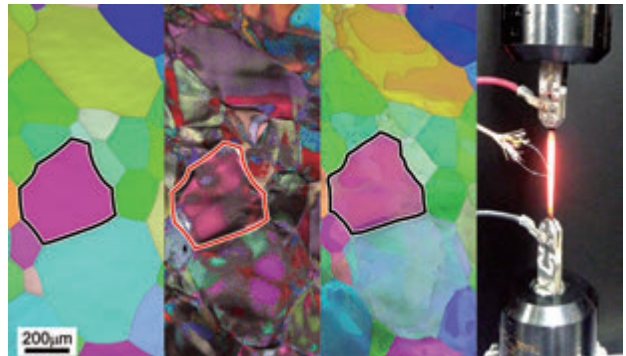


図6 拡散変態による新たな形状記憶合金の探索

### おわりに

当研究室では様々な新しい機能性材料を最先端の設備を使って研究しています。所属学生は国内外の関連学会で研究成果を発表し、多数の賞を受賞するとともに第一著者として論文発表しています。最先端材料の研究開発をしたい意欲のある学生を歓迎します！

#### 1. メンバー

スタッフ：教員4名、研究員1名、秘書1名、補佐員2名  
学生：20名 D3×2, D2×2, D1×2, M2×7, M1×5, B4×2（予定）

#### 2. 学生の受賞（2025年）

日本金属学会優秀ポスター賞2件、金属学会第7分野講演優秀ポスター賞2件、日本チタン学会最優秀ポスター賞1件等

#### 3. 卒業後の進路

博士進学、日本製鉄、JFEスチール、トヨタ、日産、日揮、JFEエンジニアリング、東京電力、など主に材料、自動車、機械、電気、コンサル等



図7 研究室集合写真（2025年度）

# 材料系 A群 (金属分野) 教員マップ

## 大岡山キャンパス

### 南 8 号館 (1)

准教授	河村 憲一	305号室
准教授	邱 琬婷	409号室
准教授	小林 郁夫	207号室
准教授	小林 覚	505号室
教授	史 蹟	212号室
教授	多田 英司	404号室
教授	林 幸	312号室
准教授	春本 高志	213号室
教授	藤居 俊之	410号室
教授	村石 信二	211号室
准教授	雷 霄雯	405号室

### 北 2 号館 (2)

教授 小林 能直 328号室

### 北実験棟 2A (3)

准教授 安井 伸太郎 201号室

