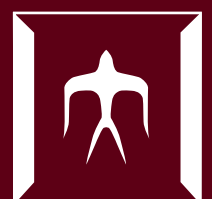
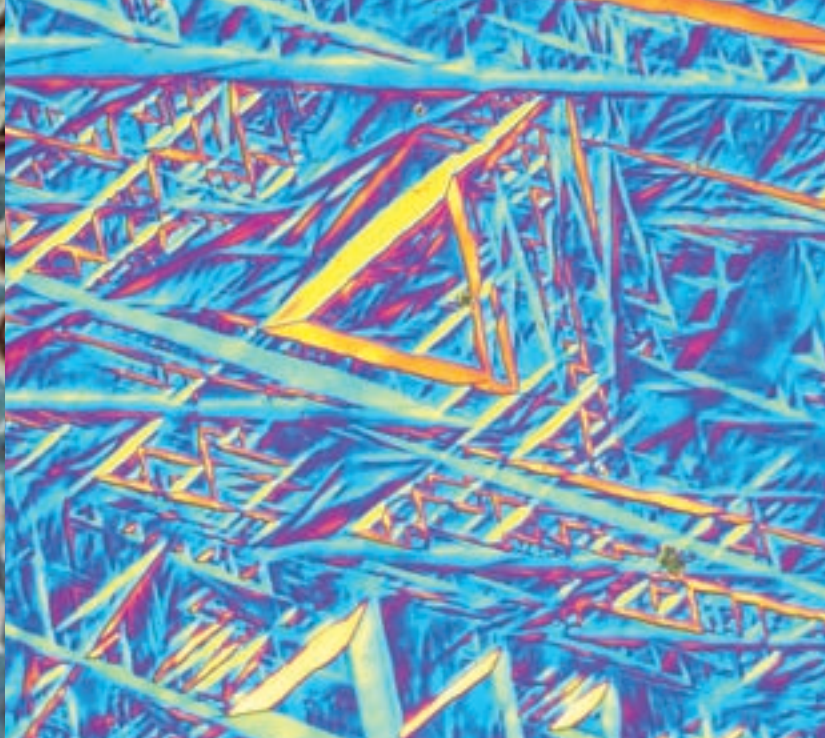
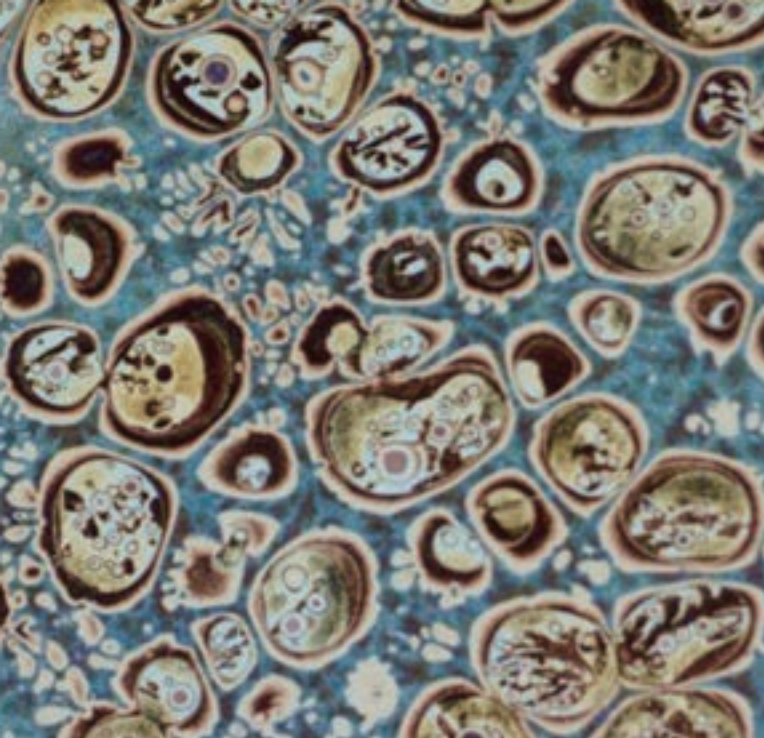


東京工業大学 物質理工学院

材料系 A 群（金属分野）

Department of Materials Science and Engineering
School of Materials and Chemical Technology
Tokyo Institute of Technology

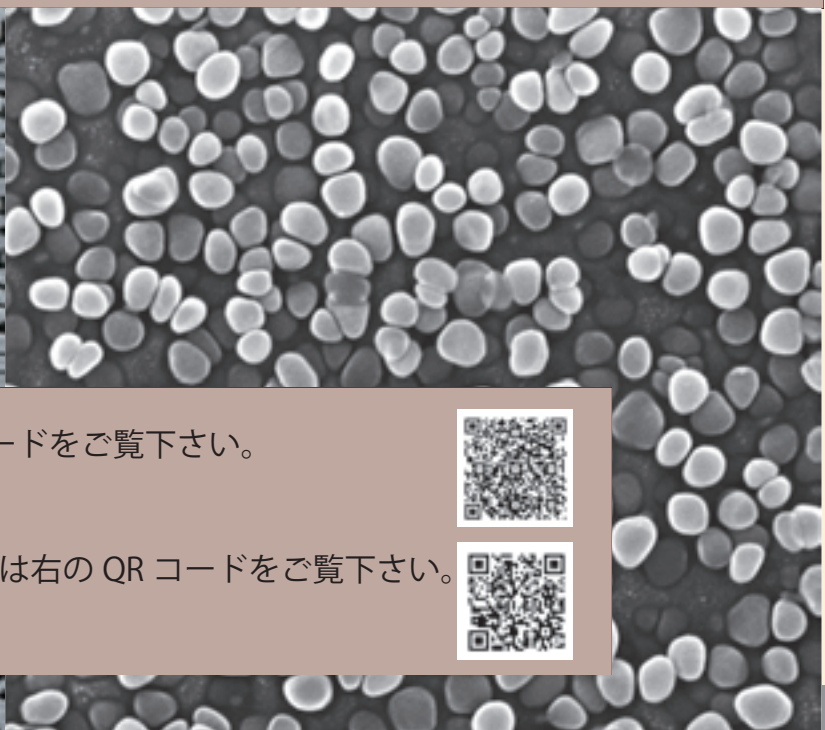
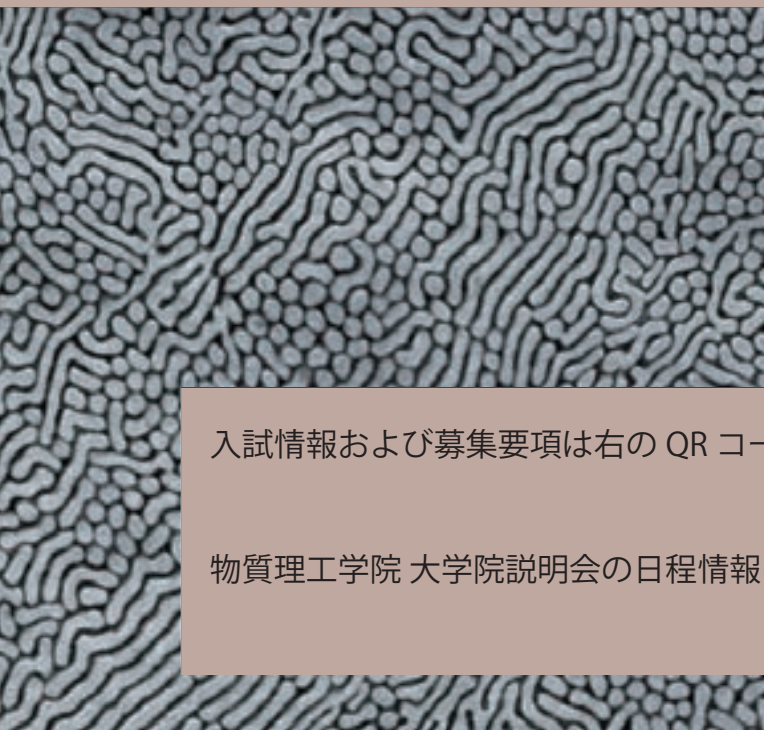




物質理工学院の材料系A群では、物理学、化学、材料科学等の基礎学問に基づき、鉄鋼材料等の社会基盤材料から超電導材料等の機能性材料にわたる幅広い専門分野を持つ教授陣が世界的水準の教育と研究を行っています。金属材料は、最も重要な工業材料として、あらゆる産業分野における科学技術の根幹を支えています。これからの人間社会が必要とする種々の革新的な科学技術の実現は、材料開発が鍵を握っています。

A群は、学部時代の専門によらず、果敢に材料開発に挑戦したいと志す皆さんに対し、材料科学の基礎力と応用力を身につけるための独自の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を高めるための英語による講義、進路・就職に関するキャリアデベロップメント講義等、各教員は学生の皆さんの視点に立った教育と支援にも力を入れています。このような優れた当分野の教員とともに、一緒に学び、一緒に発展しましょう！

物質理工学院 材料系 A群主任 尾中 晋



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。



A 群（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		
06	教授	稲 呂 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の開発, 長周期Mg合金のキンク強化		J3棟 1116号室	045-924-5058	
			エネルギーコース	すずかけ台	http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura_tit/	inamura.t.aa@m.titech.ac.jp		
07	准教授	上 田 光 敏	エネルギーコース	耐熱鋼の高温水蒸気酸化, 鉄鋼材料の高温酸化と脱スケール特性の改善, 耐熱合金の高温酸化に及ぼす母材結晶方位の影響		南8号館 304号室	03-5734-3311	
			材料コース	大岡山	http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/	mueda@mtl.titech.ac.jp		
08	教授	尾 中 晋	材料コース	材料の力学物性とその微視構造依存性, 材料組織における形の物理, 超微細粒金属材料の創製, 計算材料科学による力学物性の解析		J2棟 1505号室	045-924-5564	
				すずかけ台	http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/	onaka.s.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	http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/	kawamura@mtl.titech.ac.jp		
10	教授	木 村 好 里	エネルギーコース	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	すずかけ台	http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/	kimura.y.ac@m.titech.ac.jp		
20	教授	熊 井 真 次	材料コース	アルミニウム合金, 非鉄金属材料, 異種金属接合, シミュレーションと実験による接合メカニズムの解析, 高速双ロールキャスト法によるクラッド材の製造, 着色腐食法による凝固組織解析		南8号館 212号室	03-5734-2559	
				大岡山	http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/	kumai.s.aa@m.titech.ac.jp		
11	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	
			ライフエンジニアリングコース	大岡山	http://www.satokobayashi.mtl.titech.ac.jp/	equo@mtl.titech.ac.jp		

A 群（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	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	http://steel.mtl.titech.ac.jp/	kobayashi.s.be@m.titech.ac.jp		
12	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	http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~ykobayashi/ja/	kobayashi.y.at@m.titech.ac.jp		
13	准教授	ごうだ 合 田 義 弘	材料コース	物性理論, 磁性金属の電子論, 計算物質科学, 材料組織界面, 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		J1棟 314号室	045-924-5636	
				すずかけ台	http://www.cms.materia.titech.ac.jp/	gohda.y.ab@m.titech.ac.jp		
14	准教授	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	
			エネルギーコース ライフエンジニアリングコース	すずかけ台	http://www.sannomiya.iem.titech.ac.jp/	sannomiya.t.aa@m.titech.ac.jp		
28	教授	史 蹟	エネルギーコース	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 214号室	03-5734-3145	
			材料コース	大岡山	http://www.nakamura-shi.mtl.titech.ac.jp/	shi.j.aa@m.titech.ac.jp		
22	教授	須 佐 匡 裕	エネルギーコース	金属物理化学, 鉄鋼生産プロセス, 連続鋳造用モールドフラックス, 熱延スケール, 熱物性測定および測定法の開発, 伝熱解析		南8号館 312号室	03-5734-3141	
			材料コース	大岡山	http://www.susalab.mtl.titech.ac.jp/	susa.m.aa@m.titech.ac.jp		
24	教授	曽 根 正 人	ライフエンジニアリングコース	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	すずかけ台	http://www.ames.pi.titech.ac.jp/	sone.m.aa@m.titech.ac.jp		

A 群（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	教授	竹 山 雅 夫	材料コース	鉄鋼材料学, 高温材料の組織設計と強度学, 金属間化合物の構造と相変態		南8号館 506号室	03-5734-3133	
			エネルギーコース	大岡山	http://steel.mtl.titech.ac.jp/	takeyama@m.titech.ac.jp		
15	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, 電気化学測定, 表面処理鋼板の腐食防食機構		南8号館 404号室	03-5734-2296	
				大岡山	http://www.elechemcorr.mtl.titech.ac.jp/	tada.e.aa@m.titech.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		R2棟 916号室	045-924-5475	
			ライフエンジニアリングコース	すずかけ台	http://www.mater.pi.titech.ac.jp/	tahara.m.aa@m.titech.ac.jp		
24	准教授	Tso-Fu Mark Chang	ライフエンジニアリングコース	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	すずかけ台	http://www.ames.pi.titech.ac.jp/	chang.m.aa@m.titech.ac.jp		
16	准教授	寺 田 芳 弘	材料コース	耐熱ニッケル基超合金の時効析出挙動, フルラメラ型耐熱マグネシウム合金の組織安定性と機械的特性, 耐熱合金開発, 金属組織制御, 機械強度評価		J2棟 1404号室	045-924-5630	
				すずかけ台	http://terada.materia.titech.ac.jp/	terada.y.ab@m.titech.ac.jp		
17	准教授	中 田 伸 生	材料コース	鉄鋼材料の組織と力学特性、相変態・析出、強度・延靱性、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	
				すずかけ台	http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/top.html	nakada.n.aa@m.titech.ac.jp		
18	准教授	中 辻 寛	材料コース	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	
				すずかけ台	http://www.materia.titech.ac.jp/~hirayama/2009hirayamalabHP/	nakatsuji.k.aa@m.titech.ac.jp		

A 群（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		
28	教授	中 村 吉 男	材料コース	回折結晶学, 結晶評価, 材料物性, 組織制御		南8号館 213号室	03-5734-3144	
				大岡山	http://www.nakamura-shi.mtl.titech.ac.jp/	nakamura.y.ab@m.titech.ac.jp		
22	准教授	林 幸	エネルギーコース	熔融スラグ及び液体金属の熱物性・熱力学物性と構造, 焼結鈹の還元・熔融機構, マイクロ波加熱の高温プロセスへの利用		南8号館 313号室	03-5734-3586	
			材料コース	大岡山	http://www.susalab.mtl.titech.ac.jp/	hayashi@mtl.titech.ac.jp		
19	教授	藤 居 俊 之	材料コース	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	
				大岡山	http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/	fujii.t.af@m.titech.ac.jp		
30	教授	細 田 秀 樹	材料コース	材料設計・開発, エネルギー・医用材料, 機能材料, 形状記憶・超弾性合金, 複合・磁性材料, 相変態, 相安定性, 原子配列, 組織制御, 金属間化合物, 水素		R2棟 916号室	045-924-5057	
			エネルギーコース ライフエンジニアリングコース	すずかけ台	http://www.mater.pi.titech.ac.jp/	hosoda.h.aa@m.titech.ac.jp		
20	准教授	村石 信二	材料コース	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	
				大岡山	http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/	muraishi.s.aa@m.titech.ac.jp		

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 コ ー ス	ライフエンジニア リングコース	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 コ ー ス	ライフエンジニア リングコース	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り、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。

エネルギーコース

各系での高い専門性を持ちエネルギー分野の共通学理を修得した人材になる

分化と進化によって発展し、複雑化したエネルギー関連技術を融合、再構造化し、俯瞰と知識の有効活用を可能にする学問領域である“多元的エネルギー学理”の開拓とそれら学問領域を修得した人材の育成が求められています。エネルギーコースでは、エネルギー分野において、物理、化学、材料、機械、電気の各ディシプリンを基礎とする高度な専門性を有し、かつ、その形態を変えていくエネルギー諸問題を多元的エネルギー学理の視点から判断できる俯瞰力、自立的課題抽出・解決力、及び国際的リーダーシップ力を兼ね備え、社会に貢献する高い志を持ってイノベーションを牽引できる人材を養成します。

ライフエンジニアリングコース

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

豊かな暮らしを実現するために、ひとの健康・医療・環境などに関する工学的研究開発である「ライフエンジニアリング」を推進します。ひとに関する自然科学、生命倫理、健康・医療の基礎、環境の基礎などを様々な理工系専門技術と融合し、ひとが持続的に発展できる生活基盤の構築とともに、未来に向けた新たな学問分野の創出を目指します。

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社会に貢献する

原子力の利用は今後どうしたらよいのでしょうか。ガンの治療にも使われている放射線をもっと有効に利用するにはどうしたらよいのでしょうか。原子核工学コースでは、原子核エネルギー・放射線の利用、およびそれらを支える科学・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を出していきます。

稲邑朋也 研究室

材料組織の幾何で力学物性を制御する

http://www.mrst.first.iir.titech.ac.jp/inamura_tit/



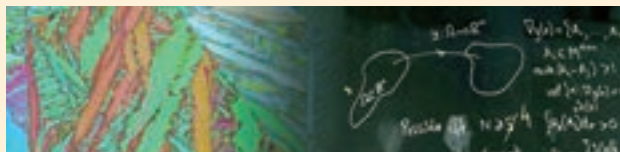
教授
稲邑朋也



助教
篠原百合

はじめに

“Seeing is believing”という言葉があります。新しい事実を直接「見る」ことで、物事に対する理解が大きく進歩することは、想像に難しくありません。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こともあるのです。



稲邑研究室では、電子顕微鏡をはじめとした、金属分野ではオーソドックスな実験手法を“Seeing”に用います。当研究室の特徴は、“Believing”に幾何学を用いる点です。材料の組織形成や変形に宿る数理は、何かの存在や不可能性を、強烈な説得力をもって示し、材料特性の起源を探る原動力や、材料設計の指針になり得ます。



当研究室では、金属物理学・金属組織学に加えて、数学に裏打ちされた原理的な視点と理論解析、各種顕微解析、回折実験等をはじめとした実験手法を縦横無尽に駆使して、新材料や材料設計指針の研究を形状記憶合金、マグネシウム合金、鉄鋼を中心に行っています。

研究テーマについて

いずれのテーマも、実験と理論解析を両方用いますが、学生さんの個性に応じて、その比率を変えています。実験だけが好きな人、理論だけが好きな人、どちらも好きな人、いずれも歓迎します。

1. 超長寿命形状記憶合金の設計原理と開発

形状記憶合金は、変形しても加熱すると元の形に戻ったり、ゴムの様に変形する金属で、マルテンサイト変態によって機能性を発現します。形状記憶合金は低侵襲医療を中心に様々な用途に使用されますが、繰り返し駆動すると、すぐ機能劣化することが問題です。

日経サイエンス 2013 年 11 月号掲載



稲邑研究室では機能劣化が全く進行しない合金を発見し、さらに、長寿命化をもたらすマルテンサイト組織が満たすべき、新しい幾何学条件の存在をつきとめました。現在、耐久性を 100 倍以上に向上させた画期的な新合金の開発と、組織の幾何学（運動学）理論の構築を行っています。

修士の学生さんがこの合金を実験で発見しました。実用化にむけた研究は、(株)古河テクノマテリアルと共同で進めています。医療技術や環境技術の発展と、新奇な技術・商品の創出につながる研究です。

2. キンクと回位 —マグネシウム合金の強化機構の黒幕—

マグネシウム合金は究極の構造用軽量金属材料です。なかでも長周期積層構造マグネシウム合金では、「キンク変形」という塑性変形によって形成された特異なキンク組織が、異常に高い強度をもたらすことが最近発見されました。しかしキンク組織の構造やそれによる強化機構は明確にされていません。



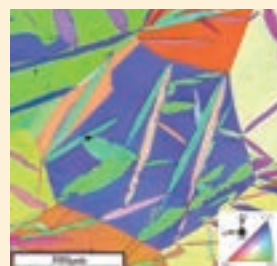
楔型回位

当研究室は、変形の連続性に着目して、キンク変形には「回位」が隠然と関与していることを理論的に発見しました。理論の妥当性を実験で検証するとともに、層状構造の一種である「ミルフィーユ構造」の強化理論を、専門分野を異にする研究者達と力を合わせて研究しています。

「ミルフィーユ構造の材料科学」という文科省の大型プロジェクトの一環で、金属、高分子、セラミクス材料分野に渡る新領域を切り拓く研究です。他大学の院生仲間もたくさん作れます。

3. 鉄鋼のマルテンサイトバリエーション選択則

鉄に「焼き」を入れる際にマルテンサイト変態によって形成されるマルテンサイト組織は、多くの鋼種の基本組織となります。近年、より高度に組織を予測・制御することが求められており、マルテンサイト変態が再び重要視されています。



当研究室では形状記憶合金の研究で得た理論解析と実験手法のノウハウをフル活用して、鉄鋼のマルテンサイト晶の形態、分布、配向を統べる「バリエーション選択則」の解明と新たな組織制御指針の構築に挑戦しています。

鉄鋼材料は、時代のニーズに合わせて常に進化します。本研究は日本製鉄株との共同研究で、環境技術、社会基盤技術に貢献します。

研究室のメンバー、就職先、共同研究先など

当研究室は、細田・田原研究室、曾根研究室と、一部の実験装置を共同で使用したり、ゼミやイベントを合同で行う等、連携しています。

2021 年度の予定メンバー: 教員 2, 事務支援員 1, 博士課程 2, 修士課程 8 (うち留学生 2), 学部生 1~2

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:

日産, 野村総研, 日本冶金, SUBARU, 三菱重工, 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



上田光敏 研究室

耐熱金属材料の高温酸化現象を解明し、エネルギー分野に貢献する

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



准教授
上田光敏

はじめに

我々は、限られたエネルギー資源を有効に利用し、地球環境に負荷をかけない持続可能な社会を築いていかななくてはなりません。当研究室では、火力発電の高効率化や鉄鋼生産における各種高温プロセスの最適化・効率化を実現するための研究を行っています。

研究の主な内容は、高温における金属材料の環境劣化に関するもので、高温における鉄鋼材料や耐熱合金の劣化機構を解明し、これらの材料を長期にわたって使用するための指針などを提案しています。

「金属が酸化する」という現象は、日常生活の中でごく当たり前に見られるものですが、材料と環境が織り成す自然現象であり、その詳細は未だ明らかになっていません。また、高温における金属材料の環境劣化は、非常に地味な現象である反面、社会基盤を支える産業においてとても重要な現象です。

研究室について

当研究室に所属した学生は、自身の研究を通して、金属の高温酸化を理解する上で必要となる熱力学や反応速度論を基礎から丁寧に学んでいくと共に、実験装置の作製など研究に必要なスキルを身に付けていきます。学生の自主性を重んじた研究室運営を心がけています。

また、当研究室では、鉄鋼材料を中心とした金属の高温酸化に関する基礎的研究を行っており、多くの他研究室とも連携して研究を進めています。次に、現在行っている研究テーマの中で代表的なものを紹介します。



実験装置の一例：

写真は水蒸気酸化試験装置の一部。実験装置はすべて手作り。この装置を用いて、様々な耐熱金属材料の水蒸気酸化試験を行う。

研究テーマについて

1. 新規オーステナイト系耐熱鋼の開発

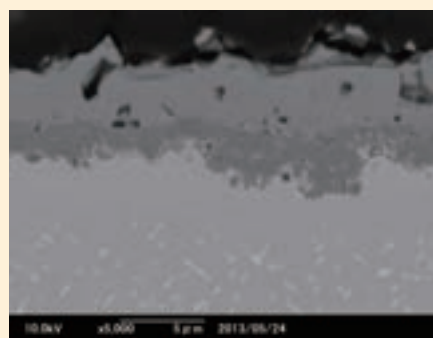
—優れた高温強度と耐酸化特性の両立を目指して—

東日本大震災以降、使用されている電力のほぼ9割が火力発電でまかなわれています。一方、化石燃料を使用する火力発電は、他の発電手段に比べ、多くの二酸化炭素を排出します。現状の電力供給を維持しつつ、二酸化炭素の排出を抑制

して、低炭素社会を実現するためには、火力発電プラントの更なる高効率化が必要不可欠となります。

その鍵を握るのは「材料開発」であり、蒸気条件の高温・高圧化に耐えうる優れた耐熱金属材料の開発が重要になります。当研究室が目指すのは、「使用環境における耐酸化特性」であり、優れた高温強度を発揮するように合金設計された新規耐熱金属材料を、使用環境で如何に長持ちさせるか？という点に着目した研究を行っています。

当研究室では、長年にわたり火力発電プラントのボイラー配管等に使用されている耐熱鋼の高温水蒸気酸化に関する研究を行ってきました。耐熱鋼は、その表面に保護性酸化皮膜が形成するように合金設計されていますが、水蒸気を含む雰囲気では、保護性酸化皮膜が形成しにくくなることが知られています。耐熱鋼をボイラーのような水蒸気含有雰囲気で安定に使用するためには、この現象のメカニズムを明らかにする必要があります。学問的にも工業的にもやり甲斐のある研究テーマになっています。



新規オーステナイト系耐熱鋼に形成した酸化皮膜の一例：

800℃/336hの水蒸気酸化試験で約5μmの酸化皮膜が形成した。酸化皮膜は2相構造を呈しており、下側の層（色の濃い層）が保護性酸化皮膜。このような構造を長時間維持することが求められる。

2. 各種高温プロセスの最適化・効率化に関する研究

鉄鋼材料は現代社会において欠かせない材料の1つであり、その性能は日々向上しています。鉄鋼生産の現場には様々な高温プロセスが存在し、鋼板は常に酸化する環境に置かれています。各種高温プロセスにおいて鋼板表面に形成する酸化スケールを的確に制御することができれば、鋼板の品質が向上するとともに、生産性が上がります。

当研究室では、鋼の高温酸化に関する知見や経験を生かし、鉄鋼生産における熱延工程や溶融めっきプロセスにおける焼鈍工程に関して、その最適化や効率化を実現するための基礎研究を行っています。

尾中 晋 研究室

好奇心からはじめよう

<http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/>



教授
尾中 晋



助教
宮澤直己

はじめに

ライト兄弟の弟のほうの話である。記者に「飛行機の発明には大学の教育なんて邪魔なものにすぎませんよね」と質問され、「大学の教育を受けていたら間違いなくもっと簡単にできただろう」と答えたそうだ。現在においても大学や大学院は、そこに集まる人間が夢や目標を設定し達成するための場、そのための素養を身につける場であり続けたいと思っている。

研究について

さて我々の研究室であるが、力学物性を中心にした材料物性に関する実験的・理論的研究を行っている。力学物性というと材料の変形や破壊に限られる話と思うかもしれないが必ずしもそうではない。確かにそれらは大きな応用例ではあるが、材料のなかの力学的な状態は微細組織の形成と遷移を決める重要な因子の一つであり、それらを介して材料の機能的な性質にも影響を与える。

では、どのようなタイプの研究を行っているかという、それは材料の中で起こる種々の現象についてそれらを支配する普遍的な基礎原理の獲得を目指した研究が多い。このような研究にはひろがりがあり興味深い。例えば、1000℃を越える温度での金属のクリープ変形と氷点下における氷河の流動がともに融点直下近傍での結晶性材料の変形挙動として統一的に理解できることは、意外に思えても理にかなったことであることに気付く。

研究テーマについて

材料における微細組織の形成と遷移に関する研究

材料組織は多様に変化し、その変化は材料全体の物性の変化と密接に関連する。材料における微細組織の形成と遷移を実験的・理論的に考察している。図1はCuの単結晶を圧延（塑性変形）した際の方位変化を測定した結果である。(a)は圧延前の単結晶の方位を示しており、図中のRDが圧延方向である。(b)は圧延後のこの材料内部の結晶方位を色で示す解析結果であり、左下から右上への整った筋状のコントラストの出現は、これに沿った転位壁の形成による単結晶の方位変化を意味している。この様な周期的な方位変化は、単結晶中での塑性変形による自発的秩序形成とみなせる。

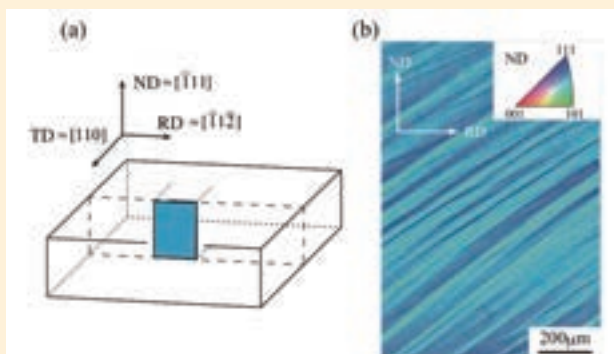


図1 (a) ある方位のCu単結晶を圧延すると、(b)に示す方位変化が起こる。これは塑性変形に伴う自発的秩序形成とみなせる。

超微細粒金属中の組織因子の定量と力学特性の評価

超微細粒とは大きさが100nmから1μm程度の小さな結晶粒を意味し、一般に用いられている材料の結晶粒径に比較して1/100程度である。この材料の変形機構を理解して組織の最適化を達成するため、種々の研究を行っている。

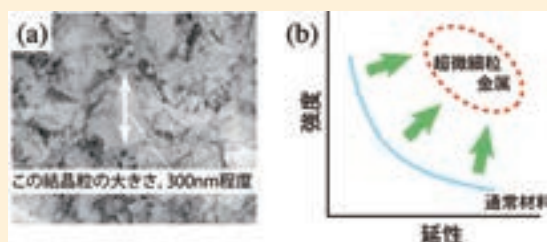


図2 (a)はNi多結晶中の超微細結晶粒を示す透過型電子顕微鏡写真である。超微細粒金属は、(b)の赤点線の領域のような強度と延性の両方に優れた材料になると期待されている。

計算科学を利用した材料の力学物性のメカニズム解明

材料の強度・延性といった力学物性の向上には、転位の運動や阻害、材料を構成する原子間の結合の破断といった原子・電子レベルの現象を理解することが効果的な場合がある。材料に含まれる転位や粒界などの欠陥や添加元素の状態をモデル化し、スーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションを用いて解析することで材料物性をミクロな視点から考察する試みを行っている。

図3(a)は分子動力学法を用いて粒界と転位の相互作用を調べた例であり、粒界が転位の運動を妨げる様子が観察される。また(b)は第一原理計算を用いて粒界近傍での電子密度分布を調べた例であり、電子密度の粗密から粒界の割れやすさを評価することができる。このように実験では直接観察することが難しい現象を可視化することで、材料の強度や延性が発現するメカニズムの考察や種々の材料物性の予測などを行っている。

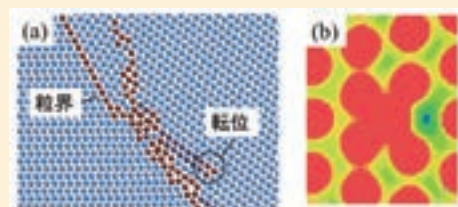


図3 計算科学によって転位の運動や阻害、結合の破断といったミクロな現象を捉えることができる。(a)は分子動力学計算で得られた粒界と転位が相互作用する様子、(b)は第一原理計算で得られた粒界近傍の電子密度を示す図である。

おわりに

夢や目標を持つための出発点として好奇心はとても大事だが、材料・物質の持つ多様性には好奇心をそそられる数多くのことがらが含まれている。見過ごしてしまうようなことのなかにも実は興味深い現象が含まれていることが多く、材料・物質について知られていないことを探し出すのは大きな楽しみである。材料・物質の勉強と研究に関心を寄せる諸君の選択は間違っていない。さあ、好奇心から始めよう。

河村憲一 研究室

熱さに負けない金属の美肌の追求

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



准教授
河村憲一

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行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。

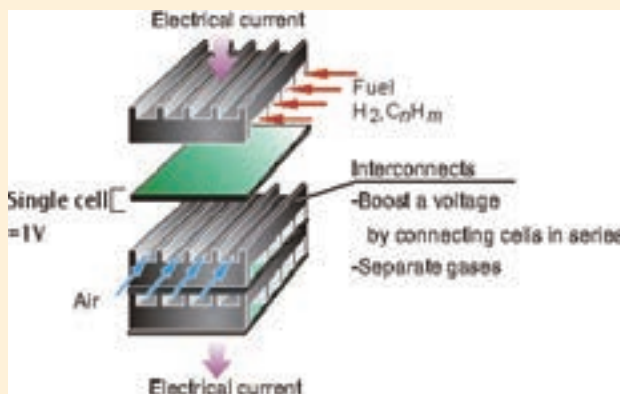


図3 固体酸化物燃料電池の概略。燃料電池の大容量化に欠かせない合金インターコネクト。高温における耐酸化性、電気伝導性など様々な特性が要求されます。

木村好里 研究室

地球環境に優しく金属材料の機能特性をデザインする

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



教授
木村好里



助教
渡邊 学

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、 βFeSi_2 や Mg_2Si 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、 $(\text{Zr},\text{Ti})\text{NiSn}$ 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。 βFeSi_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 Ni_3Al と似て非なる E_{21} 型 $\text{Co}_3\text{Al}_{1-x}$ では、 C 原子を規則化させた E_{21}' 型 $\text{Co}_3\text{Al}_{0.5}$ 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。

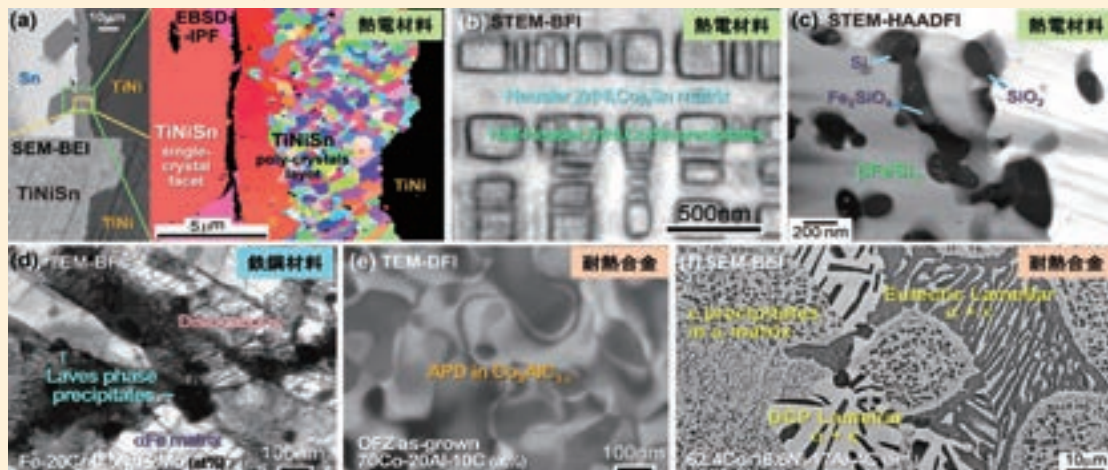


図 (a) TiNi/Sn 固液界面での Half-Heusler TiNiSn 多結晶層と単結晶 facet の形成, (b) Heusler $\text{Zr}(\text{Ni},\text{Co})_2\text{Sn}$ 母相と Half-Heusler $\text{Zr}(\text{Ni},\text{Co})\text{Sn}$ 析出, (c) 共析 Si と Fe_3O_4 の酸化還元焼結による SiO_2 分散 βFeSi_2 複相組織, (d) 強加工 βFe 母相結晶粒界と粒内に析出する Laves 相 $(\text{Fe},\text{Cr})_3(\text{Nb},\text{Mo})$, (e) E_{21} Co_3Al 単結晶の逆位相領域 APD, (f) 三形態共存の二相組織: αCo 母相と $\kappa\text{-Co}_3\text{Al}$ 析出, 共晶ラメラ, 不連続析出 DCP ラメラ。

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



助教
Minho O

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マッチに基づく応力遮蔽（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、純チタンの弾性率をもっとも低く、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ィドマンステッテン組織。幾何学的な組織が美しい

2. アルミニウム合金と鉄鋼材料の接合技術の開発と接合界面での反応拡散

近年、次々と開発・導入された新しい医療技術や新しい医療近年、CO₂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ニウム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＋アルミニウム」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。鉄鋼材料とアルミニウム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、鉄鋼材料とアルミニウム合金の固相／固相と固相／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。

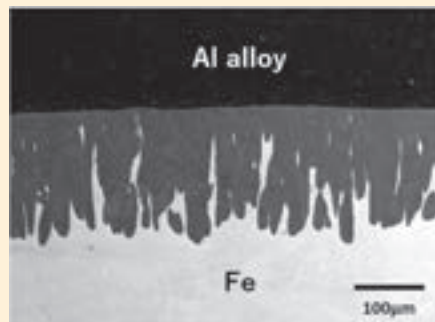


図2 鉄とAl合金を液相拡散接合法により形成された接合界面の組織。界面で生成している金属間化合物が固相の鉄に向かって成長するのが面白い

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。

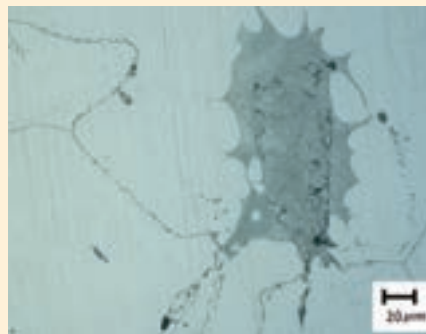


図3 マグネシウム母相（明るい色の部分）の間に生成した多相金属間化合物（暗い灰色の部分）。母相と金属間化合物との密着性が高いため、強化相としての効果が高い

小林能直 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

<http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~ykobayashi/ja/>
<https://shintaroyasui.com/>



教授
小林能直



助教
安井伸太郎

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発展させ、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、中でも「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**が必要である一方、エネルギー産業に目を転じると、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、特に過酷事故対策技術**は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。これらに対応する当研究室の活動として、必要な構造材料・機能性材料の組成・組織を高品質・高効率に創り込むための高度製精錬・鑄造技術、これらの学問を応用した原子力超長期耐久材料の開発および過酷事故材料損傷挙動解析に関する研究などを紹介します。

研究テーマについて

1. 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

高品質の鉄資源の枯渇に伴い、低品質鉱石の活用および鉄スクラップのリサイクルの重要性が高まっています。低品質鉱石中のりんや硫黄に対しては、これらの不純物を十分に除去するため、カルシウム系を中心とした**高い脱りん能・脱硫能を持ち、環境負荷も小さい精錬剤の開発**を行っています。一方、鉄スクラップには銅などの除去困難な不純物が存在するため、こ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、析出強化に役立てる**という研究も行っています。



図1 固相FeOと熔融Cu間の接触角測定(実験)と、銅と酸化鉄間に生じた銅濃縮相(実プロセス)

2. 構造材料および機能性材料に関する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、

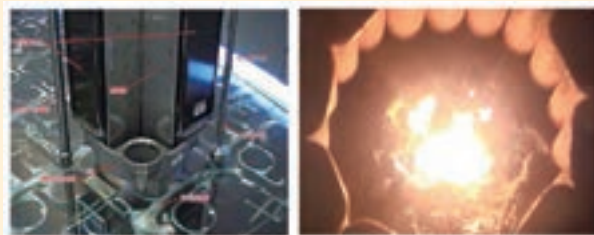
欠陥の起点となる酸化物系介在物の徹底的な除去が望まれます。この介在物が生成しない脱酸プロセスとして注目されている**電気脱酸について、スラグフリーの導線直接接点型の装置による基礎研究**を行っています。また、高保持力磁性材料である鉄ネオジム系磁石に添加されているジスプロシウムなどの希少金属は供給が不安定になる懸念があります。そこで、これらの使用をセーブするための**元素戦略としての鉄ネオジム系磁石の脱酸プロセスの熱力学**を研究しています。



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。まず炉心熔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速度を研究しています。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。

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。様々な技術を駆使してエネルギー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も併せて非常に重要となります。当研究室では安全に使用できるエネルギー貯蔵材料(リチウムイオン電池材料)の開発を行っており、電池材料は主に金属、金属化合物(特に金属酸化物)の複合体で成り立っています。本研究室で培ってきた技術を用いて、これまでに思いつかなかった未踏材料発見へ挑戦を行っています。合わせてセンサ・メモリ材料への展開も行っています。

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/>



准教授
こうだ
合田義弘

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・統計力学の基本理論と素電荷や Planck 定数といった基礎物理定数のみから求める手法が第一原理電子状態理論です。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はなく、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、永久磁石材料からナノテクノロジーの基礎となる表面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 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物理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. 永久磁石材料の高性能化に関する基礎研究

風力発電タービンやモーター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事が社会的課題となっています。その開発指針を得るための学理を構築すべく、Nd-Fe-B (図 1) や Sm-Fe といった永久磁石材料の第一原理計算を行っています。磁化反転挙動のメカニズムを解明するためには材料組織の効果を考慮する事が必須であるため、スパコンによる材料組織界面の大規模第一原理計算を行い、原子構造探索と磁気状態解析を行っています。磁性金属材料を電子論的に理解する事で新材料設計指針を提示する事を目指しています [APL(2014); PRApp(2016); PRMater(2018); JCP(2018).].



図 1：Nd-Fe-B 焼結磁石の材料組織界面（主相は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 、副相は dhcp Nd）。この様に原子スケールで平坦な界面が走査型透過電子顕微鏡による観測によっても得られている。

2. 表面・界面におけるナノ構造の物理

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した。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 2) [PRB-Rapid(2018).]. あるいは、強磁性体と強誘電体の接合系では電界や応力により磁性を制御することが可能なものがあります (界面マルチフェロイクス) [PRApp(2019); JAP(2019).]. 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いだす事を目指しています。

3. 第一原理電子論と格子模型の融合に向けた手法開発

磁気的熱揺らぎを考える時、有効 1 電子状態は必ずしもスピンの固有状態として表現できるとは限らず、これを第一原理電子論で直接扱うのは難しいのが現状です。一方、現在用いられている Heisenberg 模型などの格子スピン模型は、様々な近似により問題を簡略化しすぎており、現実物質の定量的記述には大きな問題があります。我々は、定量的な第一原理電子状態理論と格子模型を融合することにより、磁性材料の Gibbs 自由エネルギーを定量的に評価する手法を開発し、磁気冷凍材料など様々なターゲットに応用しています。

4. 耐熱金属の高強度化に向けた基礎研究

高温環境における金属材料の力学特性を向上させる機構のひとつとして、異種原子を添加することによる固溶強化は有効ですが、その根源的な理解は未だ不十分です。我々は、固溶強化において重要となる局所ひずみの理解を通じて、様々な金属材料に対して最適な固溶元素の探索を行なっています。また、実験グループと共同で、材料組織の最適化に必要な多元系状態図を整備しています。

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。

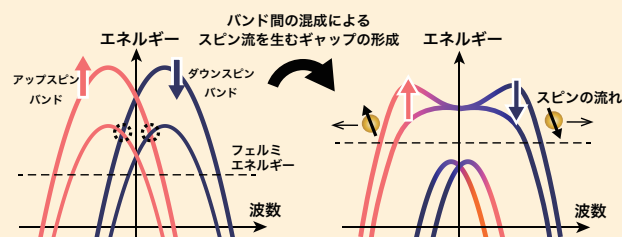


図 2：Rashba 効果を活用したスピン流生成原理の概念図。

三宮 工 研究室

機能性ナノ材料の創造と電子顕微鏡

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



准教授
三宮 工

はじめに

自由電子は物質内の電荷移動を司り、電磁気特性・光学特性・力学特性・化学反応性など様々な機能発現に寄与します。これらの機能を最大限活用することで、コンパクトで高効率・省エネルギーな次世代のデバイスが実現できます。当研究室では、自由電子を多次的（エネルギー+空間的）に制御することで、新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多くの分野へ応用可能です。また、材料評価手法にも力を入れており、特に透過電子顕微鏡（TEM）の研究、装置開発、手法開発も行っています。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、微量の血液で癌診断の可能な高感度バイオセンサー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。このような材料の設計にはナノサイズ構造制御と、光場の制御が必要となります。我々はナノ材料創製を行うとともに、計算や観察手法を駆使して、その特性を評価しています。更に、光観察手法、超高分解能電子顕微鏡法など各種電子顕微鏡手法も開発しています。企業や海外との共同研究も積極的に行っています。

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。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ナノ構造を作製しています。電子顕微鏡などの顕微手法と、スペクトル測定などを用いてこれらを評価しています。さらに、解析計算や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ナノフォトニック材料の研究を行っています。

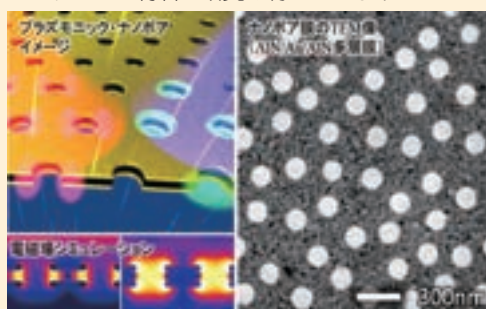


図1 光学共鳴によるセンシング機能をもつナノポア

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（～1 nm）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。

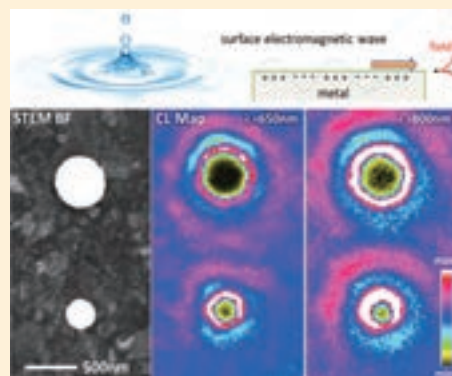


図2 金属表面の自由電子振動による電磁波（表面プラズモン）の可視化。走査型透過電子顕微鏡カソードルミネセンス法による。

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など電子線励起による材料機能の観察手法の開発、高周波加速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。

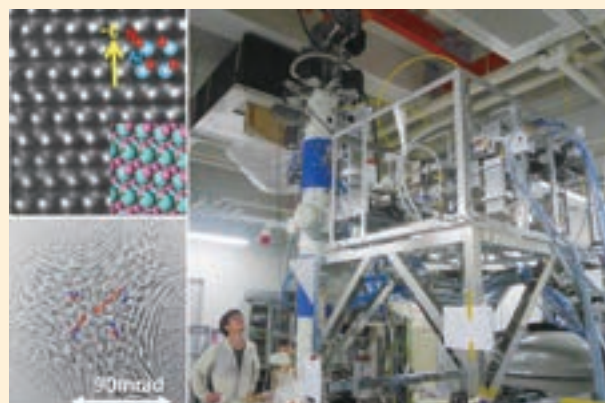


図3 左上：AINの超高分解能電子顕微鏡写真。左下：ロンチグラムの自動中心検出トレース。右：開発中の高周波加速TEMの外観

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

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



教授
多田英司



助教
大井 梓

はじめに

材料の機能には、機械的性質、電気・磁気的特性、光学的特性など様々あります。しかし、すべての材料がそれらの機能性を長期間にわたり発揮するには、使用される環境における耐久性が極めて重要です。材料の耐久性が劣化することの原因の一つに、材料表面や材料と環境の界面で起こる化学、電気化学反応があります。よって、これらの反応機構の詳細を解明し、材料の耐久性劣化を阻止する技術を開発することや、優れた耐環境性を有する材料表界面を創製することが必要であり、結果として省資源、省エネルギー、地球環境保全にすることが、地球環境保全に役立つといえます。

我々の研究室では、電極触媒や構造材料に用いられる金属材料について、表界面で起こる化学、電気化学反応を解明して、使用する環境において長期間にわたり優れた耐久性を維持できる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、学年を問わず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. 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で、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、製造コスト全体の約25%も占めるため、安価で、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、固体高分子形燃料電池に用いられるPt系電極触媒の腐食劣化機構の解明、電極反応機構の解明、Ptの使用量を抑えた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。

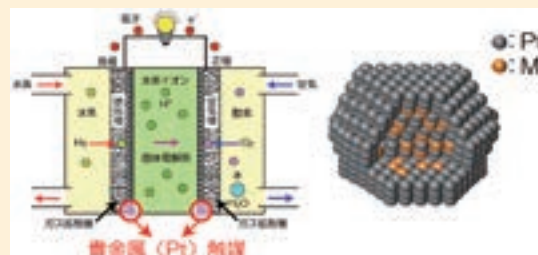


図1 固体高分子形燃料電池の模式図（左）とコアシェルPt-M合金系電極触媒の模式図（右）

2. 金属材料の腐食機構解明

米の腐食調査機関は、金属材料の防食対策における年間コストがGDPの数%に及んでいることを試算しています。消費税率%分の莫大なコストが腐食防食関連費として毎年費やされています。そのため、金属材料の高耐食化や防食は、極めてインパクトの大きな技術となります。しかしながら、様々な金属材料が、様々な環境で使われることによって、予想もしない腐食が生じ、予想を超える速度で材料劣化が進むことがあります。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、その機構の詳細を、電気化学的手法や数値シミュレーションにより調査し、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。

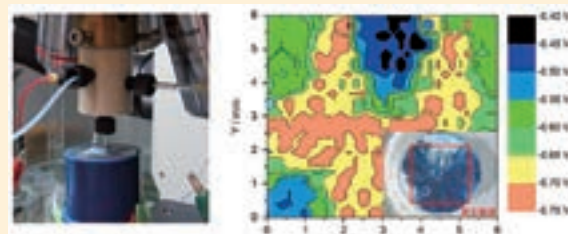


図2 特殊な電気化学測定法と測定例：微小電気化学セル（左）と走査型ケルビンプローブによる非接触表面電位測定結果（右）

3. 金属材料の環境劣化割れに関する研究

我々の研究室では、鋼構造物の劣化、特に腐食に伴う機械的性質の低下と破壊機構の解明、環境劣化割れ寿命評価に関する研究を行っています。例えば、高耐食金属材料の一つであるステンレス鋼は、塩化物イオンを含む大気腐食環境において応力腐食割れを生じることが問題となっています（図3）。そこで、このような環境劣化割れの発生、進展機構解明に関する研究を行っています。また、鉄鋼の高強度化に対する弊害となりうる、腐食等によって発生、侵入した水素によって生じる遅れ破壊について、鉄鋼表面での水素発生反応および水素侵入機構の解明を中心に、電気化学的な手法により基礎的研究を行っています。

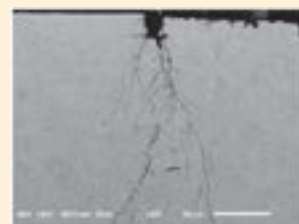


図3 ステンレス鋼表面から成長する応力腐食割れ

寺田芳弘 研究室

環境性能に優れた高温構造用材料の開発

<http://terada.materia.titech.ac.jp/>



准教授
寺田芳弘

本研究の時代要請

航空機、自動車、発電設備など、私たち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、材料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、最も基本的な構造用材料である金属系材料を中心に、組織制御と力学特性の観点から高温構造用材料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学ぶことができます。

研究テーマ課題

本研究室では、金属組織を観察する目を養うことを重視しながら、高温耐熱材料の合金設計、組織制御の基礎となる相変態や結晶構造解析、高温クリープ変形挙動の評価と材料強化機構の解明に取り組んでいます。研究課題の中で代表的なものを以下に紹介します。

- ・ 鍛造 Fe-Ni 基合金 HR6W における Laves 相の時効析出挙動
- ・ 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 合金における C15-Al₂Ca 相の析出挙動
- ・ 耐熱 Mg-Ca 合金の高温変形に及ぼす α /C14 異相界面の影響

研究テーマの社会的意義

1. 鍛造ニッケル基超合金における組織形態制御

二酸化炭素の排出削減のために、火力発電プラントはさらなる高効率化が求められています。現在開発が進められている 700℃級 A-USC 発電プラントを実現するためには、700℃-100MPa において 10 万時間以上のクリープ破断寿命を有する耐熱材料が求められます。クリープ破断寿命を精度良く推定するために、組織形態を正確に定量評価することが必要となります。絶対モーメント不変量を導入することにより、オクトデンドライト形状（図 1 参照）をも含む、鍛造 Ni 基超合金において見られる多様な析出組織形態を定量評価することが可能となります。

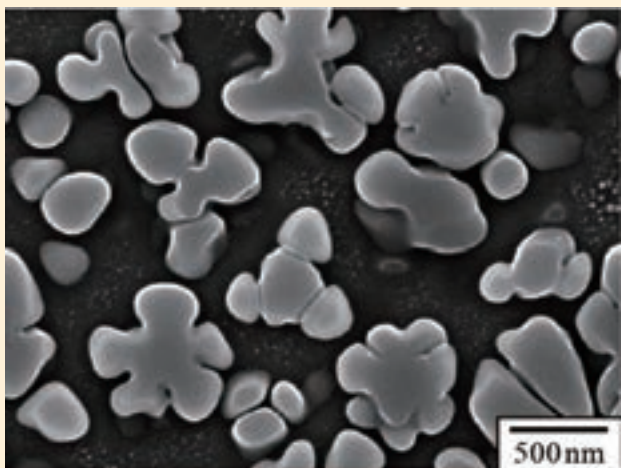


図 1 鍛造 Ni 基超合金 Udimet 720Li の走査型電子顕微鏡組織

2. 金属系耐熱材料における高温クリープ変形モデルの構築

金属系多結晶材料を高温でクリープ試験すると、結晶粒界における回復促進により粒界近傍に転位密度の低い軟化領域ができます。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、クリープ速度の結晶粒径依存性を定量的に取扱う、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。このモデルは、金属系材料のクリープ現象に対し普遍的に成立し、本モデルに基づいて組織制御を行うことにより、優れた高温強度を有する耐熱合金を開発することが期待されます。

3. 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部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、金属組織をナノメラ状に制御することを目指しています。



図 2 当研究室が提唱しているコア・マントルモデル

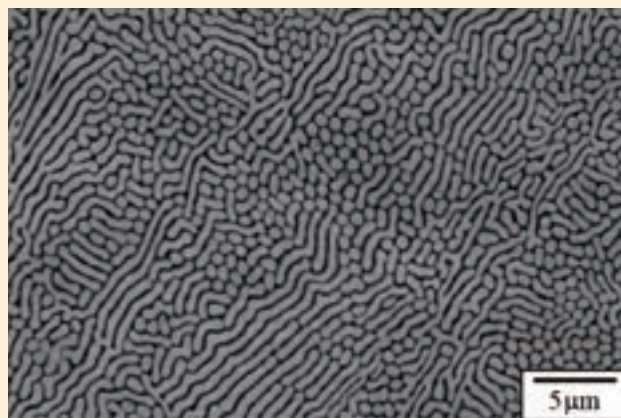


図 3 Mg-Ca 系耐熱マグネシウム合金の走査型電子顕微鏡組織

中田伸生 研究室

金属の王様・鉄鋼材料の強靱化～一人の百歩より百人の一步～



准教授
中田伸生

<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のでしょうか？乗り物のスピード・燃費は改善し、建造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（図1）。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、“一人の百歩より百人の一步”を要求されるのが、構造用金属材料の王様である鉄鋼材料の宿命なのです。



図1 東京スカイツリー完成の裏側にも、鉄鋼材料の進歩が隠れています。

研究について

金属材料の性質は、ナノレベルの格子欠陥や不純物元素の存在だけでなく、結晶粒のサイズや第二相の種類・量などミクロスケールな金属組織に依存して大きく変化します。金属組織学者は、金属の特性を最大限に引き出すことを目的に、合金成分を調整し、熱や応力を外部から加えることで金属組織を任意に制御する「金属の料理人」であり、「現代の錬金術師」なのです。当研究室では、構造用金属材料、とくに鉄鋼材料の強靱化を目指し、金属組織の科学を探索します。

研究テーマについて

1. 鉄鋼材料における新たな組織制御技術の探索

ほとんどの金属では、温度や圧力の変化によって固相状態が結晶構造が変化する「固相変態」が起こります。鉄鋼材料では、体心立方格子構造のフェライト (bcc-Fe) と面心立方格子構造のオーステナイト (fcc-Fe) が存在し、鉄鋼材料を加熱すると700～900℃の温度域でフェライトからオーステナイトへの固相変態が生じます。このbcc→fcc固相変態は高温で生じるため、変態過程では鉄原子が連続的に格子間を

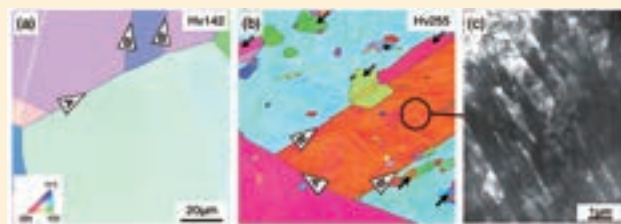


図2 加熱速度を変化によりfcc-Fe オーステナイトの金属組織が激変。加熱速度の変化のみでこのような金属組織を得たのは世界で初めて。

ジャンプするように拡散し、最終的には結晶性の良いオーステナイトとなります。図2aは、特殊な電子顕微鏡を用いて、固相変態後のオーステナイト結晶粒の方向を示したコンターマップです。各結晶粒の色は均質であり、原子の拡散を伴って生成したオーステナイトは結晶性が良いことがわかります。これに対して、鉄鋼材料を非常に速く加熱した場合、鉄原子が十分に拡散ジャンプできないうちにbcc→fcc固相変態が生じてしまい、結晶性が悪いオーステナイトとなります（図2b）。図2cは、このオーステナイトの内部組織を示す電子顕微鏡写真であり、そこには高密度の格子欠陥を内在した幅0.2 μm程度の微細な板状の金属組織が発達していることがわかります。これによって急速加熱によって生成したオーステナイト (b) は、通常のオーステナイト (a) に比べて80%増の強度を持つようになります。つまり、原子の動きを理解し、加熱速度という外的因子を変えるだけで、鉄鋼材料の特性は飛躍的に向上するのです。

2. ミクロメゾマクロに目を向けたマルチスケール組織制御

金属材料を加工すると、塑性変形（外力を除いても、形状が戻らない変形）を伴いながら、最終的な破壊にいたりします。加工しやすい金属、壊れにくい金属を造るためには、金属がどのように変形しているのかを理解しなければなりません。マクロな力学特性がミクロな金属組織に支配される金属材料では、その塑性変形・破壊の様子をミクロメゾマクロとマルチスケールかつ動的に観察することが重要になります。このような多角的な組織観察を可能にするため、固体力学を基本に高精度な計測機器ならびにAI深層学習を活用した画像処理技術を融合し、金属の変形・破壊挙動をマルチスケールかつ動的に理解する研究を進めています（図3）。

以上のように、私たちの研究室では、固相変態を中心としたミクロな金属組織制御の探究を通して、鉄鋼材料の強靱化に挑戦しています。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。『疑わずに最初の一段を登りなさい。階段のすべて見えなくてもいい。とにかく最初の一步を踏み出すのです。マーティン・ルーサー・キング Jr.』

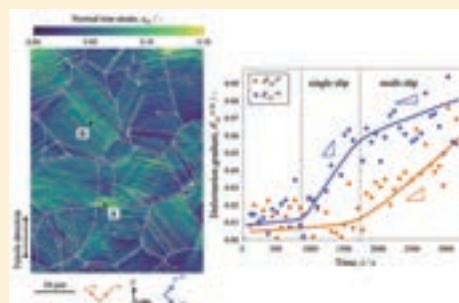


図3 電子顕微鏡と画像解析を用いて可視化した鉄鋼材料のミクロスケール不均一変形挙動。深層学習を援用したイメージプロセッシング技術を応用することで、異なるすべり系が動的に活動する様子を世界に先駆けて観察成功。

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://www.materia.titech.ac.jp/~hirayama/2009hirayamalabHP/>

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、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、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。

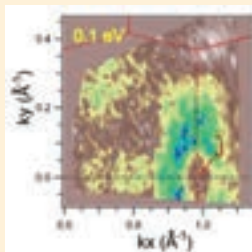
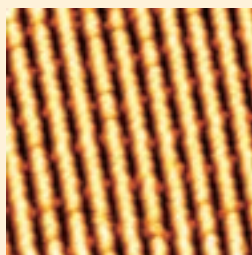


図 1 (上) Ge (001) 基板上に 1 原子層分の Au を蒸着して得られた、1.6nm 周期で配列した 1 次元原子鎖構造の STM 像。(下) 角度分解光電子分光で調べた等エネルギー面は楕円形で、この系が異方的 2 次元電子系であることを示す。

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ます。

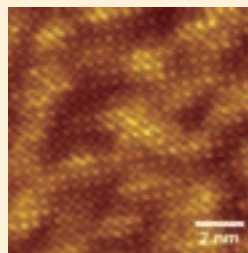


図 2 Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上に成長した Bi(110) 超薄膜表面の原子分解能 STM 像。1 つの輝点が Bi 原子に対応している。

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。

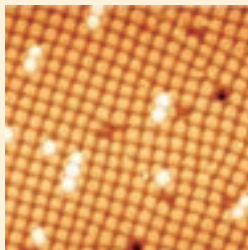


図 3 Cu(001) 基板上に 3.5 nm 周期で正方配列した単原子層厚さの MnN 磁性ナノドット配列の STM 像。

おわりに

当研究室は理学院・物理学系・物理学コースの平山博之教授 研究室と共同で研究活動を展開しています。所属学生の皆さんも、机を並べて研究室ライフを送ることになります。

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。

藤居俊之 研究室

材料組織の形成と発達機構の解明

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



教授
藤居俊之



助教
宮澤知孝

はじめに

金属材料の中のミクロやナノといったスケールの微細な領域には対称性の高い美しい組織が形成されることがしばしば見られます。その組織を観察することは材料科学の一つの醍醐味です。さらに、材料組織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と密接に結びついているはずです。観察した材料組織がなぜ、どのように形成されるかが理解できれば、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。研究対象とする材料は、面心立方晶（銅および銅合金、アルミニウム、ステンレス鋼）、体心立方晶（鉄鋼材料）、最密六方晶（マグネシウム合金）と多岐にわたります。

現在の研究内容と目指すもの

金属材料の力学特性、電気特性、磁気特性などの材料物性と材料組織との相関を種々の実験を通して明らかにし、理論解析によって現象の説明と特性の理解を行っています。また、素材メーカーとの共同研究では、産業応用で発生する具体的な問題からのフィードバック研究も進めています。

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。

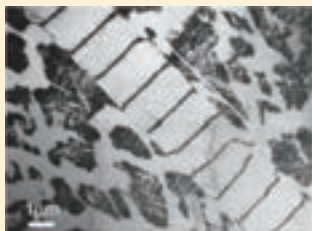


図 1 Cu 単結晶の疲労転位組織

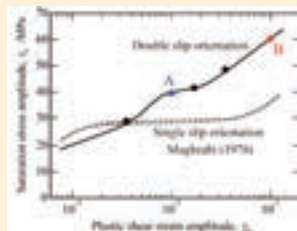


図 2 Cu 単結晶の繰返し応力-ひずみ曲線

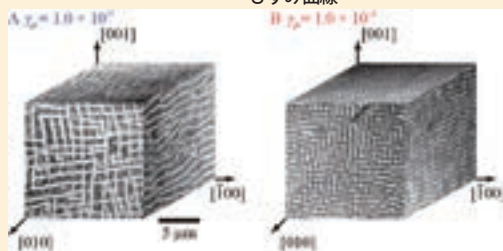


図 3 超高压走査透過型電子顕微鏡観察像より作成した Cu の転位組織三次元構成像。(A)vein-like 組織と (B)labyrinth 組織。

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。

2. 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、温間押出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明らかになってきました。しかし、どのようにキンクが形成され、なぜキンクによって合金強化されるかは、未解明のままです。そこで、LPSO のみならず、硬質層と軟質層からなる広義の“ミルフィュー構造”に着目し、キンク形成とキンク強化を理論的に解析しています。

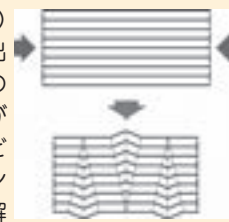


図 4 キンク形成模式図

3. 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。

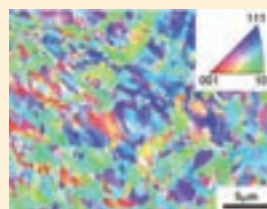


図 5 Cu の超微細粒組織

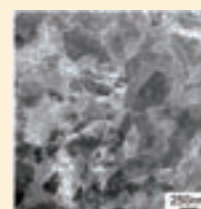


図 6 超微細粒 Cu 母相内に分散した Fe 粒子

4. 放射光 X 線による微細組織分析

大型放射光施設 Spring-8 では高エネルギー、高フラックスの X 線を利用することができ、回折や散乱によって非破壊で材料組織の平均情報の取得が可能です。材料に放射光 X 線を照射し、透過した散乱 X 線より母相内に分散した析出粒子の大きさや形を評価する小角 X 線散乱測定、結晶格子からの回折 X 線よりひずみや結晶子サイズを評価する X 線回折測定を用い、電子顕微鏡と組み合わせた多角的なアプローチによって金属材料組織を分析しています。



図 7 Spring-8 BL19B2 小角散乱測定装置図

熊井真次・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
熊井真次



准教授
村石信二

はじめに

我々は2名の教員が協力して研究室を運営し、研究・教育に取り組んでいます。学生の皆さんが毎日の研究生活において「金属材料」の面白さを実感し、その意義を理解し、さらに研究を進める上で遭遇する様々な問題を乗り越え、それぞれの将来を切り開くために必要な「自分自身で育つ力」を身につけてもらえるよう、全力で指導します。

研究について

本研究室では代表的な社会基盤材料である金属材料について、製造プロセス、組織、力学的性質の関係について探求しています。実用材料が抱えている材料科学・工学的課題を解決し、さらにその中から新しい基礎研究の種を見出すことを目標に、教員と学生が一丸となって研究に取り組んでいます。循環性に優れたアルミニウムとその合金を中心に研究を進めていますが、材料の種類に拘らず、また常に新しいテーマにチャレンジし、研究領域の拡大ならびに異分野とのコラボレーションを積極的に進めています。常に社会との接点を明確にし、時代の要請に応え得るような研究成果をもって社会に貢献すること、研究室のメンバーの一人ひとりが研究活動を通じて独自の舌（テイスト）や独自の物差し（スケール）を育み、明日を担う技術者、研究者、教育者として成長することを目指して努力しています。

研究テーマについて

1. 種々の先端的手法による同種・異種金属接合と接合機構の解明

金属板同士を電磁力や火薬の爆発力を利用して超高速で傾斜衝突させ、衝撃圧接する研究を行っています。接合に要する時間は数マイクロ秒です。種々の同種・異種金属接合材について、特異な波状接合界面形態と衝突時に発生するメタルジェットについて解析を進めています。電磁力衝撃圧接時に起こる衝突点からのメタルジェット放出を、高速ビデオカメラを用い、世界で初めて撮影することができました。（図1）衝撃解析ソフトを利用した粒子法により、図2のように衝撃圧接過程をシミュレーションによって再現し、接合機構の解明を行っています。さらに最近、熱解析ソフトによるシミュ

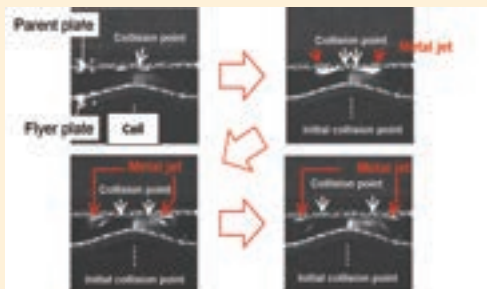


図1 高速ビデオカメラでとらえた電磁力衝撃圧接時の金属板の変形挙動と衝突点からのメタルジェット放出挙動
試験片：純Al板（厚さ1mm） 衝突時間：数マイクロ秒 推定衝突速度：500m/s

レーションを組み合わせることによって、接合界面における局所溶解や金属間化合物等の中間層の生成過程を再現することにも成功しています。

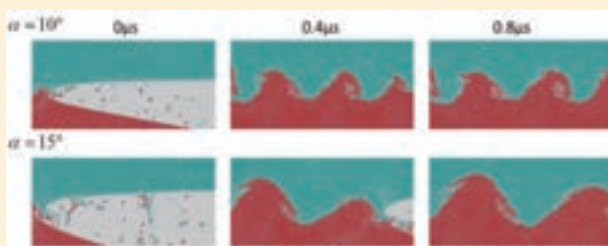


図2 Cu/Niの高速傾斜衝突界面におけるメタルジェット放出と波状界面形成（粒子法： α は衝突角度、時間は衝突後の経過時間）
・衝突点から放出されたメタルジェットと衝突点前方の金属表面が干渉し、波状界面が形成
・衝突角度の増加により波の波長と振幅が増加
・ある衝突角度を超えると波が形成しなくなる

2. 電磁力による衝撃成形と変形機構の解明

電磁力は衝撃圧接だけではなく、成形にも利用できます。通常の成形法では困難な微細加工が瞬間的に可能です。数〜数十マイクロ秒間にどのように金属が変形しているのか、またこのような超高速塑性変形はどのような変形メカニズムによってもたらされているのかについて明らかにするために、TEMによる組織解析や衝撃解析シミュレーションを駆使して研究を行っています。

3. 高速固相接合法による異種材料のスタッド接合

放電大電流を用い、温度上昇や変形、溶接痕の発生なしに、数ミリ秒間でスタッドと薄板を強固に高速固相接合する実験も実施しています。この手法を用いることにより、従来困難であった樹脂を薄いアルミニウムで被覆したクラッド材へのスタッド接合も可能になりました。

4. 高速双ロールキャスト法を用いた循環型アルミニウム合金の開発と in situ クラッド材の製造

縦型高速双ロールキャスト法により、熔融アルミニウム合金から直接、秒速数mの高速度で薄板を製造する手法を開発しています。本手法の急冷凝固効果を活かし、アルミニウムリサイクル材に含まれる不純物の無害化や、鋳物・ダイカスト用再生合金を展伸材用合金として使用可能とするアップグレードリサイクルシステム構築を目指しています。さらにタンデム式縦型高速双ロールキャストを用い、in situで熱交換器用クラッド材を直接製造する省エネルギープロセス技術の開発も併せて実施しています。（図3）

このような実用化研究のほか、「ロールキャストの凝固学」なる学問分野を確立すべく、Al-Si、Al-Mg、Al-Mn等のモデル合金を用いて本手法特有の凝固組織の形成機構、ならびに鑄造欠陥や偏析の生成機構に関する系統的な研究に取り組んでいます。

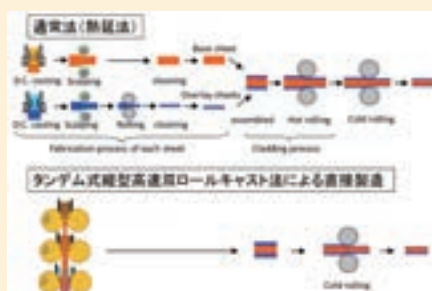


図3 本研究室で開発したタンデム式縦型高速双ロールキャスト法により、従来法に比べ大幅な省工程で、優れた特性を有するクラッドシートを製造することが可能である

5. 半熔融・半凝固材における固相の球状化ならびに溶質偏析挙動

従来は電子顕微鏡やX線マイクロアナライザーを用いて、ごく狭い領域しか解析できなかった半熔融・半凝固材の固液共存中における固相内の溶質濃度分布の変化を、溶質濃度差に極めて敏感な腐食液を用いることで、光学顕微鏡レベルで、広範囲かつ迅速・簡便に明らかにすることに成功しました。(図4)

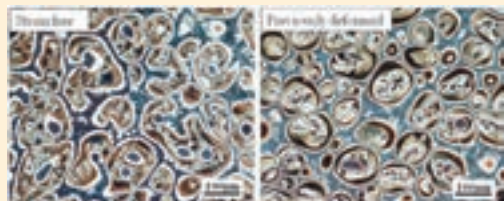


図4 Weck's 試液で腐食することによって現れた、球状化した固相内の溶質偏析と初晶デンドライトの形態変化 (AC4CH 合金の半熔融材：青い部分は急冷された残留液相)

6. 異種金属接合材料の微視的組織とその形成メカニズム

異種金属同士が高速で衝突し、波状界面を形成するまでの所要時間はわずか数 μ sec です。異材接合界面では衝撃の伝播による瞬間的な塑性変形とともに、そのエネルギー損失に起因した局所的な急速加熱と冷却の過程を辿ります。したがって光学顕微鏡で観察される波状界面の内部には極めて微細で非平衡な金属組織の形成が考えられます。

爆発圧接による Al/Fe 異材接合材を FIB 加工することで、波状界面の断面組織を TEM 観察した結果、Al 側の中間層近傍では直径数 μ m のセル状組織、Fe 側では、界面と平行に引き伸ばされた結晶粒と高密度の転位が残存していることが明らかとなりました。最も塑性変形と温度上昇が見込まれる波状界面の中間層内部には (図5)、Al 中に Fe 原子が過飽和に固溶した Al(Fe)、Fe₂Al₅、FeAl₃ の金属間化合物で構成された急冷組織であることが解明されました。

7. 高速双ロール法により作製した Al-Mn 合金の Mn 過飽和固溶体

耐食性に優れた Al-Mn 系合金は、Al₆Mn の析出を利用した回復・再結晶組織制御と Mn の固溶強化により、自動車用熱

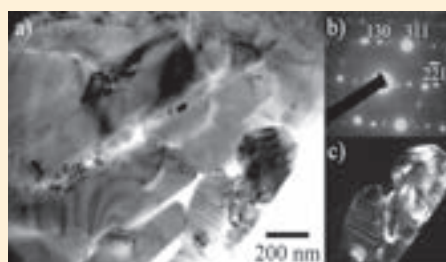


図5 Al/Fe 異種金属接合材の波状界面近傍の断面 TEM 組織 (Fe-rich 側)。a) 明視野像の右下に観察される結晶粒の b) 電子回折像ならびに c) 暗視野像から、Fe₂Al₅ の生成が確認された

交換器や飲料缶材料に実用されています。状態図に示される Al 中の Mn 固溶限は 2% 程度であるのに対し、当研究室の縦型双ロール法では、4% にも達する高濃度 Mn が過飽和に固溶することが、X 線回折、比抵抗測定から明らかとなりました。また、Al-Mn 系合金を代表する析出相 Al₆(Mn, Fe) が特異なナノ結晶の集合体として観察されており (図6)、今後更なる研究によって、その形成メカニズムの解明が期待されます。

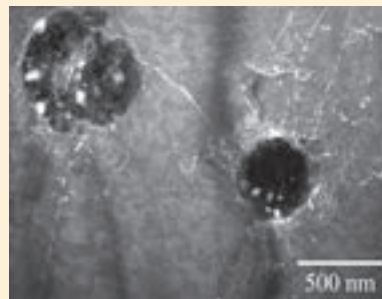


図6 Al-Mn 系合金に観察される析出 Al₆(Mn, Fe) 相の TEM 暗視野像。1 個の球状析出粒子は直径 50nm からなるナノ結晶で構成される

8. TEM 内その場引張試験による転位運動の動的観察

金属材料が塑性変形する上で重要な役割を担う転位は、そのすべり運動において周囲の転位や固溶原子、析出物などと弾性的な相互作用をすることで材料の強化に寄与します。当研究室では、TEM 内その場観察を可能とする温度可変引張りホルダーを用いて各種合金中の転位運動の素過程を直接観察するとともに (図7)、Green 関数法による転位動力学的数値計算から、巨視的な塑性変形や破壊挙動の素過程を解明する研究を進めています。

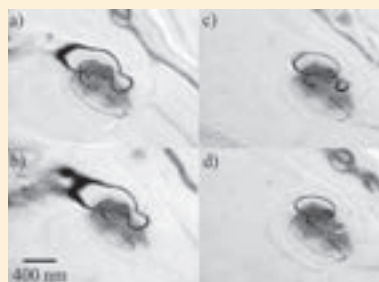


図7 TEM 内その場引張試験で観察された転位ループの収縮・分離・消滅過程。a)~d) は動画からの取込み画像 (2 秒間隔)

須佐匡裕・林 幸 研究室

カーボンニュートラル社会に向けて

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



教授
須佐匡裕



准教授
林 幸

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を探っています。

高度に発展してきた私たちの生活は、大量のエネルギー消費の上に成り立っています。エネルギー白書によると、産業部門のエネルギー消費は日本の最終エネルギー消費の4割以上を占め、中でも鉄鋼分野は化学分野に次いでエネルギーを大量に消費しています。このことは鉄鋼材料が私たちの生活を支えていることを意味しています。人類はこれまでに大量の鉄を生産してきましたが、全世界的には鉄鋼生産量は増加の一途を辿り、今でも毎年10億トン以上の鉄を生産しています。したがって、エネルギー消費もそれに応じて増えることになります。このような背景のもと、鉄鋼生産プロセスでは、環境に負荷をかけずに生産量を増やすこと、すなわちプロセスの高効率化が求められています。鉄鋼生産は高温のプロセスであるため熱と化学反応を自在に操る必要があります。そのため、当研究室では熱力学と熱物性を基礎として上の問題にアプローチしています。

共同研究～鉄鋼生産プロセスについて～

鉄鋼製品は、図1に示すようなプロセスで製造されています。原料調整に始まり、高炉、溶鉄予備処理、転炉、2次精錬と製精錬を行って目的の組成を持つ溶鋼を作り、連続鋳造によりスラブ、ブルーム、ピレットが製造されます。その後、熱間圧延工程などを経て、製品となります。どの工程でも環境負荷低減は問題となっていますが、実は関連する材料の微細な性質が操業に効いてきます。当研究室では国内外の企業・研究機関・大学と共同して、高温プロセス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（焼結鉱の組織制御）

近年、鋼には高品質化が求められる反面、鉄鉱石などの原料の品質は低下しています。これらの原料は世界中から輸入されており、産地によって酸化鉄の濃度や不純物の構成が異なります。原料調整段階では、後工程のCO₂排出量削減のために、原料鉄石中の不純物の影響も考慮した調整が求められています。当研究室では原料調整に関連して以下のような研究を行っています。

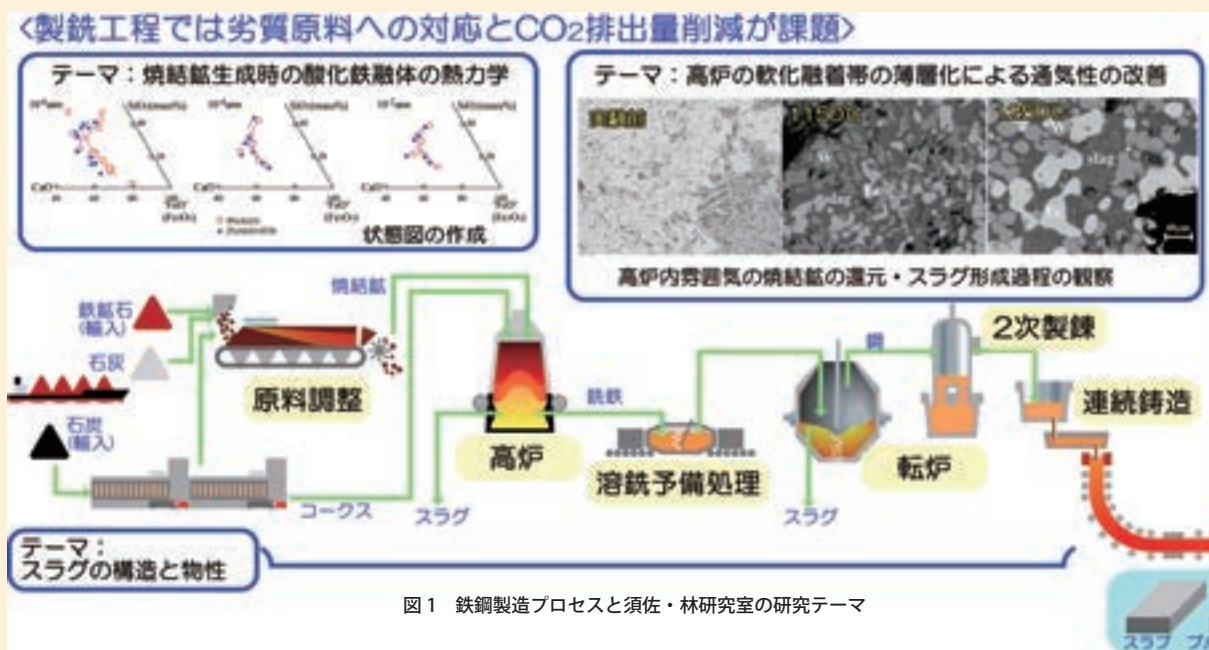
- 鉄石に含まれる溶融シリケートの構造解析
- 溶融シリケートの熱力学および物性値測定
- 高炉でのCO₂排出量を削減する焼結鉱の組織制御

2. 高炉プロセス～高炉内鉄石還元・溶融挙動の解明

鉄鋼業のCO₂排出量割合は日本全体の約14%であり、その大部分は高炉由来のものです。高炉では、コークスの燃焼により生成するCOで鉄鉱石を還元し、鉄鉄を得ています。この過程でCO₂が排出されます。コークスは還元材であるとともに、原料の加熱源、さらに高温ガスの通気を確保する隙間を作るための構造材の役割も果たしています。当研究室では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、通気の妨げとなる鉄石の反応・溶融挙動を解明し高炉プロセスにおけるCO₂排出量削減に取り組んでいます。

3. 連続鋳造～溶鋼からの抜熱評価とモールドフラックスの開発

連続鋳造工程の生産速度がはやくなると、製鉄所全体の生産性が向上すると言われています。しかしながら、連続鋳造の高速化はそれほど簡単な話ではありません。単に鋼の引抜速度





助教
渡邊 玄



助教
遠藤理恵

を上げると、冷却速度が速くなりすぎ、鋼の表面が割れてしまいます。割れを防ぐためには、溶鋼と鋳型の間にあるモールドフラックスの組成や構造を制御してその抜熱特性を設計し、高速でも適度な速さで冷却可能なモールドフラックスを開発する必要があります。近年の研究からは、モールドフラックスを結晶化させて鋼の抜熱速度を遅くすることが重要であることが分かっています。このような背景の下、以下のような実験・研究を通してモールドフラックスの開発を行っています。（図1中のテーマ「究極の緩冷却用モールドフラックスの開発」）

- 溶鋼 / モールドフラックス / 鋳型の間の伝熱モデルの構築
- 伝熱モデルによる解析に必要なパラメータ（熱伝導率、光学特性）の計測
- ホットサーモカップル装置の開発とフラックスの結晶化速度の測定および状態図作成

4. 圧延工程～酸化スケールの役割

鋳造された鋼は圧延工程を経て水冷されます。この冷却速度にムラがあると、鋼の性質が場所によって異なってしまいます。均一冷却のためには、鋼の表面に生成するスケールがキーとなっていて、その熱物性値の測定が喫緊の課題となっています。酸化スケールとは FeO 、 Fe_3O_4 および Fe_2O_3 などから形成される酸化物層で、その全体の厚さは数 10 ～ 100 μm です。実際のプロセスでの鋼の冷却速度は非常に速いため、熱力学的には不安定な相でも実際には酸化スケール層に見出されることがあります。このような状況を再現して熱物性値を測定するために、図2に示す光・通電ハイブリッド加熱法を利用しています。これは産業技術総合研究所との協力によるものです。その他にも以下のような方法を使い分けて、酸化スケールの熱物性値の測定を行っています。

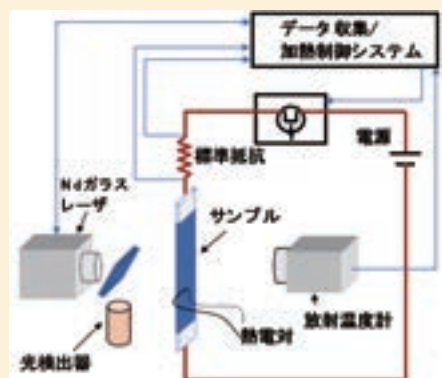


図2 光・通電ハイブリッド加熱法の装置

- 熱伝導率：擬定常ホットプレート法
- 熱浸透率：ホットストリップ法、
表面加熱・表面検出レーザフラッシュ法、
パルス光加熱サーモリフレクタンス法

さらに、鋼の冷却速度は、核沸騰、膜沸騰という水の沸騰形態に大きく依存することが知られています。しかし、沸騰形態が何に依存して変化するかは今なお明らかになっていません。当研究室では、図1中のテーマ「鋼の冷却速度の評価と鋼表面の酸化スケールの熱物性測定」に示すようにスケール付き鋼板の水冷却を模擬できる実験装置を開発して、鋼板冷却に対する影響因子の解明にも取り組んでいます。

5. 航空宇宙分野への展開

以上のような鉄鋼生産プロセスに関する研究から得た技術・知見を航空宇宙分野へも展開しています。高温の化学反応・熱物性の観点から、JAXA や茨城大学とも協力して以下のような研究に取り組んでいます。

<タービンブレードに用いられる遮熱コーティング>

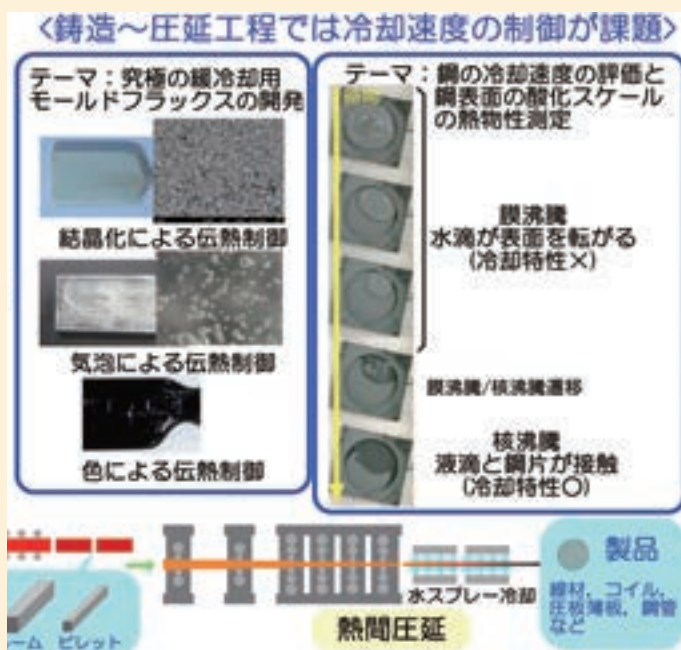
- 火山灰との遮熱コーティングの反応性評価
 - 遮熱コーティングの熱物性評価手法の開発
- <ポストはやぶさ2>
- 砂粒の熱物性評価～探査機の着陸のために

研究室の活動・メンバー・就職先など

学会活動は、日本鉄鋼協会・日本熱物性学会が中心です。

2020年度のメンバーは、教職員5名（須佐、林、渡邊、遠藤、事務支援員）、修士課程学生12名、学部生4名、海外からの研究員1名、研究生1名です。ヨーロッパ等からの短期の留学生も受け入れ等、海外との交流も積極的に行っています。

直近の4年間における卒業生の就職先は、日産自動車（5名）、日野自動車（2名）、日本製鉄（2名）、日揮（2名）、AGC（以下1名）、サンディスク、産業技術総合研究所、JFEスチール、住友重機械工業、東京製鐵、巴川製紙所、日本郵船、野村アセットマネジメント、野村総合研究所、ブリーチ、本田技研工業、マツダ、三菱電機、三菱マテリアル、ファウウェイ、長春一汽、美的集団です。



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

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



教授
曾根正人



准教授
Tso-Fu Mark Chang

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。

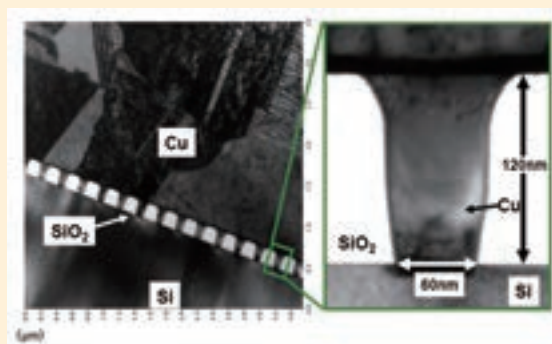


図 1. 半導体テストチップ (直径 60nm・深さ 200nm) へ超臨界ナノプレーティング (SNP) 法による埋込んだ Cu の TEM 像

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。

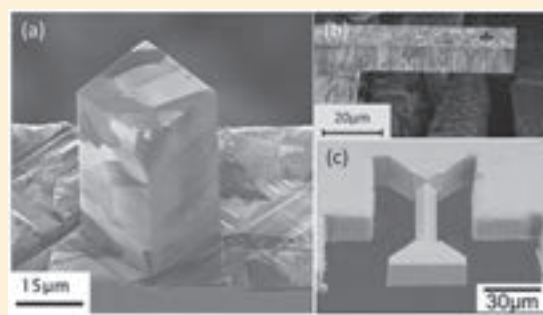


図 2. マイクロ試験片 : (a) 圧縮試験片, (b) 曲げ試験片, (c) 引張試験片

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。

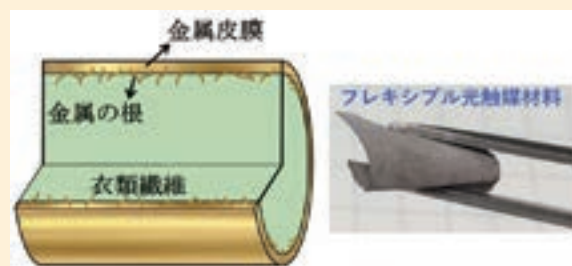


図 3. マイクロ試験片 : (a) 圧縮試験片, (b) 曲げ試験片, (c) 引張試験片

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_2 と Au_4 は、 Au_1 と Au_3 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。

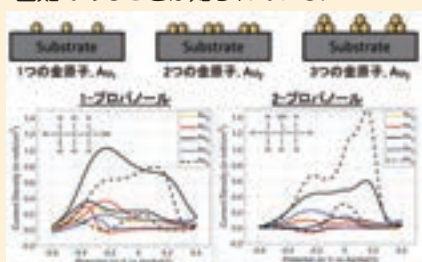


図4. 原子レベル金クラスターのイラストとプロパノールセンシングでのパフォーマンス

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。



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

その他

スタッフ: 曾根教授, Chang 准教授, 陳特任助教, 戸田秘書, 学生 14 名 (D3 × 1, D2 × 1, M2 × 5, M1 × 4, B4 × 2 予定).
就職 (直近 3 年間): サイバーエージェント, ヤマハ, ENEOS, 三菱マテリアル, M3, SONY, Continental, Apple, 本田技研, 神戸製鋼, リコー, 東京電力.
学会活動: 日本応用物理学会, 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) などが中心.



図6. 参加している国内&国際学会の例

竹山雅夫・小林 覚 研究室

エネルギーと環境問題解決にチャレンジする
革命的耐熱金属材料の設計指導原理

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



教授
竹山雅夫



准教授
小林 覚

研究哲学

鉄は神様からの贈り物 !!

地球は「鉄 (Fe)」の星、といっても過言ではありません。それは宇宙の誕生とともに始まった核融合の終焉の元素、最も安定な元素だからです。人類はこの地上に豊富にある鉄の進化とともに発展してきました。そして今、我々は、エネルギー問題、環境問題に直面しています。CO₂ 排出量の3割は発電部門、2割は輸送部門によるものです。環境への負荷を最小化し、安全安心・持続可能な『豊かな社会』を構築するためには、より過酷な環境下においても耐え得る革命的な材料が求められます。それを可能にするのがFeを中心とする金属材料です。その高性能化、高機能化を実現する決め手は、原子レベルからの組織設計にあります。

組織が材料の特性を決める !!

当研究室では「ものを作る」技術と「組織を観察する目(力)」を重視し、金属学の王道である平衡論(状態図)、速度論(相変態)、結晶学(構造解析)、強度学(変形機構)に基づいて、学理の追求と工学への応用を念頭に、既存の常識を打ち破る新たな耐熱金属材料の創出のための組織設計指導原理の構築に取り組んでいます(図1参照)。

研究テーマ

1. 発電用耐熱材料の高温化と高強度化

安価で豊富なFeでどこまで高温化が可能か!! 発電効率の向上には、タービンに送る蒸気(ガス)温度を高めればよいことは物理の法則です。問題はそれに耐えうる材料の創生です。例えば、現状の火力発電(図2)の蒸気温度は600℃であり、ボイラーやタービンにはフェライトと呼ばれるbcc構造の α -Feが用いられます。このFeの適用限界は650℃とされています。現在、これを700℃以上、且つ、10年以上壊れずに強度を保つ材料開発が日欧米で行われており、その候補合金は全てNi基合金です。しかし、当研究室ではこれをFe基で実現する、しかも800℃という世界で誰も行っていない挑戦的テーマに取り組んでいます。Feの面白さは、温度及び元素の添加によってその結晶構造が変わり(相変態)、組織を自在に制御できる点にあります。我々はオーステナイトと呼ばれるfcc構造の γ -Feを利用して世界初の金属間化合物を強化相とする超耐熱鋼の設計指導原理を構築し、粒界析出強化という新たな強化手法を用いてNi基の匹敵するクリープ強度がFe基においても得られことを実証し

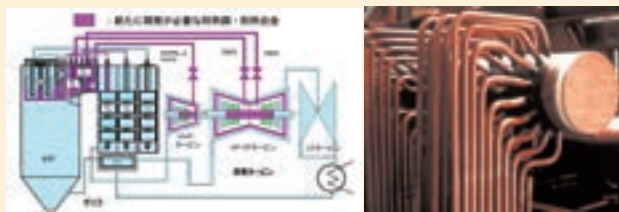


図2 火力発電の熱交換器用の耐熱鋼・耐熱合金とボイラー管

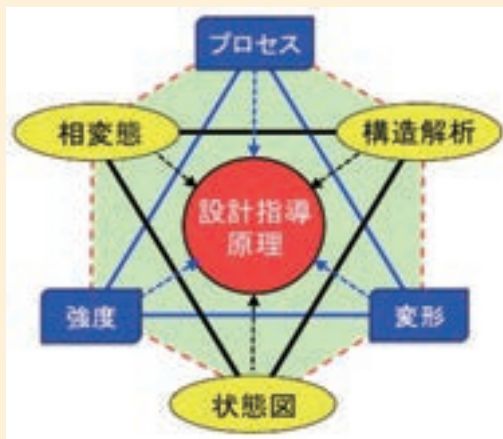


図1 当研究室における研究哲学

ています。また、 α -Feにおいても同様に金属間化合物の析出及び相変態を利用し、従来とは全く異なる組織設計により高温化・長寿命化を目指しています。

2. 航空機エンジン用新材料創生と高性能化

ジェットエンジン(図3)のタービンや高圧圧縮機動翼には現在Ni基合金が使われています。航空機は2030年までに約35,000機の製造が見込まれ、高推重比化・環境負荷低減化は喫緊の課題であり、より軽量な高強度材料が求められています。当研究室では、Ni基合金の高強度化に向けた全く新しい組織設計指導原理の構築はもとより、新たな材料創生を行っています。それがTiAl基合金です。TiAlは、比重がNi基合金の約半分のL1₀型構造の高比強度金属間化合物材料であり、今後設計される全てのエンジンへの利用が確実なホットな新材料です。我々は世界で初めてその鍛造性を実証し、鍛造TiAl基合金の組織設計指導原理を構築しました。その原理に基づいて低圧タービンや高圧圧縮機動翼に利用すべく、高温でのさらなる高強度化と高靱性化に取り組んでいます。

3. 金属間化合物の構造解析と特性評価

金属間化合物は、異種金属原子が幾何学的(GCP相)に、あるいは、トポロジカル(TCP相)に規則的に配列した複雑な結晶構造を有する物質であり、特異な性質を持ちます。我々はこの金属間化合物相を自ら作り、その構造をX線や電子顕微鏡を用いて解析し、その機械的性質を評価し、実用材としての利用を探索しています。化合物は宝の宝庫です。



図3 ジェットエンジンの構造(左)とTiAl基合金動翼の試作体(右)



助教
中島広豊



特任助教
山形遼介

研究内容

1. 研究手法

当研究室では、アーク溶解炉、単結晶作成装置を用いて、あらゆる合金を自分たちで作ります。その後、合金に適当な熱処理を施して、その際に現れる第2相に対してX線回折、透過型電子顕微鏡による構造解析（結晶学）および電子線マイクロアナライザによる組成分析を行うとともに、熱力学計算を取り入れて、材料設計の基礎となる多元系状態図（平衡論）を実験及び計算によって構築します。次に、その組織がどのように形成されたか（相変態）を明らかにし、目的とする組織を自在に得るための組織制御法を構築します。ここまで来れば、企業と共同研究を行い、大型インゴットを溶製し、組織制御した材料を用いてクリーブ試験、疲労試験、亀裂進展のその場観察試験等の機械的性質や熱膨張係数、弾性定数等の物理的性質の評価を行います。そして、得られた結果を組織設計にフィードバックして、材料設計指導原理の構築を目指します。

2.3 次元組織評価

イオンビーム（FIB）あるいはレーザによる試料のスライスとSEM撮像およびEBSDによる方位解析を数100回繰り返して、3次元的に組織を評価します。

3. 実験装置

当研究室では、装置設計して斬新なデータを得る工夫をします。例えば、世界でも類の無いSEM内にて800℃で亀裂の進展をその場観察できる装置を構築しました。また、水蒸気雰囲気中にてクリーブ試験する装置も自分たちで設計しました。3D組織解析装置も市販のFIBにレーザーを付設して、mmオーダーの3次元像が得られるよう工夫しています。その他、構造解析、特性評価をする装置は大半が揃っています。

4. 共同研究

当研究室では、国内の多くの企業はもちろん、欧米の大学、研究所、例えば、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、ウィスコンシン大学マジソン校、レオベン大学などと共同研究しており、相互交流しながら研究と教育を推進しています。



中村吉男・史 蹟 研究室

結晶を知り、環境を整え、新規な物性を導く

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



教授
中村吉男



教授
史 蹟

はじめに

中村・史研究室は、教授二人、助教一人の教員グループで、主に回折結晶学を基本に薄膜材料とその物性の研究を行っています。

薄膜材料については磁気的性質、電気的性質、光学的性質、機械的性質など薄膜特有の物性が注目されていますが、単に物質があるだけでその性質が発現するのではなく、結晶の方位、形状、表面状態などバルクの結晶とは異なる環境を整えることが必要です。結晶を知り、結晶構造や組織などの関係を、透過型電子顕微鏡やX線回折などの手法を使って調べ、環境を整えることにより自然に望みの結晶構造や表面方位を導き、バルク材料にない新規な物性を導くことができます。特に積極的に取り組んでいる研究は、結晶構造も物理的・化学的性質も異なるヘテロな物質を、ナノスケールで積層させ得られるナノヘテロ構造薄膜の創製、評価および機能発現メカニズムの解明です。

研究について

薄膜はバルクの材料と比べ表面や界面の割合が多く、少ない原子の数で所望の機能を発現できます。また結晶に働く応力も大きく、場合によっては対称性すら変わってしまうこともあります。電子顕微鏡、X線回折などの構造解析、構造評価、EDS、XPSなどの特性X線分析、XPS、オージェ分光分析など表面敏感な分析技術、薄膜作製技術を習得しながら材料科学者として独り立ちできる学問基礎と考え方を学びます。3人の教員の得意分野を補完しあい、議論を重ね研究室を過ごすことができます。現在実施している研究の中で代表的なものを紹介します。

研究テーマについて

1. ナノヘテロ多層膜の構造評価 (中村, 春本)

セラミックスであるAlNと金属Ptや磁性体CoPtをナノスケールで積層したナノヘテロ多層膜では、室温での製膜にもかかわらず、極めて平滑で周期性のそろった原子格子を作ることができます。図1はX線反射率法の測定結果です。人工的に作った周期 Λ とブラッグの式を使い $2\Lambda \sin \theta = n\lambda$ を満たす θ の位置に回折ピークが観察され、しかも17次のピークまで観察されています。これは周期性と界面平滑度が高い

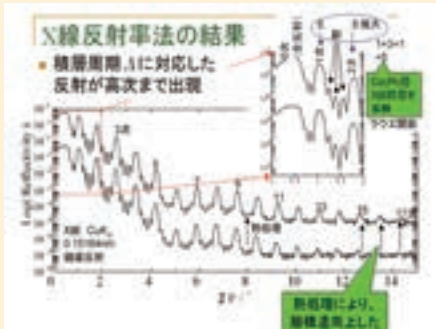


図1 X線反射率法によるCoPt/AlN多層膜の周期性、界面構造の評価

ことをし、しかも600℃まで熱的に安定であることを示しています。これはナノヘテロ材料の大きな特徴といえます。

2. 中心対称を持たない物質の極性制御 (春本, 中村)

1. で利用したAlNは中心対称を持たない極性物質です。六方晶の(001)と(00-1)では最表面の原子種や積層順に違いがあります。この積層順を直視するには0.1nmより高い分解能の電子顕微鏡が必要です。図2はAlN/Ptの多層膜でのAlNの原子分解能電子顕微鏡像です。この図ではN原子の直上にAl原子が、ずれてN原子、その直上にAl原子の“N極成長”を示しています。しかし反応ガス切り替えて作製したAl/AlNでは同じfcc金属(111)/AlN(001)の高配向膜になるのですが、その極性、積層が異なっており、Al原子の直上にN原子が位置する“Al極性成長”をしています。

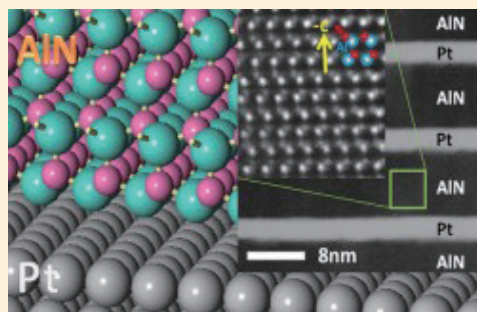


図2 AlN/Pt多層膜の原子分解能電子顕微鏡とAlNの成長様式

3. ナノヘテロ構造の磁気特性設計と評価 (史, 中村, 春本)

材料の中で構成する物質がナノスケールになると、材料の全体が界面の影響範囲内になり、材料にその構成する物質と異なる新しい物性をもたらしことができます。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、磁気センサー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。

(1) CoPt/AlN多層膜の磁気異方性の制御

図3はCoPt/AlN多層膜の電子顕微鏡写真で、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、磁気的なパフォーマンスを自在に制御することができます。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が違っただけで異なる特性を示します。

図3の写真はCoPt/AlN多層膜の上にさらに異なる厚さのCoPt層を作製し、熱処理した試料の断面構造(電子顕微鏡)です。図4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層の厚さによっては、二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。



助教
春本高志

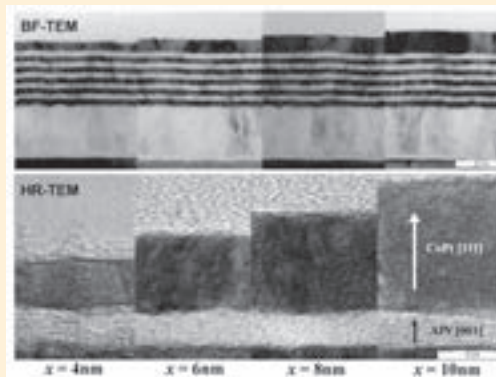


図3 CoPt/AlN 多層膜の透過電子顕微鏡写真

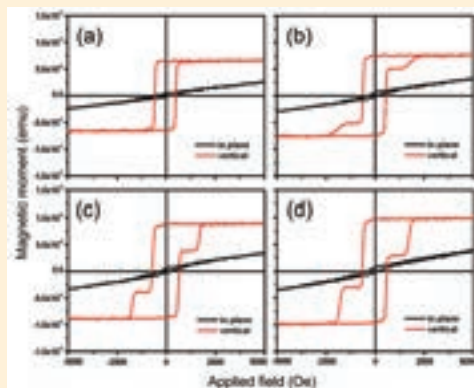


図4 CoPt/AlN 多層膜の面垂直方向の磁化曲線

(2) CoPt/CoO 多層膜の垂直交換バイアス効果

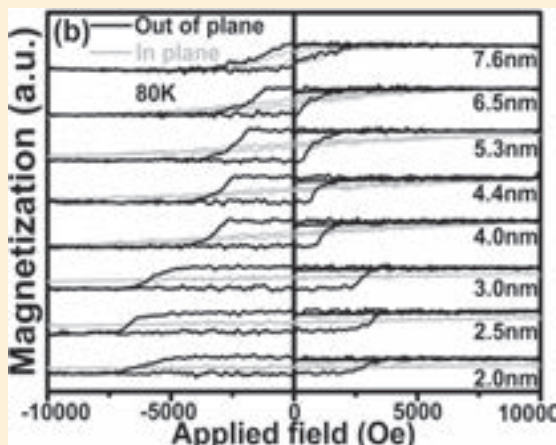


図5は CoPt/CoO ナノヘテロ多層膜の磁化曲線です。

図5 CoPt/CoO 多層膜の磁化曲線

磁化曲線が原点に対し対称でないことがわかります。交換バイアス効果とは同じ軸上で片方向に磁化しやすく、片方向に磁化しにくい現象で、強磁性体と反強磁性体の界面でのスピン相互作用による結果として理解されています。特に薄

膜面と垂直方向の交換バイアス効果は次世代の記録デバイス(MRAM)への応用が期待されています。我々は強磁性体にCoPt, 反強磁性体にCoOを採用し、膜構造のエンジニアリングにより垂直磁化および垂直方向の交換バイアスを実現しました。図5に示した結果は、異なるCoPt層の厚さの多層膜を磁場の中で冷却するとCoOは常磁性から反強磁性に変態し、磁化曲線の中心は負の磁場方向にシフトしているのがわかります。すなわち正の磁場方向には磁化しやすく、負の磁場方向には磁化しにくい状態が実現でき、書き込みやすく消えにくい磁性体が得られたことになります。この試料では、CoPt層の厚さ(2.5-3 nm)のとき最大の垂直交換バイアスが得られていることがわかります。

4. 水素吸蔵薄膜・水素センサの開発(春本)

水素社会の実現に向け、パラジウム(Pd)極薄膜、及び、Pdナノ多孔質薄膜の水素化について研究しています。

図6はPd/AlN極薄膜の水素化過程を、X線回折法により測定した結果です。Pdピークが、水素導入に伴って移動(横方向へシフト)している事が観察されています。詳細に解析すると、

- ・水素低濃度の時は、水素の侵入固溶による格子膨張が起こる
- ・水素高濃度の時は、水素化物(PdH_x)が新しい相として析出する

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Pdとは異なる挙動を示すPdナノ結晶粒の水素化過程について調査しています。また、このことを通して、実用上の大きな課題である水素脆化を解決することを目指しています。

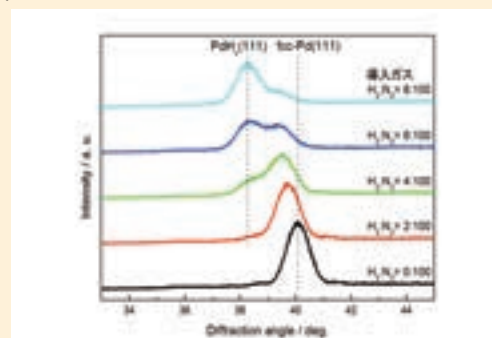


図6 X線回折法によるPd/AlN極薄膜の水素化その場観察

加えて、薄膜作製プロセスの改良にも取り組んでいます。図7はPd合金薄膜を熱水で処理することにより作製したPdナノ多孔質薄膜の断面です。非常に微細な多孔構造が観察されています。現在、本薄膜の水素化過程の解明を行うと共に、多孔構造を活かして、水素センサへの応用も検討しています。



図7 Pd多孔質薄膜の断面走査透過電子顕微鏡像(Pd: 白い部分)

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

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



教授
細田秀樹

准教授
田原正樹

はじめに

原子配列を制御し、ナノテクノロジーを駆使することで、人や環境に優しく社会の役に立つ新材料の研究・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、グリーン・ライフ、エネルギー、医療、低炭素化、ロボット技術などの応用展開を含む革新的基盤材料研究をしています。当研究室は、[材料コース](#)と[エネルギーコース](#)、[ライフエンジニアリング](#)に所属し、何にでも興味のある学生を歓迎します。

専門分野：材料設計、エネルギー・医療、形状記憶・超弾性合

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、原子配列、欠陥構造、組織制御、金属間化合物、医歯工連携、新材料プロセス、水素貯蔵材料 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[科学技術創成研究院](#)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、科学技術創成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。

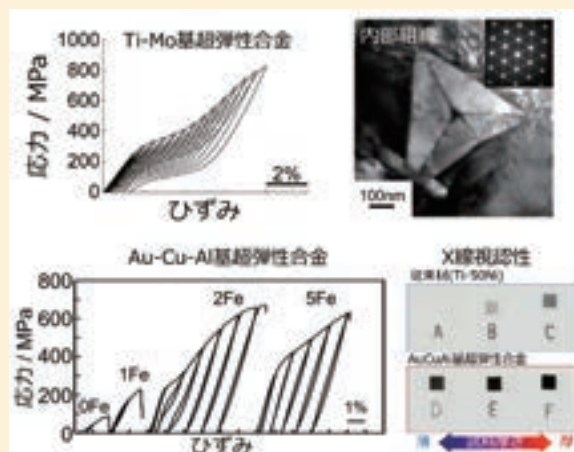


図2 当研究室で開発したTi基超弾性合金とAuCuAl基超弾性合金

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。

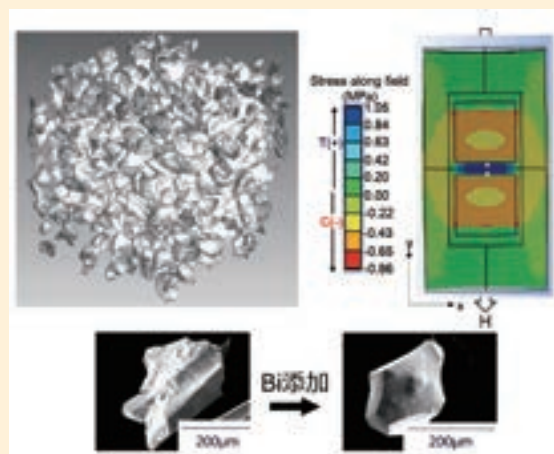


図3 磁性形状記憶合金/ポリマーコンポジット



助教 海瀬 晃 助教 邱 琬婷 WRHI 教授 V.A. Chernenko

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をはじめ、様々な形状記憶合金の単結晶を作製し、マルテンサイト変態挙動や変形挙動の解明に取り組んでいます。

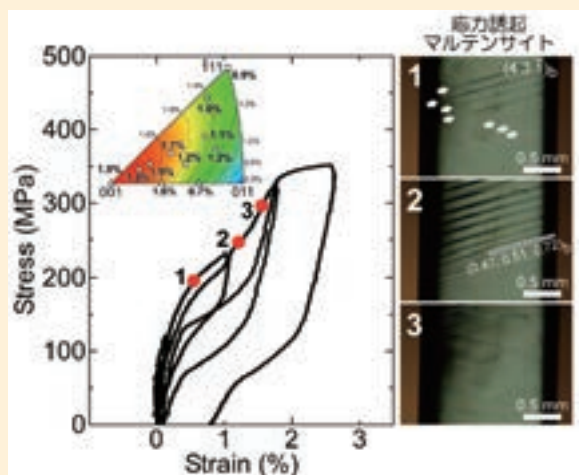


図4 形状記憶合金単結晶におけるマルテンサイト変態

その他

材料設計の研究室で、様々な新機能性材料の研究をしています。学生の特許も多数あり、手島記念発明賞なども受賞しています。研究室のポリシーは「よく遊び、よく学べ」で、多数の国内・国際会議に参加し、国内外の研究機関と共同研究を行っています。学生の受賞も多数あり、就職もほぼ第一希望に就職します。自分で新材料を開発したい意欲のある学生を歓迎します。

- ・ **スタッフ**：細田教授，田原准教授，海瀬助教，邱助教，中田秘書，佐藤技術補佐員，Chernenko WRHI 教授 (Univ. Basque Country)，学生22名 D3×4, D2x0, D1x1, M2×5, M1×8, B4×2, 研究生×2 (予定)
- ・ **学生の受賞 (2019年)**：日本金属学会ポスター賞，ヤングメタラジスト研究交流会優秀ポスター賞，ロベルトロッカ奨学金など
- ・ **就職**：(2020.3) 日本製鉄，大同特殊鋼，トヨタ自動車，住友重機械，ユニプレス。その他：博士進学，JFE スチール，日産，ホンダなど主に材料，自動車，機械，電気などの企業や研究機関ですが，丸紅や電通などもたまにあります。博士を含め就職率100%で，大半が大学推薦です。研究に打ち込む学生ほど早く内定が出る傾向にあります。
- ・ 学会や共同研究の出張で他大学の先生や学生さんの知り合いも多くできます。見聞を広めてください。



研究の紹介と2019年後半の学生会議の会議の例。他，フランス (Ti-2019) や iLIM-4 国際会議，ヤングメタラジストなど参加

Microstructural Design

- Microstructure stability/design
- Structural analysis
- Chemical analysis



尾中晋・教授 細田秀樹・教授 木村好里・教授 寺田芳弘・准教授



小林寛・准教授 Mark Chang・准教授

Computational Metallurgy

- Multi-component phase diagram calculation
- Kinetic simulation



合田義弘・准教授 オーミンホ・助教 中島広豊・助教 宮澤直己・助教

Processing & Repairing

- Wrought process
- Solidification simulation
- Additive manufacturing



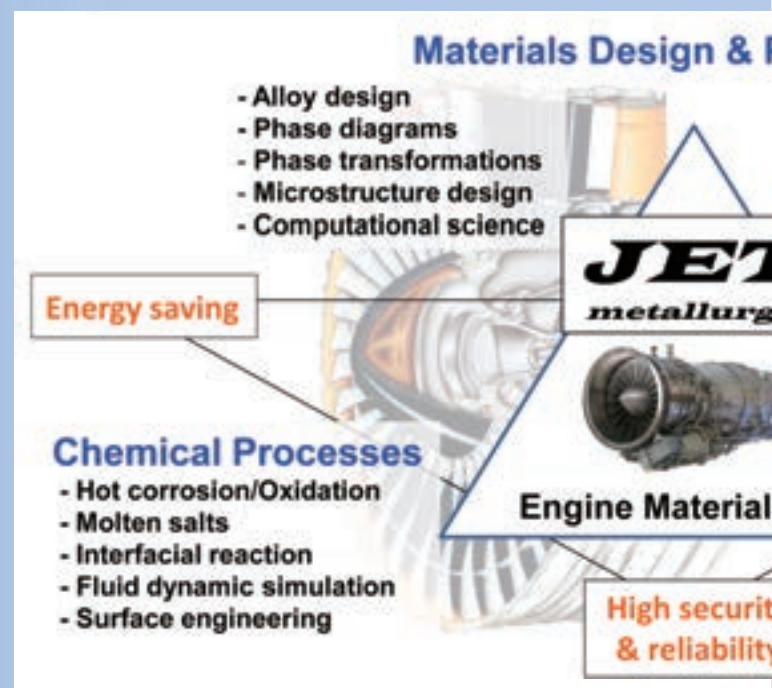
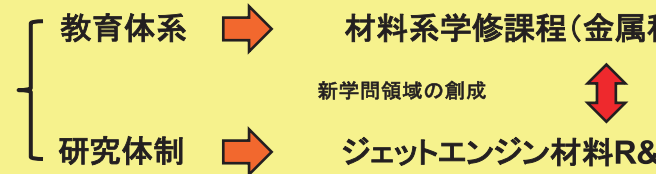
熊井真次・教授 小林能直・教授 小林郁夫・准教授 林幸・准教授



春本高志・助教 篠原百合・助教

JET (Jet Eng

物質理工学院材料系では、金属分野の研究に携わる38名の教員が、ジェットに、企業と有機的に連携し、企業側が抱える課題の解決及びwin-winの関係になるべく、高性能ジェットエンジンの開発に力を注ぎ、成果を立ち上げました。JETでは教員を下記に示す6分野に横断型（材料系、航空会社）との個別の共同研究契約の締結や連携講座の設置、及び大学院生の人材育成教育を行います。将来的には、他分野とも連携し、対象を航空機にまで拡張して、世界に開かれた国

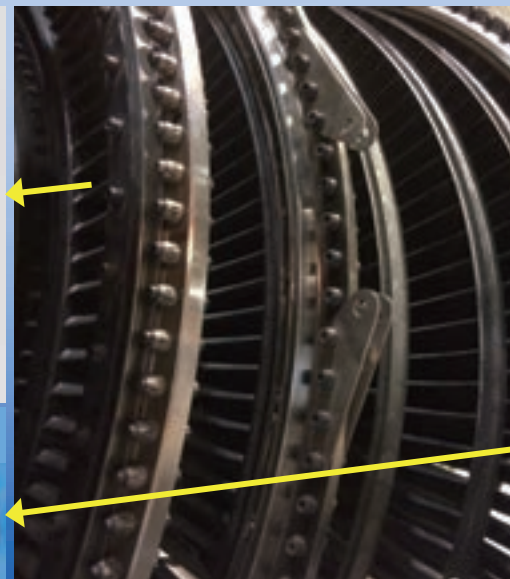


JETの研究・開発

High pressure turbine (HPT) blade



Low pressure turbine (LPT) blade



Engine Triangles)

教員が一体となって、ジェットエンジン材料をターゲットとし、基礎及び経験則に基づくノウハウの学理化を図り、お互いに資するプロジェクト「JET (Jet Engine Triangles)」に配置し、企業(素材メーカー、エンジンメーカー、)を通じて、学理と実利を連携させる研究体制の構築(有機材料、無機材料)および他大学、他研究機関国際共同研究開発拠点を目指します。

科目群)

研究指導
研究UNIT

←

関連企業との
コラボレーション
(寄付講座)

D

Processing

- Wrought process
- Cast process
- Additive manufacturing
- Thermal barrier coating
- Solidification technique

Environment friendly

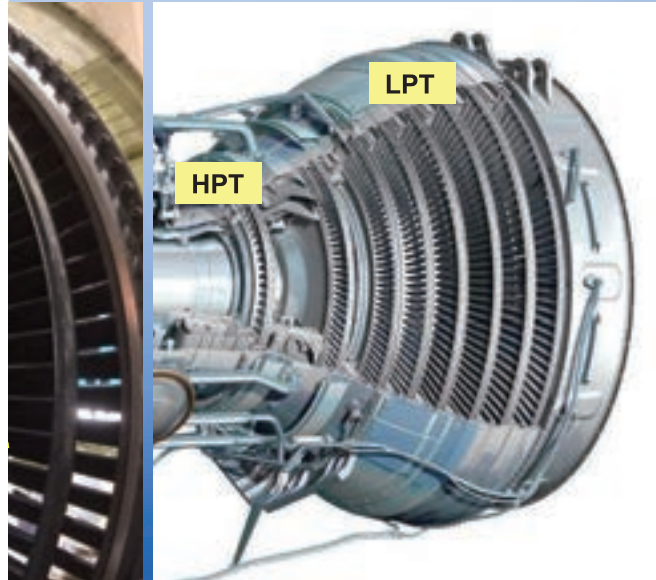
Physical Properties & Characterization

- Creep/Fatigue properties
- Thermophysical properties
- Nano-structure analysis
- Microstructure analysis

s R&D

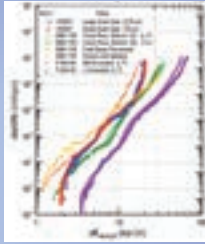
y

開発対象



Mechanical Design

- Creep deformation
- Fatigue strength
- Crack propagation



竹山雅夫・教授



藤居俊之・教授



稲邑朋也・教授



村石信二・准教授



中田伸生・准教授



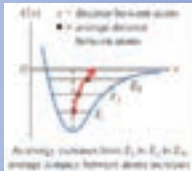
田原正樹・准教授



宮澤知孝・助教

Physical Properties

- Thermal properties
- Electrical properties
- Optical properties
- Magnetic properties



中村良男・教授



史蹟・教授



曾根正人・教授



中辻寛・准教授



三宮工・准教授



渡辺玄・助教



遠藤理恵・助教



安井伸太郎・助教

Surface Engineering

- Environmental barrier coating
- Interfacial reactions



須佐匡裕・教授



河村憲一・准教授



多田英司・教授



上田光敏・准教授



大井梓・助教



邱琬婷・助教



渡邊 学・助教

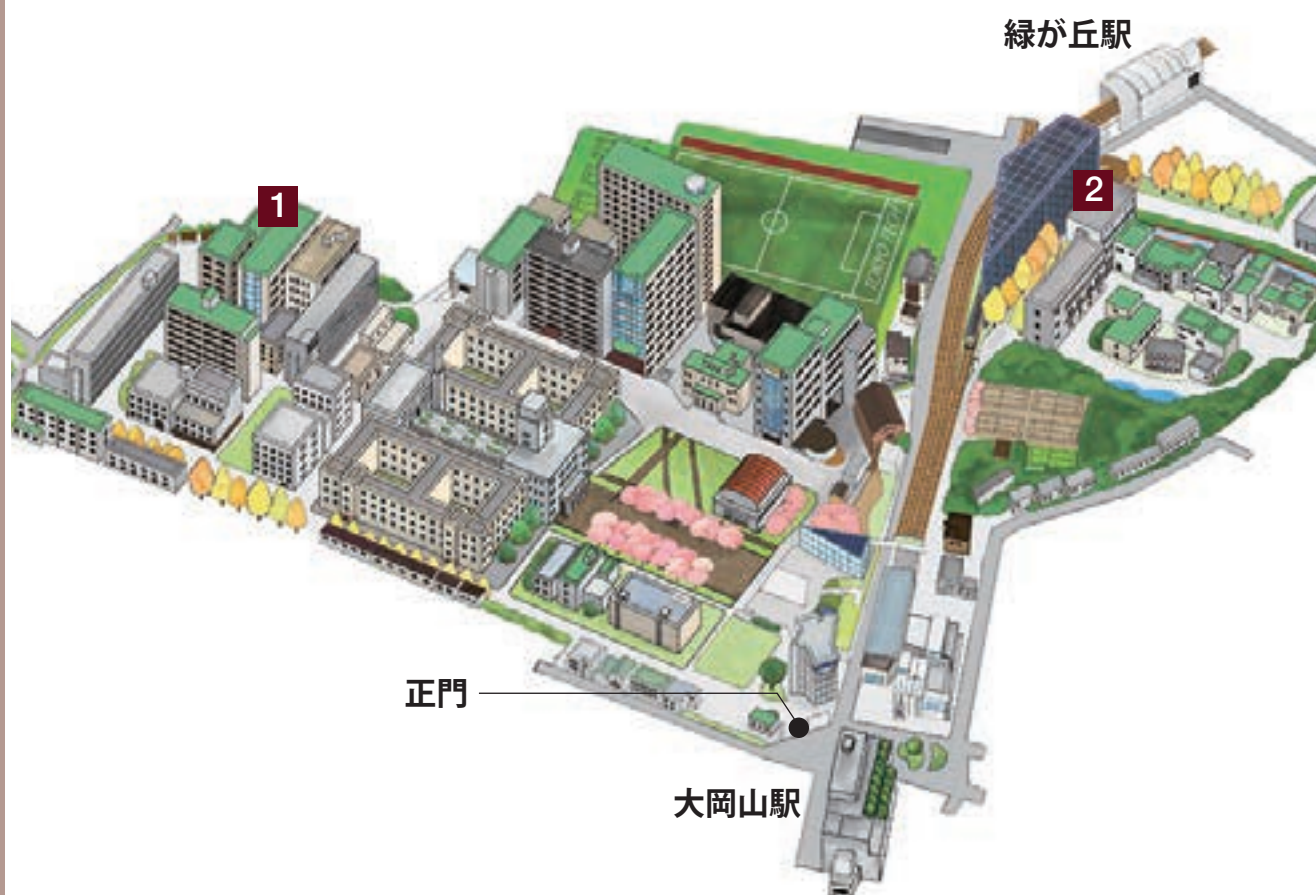
大岡山キャンパス

南 8 号館 (1)

准教授	上 田 光 敏	304 号室
准教授	河 村 憲 一	305 号室
教 授	熊 井 真 次	212 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	214 号室
教 授	須 佐 匡 裕	312 号室
教 授	竹 山 雅 夫	506 号室
教 授	多 田 英 司	404 号室
教 授	中 村 吉 男	213 号室
准教授	林 幸	313 号室
教 授	藤 居 俊 之	410 号室
准教授	村 石 信 二	211 号室

北 2 号館 (2)

教 授	小 林 能 直	328 号室
-----	---------	--------



すすかけ台キャンパス

J1 棟 (1)

准教授 合 田 義 弘 314 号室
准教授 中 辻 寛 411 号室

J2 棟 (2)

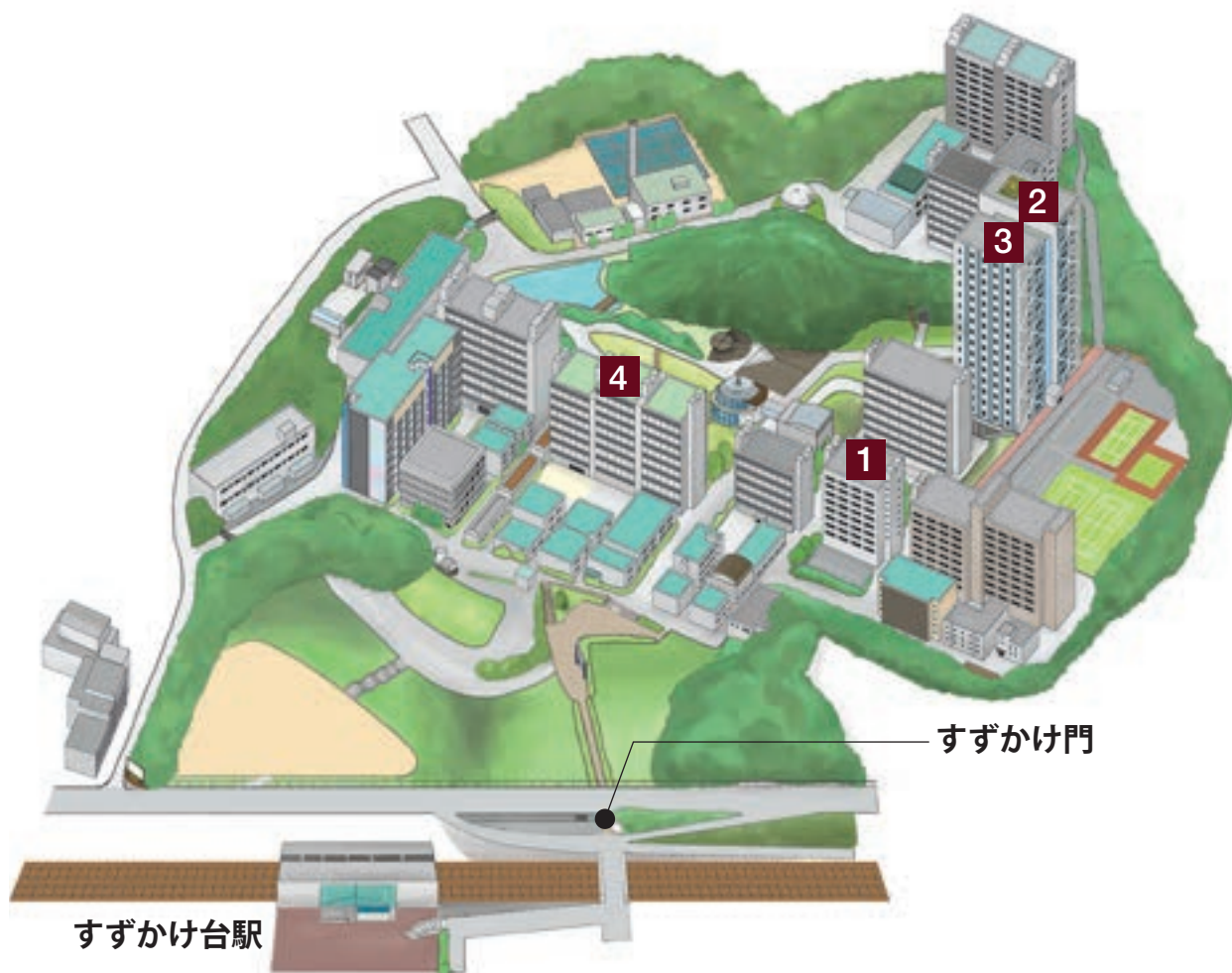
教 授 尾 中 晋 1505 号室
准教授 三 宮 工 1502 号室
准教授 寺 田 芳 弘 1404 号室

J3 棟 (3)

教 授 稲 邑 朋 也 1116 号室
教 授 木 村 好 里 1516 号室
准教授 中 田 伸 生 1521 号室

R2 棟 (4)

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





大岡山キャンパス 東急大井町線・目黒線（大岡山駅下車徒歩 1 分）
 すずかけ台キャンパス 東急田園都市線（すずかけ台駅下車徒歩 5 分）



東京工業大学 物質理工学院

材料系 A 群(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

すずかけ台キャンパス
 〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259