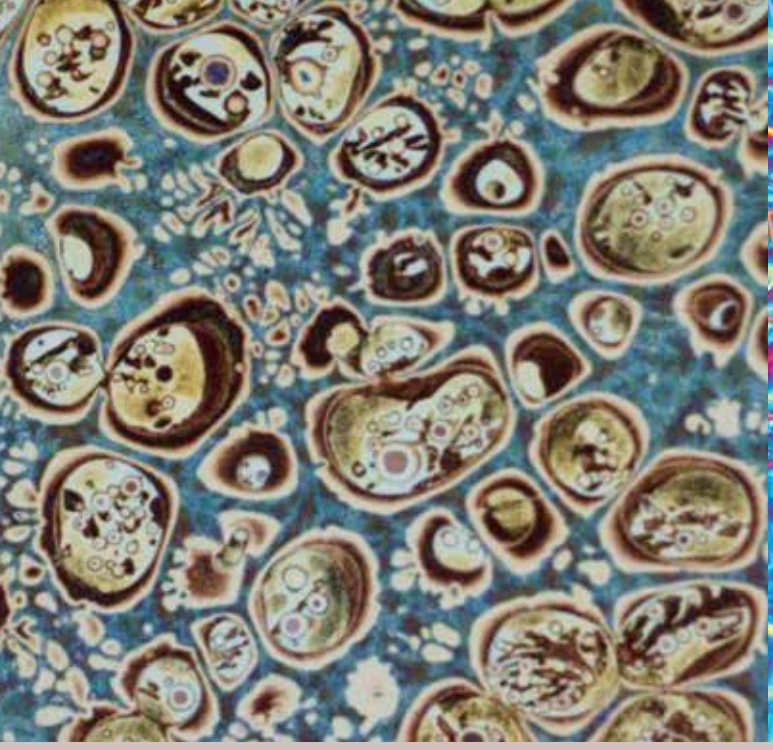
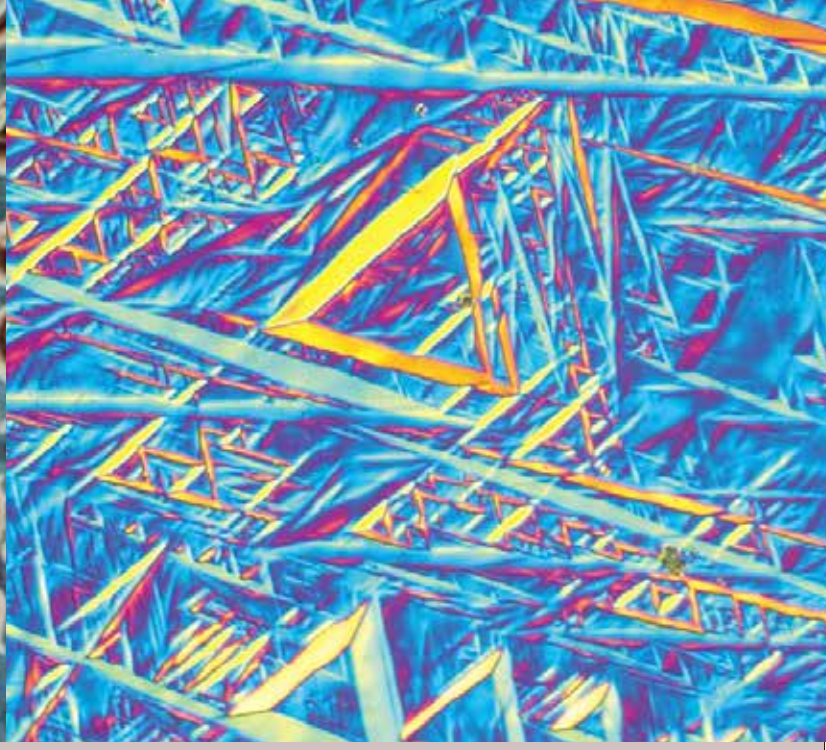
2023

東京工業大学 物質理工学

材料系（金属分野）

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

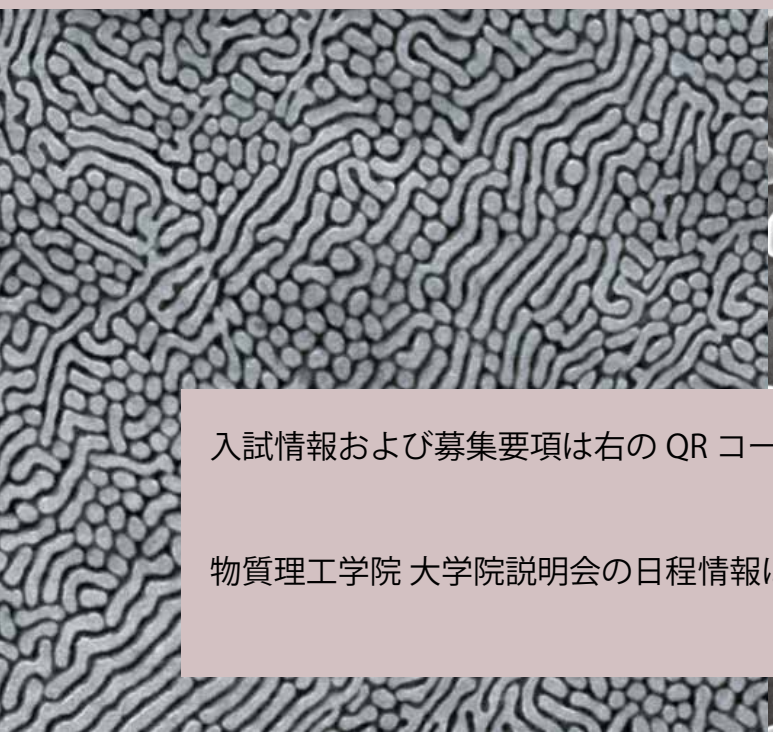


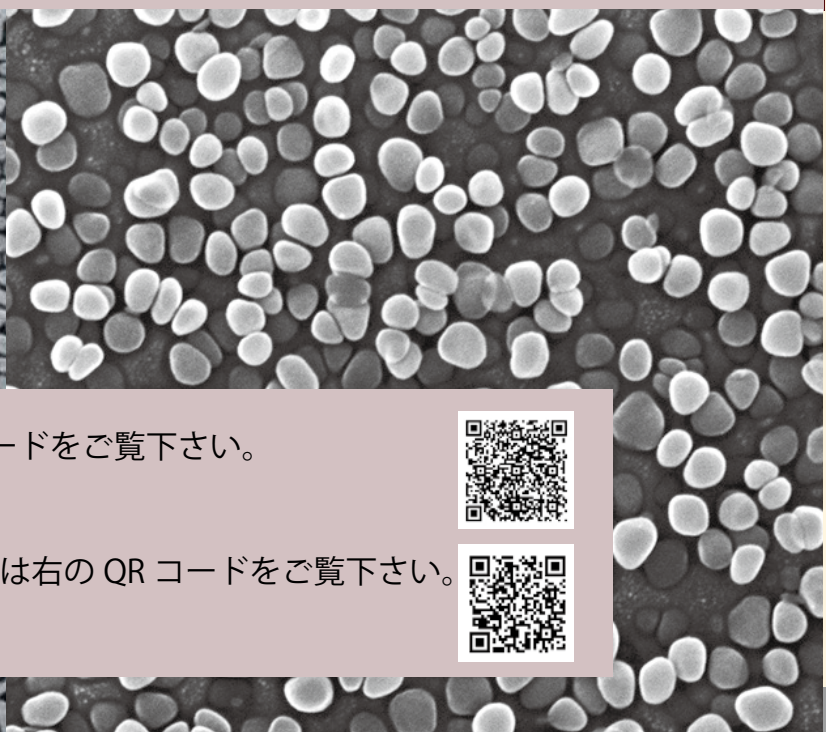


物質理工学院の材料系Ａ群では，物理学，化学，材料科学等の基礎学問に基づき，鉄鋼材料等の社会基盤材料から先進デバイス用ナノ構造機能性材料にわたる幅広い専門分野を持つ教授陣が世界的水準の教育と研究を行っています。金属材料は，最も重要な工業材料として，あらゆる産業分野における科学技術の根幹を支えています。これからの人間社会が必要とする種々の革新的な科学技術の実現は，材料開発が鍵を握っています。

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　史　　蹟





入試情報および募集要項は右の QR コードをご覧下さい。

物質理工学院 大学院説明会の日程情報は右の QR コードをご覧下さい。

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		
06	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, 連続体力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靭化, 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		
11	准教授	合田（ごうだ）　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		
12	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		

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		
13	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		
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	http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~ykobayashi/ja/	kobayashi.y.at@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		
15	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		
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		
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		
28	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		

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		
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		
17	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		
18	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・延靭性、マルチスケール組織制御、熱力学、速度論、結晶学、転位論、マイクロメカニックス		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		
19	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://nakatsuji.mat.mac.titech.ac.jp/	nakatsuji.k.aa@m.titech.ac.jp		
20	教授	林　幸	エネルギーコース	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 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		
26	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		
28	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		

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		
21	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		
22	ﾃﾆｭｱﾄﾗｯｸ 助教	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-201号室	03-5734-3060	
			材料コース	大岡山	http://www.zc.iir.titech.ac.jp/-yasui/	yasui.s.aa@m.titech.ac.jp		
26	准教授	雷（らい）　霄雯（しょうぶん）	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 407号室	03-5734-3260	
				大岡山	http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/	leixiaowen555@gmail.com		

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ると，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，材料特性の起源を解き明かす指針や，材料設計の指導原理になり得ます．

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．

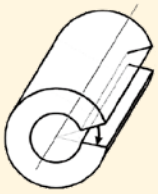
日経サイエンス 2013 年 11 月号掲載

稲邑研究室では，マルテンサイト変態しても機能劣化をもたらす転位が全く発生しない特殊な相変態組織を形成させるために格子定数が満たすべき新しい幾何学条件“Triplet Condition”を発見し定式化しました．現在，耐久性を飛躍的に向上させた画期的な新合金の研究と，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，㈱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．



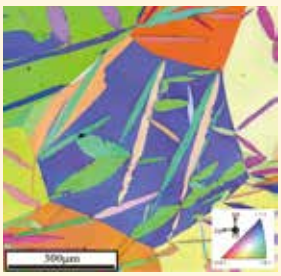
楔型回位

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．

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アント選択則

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・制御するために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「バリアント選択則」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㈱との共同研究で，環境技術，社会基盤技術に貢献します．

研究室の運営体制，卒業生の就職先

当研究室は，細田・田原研究室，曽根研究室と，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．

2023 年度のメンバー：教員 2，事務支援員 1，実験補佐員 1，博士課程 5（うち留学生 1），修士課程 6（うち留学生 1），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：

三菱重工，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

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くてはいけません．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．

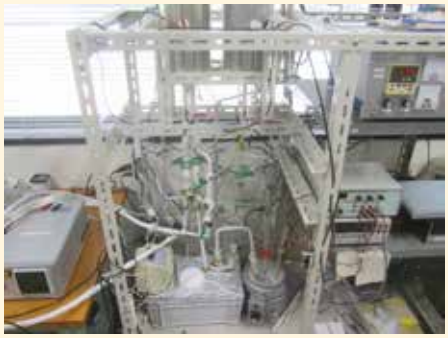
研究の主な内容は，高温における金属材料の環境劣化に関するもので，高温における鉄鋼材料や耐熱合金の劣化機構を解明し，これらの材料を長期にわたって使用するための指針などを提案しています．

「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着けていきます．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．

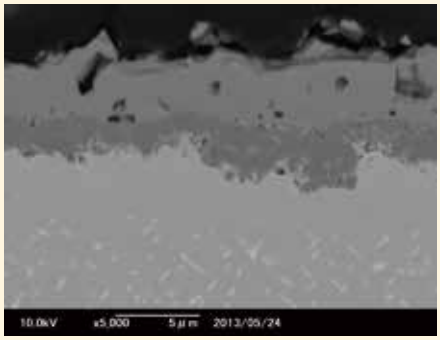
研究テーマについて

1．新規オーステナイト系耐熱鋼の開発
ー優れた高温強度と耐酸化特性の両立を目指してー

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．当研究室が注目するのは,「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，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 ℃ /336 h の水蒸気酸化試験で約 5 μ m 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

はじめに

ライト兄弟の弟のほうの話しである．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し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と，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って興味深い．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) が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) が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はこれに沿った転位壁の形成を意味している．この結果は，塑性変形による単結晶中での自発的秩序形成とみなせる．

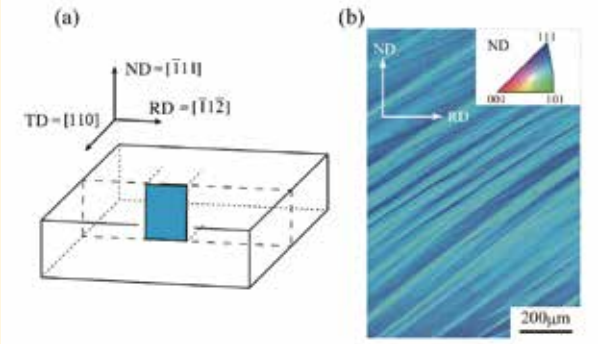


図 1　(a) ある方位の Cu 単結晶を圧延すると，(b) に示す方位変化が起こる．これは塑性変形に伴う自発的秩序形成とみなせる．

結晶粒間の方位関係の解析による多結晶の物性評価

実用金属材料の多くは，結晶性の固体であっても結晶方位の異なる数多くの粒で構成される多結晶と呼ばれる状態になっている．多結晶中のある結晶粒が周囲の結晶粒とどういう方位関係にあるかは多結晶の物性に影響を与える因子の一つであるが，現在でも十分には理解されていない．特に，多結晶の変形や破壊の挙動に大きな影響を及ぼす三つの結晶粒の会合部（粒界三重線）には不明の点が多い．そこで，粒界三重線周りの結晶粒間の方位関係に注目した研究を実験的そして理論的に行っている．

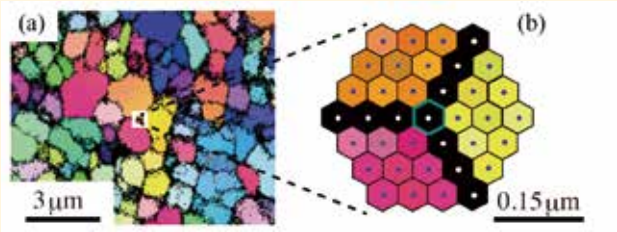


図 2 (a) は塑性変形後の Al 多結晶についての電子顕微鏡観察の結果で，方位の異なる結晶粒が色の異なる粒として示されている．(b) に拡大図を模式的に示しているのは三つの結晶粒の会合部であり，結晶粒間の境界（黒色領域）を隔ててのの大きな方位差と結晶粒内でのわずかな方位差が示されている．このような方位関係の解析，評価を行い，得られる結果を多結晶の物性評価に応用している．

結晶粒内でのわずかな方位変化と転位組織の関係

結晶粒のなかであってもそこに結晶欠陥である転位が数多く含まれると，わずかではあるが結晶の方位は結晶内の位置によって変化する．そこで，結晶粒内のわずかな方位変化を測定し，含まれる転位の状態評価を行っている．

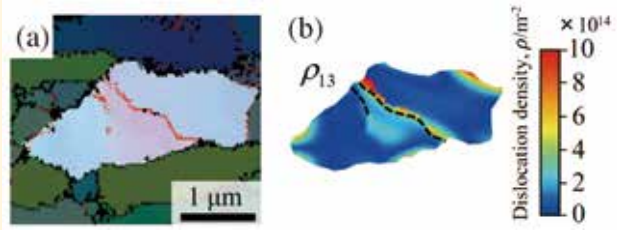


図 3 (a) は塑性変形を受けた Cu 多結晶中の結晶粒とその中での方位変化を示す実験結果．(a) に示す結晶方位の場所による変化から，(b) に示すような転位密度の場所による変化が求められる．このような解析は多結晶の塑性変形機構の理解に有用になる．

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・物質の勉学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」を制御するという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，運用に必要になる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作動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．溶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性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溶融金属と配管との間の反応を抑制するためには溶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．

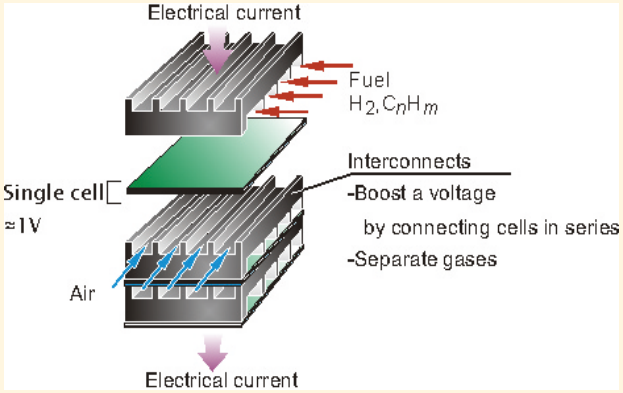


図 3　固体酸化物燃料電池の概略．燃料電池の大容量化に欠かせない合金インターコネクト．高温における耐酸化性，電気伝導性など様々な特性が要求されます．

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
渡邉 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，$\beta FeSi_2$ 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，(Zr,Ti)NiSn と $Mg_2(Si,Sn)$ 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．$\beta FeSi_2$ 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 $L1_2$ 型 Ni_3Al と似て非なる E21 型 $Co_3AlC1\text{-}x$ では，C 原子を規則化させた $E2_1$’ 型 $Co_3AlC_{0.5}$ 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．

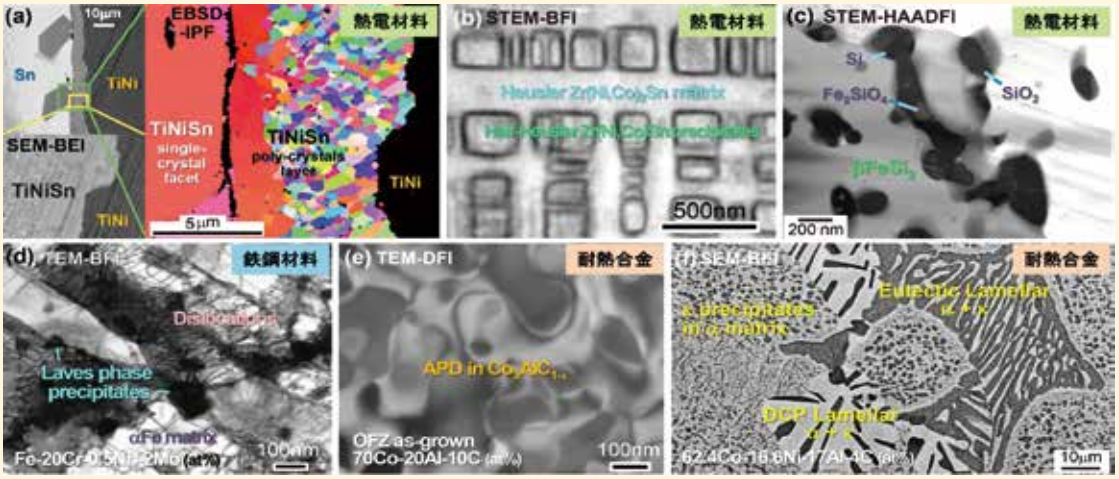


図 (a) TiNi/Sn 固液界面での Half-Heusler TiNiSn 多結晶層と単結晶 facet の形成 , (b) Heusler $Zr(Ni,Co)_2Sn$ 母相と Half-Heusler Zr(Ni,Co)Sn 析出 , (c) 共析 Si と Fe_3O_4 の酸化還元焼結による SiO_2 分散 β FeSi2 複相組織 , (d) 強加工 β Fe 母相結晶粒界と粒内に析出する Laves 相 $(Fe,Cr)_2(Nb,Mo)$, (e) $E2_1$ Co_3AlC 単結晶の逆位相領域 APD, (f) 三形態共存の二相組織：αCo 母相と κ ー Co_3AlC 析出 , 共晶ラメラ , 不連続析出 DCP ラメラ .

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
合田（ごうだ）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・統計力学の基本原理と素電荷や 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，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 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

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（図 1），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．

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，新手法によって格子振動の効果を考慮すると，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].

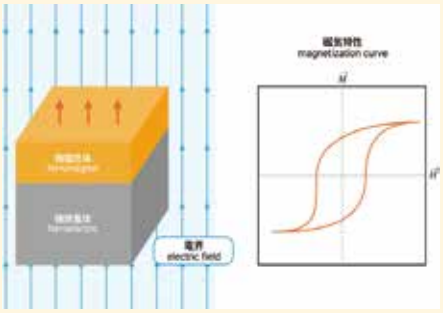


図 1：強磁性金属と強誘電体を接合したマルチフェロイク界面における，電界による磁気特性制御の概念図.

2．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2). 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．

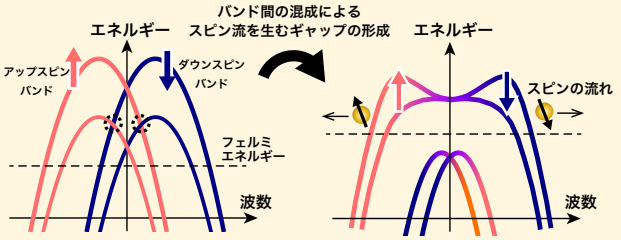


図 2：Rashba 効果を活用したスピン流生成原理の概念図 [PRB-Rapid 2018].

3．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，混合エンタルピー・格子振動・配置のエントロピー・磁気励起の効果を取り入れた 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 3）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．

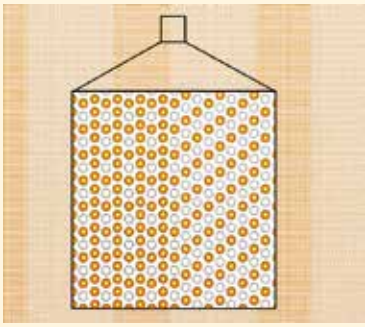


図 3：Ti-Al 基合金の結晶粒内部に見られる α_2 / γ ラメラ組織の理想的な原子配置.

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

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，純チタンの弾性率はもっとも低く，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

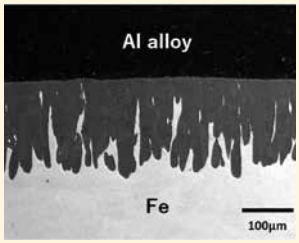


図 2　固相鉄と液相 Al 合金の界面の組織．界面で生成している金属間化合物が固相の鉄に向かって成長するのが面白い

2．異種金属間の接合と接合界面での反応拡散

CO_2 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 ボイドが生成します．このようなボ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・高靭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．

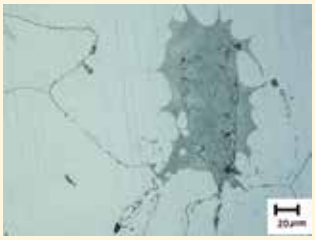


図 3　マグネシウム母相（明るい色の部分）の間に生成した多相金属間化合物（暗い灰色の部分）．母相と金属間化合物との密着性が高いため，強化相としての効果が高い

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とされる特性評価を行っています．

小林 覚 研究室

2050年エネルギー変革に向けた耐熱金属材料の信頼性評価と設計原理構築

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

准教授 小林　覚
助教 中島広豊

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．最近の世界的な脱炭素化の流れにより生じ得る2050年エネルギー変革を見据えて，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_2・NH_3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となる耐熱材料の高温化・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基合金やTiAl基合金を対象とし，今注目を浴びている3次元積層造形用合金の製造設計も行っています．

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）に基づいて追及しています（図1参照）．

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業における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．高効率な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アンモニア分解型の水素燃焼ガスタービン等では，600℃以上の高温水素環境が生じます．高温水素環境による材料損傷は「高温水素損傷」と呼ばれ，脱炭（図2参照）やメタンバブルの形成が生じます．この分野は石油精製・化学プラントで長年調査・研究されてきましたが，上記水素環境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，ステンレス鋼からNi基合金までの幅広い材料に対して高温水素環境での材質変化挙動を調べる基礎的評価に着手しています．脱炭は材料表面反応にも関連するため，高温酸化分野との研究連携も行っていく予定です．

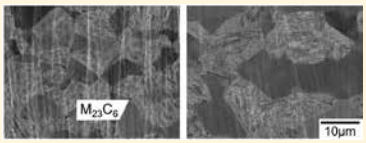


図2　2相ステンレス鋼の水素環境下での脱炭現象：
（左）試料内部，
（右）試料表面近傍

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

脱炭素化への流れにより，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（図3）のタービンや高圧圧縮機動翼には，現在Ni基合金が主に使用されています．航空機は2041年までに約39,500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・TiAl基合金の高性能化を目指した研究を行っています．TiAl基合金は，比重がNi基合金の約半分の$L1_0$型構造のTiAl金属間化合物を基調とした高比強度耐熱合金であり，今後設計される全ての航空機エンジンタービンへの適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靭性化に取組んでいます．また，ガスタービンディスク材等に使用される汎用Ni基耐熱合金（Alloy 718）の高温化・高温変形機構解明・3次元積層造形体での特性向上を目指した研究や耐熱鋼の高温化を目指した研究も実施しています．

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）

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）やドイツの国立研究所・大学との研究連携も行っています．

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・研究所・企業で活躍しています．

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

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

准教授
三宮　工

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元的（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いれており，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．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ーなど，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て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．

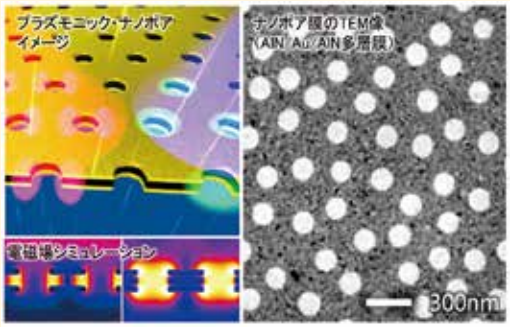


図１　光学共鳴によるセンシング機能をもつナノポア

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（～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．

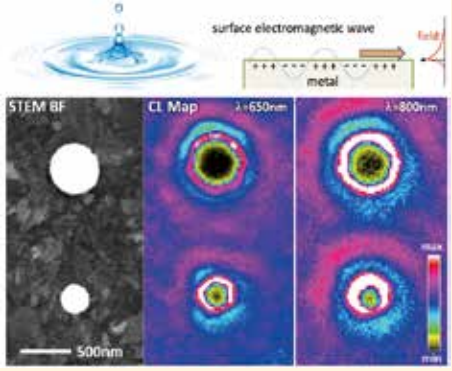


図２　金属表面の自由電子振動による電磁波（表面プラズモン）の可視化．走査型透過電子顕微鏡カソードルミネセンス法による．

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．

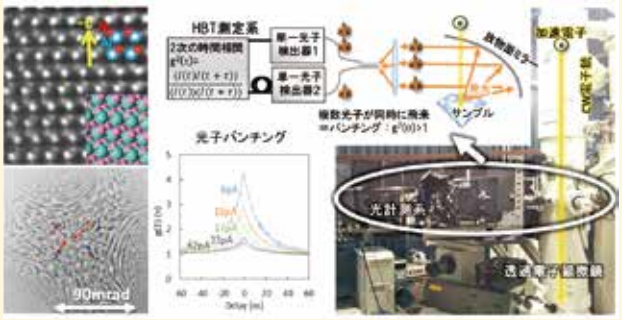


図３　左上：AlN の超高分解能電子顕微鏡写真．左下：ロンチグラムの自動中心検出トレース．右：開発中の光子相関カソードルミネセンス法

史 蹟 研究室

薄膜の新奇な物性を探求しよう

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

教授
史　蹟

助教
春本高志

はじめに

史研究室は主に薄膜材料とその物性の研究を行っています．

薄膜材料は，磁気的，電気的，光学的，機械的性質などにおける薄膜特有の物性が注目されています．これらは，薄膜成長の際に，結晶の成長方位，成長形態，表面状態などを制御することで，バルク材料にはない新奇な物性を発現させることができます．

現在，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，ナノスケールで複合させた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，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．このような特殊な状態では，新奇な機能を発現させることができます．

本研究室では学生各自の考えで，研究テーマを設定すること推奨し，薄膜技術，電子顕微鏡，X 線回折などの構造解析，構造評価方法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．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．ナノヘテロ構造の磁気特性設計と評価

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．

CoPt/AlN 多層膜の磁気異方性の制御

図 1 は 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．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．

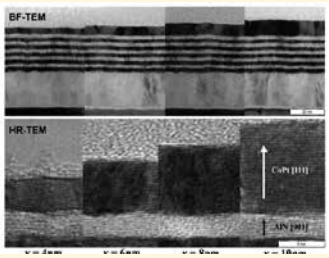


図 1．CoPt/AlN 多層膜の透過電子顕微鏡写真

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．

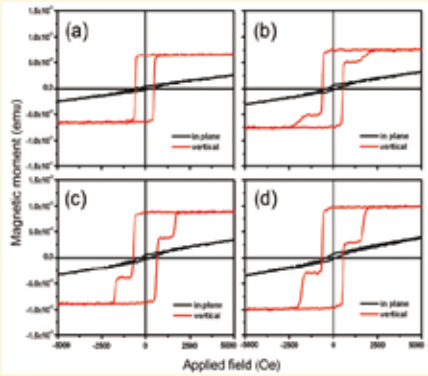


図 2．CoPt/AlN 多層膜の面垂直方向の磁化曲線

2．水素吸蔵薄膜・水素センサの開発

水素社会の実現に向け，パラジウム（Pd）極薄膜，および PdCo 合金磁性薄膜の水素化過程，電気・磁気特性についても研究しています．

図 3 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 のピークが，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，水素低濃度の時には，水素の侵入固溶による格子膨張が起こり，水素高濃度の時には水素化物（PdHx）が新しい相として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 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，水素化による電気･磁気の特性への効果を利用し，水素センサーの実現を目指しています．

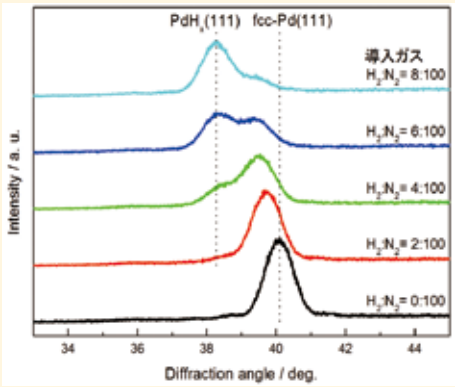


図 3．X 線回折法による Pd/AlN 極薄膜の水素化その場観察

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．

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，使用される環境中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，使用する環境中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，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．

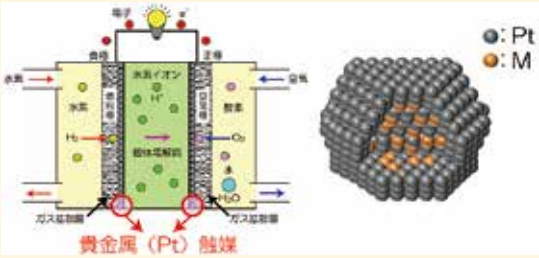


図 1　固体高分子形燃料電池の模式図（左）とコアシェル Pt-M 合金系電極触媒の模式図（右）

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．消費税数 % 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．

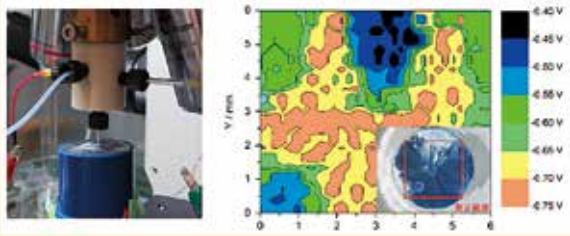


図 2　特殊な電気化学測定法と測定例：微小電気化学セル（左）と走査型ケルビンプローブによる非接触表面電位測定結果（右）

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．

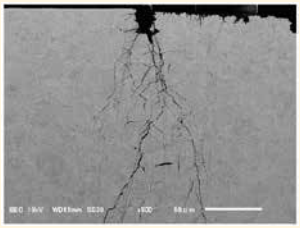


図 3　ステンレス鋼表面から成長する応力腐食割れ

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

本研究室の時代要請

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-Al_2Ca 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．

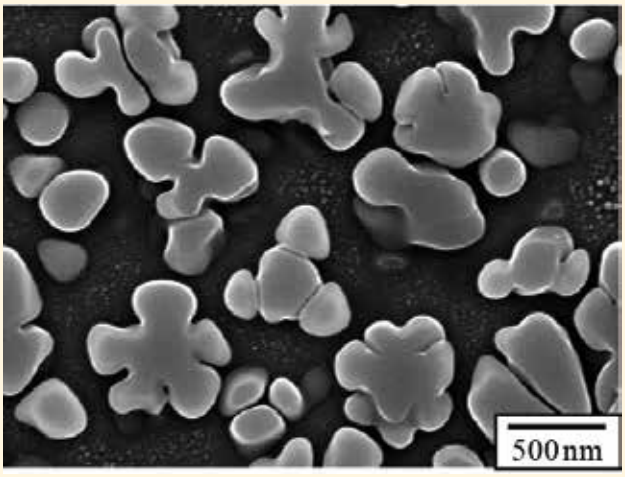


図 1　鍛造 Ni 基超合金 Udimet 720Li の走査型電子顕微鏡組織

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，有害相であると一般に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．

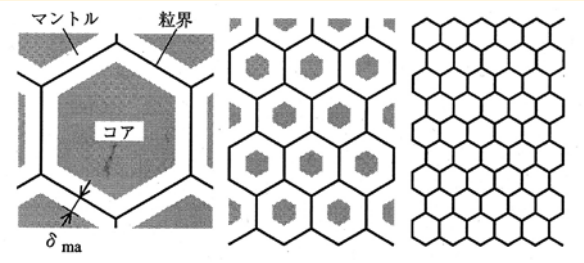


図 2　当研究室が提唱しているコア・マントルモデル

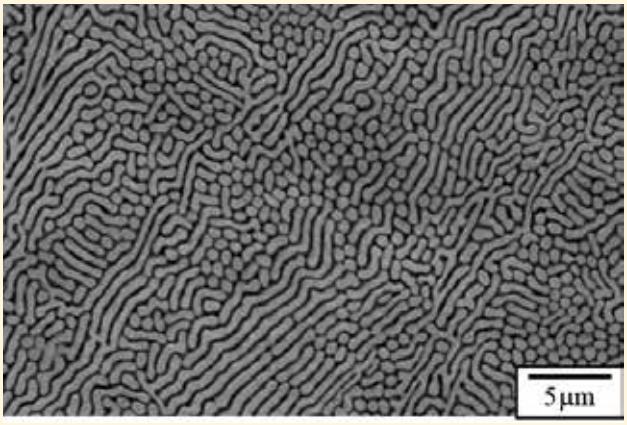


図 3　Mg-Ca 系耐熱マグネシウム合金の走査型電子顕微鏡組織

中田伸生 研究室

金属の王様・鉄鋼材料の強靭化～最強の鉄をつくる！～

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

教授 中田伸生　助教 永島涼太

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靭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求します（図 1）．

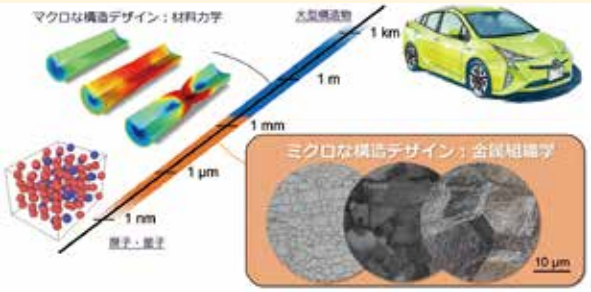


図 1　微視的な金属組織を任意に制御すれば，マクロとミクロの両面で金属材料の特性を最大限に活用可能

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，その強靭性から，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．

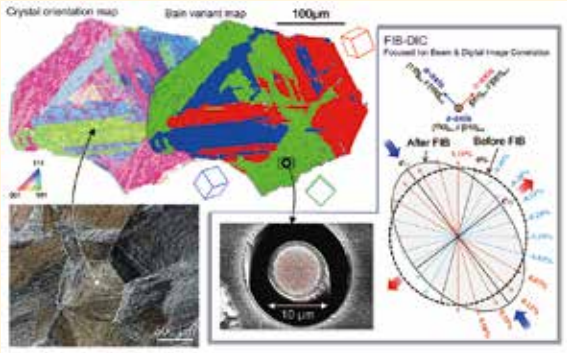


図 2　鉄鋼材料の強靭性を支えるマルテンサイトにおけるミクロスケールでのひずみ解析

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．強靭な鉄鋼材料をつくるためにも観察は必須です．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）の後に最終的な破壊にいたります．加工しやすい金属，壊れにくい金属をつくるためには，まず金属がどのように変形しているのかを正しく理解しなければなりません．力学特性が macro-structure と micro-structure に支配される金属材料では，その塑性変形･破壊の様子をマルチスケールかつダイナミックに観察することが重要です．このような金属組織観察を可能にするため，高精度な計測機器と AI 深層学習によるイメージプロセッシング技術を融合し，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（図 3）．

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靭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．

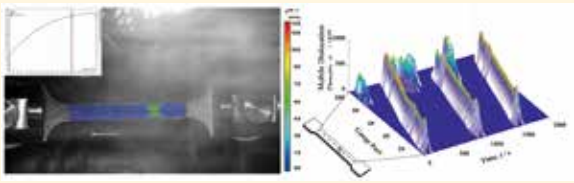


図 3　オーステナイト系ステンレス鋼の 500℃高温引張試験における局所変形帯の発生とその可視化．転位論に基づいた塑性変形モデルとの比較

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

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

准教授
中辻　寛

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．

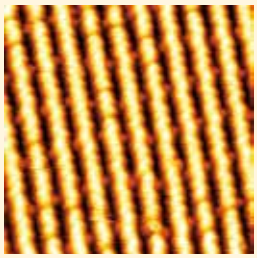


図 1 に示すのは Ge(001) 表面上に 1 原子層分の Au を蒸着して得られた 1 次元原子鎖構造です．大変きれいな 1 次元構造であることから金属的 1 次元電子系を持つことが期待されましたが，実際に電子バンド構造を調べてみると残念ながら，異方的 2 次元電子系であることがわかりました．「表面新物質」の真の姿を知るには，原子構造と電子状態の両方を明らかにする必要があることを示す好例といえるでしょう．今後はこの原子鎖構造をテンプレートに用いて，異種元素や分子による 1 次元電子系の構築を目指します．

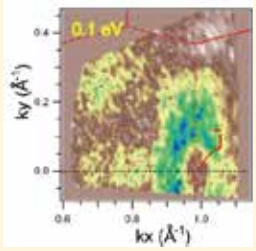


図 1 （上）Ge（001）基板上に 1 原子層分の Au を蒸着して得られた，1.6nm 周期で配列した 1 次元原子鎖構造の STM 像．（下）角度分解光電子分光で調べた等エネルギー面は楕円形で，この系が異方的 2 次元電子系であることを示す．

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) √3 × √3-B 基板に蒸着し，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．

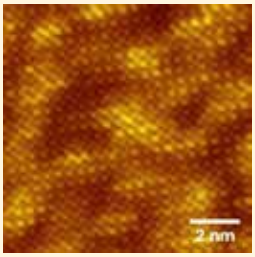


図 2　Si(111) √3 ×√3-B 基板上に成長した Bi(110) 超薄膜表面の原子分解能 STM 像．1 つの輝点が Bi 原子に対応している．

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．

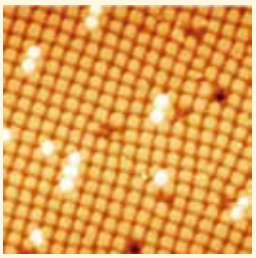


図 3　Cu(001) 基板上に 3.5 nm 周期で正方配列した単原子層厚さの MnN 磁性ナノドット配列の STM 像．

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://www.susalab.mtl.titech.ac.jp/

教授 林 幸
助教 渡邊 玄
特定准教授 遠藤理恵

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_2 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銑鉄を得る工程によるものです．CO_2 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作る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_2 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鋳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（鋳造用潤滑剤）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，製銑工程，連続鋳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）

製銑工程において CO_2 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_2 排出量削減に取り組んでいます．

3．連続鋳造～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鋳造工程によって凝固させます．この連続鋳造工程では，鋳片 / 鋳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，鋳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_2 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．

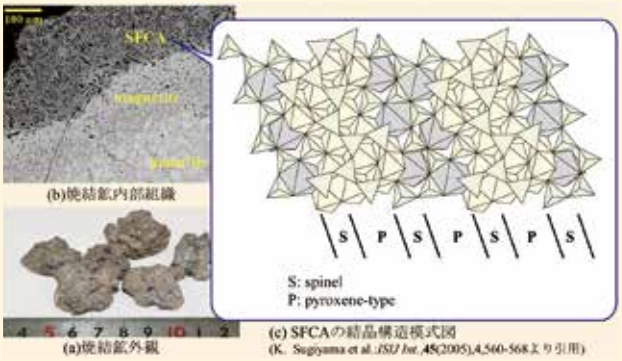


図 1　焼結鉱中に生成する SFCA の組織制御に関する研究

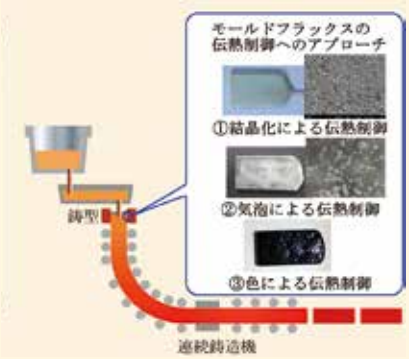


図 2　連続鋳造工程での伝熱制御に関する研究

村石信二 研究室

強くて優しい社会基盤材料を創る

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

准教授
村石信二

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_2 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，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．

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

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靭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）．

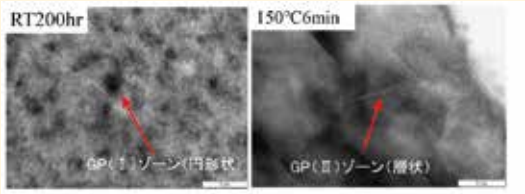


図 2　アルミニウム合金中の微細析出相の電子顕微鏡像

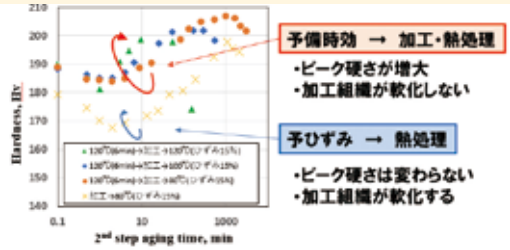


図 3　転位強化と析出強化の両立による高強度化プロセス

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

http://www.zc.iir.titech.ac.jp/~ykobayashi/（小林能直研）
http://www.zc.iir.titech.ac.jp/~yasui/（安井研）

教授 小林能直　特任助教 伊藤あゆみ

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「原子力安全金属工学研究」や「新奇エネルギー材料研究」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，過酷事故対策技術に体して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ホームを形成し，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・伊藤担当）

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，析出強化に役立てるという研究も行っています．

図１　ゼロカーボン製鉄を目したスクラップ有効利用と，鋼と酸化鉄間に生じた銅濃化液相（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

テニュアトラック助教
安井伸太郎

研究テーマについて（安井担当）

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創成を行っていますが，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ます．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．リチウムイオン電池の研究指針は大きく分けて二つあり，一つ目は高速充放電可能で繰り返し使用しても劣化しない電池の創成，二つ目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の創成です．蓄電技術の向上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）と最新の全固体リチウムイオン電池（右）

本研究室ではセラミックス技術 (高品質薄膜・バルク合成) を駆使して強誘電体 / 圧電体の研究を行っています．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畜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　研究室内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．国内では東工大内部連携をはじめ，東大，東北大，北大，岡山大，広島大，防衛大他，海外は UMD(アメリカ)，NIST(アメリカ)，UCL(イギリス)，UNSW(オーストラリア)，IIT(インド)，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 1 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．これまでには思いつかなかった未踏材料発見への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) の喜びは今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)・安井研は科学技術創成研究院 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から学生が所属します．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 3 名に加え，研究室をサポートしてくれるスタッフが 2 名，ポスドク・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．“百聞は一見にしかず”です．一緒に世界を変えてやろうと思っている方，是非一度遊びに来てください．

曽根正人・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
曽根正人

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いる．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ている．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．

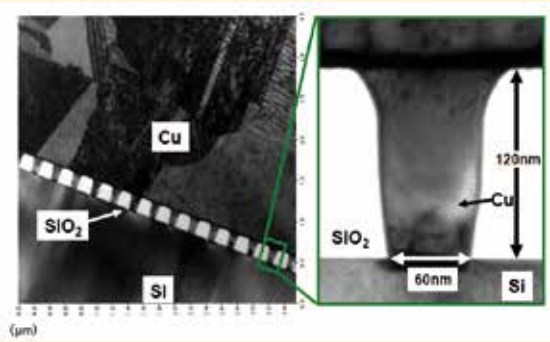


図 1．半導体テストチップ（直径 60nm・深さ 200nm）へ超臨界ナノプレーティング（SNP）法による埋込んだ Cu の TEM 像

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．

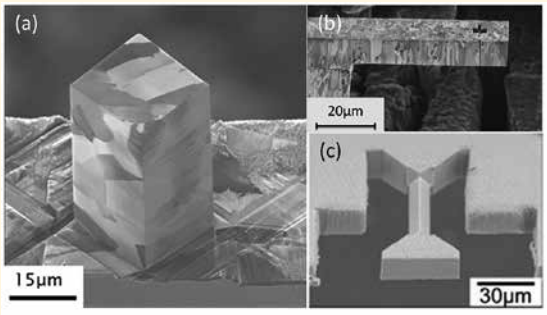


図 2．マイクロ試験片：(a) 圧縮試験片，（b）曲げ試験片 , (c) 引張試験片

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．

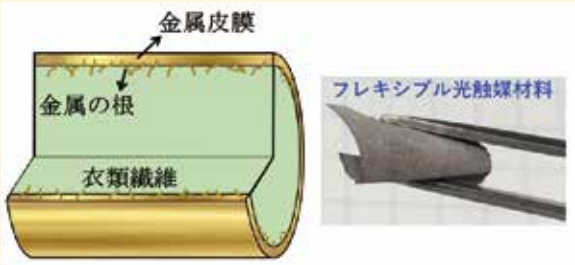
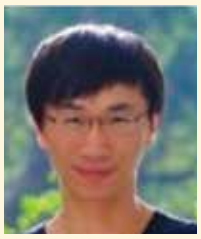


図 3．マイクロ試験片：(a) 圧縮試験片，（b）曲げ試験片 , (c) 引張試験片



助教
栗岡智行

特任助教
陳　君怡

WRH 特任教授
Yung-Jung Hsu

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，Au2 と Au4 は，Au1 と Au3 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．

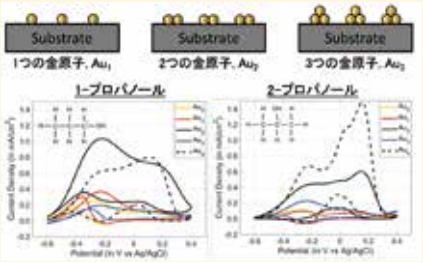


図 4．原子レベル金クラスターのイラストとプロパノールセンシングでのパフォーマンス

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 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：曽根教授，Chang 准教授，栗岡助教，陳特任助教，Hsu WRH 特任教授，戸田秘書.

学生 14 名：(D3 × 1, D2 × 1, D1 × 3, M2 × 3, M1 × 5, B4 × 4).

就職（直近 3 年間）：サイバーエージェント，ヤマハ株式会社，M3，SONY，Continental，ENEOS.

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）などが中心.

図 6．参加している国内＆国際学会の例

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．

研究室について

藤居・雷研究室は 2023 年度から新たな連携体制で始動しました．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．特に，研究開始にあたっては，先行研究を丁寧に調査すること，それらを理解して自らの立ち位置でオリジナルの研究が展開できるように心がけています．

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，最新の超高圧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．

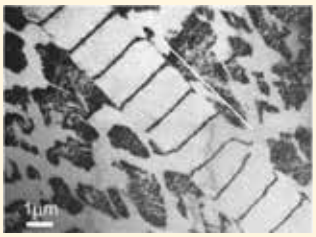


図 1　Cu 単結晶の疲労転位組織

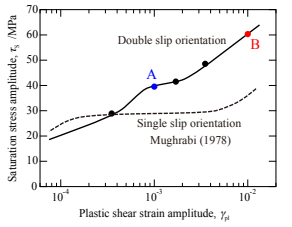


図 2　Cu 単結晶の繰り返し応力 - ひずみ曲線

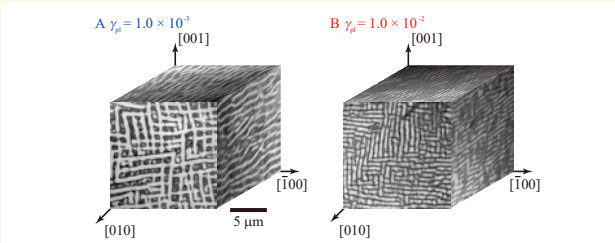


図 3　超高圧走査透過型電子顕微鏡観察像より作成した Cu の転位組織三次元構成像．(A)vein-like 組織と (B)labyrinth 組織．

2．格子欠陥の力学解析

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．本研究では知見の整理・概念の統合・理論の精緻化により，実験結果に矛盾しない格子欠陥理論を構築することを目指しています．

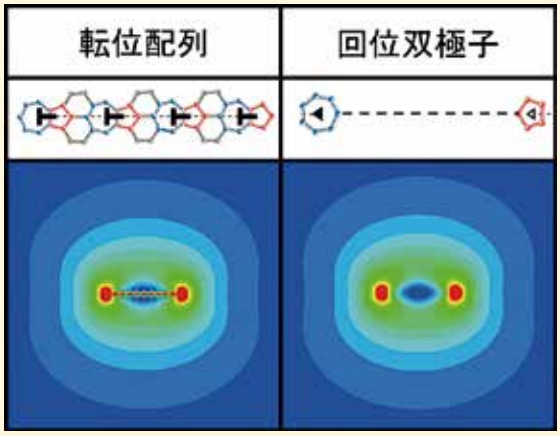


図 4　転位と回位の等価性解析

3．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

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 5 に示すように機能性を有する曲面を設計しています．図 6 の構造における力学モデルと図 7 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．

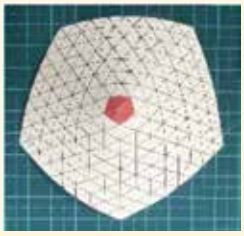


図 5　紙模型

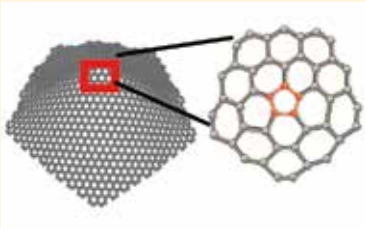


図 6　力学モデル

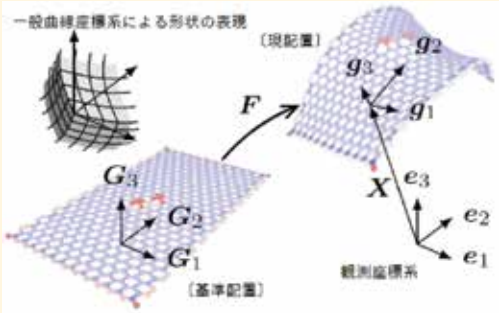


図 7　幾何学モデル

助教
宮澤知孝

4．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．

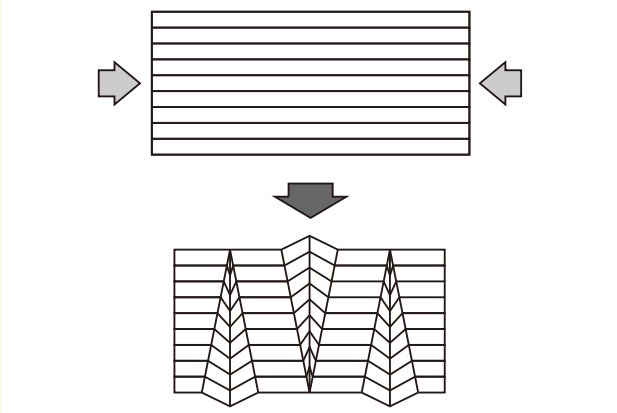


図 8　キンク形成模式図

5．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 9）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．

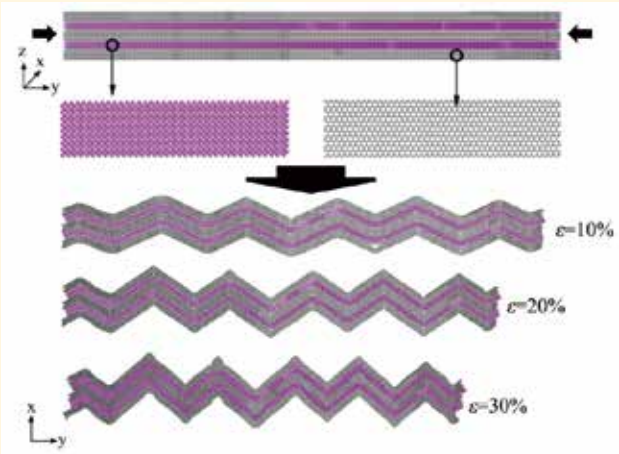


図 9　ナノ積層構造体の変形シミュレーション

6．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求しています．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．

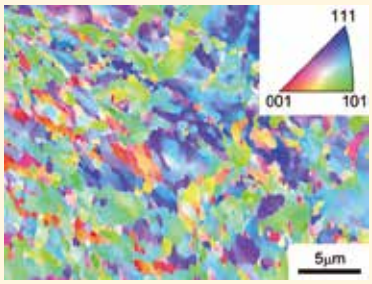


図 10　Cu の超微細粒組織

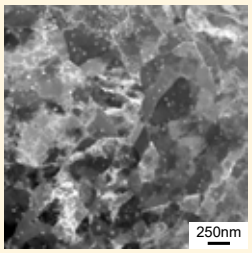


図 11　超微細粒 Cu 母相内に分散した Fe 粒子

7．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 12　SPring-8 BL19B2 小角散乱測定装置図

おわりに

上でご紹介したとおり，藤居・雷研究室では，研究対象としている材料は多岐に及んでいます．金属材料に限っても，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）と様々です．学士課程で材料を学んでこなかった学生（たとえば，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．

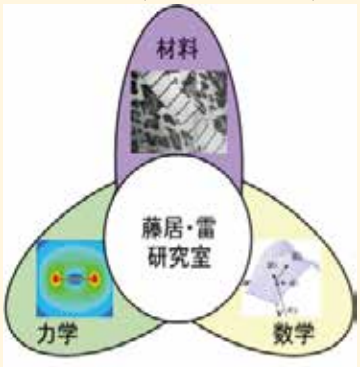


図 13　研究室のコンセプト

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はなく，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 日ですみます．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．

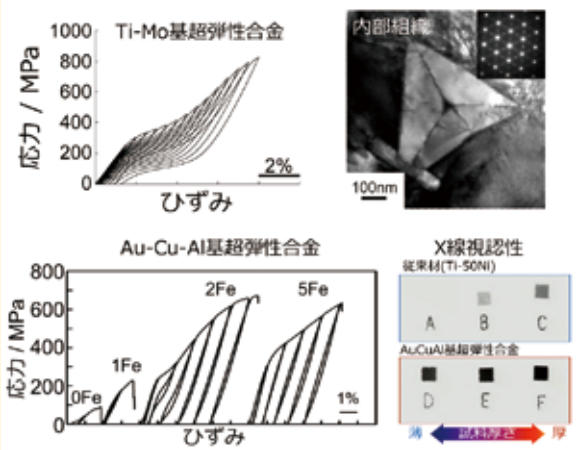


図 2　当研究室で開発した Ti 基超弾性合金と AuCuAl 基超弾性合金

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．

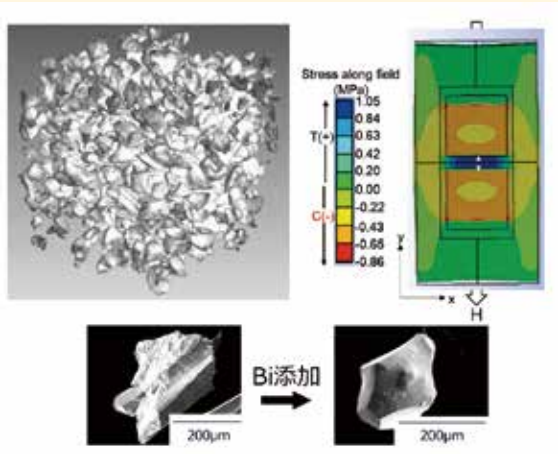


図 3　磁性形状記憶合金 / ポリマーコンポジット

助教 海瀬　晃　　助教 邱　琬婷　　特任助教 野平直希　　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浮遊帯域溶融法や金属 3D プリンティングにより作製し，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．

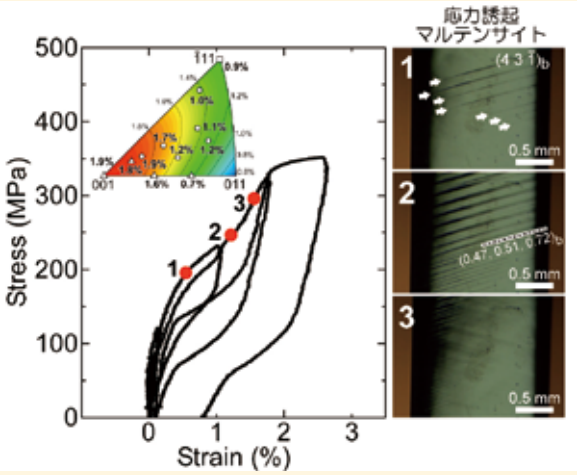


図 4　形状記憶合金単結晶におけるマルテンサイト変態

その他

当研究室は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．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．毎年，所属学生が関連学会で多数の発表賞を受賞しており，研究成果を第一著者として論文発表しています．**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．**

1. メンバー

スタッフ：細田教授，田原准教授，海瀬助教，邱助教，野平特任助教，中田秘書，佐藤技術補佐員，Chernenko 教授 (Univ. Basque Country)

学生：22 名　D3 × 1, D2x2, D1x1, M2 × 3, M1 × 7, B4 × 3, 研究生× 1（予定）

2. 学生の受賞（2022 年）

日本金属学会優秀ポスター賞 3 件，ヤングメタラジスト研究交流会優秀ポスター賞 1 件，金属学会第 7 分野講演優秀ポスター賞 1 件 等

3. 卒業後の進路

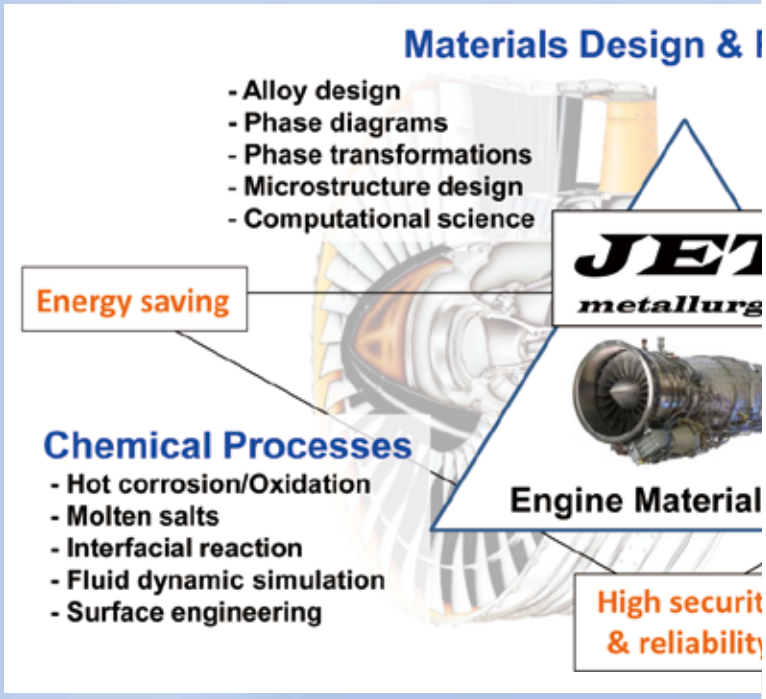
(2022.3) 三菱マテリアル，日本精工，昭和電工，日産，凸版印刷，日揮，レノボ，セプテーニ．（その他）博士進学，日本製鉄，JFE スチール，トヨタ，日産など主に材料，自動車，機械，電気など．

研究成果の一例，学会発表，研究室集合写真（2022 年度）

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
ゲットに，企業と有機的に連携し，企業側が抱える課題の解決及
いがwin-win の関係になるべく，高性能ジェットエンジンの開発
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
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
関とも連携し，対象を航空機にまで拡張して，世界に開かれた国

教育体系 → 材料系学修課程（金属
新学問領域の創成
研究体制 → ジェットエンジン材料R&

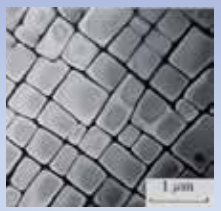


Microstructural Design

-Microstructure stability/design

-Structural analysis

-Chemical analysis



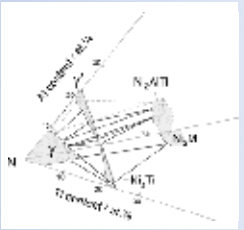
尾中晋・教授　細田秀樹・教授　木村好里・教授　寺田芳弘・准教授

小林覚・准教授　Mark Chang・准教授

Computational Metallurgy

-Multi-component phase diagram calculation

-Kinetic simulation



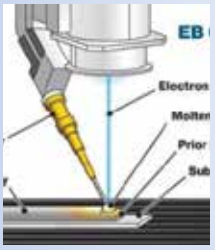
合田義弘・准教授　雷霄旻・准教授　オーミンホ・助教　中島広豊・助教

Processing & Repairing

-Wrought process

-Solidification simulation

-Additive manufacturing

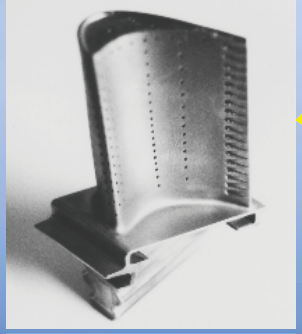


小林能直・教授　林幸・教授　小林郁夫・准教授　春本高志・助教

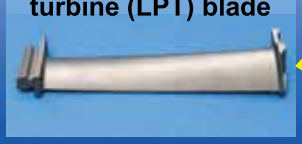
篠原百合・助教

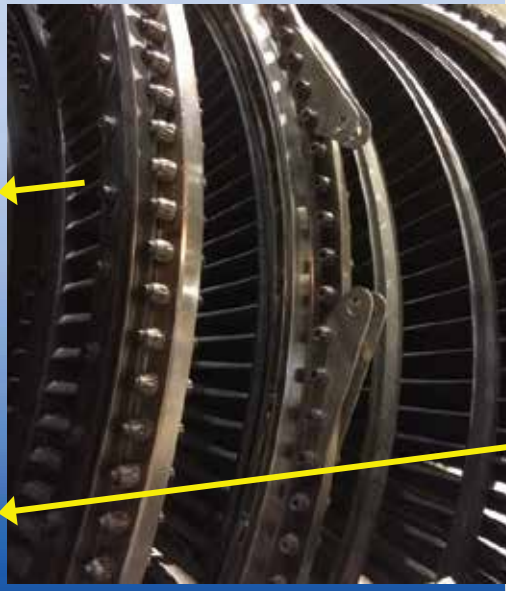
JETの研究・

High pressure turbine (HPT) blade



Low pressure turbine (LPT) blade





gine Triangles）

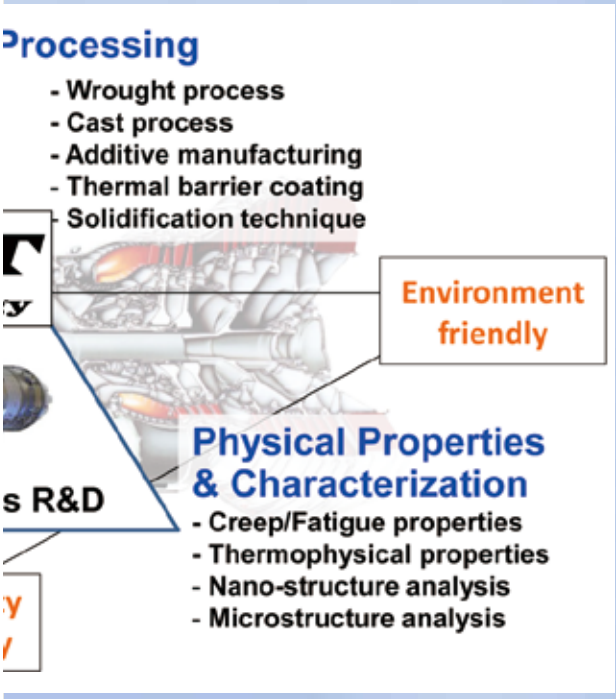
教員が一体となって，ジェットエンジン材料をター
及び経験則に基づくノウハウの学理化を図り，お互
に資するプロジェクト「*JET* (Jet Engine Triangles)」
に配置し，企業（素材メーカー，エンジンメーカー，
を通じて，学理と実利を連携させる研究体制の構築
野（有機材料，無機材料）および他大学，他研究機
国際共同研究開発拠点を目指します．

科目群）

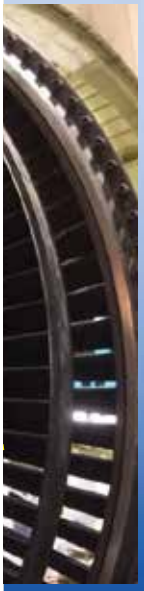
研究指導
研究UNIT

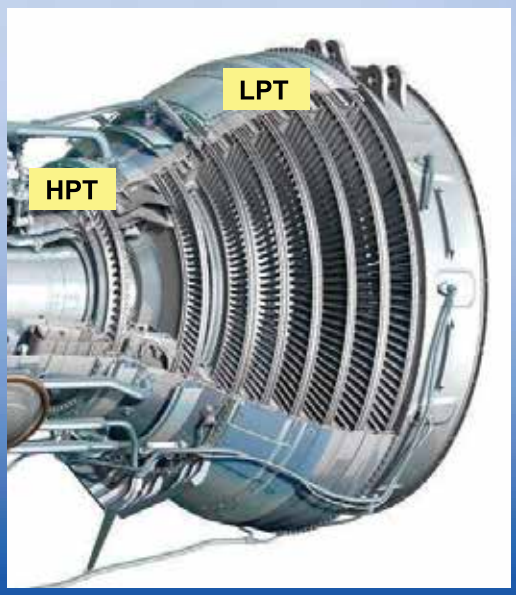
D

関連企業との
コラボレーション
（寄付講座）



開発対象



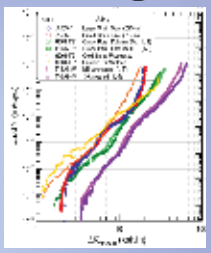


Mechanical Design

-Creep deformation

-Fatigue strength

-Crack propagation



藤居俊之・教授　稲邑朋也・教授　中田伸生・教授　村石信二・准教授
田原正樹・准教授　宮澤知孝・助教　永島良太・助教

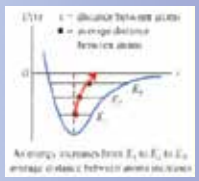
Physical Properties

-Thermal properties

-Electrical properties

-Optical properties

-Magnetic properties



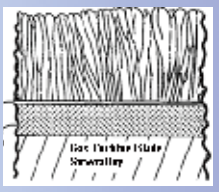
史蹟・教授　曽根正人・教授　中辻寛・准教授　三宮工・准教授
渡辺玄・助教　安井伸太郎・助教　渡邉 学・助教

Surface Engineering

-Environmental barrier coating

-Interfacial reactions

多田英司・教授　河村憲一・准教授



上田光敏・准教授　大井梓・助教　邱琬婷・助教　栗岡智行 助教

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	上田光敏	304 号室
准教授	河村憲一	305 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	多田英司	404 号室
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
准教授	雷霄雯	407 号室

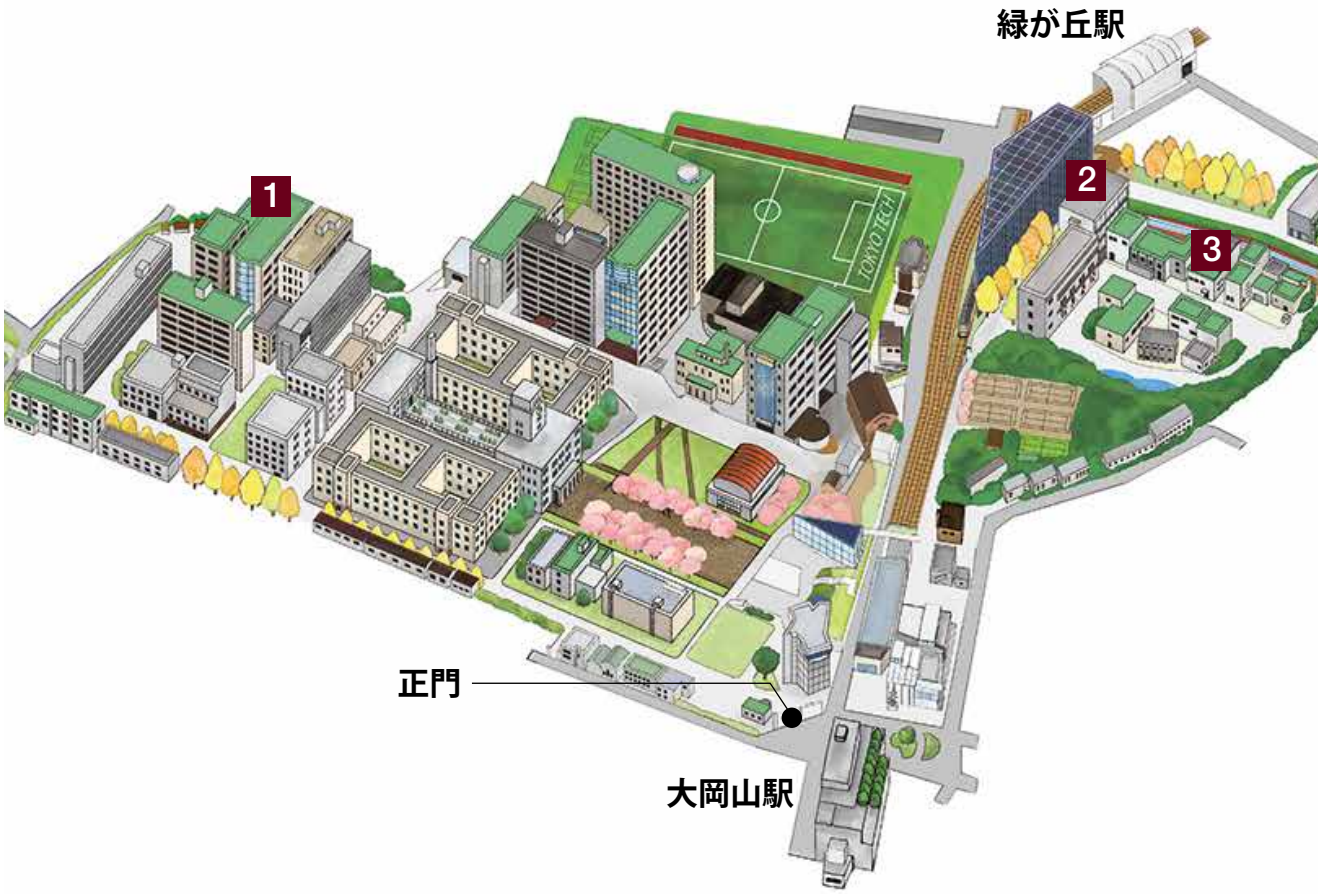
北 2 号館（2）

教授	小林能直	328 号室

北実験棟 2A（3）

テニュアトラック助教

安井伸太郎　201 号室



材料系 A群（金属分野） 教員マップ

すずかけ台キャンパス

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）

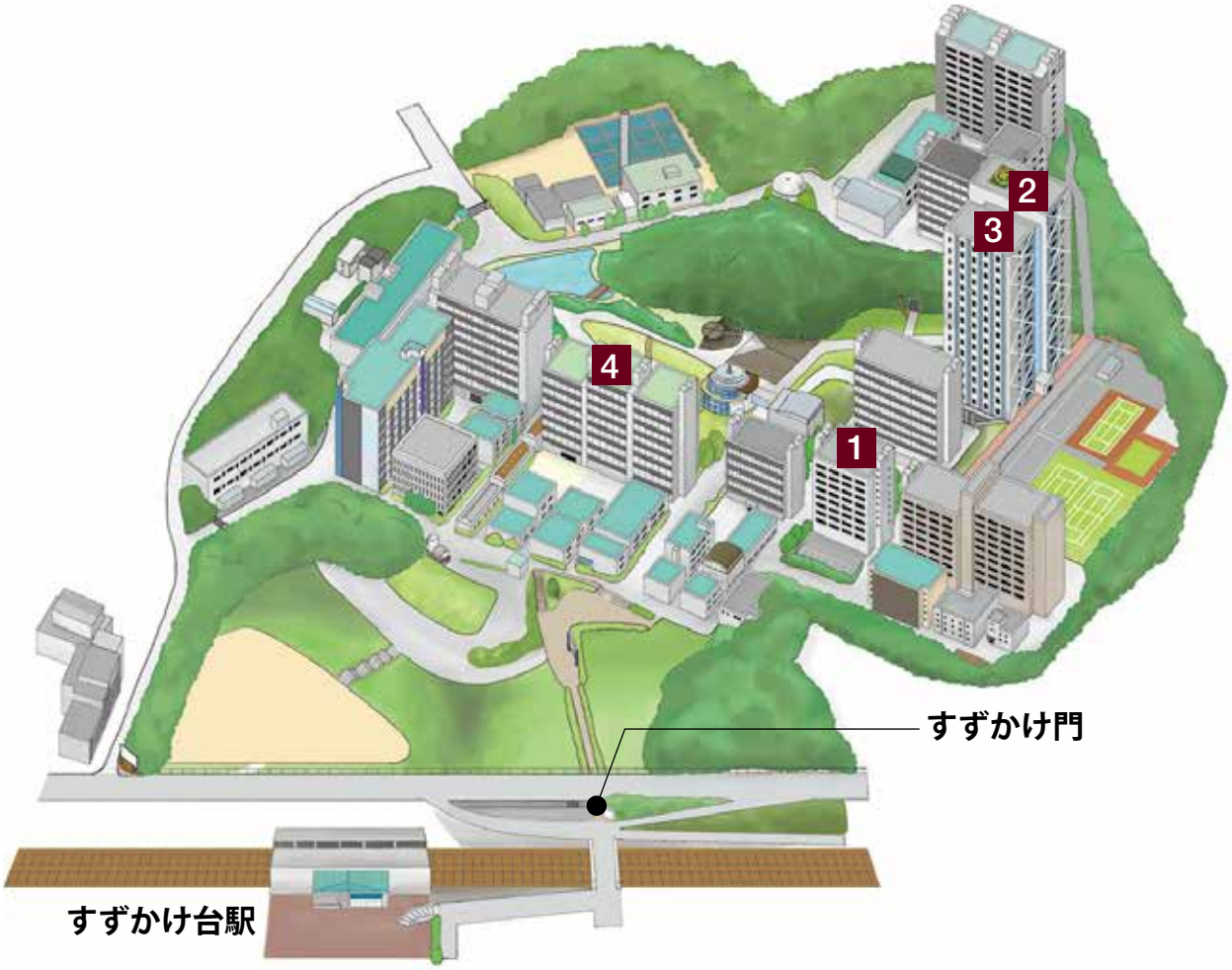
教授	尾中　晋	1505 号室
准教授	三宮　工	1502 号室
准教授	寺田芳弘	1404 号室

J3 棟（3）

教授	稲邑朋也	1116 号室
教授	木村好里	1516 号室
教授	中田伸生	1521 号室

R2 棟（4）

教授	曽根正人	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（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