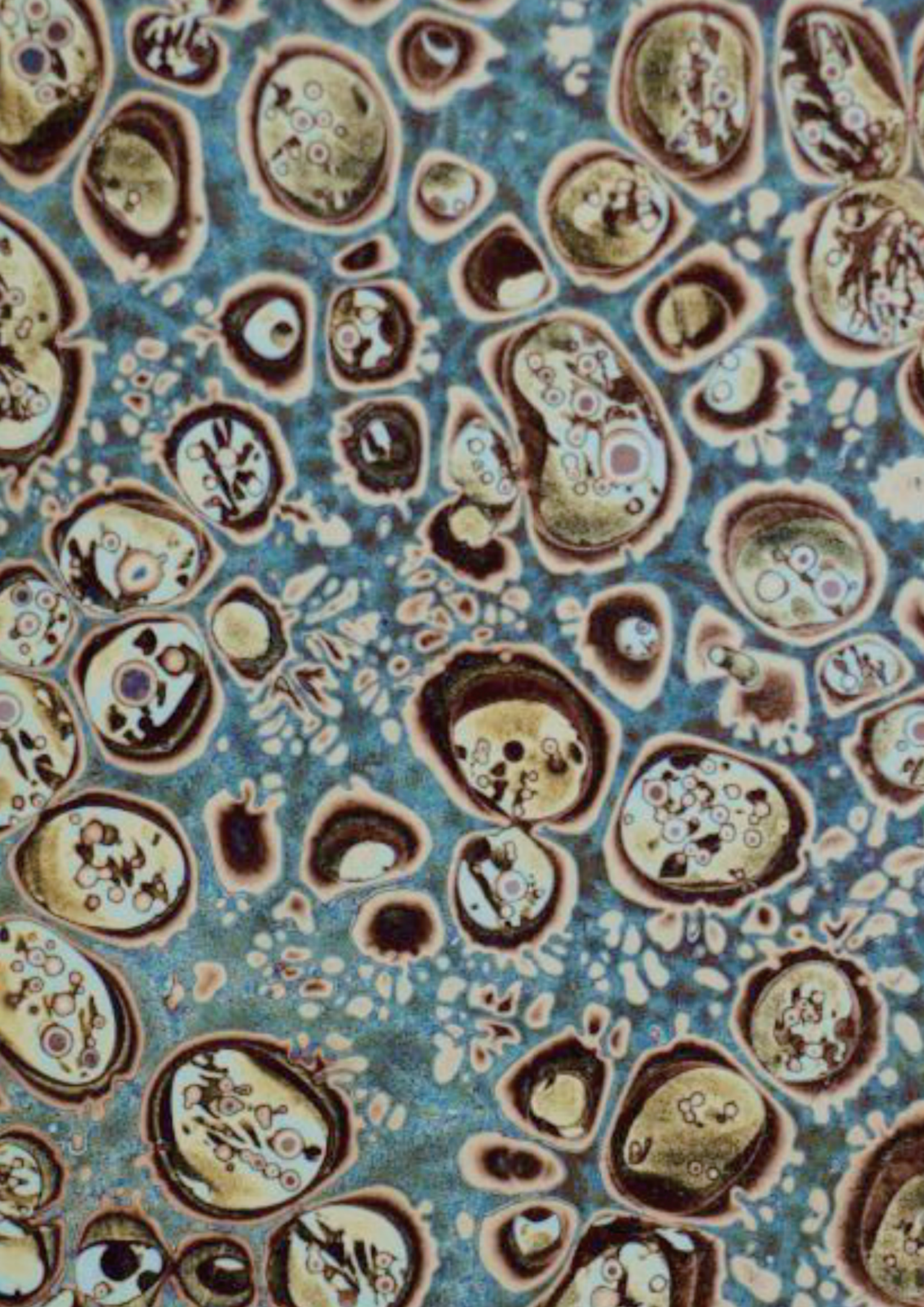
2016 東京工業大学 物質理工学院

材料系 金属分野

Department of Materials Science & Engineering
Tokyo Institute of Technology



物質理工学院の材料系における当分野では，物理学，化学，材料科学等の基礎学問に基づき，鉄鋼材料などの社会基盤材料から超電導材料など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。当分野は，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，国際的な意思伝達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，各種の経済的支援など，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！

金属分野
研究室リスト

（50音順）

頁	役職	氏名	主コース	副コース	研究内容	キャンパス	ホームページアドレス	居室	電話番号	e-mail
06	准教授	稲邑　朋也	材料コース	エネルギーコース	無拡散変態組織の構造とダイナミクス, 集合組織制御, 超長寿命形状記憶合金, 低弾性率チタン合金	すずかけ台	http://www.mater.pi.titech.ac.jp/	R2棟9F 914号室	045-924-5058	inamura.t.aa@m.titech.ac.jp
07	准教授	上田　光敏	エネルギーコース	材料コース	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	大岡山	http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/	南8号館 304号室	03-5734-3311	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, 超微細粒金属などの先進構造材料の創製	すずかけ台	http://www.materia.titech.ac.jp/onaka.html	J2棟 1505号室	045-924-5564	onaka.s.aa@m.titech.ac.jp
10	教授	梶原　正憲	材料コース		電子デバイス用導電性合金の開発, 環境調和型の導電性材料や超伝導合金の開発, 反応拡散を利用した合金創製, 固体熱力学や速度論に基づく相平衡・相変化の検討	すずかけ台	http://j2www.materia.titech.ac.jp/kajihara/	J2棟 1409号室	045-924-5635	kajihara@materia.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	大岡山	http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/	南8号館 305号室	03-5734-3137	kawamura@mtl.titech.ac.jp
12	准教授	木村　好里	エネルギーコース	材料コース	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	すずかけ台	http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/	J3棟 1516号室	045-924-5157	kimura.y.ac@m.titech.ac.jp
14	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	大岡山	http://www.kumai.mtl.titech.ac.jp/	南8号館 212号室	03-5734-2559	kumai.s.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		
13	准教授	小林 郁夫	材料コース	非鉄金属材料の材料設計と特性評価，生体材料の開発と評価，機能性材料の特性評価，チタン合金，アルミニウム合金，マグネシウム合金，銅合金，複合材料，多孔質材料，粉末冶金，医療機器の国際標準化		南8号館 207号室	03-5734-3139	
			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		
16	講師	小林 覚				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		
18	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.ne.titech.ac.jp/Japanese/Laboratories/Data/ykobayashi.html	kobayashi.y.at@m.titech.ac.jp		
19	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		
28	講師	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	
				すずかけ台	http://www.iem.titech.ac.jp/~sannomiya/	sannomiya.t.aa@m.titech.ac.jp		
22	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	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		

金属分野
研究室リスト

頁	役職	氏名	主コース	副コース	研究内容	キャンパス	ホームページアドレス	居室	電話番号	e-mail	QRコード
21	准教授	曽根 正人	材料コース	エネルギーコース	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	すずかけ台	http://www.ames.pi.titech.ac.jp/	R2棟 920号室	045-924-5043	sone.m.aa@m.titech.ac.jp	
16	教授	竹山 雅夫				大岡山	http://steel.mtl.titech.ac.jp/	南8号館 506号室	03-5734-3138	takeyama@mtl.titech.ac.jp	
26	准教授	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	大岡山	www.elechemcorr.mtl.titech.ac.jp/	南8号館 404号室	03-5734-2296	tada.e.aa@m.titech.ac.jp	
28	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	すずかけ台	http://terada.materia.titech.ac.jp/	J2棟 1404号室	045-924-5630	terada.y.ab@m.titech.ac.jp	
11	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	すずかけ台	http://www.materia.titech.ac.jp/lab/lab_001.html	J3棟 1521号室	045-924-5622	nakada.n.aa@m.titech.ac.jp	
29	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	すずかけ台	http://www.materia.titech.ac.jp/~hirayama/2009hirayamalabHP/	J1棟 411号室	045-924-5619	nakatsuji.k.aa@m.titech.ac.jp	
22	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	大岡山	http://www.nakamura-shi.mtl.titech.ac.jp/	南8号館 213号室	03-5734-3144	nakamura.y.ab@m.titech.ac.jp	

金属分野
研究室リスト

頁	役職	氏名	主コース	研究内容		居室	電話番号	QRコード
			副コース	キャンパス	ホームページアドレス	e-mail		
26	教授	西方 篤	材料コース	金属電気化学, 高温電気化学, 固体高分子形燃料電池, 電極触媒の溶解劣化, 大気腐食, 腐食モニタリング, 溶融塩腐食		南8号館 405号室	03-5734-3134	
				大岡山	www.elechemcorr.mtl.titech.ac.jp/	nishikata..a.aa@m.titech.ac.jp		
30	准教授	林 重成	材料コース	金属材料の高温酸化・腐食、高温材料化学、耐酸化合金、コーティング		南8号館 505号室	03-5734-3585	
				大岡山		s.hayashi@mtl.titech.ac.jp		
24	准教授	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.hayashi.mtl.titech.ac.jp/	hayashi@mtl.titech.ac.jp		
31	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		
32	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	すずかけ台	http://mater.pi.titech.ac.jp	hosoda.h.aa@m.titech.ac.jp		
14	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		

稲邑朋也 研究室

ミクロ組織の幾何学でマクロ物性を制御する

URL http://www.mater.pi.titech.ac.jp/

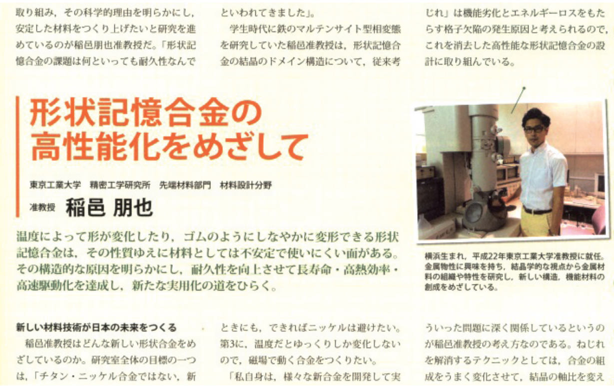
准教授
稲邑朋也

助教
篠原百合

はじめに

金属材料は，ナノ～マクロスケールに渡る，実に多様な下部構造（組織）を持っています．組織は，同じ合金系であっても，組成や加工熱処理条件に応じて大きく変化し，材料特性を決定づけます．合金設計と組織制御は，新合金開発の両輪といっても過言ではありません．

稲邑研究室では，主に形状記憶合金を対象として，無拡散相変態のダイナミクスや，それに関わる微細組織・欠陥構造の形成過程にみられる普遍的な側面を抽出して体系化してゆく基礎研究を結晶学・幾何学理論と各種顕微技術を駆使して行っています．これをもとに，対象とする材料の持つポテンシャルを最大限に引き出す原理やプロセスの研究を行います．さらにそれらを活かして，多様な新合金の開発や高性能化などの応用研究を，合金設計を専門とする，細田研究室と連携して進めています（細田研究室と一体で運営しています）．



取り組み，その科学的理由を明らかにし，安定した材料をつくり上げたいと研究を進めているのが稲邑朋也准教授だ。「形状記憶合金の課題は何といっても耐久性なんでといわれてきました」。

学生時代に鉄のマルテンサイト型相変態を研究していた稲邑准教授は，形状記憶合金の結晶のドメイン構造について，従来考じれ」は機能劣化とエネルギーロスをもたらす格子欠陥の発生原因と考えられるので，これを消去した高性能な形状記憶合金の設計に取り組んでいる。

形状記憶合金の高性能化をめざして

東京工業大学　精密工学研究所　先端材料部門　材料設計分野

准教授 **稲邑 朋也**

温度によって形が変化したり，ゴムのようにしなやかに変形できる形状記憶合金は，その性質ゆえに材料としては不安定で使いにくい面がある。その構造的な原因を明らかにし，耐久性を向上させて長寿命・高熱効率・高速駆動化を達成し，新たな実用化の道をひらく。

横浜生まれ，平成22年東京工業大学准教授に就任。金属物性に興味を持ち，結晶学的な視点から金属材料の組織や特性を研究し，新しい構造，機能材料の創成をめざしている。

新しい材料技術が日本の未来をつくる

稲邑准教授はどんな新しい形状合金をめざしているのか。研究室全体の目標の一つは，「チタン・ニッケル合金ではない，新ときにも，できればニッケルは避けたい。第3に，温度だとゆっくりしか変化しないので，磁場で動く合金をつくりたい。

「私自身は，様々な新合金を開発して実ういった問題に深く関係しているというのが稲邑准教授の考え方なのである。ねじれを解消するテクニックとしては，合金の組成をうまく変化させて，結晶の軸比を変え

図１　日経サイエンス 2013 年 11 月号掲載の研究紹介

研究テーマについて

1．ドメイン組織の欠陥構造とトポロジー

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（形状記憶効果），ゴムの様にしなやかに変形できるといった（超弾性効果），特異な力学特性を示します．形状記憶合金を駆動させると，マルテンサイト相変態により形成するドメインが変換し合い，その過程で内部摩擦や疲労損傷が発生します．稲邑研究室は，ドメイン組織に隠然と存在する「ねじれ」を発見し，これに基づくドメイン制御原理を見いだしており，形状記憶合金の応答速度や耐久性を格段に向上させる基本原理を明らかにしつつあります．

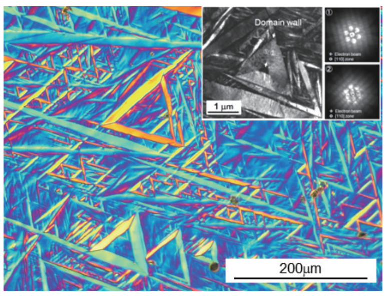


図２　Ti-Nb-Al 合金のマルテンサイト相が呈するドメイン構造

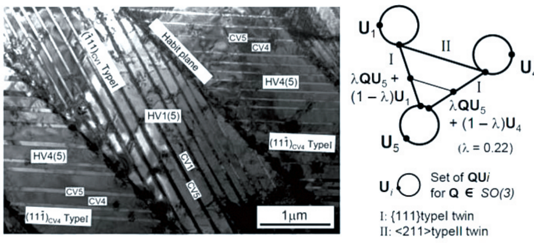


図３　Ti-Au 合金の twin-within-twin 構造

2．超長寿命形状記憶合金の開発

チタン系形状記憶合金や，既に実用化されているニチノール合金（Ti-Ni）をベースに，耐久性を飛躍的に向上させた新合金の開発を，上記のドメイン組織制御原理を応用して行っています．これによって廃熱利用技術，低侵襲医療機器，磁場アクチュエータ，マイクロアクチュエータ技術などの発展に貢献します．

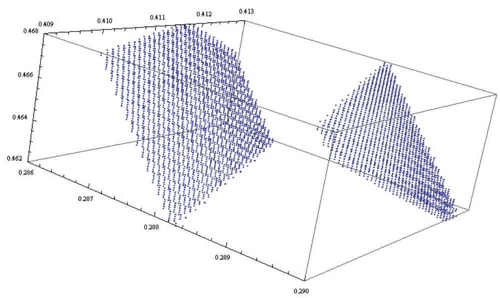


図４　ドメイン間のねじれが解消される格子定数条件（立方晶 - 単斜晶変態）

3．医療用チタン合金の集合組織制御と高機能化

回復・再結晶を利用して，結晶粒の配向方位を制御し，生体用形状記憶・超弾性合金の機能性を最大限に引き出して，実用レベルの性能を得るための研究を行っています．また骨代替用βチタン合金を極限まで低弾性率化させる為の集合組織形成プロセスも研究しています．

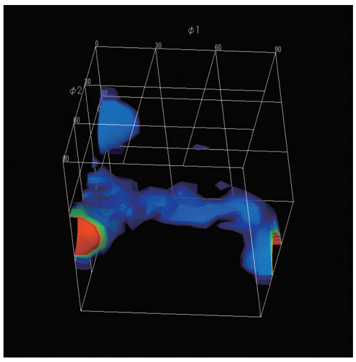


図５　強圧延した Ti-Mo-Al-Zr 超弾性合金の再結晶開始 15 秒後の結晶方位分布関数

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

URL 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．

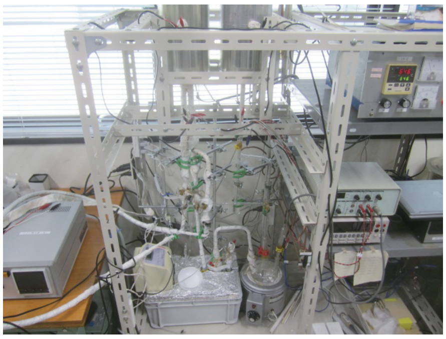
研究の主な内容は，高温における金属材料の環境劣化に関するもので，高温における鉄鋼材料や耐熱合金の劣化機構を解明し，これらの材料を長期にわたって使用するための指針などを提案しています．

「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．

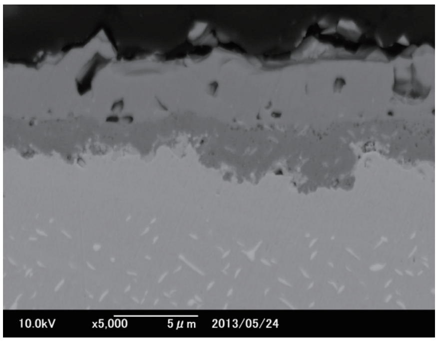
研究テーマについて

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

URL http://www.materia.titech.ac.jp/onaka.html

教授
尾中 晋

助教
宮嶋陽司

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について，その理由を実験的・理論的に考察している．図 1 は球と多面体のあいだの形になる金属中の析出物の観察結果とそのモデル化の例である．このような微細組織の形成と遷移は形の科学としても面白い．

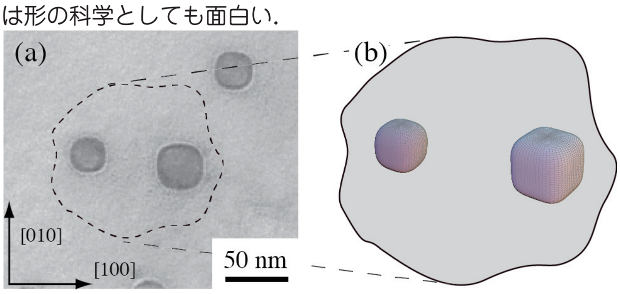


図 1　Cu に微量の Cr と Co を添加して熱処理をするとこれらの添加元素が集合体を形成し，(a) の透過型電子顕微鏡写真に示すような球と立方体のあいだの形をした析出物ができる．材料の物性は，析出物の大きさや形状といった材料組織に依存して変化するため，析出物形成についての理解は材料開発に不可欠である．析出物は材料に内部応力をもたらすため，その状態の理解には力学的な議論が必要になる．そこで，(b) に示すような図をもとにモデル化を行って，析出物の成り立ちを考察している．

超微細粒金属中の組織因子の定量と力学特性の評価

超微細粒金属では結晶粒径が 100nm から 1 μ m 程度であり (図 2 (a))，一般に用いられている材料の結晶粒径に比較して 1/100 程度に小さくなっている．この大きさの比 1:100 とはピンポン玉の直径と相撲の土俵の直径の比ほどに甚だしく，これが「超微細」の「超」の意味である．このくらいまで結晶粒径が小さくなると，通常の材料とは異なる特異な性質があらわれるようになり，極めて興味深い．

超微細粒金属は高い強度と大きな伸びを示す先進強靱材料として期待されている (図 2 (b))．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，種々の観察・測定手法によって組織因子を定量的に評価し，力学特性との関連を調査している．

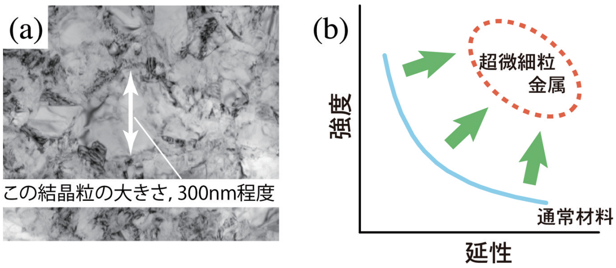


図 2　(a) は 超微細結晶粒で構成される Ni 多結晶の透過型電子顕微鏡写真である．結晶粒は白い粒としてみえる．(b) は材料の強度と延性のあいだの関係を示す図である．一般に用いられている通常の材料では，水色の線で示すように，強度を上昇させると延性は低下してしまう．これに対して超微細粒金属では，この図の赤点線の領域の性質を示す材料，すなわち，強度と延性の両方に優れた材料になると期待されている．

材料の力学物性についてのマイクロメカニックスによる解析

マイクロメカニックスは，材料組織の状態を取り入れたうえで，材料全体の力学的性質を定量的に考察するための理論といえる．計算より実験が好きという人もいるが，実験結果についてのある理解をぴったり裏付ける計算結果が得られたときの達成感も大きなものである．実験と計算の両方が自分でやったものなら，なおさらである．マイクロメカニックスに基づく考察を発展させることによって，各種の複合材料や第二相を含む合金の変形挙動そして材料組織形成についての理論的な予測を行っている．

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

高温用材料に耐環境性能を付与する

URL http://www.mkg.mtl.titech.ac.jp/

准教授
河村憲一

はじめに

金属光沢のあるフライパンを高温で空焼きすると表面がさびて色が付きます。良い「さび」ができると,「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でから,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。

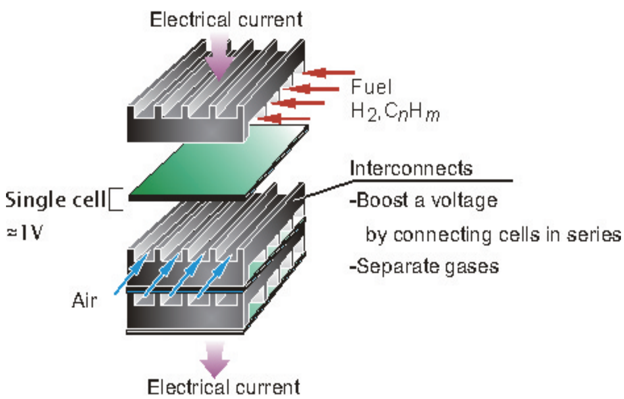


図 3 固体酸化物燃料電池の概略。燃料電池の大容量化に欠かせない合金インターコネクト。高温における耐酸化性,電気伝導性など様々な特性が要求されます。

梶原正憲 研究室

環境と調和する新しい導電性合金・超伝導合金の開発


URL http://j2www.materia.titech.ac.jp/kajihara/

教授
梶原正憲

助教
Minho O

はじめに

材料の物理的性質は，化学組成が等しくても材料組織を調整することにより，大きく変えることができる。材料組織を制御し目的とする物理的性質を備えた新しい材料を開発するためには，材料中で進行する材料組織の律速過程を理解することが極めて重要である。そこで本研究室では，材料組織変化の律速過程に注目し，相平衡熱力学や相変化速度論等の材料科学の基礎原理に基づき，種々の合金材料を対象とし，材料組織学的な実験手法を用いた体系的な研究を行っている。また，独自の速度理論を構築し，実験結果の理論的解析を行っている。これらの成果は，当該分野において世界的に高く評価されている。また，鉄鋼材料の研究を専門とする中田伸生研究室と緊密な連携をとり，幅広い合金材料を対象とする研究を実現している。図 1 は，2015 年の秋に九州大学で開催された定期講演大会における記念写真である。

主な研究機器について

実験研究では，走査型電子顕微鏡，透過型電子顕微鏡，波長分散型 X 線マイクロアナライザー，エネルギー分散型 X 線マイクロアナライザー，X 線回折装置，微分干渉型光学顕微鏡，インストロン型機械強度試験装置・・・等を活用している。一方，理論的解析には，UNIX 系ワークステーションや画像処理コンピュータ等を使用している。

最近の研究テーマについて

1. 新しい無鉛はんだ合金の開発と評価・解析

Sn-Pb 系はんだ合金は，優れた電気的・機械的特性や経済性を兼ね備えた導電性接合用材料である。しかし，同はんだ合金を使用した電子機器を廃棄処分すると，酸性雨等により Pb が溶出し著しい環境破壊の原因となることが明らかになってきた。Pb 汚染によるこのような環境破壊の拡大を食止めるためには，Pb(鉛) を一切含まない新しいタイプの無鉛はんだ合金の開発が急務である。このような社会的要請に応えるために，Sn-Ag 系，Sn-Cu 系，Sn-Ni 系，Sn-Bi 系等の Sn 基無鉛はんだ合金が提案されてきた。しかし，これら既存の Sn 基無鉛はんだ合金は，Sn-Pb 系はんだ合金の完全な代替材料になりきれていないのが現状である。そこで本研究室では，Sn-Pb 系はんだ合金の特性を凌駕する新しい無鉛はんだ合金を開発するための基礎研究と応用研究を行っている。

2. 環境調和型の導電性合金の開発と評価・解析

通常の電子機器用導電性材料は，Cu 基合金に Ni を下地めっきし最表面に Au を被覆した Au/Ni/Cu 基複層導電性材料が広く使用されている。しかし，この Au/Ni/Cu 基複層導電性材料を上述の Sn 基無鉛はんだ合金ではんだ接合すると，最表面の Au が瞬時に消失し，溶融 Sn と Ni 層の反応拡散により Ni-Sn 系化合物が生成する。また，通電使用環境下で発生するジュール熱によってはんだ接合部が加熱されると，Ni-Sn 系化合物は成長する。しかし，Ni-Sn 系化合物は電気抵抗が大きく脆いため，はんだ接合部の電気特性や機械強度が経年劣化する。そこで本研究室では，はんだ接合部の反応拡散を抑制し耐経年劣化特性を高めた新しい導電性材料を開発するための基礎研究と応用研究を行っている。

3. 環境調和型の超伝導合金の開発と評価・解析

微細な Nb 線を埋設した Cu-Sn 系合金を体積拡散が十分な速さで進行する高温度域で加熱処理すると，Nb 細線と Cu-Sn 合金母層が反応拡散し超伝導特性を有する Nb_3Sn が接合界面に生成する。このような反応拡散を利用した超伝導合金の創製法をブロンズ法と呼ぶ。本研究室では，ブロンズ法における反応拡散の速度論的な特徴に対する材料組織学的な理解を深めることにより，毒性元素を含まず優れた電磁特性を有する新しい超伝導合金を開発するための基礎研究と応用研究を行っている。

4. 材料組織変化の速度論的解析

前述の反応拡散による化合物の生成や一般的な合金材料で進行する組織変化は，反応初期では界面反応律速型で進行し，反応後期では拡散律速型に遷移する。本研究室では，界面反応律速型から拡散律速型への遷移過程が明確に観察できる合金系を見出している。そこで，この合金系に注目し，上記の遷移過程の一般的な特徴を明らかにするための実験研究を続けている。また，同遷移過程を定量的に記述するための速度理論を構築している。

図 1 九州大学にて (2015 年 9 月 17 日)

中田伸生 研究室

構造用鉄鋼材料の強靭化～一人の百歩より百人の一歩～

URL http://www.materia.titech.ac.jp/lab/lab_001.html

准教授
中田伸生

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歩 " 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。

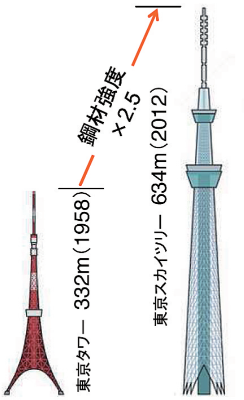


図 1 東京スカイツリー完成の裏側にも、鉄鋼材料の進歩が隠れています。

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靭化を目指し、金属組織の科学を探求します。

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で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 μ m 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。この金属組織に起因して、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。

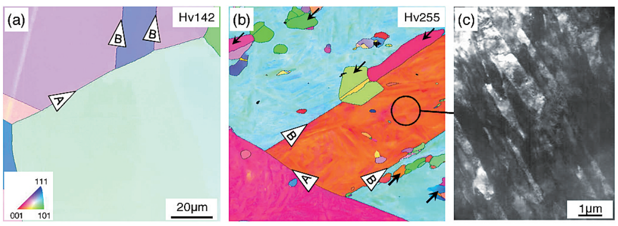


図 2 加熱速度を変化により fcc-Fe オーステナイトの金属組織が激変。加熱速度の変化のみでこのような金属組織を得たのは世界で初めて。

2．ミクローメゾー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。当然ながら、ミクロな金属組織はマクロな変形・破壊挙動にも大きな影響を及ぼしますが、金属の変形・破壊現象をコントロールするためには、ミクロに加えて、メゾスケールでの金属組織制御が重要になります。たとえば、自動車用鋼板として広く利用されている複相鋼板は、軟質なフェライト組織と硬質なマルテンサイト組織が混在した金属組織を有しています。複相鋼板を加工すると、軟質なフェライト組織を基点としてミクロな塑性ひずみが材料のいたるところで発生します。しかしながら、マクロな破壊は材料のある一箇所のみで起こります。つまり、変形から破壊へと遷移する過程には、ミクロな塑性ひずみ領域がメゾスケールに連結しなければならないのです (図 3)。このような観点から、当研究室では、固相変態を中心としたミクロな金属組織制御に加えて、金属組織の形状や分散状態を考えたメゾスケールな制御にも取り組んでおり、このマルチスケールな組織制御によって鉄鋼材料の強靭化を目指します。

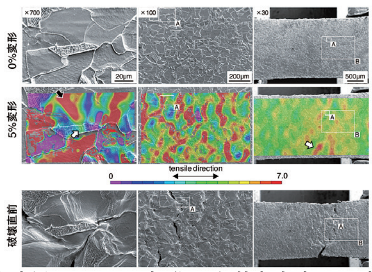


図 3 画像解析を用いて可視化した複相鋼板の不均一変形挙動。観察倍率の違いに注目すると、金属組織に起因して発生したミクロな塑性ひずみが連結し、破壊にいたる様子がわかる。

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

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

准教授
木村好里

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、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、β $FeSi_2$ 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る n − p 特性変換、フォノン散乱源とする熱伝導低減を実現しています。β $FeSi_2$ 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 $E2_1$ 型 Co_3AlC_{1-x} では、C 原子を規則化させた E21’ 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。

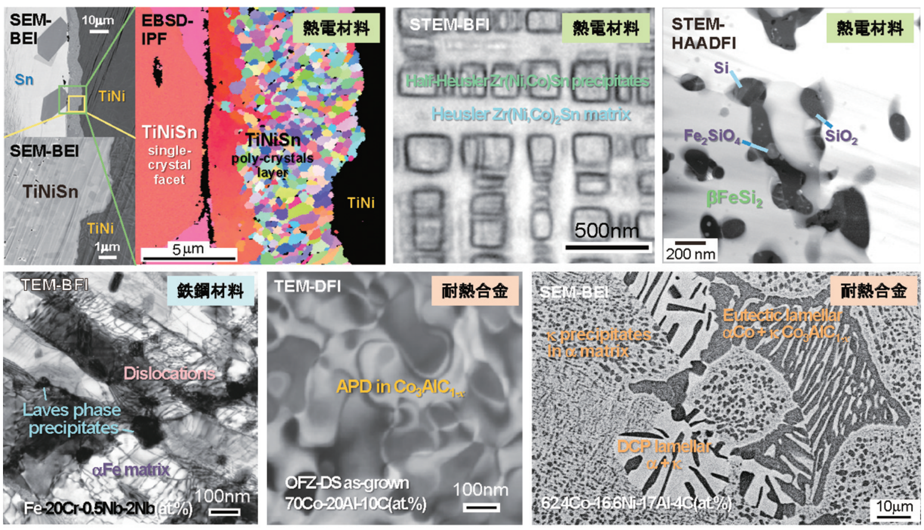


図 (a) TiNi/Sn 固液界面での Half-Heusler TiNiSn 多結晶層と単結晶 facet の形成 , (b) Heusler $Zr(Ni,Co)_2Sn$ 母相と Half-Heusler Zr(Ni,Co)Sn 析出 , (c) 共析 Si と Fe_3O_4 の酸化還元焼結による SiO_2 分散 β $FeSi_2$ 複相組織 , (d) 強加工 α Fe 母相結晶粒界と粒内に析出する Laves 相 $(Fe,Cr)_2(Nb,Mo)$, (e) $E2_1$ Co_3AlC 単結晶の逆位相領域 APD, (f) 三形態共存の二相組織 : α Co 母相と κ − Co_3AlC 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

URL http://www.satokobayashi.mtl.titech.ac.jp/

准教授
小林郁夫

はじめに

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

研究テーマについて

1．低弾性率型生体材料の開発

骨などの硬組織に接合して用いるインプラント材料の弾性率は，骨のそれ（10 ～ 30GPa）に近いことが求められています．これは生体骨とインプラント材料の間の弾性ミスフィットに基づく応力遮蔽（stress shielding）による骨形成障害を防止するためです．多くの生体用金属材料の中で，純チタンの弾性率はもっとも低く，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

2．アブレーションカテーテル用電極材料の開発と特性評価

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．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（図 2）など，様々な機能性が求められています．当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に必要とされる特性評価を行っています．

図 2　開発したアブレーションカテーテル電極用材料の X 線透視下での視認性評価の様子（筑波記念病院放射線科協力）

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．

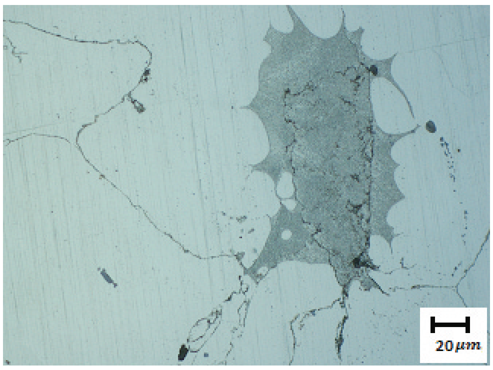


図 3　マグネシウム母相（明るい色の部分）の間に生成した多相反応生成物（暗い灰色の部分）．母相と反応生成物との密着性が高いため，強化相としての効果が高い

熊井真次・村石信二 研究室

強くて優しい社会基盤材料を創る

URL 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3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．さらに最近は，熱解析ソフトによるシミュレーションを組み合わせせることによって，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．

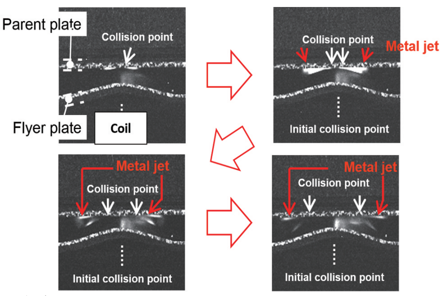


図1　高速ビデオカメラでとらえた電磁力衝撃圧接時の金属板の変形挙動と衝突点からのメタルジェット放出挙動
試験片：純 Al 板（厚さ 1mm）　衝突時間：数マイクロ秒　推定衝突速度：500m/s

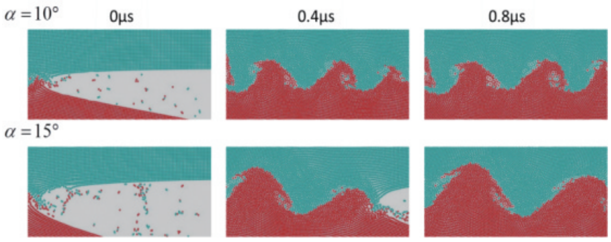


図2 Cu/Ni の高速傾斜衝突界面におけるメタルジェット放出と波状界面形成
（粒子法：αは衝突角度，時間は衝突後の経過時間）
・衝突点から放出されたメタルジェットと衝突点前方の金属表面が干渉し，波状界面が形成
・衝突角度の増加により波の波長と振幅が増加
・ある衝突角度を超えると波が形成しなくなる

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，溶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ターを用い，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，ならびに鋳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．

助教
原田陽平

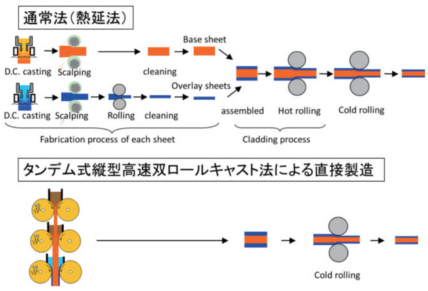


図３　本研究室で開発したタンデム式縦型高速双ロールキャスト法により，従来法に比べ大幅な省工程で，優れた特性を有するクラッドシートを製造することが可能である

5. 半溶融・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溶融・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）

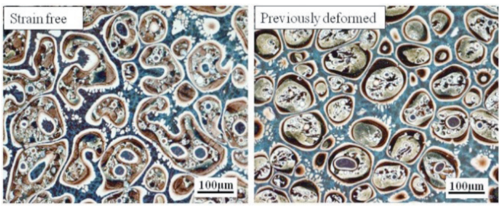


図４　Weck's 試液で腐食することによって現れた，球状化した固相内の溶質偏析と初晶デンドライトの形態変化（AC4CH 合金の半溶融材：青い部分は急冷された残留液相）

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

耐食性に優れる 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

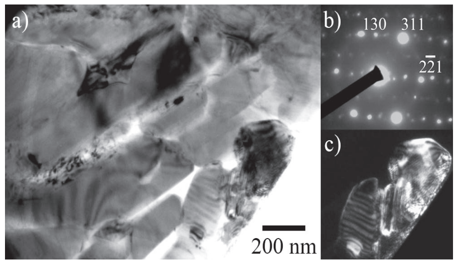


図５　Al/Fe 異種金属接合材の波状界面近傍の断面 TEM 組織（Fe-rich 側）．a) 明視野像の右下に観察される結晶粒の b) 電子回折像ならびに c) 暗視野像から，Fe2Al5 の生成が確認された

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ってきました．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．

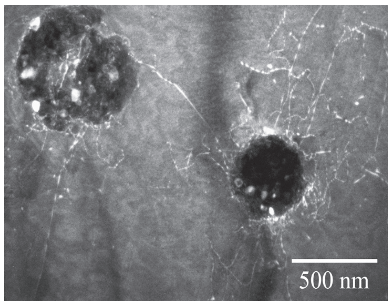


図 6 Al-Mn 系合金に観察される析出 Al6(Mn,Fe) 相の TEM 暗視野像．１個の球状析出粒子は直径 50nm からなるナノ結晶で構成される

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の数値計算から，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．

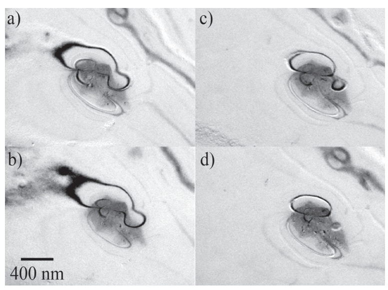
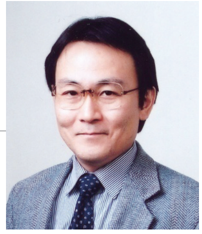


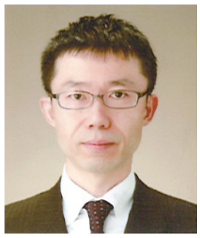
図７　TEM 内その場引張試験で観察された転位ループの収縮・分離・消滅過程.
a) ~ d) は動画からの取込み画像（2 秒間隔）

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

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





教授
竹山雅夫

講師
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．CO_2 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）．

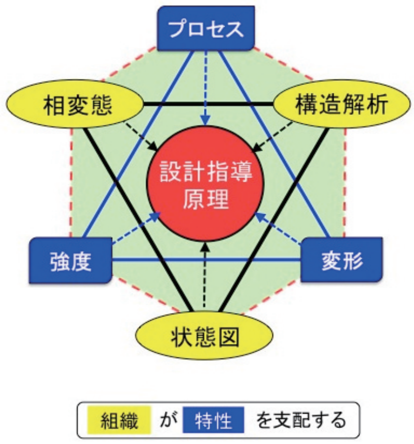


図１ 当研究室における研究哲学

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，現状の汽力発電（図 2）の蒸気温度は約 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℃と言われています．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 $L1_0$ 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求しています．化合物は宝の宝庫です．

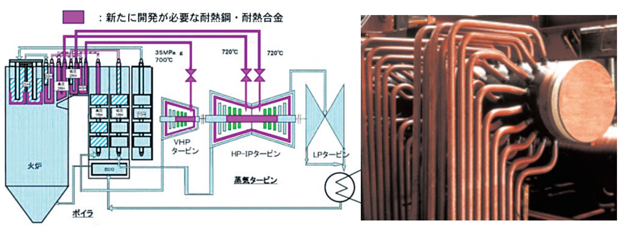


図２ 火力発電の熱交換器用の耐熱鋼・耐熱合金とボイラー管

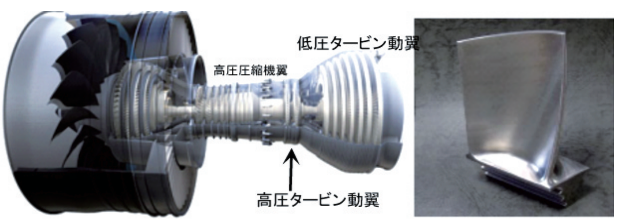


図３ ジェットエンジンの構造（左）と TiAl 基合金動翼の試作体（右）

助教
中島広豊

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，第 3 相の TEM 構造解析（結晶学），組成分析を行い，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プ試験，疲労試験，亀裂進展のその場観察試験を行い，機械的性質の評価を行います．得られた結果を組織設計にフィードバックして，材料設計指導原理を構築します．

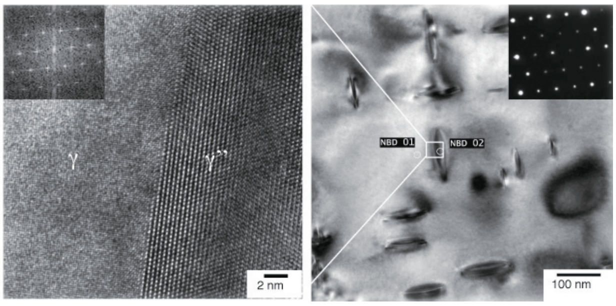
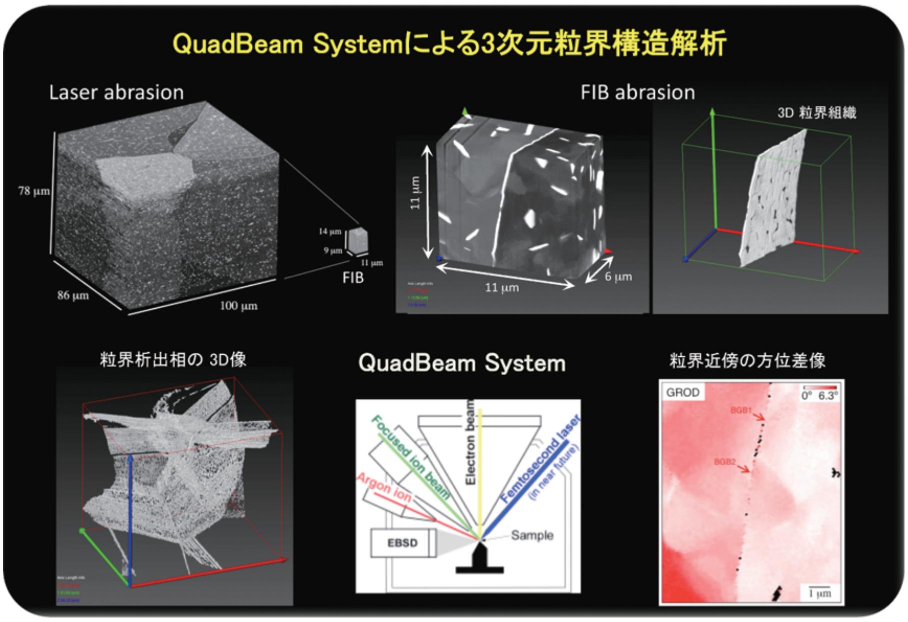


図4　電子顕微鏡を用いた第 2 相の構造解析の一例

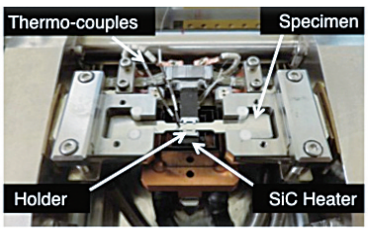
2．3 次元組織評価

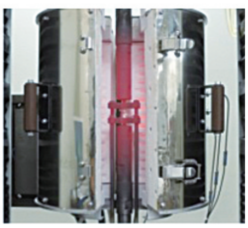
イオンビームあるいはレーザーにより試料スライス，撮像，EBSD による方位解析を数 100 回繰り返し，3 次元像を構築します．



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，下図左は，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です．また，水蒸気雰囲気中にてクリープ試験する装置（下図右）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 , ブラウン大学，欧州では，マックスプランク研究所（ドイツ），レオベン大学（オーストリア）など共同研究をしており，相互交流をしながら研究と教育を推進しています．

小林能直 研究室

高度金属製造・鉄冶金技術と原子力安全金属工学への展開

URL http://www.ne.titech.ac.jp/Japanese/Laboratories/Data/ykobayashi.html

教授
小林能直

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・高効率で創り込むための高度製精錬・鋳造技術、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層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、銅濃縮層の鉄層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、銅が鉄層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。

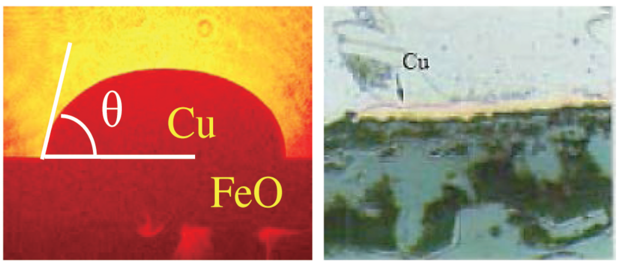


図１　固相 FeO と溶融 Cu 間の接触角測定（実験）と、鋼と酸化鉄間に生じた銅濃化液相（実プロセス）

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触型の装置による基礎研究を行っています。また、高保持力磁性材料である鉄ネオジム系磁石に添加されているジスプロシウムなどの希少金属は供給が不安定になる懸念があります。そこで、これらの使用をセーブするための元素戦略としての鉄ネオジム系磁石の脱酸プロセスの熱力学を研究しています。

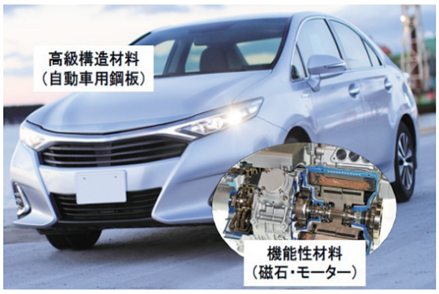


図２　ハイブリッドカーに使用される鉄鋼・鉄基合金材料

3．原子炉における過酷事故事象解明と安全な材料処理のための研究

エネルギー産業の中でも格段に高い安全性・健全性の担保が必要な原子力安全材料の研究は中長期的課題として非常重要です。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。

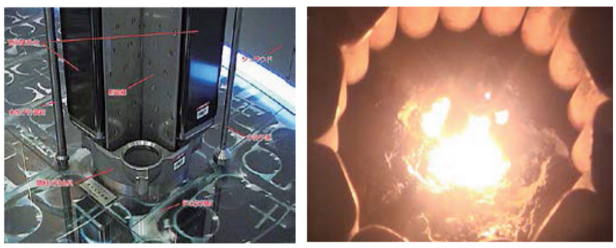


図３　原子炉芯構造物とコールドクルーシブルによるデブリ模擬溶融試験

合田義弘 研究室

計算機実験による物性理論

URL http://www.cms.materia.titech.ac.jp/

准教授
合田義弘（ごうだ）

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。その様な電子状態を、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手法が第一原理電子状態理論です。我々の研究室の目指している所は、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です。

研究について

我々の興味の直接の対象は物質・材料中の電子です。当研究室では、永久磁石材料の材料組織界面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、「京」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います。良い研究結果が得られれば、国際的な学術雑誌に結果を公表し、海外での国際学会で成果を発表する事が可能です。

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 Mn-Bi 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、原子構造探査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。

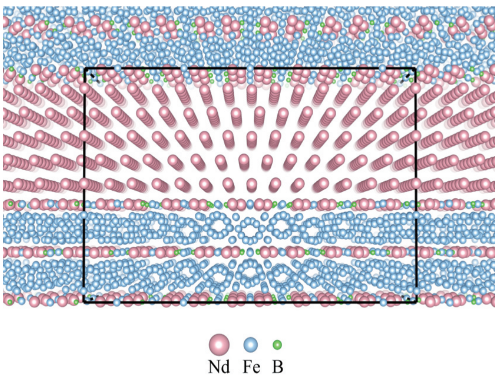


図 1：Nd-Fe-B 焼結磁石の材料組織界面（主相は $Nd_2Fe_{14}B$、副相は dhcp Nd)。この様に原子スケールで平坦な界面が走査型透過電子顕微鏡による観測によっても得られている。

2．ナノ構造におけるスピン物性への重元素効果の解明

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 AlN は非磁性絶縁体、MgB_2 は非磁性金属・超伝導体ですが、我々の物性予測によればこれらを接合した界面では 2 次元強磁性が発現します。また、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。その様な金属ナノ構造に対して、第一原理計算から物理現象の理解を深化させ、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。例えば、Si(111)-B 基盤上の Bi(110) 超薄膜の原子構造と電子状態の同定を実験と連携して行っています（図 2）。

3．第一原理電子状態理論と格子模型の融合に向けた手法開発

材料組織はマイクロメートルスケールの非常に大きなもので、その理論解析を十分行うためには第一原理計算と現象論的格子模型を組み合わせる事が有効です。また、磁化反転のダイナミクスや温度特性を記述するためにも格子模型は有用です。その様な格子模型と現実の物質を結びつけるために、格子模型でのパラメーターを第一原理計算により求める手法の開発を行っています。これまでには原子サイト毎の磁気異方性定数の計算手法を開発し、局所異方性解析に活用しました [Appl. Phys. Lett. (2014).]。

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と思います。

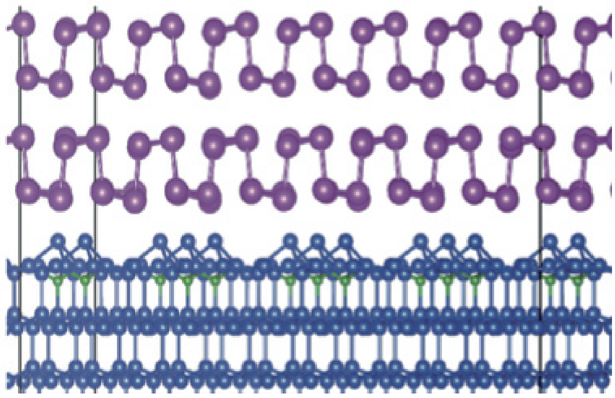


図 2：Si(111)-B 基盤上の Bi(110) 超薄膜の原子構造。

三宮 工 研究室

機能性ナノ材料の創造と電子顕微鏡法開発

講師
三宮　工

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

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、自由電子を多次元的（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、特にプラズモニック材料に主眼を置いています。プラズモ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。このプラズモニック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．多機能プラズモニック材料の創製

金属材料をナノスケールに空間制御すると、自由電子の集団運動（プラズモン）が共鳴し特異な光学特性が発現します。プラズモン共鳴により、光をナノ空間に閉じ込めることで、癌マーカーや DNA などの検出のためのバイオセンシング、高効率発光素子、光エネルギー変換、低損失計算回路への応用が可能となります。

材料作製、評価、観察し、電磁場シミュレーションから原理を探るなど、総合的なアプローチで、このような金属ナノ材料創製を行っています。プラズモニック材料のバイオセンサー・化学センサー応用などについて、海外の研究機関（スイス・スウェーデン等）との共同研究を多く行っています。

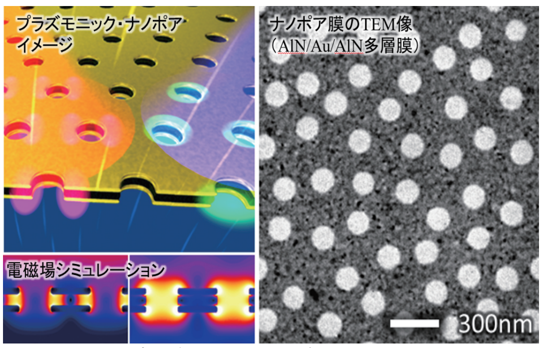


図１　プラズモニックナノポア（ナノフィルタ）

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、光の放出特性、伝播波の分散の測定などを行っています。

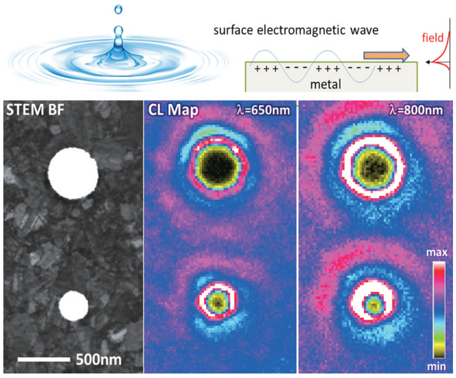


図２　金属表面の自由電子振動による電磁波（表面プラズモン）の可視化。走査型透過電子顕微鏡カソードルミネセンス法による。

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。

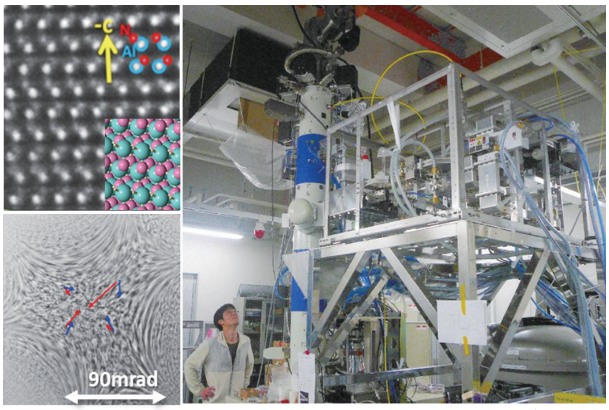


図３　左上：AlN の超高分解能電子顕微鏡写真。左下：ロンチグラムの自動中心検出トレース。右：開発中の高周波加速 TEM の外観

曽根正人 研究室

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

准教授
曽根正人

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

はじめに

次の時代に要求される技術はどのようなものが求められているだろうか？材料工学の分野においては、ナノメーターオーダーで材料の構造制御により新機能性を持たせたマイクロ・ナノマテリアルの開発はその答えの一つである。当研究室では、新規なマイクロ・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。また同時に、材料・構造物のプロセス評価と組織解析によるナノ構造の形成メカニズムの解明、マイクロマテリアル強化法への応用に関する基礎的な研究も行なっている。

1. 薄膜形成技術のマイクロ・ナノオーダー分野への展開

現在、半導体製造技術では、DRAM ハーフピッチ（hp）が 14nm という超微細配線技術の確立が求められている。同時に、半導体製造技術を応用した微細電子機械システム（MEMS）の要素技術開発が世界的な規模で行われている。本グループでは、この技術的要請に基づき、新規なナノマテリアルの創製技術の開発を行っている。

一つ目は、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に、当研究室で開発された超臨界無電解めっき（SNELP）法や超臨界ナノプレーティング（SNP）法を融合することで、超微細配線を可能としている。図 1 に、直径が 60nm・深さ 120nm の埋込孔に、我々が開発した方法を用いて Cu を埋め込んだサンプルを、FIB で表面を加工し、透過型電子顕微鏡（TEM）で観察した結果を示す。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。この技術を洗練させるとともに、段差被覆性や密着性の定量的評価を行う。

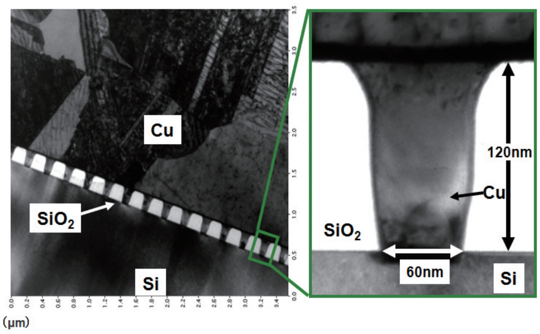


図 1.　半導体テストチップ（直径 60nm・深さ 200nm）へ超臨界ナノプレーティング（SNP）法による埋込んだ Cu の TEM 像

二つ目としては、金属材料の新しい展開として世界的に着目されている金属ガラスを、無電解合金めっき手法で作成する技術の開発である。金属ガラスは通常構成元素の溶融・混合により作製するが、我々は、電気学的作製法の一つである無電解めっき法を用いて作製を試みた。この結果、バルク材料と同じようにガラス転移点が観測されること、更に図 2 に示すような微細ナノ構造が観測されることを明らかになった。この内部構造は、金属ガラスの力学的物性に大きく影響する。更にこの技術により、パターン化された基板への金属ガラスの埋め込みが可能となる。また、この金属ガラスは無電解めっきの触媒として機能し、この触媒を用いると超平滑な無電解 Ni-P 金属表面が得られるころがわかった。

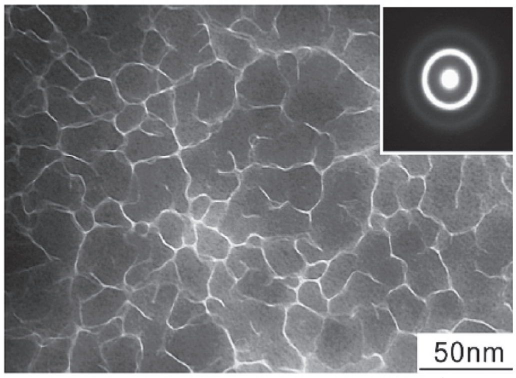


図 2．無電解合金めっき法により作製した Pd-Ni-P 金属ガラスの内部構造の TEM 像

2. 特定の金属組織から試験片を切り出し材料試験

マイクロサイズの構造を有する材料を作成した場合、構成する結晶粒の形状と結晶方位がその機械的強度に影響を与える。本研究室では、金属材料の特定の組織から、マイクロメートルレベルの片持梁試験片や柱状試験片を作成し、その曲げ強度や降伏強度を測定している。図 3 に柱状組織を有する Ni めっき皮膜から、結晶成長軸に対し長軸方向を平行（膜厚方向）あるいは垂直（膜面方向）にして集束イオンビーム装置（FIB）により作製したマイクロ片持梁試験片を示す。この試験片を当研究室が構築したマイクロ材料試験機で曲げ強度を測定したところ、強度に大きな差が見られた。めっき皮膜の膜厚および膜面方向の強度をそれぞれ独立で測定した研究は現在まで報告例がなく、材料工学の観点から大きな成果と言える。

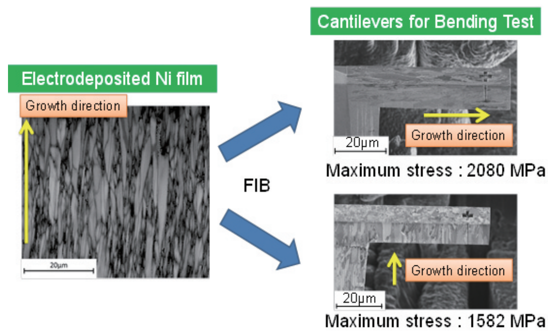


図 3．柱状結晶粒を有する Ni めっき皮膜から結晶成長軸に平行／垂直方向に切り出した片持梁試験片とその曲げ強度

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

URL 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,XDS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人口格子を作ることができます。図1はX線反射率の測定結果です。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ことをしまし、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。

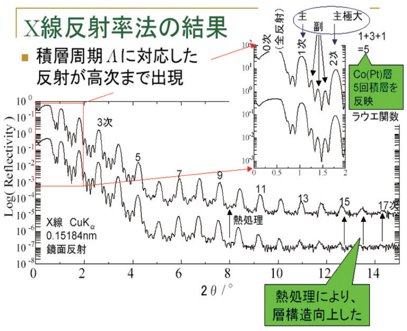


図1　X線反射率法によるCoPt/AlN多層膜の周期性、界面構造の評価

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で作製した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”しています。

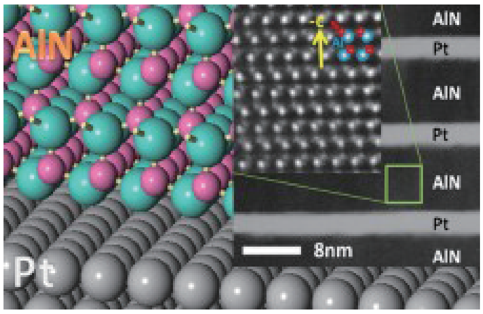


図2　AlN/Pt多層膜の原子分解能電子顕微鏡とAlNの成長様式

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すことができます。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う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，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。

助教
春本高志

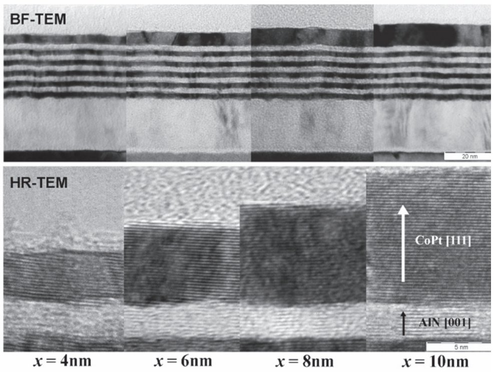


図3．CoPt/AlN 多層膜の透過電子顕微鏡写真

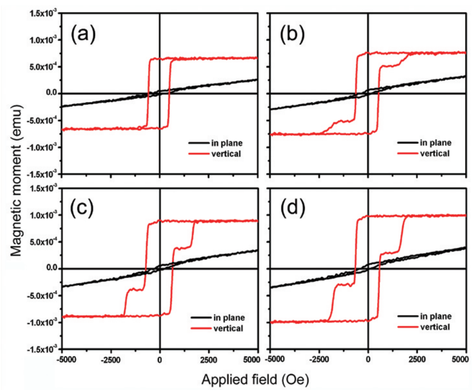


図4．CoPt/AlN 多層膜の面垂直方向の磁化曲線

（２）CoPt/CoO 多層膜の垂直交換バイアス効果

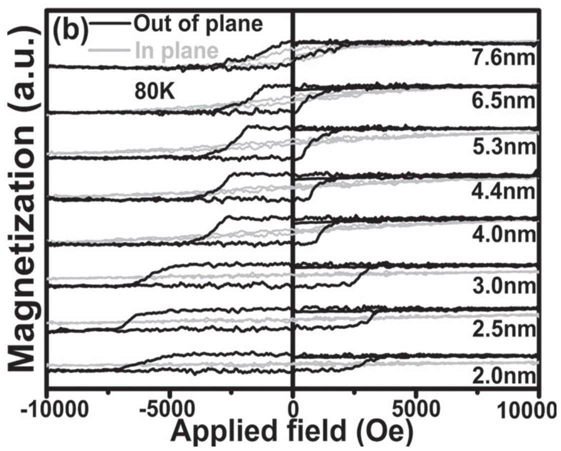


図５は CoPt/CoO ナノヘテロ多層膜の磁化曲線です。

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 は常磁性から反共磁性に変態し、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（PdHx）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。

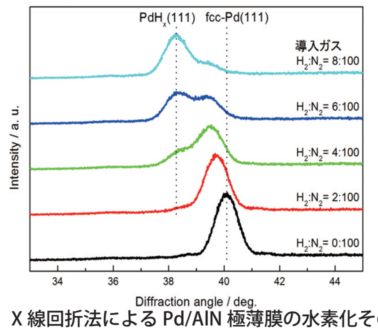


図６　X 線回折法による Pd/AlN 極薄膜の水素化その場観察

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。

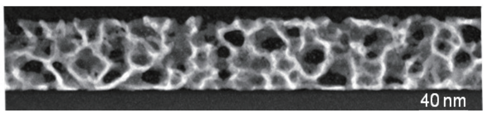


図７　Pd 多孔質薄膜の断面走査透過電子顕微鏡像（Pd: 白い部分）

須佐匡裕・林 幸 研究室

環境性能に優れた鉄鋼プロセスの提案

URL http://www.susalab.mtl.titech.ac.jp/,
http://www.hayashi.mtl.titech.ac.jp/

教授
須佐匡裕

准教授
林　　幸

はじめに

「いい鉄を効率よくつくる」このことを目指して、当研究室では熱力学・熱物性という学問を基調として、環境との調和を保ちながら人類の発展に役立つ鉄鋼生産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。このようなことを背景に、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。

鉄鋼生産プロセスについて

鉄鋼は、図 1 に示すようなプロセスで製造されています。原料調整から始まり、高炉、溶銑予備処理、転炉、2 次精錬と製精錬を行って目的の組成を持つ鋼を作り、連続鋳造によりスラブ、ブルーム、ビレットが製造されます。これらは、熱間圧延工程などを経て、製品となります。いずれの工程においても環境負荷低減は問題であり、様々な取り組みがなされています。

研究テーマについて

1．原料調整～溶融スラグの物性値と構造との関係

スラグなどのシリケート融体は、鉄・非鉄精錬で用いられています。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、産地によって異なる不純物の影響を排除して、安定した操業を行わなくてはなりません。そのためには、溶融シリケートの物性値や構造への不純物の影響を理解しておくことが重要です。私たちは、様々な溶融シリケートの熱力学および物性値データを測定・整備するとともに、構造解析も行い、それらの関係性の解明に取り組んでいます。

2．高炉プロセス～高炉内鉱石還元・溶融挙動の解明

鉄鋼業の CO_2 排出量割合は日本全体の約 14% であり、その大部分は高炉でのコークスの燃焼によるものです。高炉では、鉄鉱石をコークスの燃焼により生成する CO で還元し銑鉄を得ていますが、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。私たちは、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、通気の妨げとなる鉱石の反応・溶融挙動に着目し、通気性を損なわない焼結鉱開発のための基礎研究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

図 1 の (　) 内の時間は、各工程で鉄あるいは鋼 1 トンを処理するのに必要な時間を示しています。連続鋳造にはその前の工程よりも時間がかかり、その高速化が全体の生産性向上に重要となることがわかります。

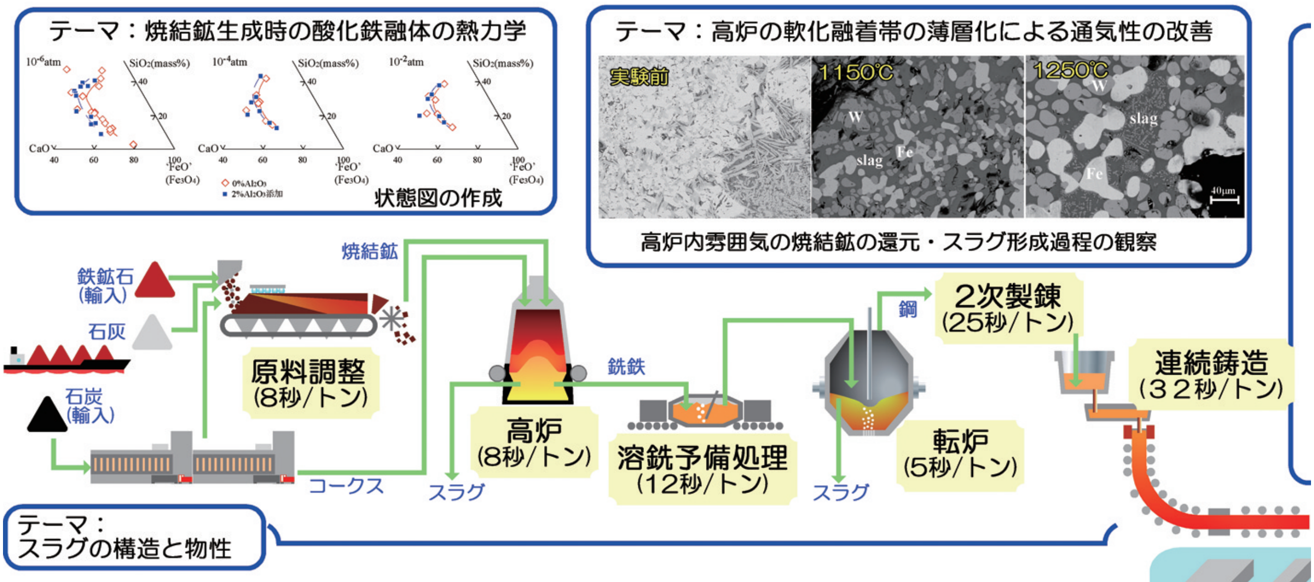


図 1　鉄工製造プロセスと須佐・林研究史の研究テーマ
(図中の時間は各工程で 1 トンの鉄を処理するのに必要な時間を示している)

助教
渡邊　玄

助教
遠藤理恵

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。

- 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

当研究室では、この研究・開発を日本の鉄鋼会社やアメリカの研究者と共同研究として行っています。

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なっています。スケールとは FeO、Fe_3O_4 および Fe_2O_3 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。

また、実際のスケール内の温度勾配は 15000K/mm にも達します。このような条件下における熱物性値の測定は、既存の装置で測定できるものではありません。このために当研究室では、図 2 に示すように、ブンゼン型氷熱量計の原理を利用して、擬定常ホットプレート法という熱伝導率測定法を世界で初めて開発するとともに、国内の研究機関と協力して、以下のような方法でもスケールの熱物性値の測定を行っています。

- レーザーフラッシュ法と多層解析による熱拡散率測定
- ホットストリップ法による熱浸透率測定

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が、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、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。

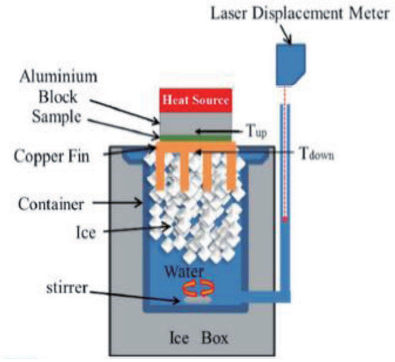
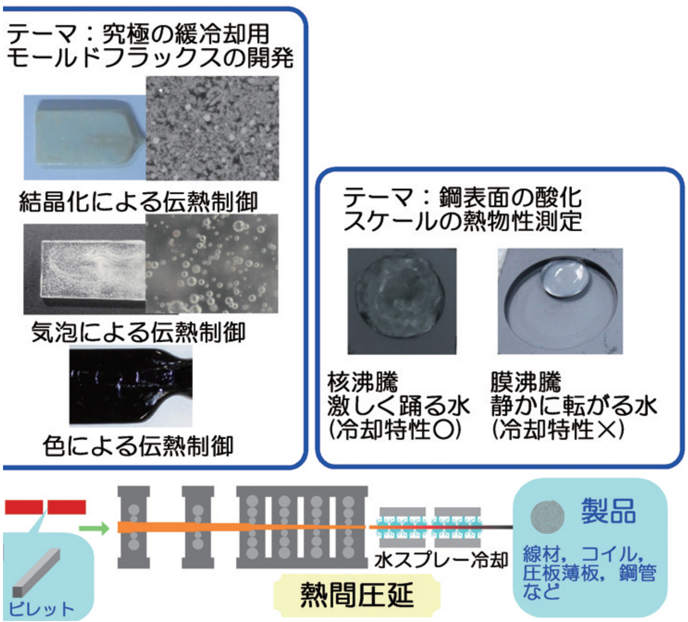


図 2　擬定常ホットプレート法装置

5．物質のマイクロ波加熱と複素誘電率・透磁率測定

高温プロセスでは、現在、化石燃料の燃焼エネルギーを用いており、地球温暖化をもたらす炭酸ガスを多量に排出しています。炭酸ガス排出量を大幅に抑制するには、非化石燃料（原子力、風力、太陽光、核融合等）により発電する電気を加熱源に用いる必要があります。そこで私たちは、電気による加熱源としてマイクロ波に着目しました。マイクロ波は、従来加熱法に比べ、内部加熱、選択加熱、反応促進効果など優れた特性を持っています。私たちは、図 3 に示す装置を作製して、物質とマイクロ波の相互作用についての研究を行っています。



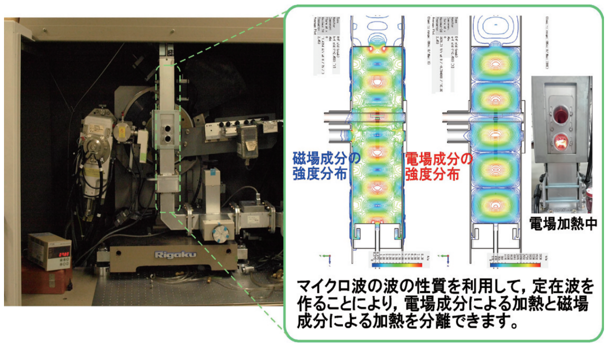


図 3　X 線回折装置＋シングルモードマイクロ波加熱装置

西方 篤・多田英司 研究室


材料表界面の環境性能評価と高耐食金属材料の開発

URL http://electrochemcorr.mtl.titech.ac.jp/

教授
西方　篤

准教授
多田英司

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１つに、材料表面や材料と環境の界面でおこる化学、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、省資源・省エネルギーといった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、電気化学反応を評価、制御して、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。

島国である日本では、鋼構造物が海浜地区で使用されることが多く、その防食対策が大きな課題となっています。その他様々な分野で必要な年間の全防食コストは GDP の数％にも達すると試算されています。よって、金属資源の損出を抑制するためには、優れた耐食性を有する材料の開発や既存材料の長寿命化を目指すことが重要かつ有効です。そのため、我々の研究室では、金属材料の腐食劣化機構の解明や腐食モニタリングシステムの開発を重点的に行っています。また、その関連として、自動車への搭載が進められきているエンジンに代わる新しいエネルギーデバイスである固体高分子形燃料電池について、その高機能化、耐久性向上を目指し、電極触媒材料の溶解劣化機構の解明も精力的に研究しています。我々とともに、地球環境保全に貢献する、構造材料，エネルギー材料の高機能化、劣化防止に関係した研究をを行いたい、興味があるという人は是非一緒に研究しましょう。心よりお待ちしています。

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。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積極的に推進しています。

また、我々の研究室では、外国文献の紹介と研究進捗の報告を兼ねたゼミを毎週行っています。さらに、学生らは、自主的に、研究に関連する学問分野の専門書を読解する勉強会を行っています。不定期ですが、国内外の研究者による講演会が開催されております。このように幅広い議論の場が提供されています。

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

研究テーマについて

１．固体高分子形燃料電池用材料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 の消費量を抑えた Pt 代替触媒の開発などの基礎研究を活発に行っています。近年の成果として、電極触媒に用いられる Pt、Pt 合金の腐食劣化機構の全容解明に成功しております。さらに、現在では、Pt 代替合金電極触媒や電極／電解質膜界面における電極反応機構の電気化学的検討を行っています。また、PEFC の小型化、量産化にとっては、カーボンセパレータを金属製セパレータにすることが有利であるため、燃料電池環境における金属セパレータの腐食劣化機構についても研究を行っています。

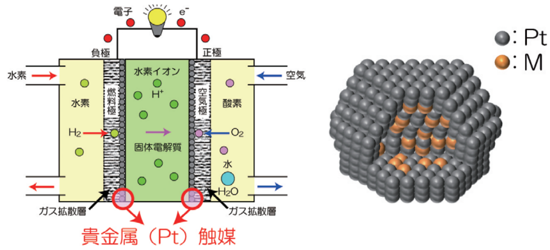


図１　固体高分子形燃料電池の模式図（左）とコアシェル Pt-M 合金系電極触媒の模式図（右）

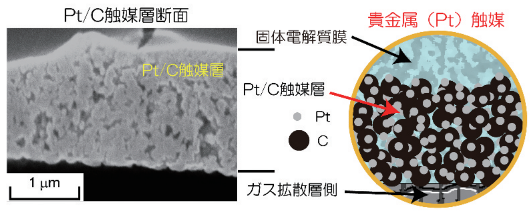


図２　固体高分子形燃料電池の電極膜接合体の Pt/C 触媒層の電子顕微鏡写真（左）とその模式図（右）

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％（日本：約 10 兆円）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．よって、金属材料の高耐食化や腐食抑制は、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、予想もしない腐食現象が生じたり、予想を超える速度で腐食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おこる腐食現象について、その機構の詳細を主に電気化学的手法によって調査しています。その機構をもとに、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おります。

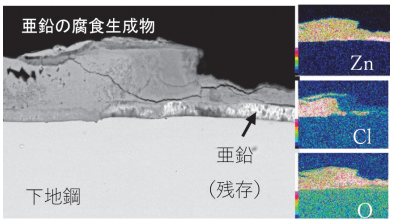


図３　腐食劣化した自動車用表面処理鋼板（溶融亜鉛めっき鋼板）の断面観察写真（右側は元素分析結果）

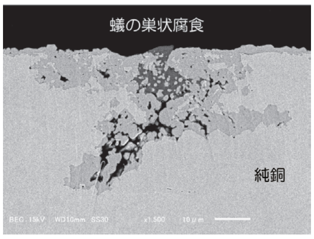


図４　ギ酸蒸気中で発生した銅の蟻の巣状腐食の断面写真（文字通り，蟻の巣のような特異な局部腐食形態を示す）

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、特に腐食にともな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。たとえば、高耐食性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５）. このような割れの発生、進展機構の研究を行っています。また、省資源・省エネルギーを進めるために自動車や鋼構造物等の高強度化が図られていますが、高強度鋼はその強度が増すにつれ、腐食等によって発生、侵入した水素によって脆性破壊（遅れ破壊）をおこす危険性が増加します。そこで、高強度鉄鋼材料の水素脆化劣化を抑制するために、鉄鋼材料への水素発生・侵入機構の解明に関する基礎的研究を行っています。さらに、最近では、鉄鋼材料以外にも、Zr や Ta など耐食性材料の水素脆化機構についての研究も行っています。

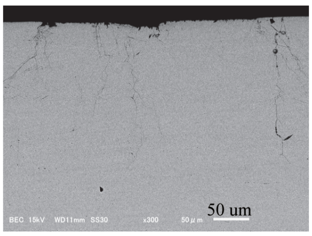


図５　大気腐食環境で 304 ステンレス鋼に発生した応力腐食割れ

４．電気化学を中心とした腐食劣化、寿命評価手法の開発

わが国の高度成長期に整備された社会資本（道路・橋梁・港湾・建造物等）は 30 年から 40 年を経て、補修・改修を迫られつつあります。また、新規に建設する社会資本は、維持・管理のコストを最小限にして 100 年以上の寿命を保たせる設計が必要となっています。たとえば、耐候性鋼の使用による無塗装の鋼製橋梁は、塗装およびその塗り替えなどの初期および維持コストを低減させることができます。最新の耐候性材料が北陸新幹線の橋梁などでも利用されています。

しかし、いかに優れた耐食性を有する金属材料でも、使用環境中において腐食劣化が避けられません。よって、腐食速度や腐食過程を継続的に監視することは、構造物等の安全と的確な管理において極めて重要となります。また、腐食環境での曝露試験や実験室試験においても、様々な環境に対して腐食反応の変化を追跡することは、新材料の開発や材料選定において有効な研究開発手法となります。我々の研究室では、交流インピーダンス法による腐食モニタリング技術を確立し、その普及に努めてきました。現在、さらにその精度の向上を図るとともに、新たなモニタリング手法を開発すべく基礎研究を行っています。

また、これらの技術は、原子力発電所からの使用済み核燃料を再処理した後に残る高レベル放射性廃棄物を処分する環境での金属材料の腐食モニタリングにりようされようとしています。使用済み放射性廃棄物は、ガラス固化し、金属容器（オーバーパック）に入れ、その周囲を人工バリアー（ベントナイト粘土）で覆い、地下数百メートルの岩盤中に埋設処分することが計画されていますが、放射性物質の半減期の関係から、オーバーパック材は 1000 年以上の耐食寿命が必要であります。我々の研究室では、オーバーパック候補材である炭素鋼のベントナイト埋設環境における腐食機構の解明と、その寿命予測に関する基礎研究として、超長期の腐食モニタリング、寿命予測技術の開発を行っています。その他，材料表面の局所的な電気化学特性を調査するための微小電気化学セル（図７左，ガラスキャピラリ先端の約 100 um φでの電気化学測定が可能）やケルビン法（非接触参照電極）など、特殊な電気化学的手法を様々な腐食評価に適用しています.

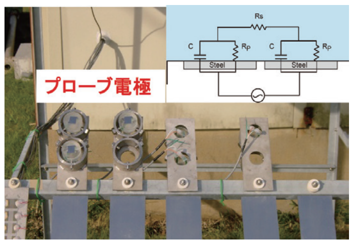


図６　実暴露腐食環境における鉄鋼材料の交流インピーダンス法による腐食速度のモニタリングの様子

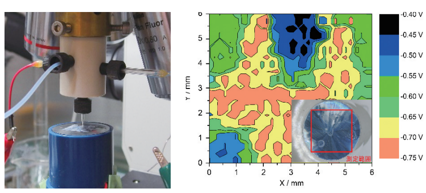


図７　特殊な電気化学測定法と測定例：微小電気化学セル（左）と走査型ケルビンプローブによる非接触表面電位測定結果（右）

寺田芳弘 研究室

環境性能に優れた高温構造用材料の開発

URL http://terada.materia.titech.ac.jp/

准教授
寺田芳弘

はじめに

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。当研究室では、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。

研究について

環境に対する負荷を最小化しながら社会の持続的発展に必要なエネルギーを確保することは、人類にとって必須の課題となっています。エネルギー効率向上のためには、過酷な使用環境下における耐熱材料に対し優れた高温強度を付与することが必要となります。当研究室では、材料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。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．ニッケル基鍛造合金におけるγ′相の組織安定性

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。一般に、ニッケル基鍛造合金のクリープ破断寿命は、Larson-Miller パラメータから評価されますが、長時間側のデータは世界的にも限られており、短時間側のデータを外挿することにより寿命を予測する手法が用いられているのが現状です。クリープ破断寿命の予測精度を向上させるためには、組織の安定性を正確に評価することが必要となります。

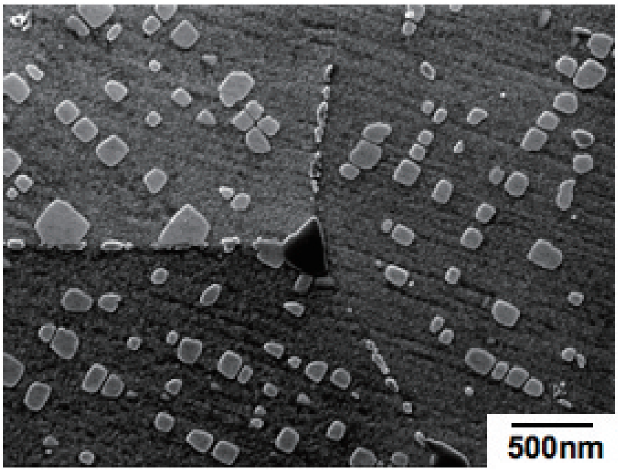


図１　ニッケル基鍛造合金 X-750 の走査型電子顕微鏡組織

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。しかし、高温強度が低いため、その使用は現在のところ室温部材に限定されています。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、最終的にはフルラメラ組織に制御することを目指しています。

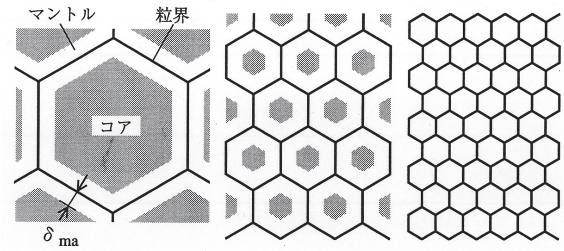


図２　当研究室が提唱しているコア・マントルモデル

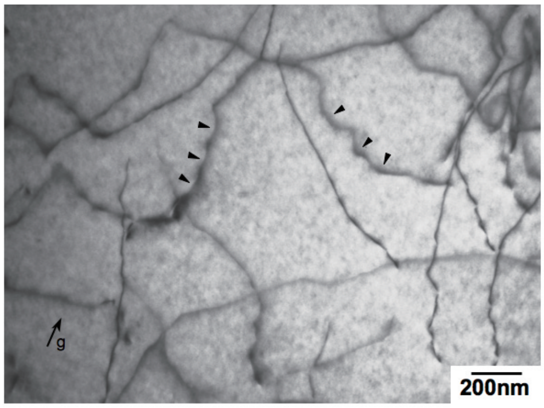


図３　クリープ変形を受けた耐熱マグネシウム合金 AX52 における透過型電子顕微鏡組織

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

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

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。

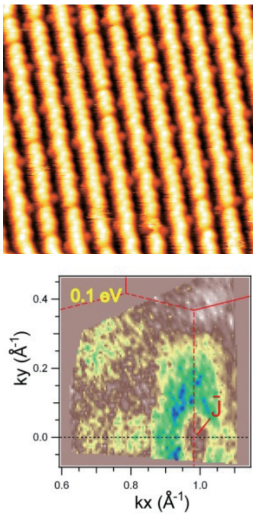


図1 （上）Ge(001) 基板上に1原子層分の Au を蒸着して得られた、1.6 nm 周期で配列した1次元原子鎖構造の STM 像。（下）角度分解光電子分光で調べた等エネルギー面は楕円形で、この系が異方的2次元電子系であることを示す。

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。

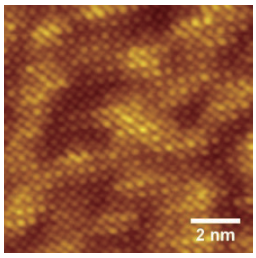


図2 Si(111) √3 × √3-B 基板上に成長した Bi(110) 超薄膜表面の原子分解能 STM 像。1つの輝点が Bi 原子に対応している。

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。

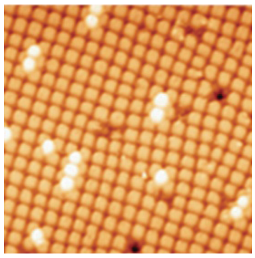


図3 Cu(001) 基板上に 3.5 nm 周期で正方配列した単原子層厚さの MnN 磁性ナノドット配列の STM 像。

おわりに

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。

林 重成 研究室

耐高温環境性に優れる耐高温酸化・腐食材料の開発

准教授
林　重成

はじめに

高温で使用される構造材料には、高温強度だけではなく、高温での過酷な環境に対して優れた耐性を保持させる必要があります。しかしながら、高温強度の向上と高温耐環境特性は、材料設計の観点からは多くの場合相反する要因が存在するため、両者を具備する高温構造用材料の設計は容易ではありません。特に､近年の省エネルギー化の要請から､高温材料の使用温度の高温化が進められており、要求特性はますます厳しくなっています。

当研究室では、耐高温酸化・腐食性を発現するメカニズムの解明といった極めて基礎的な研究から、実際のジェットエンジン等に搭載する材料の耐酸化性向上を目指した応用研究まで幅広い研究を行っています。

現在の研究内容と目指すもの

材料に高温耐酸化・腐食性を付与するためには、材料の表面に薄く、緻密でかつ成長の遅い保護性スケールと呼ばれる酸化スケールを形成することが必要です。多くの場合、保護性スケールは、合金中に添加される Al や Cr 等の合金元素が選択的に酸化されることにより形成します。従って、金属材料の高温酸化･腐食現象とは、一般的に雰囲気中の酸素や硫黄､水蒸気や炭酸ガス等の酸化･腐食性ガスとの化学反応（正確には電気化学反応）ととらえられますが、実際の耐酸化･腐食性材料の研究は化学反応だけでなく、合金中の元素拡散､析出相等の金属組織と密接に関連しています。そのため、本研究室では、材料物理化学の知識を中心として、合金学、相変態等を駆使しながら研究を進めることが要求されます。これは、高温での機械的特性と耐酸化性の両立の観点からも極めて重要な要件であり、材料学の知識と経験をを広く身につけることが可能です。

研究テーマについて

1．アルミナスケール形成におよぼす合金中の Cr の影響

多くの耐熱合金､超合金には Al や Cr が添加されています。この Cr の添加は炭化物や金属間化合物等の第二相、第三相の析出により高温強度を高めることを目的としていますが、耐熱合金に Al2O3 や Cr2O3 からなる保護性スケールを形成させることも目的の一つです。

これら元素は、機械的特性および耐酸化・腐食性の付与に不可欠な元素でありますが、これら元素の多量添加は材料の機械的特性を著しく低下します。従って、機械的特性を損なわず、かつ優れた保護性スケールを形成可能な、より少量の添加で保護性スケールの形成を目指さなければなりません。アルミナスケールの形成は、合金中の Cr により促進されることが広く知られておりますが、そのメカニズムに着いては明らかにされていませんでした。当研究室では、SPring-8 の高輝度な放射光を用いた in-situ 高温 X 線回折を駆使した検討により、アルミナスケールが初期にどのように形成し、その後の成長に何が影響するのか等の極めて基礎的な観点からアルミナスケール形成機構を詳細に検討しています。これまでに、合金中の Cr のアルミナスケール形成におよぼす影響が明らかになってきました。今後は、更なる研究を進めることにより、得られた研究成果から、新たな高温耐酸化性・耐食性を有する耐熱合金の設計指針を提案することを目指しています。

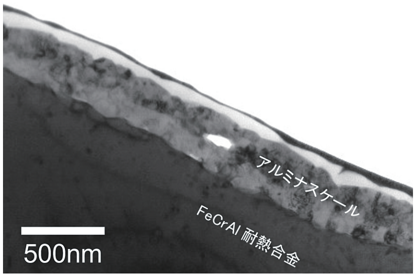


図１　FeCrAl 合金上に形成したアルミナスケール

2．アルミナスケール形成オーステナイトステンレス鋼

フェライト系の耐熱合金と比較してオーステナイト系の耐熱合金は高温での機械的特性に優れますが、より耐酸化性の高いアルミナスケール形成するためには、フェライト系合金よりもより多くの Al の添加が必要です。オーステナイト系合金では、Al の添加は高 Al 組成の金属間化合物相を形成してしまうことから、製造性および室温での加工性を著しく損なってしまうため、これまでアルミナスケールを形成するオーステナイト系のステンレス鋼の実用化は殆ど進んでいません。当研究室では、世界に先駆けて、有害な化合物相を形成しないオーステナイト系耐熱鋼を Cu を添加することにより開発しました。このステンレス鋼により、安価でかつ製造性に優れ、良好な高温強度を有する耐熱ステンレス鋼の実用化が期待されます。

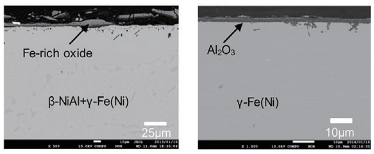


図１　FeCrAl 合金上に形成したアルミナスケール

3．蒸気タービン、ジェットエンジンタービンブレード用耐熱 TiAl 合金の耐酸化性向上

TiAl 合金は高い比強度を有し、これまで 600℃程度までの耐熱合金として回転部材等に用いられてきました。最近ではジェットエンジンへと搭載されており、今後ますます飛躍が期待される合金です。これまで製造性や高温機械的特性を向上させる合金設計法が提案され、様々な合金が開発されています。しかしながら、TiAl 基合金は高温での耐酸化性に著しく乏しく、これが TiAl 基合金の高温化を阻む最大の理由の一つとなっています。当研究室では、TiAl 基合金の組織と高温参加挙動の関係、添加元素が耐酸化性に及ぼす影響、水蒸気やその他の影響が酸化挙動に及ぼす影響を検討し、TiAl 基合金の耐酸化性を改善することを目指しています。

藤居俊之 研究室

材料組織の形成と発達機構の解明

URL 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。

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や図2に示す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。純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（図4）を用いた組織観察とその解析を進めています。

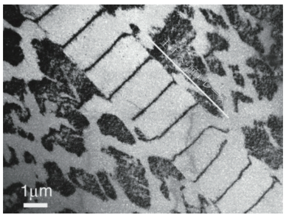


図1　Cu単結晶の疲労転位組織

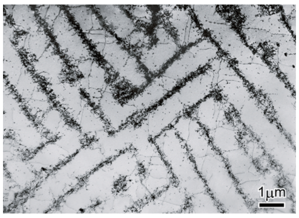


図2　3003Al合金中の疲労転位組織

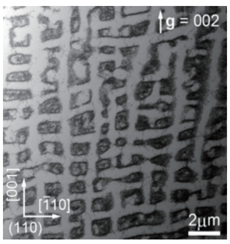


図3　超高圧電子顕微鏡による純Cuの転位組織写真

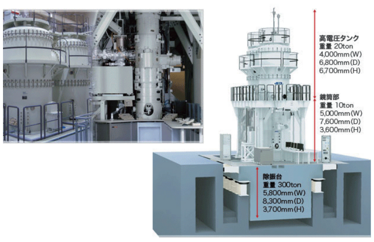


図4　超高圧走査透過型電子顕微鏡(名古屋大学)

また、企業との共同研究では、試料を数ミクロンまで薄くした銅箔の繰り返し変形挙動も調べています。箔の繰り返し変形では、バルクとは異なる変形挙動が現れます。厚さが極めて薄い金属材料の特異な繰り返し変形機構の解明にも取り組んでいます。

2．銅合金の微細組織と各種特性

パソコ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。

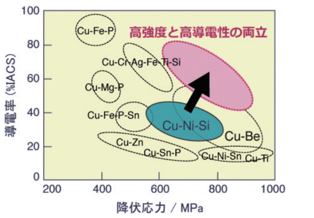


図5　Cu合金の強度と導電率の相関

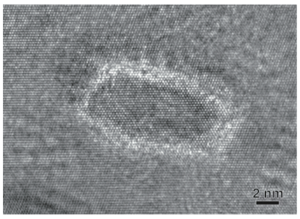


図6　Cu母相内に析出したCrナノ粒子

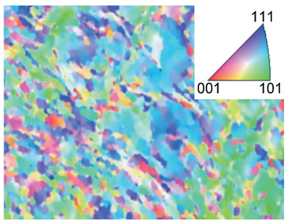


図7　Cuの超微細粒組織

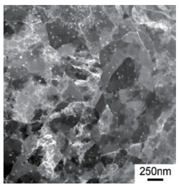


図8　超微細粒Cu母相内に分散したFe粒子

3．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線による金属材料の分析が可能であり、回折や散乱によって材料組織の平均情報を非破壊で取得することができます。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9　SPring-8 BL19B2

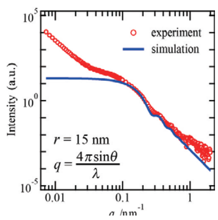


図10　Cu母相中のFe粒子の散乱プロファイル

細田秀樹 研究室

エネルギー・医療革新に向けた原子レベルの新機能性材料創製

URL http://mater.pi.titech.ac.jp/


教授
細田秀樹

助教
田原正樹

はじめに

当研究室では，周期律表上のほぼ全ての元素を使い，原子配列を制御しナノテクを駆使し，人や環境に優しく社会の役に立つ新材料創造･開発を行っています．特に，新形状記憶･超弾性材料の開発で知られています．これらの新材料の基礎物性研究から，グリーン･ライフテクノロジー，エネルギー，医療，低炭素化，ロボット技術などの応用展開まで含めた革新的基盤材料技術研究をしています．研究室は，材料コースとエネルギーコースに所属しますが，ライフエンジニアリングにも関係しますので，どれに興味のある学生でも歓迎します．

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，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

研究室としては，細田・稲邑研究室として一体運営しています．

当研究室は，教育組織である物質理工学院のみならず，東工大として，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の研究成果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．研究所としては，フロンティア材料研究所と未来産業技術研究所の両方に所属しています．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．

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．廃熱程度の温度差でエネルギー回収できる他，高齢者の心臓病や脳卒中などの血管疾患の治療機器用材料です．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新機能材料は当方が世界に先立ち開発した材料で，医療やエネルギー技術へ貢献しています．多数の新合金を発明し，多くの特許があります．

世界最先端研究として，筑波大，東北大，大阪府大，ワシントン大などの国内外大学，材料･医療企業と共同研究を行っています．世界をリードする研究として，JSPS NEXT，文部科学省科研費基盤研究 (S)，JST，福島県医療機器開発など多くの研究支援を受けています．

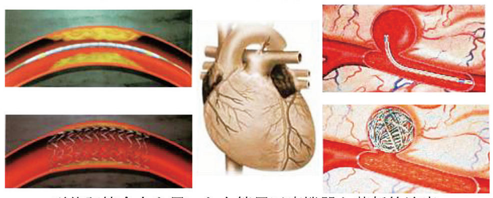
2．磁場駆動アクチュエータ材料・複合材料

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．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しています．科研費 (S) の支援を受けています．

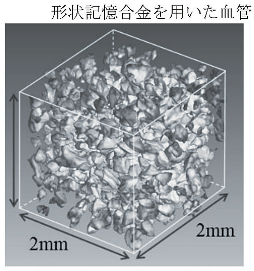
その他

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．学生が関与する特許も多数あり，2016 年 2 月には手島記念発明賞を受賞しています．研究室のポリシーは「よく遊び，よく学べ」で，見聞を広めるため，国内，国際会議，共同研究も多数あり，学生の受賞も多数あります．学生の就職も HP 記載のようにほぼ第一希望に就職しています．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

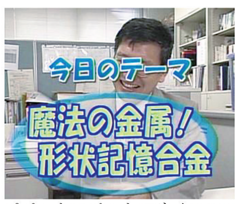
心臓や脳などの循環障害の治療



形状記憶合金を用いた血管用医療機器と革新的治療



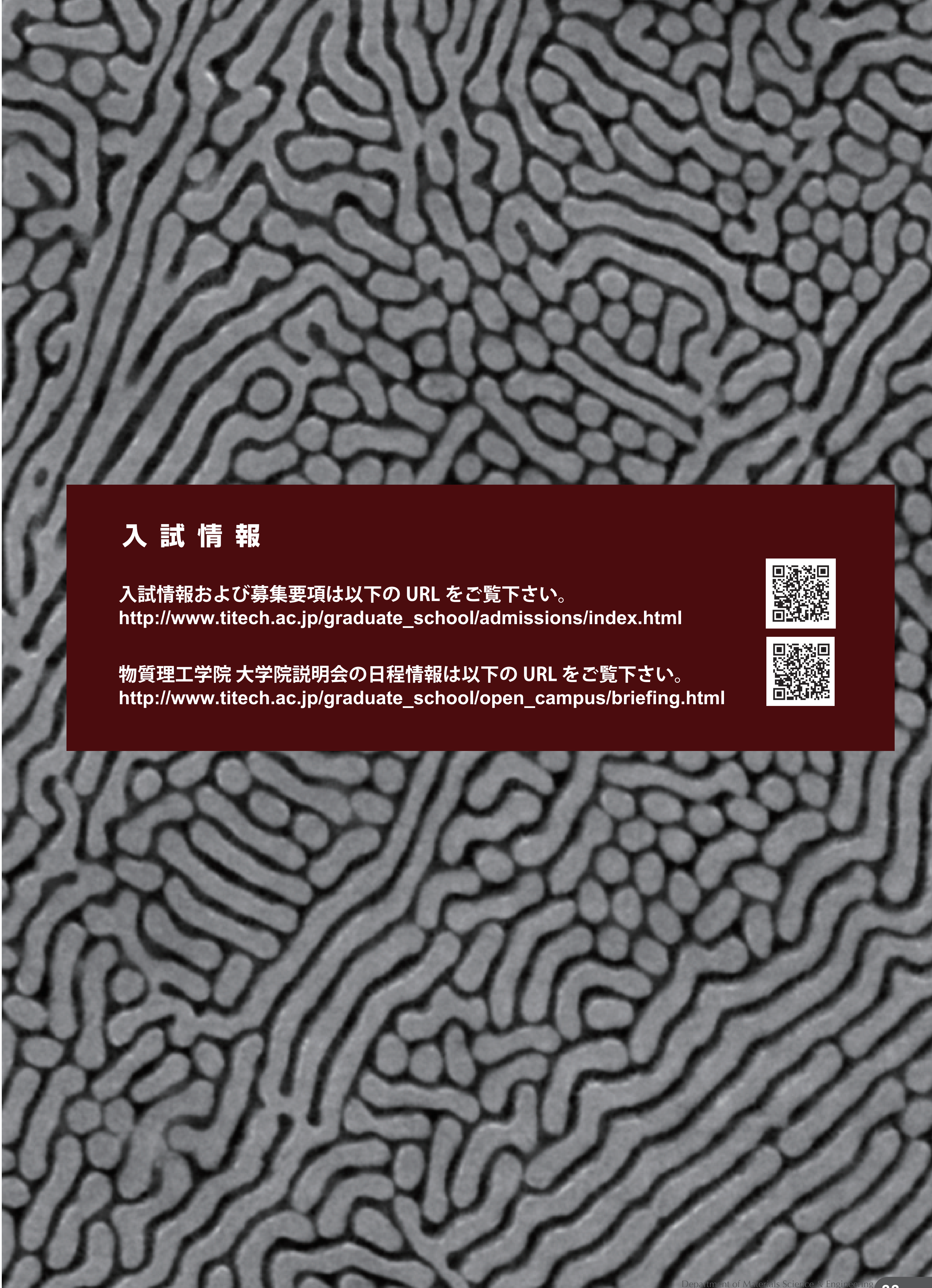
国際共同開発の磁場駆動材料の 3D 像とスペインでの国際会議




形状記憶合金
骨並みの柔軟性
東工大、骨折治療器具に

パペットマペットのサイエンスでしょ!?　　日経産業新聞

2015 年度細田・稲邑研究室一同　大別すると，細田側＝新材料開発，稲邑側＝組織・機能向上，の研究です．
細田は日本金属学会副会長をしています．研究プロジェクトも多く，研究室内，他大，学会，研究会の飲み会も多いかも



入 試 情 報

入試情報および募集要項は以下の URL をご覧下さい。
http://www.titech.ac.jp/graduate_school/admissions/index.html

物質理工学院 大学院説明会の日程情報は以下の URL をご覧下さい。
http://www.titech.ac.jp/graduate_school/open_campus/briefing.html

大岡山キャンパスマップ

南 8 号館

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
講　師	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
准教授	多田英司	404 号室
教　授	中村吉男	213 号室
教　授	西方　篤	405 号室
准教授	林　重成	505 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

教　授	小林能直	328 号室

すずかけ台キャンパスマップ

J1 棟

准教授	合田 義弘	314 号室
准教授	中辻 寛	411 号室

J2 棟

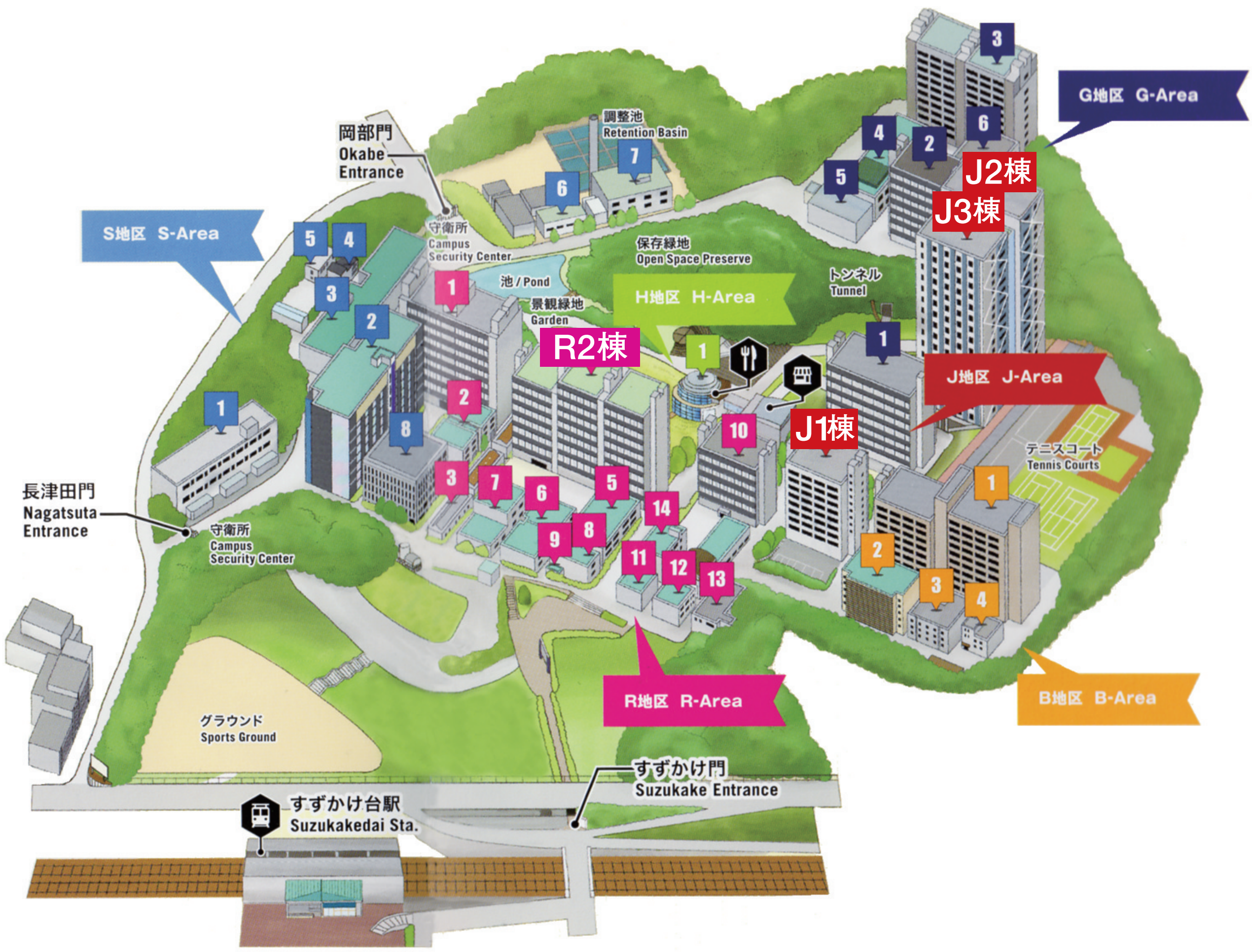
教　授	尾中 晋	1505 号室
教　授	梶原 正憲	1409 号室
講　師	三宮 工	1502 号室
准教授	寺田 芳弘	1404 号室

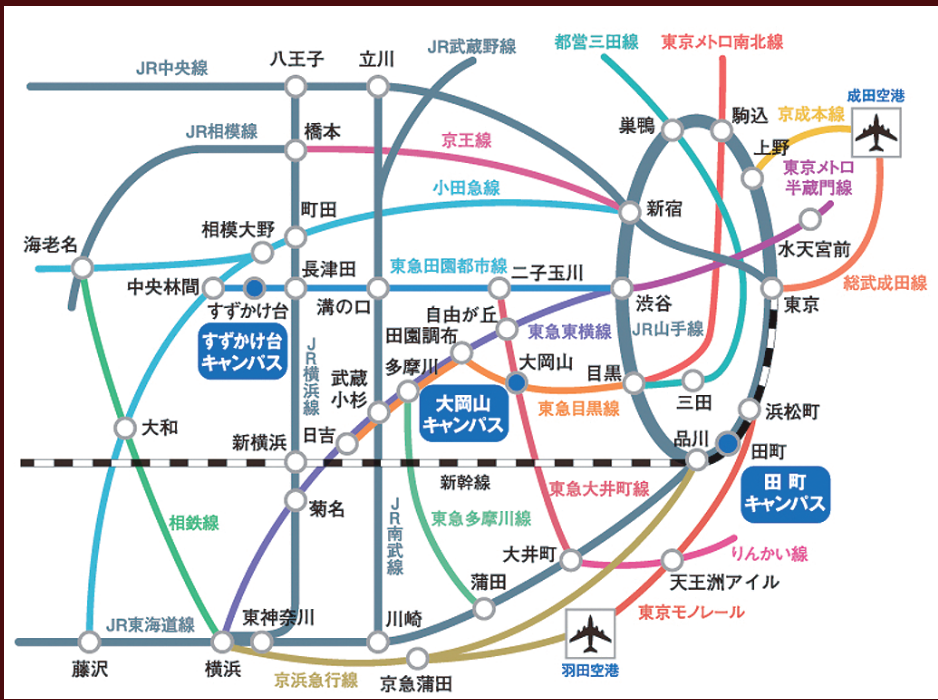
J3 棟

准教授	木村 好里	1516 号室
准教授	中田 伸生	1521 号室

R2 棟

准教授	稲邑 朋也	914 号室
准教授	曽根 正人	920 号室
教　授	細田 秀樹	916 号室





大岡山キャンパス　東京急行大井町線・目黒線（大岡山駅下車徒歩 1 分）
すずかけ台キャンパス　東京急行田園都市線（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
〒152-8552　東京都目黒区大岡山2-12-1

すずかけ台キャンパス
〒226-8502　横浜市緑区長津田町4259