

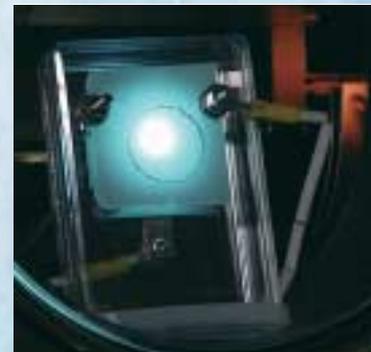
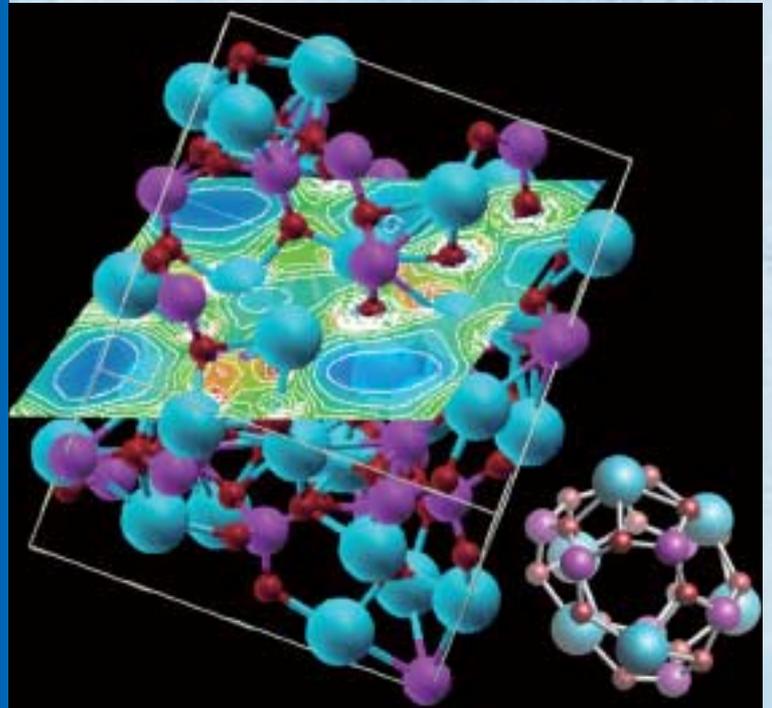
東京工業大学大学院総合理工学研究科

# 材料物理学専攻要覧

Department of  
Materials Science and  
Engineering

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering  
TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

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



# ～ナノが創る機能から宇宙開拓まで～



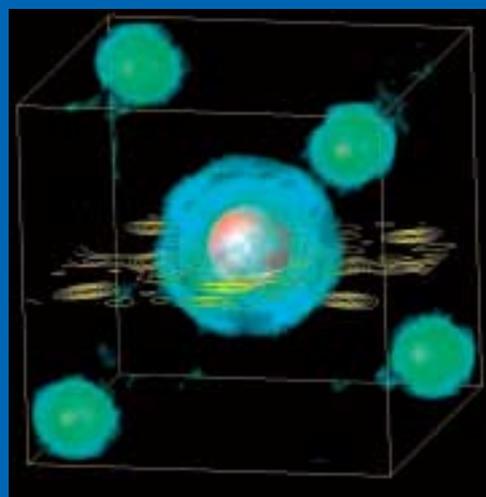
## 人を結ぶ材料

石器から青銅器、鉄器へと、人類の歴史は材料の歴史でもあった。21世紀に入った今、科学技術の進歩は更に加速し、飛躍的な発展を見せている。全長4,000mにも迫る橋、高さ500mを超える超高層ビルを見ても驚きを感じなくなったのはいつの頃からであろうか。家に帰ると、一世代前のスーパーコンピュータにすら迫る性能を発揮するパーソナルコンピュータが当たり前のように置いてある。通信媒体は銅線から光ファイバーに置き換わり、世界中の情報を瞬時に知ることが出来るようになった。変換効率の高い太陽電池や光触媒は、ますます深刻になっているエネルギー問題、環境問題を解決する救世主になると期待されている。

科学技術の革新的な発展の鍵を握っているのは材料である。新たに発見された基本原理や独創的なアイデアに基づいた「技術」を実現するためには、それに相応しい機能と性能を持つ材料が必要である。しかしながら、そのような都合の良い材料がすでに存在しているケースは極めて少ない。新しい技術の実現は、常に材料の開発に大きく依存している。

「材料を制するものが未来技術を制する」と言われるゆえんである。材料に求められる性能・機能は、年を追って多様化している。その要請に応えるには、材料学に対する深い基礎知識と異分野も見渡すことの出来る幅広い視野が必要である。

材料物理科学専攻は、材料物性、計測、構造解析、表面科学、材料設計などの材料物理科学の基礎に関する教育と最新鋭の研究設備を駆使した世界的水準の研究を通して、未来を創る意欲と資質を備えた研究者・技術者を養成する。



## 夢を拓げる材料

# CONTENTS

材料物理学専攻の組織	1
材料物理学専攻の指導教員および研究内容	2
材料物理学専攻の教育と研究	4
東工大材料系21世紀 COE プログラムにおける新しい博士課程コースの設置	5
教育および研究活動	6
尾中 晋 教授	6
加藤雅治 教授	7
梶原正憲 准教授	8
三島良直 教授	9
木村好里 准教授	10
平山博之 教授	11
熊井真次 教授	12
八島正知 准教授	13
林 克郎 准教授	14
須崎友文 准教授	15
伊藤 満 教授	16
谷山智康 准教授	16
佐々木聡 教授	18
川路 均 准教授	19
細野秀雄 教授	20
神谷利夫 准教授	20
吉村昌弘 教授	22
安田榮一 教授	23
阿藤敏行 准教授	24
肥後矢吉 教授	25
曾根正人 准教授	26
若井史博 教授	27
赤津 隆 准教授	28
高柳邦夫 教授	29
山本直紀 准教授	30
津崎兼彰 教授	31
富田章久 准教授	32
先輩の声	33
平成18年度修士課程修了生研究題目	34

## 材料物理学専攻の組織

本専攻は平成19年4月1日現在、2つの基幹大講座と8つの協力講座からなる。基幹講座は専任教員8名と客員教員（連携）5名、協力講座は合計15名の教員から構成されている。

講座名	分野名	教授	准教授
材料構造機能	複合物性	尾中 晋	
	メゾスコピック	加藤 雅治	梶原 正憲
	構造機能特性	三島 良直	木村 好里
	材料応答 [連携講座]	津崎 兼彰 内海 研一	
量子表面	表面物質	平山 博之	
	非平衡相	熊井 真次	八島 正知
	量子材料 [連携講座]	日比野浩樹	富田 章久 蟹澤 聖
低負荷物質合成			林 克郎 須崎 友文
超環境物質合成		伊藤 満	谷山 智康
精密構造解析		佐々木 聡	川路 均
電子活性物質		吉村 昌弘	神谷 利夫
相乗機能物質		安田 榮一	阿藤 敏行
材料機能評価		肥後 矢吉	曾根 正人
材料構造設計		若井 史博	赤津 隆
物質フロンティア		細野 秀雄	

専攻ホームページアドレス：<http://www.materia.titech.ac.jp/>

# 材料物理学専攻の指導教員 および研究内容

頁	指導教員	教員室	内線 E-mail	研究内容
6	教授 尾中 晋	好奇心から始めよう		材料の力学物性、複相材料の高強度化、材料組織の形成と遷移、変形と破壊の理論解析（マイクロメカニクス）
		J2-1505	5664 onaka	
7	教授 加藤雅治	「優しさ」のための「なぜ？」を追求する		機能及び構造材料の組織と性質の関係、力学的性質と相変態、微粒子や薄膜の材料科学
		J2-1407	5633 kato	
8	准教授 梶原正憲	環境と調和する新材料の開発		電子デバイス用導電性合金の開発と評価・解析、反応拡散による超伝導合金の開発と評価・解析、環境配慮型合金の開発と評価・解析
		J2-1409	5635 kajihara	
9	教授 三島良直	エネルギー有効利用技術のための材料開発		金属間化合物の組織・構造制御による耐熱構造用材料ならびに熱電半導体の材料設計
		G3-522	5612 mishima	
10	准教授 木村好里	地球に優しく材料の機能をデザインする		廃熱を電気に一熱電半導体の高性能化、信頼性と性能の向上一耐熱合金の強靱化、組織制御による材料設計一相平衡と拡散
		G3-518	5495 kimurays	
11	教授 平山博之	Wave Function Engineering		表面界面の構造と局在電子状態、ナノ構造による量子閉じ込め
		J1-409	5637 hirayama	
12	教授 熊井真次	強くて優しい社会基盤材料をつくる		金属材料の力学的特性（強度・疲労・破壊）と製造プロセス・組織との関係、リサイクルと環境配慮型材料設計
		G3-620	5622 kumai	
13	准教授 八島正知	エネルギー・環境・バイオ・電子材料の結晶構造と電子を調べる		高温での構造物性／結晶構造解析、中性子／放射光 X 線回折／散乱、無機系新素材
		J2-1403	5630 yashima	
14	准教授 林 克郎	環境と資源の世紀のための材料戦略		無機結晶の機能化、固相一気相電子・イオン輸送、活性陰イオンや水との反応を利用したプロセス開発
		R3-303	5134 hayashi	
15	准教授 須崎友文	セラミックス界面工学の構築		セキュアマテリアルの物理と応用、酸化物界面工学、光電子分光
		R3-305	5360 susaki	
16	教授 伊藤 満	酸化物の新機能探索とスピエレクトロニクス		化学設計による電子伝導性、強磁性、強誘電性およびイオン伝導性酸化物の開拓
		J2-703	5354 itoh	
16	准教授 谷山智康	微小領域でスピンを操るースピテクノロジーー		ナノ・マイクロ領域で発現する新奇磁気物理現象の探索、磁気・伝導現象、スピエレクトロニクスデバイス
		J2-707	5632 taniyama	
18	教授 佐々木聡	身近な材料で自然の世界を覗く		構造物性と電子磁気状態、放射光 X 線の回折散乱分光、計算物理
		J1-508	5308 sasaki	
19	准教授 川路 均	機能性物質の相転移機構を探る		乱れた構造を持つ物質における相転移現象、機能性物質の物性と構造の相関
		J1-701	5313 kawaji	

頁	指導教員	教員室	内線 E-mail	研究内容
20	教授 細野秀雄	自分たちが創った材料で世界を席巻する		
		J1-606	5359 hosono	透明酸化半導体 (LED、磁性半導体、ディスプレイ)、 自然ナノ構造を活用した機能開拓 (触媒、発光、半導体)、 機能材料の電子状態の測定と解析 (光電子分光、パルス ESR)
20	准教授 神谷利夫	酸化物特有の機能を活かした新半導体デバイスの開発		
		J1-615	5357 kamiya	半導体物性・デバイス (FET、FED、ナノデバイス)、 計算機シミュレーションによる材料解析・設計
22	教授 吉村昌弘	世界の常識を超えるセラミックスプロセスの提案		
		R3-501	5323 yoshimura	ソフトプロセス、ソフト溶液プロセス (環境調和型高性能セラミックスの開発)
23	教授 安田栄一	マクロからナノでの複合化で新しい材料開発		
		R3-602	5317 yasuda	セラミックス系複合材料とカーボンアロイの開発
24	准教授 阿藤敏行	ナノスケールで起こる物質変化のリアルな描像		
		R3-310	5393 atou	固体化学、超高压力、相転移、衝撃圧縮
25	教授 肥後矢吉	ナノ・マイクロで創造する新しい MEMS 材料の世界		
		R2-918	5044 higo	方位制御ならびに自己組織化ナノ構造材料の開発とその評価法の開発
26	准教授 曾根正人	MEMS 用超微細システムのための材料開発とその評価		
		R2-918	5043 sone	MEMS 用超微細システムのための材料製造プロセス開発、それにより得られた材料の評価法の開発
27	教授 若井史博	ナノ・マイクロ世界の驚きを求めるダイナミック構造設計		
		J1-612	5361 wakai	セラミックス超塑性と粒界ネットワーク・ダイナミクスが切り拓く21世紀のセラミックスの世界
28	准教授 赤津 隆	局所高応力場で見るセラミックスの破壊と変形		
		J1-506	5336 akatsu	セラミックスおよびセラミック複合材料の破壊と変形
29	教授 高柳邦夫	大岡山 本館124	03-5734-2078 takayanagi	固体表面とナノスケール物質の構造、量子化伝導、電子状態の研究
30	准教授 山本直紀	大岡山 本館135	03-5734-2481 yamamoto	電子顕微鏡、STM による半導体ナノ構造の発光解析と表面光物性
31	教授 津崎兼彰*	G3-514	5621 tsuzaki	高強度鋼の組織と強度、高強度材料設計、低環境負荷型材料設計、水素脆化、 ナノ組織解析
32	准教授 富田章久*		tomita	光による量子情報処理とそれに用いる半導体ナノ構造の光物性・デバイス

氏名右上に \* 印のある教員は、学生の配属は原則として博士後期課程からとする。

E-Mail アドレスは、上記のローマ字名に「@materia.titech.ac.jp」を付け「hirayama@materia.titech.ac.jp」のようにする。

また、電話番号は上記の内線番号に「045-924」を付け「045-924-5637」のようにする。

専攻ホームページアドレス：<http://www.materia.titech.ac.jp/>

# 材料物理学専攻の教育と研究

## ●教育・研究の理念

- 1) 旧来の物理学、金属学、応用化学などの区分を飛び越え、様々なバックグラウンドを持ったスタッフと学生諸君が一丸となり、学際的な視野から新しい材料科学の領域を切り開く。
- 2) 能力と意欲に溢れた学生諸君を、物質・材料の物性に対する深い知識を身につけ、新しい物性を予測的に材料開発が推進できる若い研究者、技術者に育て、我国の科学・技術の根幹を担う人材として材料科学技術開発の最前線に送り出す。

## ●具体的な指針

- 1) 学生諸君が将来、材料科学技術の最先端で学際的な研究開発を行う時に必要な固体物性、金属強度、化学熱力学などの基礎、コンピューターによる物性予測、および国際社会で不可欠な英語プレゼンテーション能力を系統的なカリキュラムの中でしっかり身につけさせる。
- 2) 各研究室での材料科学の最先端の問題に関する修士論文、博士論文研究を通して、物質・材料に対する知識を、現実のさまざまな具体的問題を解明、解決できる能力に昇華させる。

## ●修了後の進路

最近4年間の修士課程修了者の進路

平成18年度 修士課程修了生 (予定)	平成17年度 修士課程修了生	平成16年度 修士課程修了生	平成15年度 修士課程修了生
JFE スチール TDK いすゞ自動車 (3) インクスエンジニアリングサービス キヤノン (2) コニカミノルタホールディングス コマツ シマノ シャープ (2) セイコーエプソン ダイキン工業 トヨタ自動車 フジクラ ブリヂストン ボッシュ 丸文 京セラ 古河電気工業 三菱マテリアル 三菱重工業 (2) 三菱電機 住友生命保険 昭和電工 松下電器産業 松下電工 信越化学工業化学 新日本製鐵 (3) 大同特殊鋼 大日本印刷 (2) 東芝 凸版印刷 (2) 日鉱金属 日産自動車 日本精工 日野自動車 富士写真フイルム 豊田自動織機 (2) 博士課程進学 (3)	石川島播磨重工業 富士重工業 日野自動車 (2) フジクラ (2) 日産自動車 新日本製鐵 大同特殊鋼 三菱電機 東海カーボン NOK (3) 東陽テクニカ 中学校教員 トヨタ自動車 富士通 ブリヂストン TDK 三菱重工業 神戸製鋼所 村田製作所 東陶機器 本田技研工業 (2) 凸版印刷 東邦テナックス 材料物理学専攻 コニカミノルタ 三菱化学 旭硝子 (2) 東洋製罐 材料物理学専攻 大日本印刷 セイコーエプソン 松下電器産業 富士通日立プラズマディスプレイ 豊田自動織機 日立製作所 川崎重工業 日本ビクター ルネサステクノロジ YKK 山陽特殊製鋼 博士課程進学 (12)	トヨタ自動車工業 (2) 本田技研工業 (2) 三菱重工業 スズキ (2) 日野自動車 川崎重工業 豊田自動織機 帝国ビストンリング シャープ (2) 松下電器産業 エルピーダメモリ ローム (2) 富士通 富士電機 東芝 ソニーLSI デザイン 横河電気 NEC エレクトロニクス 日立製作所 日立電線 新日本製鐵 住友金属鉱山 神戸製鋼所 日本軽金属 YKK AP NTN 東芝セラミックス 旭化成エレクトロニクス 日本特殊陶業 三菱化学 東レ 横浜ゴム 凸版印刷 共同印刷 日本写真印刷 アクセンチュア アルバック 東海旅客鉄道 ボッシュオートモーティブシステム National Research Center in Egypt 博士課程進学 (5)	三菱重工業 本田技研工業 富士重工業 石川島播磨重工業 キヤノン 富士通 シャープ 東芝 ローム ルネサステクノロジ 富士ゼロックス 日本フィリップス 古河電気工業 東京電気工業 新日本製鐵 神戸製鋼所 伊藤忠商事 住友金属工業 大同特殊鋼 帝人 東レリサーチセンター INAX ブリヂストン 三菱マテリアル 京セラ 日本特殊陶業 共同印刷 凸版印刷 武蔵エンジニアリング コーエー イビデン タムロン ミットヨ JR 東海 材料科学技術振興財団 博士課程進学 (15)



# 東工大材料系21世紀 COE プログラムにおける新しい博士課程コースの設置

東京工業大学の材料系4専攻（材料物理学専攻、物質科学創造専攻、材料工学専攻、有機高分子物質専攻）が共同提案した「産業化を目指したナノ材料開拓と人材育成」は、平成14年度に文部科学省が募集した「21世紀 COE プログラム」に採択されました。このプログラムでは新しい博士後期課程に2つの新しいコースを設置し、4専攻の博士後期課程への進学者のなかから志望者を募り、選抜試験を行ってこのコースの履修資格を与えています。このコースへ進んだ学生には年間100万円程度のRAが支給される他、海外研修（3～6ヶ月）の経費補助等の特典が与えられます。

## 1) プロジェクトマネージング (PM) コース

産学連携ができる実践的な人材や、新産業・ベンチャービジネスを起業するような人材（博士）育成を目標にするコースです。ビジネス概論やビジネス英会話などの科目を必修とし、ベンチャー企業家や金融の現場で活躍中の人材を客員教授として迎えて、産業界の空気を生で感じられるカリキュラムを用意しています。

## 2) ナノマテリアルイニシアチブ (NI) コース

博士課程進学者の中から基礎力に優れ、研究への意欲と計画において卓越した学生を選抜して海外研修や産業界インターシップを実施して、より広い研究眼を持てる人材を育成する専門分野に特化したコースです。

第一期生は PM コース7名、NI コース6名で始まり（平成15年度）、すでに博士学位取得者も誕生しています。

詳しくは、東工大材料系21世紀 COE プログラムのホームページ <http://www.coe21.msl.titech.ac.jp/>、PM コース専用ホームページ <http://www.pm-titech.com/> をご覧下さい（紹介ムービーもあります）。

**Techno online**

東京工業大学大学院の材料系四専攻は四月、教育面での新機軸として高度な科学知識と経営センスを併せ持つ人材育成を目指すプロジェクト・マネージング (PM) コースを博士課程に開講した。一口でいえば、材料科学技術版ビジネススクールとして企業の将来のCTO（最高技術責任者）を育てるのが狙いだ。

従来の博士課程は事実上、大学や公的研究機関などの研究者・教員を育成するプログラムだった。これに対して、「企業向けの人材育成を目指した点が新しい」と、材料系四専攻COEプログラム拠点リーダーを務める応用セラミックス研究所の細野秀雄教授は説明する。

博士課程の学生は多くが、企業で応用研究に従事するよりも、大学などで自分の好奇心を満たす基礎研究の基礎研究に従事したいと考えて進学している。このため、カリキュラムも大学院の後継者を育てる内容になっていた。

新コースのカリキュラムは、技術評価や事業計画向けの専門科目を設けた点が特徴。「ビジネス概論」「実践

**東工大の新博士課程 企業の「CTO」を育成**

「PM」は、博士の学位レベルの高度な科学知識を駆使して技術評価や事業計画を立案できる経営センスを持つ人材を、産業界に送り出す。似たような人材育成プログラムとしては、MOT（総合経営）コースが最近いくつか設けられている。

新コース主任の三島昌直教授は「MOTコースは修士コースであり、研究者としては発展途上の人材を育成する。PMコースは修士を修了した出来上がった研究者を鍛え、科学技術と経営センスを併得してもらう」と、違いを解説する。新コースで学んだ人材が取材対象となる日を得た。

(日経BP社編集委員 丸山正明)

PM コースの紹介記事（日経産業新聞 平成15年8月5日付 日経BP社 丸山正明記者執筆）

## ◆ 尾中研究室

好奇心からはじめよう

<http://www.materia.titech.ac.jp/onaka.html>



尾中 晋 教授

### はじめに

ライト兄弟の弟のほうについての話したが、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」と質問されて、「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」と答えたそうである。これはもう100年も前のことだが、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、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。つまり、省エネルギーにつながる超高温材料や軽量高強度材料、環境適応型材料などを創製する試みであっても、モデル材料を用いた実験によって材料のなかで起こる現象と外的因子との関連性を先ず良く調べ、次いでそれらを理論的に考察し、得られる普遍的な知見を材料設計に応用するというやりかたである。このような研究手法にはひろがりがあり興味深い。例えば先人の研究によって、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。例えば、図1は金属

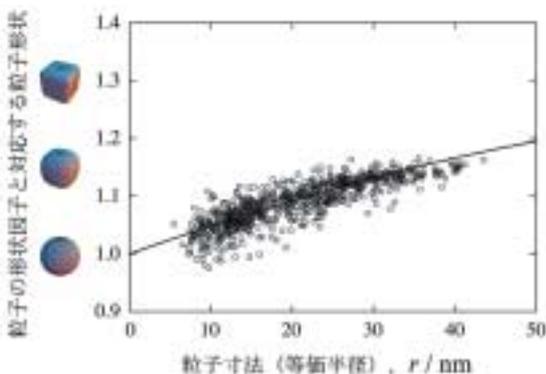


図1 銅合金中の微細な析出物の球から立方体への形状変化

中の析出物の形状が球と立方体のあいだで変化する現象を解析した結果であるが、微細組織の形成と遷移は形の科学としても面白い。図1に関する実験と計算の内容は研究室のホームページに詳しく書いている。図2のドーナツ型粒子なども扱っており、微細組織が材料の物性におよぼす影響を多面的に考察している。

#### 変形・破壊の速度論と構造材料の高強度化に関する研究

一昔前の探偵小説の一節、「タフでなければ生きていられない」とは人についてのことだが、材料も同じである。何かをしっかり支えること、これが材料に対する主要な要求になる場合が多い。

材料の変形と破壊を実験的・理論的に考察している。特に高温域における現象は、材料中の活発な固体内拡散によって様々に変化する。また、変形によつての思いがけない組織変化やその組織変化を原因として性能の向上が起こることもある。変形と破壊の素過程が理解できるような実験を、それに適した試験片の作製を含めて工夫しながら行っている。

#### 材料の力学物性についてのマイクロメカニクスによる解析

マイクロメカニクスは、複相材料を構成する各相の強度や形状、割合が材料全体の力学的状態におよぼす影響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・物質の勉強と研究に関心を寄せる諸君の選択は間違っていない。さあ、好奇心から始めよう。

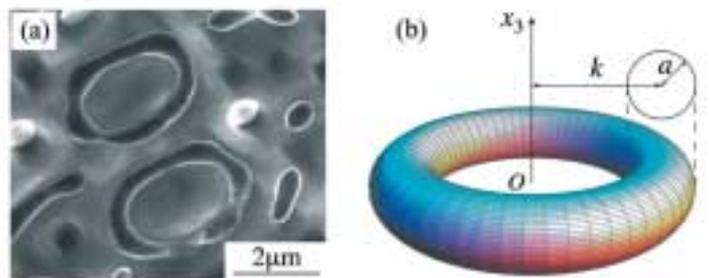


図2 銅合金に含まれる (a) ドーナツ型第二相と (b) その第二相をマイクロメカニクスで考察する場合の円環体形状

## ◆加藤研究室

「優しさ」のための「なぜ？」を追求する

<http://www.materia.titech.ac.jp/kato.html>



加藤 雅治 教授

現代の材料開発は、人間、環境、自然への「優しさ」を重視するものでなくてはならない。そのためには、基礎的な見地から材料機能発現の本質を知ることが大切で、基礎と本質を知れば応用への道が開けて、「優しい」材料開発へのブレークスルーが期待できる。

加藤研究室は、学部で様々な専門（物理、化学、材料、機械、等）を学んだ学生の集団から成り、HPにあるような研究室連合も構成して、材料の「なぜ？」を解明すべく種々の側面から材料の「組織と性質の関係」（structure-property relationship）に関する研究を行っている（図1）。扱う材料は、複相合金（複合材料、分散強化合金）、鉄鋼材料、高強度高導電性材料、形状記憶材料、微粒子・薄膜材料、単結晶モデル材料など、多岐に亘っている。

### 研究体制と研究室

当研究室は、実用材料やモデル材料を用いた実験的研究と、物性物理学、熱力学、マイクロメカニクス、速度論等を駆使した理論的研究を融合させて「なぜ？」に答える迫力ある研究成果を生み出している。“ISI Highly Cited Researchers”（世界的に論文引用回数が多い研究者）の一人に認知されている加藤教授は、本学の学生相談室長として多種多様な学生相談を引き受けた経験も活かして、学生の立場に立った指導を旨としている。大学院では実力と同時に人間としての「優しさ」も培いたいと願う欲張りな人には最適な研究室で、加藤研の卒業生は社会の様々な分野で幅広く活躍している。

### 微粒子や薄膜の材料科学

例としてCuとFeという、ありふれた2つの金属を考えよう。Cu単結晶の基板の上にFe薄膜を成長させると、Fe膜厚が薄いときはfcc結晶であるが、厚くなるとbcc結晶に変化する。また、図2はCu中のFe微粒子の電子顕微鏡写真で、上下に線状に見える転位

という格子欠陥上に並んだ粒子のみがbccで、他はfccである。「なぜこうなるのだろうか？」と考えると、さまざまな興味が湧く。微粒子や薄膜では、バルク材料とは異なる結晶構造や準安定相が出現し、それが原因となって特異な性質を示すことが多い。本研究室では、ナノ・テクノロジー研究の基盤となることを目指して、微粒子や薄膜の「なぜ？」を実験的、理論的に解明する研究を行っている。

### 固相相変態に及ぼす外的因子の影響

「組織」には、材料を形成する「相」の分布状態によって決まるものがある。材料の使用目的に応じた最適組織を得るためには相変態を利用することが多い。拡散型（析出、スピノーダル分解など）、無拡散型（マルテンサイト変態など）を問わず、これらの相変態は外的因子（力、電磁場、温度、環境など）によって、熱力学かつ速度論的に影響を受ける。図2の例も、析出形態が転位の応力場という外的因子に影響されたものと考えられることができる。本研究室では、金属・合金の相変態に及ぼすこれらの外的因子の影響を探る研究も行っている。

### 複相および単相材料の転位組織と力学的性質の関連

「組織」のもう1つに、結晶材料中の欠陥の分布状態によって決まるものもある。材料を塑性変形させることによって、材料中には転位の集合による特徴的な組織形成が起こる。よく知られた金属疲労による破壊も組織形成と密接に関係しているはずで、「なぜ？」このような転位組織が作られるのであろうか、また、そのとき材料の性質はどう変わるのであろうか、を知ることは疲労現象の理解に必須である。本研究室では、実用材料はもとより、単結晶などのモデル材料も用いて各種力学的試験を行い、転位組織の形成過程と材料の性質および信頼性との関係を明らかにしようとしている。



図1 加藤研究室の概念図

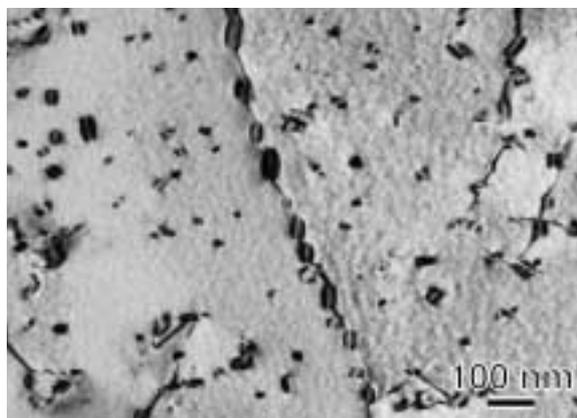


図2 Cu母相中および転位上に析出したFe粒子



図3 最近の単・共著書

## 梶原研究室

環境と調和する新しい導電性合金・超伝導合金の開発

<http://www.materia.titech.ac.jp/kajihara.html>



梶原 正憲 准教授

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。材料組織を変える一般的な方法は、高温における加熱処理である。このような高温加熱処理においては、材料組織の変化は拡散律速型反応によって通常進行する。このため、材料組織を制御し目的とする物理的性質を備えた新材料を開発するためには、材料中で進行する拡散律速型反応に対する理解が極めて重要である。

そこで本研究室では、材料組織制御の基本原則である拡散律速型反応に注目し、基礎学問の成果に基づく新材料の開発や評価・解析に関する実験的検討や理論的解析の手法による研究を進めている。以下では、本研究室における実験装置や最近の研究テーマ等について簡単に紹介する。

### 主な実験装置

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機；UNIX 系ワークステーション；画像処理コンピュータ等

### 最近の研究テーマ

#### ●電子デバイス用導電性合金の開発と評価解析

(1) 新しい無鉛ハンダ合金の開発：Sn-Pb 系ハンダ合金は、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、同ハンダ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ハンダ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-Pb 系ハンダ合金の有力な代替材料として、Sn-Bi 系、Sn-Ag 系、Sn-Cu 系、Sn-Zn 系等の種々の Sn 基無鉛ハンダ合金が提案されてきた。しかし、これら既存の Sn 基無鉛ハンダ合金を BGA (Ball Grid Array) 法による電子デバイスのパッケージ端子材料と

して使用すると、通電使用過程において端子接合部の電気的・機械的特性が経年劣化してくる。これは、通電時のジュール熱によって端子接合部が400K程度の温度に加熱され、Cu 基導電線のメッキ層である Au が端子材料母相の Sn と反応することにより、導電性や延性に乏しい Au-Sn 系の金属間化合物を生成することに起因している。このような現象に起因する組織変化の一例を写真に示す。そこで本研究室では、材料組織学的な手法を用いて、上記組織変化に起因する経年劣化の少ない新しい無鉛ハンダ合金の開発を進めている。

(2) 電子デバイス用リードフレーム Cu 基合金の材料組織学的性質：0.1~0.2mass%の微量の Cr および Zr を含む Cu-Cr-Zr 系合金は、高い導電性と優れた機械強度を兼ね備えた Cu 基合金として LSI (Large Scale Integration) チップのリードフレーム用材料等に利用されている。Cu-Cr-Zr 系合金の優れた機械強度は、Cr 固溶体相および Cu<sub>9</sub>Zr<sub>2</sub> 金属間化合物の析出・分散強化に起因している。本研究室では、Cr および Cu<sub>9</sub>Zr<sub>2</sub> の析出・分散強化の機構を理解するために必要な基礎的な知見の蓄積を目的として、透過型電子顕微鏡を主要な観察手段とする材料組織学的な研究を進めている。

(3) 短経路拡散に起因する高速合金化反応の観察と評価・解析：Cu 基導電性合金が通電環境下で加熱されると、中程度の温度域であっても粒界拡散等の短経路拡散に律速されて合金化反応が高速に起り電気特性の経年劣化が著しく進行する特異な現象の観察される場合がある。このような特異な経年劣化を回避し、耐久性に優れた Cu 基導電性合金を開発するためには、上記の高速合金化反応に対する理解を深めることが重要である。本研究室では、拡散誘起再結晶 (DIR) や拡散誘起粒界移動 (DIGM) に起因する高速合金化反応に注目し、新導電性合金の開発を目指した材料組織学的な研究を行っている。

#### ●反応拡散による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域で加熱処理すると、Nb 細線と Cu-Sn 合金母相が反応拡散し超伝導特性を有する Nb<sub>3</sub>Sn が接合界面より生成する。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挙動に対する材料組織学的な理解を深めることにより、優れた電磁特性を有する新しい超伝導合金の開発を目指している。

### 接合界面における組織観察

160°C (433K)



16h

127h

## ◆ 三島研究室

エネルギー有効利用技術のための材料開発

<http://www.materia.titech.ac.jp/mishima.html>



三島 良直 教授

21世紀を迎えエネルギーの有効利用と地球環境の保全を実現するための技術開発がその重要性を増している。発電技術を例にとろう。平成10年度における我が国の電力供給量は約9000億 kWh であり、電力源の構成比は化石燃料約51%、原子力約36%、水力・地熱等約13%となっている。現在の電力供給量の伸び率は年平均約2%であり、原子力への依存の大幅な伸びを期待できない状況では化石燃料を主体に考える他はない。化石燃料のうち石油専焼ベース用火力の新設は困難であり、燃料は天然ガスが石炭になる。したがって、これらをいかに効率よく、またCO<sub>2</sub>の発生を極力低減しつつ利用するかは地球規模で必要な革新技術であり、またその確立は非常に優先度が高いと言える。

化石燃料をいかに効率よくエネルギーに変換するか、またその際のCO<sub>2</sub>の発生量をいかに低減するか、の2つの課題は燃料の燃料温度を高めることで達成できる。すなわち次世代の複合サイクル発電用ガスタービンエンジンの熱効率はタービン入口ガス温度 (ITT) を1500℃とすると熱効率は53%、1700℃とすると65%となり、現在稼働中の火力発電設備の平均熱効率である約40%を遥かに凌ぐ。また平均熱効率以下の発電所を熱効率65%の次世代複合サイクルプラントに更新することによりCO<sub>2</sub>排出量の25%削減できることになる。この削減量は全CO<sub>2</sub>排出量の約4%にあたり、1997年の京都会議で決めた日本の削減目標6%の3分の2にあたる。

### 超耐熱金属材料の開発／高融点金属間化合物の材料設計

このような技術の開発には1500℃超の耐熱性を有するタービン翼など構造用金属材料の設計と実用化が不可欠である。現在その候補としてナノ微細組織制御した金属間化合物基多相合金が挙げられ、NbあるいはMoを主要構成元素とするいくつかの合金系を対象に米国と日本が中心となって開発競争を展開している。三島研究室では高融点金属NbやMoのシリサイドと一次固溶体を知識を駆使して微細な層状(ラメラ状)組織とし、その層間隔や配向を精確に

制御することにより1500℃以上で従来材料を遥かに凌ぐ合金の開発研究を行っている。

一方、化石燃料の有効利用と地球環境の保全に関する意識が急速に浸透しつつある今日、アメリカにおいてはすでに電力規制緩和にともなう電力市場のオープン化が実現し、ピーク負荷軽減対策や環境負荷低減の狙いから大略25MW以下の分散電源や地域ごとの発電と冷暖房システムをまかなうコージェネレーションが脚光を浴びている。コージェネレーションにおける分散電源としてはマイクロガスタービンエンジンが有効とされるが、問題点として発電にかかる熱効率が30パーセントであって大量の廃熱を伴うためこれを熱交換器によって有効に回収して温水などとして利用する必要があることが挙げられる。

### 廃熱を電気に／金属間化合物熱電半導体

マイクロガスタービンエンジンの廃熱を有効に利用する方法の一つとして熱電モジュールを通常の冷却水を用いる熱交換器と併用する複合発電方式が最適であると考えられる。そのためにはこれによって達成できる熱効率の向上が熱電モジュールのコストに十分見合う高効率低コストの熱電材料の開発が不可欠となる。

熱エネルギーを電気エネルギーに変換する熱電材料の多くは金属間化合物半導体である。これまで我々は種々の遷移金属元素のシリサイドについてゼーベック係数、電気伝導度、熱伝導度などの熱電特性にかかわる物性値を系統的に調べ、高効率熱電材料の設計指針を明らかにしてきた。例えば熱電素子としてまず価格が低廉の上環境負荷が低い元素から構成されるFeSi<sub>2</sub>やMnSi<sub>2</sub>を対象とし、化学組成と微視組織を最適化することによりその熱電性能を最適化する研究を展開し、また一方では次世代の高効率熱電材料として有望なPGEC (Phonon Glass Electron Crystal) 材料であるスクッテルダイト構造を持つIrSb<sub>3</sub>およびhalf-Heusler構造を持つTiNiSn等一連の化合物半導体について結晶構造、化学量論組成からのずれ、製造法や組織が熱電特性に及ぼす影響を調べて性能の最適化を図っている。



## ◆木村研究室

地球に優しく材料の機能をデザインする

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



木村 好里 准教授

人類は大自然から豊かな恩恵を受け続けている一方で、自らの英知と努力で培ってきた科学技術によって便利な生活を手に入れました。しかし現状のペースで過度に開発だけを進めていくと、代償として資源は枯渇し、地球環境は破壊されます。私たち研究室では、材料科学の立場から省エネルギーと低環境負荷に貢献できることを考え、高機能かつ高性能な材料をデザインして創り出すことを目指して研究を行っています。

### 1. 廃熱をクリーンな電気エネルギーに直接変換して回収する ～熱電材料（機能性材料）～

自動車、航空機、発電プラント、ゴミ焼却施設など、あらゆるところに廃熱が存在します。熱電発電は廃熱をクリーンで使いやすい電気エネルギーとして回収する技術であり、地球環境保全に貢献できます。毒性元素や希少元素を全く含まない環境に優しい熱電材料として、私たちは TiNiSn に代表される Half-Heusler 型化合物に注目しています。熱電材料の性能は温度  $T$  において無次元性能指数  $ZT = (\alpha^2 \sigma / \kappa) T$  で評価され、熱電能（熱起電力） $\alpha$  と電気伝導度  $\sigma$  を大きくし、熱伝導度  $\kappa$  を小さくすることにより  $ZT$  の値が向上できます。これらの物性値は独立に制御できないので、キャリア濃度の最適化により電気特性を改善し、 $\kappa$  の格子成分をフォノン散乱により低減することで熱電特性の向上を考えます。熱電特性は製造プロセスにも大きく依存します。Half-Heusler 型 (Hf, Zr)NiSn の単位胞ならびに出力因子（Power factor）の温度依存性を図 1 に示します。私たちは光学式浮遊帯域融合法（OFZ）を用いた一方向凝固によって、単結晶と単相合金の作製に初めて成功しました。Arc 溶解と Hot press で作製した合金は、性能を劣化させる共存相や微小き裂が存在するため低い出力因子を示します。OFZ 法ではゆっくり凝固させるため微小き裂など凝固欠陥を効果的に抑制でき、結果として 3～4 倍大きな出力因子が達成できます。つまり (Hf, Zr)NiSn に固有の優れた熱電特性を引き出すことが可能です。

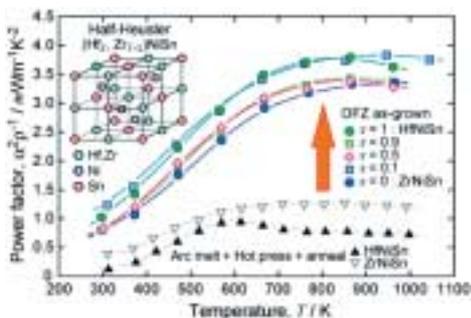


図 1 Half-Heusler(Hf, Zr)NiSn の単位胞および出力因子の温度依存性

### 2. 規則構造の変化と塑性変形の制御で強度と靱性を両立する ～耐熱合金（構造用材料）～

実用耐熱合金の耐用温度を向上させる、または新しい高融点材料で代替することができれば、高効率化によって省資源と低排出ガスを同時に実現できます。材料の性能向上だけでなく、信頼性と耐久性の改善、リサイクル性の確保も重要な課題です。一例として、私たちは Ni 基超合金の強化相である  $L1_2$  型  $Ni_3Al$  と極めて類似した

結晶構造を持つ  $E2_1$  型金属間化合物を強化相とする新しい耐熱合金の設計開発を行っています。 $E2_1$  型  $Ni_3AlC$ 、 $Fe_3AlC$ 、 $Ti_3AlC$  などは常温で高強度かつ脆性を示します。ところが  $Co_3AlC$  は室温延性に優れ、高温強度が高いという特異かつ魅力的な機械特性を有しています。 $Co_3AlC$  は C 原子の規則化により、逆位相領域（APD）の形成をともなって  $E2_1'$  型  $Co_3AlC_{0.5}$  に規則変態します。 $L1_2$  型と  $E2_1$  型の単位胞 4 個ずつが交互に隣り合わないよう配置した構造が  $E2_1'$  型であり（図 2a）、侵入型 C 原子を含まない  $L1_2$  型の最密面（111）の積層がすべり系として働くことにより優れた塑性変形能を示すと考えられます。 $E2_1'$  型への規則変態にともない形成する APD のサイズは熱処理により制御でき（図 2b）、機械特性だけでなく磁気特性にも大きな影響を及ぼします。

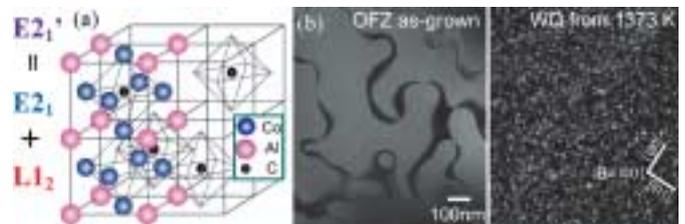


図 2  $E2_1'$  型  $Co_3AlC_{0.5}$  の規則構造と逆位相領域（APD）

### 3. 原子が活発に拡散する高温で材料を守り特性を維持する ～拡散障壁層（相平衡・拡散）～

耐熱合金はもちろん、発電用の熱電材料も高温域で使用するため、原子拡散を考慮することが材料設計において重要です。例えば耐酸化特性を改善するための手法として、 $Al_2O_3$  のような安定な酸化被膜を形成する Al 化合物を基材の表面に積層します。しかし高温域では Al が基材中に内方拡散し、基材の構成元素が外方拡散します。その結果、基材も耐酸化層である Al 化合物も本来の機能を維持できなくなります。そこで拡散を抑制するために拡散障壁層を挿入することが考えられています。融点が高く、酸素透過性が低い Ir に私たちは着目しています。Ir と種々の遷移金属元素 M の相互拡散係数の温度依存性を図 3 に示します。EPMA によって拡散対の濃度プロファイルを測定し、Boltzmann-Matano の解析法を用いて相互拡散係数  $D_{Ir-M}$  を導出します。M=Al, Ti の相互拡散係数が高融点元素 Mo, Nb の場合と同等に低い値を示すことはとても興味深く、Ir は Ti 系、Al 系合金に対する有効な拡散障壁層として利用できると考えられます。

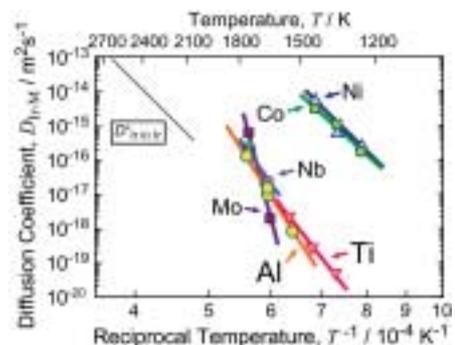


図 3 Ir と種々の遷移金属元素の相互拡散係数の温度依存性

## ◆ 平山研究室

Wave Function Engineering

<http://www.materia.titech.ac.jp/hirayama.html>



平山 博之 教授

表面科学の近年の進歩は急速である。現時点で固体表面を原子分解能で観測したり、表面上の個々の原子を操作することはさほど難しいことではなくなってきた。こうした表面科学の最近の進展は、1) ナノスケールの構造中に閉じ込められた電子状態を自由にデザインして新しい機能を持った材料を生み出す可能性や、2) 実用上は表面よりも遥かに重要ではあるが有効な研究手段がないために研究が遅れていた界面の研究に新展開をもたらしつつある。

我々の研究室では、これまでの表面科学研究に関する独自の研究の基礎の上に立って、表面研究の新しいフェーズである“ナノサイエンス”と“界面物理”に関する研究を進めようとしている。以下に具体的なテーマの内容を記す。

### 金属 / 半導体界面に局在した電子状態と量子閉じ込め

金属 / 半導体界面の電子状態はショットキー型半導体デバイスの動作を支配する重要な要因だが、数十年にもおよぶ膨大な研究によっても本質的な理解は得られていない。これは金属薄膜下に埋もれた高々数原子層厚さの界面の構造とそこに局在する電子状態を検出する有効な手法がないことが大きな原因となっている。本研究室では界面における混晶化が無視できる Ag/Si(111) 系をモデルシステムとして取り上げ、これまでその界面に局在する電子状態間遷移の光第二高調波発生 (SHG) 分光スペクトルによる選択的検出や、界面波動関数の symmetry gap による Si 表面上 Ag ナノ島内の界面垂直方向への Ag の sp 電子の量子閉じ込めに起因した SHG 強度振動の観測などに成功してきた。我々は波長可変パルスレーザーによる非線形分光と低温 STM を組み合わせ、これまでの研究のベース

の上にさらに、Ag ナノ島中への量子閉じ込め電子状態を利用したナノ構造サイズの選択的決定 (electric growth)、ナノ構造中量子状態を利用した走査トンネル顕微鏡 (STM) ベースの界面構造の原子分解能直接観察方法、ナノ量子構造を利用した表面分子選択触媒反応などへの研究の展開を図っている。

### 表面量子ナノ構造による電子状態のテーラーリング

Si 表面上に数原子層の Ge をエピタキシャル成長させると、その表面には表面原子再配列による 1 次元原子鎖と、それに直交する原子欠陥線が現れる。我々は分子線エピタキシャル成長装置 (MBE) を併設した低温 STM 装置により、この表面上で隣り合う原子欠陥線の間に挟まれた 1 次元原子鎖セグメント上には、1 次元量子閉じ込めによる電子定在波が発生することを STM 直接観察から発見した。現在我々はこの究極の超高集積度を持った Ge/Si(001) 表面上 1 次元量子井戸配列構造を舞台に、STM よりもはるかに正確に電子のエネルギーを特定できる dI/dV イメージングによる波動関数の直接観察、1 次元量子井戸配列による表面 1 次元原子鎖上電子の k-空間内の折り返しによるミニバンド形成、量子井戸配列方向へのナノ領域への電位分布導入とその STM ベースのバリア高さマッピングによる実証、電位分布による 1 次元量子井戸のシュタルククラダ状態の実現とその波動関数の直接観察、シュタルク状態をベースとする全固体量子計算機の CNOT ゲート実装などに向けた研究を展開している。

また最近我々は半導体表面上の金属層上で、STM 原子マニピュレーションを用いた人工量子ナノ構造の作成とその中にへの電子量子閉じ込め状態の STM ベース dI/dV イメージングによる直接観察とそこで作成した任意形状のナノ構造内電子量子状態の数値計算方法の開発に着手した。これまでにプレリミナリーではあるがナノサイズでは室温においても量子閉じ込めが発現できることを発見し、今後はさらに量子ナノ構造の設計の自由度を広げるべくこの研究を推進していく予定である。

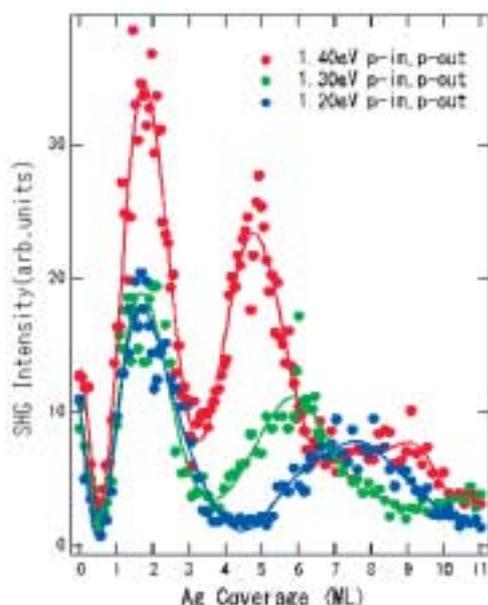


図 1 Si(111) 上 Ag 超薄膜からの SHG 強度振動  
励起光子エネルギー 1.4 (赤)、1.3 (緑)、1.2 (青) eV  
第 1 ピーク: Ag ナノ島の局在プラズモン共鳴  
第 2 ピーク: Ag 超薄膜中電子の量子準位間共鳴遷移

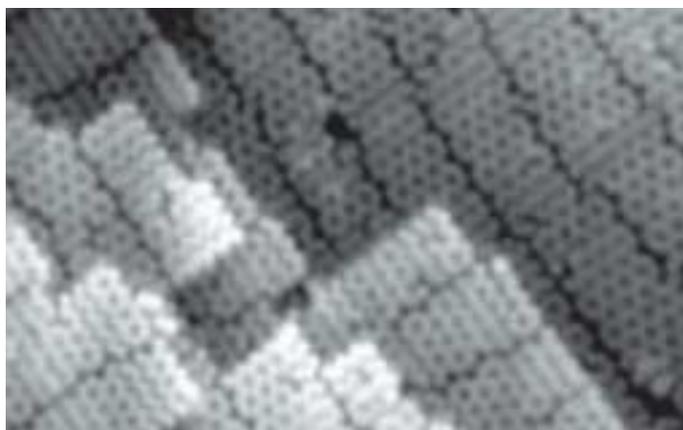


図 2 Ge/Si(001) 表面のダイマー列の STM 像  
非対称 (対称) ダイマーのジグザグ (直線) 1 次元鎖と、  
直交する周期的ダイマー欠陥列

## ◆熊井研究室

強くて優しい社会基盤材料をつくる

<http://www.materia.titech.ac.jp/kumai.html>



熊井 真次 教授

我々の研究室では、主として構造材料の組織と力学的性質について研究を行っています。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、さらに研究室のメンバーの一人一人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、明日を背負う技術者、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。我々の切り口は、材料の特性と組織ならびにその製造プロセス、これら三者の関係を材料科学・材料工学的観点から詳細に探求するところにあります。アルミニウム材料を中心に研究を進めていますが、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。ここでは、現在進行中の研究テーマのうち、代表的なものを紹介します。この他にも、構造用材料の疲労、微視組織制御による構造材料の力学的特性向上、金属表面のテクスチャと色と光沢等について研究を行っています。

### 1. 先端的手法による異材接合と接合材の界面組織のナノ構造解析と力学的特性評価

地球環境保全や省エネルギーの観点から各種輸送機器の軽量化の要求はますます高まっています。現在、軽量化の一方策として使用材料のマルチコンポーネント化への取り組みが行われていますが、この場合のキーテクノロジーになるのが異なった材料間の接合、すなわち異材接合です。我々の研究室では、電磁力を利用した衝撃圧着や摩擦攪拌を利用した固相接合法である FSW (Friction Stir Welding) 等の先端接合法を用いて、Fe と Al を初めとする異種金属の接合材を作製し、接合界面のナノ構造解析と力学的特性評価を行っています。例えば Fe と Al の電磁力衝撃圧着接合界面は、爆着による接合材の界面に見られるような波状形態を呈し、さらに中間層が認められますが、この中間層がアモルファス相やサブミクロンオーダーの Al 微細粒とその中に分散した IMC 粒の複相組織から形成されていることを明らかにしています。さらに電磁力による衝撃圧着は他の金属にも適用可能であることから、現在、Al/Ni、Al/Mg、Al/Cu 等の平衡状態図上に中間相 (IMC) が存在する系、Cu/Fe のように相互の固溶度が極めて小さい系、さらに Cu/Ni のような全率固溶する系等、特徴的な異材の組み合わせについて接合界面構造を解析し、接合メカニズムを明らかにするための基礎的研究を併せて進めています。

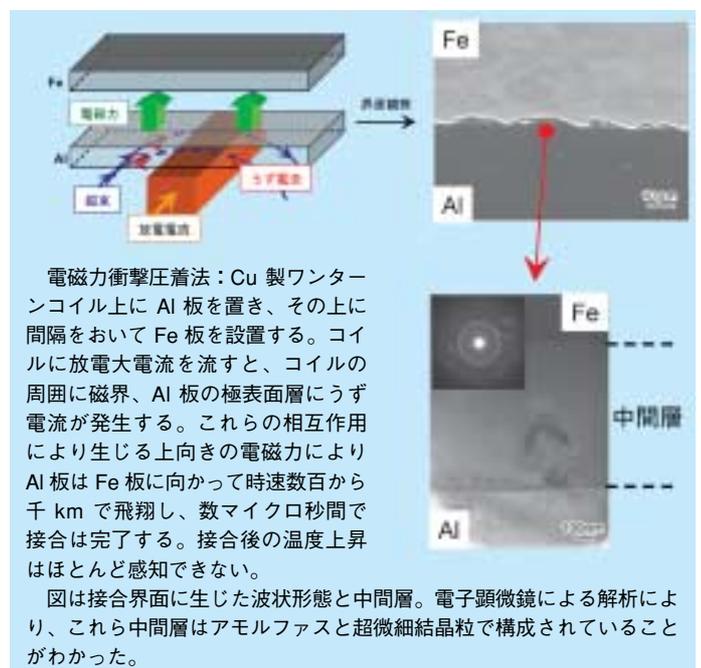
### 2. 高速双ロールキャスターによる Al 合金薄板の直接製造と急冷効果による特性改善

アルミニウム材料はリサイクルによる省エネルギー効果が大きいため、積極的に再資源化されていますが、たとえば自動車ボディー用材料として使用されている高品位の展伸材のほとんどは鋳物・ダイカスト用へとダウングレードリサイクルされているのが現状です。これは再生材の高純度化が困難であり、不純物を無害化してもとの高品位な材料へと転生させるためのプロセスがまだ確立され

ていないためです。さて、Al 合金薄板を高速度でスクラップ溶湯から直接製造し、急冷凝固による組織の微細化によって再生材の劣化した材料特性を改善することが可能であれば、資源循環性、省エネルギー性、材料組織制御等多くの点で多大な寄与が期待できます。我々の研究室では、スクラップ溶湯から高品質なアルミニウム材料板材を直接製造できる高速双ロールキャスターの開発を行って、アップグレードリサイクルのみならず新しい機能材料の作製を実現し、環境配慮型金属材料生産プロセスの構築に資することを目的に実験的研究を行っています。具体的には、双ロールキャストによる急冷凝固効果により鋳造用合金に加工性を付与することやリサイクル材の Fe 混入による特性劣化の防止に取り組んでいます。本研究は、(財)軽金属奨学会の課題研究や経済産業省の「3R システム化可能性調査事業」にも採択され、また軽金属学会論文賞、日刊工業新聞社賞を受賞しています。

### 3. 自動車軽量化のための先進 Al 合金の靱性評価

CO<sub>2</sub> 排出問題を初めとする今日の世界環境問題に対応するため自動車の燃費向上は急務で、そのため鉄鋼材料からアルミニウム材料へと材料置換が試みられています。しかしアルミニウム合金に関してはその力学的性質に関する基礎データ、特に破壊特性に関するデータが極めて少なく、その蓄積と整備が求められています。我々の研究室では、引裂試験法に着目し、引裂エネルギーを用いた鋳物・ダイカストの靱性評価法を確立し、これを利用して各種 Al 合金の破壊挙動の解明を行っています。これらの研究の一部は、関連学会の研究テーマにもなっており、他大学や企業と協力して研究を進めています。



## ◆八島研究室

エネルギー・環境・バイオ・電子材料の結晶構造と電子を調べる

<http://www.materia.titech.ac.jp/~yashima/Yashima-Jpn.html>



八島 正知 准教授

### 1. 研究のアプローチと特徴は？

現代社会には、エネルギー、環境、バイオなどの分野に多くの課題が山積みです。これらの課題の解決には優れた材料を開発することが必要ですが、そのためには材料の結晶構造（原子配列）と電子の状態を調べるのが鍵となります。当研究室では、近年発展が著しい精密構造解析技術を駆使して、実用材料の結晶構造と電子を調べています。材料の多くは高温で使用し、合成されますので、高温下に試料を保持したまま結晶構造と電子状態を実況中継（その場観察）して材料特性との関係を明らかにすること「高温構造物性」に力を入れています。そのために世界で唯一の高温構造解析システムをいくつか開発して（図1）、他人に真似できないオンリーワンの研究を行っています。装置開発という要素技術も確立して、これから飛躍する研究室です。

### 2. 研究室の構成と特徴

- スタッフ : 八島准教授、客員研究員1名
- 学生 : 博士課程2名、修士課程6名
- 出身分野 : 材料、物理、セラミックス、化学、応用物理、金属、機械
- 最近の就職先 : 東工大、ラシャヒ大、富士電機、京セラ、住友化学、シチズン、INAX、日本特殊陶業、富士重工、NEC 他
- 共同研究先 : 東大、東北大、東工大など約10大学、産総研、NIMS、KEK、原研などの研究所、民間企業数社
- 学会 : 結晶学会、セラミックス協会、金属学会、中性子科学会、物理学会、米国セラミックス協会、国際結晶学会など
- 使用装置 : 中性子回折装置（5台）、(放射光) X線回折装置（5台）、試料高温加熱装置（6台）、熱量計、熱膨張計、分光装置、試料合成加熱装置（4台）、ドラフト（2台）、パソコン（1人1台以上）等

### 3. 教育方針

世界トップレベルの研究を学生さん自身が(1)立案する、(2)実施する、(3)発表するという能力を磨きます。研究室のセミナーは(1)一週間に一度の文献紹介と研究報告、(2)一ヶ月ごとの英語による研究紹介を行っています（研究紹介の後の飲み会が楽しみ）。学生さん全員が国際会議で発表するようがんばっています（最近の修士学生の発表場所：香港、ハワイなど）。世界で活躍できる一流の研究者を育てるため、最先端の設備・巨大施設を使って解析装置の設置・光学系調整、データ測定、データ解析を行います。また、必要に応じて純度の高い試料を合成します。個々の学生が独立性を持って研究を行います。高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構、SPring-8など巨大施設では全員が協力して実験を行います。テーマの異なる学生・職員間でも忌憚のない自由な議論、情報交換をします。

### 4. 研究テーマ：

#### (1) 高温での精密構造解析システムの開発：優れた研究をするために、オンリーワンの装置を自分達で開発する

当研究室では、「高温での精密構造解析システム」をいくつも開発しました（図1）。このようなシステムは殆ど例が無く、世界初、日本初、オンリーワンを連発します。その結果、原子、イオン、電子の広がりや構造を、試料を加熱したまま正確に求めることができるようになり、高温での精密構造物性という分野を切り開きつつあります。

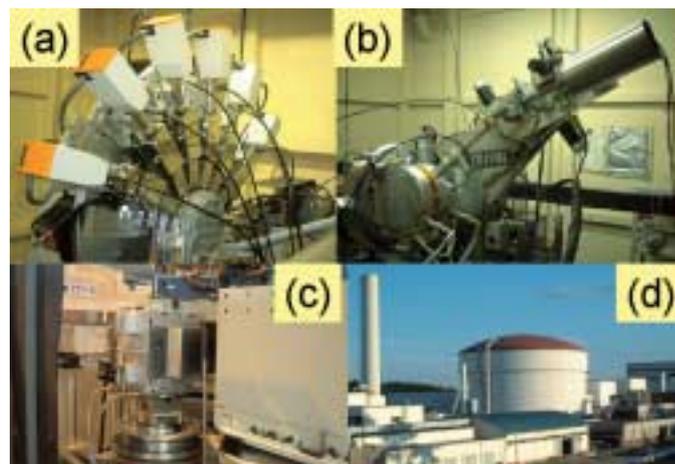


図1 八島研が中心になって開発してきたオンリーワンの高温精密構造解析システム群。(a)多連装放射光回折計に設置した新型高温加熱装置(4B<sub>2</sub>@KEK)。(b)高温高分解能放射光回折システム(3A@KEK)。原研の研究用原子炉(d)の高温中性子測定システム(c)(HERMES@東北大)。

#### (2) イオン・原子の位置と動きを調べる：中性子回折法

エネルギー・環境分野の鍵を握るのはイオン伝導体です。イオン伝導体におけるイオンの位置と動きを中性子と放射光を使って調べています。当研究室では、世界に先駆けてランタンガレート（図2(a)）、酸化ビスマス（図2(b)）、リチウム添加ランタンチタネートなどにおけるイオンの位置と拡散経路を決定することに成功しました。また、触媒材料などのナノ物質、強誘電体等における結晶構造と相転移も次々に明らかにしています。

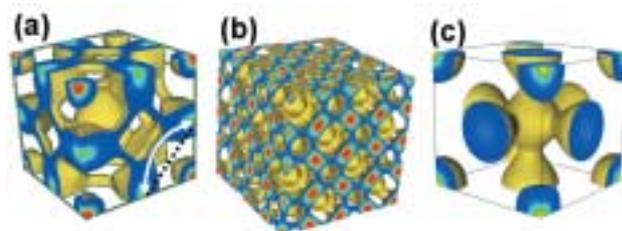


図2 当研究室が中心となって明らかにしてきた、(a)ランタンガレートにおける酸素イオンの伝導経路(白抜き矢印)、(b)酸化ビスマス固溶体における酸素イオンの伝導経路ネットワーク、(c)チタン酸カルシウムペロブスカイトにおける電子密度分布。

#### (3) 共有結合を可視化する：放射光回折法 超高分解能で複雑な先端材料も調べる

多くの先端無機材料では、イオン結合と共有結合を自在に組み合わせることでお好みの材料特性をつくり出します。一つの材料の中に共有結合とイオン結合がそれぞれどこにあるのか？可視化する研究を行っています。図2(c)には1401℃にペロブスカイト(CaTiO<sub>3</sub>)を保持したまま測定した放射光回折データをリートベルト解析と最大エントロピー法(MEM)により解析して得られた電子密度分布です。Tiと酸素原子の間の共有結合が可視化されています。必要に応じて、第一原理バンド計算も行います。図1(a),(b)の放射光回折装置は分解能が高く、バイオ系など複雑な先端材料の研究も推進しています。

## ◆ 林研究室

環境と資源の世紀のための材料戦略

<http://www.khlab.msl.titech.ac.jp/hayashi/>



林 克郎 准教授

### はじめに

近年ピークオイル説が叫ばれる様に、資源を存分に利用できない社会は、直ちではないにせよ必然的に到来します。また環境への配慮は、ますます強く要求される様になるでしょう。こうした「資源・環境制約社会」は、決して暗い未来ではありません。むしろ、科学技術の恩恵と精神的価値観がうまくバランスした幸せな未来が待っていると信じたいですし、そのための努力を始めねばなりません。

私たちは、材料研究の面から、資源・環境制約社会のために必要とされる材料や方法論を、稚拙であっても独自のものを提案したいと考えています。幅広く注目されるような材料研究ができれば、周辺分野も巻き込んだ貢献が可能でしょう。特に私たちが着目する対象は、典型元素の酸化物といった、非常にありふれた元素から構成される材料です。これらは、主に構造材としての用途以外に着目されることはありませんでしたが、元来これらの元素が持っている、水や、気相化学種と高い親和性を持つ特徴から、資源・環境制約社会に最適な機能性を引き出せる可能性に気づき始めました。これは、ナノ構造特性評価に必要な、高度な測定や計算技術が、近年になって利用し易くなっている事も、大きな要因です。

### 研究テーマ

#### 典型的な絶縁体に導電性を与える

キャストナブル耐火物として用いられる機能性セメント、カルシウム・アルミネートの中の一化合物、 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  (C12A7) に着目しました。組成から予想されるように、従来のものは透明な絶縁体ですが、私たちは、これを電子導電体に変化させる事に成功し、軽金属酸化物で初めて得られた導電性として、2002年に *Nature* 誌に発表しました。この結果は、絶縁体になるような材料でも工夫によって導電性を付与できる可能性を示しています。

図1に示すように、C12A7は籠(ケージ)状の結晶構造を持ち、ケージ内部に高い反応性を持つ、水素化物イオンや ( $\text{H}^-$ ) や酸素陰イオンラジカル ( $\text{O}^-$ ) などの化学種を、安定に閉じ込める事ができる事が分かりました。 $\text{H}^-$ イオンを閉じ込めた状態で紫外線を照

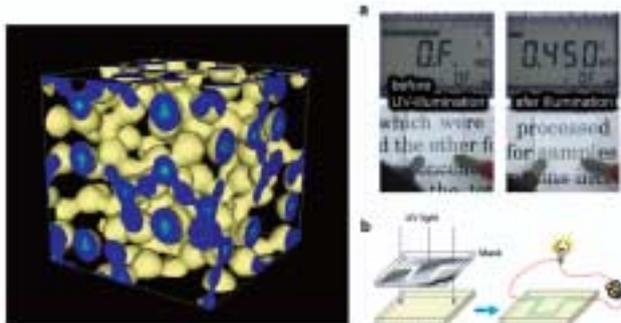


図1 (右) 放射光測定によって得られた、 $\text{H}^-$ を包接した C12A7のケージ構造。(左)  $\text{H}^-$ 包接した C12A7薄膜の紫外線照射前後の変化。「不可視」回路パターンニングが可能になる。

射すると、その部位のみが $10^{10}$ 倍以上もの伝導度変化を起し、永続的な導電性を示すようになります。 $\text{H}^-$ から放出された電子がケージに捕獲され、伝導性を担います。

更に、化学的にケージ内を空にすることで、電子を高濃度に導入して金属伝導性を付与できたり、伝導状態では低い仕事関数により効率的な電子放出を示す事がなどが明らかになっています。このような、ありふれた元素のみで効率的な電子放出材料が得られれば、環境に優しい室内照明が実現できるでしょう。また、他の物質では得ることのできない、「安定に閉じ込められた」 $\text{H}^-$ イオンの利用法についても考案中です。

#### 固体による活性酸素の生成と利用

上述の $\text{O}^-$ は、気相や固体表面上では、最も強力な酸化力を持つ化学種の一つとして知られています。一般に $\text{O}^-$ を発生させるには、比較的特殊なプラズマイオン源が用いられますが、私たちは、C12A7に閉じ込められた $\text{O}^-$ を電場によって直接引き出すという手法を利用した、負イオン源の開発を行っています。この手法は、当初はジルコニア固体電解質を用いて検討されていた手法ですが、内部に $\text{O}^-$ を含むC12A7は、それよりもずっと素性の良いものである事が分かりました。固体-気相を通したイオン輸送という新しい現象は、基礎科学としても興味深いと考えられます。C12A7および他の物質の選定や積層化、或いは、イオン源自体の構造設計を自ら行うことで、性能を高め、実用につなげるべく研究を進めています(図2)。応用のターゲットは、真空中での薄膜酸化プロセスなどを標榜していますが、大気圧下での有害物質の浄化なども視野に入れています。また酸化反応に関連して、天然ガスやバイオ燃料改質を想定したプロセス研究も開始しました。



図2 負イオン放出とその照射評価のための真空装置

### 研究室の特徴

本研究室は、2006年12月に設置されたばかりの、最も新しい研究室の一つです。研究グループの黎明期の活発さや団結を、(林は)羨ましく思ったり、あるいは、それ自体を経験したりしてきました。是非、皆さんにもこれに加わって戴きたいと思えます。

実際の研究活動は、細野・神谷研究室と境界なく行うことができます。また、本研究室では、企業や外国の研究グループとの共同研究も日常的に行っています。多くのプロの研究者や、恵まれた研究環境から、大いに刺激を受ける事ができます。

## ◆ 須崎研究室

セラミックス界面工学の構築

<http://www.materia.titech.ac.jp/susaki.html>



須崎 友文 准教授

### ・はじめに

資源の枯渇や偏在、環境破壊といった現在の世界が直面する問題を考えたとき、地球上に無尽蔵に存在する酸化物の有効利用の重要性は、今後ますます大きくなってゆきます。本研究室では、酸化物の界面を究極的に利用することで新しい物理現象を見出し、新しい機能性を開発することを目指しています。界面の存在は、半導体接合におけるバンドベンディングが外場では実現できないような巨大な電場を発生しうるように、バルク（表面や界面に依存しない、固体内部の特性）とは劇的に異なる特性を生み出す可能性があります。素材の供給面には不安がなく、かつ生体に無害であるセラミックスを素材として全く新しい機能を探索してゆくことは、特に日本において安心な社会が持続できるかどうかを左右する重みを有していると言えます。

### ・背景となる研究分野—半導体エレクトロニクスと酸化物の物理

Siをはじめとする半導体の界面において実現する空乏層形成、整流特性などの界面特有の現象は、現代のエレクトロニクスを生み出すと同時に、量子ホール効果などの全く新しい物理現象発見の舞台を提供してきました。一方、酸化物研究においては、1986年の銅酸化物超伝導体の発見以降、高温超伝導、超巨大磁気抵抗などの特異なバルク物性が遷移金属酸化物において次々と見出されてきています。これらの物性は、超伝導におけるBCS理論など、従来の物性物理学の根拠を覆すものであり、さらにエネルギー枯渇、既存のデバイス素子の限界といった、現在の科学技術の根本的な問題点に迫るものであったため、基礎・応用の両面から精力的に研究が進められています。

### ・酸化物エレクトロニクスの開発とセラミックス界面工学の構築

酸化物を素材として人工薄膜構造を作製し、ダイオードやトランジスタといった電子デバイスを開発するという試みは、近年になって活発に行われるようになってきました。このような「酸化物デバイス」が従来のデバイスと異なる点は無数に存在しますが、まず最初に直面するのが、従来の半導体に適用されてきたバンドベンディングの概念がそのまま適用できるのかという問題です。界面における空乏層形成は、半導体界面工学において出発点となる概念であり、界面からの距離に応じてキャリア密度が連続的に変わっていくような状態が実現することを意味しています。しかしながら、酸化物の場合、キャリア密度の関数として電子物性が定性的に変わってしまうということがしばしば起こり、その結果、界面からの距離に応じて、物質の電子的特性は劇的に変わるということが起こります。この問題は、酸化物デバイスの難しさを表わすと同時に、その大きな可能性を端的に示しているとも言えるでしょう。さて、仮にバンド描像が有効であることが分かれば、酸化物デバイスの理解は終了したということ

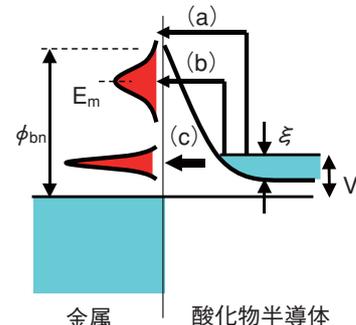


図1 典型的な金属—酸化物半導体界面の模式図。正バイアスVが印加された状態を考えている。(a), (b), (c)は考えられる3通りの接合電流である。

になるのでしょうか？ 実は、この段階においても無数の問題点が存在します。最も単純な系である金属—酸化物ショットキー接合について考えてみましょう（図1）。酸化物においては、ドナー密度が非常に大きく、その結果空乏層がきわめて薄い状況がしばしば発生します。この場合、接合の電流電圧特性を見ると、金属と低ドナー密度の半導体接合で支配的であった熱励起成分(a)に加え、トンネル成分(b)および(c)の寄与が発生し、接合特性に定性的な差が発生します。さらに、空乏層の薄さに対応して巨大な内部電場が発生し、酸化物においては巨大電場に対する応答はしばしば非線形であるため、こゝでも非自明な効果が現われることとなります。

### ・研究の進め方

このような人工構造作製の際には二通りの指針が考えられます。一つは、バルクで特異な特性を見せる物質に着目し、そのような特異な特性（通常の半導体材料では得られない超伝導特性など）をデバイスに取り込むという方法です。実際、バルク特性が詳細に調べられている銅酸化物、マンガン酸化物を素材としたさまざまなデバイスの試作が進められています。これに対し、私達は全く逆のアプローチを考えています。すなわち、界面の特性はバルクの特性とは全く違うものであるということに積極的に着目し、ありふれた酸化物を素材として、基礎的にも応用上も有用な界面系を構築するという方法です。酸化物におけるバルクと界面での特性の差については、特に近年になって原子層レベルで急峻な界面が作製されるようになってその大きさが認識されるようになってきました。

### ・研究の実際

酸化物を素材として人工構造試料の作製、評価、実験結果の解析を進めてゆきます。人工構造作製は、近年、酸化物薄膜作製に威力を発揮しているレーザーアブレーション法を用います。図2に示したように、薄膜の原料であるターゲット物質を真空槽内に準備し、高いエネルギー密度を持つレーザーをパルス的に照射し、原料物質の表面をはぎとって、基板物質上に堆積させてゆきます。基板上での薄膜成長を制御するためには、薄膜物質の相に対する理解に加え、ターゲットから基板に到達する物質粒のエネルギーを制御することが不可欠となり、照射するレーザーのエネルギーや、真空槽内のガス雰囲気、基板温度といったパラメータの最適化が、試料作製においてまず直面する課題となります。試料の評価は、面内の輸送特性測定や、接合の電圧—電気容量特性評価、さらに光電子分光という分光手法を用いて行います。

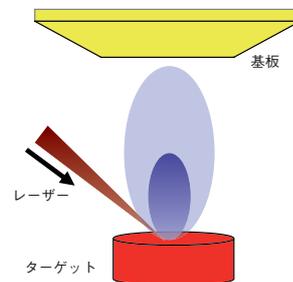


図2 パルスレーザーアブレーション法の模式図

### ・教育について

物理、化学、物質科学のいずれかを専門としてきた学生に対して、それぞれの素養を生かしたテーマ設定を行います。なお、本研究室は平成19年に発足したばかりの少人数の研究室であり、研究室内の議論の濃度が高いことも特徴として挙げるができます。

## ◆伊藤・谷山研究室

酸化物の新機能探索とスピニエレクトロニクス

<http://www.msl.titech.ac.jp/itohlab>



伊藤 満 教授 谷山 智康 准教授

### 酸化物の新機能探索

酸化物は世の中に存在する物質の中で最もダイナミックレンジの広い物性を示すことが知られています。この興味深い特性を何らかの応用可能な機能として意識して探索していくためには、化学結合を意識した材質設計が必要です。この場合、元素置換を常套手段とした古典的なセラミックスプロセス手法では桁はずれな挙動を示す新物質開発はもはや望みません。つまり、物質開発には幅広い分野の知識と合理的な直観が必要とされます。

我々のグループでは、物性の本質を見極めながら特異な挙動を示す新規物質を探索しています。具体的には、これまでの教科書に載っていない新物質を多結晶、単結晶、あるいは薄膜で作製し、これらがねらい通りの特性を示すか否かを確認しています。意図した通りの物質ができることは極めて少ないのですが、この理由を知ることで新しい物質設計の指針が得られます。具体的には、酸化物の(1)強誘電体・圧電体(2)磁性誘電体(3)磁性体(4)電子伝導体(5)イオン伝導体の新物質合成を行っています。これらの化学的/物理的研究を通して、酸化物の構造と機能を俯瞰できる世界レベルの研究者の育成を目指しています。

### 誘電体・圧電体

展型的な強誘電体はすでに多くの物質が実用化されています。しかし、なぜ、特定の物質が強誘電性を示すかという問に答えられるほど基礎研究は進んでいません。我々のグループが10年以上前に発見した量子常誘電体の物質群は現在に到っては約30まで拡がり、その物質群そのものの興味ばかりでなく、応用研究にも関心が集まっています。また、8年前に合成した酸素同位体置換 SrTiO<sub>3</sub> は‘強誘電性のもと’を特定するための恰好の材料となりました(図1) この研究を発端として、双極子相互作用 vs. 量子ゆらぎ(ゼロ点振動)を拮抗とする量子強誘電体・常誘電体に関する理解が急速に進んできました。現在、この研究は日本国内のみならず、世界の15以上の研究機関との共同研究が進んでいます。

このような本質を探る基礎研究のみならず、実用材料に対する基

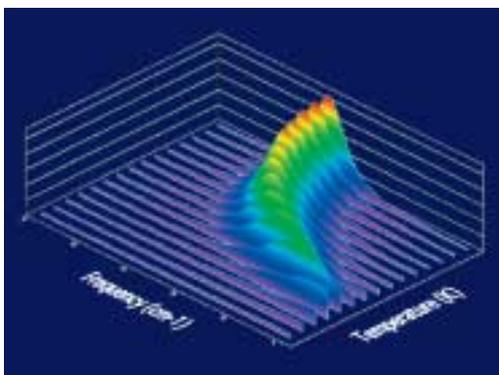


図1 強誘電転移温度に向かって周波数を減らす強誘電ソフトモード (SrTiO<sub>3</sub>)

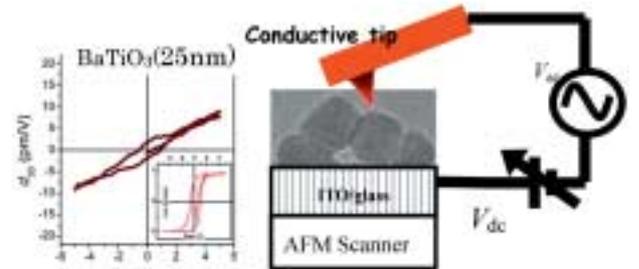


図2 AFMによるBaTiO<sub>3</sub>単一ナノ粒子の強誘電性の観測

礎研究も重要です。例えば、強誘電体である BaTiO<sub>3</sub> をナノサイズにすると、従来は、強誘電性が消失すると考えられていました。これに対して、我々は原子間力顕微鏡を用いて、単一ナノ粒子の強誘電性を直接確認することに世界で初めて成功しました(図2)。この他に、環境問題からその開発が急がれている非鉛系の高性能圧電体単結晶の開発や、磁性強誘電体の開発にも成功しています。

### 磁性体・電子伝導体・イオン伝導体

遷移金属酸化物の物性はその電子状態に依存し、全ての各遷移金属元素に固有な極めて特異な物性を示すことが知られています。いわゆる‘強相関系’が示すバラエティーに富んだ物性は現在の固体物理の中心分野となっています。遷移金属の電子状態は、その構成元素が作り出す結晶場によって大きく変化し、この結晶場の自在な制御がまさに機能制御法の本質となっています。考慮すべき可変パラメータが多い体系で物質設計を行なうには常に全体系(電子構造と結晶構造)を見わたしながら個々の化合物の研究の位置付けを見極める必要があります。我々は化学的物質感に基づく戦略に則り様々な磁性体、電子伝導体、イオン伝導体を作り出してきました。その総数は100を超えています。世界に先駆けて報告した半金属フェリ磁性金属酸化物、酸化物で最もリチウムイオン伝導性が高い酸化物、高スピン-低スピン転移を起こすコバルト酸化物、特異な磁性を示す1次元磁性体等(図3)は極めて多くの研究者の関心を集めています。

既成概念にとらわれず斬新なアイデアで物質設計を行ない、物性評価を通してフィードバックしながら、基礎研究あるいは実社会で要求される新機能を備えた酸化物の設計指針の構築が我々の使命です。

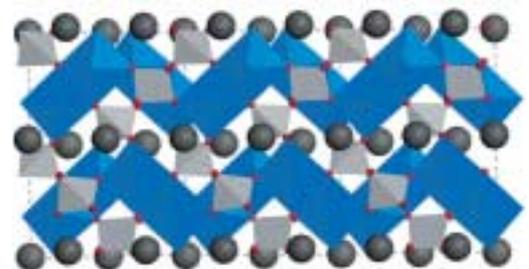


図3 1次元磁性体の結晶構造

## ナノ磁性とスピントロニクス

磁性体を微細化してゆくと、その大きさと磁気特性長とが同程度となり、バルク状態では考えられない全く新しい磁性が発現します。このようなナノ磁性現象を利用して、原子スピンや電子スピンを操作し、新しい機能性を創出しようとする分野が、21世紀のエレクトロニクスとして注目を集めているスピントロニクスです。

我々のグループでは、最先端薄膜技術・微細加工技術を利用することで、ナノスケールでの異種材料のハイブリッド化を実現し、スピントロニクスの基幹技術である「**スピン注入**」「**スピン検出**」「**スピン操作**」技術を構築し、そこに潜む新しい物理現象のメカニズムの解明を目指して研究を推進しています。**物性物理の視点に立った量子情報通信、情報記憶分野への展開**という観点から、我々はこれらの研究分野を「**情報スピントロニクス**」と呼んでいます。

### 強磁性体／強誘電体ヘテロ構造を利用した電圧印加型磁気ビット操作

磁性体を用いた記録メディア（ハードディスク）やメモリの開発、また、それに付随した新しい物理現象の探求が世界各国で精力的に行われています（これらの分野が現在のスピントロニクス研究における中心的な研究領域となっています）。特に、磁気メモリ（MRAM）における磁性層の高速磁化制御とその低消費電力化に対する革新的技術の要求が高まっています。しかし、現在最も注目されているスピン注入磁化反転を利用した磁化操作技術は大電流を必要とするため、電力消費を抑制できない等の問題点を抱えています。我々は、この電力消費の問題を回避するために、強磁性体と強誘電体とのヘテロ構造を利用し、プローブ顕微鏡用探針で局所的に電圧を印加することで、逆磁歪効果に起因する磁性体の磁気ビット操作を実現しました（図5）。これにより、原理的には電流を流す必要が全くなり、消費電力をきわめて小さく抑えることが可能となります。

### 磁性体／半導体ヘテロ構造とスピンプローブ

20世紀の半導体テクノロジーは、電子の電荷を注入、制御、検出することで多彩な機能性を創出し、華々しい成功を修めました。一方、21世紀に入り、新たに電子のスピンを注入、制御、検出する電子デバイス（スピントランジスタなど）が提案され始めています。我々は、これらの新規スピントロニクスデバイスを実現するために、半導体と磁性体とのヘテロ構造を作製し、スピン選択電子輸送現

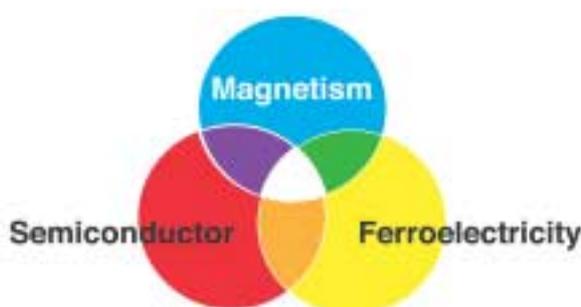


図4 ナノ磁性を基軸とした異種材料の複合化とスピン機能性の構築—情報スピントロニクス—

象に基づく電子スピン検出手法の確立を目指して研究を推進しています。具体的には、半導体中に円偏光を用いてスピン偏極電子を励起し、それをハーフメタルとして知られているマグネタイト超薄膜で**スピンフィルター効果**により検出する手法です。このスピン検出法を実現するためには、半導体から磁性体へスピン選択的に電子を透過させる必要があります。これを高効率に実現するために、内在する表面・界面物理について考察し、研究を多角的に進めています。フェムト秒レーザーを用いた**スピン注入現象のピコ秒時間分解計測**にも取り組んでいます（図6）。

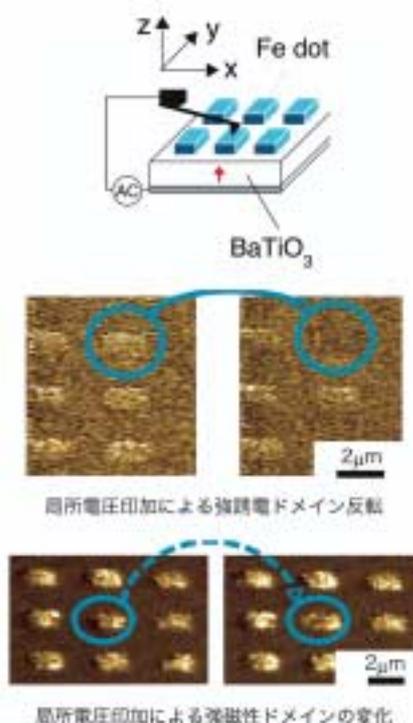


図5 プローブ顕微鏡探針を用いて局所電圧を印加することで磁気ビット操作を実現する

### 近藤系へのスピン注入と人工的操作

近藤効果の発見は、物性物理において革新をもたらしました。その中で我々は、近藤シングレットの特性を利用して「スピン検出」する手法を世界で初めて提案・実証しました。具体的には、強磁性細線と近藤細線との接合素子を用い、強磁性細線から近藤細線にスピン偏極電子を注入すると、近藤効果が抑制されることを電気的に計測することに成功しました。これをさらに展開し、スピン注入により**近藤状態を人工的に操作**するための研究を進めています。

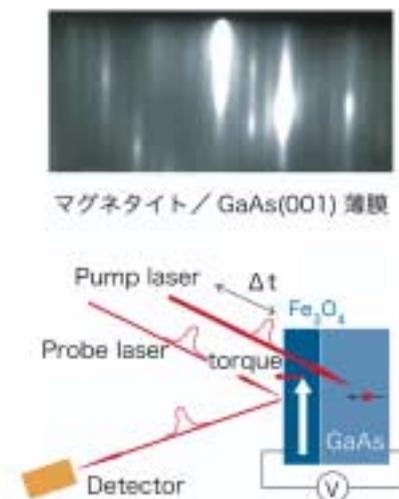


図6 フェムト秒レーザーを用いたピコ秒時間分解スピン注入計測

## ◆ 佐々木研究室

身近な材料で自然の世界を覗く

<http://www.materia.titech.ac.jp/sasaki.html>



佐々木 聡 教授

高温超伝導銅酸化物をはじめとする強相関電子系化合物では、格子歪みを伴う電荷・スピン秩序の形成など、電子とスピンの重要性が強く認識されてきている。そして高温超伝導や巨大磁気効果の機構解明には、結晶内での量子力学的現象を理解することが必要である。また、メゾスコピック領域での電氣的・磁氣的ドメインによる物性発現についても、不純物や結晶性に影響されるメカニズムは不明のままである。

一方で、近年高度化されている記録媒体をはじめとするヘッドやセンサーなどの磁性材料は、将来、電子のスピンや電子軌道のもつ磁気モーメントを利用したメモリーや演算素子になると期待されている。電子の電荷とスピンの自由度を制御するスピントロニクスを利用して、新しい物性をもつ未来型機能性材料を開発するためには、精密構造解析により電子構造や磁気構造を明らかにすることが必要である。

我々の研究室では、大型加速器によるシンクロトロン放射 X 線や中性子線を利用し、無機材料物質の電子磁気構造を調べ、物性との相関を探る研究を行っている。特に電子状態の研究のためには、連続性・偏向性・平行性を利用した新しい放射光測定法・解析法を開発し、回折散乱に分光学的アプローチをとりいれている。

### 電子状態や価数揺動の研究

光が物質にあると、吸収・反射・屈折・散乱・回折などの現象が起き、物質の電子状態が変化する。物質を構成する原子の大きさや物質内電子のエネルギーに合った光 (X 線) を用いて、物質内の原子・分子の配列、混合原子価化合物の電子状態を研究している。

例えば、吸収端近傍の XANES 領域で X 線異常散乱を利用すると、価数の異なるイオンを X 線的に区別でき、少量の価電子や磁性電子の差を議論することが可能になる (valence contrast 法)。マグネタイトをはじめとする遷移金属フェライト結晶や  $\text{Eu}_3\text{S}_4$  などの異常希土類化合物で、価数揺動や電子の秩序状態など固体内電子の描像を求めている。また、磁性電子による磁気散乱とは別に、特別な遷移に対応したエネルギーの X 線で、特定の電子をピンポイントすることにより、内殻電子の励起に伴う磁性電子の非占有状態の効果も抽出できる。

### 遷移金属・希土類化合物での磁気状態の研究

軌道磁気とスピン磁気モーメントはマクロな磁性を理解するうえで基本的な量である。X 線磁気円二色性 (XMCD) や X 線共鳴磁気散乱により、遷移金属・希土類酸化物や硫化物の電子状態および磁気状態を研究している。原子配列情報と電子・磁気状態の観測結果から、フェライト構造での超交換相互作用の存在や高スピン・低スピン状態の共存の可能性が明らかになってきている。

$\text{CoFe}_2\text{O}_4$ - $\text{FeCo}_2\text{O}_4$  系フェリ磁性体での XMCD 測定の一例を図 1 に示す。前吸収端は四面体 A サイト中の、主吸収端は八面体 B サイト中の  $\text{Co}^{2+}$  イオンのスピン状態を示している。 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  中の

$\text{Co}^{2+}$  は高スピン状態、 $\text{FeCo}_2\text{O}_4$  中の  $\text{Co}^{2+}$  は低スピン状態にあり、中間組成では高スピンと低スピン状態が共存するらしい。

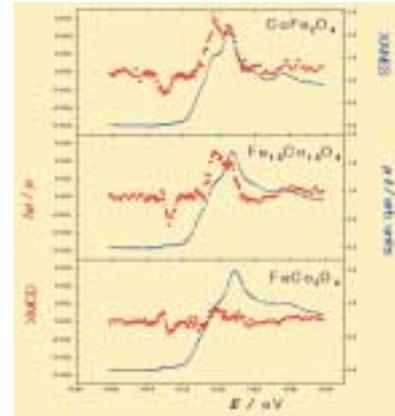


図 1  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ - $\text{FeCo}_2\text{O}_4$  の XMCD (赤) と XANES (青) ( $\text{Co K}$  吸収端)

### 計算機シミュレーション

第一原理計算や  $X_\alpha$ , CI, CCSD 法による計算機シミュレーションを行ない、結晶構造・物性や電子状態をモデル化し、XMCD スペクトルなどの実験結果との比較を行なっている。

### 結晶構造解析と物性

物質の電氣的あるいは磁氣的性質は、原子や分子の結晶構造に左右されるが、半導体などのハイテク材料には、まだ構造がよくわからないものが存在する。本研究室では、バルク単結晶、薄膜、表面界面の構造・物性を調べて、新機能物質の探索を試みる。最近の研究には、遷移金属酸化物中での電子密度分布の研究 (図 2)、フェライト中での陽イオンの席占有、高温超伝導転移に伴う電子状態変化、局所構造決定、スペックルや小角散乱によるメゾスコピック構造決定などがある。

放射光 X 線の偏光、エネルギー依存性を利用して、従来全く不可能であった薄膜の磁化の様子や界面磁気構造の解析が可能となった。現在、透明磁石 Co-doped  $\text{TiO}_2$  についてその磁気構造を共同研究している。

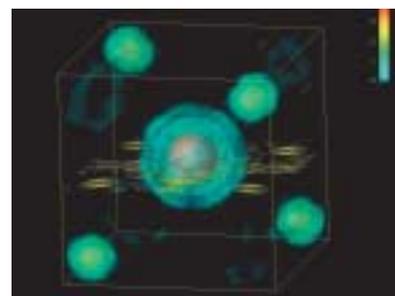


図 2 マグネタイト、四面体 A サイト中の Fe の電子密度分布図

## 川路研究室

機能性物質の相転移機構を探る

<http://www.materia.titech.ac.jp/kawaji.html>



川路 均 准教授

川路研究室では、結晶の構造とその物性との相関に関する基礎的研究を行っています。主に多くの材料の機能性に大きな影響を与える相転移現象について、出現機構を検討するとともに相転移温度などの制御の可能性を検討しています。特に結晶中に部分的な規則性の乱れを導入することによる相転移現象の制御について、詳細に調べています。さらに相転移現象の制御による材料の機能性制御についても研究を行っています。また、応用セラミックス研究所阿竹教授（物質電子化学専攻および本専攻併任）の研究室と共同して、世界最高精度の熱測定技術などを駆使し自由な雰囲気中で活発な研究活動を展開しています。

### 研究テーマ

#### ●誘電体結晶の相転移に関する物性研究（強誘電体、リラクサー、インコメンシュレート相転移、巨大粒度効果）

種々の誘電体結晶における逐次相転移現象、なかでも強誘電相・圧電相あるいはそれらの相転移が凍結させられたリラクサー、さらにはある種の自由度（分子の配向など）の周期が結晶の並進対称性とずれた周期をもつインコメンシュレート相の発現などに注目し、その機構解明をめざした研究を行っています。物質の標準エンタルピー、エントロピー、ギブズエネルギーなどの熱力学諸関数の絶対値を決定するとともに、誘電率測定や分光学的手法を駆使して総合的な研究を進めています。

#### ●超イオン導電体に関する研究（イオン導電性、格子欠陥、格子欠陥誘起現象）

燃料電池を始め各種電池材料やガスセンサーなどへの応用が期待される超イオン導電体について、構造と熱物性およびイオン伝導機構との相関を調べています。とくに高温におけるイオン伝導性を支配する欠陥構造が極低温において低励起格子振動モードを誘起することから、極低温領域での精密熱容量測定により、欠陥の分布と規則性に関する知見を得ようとしています。またイオンの欠陥構造や微視的運動と巨視的物性量との関係を明らかにし、イオン伝導機構を解明するために分子動力学シミュレーションを行っています。

#### ●新物質 C<sub>60</sub> および関連化合物における分子運動と相転移現象に関する研究（フラレン、純度効果、回転転移、超伝導）

フラレン結晶における分子運動と相転移現象の機構を調べています。また極低温領域における格子振動の解析と精密熱容量測定からこれらの籠状分子が示す特異な格子振動モードと状態密度について研究を進めています。さらに TDAE-C<sub>60</sub> が示す強磁性相転移現象や、A<sub>3</sub>C<sub>60</sub> における超伝導相転移現象などについても研究を進めています。

#### ●熱容量分光法をはじめとする新熱測定技法の開発とその応用（熱容量分光法、ナノカロリメトリー）

熱容量（比熱）は、本来熱力学的平衡状態で定義される静的物性

量ですが、ガラス転移などの緩和現象が関与すると周波数依存性が観測されます。これを精密に検出する熱容量分光法を開発し、誘電率測定、赤外・ラマン分光法などによる実験と合わせて、緩和現象の詳細な解析を行っています。また、同時に超微量試料で測定が可能な熱容量測定技法の開発研究を行っています。

#### ●機能性材料における格子振動と相転移に関する研究（機能性材料、熱容量、相転移、格子振動）

ダイヤモンドやこれに比肩し得る物性が期待されている cBN、さらにはグラファイト、hBN あるいは窒化珪素などについて精密な熱物性測定と格子力学に基づく詳細な解析を組み合わせて構造と機能性との相関を明らかにしようとしています。また酸化物超伝導体あるいは有機超伝導体および関連化合物についても、超伝導機構や分子運動と相転移現象の詳細を解明するために、13 T の磁場中熱容量（比熱）測定など、基礎的研究を行っています。

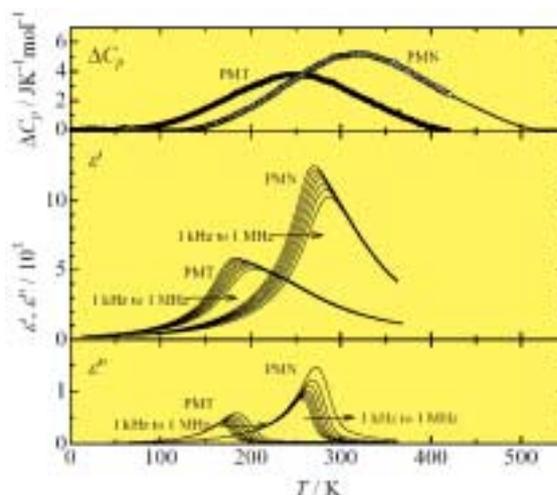


図1 リラクサー PbMg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub> (PMN) および PbMg<sub>1/3</sub>Ta<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub> (PMT) の誘導率と強誘電ナノ領域の成長による過剰熱容量

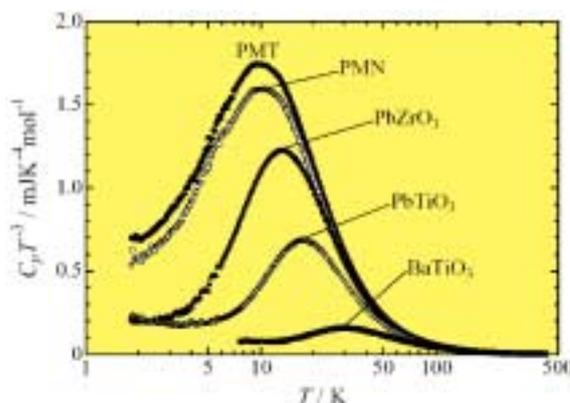


図2 リラクサーおよび典型的な誘電体の低温熱容量

## ◆ 細野・神谷研究室

自分たちが創った材料で世界を席卷する

<http://www.materia.titech.ac.jp/hosono.html>



細野 秀雄 教授 神谷 利夫 准教授

### 1. 研究室の目指すもの

膨大な数の「物質」の中で、人間の社会に直接に役に立つものが「材料」です。私たち研究室は、自分たちが打ちたてた材料設計指針をもとに、以下のような新しい材料を開発しています。

#### (1) 酸化物でシリコンを凌ぐ半導体デバイスを実現する。

・アモルファス酸化物半導体で最高の性能を持つフレキシブルトランジスタ（図1）を開発し、フレキシブル TV、電子ペーパーに新しい有望な材料を提供しました。

私たちは、透明酸化物半導体（Transparent Oxide Semiconductor: TOS）という新しい研究領域を開拓してきたパイオニアです。最近、TOS に関する研究が世界中で盛んになり、透明トランジスタなどの応用デバイスに熱い関心が集まっています。

#### (2) 酸化物が持つ特有の結晶構造を利用して新しい機能を創る。

・0.4nm の大きさのかご構造からできている結晶 C12A7をベースに、新しい透明導電膜、高輝度電子放出源、有機発光ディスプレイ用高性能電極、反応触媒などの機能を開拓しました。

・層状構造を持つ混合アニオン化合物で、室温励起子発光ダイオードや超伝導などの機能を開発しました。

#### (3) 材料研究の新しい潮流「ユビキタス元素戦略」

私たちは、今までは希少金属を使ってしか実現できていなかった機能を、Ca や Al などの豊富で無害な元素だけを使って実現しようとする「ユビキタス元素戦略」を提唱し、今年から政府が推進する「元素戦略」の大きな柱の一つとなりました。上述の C12A7や深紫外ファイバー（図1）はそのもっとも成功しているユビキタス材料の例です。



図1 透明電子活性の樹（こんな具合に育てて欲しいという図）

材料研究はしばしば、すでにある材料の開発に終始してしまいがちですが、これまでに作り出された画期的な新材料—ナイロン、カーボンファイバーや高温超伝導体など—は、そのような改良研究からは決して生まれません。物質の内部で何が起きているかをしっかり調べ理解すると同時に、他人とは違った発想とアプローチで研究をする必要があります。

私たちが目的としているのは、このような独自のアプローチにより新しい物質と機能を創り出し、それらを人の役に立つ「材料」へと進化させることです。Nature 誌や Science 誌などの世界トップの学術誌に掲載される研究成果をあげ、企業と連携し産業化するとともに、その実践研究の過程で「真の材料研究」のセンスをもつ学生を育てることを理想としています。

### 2. アプローチの特徴

酸化物は、その構成元素が資源的に豊富で、かつ環境調和性に優れたものが多くあり、古くから陶磁器やガラスとして人類の発展を支えてきた材料です。それにもかかわらず、酸化物中で電子が主役を演ずる機能は、以前は殆ど見出されていませんでした。これは酸化物の本質によるものではありません。私たちは、酸化物結晶に内在する特徴的なナノ構造に着目し、その電子状態や欠陥構造を制御・活用することで、新しい光・電子および化学機能をもつ材料を創り出すことを目指しています。ただ試料を作るだけでなく、計算と実験の両面から電子状態を調べて物質のイメージを作り、研究方法を考えています。独自の視点からのアイデアに基づいたアプローチで、世界で「初めての」、「最高の」、あるいは「唯一の」結果を出せるよう、研究を進めています。

### 3. 研究室の構成

スタッフ : 細野（光機能材料、透明半導体、磁気共鳴）  
 神谷（計算材料設計、半導体薄膜、電子デバイス）  
 平野正浩客員教授（光物性、固体物理）  
 柳博助教（固体電子物性、物質探索）  
 松石聡フロンティア研助教（固体科学、欠陥電子物性）

学 生 : 博士課程7名、修士課程12名、学部4年生1名  
 プロジェクト :

現在、次の3つのプロジェクトを通して研究を進めています。

- (i) 科学技術振興機構 戦略的創造研究継続研究 (ERATO-SORST) (期間: 2004.10~2009.9)
  - (ii) 科学研究費学術創成研究 (期間: 2004.4~2009.3)
  - (iii) 21世紀 COE (期間: 2002.4~2007.3) 材料系拠点リーダー
- これらのプロジェクトでは博士研究員11名が活躍しており、研究室学生と緊密な連携をして研究をしています。

### 4. 方針

領域にとらわれずに世界で活躍できる一流の研究者を育てるため、実施研究と輪講を中心とした方針を採っています。最先端の設備を自由に使える環境の中で、個々の学生が高い独立性を持って研究をするとともに、テーマの異なる学生・職員間でも忌憚のない自由な議論、情報交換をすることを重要視しています。

優れた成果が得られれば、学生自身が国際学会へ参加したり一流国際学術誌に論文を書いたりしています (D2、D3の学生がそれぞれ Science 誌に論文を発表しました)。

また、学生の研究成果が評価され、以下のような表彰を受けています (過去7年間)。この中には、修士1年の時に出した成果も含まれています。

国内学会: 講演賞 [応用物理学会、化学会等] 9名、論文賞 2名  
 国際学会: 講演賞 [米国材料学会等] 2名、ポスター賞 1名  
 井上研究奨励賞 (自然科学全分野で50件/年の博士論文に授与) 2件  
 先端技術大賞材料分野 最優秀論文賞 1件

### 5. 研究テーマ

#### (1) 曲がる高性能透明トランジスタ: 透明酸化物半導体

私たちは、1997年に世界で初めて、P型透明酸化物半導体の設計

法と具体例を *Nature* 誌に報告しました。それ以来、透明酸化物エレクトロニクスという新しいフロンティアが拓けつつあります。2004年には、酸化物半導体の長を活かして、フレキシブル透明トランジスタ (TFT) を実現しました。このトランジスタは世界でトップの性能を示し、*Nature* 誌にも掲載され、世界中の大学や企業が研究を開始しました。この僅か2年の間に、曲がる電子ペーパーやディスプレイなどが試作され、相次いで発表されるなど、大きな反響を呼んでいます。自分たちの創った材料で世界を席巻する例になりつつあります。

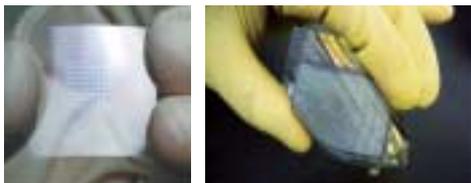


図2 (左) 透明フレキシブル TFT。アモルファスシリコンや有機 TFT より一桁以上高い特性を示す。(右) 透明フレキシブル TFT で凸版印刷が試作した曲がる電子ペーパー

## (2) コピキタス (ありふれた) 元素戦略：ナノ籠構造と包接イオンが多彩な機能を創る

これまで、酸化物の多様な機能は遷移金属や希土類イオンなど陽イオンを変えることで実現してきました。私たちは発想を変え、陰イオンの状態を制御することで新しい可能性が拓けないか、という視点からアプローチをしています。

$12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  (C12A7) は、酸化カルシウムと酸化アルミニウムというありふれた酸化物から構成されている、何の変哲もない物質と考えられてきました。ところが、原子レベルで結晶構造を見直してみると、陰イオン (通常は  $\text{O}^{2-}$  イオン) を包接できるナノ籠構造を持っていることがわかります (図3左)。合成法を工夫することで、ナノ籠構造中に様々なイオンを包接させることができます。例えば、空気中では不安定ですが最強の酸化力を持つことで知られる  $\text{O}^-$  イオンを、 $10^{20}\text{cm}^{-3}$  以上の高濃度で安定に含有させて、最も安定な白金さえ容易に酸化できました。また、C12A7 は典型的な絶縁体であると信じられていましたが、 $\text{H}^-$  イオンを包接させて紫外光や電子線を照射することで、透明で電子がよく流れる状態に変えることに成功しました。さらには、電子を包接させることで、世界初の室温で安定なエレクトライド  $\text{C12A7:e}^-$  を実現し、電界放射型ディスプレイ (図3右下)、電界効果型トランジスタや有機発光ディスプレイなどへ応用できることを実証しました。

このように、ありふれた原料だけから構成される材料でも、ナノ構造を巧く利用することにより、多彩な電子・光・化学機能をひきだすことができます。このアイデアを追及していくことで、深刻化している環境・エネルギー問題の解決に大きく寄与できるスーパーセラミックスが誕生すると期待しています。

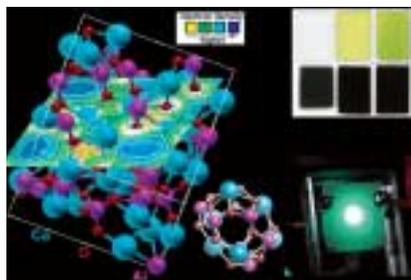


図3 (左) エレクトライド  $\text{C12A7:e}^-$  の結晶構造と電子分布。(中央) ナノ籠構造 (籠の内径は  $\sim 4\text{\AA}$ )。 (右上) 電子が生成する様子が色の变化でわかる。(右下) 電界放射型発光デバイス。

## (3) 独自の攻め方で新材料を探す：新しい超伝導物質

材料の結晶構造を覗き、電子構造に思いを馳せ、物性との関係について考えると、どのようなアプローチで新しい特性を持つ材料を作ったらよいか、アイデアがでます。

図4の挿入図は、層状オキシブニクタイトという材料の結晶構造

ですが、私たちは、同じ構造を持つ  $\text{LaCuOSe}$  に二次元的な電子構造に起因する興味深い物性が発現することを見出してきました。 $\text{LaCuOSe}$  で得られた知見をもとに、 $\text{Cu}$  を  $\text{Fe}$  で置き換え、 $\text{Se}$  を  $\text{P}$  や  $\text{As}$  などに置き換えることで、今までとは全く構造の違う、新しい超伝導体を発見しました。

この結晶構造には、さまざまな種類のイオンを導入することで、さらに新しい機能を持つ材料が潜んでいると考えています。

## (4) 境界領域に切り込む：透明酸化物半導体との界面制御で有機デバイスの課題を克服する

真に新しい材料を開発するためには、広い知識と異分野の研究者の協力が欠かせません。ここまで書いてきたように透明電子活性酸化物は多くの面白い機能を示しますが、それらを実用化し、人間の役に立てるには、他の材料、デバイス、システムと整合性のある機能設計、プロセス開発をする必要があります。

私たちは、21世紀の材料科学は、有機、バイオ分野との連携が必須だと考えています。逆にこれら分野もまた、深紫外透明導電体や光・電子機能層の開発に、酸化物材料との連携を必要としています。私たちは、酸化物研究を他材料へ拡げ、その上で酸化物を材料・デバイス研究の主役に押し上げるための戦略を進めています。

高性能有機 EL/TFT を作製でき、電子構造と物性を大気開放せずに評価できる装置 (図5右) や表面機能を開拓するための超高真空走査トンネル顕微鏡、20nm

サイズの超微細デバイスを作製できる超高精細電子線描画装置など、さまざまな新しい武器を使って、酸化物の新機能開拓を行っています。最近では、電子ドープした C12A7 が、有機 EL 用電極として、これまで報告されてきた材料よりも優れていることがわかりつつあります。

## (5) 新材料・機能を創るために：理論と実験による電子状態の解析

やみくもに実験をしても、新しい機能・材料を見つけることはほとんど不可能です。私たちは、正・逆光電子分光法、パルス電子スピン共鳴法や X 線回折法などを用いて、物質や欠陥の電子状態を直接的に実験で観察しています。さらに第一原理計算を併用することで物質のイメージを作り、物質探索や材料設計の指針をたてて開拓研究を進めています。図6は、C12A7 の中でかご構造のひずみを X 線構造解析と第一原理計算で調べた結果です。C12A7 中の電子数が増えるにしたがってかごの形がきれいになり、電子の通り道である波動関数が広がっていく様子が見えます。

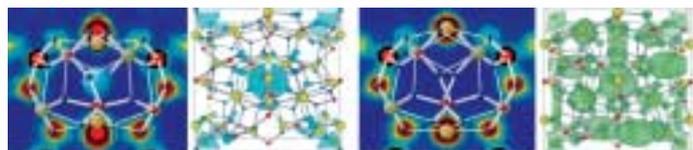


図6 (左端、右から2番目の図) MEM/Rietveld 解析で観測した電子密度。左のかご構造は酸素イオンが入っているためにひずんでいる。(左から2番目、右の図) 第一原理計算で求めたかご構造のひずみと電子密度。電子数が多くなるとかごの形がきれいになると、波動関数が結晶全体に広がる (右図)。

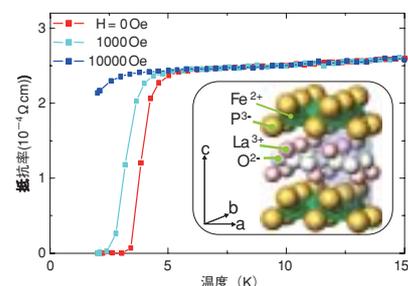


図4  $\text{LaFeOP}$  の超伝導。挿入図は結晶構造を示す。

## ◆吉村研究室

世界の常識を変えるセラミックスプロセスの提案

<http://www.msl.titech.ac.jp/~yoshimura/>



吉村 昌弘 教授

全世界をあげての工業化により大量生産・大量輸送・大量消費のシステムができあがり、無限に見えた地球環境がここ数十年で大きく変化し始めているのは周知の事実である。必要な物質や材料を作製するために地表環境とは全く異なる、極限的環境（高温・高圧・低温・真空など物理的な極限）を創製・使用することが、多量のエネルギーを使い多量の廃棄物・廃熱を排出していることの原因のひとつとしてあげられる。最近グリーンケミストリーやソフトケミストリーという概念を使って化学物質の安全かつ省エネルギーな合成法を開発することが行われているが、物質の合成プロセスに加えて、材料の作製プロセス、そしてそれらに伴って生成する廃棄物までを包括的に考えた研究は多くない。物質の合成だけでは材料にならないから、トータルでの低環境負荷を考える場合、「物質の合成」と「材料の作製」それぞれのプロセスを一貫してとらえなければならない。我々の研究室ではこれら材料作製プロセスを通して環境問題に取り組んでおり、「ソフト溶液プロセス」という概念・手法を提案しその有効性を実験により証明しようとしている。つまり、比較的低温の水溶液系のプロセスをセラミックス材料作製に応用しようとするものである。一言で言えば「高機能セラミックスを焼かずに水溶液から直接作れないか？」に挑戦する研究テーマである。これは今後持続的な社会を形成するために、是非実現する必要があるものの一つであると考えている。現在、水溶液からフェライトを作り磁性、生体の分野に応用しようという、応用セラミックス研究所、松下伸広講師（物質電子化学専攻および本専攻兼任）の研究室と共同で運営しています。

### 水熱電気化学法によるセラミックス薄膜・積層膜の直接作製

我々が1989年に報告した「水熱電気化学法による BaTiO<sub>3</sub> 薄膜の作製」は BaTiO<sub>3</sub> の低温合成の例として多くの研究者の関心を惹き起こした。これはオートクレーブ中で 100-200℃ 程度の Ba(OH)<sub>2</sub> や Sr(OH)<sub>2</sub> 溶液を用い Ti 基板を陽極酸化することで、BaTiO<sub>3</sub> や SrTiO<sub>3</sub> の薄膜が直接作製可能であることを示したもので、反応温度や電気化学条件を変化させることで膜厚や膜組織を制御可能であることがわかってきている。さらに近年になって反応溶液を流通させながら反応させることができるフロー式反応装置を設計・製作し、反応溶液を膜作製途中で切り替えることにより BaTiO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> セラミックス積層膜・傾斜機能膜の直接作製が可能となった。また、小型情報機器には欠かせないものにリチウムイオン電池があるが、この正極材料である LiCoO<sub>2</sub> もこのフロー式反応装置を改良したものを使って作製することに成功している。これらの誘電体膜・イオン伝導材料以外にも、蛍光体材料・光機能材料など、各種機能性セラミックス材料の直接作製および、作製したものの物性評価（レーザー顕微鏡・SEM/EDX・X線回折・可視/紫外ラマン散乱分光・顕微 IR 分光・AFM/STM・XPS など主に研究室内の設備）に関する研究を行っている。

### 作製液プロセスによる各種材料のパターニング・デバイス直接作製

我々はソフト溶液プロセスの反応が固一液あるいは液一液界面で起こることを利用して、セラミックス膜の直接パターニングへの応

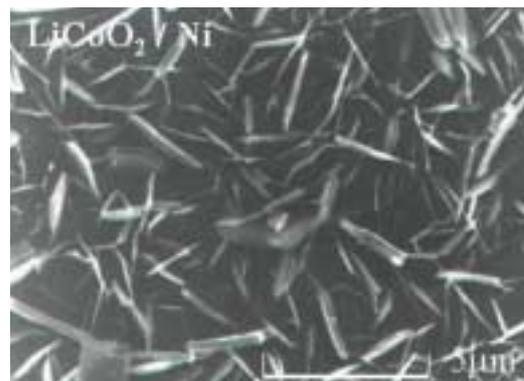


図1 ニッケル基板上に直接作製した LiCoO<sub>2</sub> 膜の SEM 像

用を試みている。たとえば下図のように、界面にレーザー光を照射することにより BaTiO<sub>3</sub> などの誘電体材料のパターンを溶液中から直接得ることに初めて成功している。現在は有機・金属・セラミックスの複合デバイスを溶液から作製しようと模索中である。インクジェットやスプレーによる薄膜やパターニング、ナノカーボンの作製も行っている。

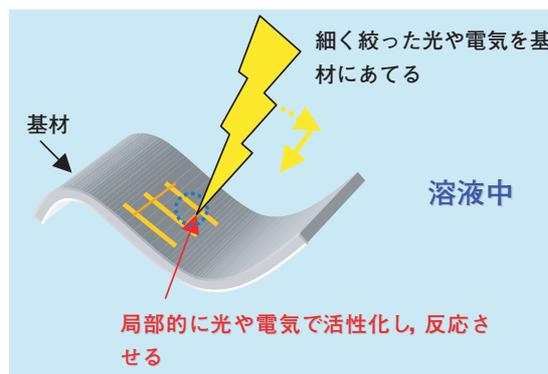


図2 溶液中パターニングの概念図

### 金属ガラス・合金上へのセラミックスコーティング

東北大学金属材料研究所、大阪大学接合科学研究所と本研究所の三研連携プロジェクトで金属や合金を生体材料にするために必要な生体活性化処理を研究している。

バルク体作製のために融解鋳造法による共晶系のナノコンポジットセラミックも検討している。

### 研究室の雰囲気

我々の研究室の雰囲気を一言で表現するとすれば「国際的」でしょうか。常に外国から5-8人の学生・研究員を受け入れています。いろいろな文化・習慣をもった研究者に囲まれて過ごすことは、社会人になってからも大いに役に立つと思います。興味を持った方は是非一度研究室を訪問してみてください！

## ◆安田研究室

マクロからナノでの複合化で新しい材料開発

<http://www.materia.titech.ac.jp/yasuda.html>



安田 榮一 教授

セラミックスは、軽量、耐熱性、耐環境性、優れた力学的特性、環境に優しい材料等々の故に、宇宙材料、自動車用部材、製鉄用耐火物、等々に利用されている。しかし、近年、エネルギー効率の向上を目指した1500℃以上の高温化での操業、宇宙環境下での飛翔体の衝突、スペースシャトルの大気圏突入時の空気との摩擦による1400℃以上での断熱と構造保持等、より過酷な環境下での使用が求められている。新しい概念を提案し、ナノテクノロジーを駆使して研究を進めている。以下に具体的なテーマとその概要を示す。

### カーボンアロイ

我々が提唱し、世界に発信している概念である。

炭素原子が示すその特異な電子軌道 ( $sp$ ,  $sp^2$ ,  $sp^3$ ) の故に多様な性質を示し、最近でも新しい物質が次々に発見されている。このように炭素のみの材料を考えただけでもまだまだ未発展、未知の部分が多く、これに他の元素との化合物やその複合系まで含めると益々の発展が期待される。

「カーボンアロイ」はこのような電子軌道の複合系から、ヘテロ原子とのアロイングならびに組織形態の複合系まで含めて一種の合金と考えようという発想であり、平成9-12年の文部省・科研費・特定領域研究のプロジェクトとして採択され、安田が代表としてプロジェクトを推進した。

カーボンアロイは、炭素材料学会で以下のように定義付けがなされている。「カーボン原子の集合体を主体とした多成分系からなり、それらの構成単位間に物理的・化学的な相互作用を有する材料。但し、異なる混成軌道を有する炭素は、異なる成分系と考える。」

最近の成果としては、炭素原料であるピッチに沃土を反応させると電荷移動錯体を形成して重合を促進し、炭素化過程で賦形を容易とするばかりでなくピッチ中の炭素を殆ど固定できる事を見出した。また、特殊な金属を極微量添加することにより、夢の「燃えない炭素材料」が出来そうな気配があり、将来が楽しみである。

### C/C 複合材料の開発

日本のオリジナルとしての PAN 系の高強度炭素繊維が発明されてから40年以上経た。C/C 複合材料の応用分野は、航空機 (B-747、B-767、A-300等) やレーシングカーのブレーキディスク、半導体等の製造治具、発熱体、ホットプレスの型材、宇宙往還機の外壁材料やロケットエンジンのスカート材料等に利用されている。最近ではイオンエンジン、ラムジェットエンジン等への検討がなされている。

C/C 複合材料は、炭素繊維を補強材とし、マトリックスも炭素からなるオールカーボンの材料である。作製プロセスは、炭素繊維の編物にマトリックス原料としてピッチあるいは樹脂を含浸し、炭素化する。その際、最も重要な技術は、繊維の表面処理であり、要求特性に応じて炭素繊維の表面処理を強くしたり、弱くしたりする。当研究室では、C/C 複合材料を自作し、特性を調べ、これをプロセスにフィードバックして研究を進めている。

### 共晶凝固セラミックス

酸化性雰囲気中で利用される高温構造材料の本命は、酸化物である。しかし、これまでの焼結で作製される多結晶体は、界面の不安定性に起因して、高温強度や耐クリープ性が充分ではない。そのため、整合性の高い界面を凝固過程で形成させることが必要となる。また、セラミックスの靱性を向上させる手法として、複合材料にすることも有効である。この両者を組み合わせた共晶系の一方向凝固は、靱性、高温クリープ特性ともに期待される材料である。現在扱っている共晶系は、アルミナと希土類酸化物の系で、その組織の一例を下図に示す。

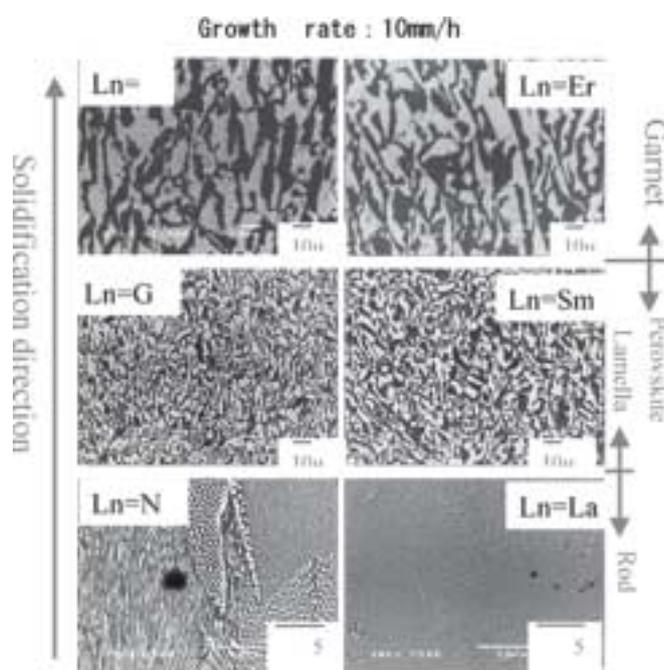


Fig. 1 SEM images of longitudinal section of  $Al_2O_3/Ln_3Al_5O_{12}$  and/or  $Al_2O_3/LnAlO_3$ , (a)  $Ln=Y$ , (b)

## ◆ 阿藤研究室

ナノスケールで起こる物質変化のリアルな描像

<http://www.materia.titech.ac.jp/atou.html>



阿藤 敏行 准教授

本研究室では、衝撃超高压力によって誘起されるセラミックスの相転移や化学反応を、微視的に調べることで、その機構を明らかとし、“壊れ方機能”という新しい概念に沿った材料開発を目指します。

従来の構造材料開発では、より強い材料を指向してきましたが、どのような材料であれ、得られる強さには限界があります。そこで、発想を転換して、自らが壊れることで、生命を守る機能を材料にもたせることが、可能なのではないかと模索しています。このような材料開発を通して、安全・安心な社会の実現に、貢献したいと考えています。そのための切り口として、本研究室では、“壊れ方”を新しい機能として捉え、デザインされた壊れ方を持った、新規構造材料を創成することを、将来的な目的とします。まず、基礎的な要素として、高速な衝突によって発生する衝撃波が引き起こす、構造相転移や化学反応を、ナノスケール以下の微視的な観点から研究します。

物体が秒速 1 km 以上という超高速で衝突すると、物体中に超音速で進行する衝撃波が伝播します。衝撃波が通過した背後では、マイクロ秒程度の短時間の圧力パルスにより、数万から数百万気圧という極超高压状態が実現し、さまざまな圧力誘起による相転移や化学反応が起こります。パルスのな衝撃圧縮環境下でも生じる高速な物質変化は、衝突や衝撃などに対して物質自身が応答する、アクティブな吸収体やセンサーなどとしての応用が期待できます。実際の実験には火薬の燃焼ガスにより飛翔体を高速に加速する衝撃銃と呼ばれる装置を用い、各種材料に対しての衝撃実験を行います。また、ダイヤモンドアンビルセルなどの静的手法も併用することにより、原子レベルでの構造相転移の機構を解明します。

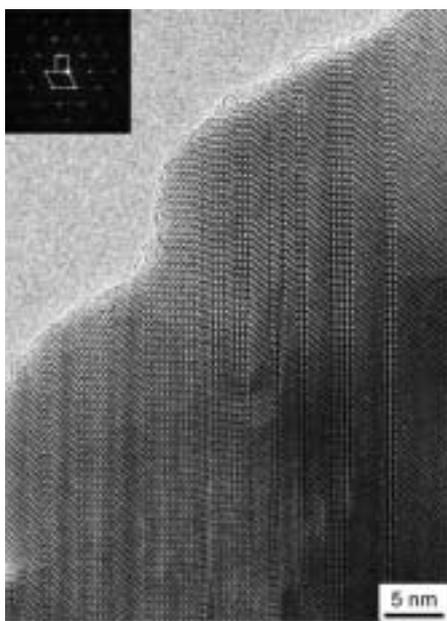


図1 9万気圧に衝撃圧縮したフッ化マンガンの高分解電子顕微鏡像。ナノスケールで高压相と常圧相がラメラ構造をとっている。

### 衝撃圧縮により誘起される相転移／化学反応

相転移という現象は、ジルコニアセラミックスの靱性化に見られるように、材料それ自身が内包するアクティブな特性であり、材料の高機能化にとって重要な役割を果たす可能性を秘めています。特に、衝撃圧縮により誘起される大きな体積減少をともなう相転移や化学反応は、ナノからマイクロ秒という極短時間で起こる、きわめて特異的なプロセスです。このような短時間での物理的、および化学的变化は、我々の身近でも起こりうる、高速物体の衝突や、地震などによる建造物の破壊と、密接に関係しているものと考えられ、「安全・安心のための材料」という、セキュアマテリアルの開発という観点からも、きわめて重要な意味を持っています。研究方針としては、衝撃変成を受けたセラミックス材料を、種々の方法によりキャラクタリゼーションし、相転移や化学反応の原子レベルにまで踏み込んだ詳細な機構を調べ、さらに、これらの基礎的なデータを蓄積することにより、新しい安全な構造材料の開発へと展開させていきます。

### コンクリート関連物質の衝撃圧縮挙動

現代社会で最も重要な構造材料、コンクリートの主成分であるアルミノケイ酸塩鉱物は地球上での存在量が大きく、安価に入手可能であり、環境負荷も小さい材料です。石英や長石などは、衝撃圧縮により約30%にもおよぶ体積減少をともなう相転移を起こし、熔融ガラスよりも密度の大きなガラスとなることが知られています。また、コンクリートの固化に重要な役割を担うセメント中のカルシウムケイ酸塩水和物は多くの水分子を含みますが、その衝撃波に対する応答は分かっていません。これらの挙動が、微視的なレベルから明らかとなれば、所望の相転移特性を持つガラスやセラミックス材料を設計するための指針となり、新しい機能を持つコンクリートへの混和剤や、新たな高密度ガラスの製法への展開が可能となります。

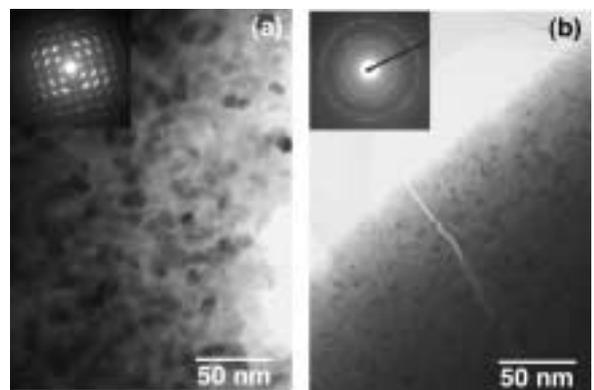


図2 衝撃圧縮したムライトセラミックス ((a) 49GPa (b) 65GPa) 相転移に伴うムライトのナノ結晶化 (a) や微細なγ-アルミナとSiO<sub>2</sub>ガラスへの分解反応 (b) が見られる。

## ◆肥後研究室

ナノ・マイクロで創造する新しい MEMS 材料の世界

<http://www.materia.titech.ac.jp/higo.html>



肥後 矢吉 教授

材料の構造をナノメートルのオーダーで制御することにより、従来の材料に比べて特性を大きく向上させたり、今まで知られていない新しい機能を有する材料の開発、いわゆる「ナノマテリアル」の開発が世界的規模で進められている。このようなナノマテリアルの開発は、ナノテクノロジー技術の基礎となるもので、21世紀の基盤技術として大きな発展が期待されている。ナノマテリアルの創製プロセスはこれまでもいくつか考案されているが、本研究室では従来のコンセプトとは大きく異なる独創性のきわめて高い手法の開発を行っている。また、このようなナノマテリアルの材料創製のためには、ナノマテリアルの評価技術が重要である。これまで、創製技術と評価技術は個別に開発されてきているが、創製技術と評価技術の融合が材料開発を迅速に進めるために、きわめて重要となる。

本研究室では、このようなナノ構造制御材料の開発と評価を有機的に融合させることにより、世界に先駆ける研究を進めている。以下にその具体的な研究テーマを記す。

### 方位制御型高機能ナノ結晶材料の開発

ナノテクノロジーの大きな目標の一つに、強磁性体ナノ結晶を非磁性体の中に析出、成長させることにより超高密度の記録素子を作る試みが精力的に行われている。この場合、ナノ結晶の方位を揃えることが、高密度化や書き込み、読み取りの S/N 比を向上させる上で不可欠となる。しかしながら、これまでの手法では、ナノ結晶を析出させることは可能であるが、その方位を配向させることまではできない。本研究室では、材料組成の制御に加えて、ある特定の応力を材料に負荷させることにより、2 nm の強磁性体ナノ結晶をアモルファス中に高密度かつ自己組織的に析出させることに成功した。図1にその透過電子顕微鏡写真を示す。

本技術は、高 S/N 比のテラビット級超高密度大容量磁気記憶媒体への応用が期待できる画期的な成果として注目を集めている。

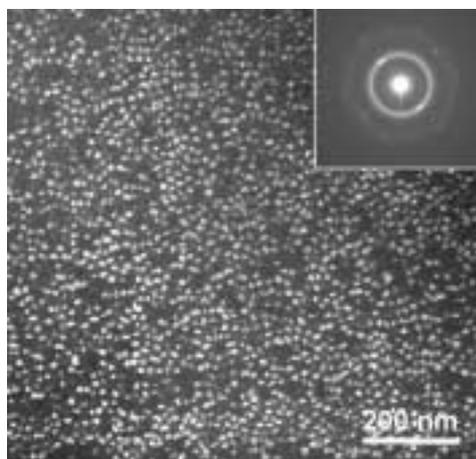


図1 Ni-P アモルファス合金中に方位配向析出させたナノ結晶。一つの結晶のサイズは約 2 nm である。

### ナノ構造制御による高性能 MEMS 材料の開発とその評価

MEMS (微小電子機械システム) は、基板上に生成させた薄膜に対して、微細表面加工を行い、一つの基板上に電子回路と微小可動部品を作製し、一つの微小デバイスとしたものである。このような MEMS デバイスは、光スイッチを始めとする光情報関連分野や、マイクロカテーテルなどのバイオ・医療技術を支えるものとして、今後大きな発展が期待されている。ところで、このような MEMS デバイスを構成する部品のサイズは、薄膜の厚さを基準とする寸法、すなわちミクロンオーダーになる。したがって、信頼性、耐久性に優れる MEMS デバイスを作製するためには、ミクロンサイズの材料に対する材料強化法の確立が必要となる。通常サイズの材料では、これまで結晶粒の微細化、析出物の分散等によって材料の強化が行われてきた。しかしながら、ミクロンサイズの構造体に対しては、このような材料強化法は使えず、今までの材料強化法とはまったく異なるナノメートルサイズを基本とする新たな材料強化法の開発が強く望まれる。そこで、本研究室では、微細構造物の局所領域にイオン注入を行う選択的な材料強化法の開発や、超音波を利用したショットピーニングと熱処理を組み合わせることにより、材料表面層のみをナノ結晶化させた表面ナノ構造制御材料の開発を行っている。ところで、このようにして作製したマイクロ材料について、機械的性質の評価が重要となる。本研究室では、ミクロンサイズの材料に対して、強度、靱性、疲労特性等の機械的性質の計測が可能な材料試験機を世界に先駆けて開発し、この装置を用いて微小寸法材料の評価を行っている。図2に開発した試験機の写真を示す。この評価試験装置は、現在のところ世界に1台しかなく、世界各国から国際共同研究の申し込みが相次いでいる。また、このような微小材料の機械的特性評価の国際標準化を目指した国際共同研究も実施している。

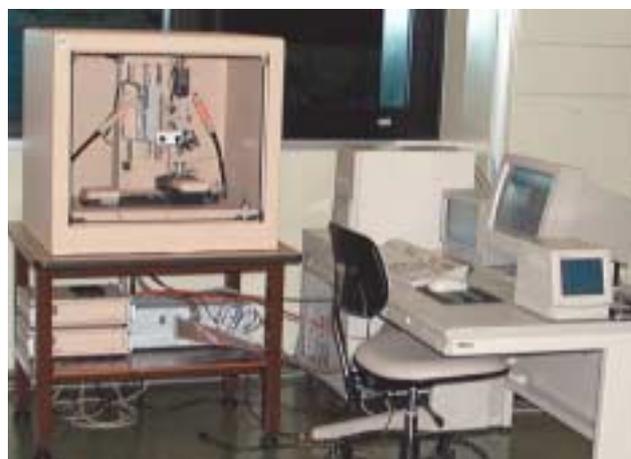


図2 本研究室で開発したナノ/マイクロ材料評価試験機

## ◆ 曽根研究室

**MEMS 用超微細システムのための材料開発とその評価**

<http://materia.titech.ac.jp/sone.html/>



曽根 正人 准教授

MEMS (Micro-Electro-Mechanical System: 微小電子機械システム) デバイスやマイクロマシンに代表されるように、「機械システムの微小化」は世界的な技術課題となっています。このようなデバイスで使用される部品はミクロンオーダーのサイズであり、この部品の材料は高い成型加工性を有し、ミクロ環境下において十分な信頼性や耐久性を達成するための強度・韌性・耐摩耗性などの様々な性能を有する必要があります。従って、MEMS の更なる高機能化・微細化を達成するためには、ミクロン・ナノオーダーの成型加工を可能とする材料作成技術、更には、作成したマイクロ材料の機械的特性を測る評価技術の確立が必要となります。

本研究室では、ミクロン・ナノオーダーの成型加工を可能とする材料作成技術の開発を行うとともに、ミクロンサイズの材料の評価法を開発する研究を進めています。なお本研究室は肥後研究室と一体運営されており、そちらの研究テーマも併せてご覧ください。

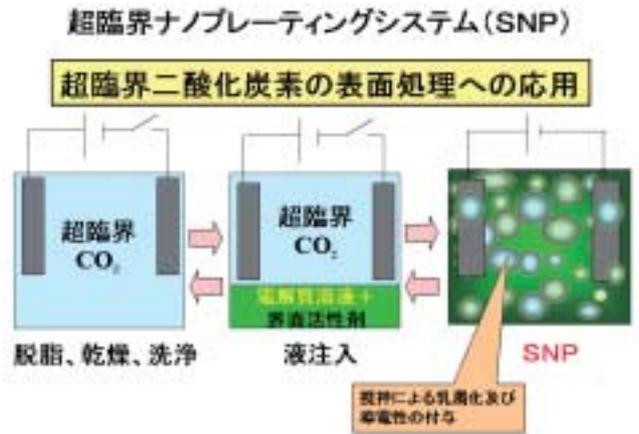


図2 超臨界ナノプレーティングシステム

### 超臨界ナノプレーティングシステム (SNP)

本研究室では、この超臨界流体技術と電気めっき技術を融合した新規技術である超臨界流体ナノプレーティングシステムを世界で初めて開発しました (図2)。この技術は、二酸化炭素で洗浄・乾燥を行い、めっき反応を二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) とめっき液のエマルジョンで行うことを特徴としています。超臨界 CO<sub>2</sub> 中では電気めっき反応は不可能といわれていましたが、界面活性剤を利用したエマルジョンを用いることで、超臨界 CO<sub>2</sub> の液体的特性によりエマルジョンの安定化を行い実現しました。また、超臨界 CO<sub>2</sub> の気体的特性により低粘度と水素溶解を可能とし、高い均一性と高硬度を有する Ni、Au、Pd、Cu などの金属皮膜の作成を可能としました。得られた金属皮膜は従来のめっき法で作製された膜と異なり、ピンホールが無くレベリングも高く、更に金属粒径が10nm 前後と非常に細かく緻密であり硬度も高いのでドライプロセスのように薄膜化が可能となりました (図3)。また、面粗度20nm を達成する均一な高性能膜が生成することを明らかにしました。更に最近では、濃硫酸中で腐食しない膜厚300nm の金属皮膜の作成に成功しました。

現在、この SNP 技術を MEMS 用超微細システムへ応用すべく研究が進められています。また、これと同時にミクロンサイズの材料の評価法を開発する研究を進めています。

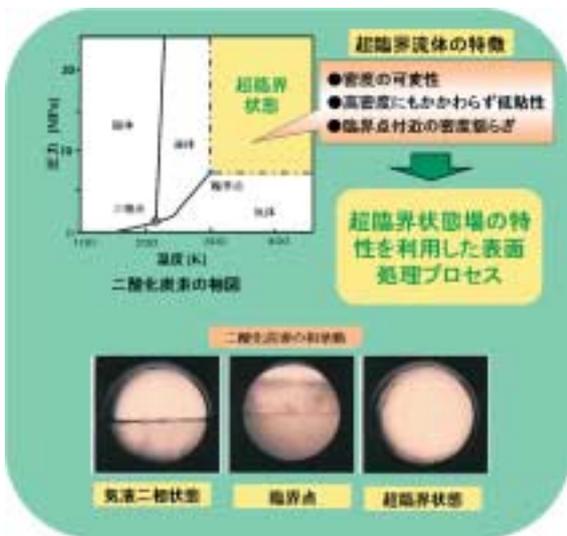


図1 超臨界状態場とは

### 超臨界流体とナノテクノロジー

本研究室の MEMS 用超微細システムのための材料開発の特徴は、超臨界流体場を用いることにあります。超臨界状態とは、気体と液体の境界である沸点が消失する臨界点の温度・圧力以上の状態と定義されます (図1)。この超臨界状態では、①気体から液体までの密度を連続的に可変しうる、②高密度でありながら低粘性の状態を実現できる、③臨界点付近での超臨界流体中の分子は動的クラスターを形成し、このクラスターにより異常な溶解性を実現できることが知られています。このうち、②における高密度でありながら低粘性ということは、気体の高拡散性と液体の溶解性を同時に達成できることを意味しており、気体でも液体でもできないナノ領域への物質輸送を可能とします。また、①における密度の幅広い可変性により、ナノ領域への物質輸送後に、気体と液体の界面張力による細孔内収縮などのナノ構造の破壊を防ぎつつ乾燥や洗浄を実現できるのです。

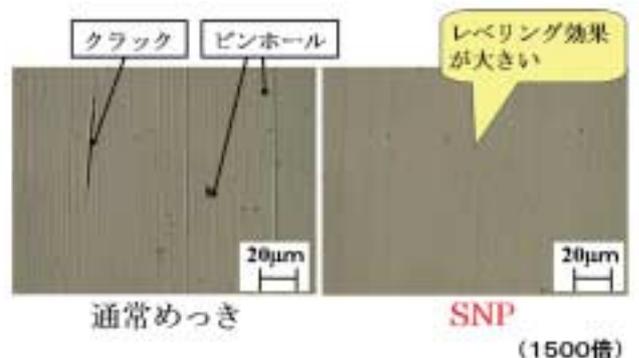


図3 通常めっきと SNP による金属皮膜

## ◆若井研究室

ナノ・マイクロ世界の驚きを求めるダイナミック構造設計

<http://www.msl.titech.ac.jp/~dfc/>



若井 史博 教授

地球を構成する主要元素であるケイ素、アルミニウムなどの酸化物、窒化物、炭化物であるセラミックスは、強固な原子間結合力のため、硬い、化学的に安定、高温で使用できる、という特長があります。地球温暖化ガスによる温室効果の削減や省エネルギー化の要求に対する高効率発電システム部材、耐磨耗・高温構造部材、マイクロマシンデバイスなど、エネルギー、輸送、製造、建築システム等の要素部品として、多様な未来産業の基盤となる材料です。一方、本質的に脆く、巨視的強度はミクロ欠陥に支配されます。安全・安心なシステムの実現に向けた材料レベルからのアプローチとして、セラミックスの脆性の克服とセラミック部材の信頼性の確保は挑戦すべき重要な課題です。

脆いセラミックスに室温で延性を付与することは未だ夢ですが、若井研究室では、セラミックスが高温でチューインガムのように巨大に伸びる超塑性という現象を世界で最初に発見しました。結晶粒の大きさがナノメートルスケールになったナノ材料は通常は多結晶材料の常識を超えた不思議な性質を示します。超塑性はナノ材料が示す意外な性質のひとつですが、ナノ材料の背後にはまだまだ未知の物性が数多く隠されていそうです。本研究室では、ナノ・マイクロ構造デザインによって、超耐熱性から超塑性まで幅広く物性を制御し、画期的な特性をもつセラミックスの創製を目指します。さらに、高温での粒界ネットワーク構造のダイナミクスに関する新しい概念や基本原理を提唱することを目指しています。

### ナノ構造プロセッシングによる新材料創製

熱力学的に不安定なナノ材料をいかに実現するかが材料創製の課題です。ナノ・マイクロ粒子集合体では、高温で原子拡散により粒子間の結合が形成されます。この焼結現象はセラミックス製造プロセスの基礎です。ナノ構造プロセッシングとして、ナノ粒子の熱間静水圧焼結 (HIP)、焼結鍛造、メカニカルアロイングなどの手法を駆使して、新しい性質をもつセラミックスを次々と作り出すことができます。

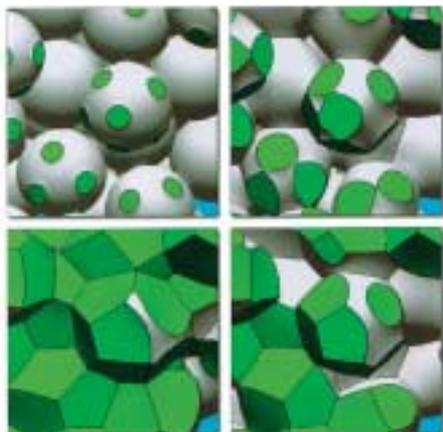


図1 焼結プロセスの3次元シミュレーション (2006)

### 高速超塑性を目指して

セラミックス超塑性は、ジルコニアで最初に発見されました。ジルコニアは鉄系合金のマルテンサイト変態強化と類似した機構によって高強度・高靱性を示します。私たちはジルコニアだけでなく、窒化ケイ素、炭化ケイ素、バイオセラミックス、超電導セラミックスでも超塑性を実現しました。セラミックス超塑性の世界は想像力だけでどんどん広がっていきそうです。

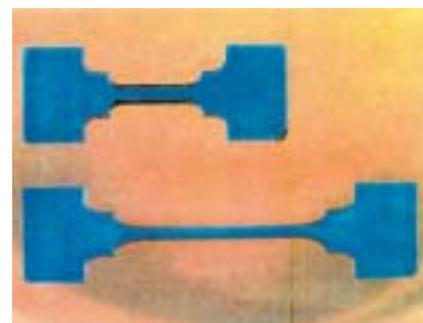


図2 窒化ケイ素の超塑性変形  
Nature1990

超塑性の発見はセラミックスを自由自在に変形する成型加工技術を可能にしました。ジルコニア系複合材料では1秒で試験片が倍の長さに伸びる高速超塑性も可能となりました。地球上で最も硬い材料のひとつである窒化ケイ素や炭化ケイ素などで高速超塑性を実現することは挑戦的な課題ですが、図のような超塑性成形の実用化につながるでしょう。



図3 セラミックスの超塑性成形

### 粒界ネットワーク・ダイナミクス

セラミックスは焼結技術を原点として発展を遂げ、その特徴は部材産業であること、すなわち、部材化技術が国際競争力と付加価値の源泉です。セラミックスは膨大な数の結晶粒から構成されます。結晶粒子を緻密な部材へと変換するプロセスが「焼結」です。これは、粒界ネットワーク構造の形成プロセスであり、「超塑性」機構とも深い関連があります。複雑な粒界ネットワーク構造のダイナミクスを解析する道具として、コンピューター・シミュレーションを駆使して、より優れた材料特性を実現するためのダイナミック構造デザインを提唱しています。私たちは、組織形成プロセスにおける新概念や基本原理の再定式化を提案することを目指しているのです。

## 赤津研究室

(応用セラミックス研究所, 構造デザイン研究センターが協力)



赤津 隆 准教授

### 局所高応力場で視るセラミックスの破壊と変形

<http://www.materia.titech.ac.jp/akatsu.htm>

セラミックスは変形や破壊に対し「融通の効かない」共有結合やイオン結合で基本的に構築されるため典型的に「硬くて脆い」材料です。しかし、亀裂先端、点接触部及び粒界などの極めて大きな応力が集中する場においては、セラミックスも特異な力学的振舞いを示すことが知られています。こうした局所高応力場におけるセラミックスの力学的性質を探索し、高性能構造用セラミックスを開発することが私たちの基本的な研究方針です。以下に現在行っている研究テーマの具体例を示します。

### 高靱性セラミックスの材料設計

亀裂先端での高い応力集中を緩和させる機構が作用しにくい通常のセラミックスは極めて脆く、これを構造用部材として危険なく使用するだけの技術は現状ではありません。従って、セラミックスの脆さ改善は工学上非常に重要です。破壊靱性値 (Fracture Toughness) を大きくすること、つまり高靱性化することが脆さを改善する1つの方法であることを破壊力学は教えてくれます。私たちは結晶粒界や複合材料における異種界面を利用して元来脆いセラミックスを高靱性化するにはどのような微細構造デザインが必要か? という難問に挑戦しています。例えば、セラミックウイスキー (ひげ状単結晶) を強化材としたセラミック/セラミック複合材料が通常のセラミックスよりも高い破壊靱性値や破壊エネルギー (Work-of-fracture) を示す現象を精度の高い実験によって実証し、その高靱性化機構をよく説明できるウイスキー亀裂面架橋モデルを提唱しています。さらに、ウイスキーの配向状態やウイスキー/マトリックス界面の制御によってより大きな高靱性化が達成できることを明らかにしました。

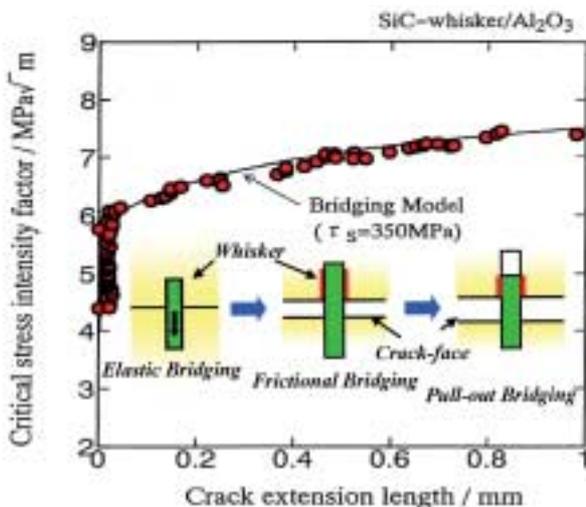


図1 ウイスキー強化セラミック複合材料の R 曲線挙動の実験値 (赤点) と亀裂面架橋モデルによる予測値 (実線)

### ナノインデンテーション法によるセラミックスの弾塑性解析

古くから材料の硬さや脆性材料に対する破壊靱性値の評価手法として用いられてきたインデンテーション法の最大の特徴は、セラミックスといえども室温で塑性変形を生じさせるほどの圧子直下の高応力場であり、それに伴う弾塑性変形から局所的な力学的性質を場所場所で評価できる可能性をもっていることです。私たちはナノメートルオーダーで押し込み深さを制御・計測できる独自のナノインデンターを開発しました。このナノインデンターには外的変形を排除した「真の押し込み深さ」を直接測定できる特徴があります。これを用いてセラミック材料のインデンテーション挙動の評価・解析を行い、弾塑性変形と微細構造との関連を研究し、材料の「硬さ」とは何かについて探求しています。また、極微小押し込み深さでは材料の不均質性や異質性は必然的に無視できなくなるにもかかわらず、均質等方体を前提とした押し込み理論による解析が一般的です。私たちは圧子押し込みによる実験結果をより正確に解析するために、スーパーコンピュータを用いた有限要素解析を有効に活用しています。ナノインデンテーション法は上述のような基礎的研究ばかりでなく、マイクロマシンなどに用いられる微小材料評価など実用的側面でも有益であると考えています。さらにバルク体だけでなく、基板上の薄膜やテープ状試料も評価対象にできるメリットを有しています。



図2 自作したナノインデンター (特許公開中)。圧子直下に発生する高応力場での力学特性が評価できる。

### 研究室の特徴

赤津研究室は様々な大学、学科出身の学生により構成されています。新しいことに挑戦する機会をできる限り尊重しているため、個性を活かしながら研究をエンジョイしようという雰囲気があります。大学院の講義ばかりでなく、ゼミや研究などでの懇切な指導を通して、学生のレベルアップ・スキルアップを心がけています。修了後の進路は材料系に限らず多岐にわたっており、OBの方々は色々な方面で活躍しています。

## ◆高柳研究室

<http://www.materia.titech.ac.jp/takayanagi.html>



高柳 邦夫 教授

表面科学は、急速な進展を果たした。1927年に Devisson&Germer がニッケル表面の低速電子回折図形を得、1947年に清浄 Si(111) 7×7 表面の再構成がみつき、1948年に Brattin&Bardeen の半導体—金属点接触型トランジスタが現れて表面科学が産声をあげた。現在では、固体表面を原子レベルで観て、個々の原子を操作して、ナノスケール物質をつくることや、分子をつかって機能物質をデザインすることが可能となった。今、表面科学は、ナノスケール物質を作る探索研究フェーズからそれらの性質を解き明かす物性研究フェーズに展開しつつある。ナノスケール物質のキーワードは、“量子化”である。たとえば、ナノスケールの粒子中に閉じ込められた自由電子は新たな離散的電子状態をつくり、あたかも新種の原子のように振る舞うのである。

我々の研究グループでは、これまでの表面・界面科学を推進してきた研究基盤にたつて、表面研究に新展開を引き起こしつつある“ナノスケール科学 (Nano-Science&Technology)”を進めようとしている。以下に具体的なテーマの内容を記す。

### 量子コンタクトの室温量子化伝導

2つの電極を結ぶ接点の太さがフェルミ波長程度に細くなると、接点を流れる電子（正孔）の電気伝導度（コンダクタンス）が  $2e^2/h$  を単位として量子化される。ここに、 $e$  は電子の電荷、 $h$  はプランク定数であり、単位の大きさは  $(12.9k\Omega)^{-1}$  である。接点が大きくなると、コンダクタンスはその整数倍の値を取る。この特徴は、接点を弾道的 (ballistic) に通過する電子が量子化 (quantize) され、

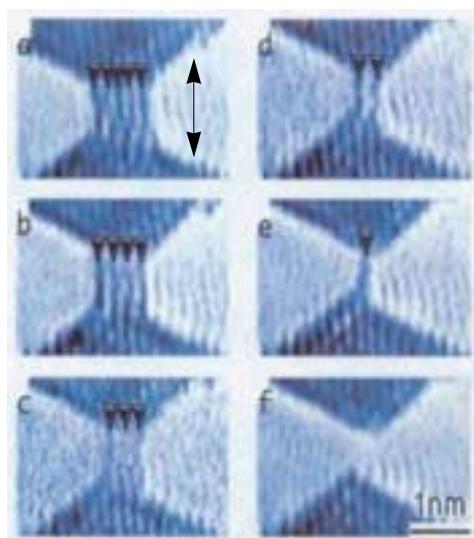


図1 金の量子コンタクトの電子顕微鏡写真。黒い線は原子鎖。STM を使って、電極を引き離すと、接点に作られた金原子鎖が一本ずつ減って、接点が次第に細くなっていく。電極に電流を流して同時計測したコンダクタンスは階段状に減少し、階段の高さは  $2e^2/h$  の整数倍になっていた。

決まった数のコンダクタンス・チャンネルしか持たないことによる。

金のフェルミ波長は、概ね0.5nm なので、原子の太さをもつ量子コンタクトが作れたときに、この量子化は起こると期待される。我々は数原子以下の太さのコンタクトを作り、コンダクタンスを同時に計測する実験に挑戦した。実験のために電界放射型電子銃をもつ超高真空電子顕微鏡に走査型トンネル顕微鏡 (STM) を組み込んだ装置を開発した。結果は、図1のように、金コンタクトに原子の鎖が作られ、コンダクタンスの量子化が起きていることが分かった。

これから、この研究を**磁性コンタクト**に展開し、スピン量子伝導や、量子化された磁気抵抗効果の性質を明らかにしようとしている。

こうした研究方向で、従来型の半導体デバイスとは違う、**新型の量子デバイス**へつなげて行きたい。

### ナノワイヤのバリスティック伝導

図1の観察結果を観ると、量子コンタクトの接点には均一な太さの金ナノワイヤが自然と形成されている。ナノワイヤのような一次元電子系で期待される**朝永-Luttinger 液体**の振る舞いを研究するため、10nm~100nm ほどの長いナノワイヤを作ることを現在進めている。現在まで、作られているのは20nm 程までであるが、ナノスケールになって始めて現れる不思議な現象が現れた。金のナノワイヤが、まるでカーボンナノチューブのように**カイラル・チューブ**となっていること、しかも**マジック構造**を持つことが分かってきた (図2)。また、原子鎖も作れている (図3)。

現在、ナノワイヤの構造、伝導特性、光学特性などを調べて、ナノスケール物質という、数100個~数千個のアンサンプルの魅力を明らかにしよう計画を進めている。

そのため、**ナノプローブをもつ超高輝度超高真空 TEM の製作**や、原子間力顕微鏡 (AFM)、走査型トンネル顕微鏡 (STM)、光ファイバーによる光子検出などの実験手段を独自のアイデアと共同研究によって推進させている。

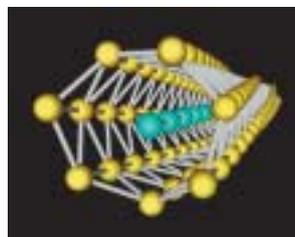


図2 金ナノワイヤのマジック構造。黄色、青色の玉で原子を表す。外側のチューブに7本の原子列が螺旋を描き、チューブの中心に1本の原子鎖が通っている。

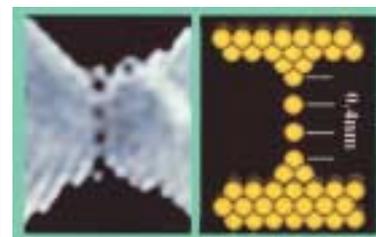


図3 宙に浮く原子鎖の電子顕微鏡像。金原子が4個、直線に並んで原子鎖を形成している。黒い4つの点が金原子。鎖の周囲の空間は真空である。右側の図は原子鎖のモデル。

## ◆山本研究室 (統計固体物理学講座)



山本 直紀 准教授

<http://www.materia.titech.ac.jp/yamamoto.html>

透過型電子顕微鏡 (TEM) と走査型トンネル顕微鏡 (STM) の発展により現在では固体構造および表面構造の原子スケールでの直接観察が可能となっている。本研究室では、TEM や STM がもつ小さなプローブ径の電子ビームを利用し、入射位置から放射される光を測定することで局所的な物性を調べ、ナノ構造のもつ固有の新物性を探索している。人工的に作られた半導体の量子構造や、金属、半導体の表面に形成される表面ナノ構造が示す光学的性質を調べることが現在の研究テーマである。これらの構造には量子サイズ効果による電子状態変化や光物性変化など、ナノスケールにすることで生じる電子系の新物性が現れる。最近、ナノ構造を超高真空中で種々の方法により作製し、測定する装置の製作を行っている。また、フォトリソグラフィによる光やプラズモニック結晶の表面プラズモンの性質を、電子線励起発光顕微法を用いて調べる研究を行っている。

### 半導体量子構造の光物性の研究

半導体のサイズが小さくなると電子準位がとびとびになる量子効果が顕著になる。そのため、半導体が量子井戸、量子細線、量子ドットといった量子構造を持つと発光のエネルギーや偏光特性がサイズや形状で変わり、電気的および光学的性質に特有の性質が現れる。ナノ構造が密集していると巨視的な測定法では新規な物性は平均化され隠されてしまう。本研究室では、局所からの発光を検出する手法として透過型電子顕微鏡を使ったカソードルミネッセンス (CL) 法を用いて、高密度に分布したサイズの異なる量子構造を個別に調べる研究を行っている。図1に、(a) InP 量子細線 (ナノワイヤ) 構造の SEM 像と (b) GaAs 結晶中の InAs 量子ドットの TEM 像を示す。ナノワイヤ1本1本の発光スペクトルを測定すると異なる波長にピークが現れ、発光がワイヤ方向に強く偏光していることが観測される。

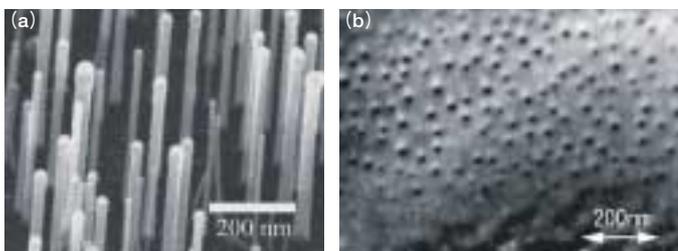


図1 (a) InP ナノワイヤの SEM 像と (b) InAs 量子ドットの TEM 像

### 電子線励起発光顕微法によるプラズモニック結晶の研究

電子が物質に入射すると可視光の波長領域ではチェレンコフ放射や遷移放射といった光が放出される。これらは入射電子と物質中の電子系との相互作用によって生じる放射現象で、その放射スペクトルは物質の誘電率に依存する。特に金属では表面のプラズマ振動 (表面プラズモン) による放射が起こり、 $0.1\mu\text{m}$  オーダーの大きさの金属微粒子からはプラズマ振動の多重極モードの放射が観測される。様々なナノ構造を作製し表面に励起されるプラズモンが起こす

放射の性質について調べている。図2は、ポリスチレン球をベースに作製した銀の微粒子の2次元配列構造である。発光スペクトルには多数のピークが現れ、ピーク強度は電子ビーム照射位置で激しく変化する。その様子はピーク波長で測定したフォトンマップ (図2下図) に現れており、このパターンは表面プラズモンの定在波モードの空間分布を表している。この測定からプラズモニック結晶における表面プラズモンのバンド構造を推定できる。

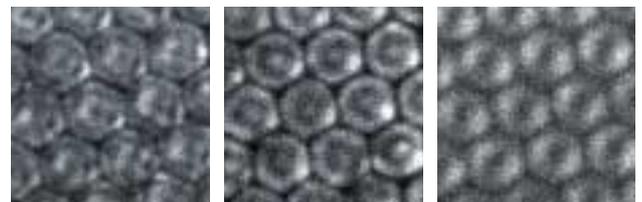
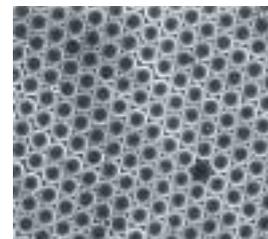


図2 銀微粒子配列 (粒径500nm) とピーク波長のフォトンマップ

### 走査型トンネル顕微鏡 (STM) による表面光物性の研究

表面には固体内部と違った表面特有の構造が現れる。それに伴い表面のさまざまな物性も固体と違ったものになると考えられる。表面構造を原子レベルで調べる装置に走査型トンネル顕微鏡 (STM) があるが、最近この装置に光を検出する装置を組み合わせると試料からの発光を調べることができるようになった。トンネル電流が流れる微小領域からの発光を測定し、表面モルフォロジーに加えて物性に関する情報を同時に得ることが出来る。発光スペクトルや発光の空間分布から表面特有の物性や、金属・半導体表面で起こる特有な発光現象を研究している。

図3は、超高真空 STM 内で測定した Si(111)  $7\times 7$  表面構造のフォトンマップで、アドアトムの位置が明るいコントラストを生じている。このような表面にナノ構造が形成されたときの光学的性質の変化を STM 発光から直接調べようと試みている。

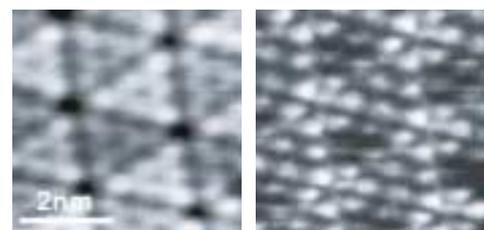


図3 Si(111)  $7\times 7$  表面の STM 像とフォトンマップ ( $V_s = -3\text{V}$ ,  $I_t = 1.5\text{nA}$ )



### ◆富田研究室



富田 章久 准教授

<http://www.materia.titech.ac.jp/tomita.html>

情報社会の進展に伴い、IT 技術への要求はどんどんエスカレートしています。より高速大容量の通信、これまでとは桁違いの大規模計算、絶対に安全な秘密の保持など。このような要求にこたえるには従来の技術の延長だけでは十分ではなくなってきているのかもしれない。情報処理に量子力学の考え方を持ち込むことに従来の情報処理技術の限界を超えようとする試みが始まっています。

量子情報技術では情報を 1 個、あるいはごく少数の光子や電子に担わせます。そのため、情報そのものが量子力学に従うようになり、量子情報技術ではどう使われるかということを考えながら具体的なデバイスを開発していかなければなりません。そのようないわば異文化との出会いが量子情報の面白さでもあります。実際、私たちは数学・情報科学の出身者と共同で量子暗号や量子計算の実現法を研究していますし、一方ではアバランシェフォトダイオードの開発を光通信デバイスの研究者と行っています。

当研究室では光を利用した量子情報処理技術の実現を目指しています。光は環境との相互作用が小さいため量子情報を送るのに適しています。また、光通信用に開発された変調器や各種の受動光学素子を使って光子の状態を制御することも比較的容易です。その反面、2つの光子を相互作用させて論理演算を行うのは大変難しいという欠点もあります。そこで私たちは光の長所を生かした伝送（量子暗号）や線形の光子状態制御を使った量子情報技術の開発と光子状態を光子で制御するためのデバイスを開発するための研究の 2 本立てで研究を進めています。

当研究室では、量子暗号通信に必要な光子検出器を開発しています。光通信用のアバランシェフォトダイオードを用い、動作条件の最適化と独自の差動回路により世界最高の感度を得ています。光子検出器の性能は量子暗号伝送の距離を制限しているため、私たちの光子検出器を利用することにより 100km という光ファイバで最長の伝送に成功しました。

また、光部品を利用することで量子計算の重要な部分である量子フーリエ変換が実現できることを見出し、実際 1024 ビットの量子フーリエ変換を行うことができました。このほかにも、量子情報で必要とされる機能を現在ある技術で実現するための検討を行っています。

量子誤り訂正や量子計算でより高度な操作を行うためには量子ビットを他の量子ビットの状態に応じて変化させる量子制御ロジックデバイスや量子ビットのレジスタが必要になります。私たちは将来の集積化を考慮し、半導体量子ドットを用いた固体デバイスを検討しています。量子ドット中の励起子は固体中の 2 準位原子とみなすことができ、量子ビットを表現できます。一つの量子ドット光学的性質を調べるため共焦点顕微鏡と近接場光学顕微鏡の開発を行っています。さらに、量子ドットの励起子と光の相互作用を強めるためにフォトリック結晶を用いた微小共振器で光子のエネルギーを小さな体積に集める研究も行っています。この分野の研究はまさにナノテクノロジーと量子情報の接点であり、これから重要になっていくものと考えています。

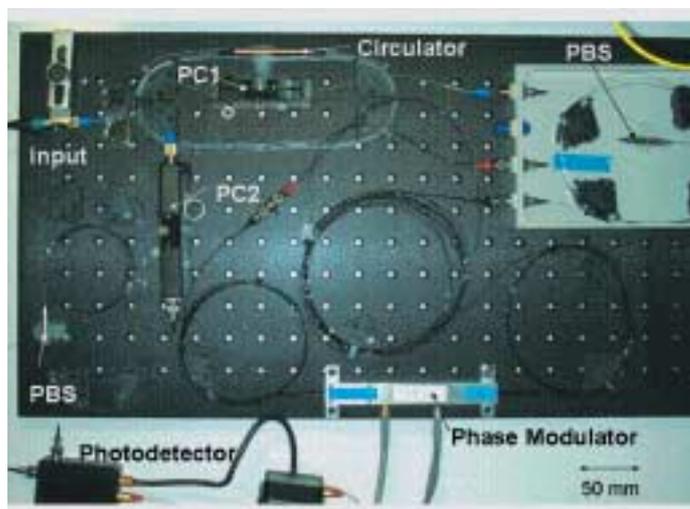


図 1 ファイバ光学部品で構成した量子フーリエ変換回路  
今の技術でできる量子計算の一つ



図 2 量子ドットを 1 個ずつ分離して観測するための低温強磁場近接場光学顕微鏡

# 先輩の声

## 本光 英治 (2003年4月博士課程入学)

2004年 MRS Fall Meeting に参加する機会を与えていただきました。とはいうものの、自称「尊皇攘夷の志士」である私は、その時点で自分が外国に行くことに対して嫌悪感を抱き、先生方から「ボストンに行ってい」いわれたときは相当取り乱しました。実際、アメリカ滞在期間中も英会話に四苦八苦しましたが、驚いた事に現地の人たちは私の想像を超えて気さくで親切な人たちが多く、見知らぬ「外国人」である私に対して親身に接してくるのです。私はといえば英会話が苦手なばかりに、彼らとのコミュニケーションを楽しめないばかりか、煩わしくさえ感じてしまったことが後になって非常に残念に思われました。

学会で発表した内容は、私が初めて創った物質に関する報告でした。ところがこれらの物質は当初期待したような性質を得る事ができなかったため、わざわざアメリカまで向うて発表する事に対して多少なりとも躊躇する気持ちがありました。そのような気持ちがプレゼンテーションに表れたのか、私の発表は、残念ながら抑揚のない淡白な調子で終始してしまいました。

現在この研究が発展して、私の研究もようやく興味深い成果が挙げられるようになりました。今度再び海外へ行く機会が与えられたら、今回のほろ苦い体験を元に自分の研究の成果を胸を張って堂々と発表できるように努めたいと思います。そのためにも英語の勉強にもっと積極的に取り組みたいと思います。

## 富田 恒之 (2002年3月博士課程入学、日本 MRS 奨励賞受賞)

2002年12月に行われた第14回日本 MRS 学術シンポジウムで「乳酸チタン錯体を用いた水溶液からのチタン酸ストロンチウムの合成」というタイトルのポスター発表をし、これに対して奨励賞を頂きました。私としては、研究内容、ポスター共に十分納得のいくものだったので、それだけで満足していたのですが、この様な形で評価されることはさらに嬉しく、大変光栄です。この研究は新しいものを作るのではなく、今まであるものを環境にやさしい新しい手法で作るというもので、決して派手な研究ではないため注目されることも少ないのですが、もし実用化につながれば現在の環境問題に少しでも貢献ができると思います。そのためにもこの賞を励みに、これからも頑張りたいと思います。



## 野村 研二 (2001年4月博士課程入学、2002年秋応用物理学会講演奨励賞、2004年 MRS Graduate Student Gold Award 受賞)

2004 MRS Spring Meeting (San Francisco) にて講演した“Carrier Transport of Extended and Localized States in InGaO<sub>3</sub>(ZnO)<sub>5</sub>.” に対して、Graduate Student Gold Award を頂きました。発表間近まで実験していたような状況でしたが、研究室の仲間や先生方に助けてもらったおかげでこのような賞を頂くことができました。この受賞は、私にとって大変光栄なことであり、さらに研究を進めていく上で非常に励みになりました。英語でのプレゼンテーション自体はお世辞でも誉められるものではなく、反省する点も数多くありました。しかし、これらの経験は私にとって大変有意義なものであり、また次に前進するための十分な動機になるものだと確信しています。



## 村石 信二 (1999年4月博士課程入学、現在 東京工業大学 大学院理工学研究科助教)

博士課程3年次に韓国釜山で開催された国際会議に参加する機会に恵まれました。通常ならば国際会議独特の雰囲気と慣れない海外に右往左往する所ですが、ともに参加した熊井先生、韓国人留学生韓さんのおかげで、訪問先での交流、遭遇したハプニングなど印象深い滞在でありました。とりわけ私にとって初めてとなる英語によるプレゼンテーションは生涯忘れられない出来事です。前日までに、OHP、原稿の暗唱といった下準備は充分整えました。当日いざ会場に入ると、当たり前のように英語で進行していく会場の様に圧倒され、「本当に自分は英語でしゃべれるのか？」と非常に不安になりました。しかし、「今の自分で堂々とやろう」という良い意味で開き直りの境地がプラスに働いたことを覚えています。とても平常心で迎えられる物ではありませんが、発表は質疑応答まで無事に終えることができました。発表後は一日中興奮状態で、その心地良さの記憶が次にチャレンジさせる原動力でもあります。

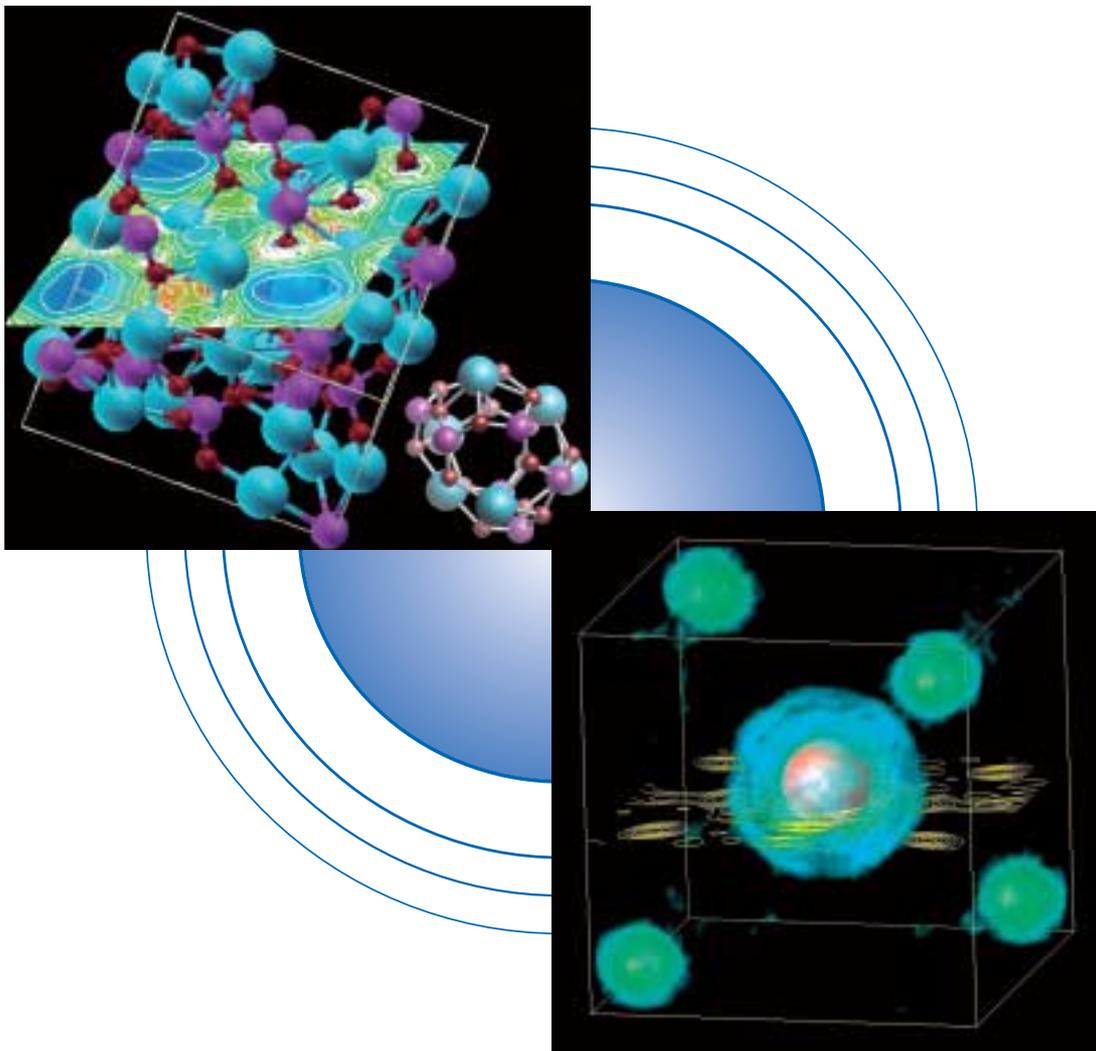
## 大岩 直貴 (1997年4月修士課程入学、現在 IHI 技術開発本部生産技術センターに勤務)

昨年10月より、航空機部品に適用を目指している摩擦接合の研究を行うため、英国はケンブリッジにある TWI (The Welding Institute) に家族ともども赴任しています。TWI は、アルミ合金の溶接法としては20世紀最大の発明と言われる、FSW (Friction Stir Welding) を発明した事で有名な研究所です。こちらでの研究生活は、日本のそれと比べるとずいぶんとゆったりしています。研究の経過ではなく、成果が求められるので、時間管理や休暇取得などは個人の裁量に任される部分が多く、多くのエンジニア、テクニシャンは2週間から3週間の長期休暇を取得して、旅行をするなど楽しんでます。その代わりに成果は厳しく審査されます。この雰囲気はずすかけ台の研究室のそれに似ているかもしれません。また仕事以外では同僚らとサッカー談義に花を咲かせたり、食事に招かれたり楽しんでます。英語がちっとも上達しないのが悩みの種ではありますが。長い冬もそろそろ終わりに近づいて来たので、今は欧州旅行を色々計画しています。日本の国内線よりはるかに安い！値段で、欧州のあちこちへ出かける事が出来ます。私と同じく(いやそれより厳しい環境で)活躍している日本人のサッカー選手を見に行ければなあと考えています。

# 平成18年度修士課程修了生研究題目

論文題目	指導教員
Si (111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上 2 次元電子ガスの散乱	平山・松本
Si (111) 表面における Ag 超薄膜成長	平山・松本
ナノレベルで構造制御されたエピタキシャル二酸化チタン薄膜の光触媒効果	松本・細野
ITO および LaCuOSe/NPB 界面のその場光電子分光測定	神谷・細野
金属-酸化亜鉛界面の第一原理計算	神谷・細野
フラックスエピタキシー法による ScAlMgO <sub>4</sub> エピタキシャル薄膜の作製	神谷・細野
12CaO・7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (C12A7) エレクトライドナノワイヤの作製と電気特性	細野・神谷
層状オキシリン化合物 LaMOP (M = Co, Zn) の電気・磁気特性	細野・神谷
C12A7 の結晶構造と金属-絶縁体転移	細野・神谷
C12A7 置換体の感湿特性および電子ドーピング	細野・神谷
C12A7 を用いた O <sup>-</sup> イオンの電界放出	細野・神谷
モルタル及び短繊維強化モルタルの高速衝撃破壊挙動	安田・若井
母材樹脂・界面接着強度の異なる CFRP の高速衝撃破壊	安田・若井
カーボンナノファイバーを強化材とした炭素複合材料の作製と特性評価	安田・若井
朱子織 CFRP 積層板の曲げ破壊挙動に及ぼす界面と樹脂の影響	安田・赤津
カーボンナノファイバーの配向が FRP の機械的・電気的特性に与える影響	安田・赤津
微細粒マグネシアの低温変形挙動	若井・赤津
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BN 添加液相焼結炭化ケイ素の超塑性変形挙動	若井・赤津
ナノインデンテーション法を用いた逆解析による基板上薄膜の力学特性評価	赤津・若井
アルミニウム陽極酸化皮膜の機械的特性に及ぼす火花放電の影響	赤津・若井
C <sub>12</sub> A <sub>7</sub> (Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> )-C <sub>13</sub> A <sub>6</sub> Hf <sub>2</sub> (Ca <sub>13</sub> Al <sub>12</sub> Hf <sub>2</sub> O <sub>35</sub> ) 系における融体急冷によるアモルファス相の形成とその結晶化	吉村・松下
鉄微粒子へのフェライトめっきによる複合磁気コアの形成とその高周波透磁率特性の改善	吉村・松下
スピネル型 Cd <sub>1-x</sub> M <sub>x</sub> Cr <sub>2</sub> S <sub>4</sub> (M=Fe, Co) の単結晶育成と磁氣的挙動の研究	川路・阿竹
X 線共鳴磁気散乱法による Ba フェライトのキャント磁気構造の決定	佐々木・川路
バリウムをドーブしたリン酸三カルシウムの結晶構造解析	八島・佐々木
イットリウムタンタル酸塩及びドーブしたランタンコバルト酸塩の結晶構造とディスオーダー	八島
ジルコニア-スカンジア固溶体の相転移とイオン伝導経路	八島・佐々木
電磁力衝撃圧着した Cu/Ni および Cu/Fe 接合材の界面組織	熊井・三島
Fe/Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub> および Al <sub>2</sub> Fe/Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub> 界面における Al <sub>5</sub> Fe <sub>2</sub> の成長挙動	熊井・三島
AC4CH アルミニウム合金レオキャスト材の引裂靱性に及ぼす熱処理の影響	熊井・加藤
高速双ロールキャスト材における内部割れの発生メカニズムとその抑制	熊井・三島
摩擦攪拌を応用した Fe/Al 重ね合せ接合材の接合強度と界面組織	熊井・加藤
二重円筒型双結晶の繰り返し変形挙動	加藤・尾中
Cu-Fe-Co 合金における粒界および粒界近傍での Fe-Co 粒子の析出	加藤・尾中
Half-Heusler 合金の組織複合化プロセスが熱電特性に及ぼす影響	加藤・三島
Sn 基はんだ合金の関与する混合律速型反応拡散の速度論的特徴	梶原・三島
導電性耐食合金と Sn の固相反応による化合物の成長挙動	梶原・加藤
Cu-Sn-Ti 二相合金と Nb の反応拡散による超伝導相の生成挙動	梶原・三島

論文題目	指導教員
耐熱合金設計における Ir-Ru 系拡散障壁層の機能評価	三島・木村
Half-Heusler 型 NbCoSn 合金の組織と熱電特性	木村・三島
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /GaAs ハイブリッド構造の磁気特性と界面を介した電気伝導	谷山・伊藤
リチウム添加ニオブ酸銀の結晶構造と強誘電および圧電特性	伊藤・谷山
デラフォサイト型 Cu(Fe <sub>1-x</sub> M <sub>x</sub> )O <sub>2</sub> (M=Sc, Cr) の電気磁気特性	伊藤・谷山
圧電応答顕微鏡を用いたリラクサー強誘電体のドメイン構造解析	伊藤・谷山
超臨界 CO <sub>2</sub> エマルジョンを用いた無電解めっき法の開発	肥後・曽根
SUS304 ステンレス鋼及び Zr 基金属ガラス微小引張試験片の機械的性質	肥後・曽根
アモルファス合金へのイオン照射により生じるナノ結晶の析出分布に及ぼす P 組成の効果	肥後・曽根
基板・薄膜間における剥離強度評価法の開発	肥後・曽根
鋭敏化 SUS304 ステンレス鋼の強加工と結晶粒微細化による耐食性への効果	肥後・曽根
Si(111) 基板上の In ナノ構造の STM 発光	山本・高柳

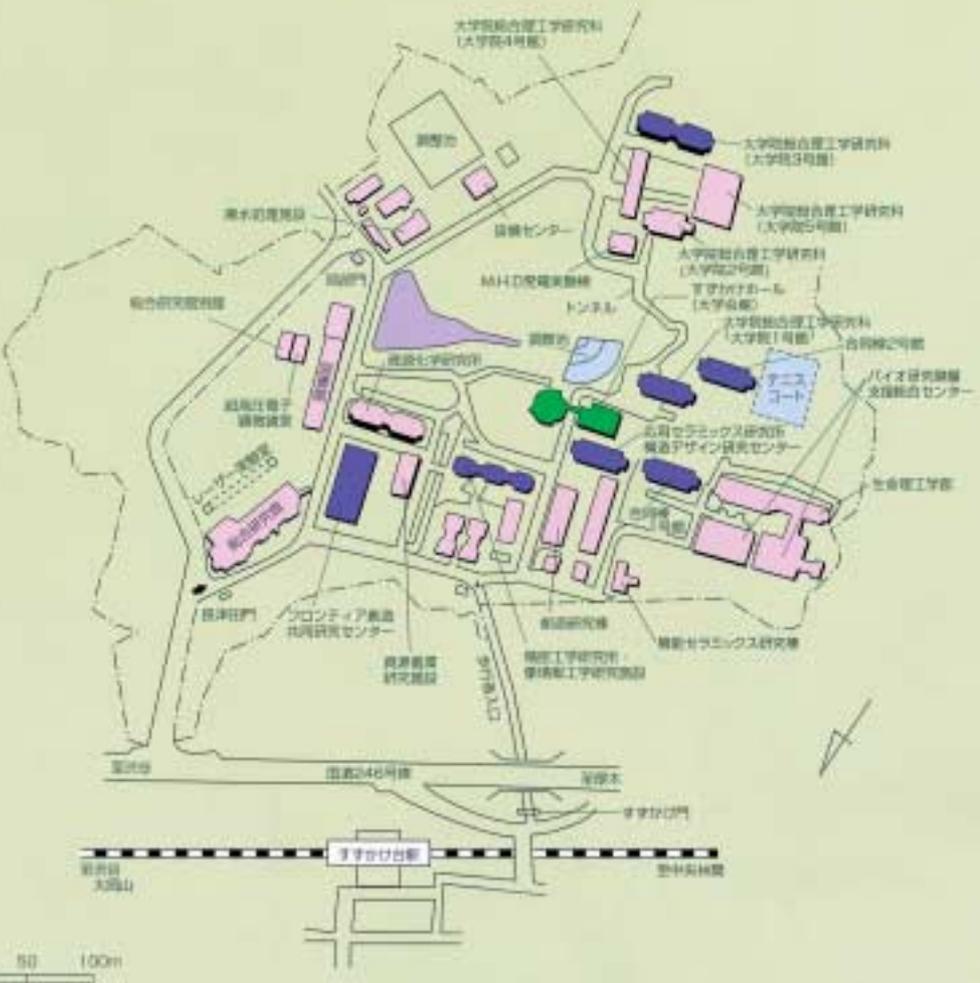




東京工業大学施設運営部提供

### すずかけ台キャンパスマップ

大学院総合理工学研究科 大学院1号館	G1棟
大学院3号館	G3棟
精密工学研究所 像情報工学研究施設	R2棟
応用セラミックス研究所 構造デザイン研究センター	R3棟
合同棟1号館	J1棟
合同棟2号館	J2棟
フロンティア創造 共同研究センター	S2棟
すずかけホール 食堂、生協、会議室など	



## 東京工業大学

大学院総合理工学研究科 材料物理科学専攻  
<http://www.materia.titech.ac.jp>

〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259  
 TEL 045-924-(各内線番号)

