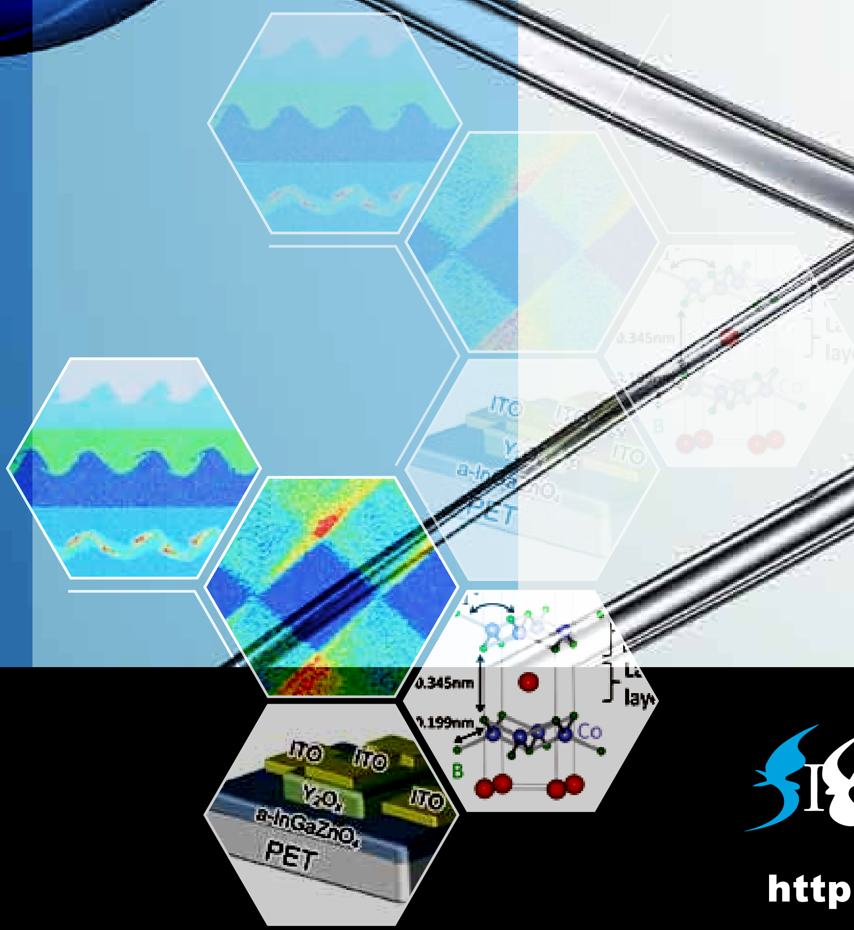
東京工業大学大学院総合理工学研究科

材料物理科学専攻要覧

2014

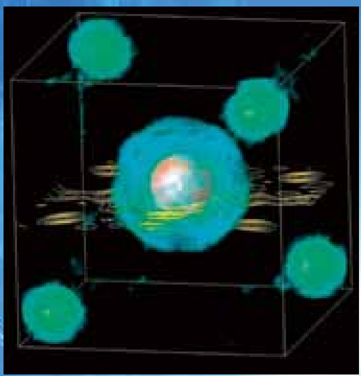
Department of Materials Science and Engineering
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering
TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY



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

ナノが創る機能から宇宙開拓まで



夢を拡げる材料

　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。

人を結ぶ材料

CONTENTS

材料物理科学専攻の組織

本専攻は平成26年4月1日現在、2つの基幹講座と9つの協力･準協力講座からなる。
基幹講座は専任教員8名と客員教員（連携）6名、協力･準協力講座は合計13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	寺田 芳弘
	メゾスコピック	加藤 雅治	
	構造機能特性	梶原 正憲	木村 好里
	材料応答［連携講座］	内海 研一 神戸 洋史 吉永 直樹	
量子表面	表面物質	平山 博之	中辻 寛
	非平衡相		合田 義弘
	量子材料［連携講座］	日比野浩樹 蟹澤 聖	五十嵐信行
低負荷物質合成			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	
電子活性物質		真島 豊	平松 秀典
相乗機能物質			阿藤 敏行
材料機能評価		里 達雄	曽根 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	
元素機能解析			松石 聡

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

頁	指導教員	教員室	内線	E-mail	研究内容
06	教授 尾中 晋	J2-1505	5564	onaka.s.aa@m.titech.ac.jp	**好奇心からはじめよう** 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（マイクロメカニックス）
07	准教授 寺田 芳弘	J2-1404	5630	terada.y.ab@m.titech.ac.jp	**環境性能に優れた高温構造用材料の開発** 高温構造用金属系材料の組織制御と力学的特性評価
08	教授 加藤 雅治	J2-1407	5633	kato@materia.titech.ac.jp	**「優しさ」のための「なぜ？」を追究する** 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
09	教授 梶原 正憲	J2-1409	5635	kajihara@materia.titech.ac.jp	**環境と調和する新しい導電性合金・超伝導合金の開発** 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
10	准教授 木村 好里	J3-1516	5157	kimura.y.ac@m.titech.ac.jp	**地球に優しい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
11	准教授 合田 義弘	J1-314	5636		**計算機実験による材料物理科学** 第一原理電子状態理論、表面・界面・ナノ構造の物性予測と物質デザイン、磁性
12	教授 平山 博之	J1-409	5637	hirayama.h.aa@m.titech.ac.jp	**Wave Function Engineering** 固体表面上２次元電子系のスピン偏極、グラフェン格子上ディラック電子などの物性と制御
12	准教授 中辻 寛	J1-411	5619	nakatsuji.k.aa@m.titech.ac.jp	**固体表面に構築したナノ構造の電子物性** 表面物性、金属・半導体表面における低次元構造・ナノ構造の構築、 量子サイズ効果をはじめとする電子物性の解明および、その制御
14	准教授 須崎 友文	R3-305	5360	susaki@msl.titech.ac.jp	**酸化物界面の物理：持続可能社会のためのナノ電子材料開発** 物性物理学、固体物理学、物理化学、低次元系、界面工学、酸化物エレクトロニクス・デバイス、光電子分光、仕事関数制御、触媒機能、磁気輸送特性、低環境負荷
15	教授 佐々木 聡	J1-508	5308	sasaki@n.cc.titech.ac.jp	**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
16	教授 伊藤 満	J2-703	5354	Mitsuru_Itoh@msl.titech.ac.jp	**酸化物の機能物質科学** 固体化学による新規機能性酸化物の開拓-強誘電性、圧電性、電気磁気、強磁性、電子伝導性、イオン伝導性酸化物、触媒、螢光、薄膜デバイス
16	准教授 谷山 智康	J3-717	5632	taniyama@msl.titech.ac.jp	**スピン変換の物理と物質科学、スピントロニクス** スピン-光・磁性・格子変換、巨大磁気抵抗・スピン蓄積・スピントルク・磁気弾性効果、マルチフェロイックヘテロ構造等に関連したナノスケール磁性、スピントロニクス
18	教授 真島 豊	R3-410	5309	majima@msl.titech.ac.jp	**分子デバイス・単電子デバイスの創製** ナノ電子デバイス、無電解メッキ、 走査型プローブ顕微鏡
19	准教授 阿藤 敏行	R3-310	5393	atou@msl.titech.ac.jp	**ナノスケールで起こる物質変化のリアルな描像** 固体化学、超高圧力、相転移、衝撃圧縮

材料物理科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	研究内容
		E-mail		
20	教 授 里 達雄	R2-918	5044	**先進軽合金材料のナノマルチ組織制御法の構築と材料評価**
		sato.t.ap@m.titech.ac.jp		先進軽合金材料、金属組織学、析出相変態、非鉄金属材料学
21	准教授 曽根 正人	R2-920	5043	**ナノマテリアルの新規創製技術の開発および材料組織解析**
		msone@pi.titech.ac.jp		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
22	教 授 若井 史博	J1-612	5361	**ナノ・ミクロ構造設計によるセキュアセラミックスの開発**
		wakai@msl.titech.ac.jp		セラミックス、ナノ材料、焼結、微構造制御、高温変形、高温破壊、超塑性
23	准教授 赤津 隆	R3-311	5336	**局所高応力場で視るセラミックスの破壊と変形**
		akatsu.t.aa@m.titech.ac.jp		セラミックスおよびセラミック複合材料の破壊と変形
24	教 授 細野 秀雄	S2-502	5009	**世界を席巻する新材料を創り出す**
		hosono@msl.titech.ac.jp		新超伝導物質（鉄系など）、透明酸化物半導体（有機 EL 駆動用 TFT や CMOS 化）、元素戦略（ありふれた元素を利用した光・電子・化学機能の実現）
24	准教授 平松 秀典	R3-D-102	5855	**高品質な試料を作製し、新材料を発掘する**
		h-hirama@lucid.msl.titech.ac.jp		超伝導体や透明半導体をはじめとするさまざまな機能性材料の探索、エピタキシャル薄膜成長（PLD、MBE、スパッタリング）、光・電子・磁気物性評価（発光、キャリア輸送、超伝導）、デバイス化（LED、ジョセフソン接合）
26	准教授 松石 聡	S2-602-1	5190	**元素戦略のためのアニオン科学**
		matsuishi.s.aa@m.titech.ac.jp		超電導物質、透明伝導性物質など電子機能性物質の探索
27	准教授 山本 直紀	大岡山本館135	03-5734-2481	**電子プローブにより金属・半導体ナノ構造の新物性を探索する**
		nyamamot@phys.titech.ac.jp		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
28	教 授 内海 研一 ＊			**物性物理を通して、科学の意味・人間社会との関わりを学ぶ**
		ken-Utsumi@jcom.home.ne.jp		物性理論、結晶理論、相変態理論
29	教 授 神戸 洋史 ＊			**金属材料と製造技術の革新で地球環境改善に貢献する**
		h-kambe@mail.nissan.co.jp		自動車用非鉄金属材料、鋳造技術、凝固
30	教 授 吉永 直樹 ＊			**鉄のすばらしい性質を極限まで引き出す－理想の組織を求めて－**
		yoshinaga.6yr.naoki@jp.nssmc.com		金属組織学、鉄鋼材料工学
31	教 授 日比野浩樹 ＊			**半導体表面にナノ構造を自在につくり、新たな機能を生み出す**
		hibino.hiroki@lab.ntt.co.jp		表面物性、表面ナノ構造、自己組織化、薄膜成長
32	教 授 蟹澤 聖 ＊			**量子材料で新分野を開拓する**
		kanisawa.kiyoshi@lab.ntt.co.jp		半導体電子物性、結晶成長、表面物理
33	准教授 五十嵐信行 ＊			**半導体デバイス研究開発の最前線**
		nobuyuki.ikarashi.xz@renesas.com		電子顕微鏡、半導体超微細構造評価

・電話番号は上記の内線番号に「045-924」を付け「045-924-5612」のようにする。
・専攻ホームページアドレス：**http://www.materia.titech.ac.jp**
・学生の配属が可能かどうかは、学生募集要項を確認のこと。
・氏名右下に＊印のある教員への学生配属は、原則として博士後期課程からとする。

材料物理科学専攻の教育と研究

教育・研究の理念

❶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。
❷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、新しい物性を予測し的確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

❶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 。
❷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。

授業科目名

確実な基礎学力を身につけた上で、急速に進展する材料科学分野の最先端をリードする人材を育成するため、材料・物理・化学の基礎から材料科学の応用まで幅広く、深く学べるカリキュラムが充実しています。
主な授業科目名は下記のとおりです。(括弧内は担当教員名)

結晶科学 (佐々木・内海・奥部)、固体の変形と力学 (加藤・尾中)、材料組織学 (木村)、材料強度学 (赤津・寺田)、
固体物性Ⅰ：電子物性 (平山)、固体物性Ⅱ：磁性(谷山)、固体物性Ⅲ：誘電体物性 (伊藤)、
固体物性Ⅳ：半導体物性 (細野・平松　他)、相平衡の熱力学 (曽根/梶原)、統計力学 (中辻)、
固体の拡散と相転移 (梶原・阿藤)、Optics of Semiconductors and Luminescent Materials (松石)、
計算材料学 (若井　他)、エネルギー・環境材料 (神戸・吉永)、ナノ材料テクノロジー (日比野・蟹澤・五十嵐)、
表面・界面工学 (須崎)、電子顕微鏡および回折 (山本)、金属のミクロ組織 (里)、
量子物性入門(平山・中辻・青木)、Advanced ferrous and non-ferrous materials (寺田)、
Characterization & Application of Intermetallic Alloys (木村)、Introduction to Solid State Science (若井　他)、
Lattice Defects & Mechanical Properties of Materials (尾中・加藤)、Diffusion in Alloys (梶原)、
Advanced Course in Design and Fabrication of Micro/Nano Materials (曽根・Chang)、
人間社会と材料 (真島・内海・里)、材料物理科学英語プレゼンテーション　第1、第2 (専攻長)、
材料物理科学特別講義　第1-第6 (外部講師)、材料物理科学講究 第1-第10 (指導教員)、
Scientific Writing、材料物理科学異分野特定課題研究スキル、材料物理科学専攻インターンシップ、
材料物理科学派遣プロジェクト、他

充実した学生支援体制と設備

学生支援センター、各種奨学金、Teaching & Research Assistant、学生相談室・カウンセリング (進路や心の悩みを相談できます)、保健管理センター、国内最大規模を誇る拠点図書館 (全国に 2 つしかない)、海外留学、海外短期留学、キャリア相談、トレーニングジム、グラウンド、テニスコート、寮、宿泊施設、生協購買部 (夜 9 時まで営業) と食堂 (夜 8 時まで営業)、手軽なバー、放射線管理・教育、合宿・研修所、アルバイト紹介、など

博士課程教育リーディングプログラム「環境エネルギー協創教育院」

本専攻は、文部科学省の博士課程教育リーディングプログラムとして採択された「環境エネルギー協創教育院」に参画しています。本プログラムは選抜された学生を対象に、経済援助によって勉学に集中できる環境を整え、優秀な研究提案に対する助成で学生の自立を図ります。専門の壁を超えて異分野に飛び込み広い視野で学ぶ「異分野協創」、産業界や政府機関と密接な連携の下で実施するインターンシップの体験から国際的リーダーシップ力を身につける「産官学協創」、東京工業大学の海外協定校や海外主要研究機関を中心に国際交流やインターンシップの経験を通して国際コミュニケーション力を強化する「国際連携協創」という 3 本柱により、エネルギーと環境の両分野にわたる卓越した専門性と先見性をもって世界をリードできる人材の育成を目指します。

修了後の進路

材料物理科学専攻と東京工業大学では就職支援活動に力を入れています。
多くの修了生が社会で活躍しています。

平成25年度	平成24年度	平成23年度	平成22年度
修士課程修了生（予定）	修士課程修了生	修士課程修了生	修士課程修了生
IHI JFEスチール LIXIL TDK YKK AP YKK いすゞ自動車 鹿島建設 川崎重工業 川重テクノロジー キヤノン 神戸製鋼所 シャープ 新日鐵住金 住重フォージング 太陽石油 太洋マシナリー 電気化学工業 トヨタ自動車(3) 豊田自動織機 日揮プラントソリューション 日本ゼオン 日本電信電話 日本電信電話東日本 日本電気硝子 日本取引所 フジクラ 富士ゼロックス ヨコオ 三菱重工業 三菱マテリアル 博士後期課程進学(5)	IHI JFEスチール KIMS材料研究所 旭硝子 いすゞ自動車 オリンパス コマツ 神戸製鋼所 シャープ (2) 新神戸電機 新日鉄エンジニアリング 新日本製鐵 スチールプランテック 住友電気工業 石油資源開発 ソニー ダイキン工業 大同特殊鋼 太陽日酸 デンソー 東京都公立学校教員 東芝 東レ トヨタ自動車 (2) 豊田自動織機 日産自動車 日産車体 (2) 日本電気 日本発条 日立金属 日野自動車 フジクラ 富士通 古河機械金属 (2) 古河スカイ 本田技研工業 三井金属鉱業 三菱原子燃料 三菱スペース・ソフトウェア ミツミ電機 リコー 博士後期課程進学(7)	DeNA IHI　(2) JX日鉱日石金属 OKIセミコンダクタ TDK YKK Z会 曙ブレーキ工業 旭硝子 アルプス電気 イノベーショントラスト 金属技研 クライアントジャパン 群馬県庁 神戸製鋼所 シグマクシス シャープ 昭和電工 新日本製鐵　(2) 住友化学　(2) 住友金属工業 大同特殊鋼 ダイハツ工業 太平洋セメント チノー 東芝　(2) 東邦チタニウム トヨタ自動車 日本ガイシ ブイ・テクノロジー 富士通 古河スカイ 古河電気工業 本田技研工業 マグネスケール マツダ　(2) 三菱重工業 三菱マテリアル 村田製作所 森精機製作所 横河電機 ローム 博士後期課程進学　(6)	IHI　(2) NOK OKIセミコンダクタ YKK AP アイシン精機　(2) 曙ブレーキ 旭化成 アルバック 岩谷産業 クボタ 神戸製鋼所 神戸製鋼所 コニカミノルタビジネステクノロジーズ シチズン時計 島貿易 シュルンベルジェ 昭和電線 新川 新日本製鐵 住友化学 ダイキン工業 鉄道総合技術研究所 大同特殊鋼 東芝機械 豊田合成 豊田自動織機 並木精密宝石 ニチアス 日本ゼオン 日本原燃 日本精工 パナソニック電工 東日本電信電話 東日本トランスポーテック 日立製作所　(2) 富士通 三菱重工業　(2) 三菱自動車工業 武蔵エンジニアリング 山武 ヨコオ ライブレボリューション リコー ローム 博士後期課程進学　(2)
	博士後期課程修了生	博士後期課程修了生	博士後期課程修了生
	東京工業大学 電力中央研究所 日本軽金属 日立製作所 ボッシュ 三菱マテリアル	北海道大学 高輝度光科学研究センター ＩＨＩ サムソン電子 日軽金アクト 富士フイルム	大阪大学 名古屋大学 鬼塚硝子 ボッシュ

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

尾中研究室

尾中　晋 教授

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

好奇心からはじめよう

はじめに

ライト兄弟の弟のほうの話しだが、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。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って興味深い。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は金属中の析出物の形状が球と立方体のあい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や球と種々の多面体のあいだの形状については研究室のホームページに詳しく書いてある。

■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かれない」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、変形によっ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。その様な工夫の一つである二重円筒型双結晶について、図２に示した。この双結晶を用いた実験によって、高温破壊に及ぼす結晶粒界の影響を抽出して議論している。

■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、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。

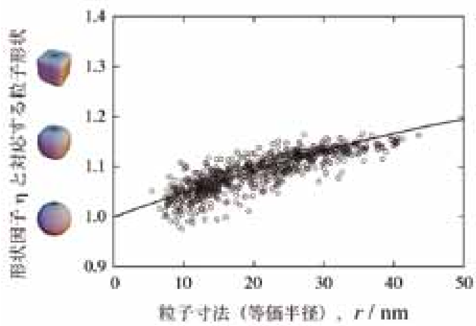


図１　銅合金中の微細な析出物の球から立方体への形状変化

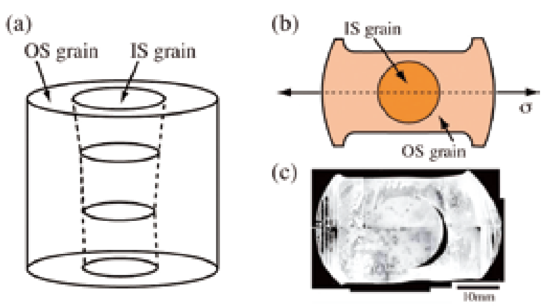


図２（a）銅の二重円筒型双結晶（DC 双結晶）と（b）それから切り出される試験片の模式図。（c）高温変型後のDC双結晶試験片の光学顕微鏡写真。円形の粒界に沿ってクラックが発生している

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

寺田研究室

寺田　芳弘 准教授

http://www.materia.titech.ac.jp/terada.html

環境性能に優れた高温構造用材料の開発

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。

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。

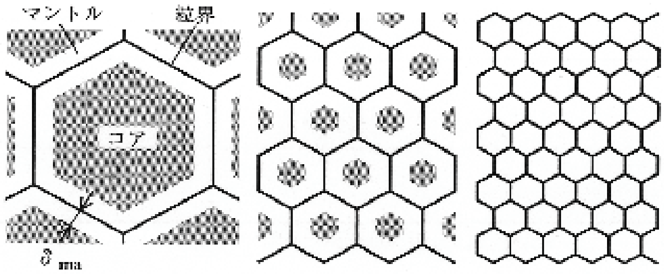


図 2 当研究室が提唱しているコア・マントルモデル

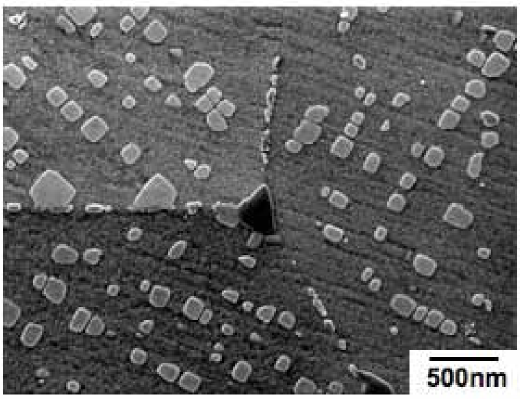


図 1 ニッケル基鍛造合金X-750 の走査型電子顕微鏡組織

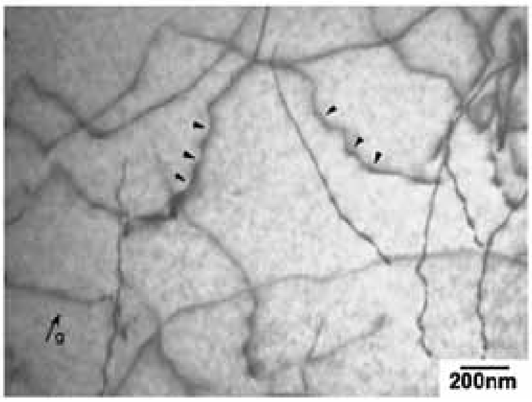


図 3 クリープ変形を受けた耐熱マグネシウム合金AX52
における透過型電子顕微鏡組織

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

加藤研究室

加藤　雅治 教授

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

「優しさ」のための「なぜ？」を追究する

加藤研究室では、金属材料の力学的性質と相変態を扱ういわゆるphysical metallurgy分野に基盤を置き、材料科学、物性物理学、連続体力学などを解析の道具として、実験的研究と理論的研究の双方を融合させた「なぜ？」に応える迫力ある研究を行っています。

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りません。そのためには、「なぜ？」を追究する基礎的な見地から材料機能発現メカニズム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ます。

学部で様々な専門（物理、化学、材料、機械など）を学んだ学生の集団からなり、金属材料学に関する広範囲の研究を遂行しています。そのため、加藤研究室で今までに扱ってきた材料は、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、多岐に亘っています。

研究室の体制

研究室のホームページにありますように、本研究室は、尾中研究室と物質科学創造専攻の藤居研究室との間で研究室連合（通称：かものはし）を作り、３研究室がほぼ一体となった研究体制を敷いています。その結果、学生室には２つの専攻の学生さんが同居するアットホームな雰囲気があり、さらには、自分の狭い研究分野に閉じこもらずに、自然に広い視野を持てる環境が備わっています。博士後期課程の学生さんのリーダーシップにより、安全衛生マネジメント体制も非常に充実しています。

材料科学の未踏領域への挑戦

材料科学には、長さの尺度で「ナノ(10^{-9}m)より大きく、ミクロ(10^{-6}m)より小さい」未踏領域があることに数年前に気付きました。この領域は、マクロ（大きいサイズ）側から攻めても、ピコやナノ（小さいサイズ）側から攻めても非常に攻めにくい学問領域なのですが、まさにこの領域に材料特性の種々の特異現象が集中しています。

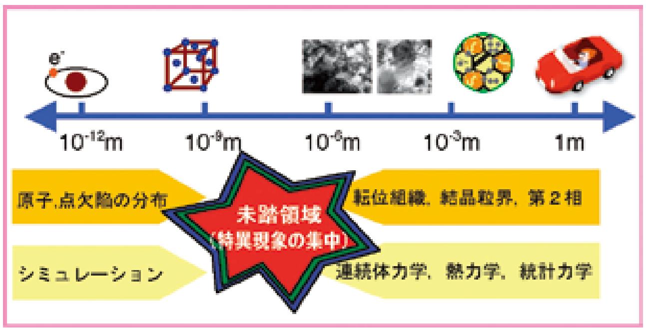


図1　ナノより大きくミクロより小さい材料科学の未踏領域

たとえば、大規模集積回路の金属配線では、配線幅が１μm以下になると、エレクトロマイグレーションやストレスマイグレーションなどの断線原因が急に出現するようになります。また、結晶粒を極度に微細化した材料では、結晶粒径が１μm以下になると、急激な強度上昇と強度の顕著な温度依存性など、興味ある力学特性を示すようになります。さらに、薄膜や微粒子の分野では、膜厚や粒子サイズが１μm以下になると、バルクでは考えられない新しい物性が発現したりします。

本研究室では、未踏領域踏破の情熱に燃えて、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ます。以下はいくつかの研究テーマの具体例です。

超微細結晶粒材料の力学特性

材料の強度と延性（大きく変形できる能力）はトレードオフの関係にあり、一方を大きくすると一方が小さくなるのが通常です。しかし、結晶粒径が１μm程度以下の超微細結晶粒からなる多結晶材料では、強度と延性が共に大きくなったり、強度に顕著な変形速度依存性が出現するなど、未だ原因が解明されていない特異な力学特性が発現します。加藤研究室では、特殊な加工によって超微細粒組織にしたCu、Alなどの金属、合金を用いて、特異現象の発現機構を調べる研究を行っています。

具体的には、引張試験、疲労試験などの実験的研究と、転位論やマイクロメカニックスを使った理論的研究を融合させ、「ミクロより小さい」未踏領域の材料科学に挑戦しています。この研究の延長上には、強度も延性も同時に大きくなる画期的な夢の材料の実現が待っています。

金属疲労と組織の関係

金属疲労は実用的にも強い関心が持たれている現象です。図２は、Cu単結晶を疲労させたときに生じる代表的な転位（結晶欠陥の一種）組織の電子顕微鏡写真です。ここでも、各々の組織の単位の大きさは１μm程度という未踏領域に属する長さスケールの現象が現れています。

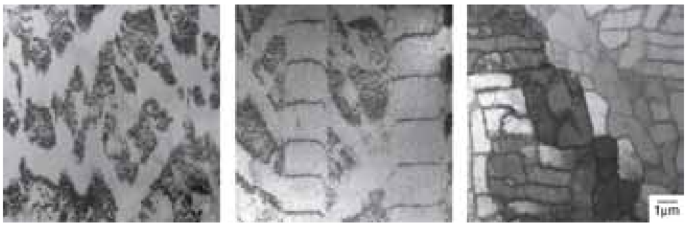


図1　ナノより大きくミクロより小さい材料科学の未踏領域

本研究分野では、なぜこのような転位組織が形成されるのか？また、転位組織と材料の疲労寿命との関係は？　という疑問に答えるため、実験と理論の双方から金属の繰り返し変形と疲労を研究しています。

第２相の材料科学

CuとFeという、ありふれた２つの金属を例にとります。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構造をとりますが、厚くなるとbcc構造に変化します。また、図３にはCu母相中に析出したナノスケールのFe微粒子が見えます。ここでは、上下に伸びる転位線上に並んだFe微粒子のみがbcc結晶で、その他の部分にある粒子はfcc結晶です。さらに、転位線上の粒子は同じ形をしています。「なぜ？」と考えると、さまざまな興味が湧いてきます。

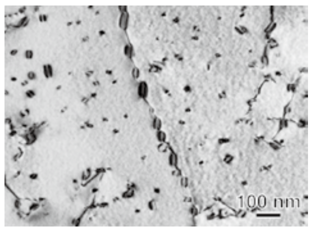


図3　Fe微粒子の転位上析出

本研究室では、微粒子や薄膜の「なぜ？」を実験的、理論的に解明する研究も行っています。実験条件や状況に応じて変化する微粒子の形状の解析、外場（磁場や応力場）を加えて微粒子を析出させるときに出現する微粒子の配列効果などの興味ある現象を、熱力学、連続体力学、電磁気学、速度論などを使って解明する研究も行っています。

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

梶原研究室

梶原　正憲　教授

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

環境と調和する新しい導電性合金・超伝導合金の開発

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理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。

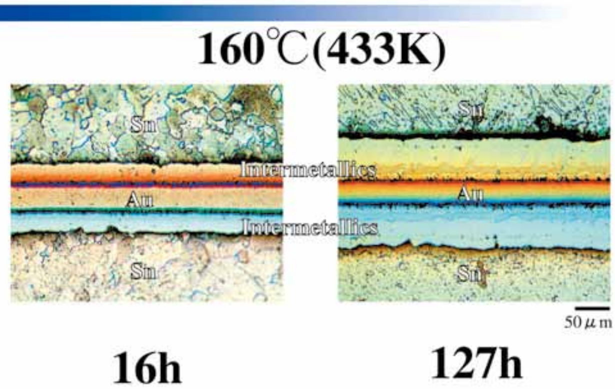
（2）電子デバイス用リードフレームCu 基合金の材料組織学的性質：0.1〜0.2mass％の微量のCr およびZr を含むCu-Cr-Zr 系合金は、高い導電性と優れた機械強度を兼ね備えたCu 基合金としてLSI（Large Scale Integration）チップのリードフレーム用材料等に利用されている。Cu-Cr-Zr 系合金の優れた機械強度は、Cr 固溶体相およびCu_9Zr_2 金属間化合物の析出・分散強化に起因している。本研究室では、Cr およびCu_9Zr_2 の析出・分散強化の機構を理解するために必要な基礎的な知見の蓄積を目的として、透過型電子顕微鏡を主要な観察手段とする材料組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充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 合金母相が反応拡散し超伝導特性を有するNb_3Sn 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



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

木村研究室

木村　好里 准教授

http://j3www.materia.titech.ac.jp/ kimura/

地球に優しい材料の機能をデザインする

Materials Science & Engineering －材料の科学と工学－の分野が地球環境保全に貢献できることを考えて、研究室メンバーがみんな一緒に楽しく研究に励んでいます。機能性材料と構造用材料という一見すると異なる材料を対象として、高機能かつ高性能な材料を創製するめに「 Multi-scale 構造制御による材料の機能デザインと高性能化」という Strategy と Philosophy に基づき、広範でありながら統一的な研究展開を心がけています。３元系の金属間化合物に着目して nano-scale における規則結晶構造および格子欠陥の制御、 micro から macro-scale にわたる(金属)組織の制御を行うことで材料の機能特性を向上させます。材料の飛躍的な性能向上を目指すだけでなく、低環境負荷を考慮した組成の選択、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. 熱電発電材料　—廃熱を電気に直接変換—

自動車や航空機、各種プラント、自然界など地球上のあらゆるところに廃熱（熱源）が存在します。例えば化石燃料の持つエネルギーの約70%が廃熱として棄てられます。 Seebeck 効果を利用する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できる技術であり、地球環境を守ることに大きく貢献できます。有毒元素や希少元素を含まず環境に優しい高温用の熱電材料として、TiNiSn に代表される Half-Heusler 型化合物、Fe や Mg の Silicide に注目しています。

Half-Heusler 型化合物の場合、世界に先駆けて単相合金を作製して固有の熱電特性を評価する一方で、固液反応焼結などの作製プロセスを応用する複合組織の界面制御によって高性能化を目指しています。 Half-Heusler 型構造の格子欠陥制御という新しい挑戦として、全格子点の 1/4 に達する空孔サイトを優先的に占有できる元素の選択添加を考えています。空孔に原子を固溶することにより、バンド構造の変化にともなう n−p 特性変換、フォノン散乱源の増加による格子熱伝導の低減を実現します。相安定性が Heusler 型構造に近づくことに着目して相平衡の理解と合わせた系統的な材料設計基盤を構築します。

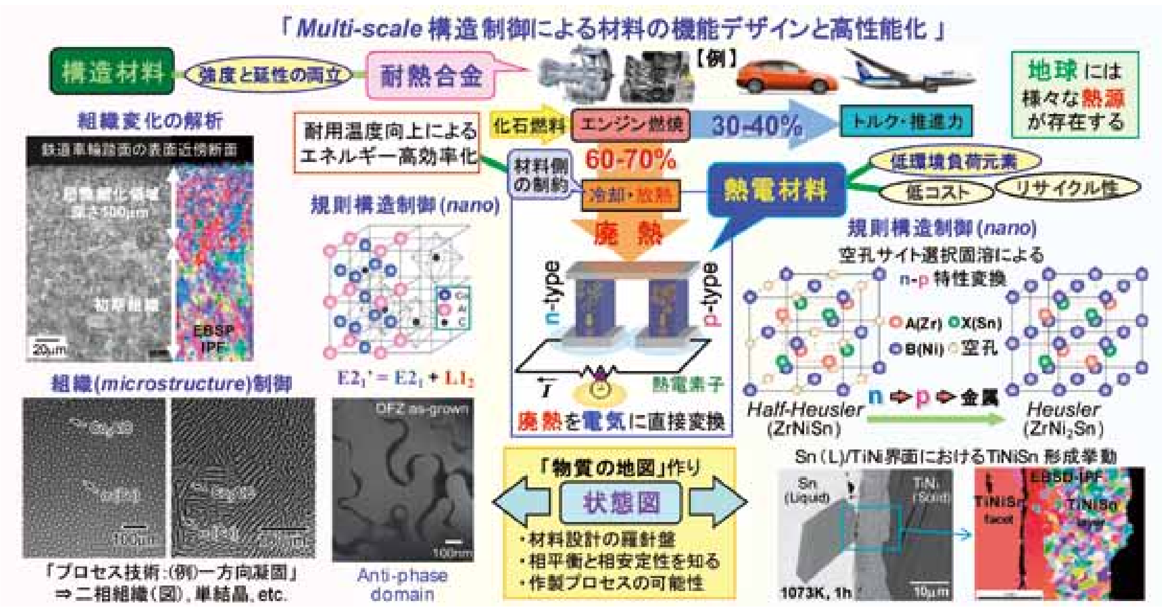
2. 耐熱合金・構造用材料　—より強く、しなやかに—

耐熱合金の耐用温度を向上、または新しい高融点材料によって代替できれば、高効率化によって省資源と環境保全を実現できます。信頼性と耐久性の改善、リサイクル性確保も重要な課題です。私たちは$E2_1$型金属間化合物を強化相とする新しい耐熱合金の開発に取り組んでいます。例えば$E2_1$型Co_3AlC_{1-x}はC原子の規則化によって逆位相領域APDの形成をともなない$E2_1$'型$Co_3AlC_{0.5}$に変態します。$L1_2$型と$E2_1$型の最密面が交互に積層した構造が$E2_1$'型であり、C原子を含まない$L1_2$型の最密面がすべり系として働くので優れた塑性変形能と高強度を両立できます。$L1_2$型はジェットエンジン動翼に実用されているNi基超合金の主要強化相Ni_3Alの規則構造です。APDサイズは熱処理により制御でき、磁気特性にも大きな影響を及ぼします。

鉄道車輪の最表面は繰り返しの強加工と熱処理を受け、組織が変化することをご存じですか。き裂が進展しないよう表層を切削しながら使うのでコストが嵩みます。高炭素鋼製の車輪は強度と靭性に優れるパーライト組織を有しますが、粒径１μmの極微細αFeフェライトと球状化セメンタイトが形成されます。意図せぬ組織制御によって姿を変えても機械特性を維持できるよう自己防衛しているかのようです。組織変化の詳細な解析によって、この興味深い事実を見つけました。

3. 相平衡・拡散　—物質の地図「状態図」—

熱電材料や耐熱合金の材料設計を適切かつ効果的に行うためには、物質の地図としての「状態図」を駆使することが不可欠です。融点や組成域などの相安定性、相変態および各種反応の有無、共存できる相の情報は、組織制御や作製プロセスの可能性を考える上で役立ちます。私たちは状態図に立脚して材料設計を行うため、実験による状態図の構築とアセスメントも研究の重要な一部分です。耐熱合金と熱電材料、どちらも原子が活発に拡散する高温度で使います。材料を守り特性を維持するため、状態図で相平衡の変化を予測して材料設計を考えます。



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

合田研究室

合田　義弘　准教授

計算機実験による材料物理科学

はじめに

コンピューターの性能は18ヶ月で2倍になる、というMooreの法則がある。実際のところ、この原稿は2011年製のMacbook　Airで書いているが、重量わずか1.08kgのこのマシンの性能は大雑把に言って2001年時点のスーパーコンピューターと同等である。かつて思考実験(Gedankenexperiment)という言葉が存在したが、この驚異的な計算機の進化は理論研究のあり方を根本的に変え、数十年前の先人達が紙と鉛筆で研究していたのと対照的に、現在の理論研究は主にスーパーコンピューターを用いた計算機実験(computer experiment)へと変化してきている。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ある。

研究について

我々の興味の直接の対象は物質・材料中の電子である。物質は原子核と電子（実際これらは物質の構成要素の最小単位ではないが現実的にはこう考えてよい）から構成されており、物性、つまり物質の性質は電子の振る舞いによってほとんど決まっている。我々が拠り所とする電子状態理論の一つが密度汎関数理論（1998年ノーベル賞）であるが、これを用いると原子番号・結晶周期の単位の中にある原子の数・計算精度をコントロールする数値的パラメーターを与えるだけで、つまり実験から得られる情報を一切使わないで、シリコンが半導体になる事、酸化チタンが日焼け止めになる事、多くの鉄化合物が磁石になる事などがコンピューターの中で再現され、計算結果を精査する事によりそのメカニズムを説明する事ができる。上の例はわざわざ計算しなくても結果が既に実験的に知られているものであるが、同じ事を誰も作った事のない未知の物質・材料に対してもやってみようという訳である。また既存の理論ではよく記述出来ない材料・物性・現象に対しては、理論手法の拡張・開発も行っていく。研究環境としては、学内外のスーパーコンピューター（国内最速のスパコン「京」を含む）を活用する事が出来、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発表する事が可能である。

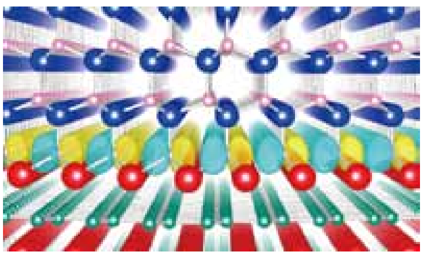


図１：第一原理計算によって同定されたAlN/MgB_2(0001)界面の安定原子構造と界面スピン分極波動関数。球は原子位置を表し、青：Al、ピンク：N、赤：Mg、緑：Bである。

研究テーマについて

1．表面・界面・ナノ構造で発現される磁性

表面・界面はナノスケールでの量子効果発現の舞台として重要である。デバイスへの応用上でも、素子のサイズがナノスケールまで微細化されると、材料内部よりも表面・界面の効果が支配的になってくる事がある。実際、表面・界面では物質内部には無い物性が現れうる。例えばAlNは非磁性絶縁体、MgB_2は非磁性金属・超伝導体であるが、我々の物性予測によればこれらを接合した界面では2次元強磁性が発現する（図１）。また、Bi/Ag(111)表面の様な原子番号の大きい元素を含む表面・界面では、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る。Rashba効果、トポロジカル表面状態、non-collinearスピン状態、磁気異方性、QED効果による軌道磁化電流間相互作用などに興味を持っており、実験で得られる結果と理論計算の結果を比較する事により、現実に起こっている現象の理解を深化させ、その背後にある普遍性を見いだす。

2．グラフェン・シリセンにおける界面効果

グラフェンは2010年のノーベル賞となった革新的な2次元材料であるが、最近シリコンによる同様な物質、シリセンが注目されている。ただし、シリセンはグラフェンよりもはるかに化学的に活性であるため、その下地となる基盤との相互作用がその性質を支配する。これまでにグラフェン/窒化物半導体界面の構造と電子状態（図２）を精査してきたが、シリセンと基盤の界面に対しても電子状態計算を行い、物性予測とそのメカニズムの解明を行う。

3．その他：something new, something interesting

研究テーマは上記にとどまらず、研究室メンバーの興味に応じてどんどん新しい事に挑戦していく予定である。例えば、(i)水素化物イオン(H-)を含む酸化物が最近注目されているが、その物質デザインや表面状態・表面からの水素吸蔵プロセスなどを明らかにする事、(ii)熱電材料・太陽電池材料・磁石材料などエネルギー問題に直結する材料での表面・界面効果、(iii)第一原理電子状態理論と格子模型との融合といった方法論開発など様々な可能性が考えられる。

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。研究室所属の際ごく基礎的な量子力学の予備知識があ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。

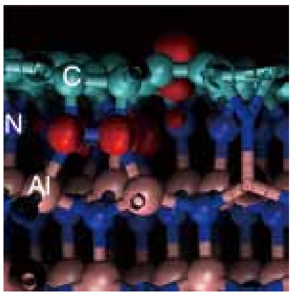


図２：グラフェン/窒化物半導体界面の安定原子構造とスピン密度分布の例。

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

平山・中辻研究室

平山　博之　教　授(写真左)
中辻　　寛　准教授(写真右)

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

Wave Function Engineering

はじめに

固体表面上には、固体内部とは全く異なる表面特有の超周期構造を持った原子配列や電子状態が現れます。また固体表面を舞台として、その上に原子や欠陥を並べたり、非常に薄い薄膜や島を成長させることにより、ナノスケールの構造を人工的に形成することができます。私たちは (i) こうした固体表面や界面、超薄膜の構造や電子状態を上手く利用しながらナノ構造を構築し、(ii) 構築した表面ナノ構造中に電子を閉じ込めることにより、構造・形状を通した電子の波動関数の制御を通して望まれる電子状態や物性を実現するための研究を行っています。

表面上への2次元量子構造の構築

貴金属の表面、あるいは半導体上に貴金属を１原子層程度蒸着した表面上には２次元電子ガス的な性質を持った表面電子準位が発生する例が多く見られます。一例として図１に Ag(111) 表面上の２次元電子系が表面のステップや転位によって散乱された結果発生した電子定在波（電子のさざ波：電子波動関数の２乗振幅の空間分布 $|\Phi(r)|^2$）を STM(dI/dV モード）によって可視化した結果を示します。

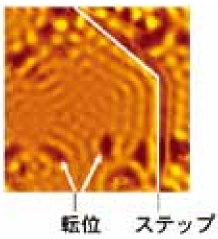


図1　Ag（111）表面の電子定在波のSTM（dI/dVモード）像

私たちはこうした表面に STM 探針を用いて原子を部分的に引き抜いた閉曲線を描き、描いた図形中に表面の２次元電子系を閉じ込める研究をしています。この方法を用いると、室温においても安定でサイズ、形状を原子レベルで任意に制御した２次元ナノ構造を構築することができます。またこの構造中に閉じ込められた２次元電子はそのサイズ、形状に応じて決まる量子準位を発現します。特にそのサイズが小さい場合には、量子準位間隔を室温における熱揺らぎより大きく取ることができ、室温においても量子効果を発現できる可能性が生じます。図２に一例として私たちが開発した任意のサイズ、形状における量子準位を理論的に予測する数値計算コードを用いて予測したいくつかの量子準位の電子状態 $|\Phi(r)|^2$ の空間密度分布と、これを実際に室温で STM(dI/dV モード) で観察した結果を示します。

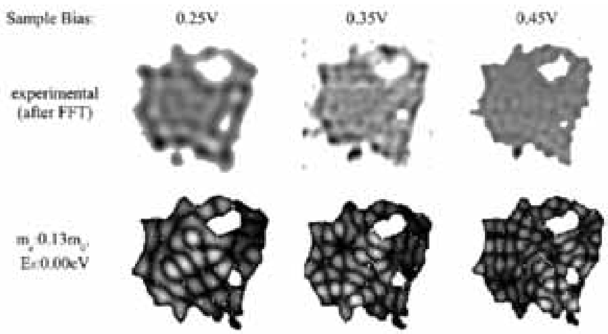


図2　Si（111）√3×√3-Ag表面にSTM探針で描いた2次元閉曲線図形中への表面電子の量子閉じ込め
（上段）STM像（dI/dVモード）@室温；（下段）数値計算結果

2次元電子状態へのスピン分裂の導入

固体内の結晶格子の連続性は、表面から外側ではいきなり無くなってしまいます。これを別の見方で眺めれば、固体内部の結晶格子では保存されていた格子の“空間反転対称性が、表面では破れている”と言い変えることもできます。この“空間反転対称性の破れ”は表面に様々な面白い性質をもたらします。中でも興味深いのは、この空間反転対称性の破れのために、表面に張りつくような形で局在している表面２次元電子状態（表面準位）が、外部から磁場を印加しなくても、またたとえその物質が非磁性体であっても、表面バンドは自然にスピン分裂してしまうという現象です。

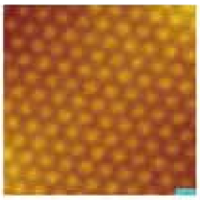


図3　Bi/Ag(111)√3x√3表面の STM 像（輝点がBi原子）

この表面電子状態のスピン分裂は、実際には表面平行方向に運動する表面電子が感じるスピン－軌道相互作用を介して現れます。ただしほとんどの物質では、このスピン－軌道相互作用は非常に弱いため、実効的なスピン分裂は無視できるほど小さい値に留まっています。しかし固体表面にスピン－軌道相互作用の大きなBiのような原子番号の大きい原子を並べ、さらに表面電子の波動関数を空間的に歪ませて対称性を強く破った場合、Agのような非磁性物質においても、その表面の電子状態は巨大なスピン分裂を示します。中でも図３のSTM像に示すような、Ag(111)表面上に1/3原子層のBI原子がAg1x1格子に対して√3x√3の長距離秩序を持って配列したBi/Ag(111)√3x√3表面は、これまで知られている物質群の中で最も大きな表面準位のスピン分裂を示すことが最近の研究で分かってきました。

私たちはこのBi/Ag(111)√3x√3表面を舞台として、その上で引き起こされる電子の散乱過程を調べています。通常の２次元非磁性電子状態では、＋k方向に進む表面電子は不純物原子などに衝突した場合、－k方向に散乱され電気伝導度を低下させます。一方、対称性の破れによりスピン分裂した表面電子状態では、＋k方向に進む電子と－k方向に進む電子は互いに反対向きにスピン分極したバンドに分裂してしまうため、＋k→－kへの散乱（遷移）はスピン部分の積分によってに禁止されてしまう筈です。これは現在盛んに研究されているスピントロニクスの分野におけるスピン流のロバストネス（頑丈さ）や後方散乱の禁止といったトピックスの根幹に関わっており、応用上も非常に重要な問題です。

実際に私たちは STM を用いて Bi/Ag(111)√3x√3 表面上のスピン分裂した２次元電子系における量子干渉に伴う $|\Phi(r)|^2$ の空間分布

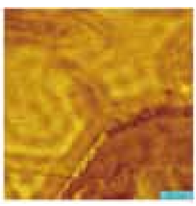


図4　Bi/Ag(111)√3x√3表面後方散乱に伴う量子干渉パターン（$|\Phi(r)|^2$ 空間分散像）

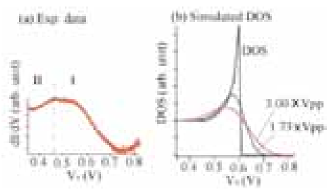


図5　Bi/Ag(111)√3x√3表面のスピンにより後方錯乱が禁止されたエネルギー領域の電子状態密度
(a)STS スペクトル
(b) 理論的シュミレーション結果

や、STSと呼ばれる電子状態密度の観測により、この問題にアプローチしています。これまでの研究から、びっくりすることにスピン分裂した表面２次元電子系においても、表面バンド分散の特徴によって決まるあるエネルギー範囲では電子の後方散乱が許される（図4）ことや、別のエネルギー範囲ではスピン分極が原因で後方散乱がきちんと抑制されること（図５）がわかってきました。

私たちはまた、このスピン分裂した表面２次元電子状態の磁性不純物原子による散乱過程にも興味をもって研究を進めています。これは磁性原子に居在したスピンに関する非磁性不純物中での近藤効果が、スピン分裂した２次元電子系ではどのような形で発現するかという問題であり、応用の上でも重要な課題です。

シリコン2次元格子上でのディラック電子系の実現

炭素原子でできた２次元ハニカム格子構造を持ったグラフェンは、ニュートリノと同じマスレスフェルミオンの電子分散関係（ディラック電子系）を持ち、驚異的な電子移動度や室温における量子ホール効果の発現など、そのユニークな物性で注目されています。しかし残念なことに、グラフェンはその素晴らしい電子特性にも拘わらず、シリコンを用いた現在の半導体デバイステクノロジーと相性が悪いという、電子デバイス応用上致命的な問題があります。

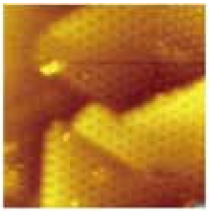


図6 Si原子で出来たグラフェン構造のSTM像

私たちはこの問題を解決すべく、シリコン原子で構成されたグラフェン構造（silicene）のエピタキシャル成長とその物性の研究を行っています。実際に我々が成長に成功したsiliceneのSTM像を図6に示します。Siliceneの研究は世界的に見てもまだ始まったばかりで、今後急速な進展が予想される非常に面白い分野です。

１次元電子系の構築と電子構造評価

固体表面においては、元素、結晶方位面、そこに蒸着する物質、の様々な組み合わせにより、”表面新物質”ともいうべき実に多様な超構造を作り出すことができます。上でみてきた表面超構造は2次元面内での広がりをもち、その電子構造も2次元電子系として理解することができます。それでは1次元の表面超構造においては、どのような物性の発現が期待されるでしょうか。1次元電子系が実現された場合は、朝永-ラッティンジャー液体としての振る舞いや、パイエルス不安定性による電荷密度波転移などの特徴的な電子物性が予想できます。また、電気伝導性をもつ原子ワイヤが実現できれば、応用上も重要な知見が得られることになります。これまでにも、単原子層の金属を蒸着したシリコン単結晶表面において1次元電子系が報告されていますが、その数は非常に限られているのが現状です。

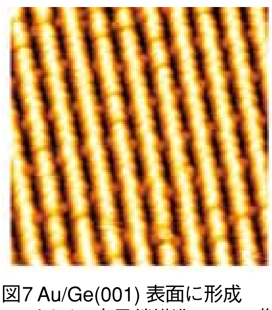


図7 Au/Ge(001) 表面に形成された1次元鎖構造のSTM像

そこで私たちはGe(001)表面にAuを蒸着して得られる1次元鎖構造に着目し、その電子状態を明らかにしようとしています。図7にそのSTM像を示します。明るく見えている1次元鎖構造が、1.6 nm周期で規則正しく並んでいる様子がわかります。それぞれの鎖は100 nmに及ぶ長さを持っており、1次元電子系である可能性が非常に高いように思われます。これを確かめるには価電子帯の電子構造を調べることが必要ですが、角度分解光電子分光法(ARPES)を用いれば、表面状態のバンド構造や、フェルミ面を含むバンド形状を直接求めることが可能です。ARPES測定によって、この系が金属的な表面状態をもつことが確かめられました。ところがそのバンド形状(図8)から、この系は異方的な2次元電子系であり、しかも表面電子の有効質量は1次元原子鎖に平行方向ではなく、むしろ垂直方向で小さい、すなわち電気伝導しやすい、ということが明らかになりました。このことは、電子物性を正しく理解するには、原子構造だけでなくバンド構造を調べることが不可欠であることを示しています。

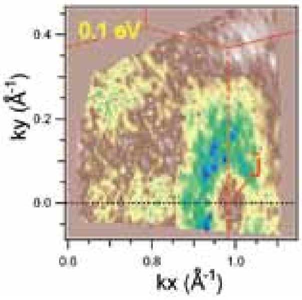


図８ 表面状態のバンド形状。1次元鎖はy方向に伸びている。J点に楕円形の等エネルギー面がみえる。

さて、残念ながらこの系は1次元電子系ではないことが明らかになりましたが、今後はこの表面をテンプレートとして1次元電子系を探索していきます。例えばこの表面に別の金属原子、あるいはフラーレン(C_{60})分子を蒸着すると、1次元鎖構造上に原子あるいは分子ワイヤを構築でき、それらが1次元的な電気伝導を示す可能性があります。このように、固体表面上で自由に新奇な超構造をつくり、STMと光電子分光を用いて原子構造と電子構造の両面からその物性に迫る研究を展開していきます。

固体表面上での周期的ナノ構造の構築

ナノサイズの構造を固体表面上に周期的に並べるには、どうしたらよいでしょうか。その方法のひとつが、表面への蒸着物質の吸着確率の違いや周期的な格子歪みを利用した自己集積化で、ボトムアッププロセスに分類されるものです。その一例が図９のＳＴＭ像です。これはCu(001)表面に窒素原子を吸着させた表面で、暗く見える5 nm四方の窒素吸着領域が、明るく見える2 nm幅の清浄Cu領域を挟んで自己集積的に配列している様子がわかります。清浄Cu領域のCu原子間距離は、通常のCuに比べて縮んでおり、分子の吸着確率も異なることがわかっています。またこの表面にCoを蒸着すると、Co磁性ナノドット配列が形成されることもわかっており、ナノサイズの磁性についての重要な知見を得ることができます。私たちはこのような自己集積化が起こるメカニズムを調べ、周期的ナノ構造が示す物性を明らかにしていきます。


図９ N/Cu(001) 表面に自己集積的に形成された、グリッドパターン構造の STM 像

おわりに

以上に述べたテーマ以外にも、私たちは燃料電池や水素吸蔵などの応用上重要なPd表面上の水素原子・分子の吸着・脱離反応の研究などさまざまな研究を行っています。

固体表面は、物理学、化学、電子工学、材料工学など、既存の様々な学問を跨ぐ非常に学際的な研究の対象あり、サイエンスとエンジニアリングが不可分に絡み合った非常に魅力的な分野です。この固体表面というめちゃくちゃ面白い世界に、意欲をもった若い方々がさまざまなバックグランドから積極的に飛び込んでくることを期待しています。

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

須崎研究室

須崎　友文 准教授

http://www.msl.titech.ac.jp/~susaki/

酸化物界面の物理：持続可能社会のためのナノ電子材料開発

研究室の特徴

須崎研究室は、固体界面、表面の物理現象に注目し、エレクトロニクスや触媒などの応用を念頭においた薄膜人工構造（主に酸化物）の研究を行っています。他の薄膜の研究室と比較すると、地殻中の存在率が高い**クラーク数上位元素を積極的に用いること**、**基礎科学の対象として重要な問題を見出そうとする志向が強いこと**が特徴です。

ナノサイエンスとしての面白さ

固体界面は、ナノスケール人工構造の最小単位であり、ナノサイエンスにおいて最も基本的な位置を占めます。歴史的には、Si、GaAs などの良質な半導体界面において実現する２次元電子状態は、量子ホール効果などの量子現象発見の舞台となってきました。一方、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酸化物において次々と見出されてきています。高温超伝導では銅酸化物平面の存在が本質的であり、超巨大磁気抵抗においては結晶構造の層状化によって磁気抵抗の大きな増強が実現するなど、低次元性や界面が大きな役割を果たしています。このような界面の効果を酸化物において積極的に利用するという試みは、試料作製、評価が困難であることから進展が阻まれてきましたが、2000 年代に入って原子スケールの精度での薄膜作製技術が確立し、世界中で精力的に研究が行われるようになりました。**イオン結合性・電子間相互作用などの酸化物特有の効果に、ナノスケールの構造的工夫をどう絡めていくかが腕の見せどころです。**

須崎研で着目している研究対象の一つは岩塩構造の特定の面です（図１）。原子スケールで見ると、(100) 面は電荷のバランスが取れているのに対し、天然には存在しない (111) 面はすべて陽イオン、あるいは陰イオンから成り、この面を利用した人工構造で特異な現象が発現することが期待できます。岩塩構造というありふれた結晶構造において、原子スケールで見るとこのような異常な面が存在する、というのが面白いところです。

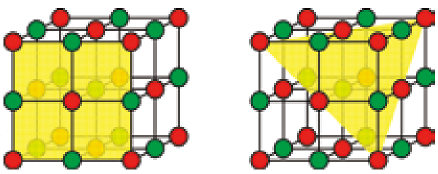


図１. 岩塩構造の (100) 面および (111) 面

ナノエレクトロニクスにどう寄与するか

演算能力向上、省消費電力、省材料などの観点から、デバイスの微細化は現在のエレクトロニクスの最重要の課題です。現在のデバイス工学が直面している問題は、バルク（表面や界面の影響を受けない、固体内部の物性）の特性がナノスケールでは劣化してしまう、という問題に帰着します。酸化物においても、有用な物性（超伝導・磁性など）は表面、界面ではしばしば劣化してしまいます。このような試料に改良を加え、表面・界面の劣化を最小限に食いとどめるという研究も行われていますが、須崎研ではこの逆の例、すなわち、**原子スケールで制御された表面や界面、薄膜で、バルク以上に有用・興味深い機能特性が発現する系を見出すこと**を目標にしています。電子デバイスが、平凡な特性（非磁性絶縁体）を持つ筐体に埋め込まれた機能素子であると考えると、このような系は極限まで微細化可能な新デバイス開発に直結します。特に、天然資源・廃棄物として無尽蔵に存在し、かつ生体にも無害であるクラーク数上位元素を活用することで、超長期のタイムスケールで日本の社会に寄与できるナノ電子材料の開発を狙っています。

研究の実際

酸化物などを素材として人工薄膜試料の作製、評価、実験結果の解析を進めてゆきます。試料作製は、半導体・絶縁体薄膜の高精度作製に威力を発揮するレーザーアブレーション法を用い（図２左）、真空槽内に準備した薄膜原料に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、原料の表面をはぎとって基板上に堆積させてゆきます。このようにして、岩塩構造の (111) 面のような特異な面を界面・表面とする人工構造を作製しています。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（図２右）、さらに極薄膜の電子状態観察に有効である光電子分光、ケルビンプローブという手法を用いて行っています。

具体的には、代表的な岩塩構造酸化物である酸化マグネシウムに着目し、さまざまな人工構造を試作してきましたが、2010 年には原子スケールで平坦な表面を持つ (111) 人工薄膜を絶縁体基板上に作製することに世界ではじめて成功しています。

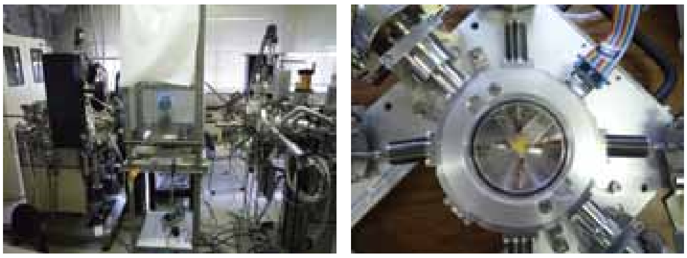


**図２. 左：酸化物薄膜作製装置（レーザーアブレーション法）。
右：電気特性評価装置。80 K ～ 730 K の範囲で、磁場を印加して輸送特性を評価。**

応用としては、エレクトロニクスをはじめとして、触媒などの表面化学機能、環境・生命体にやさしいクラーク数上位元素ならではの生体応用を念頭に置いて研究を進めています。

研究室の今後の展望

須崎研究室は 2007 年の須崎の着任以降、ワイドギャップ酸化物薄膜研究に専念し、基礎科学の観点からは 酸化マグネシウム (111) 面の完全平坦面の創成、デバイス応用の観点からは、絶縁体積層構造による低仕事関数表面形成という成果を挙げて来ました。これらの研究は、研究室内においてさらに進行していますが、興味を持って下さった外部機関とも連携し、当初予定していなかった方面へも展開しています。

2013 年には磁性薄膜についてのはじめての成果が学術誌に掲載され、研究内容の幅も広がってきました。興味を持たれた方は、ぜひ一度研究室へご来訪下さい。

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

佐々木研究室

佐々木　聡 教授

http://lipro.msl.titech.ac.jp/

身近な材料で自然の世界を覗く

固体材料の電子的な性質（機能や物性）と結晶構造との関係を知ることは、エレクトロニクスを始めとする多くの分野で重要です。佐々木研究室では、ミクロ領域での結晶構造や電子構造が、どのようにマクロの世界にかかわっているかを明らかにしたいと考えています。このため、セラミックスなど機能性材料の結晶構造解析、混合原子価化合物での相転移や電荷秩序・価数揺動状態の研究、磁気吸収やＸ線共鳴磁気散乱による磁性材料の研究、機能性酸化物での電子状態研究、計算機シミュレーション、高温高圧下での構造物性研究、地球・惑星物質の局所構造解析、高集積熱電変換による廃熱回収システムといった研究課題について、原子や電子レベルで見た結晶構造と物性の関係を調べています。

電子状態や電荷整列の研究

光が物質にあたると、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します。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）を用いると、物質内の原子や分子の配列や化合物の電子状態の研究が行えます。これらの研究を先端的に行うには、大型加速器によるシンクロトロン放射光や中性子などの利用が不可欠です。連続性・偏向性・平行性を利用した新しい放射光測定技術としてＸ線回折散乱に分光学的手法を取り入れ、結晶内原子の電子状態を研究しています。

元素の吸収端近傍でＸ線異常散乱を利用すると、価数の異なるイオンを共鳴散乱能の差でＸ線的に区別でき、少量の価電子や磁性電子の特徴が議論できます。マグネタイト（Fe_3O_4）をはじめとする遷移金属フェライト結晶やEu_3S_4などの希土類元素化合物で価数揺動や電子的秩序状態など固体内電子の描像を求めています（図１）。

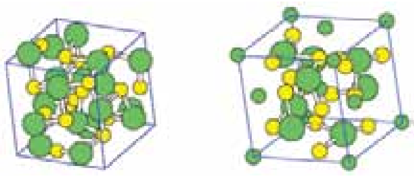


図1　Eu_3S_4の高温相（左）と低温相（右）。低温相では4aサイト（緑小球）にEu^{3+}が、8dサイト（緑大球）にEu^{2+}とEu^{3+}が1:1で入る。

磁気状態や磁気構造の研究

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上で基本的な量です。研究室では、磁気光学効果であるＸ線磁気円二色性（XMCD）実験やＸ線共鳴磁気散乱実験により、遷移金属・希土類元素酸化物や硫化物の電子状態や磁気状態を研究しています。

電荷移動型半導体$LaCoO_3$についてのXMCD研究から、Co^{3+}の中間スピン状態（$t_{2g}{}^5e_g{}^1$, S=1）の存在が確認できました。また、Laをアルカリ土類金属で置換した$La_{1-x}M_xCoO_3$（M = Ca, Sr, Ba）では、Coイオンの強磁反強磁性的二重交換相互作用が置換元素の大きさに依存することがわかりました。フェリ磁性$NiFe_2O_4$のXMCD実験スペクトルとマグネタイトFeイオンの理論電子密度分布を示します（図２）。

この手法は蛍光分光法を用いることで、薄膜試料にも適用できます。透明で室温強磁性であるCoドープTiO_2薄膜について、C K吸収端でXMCDとXANES解析を行いました。その結果、薄膜中のCoイオンはCo^{2+} 低スピン状態にあり、そのイオンがイルメナイト部分構造をとって単位胞双晶の境界に存在し、この特異な結晶構造が強磁性を発現させていることがわかりました。

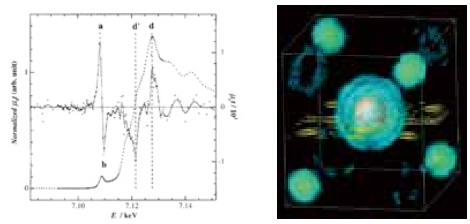


図2　$NiFe_2O_4$のXMCD とFe_3O_4内 A サイトFe の理論電子分布

磁気構造解析には中性子を用いるのが一般的ですが、中性子回折では価数や元素選択的な解析が困難なため、研究室では放射光Ｘ線共鳴磁気散乱による磁気構造解析法の開発を行っています。M型フェライト（$BaFe_{12}O_{19}$）では、c軸方向の自発磁化の磁気異方性がFe^{3+}をCo^{2+}とTi^{4+}で置換することで軽減できます。この原因を調べるために、３種の元素が占める５つの独立サイトでの席有率や磁気モーメントの配列を、高エネレギー加速器研究機構PF-BL3A/6Cを利用して詳しく研究しました。図３に、Fe K吸収端の左右円偏光Ｘ線を用いた共鳴磁気散乱の実験から得られた磁気構造を示します。

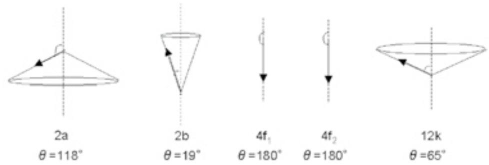


図3　$BaCoTiFe_{10}O_{19}$のFe 磁気モーメントの傾き（５サイト）

熱電変換素子の開発と廃熱利用

地球温暖化や化石燃料の枯渇化が叫ばれる中、熱電発電はスケール効果が無視でき低密度廃熱のエネルギー変換として期待できます。実用化には熱電性能や耐久性の向上と低コスト化が必須で、高温熱電用酸化物材料の開発とともに、熱電素子パッケージ化（図４）の共同研究を進め、低密度廃熱利用の熱リサイクル構築を目指しています。

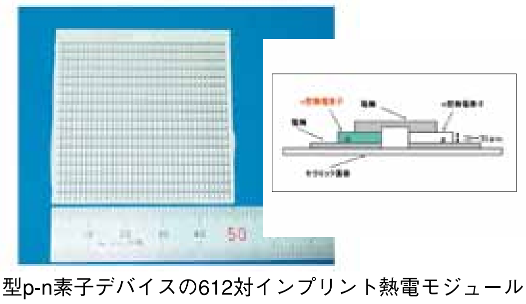


図4　π型p-n素子デバイスの612対インプリント熱電モジュール

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

伊藤・谷山研究室

伊藤　満 教　授(写真左)
谷山　智康 准教授(写真右)

http://www.msl.titech.ac.jp/~itohlab

酸化物機能物質科学とスピン変換の物質科学・スピントロニクス

はじめに

物質が特定の有用な性質を有するとき我々はそれらを材料と称します。いくつかの材料を組み合わせてデバイスや装置を組み立てます。我々の研究グループは、物質がなぜ特定の機能を有するかを問いかける根源的な研究（理学）をはじめとして、応用を志向した機能発現を目的とした研究プロセスを通して物質の研究を行っています。研究分野としては、固体化学、固体物理、構造化学を含む材料科学であり、常に、世界の研究者と議論しつつ共同研究を遂行しています。

研究について

過去 25 年間、我々が精力的に進めてきたのは、強誘電性、強磁性、電気伝導性、イオン伝導性、発光特性を有する新物質の探索です。研究の対象とする物質はこれまでに誰も報告していない新物質であり、既知物質に対しては、興味ある機能を発現する起源とメカニズムを調べて報告しています。また、目的に応じて、自分自身でセラミックス (多結晶)、単結晶、薄膜を作製し、結晶構造や特性を評価する試料作製と物性評価を行うことによって物質・材料研究の全てを経験するように努めています。

実験装置は最新鋭のものをそろえていますが、研究室のモットーは、測定や解釈でブラックボックスを作らず原理を理解し、自分で意図した実験ができるように努めています。

研究は各人が興味あるテーマに取り組み、日常的な議論、あるいは月例報告での議論を通して問題点を解決しています。2 年間の修士課程では、物質・材料に関する研究を通して研究者として孵化することを目指し、3 年間の博士課程では、世界をリードする独立した研究者として羽ばたけるように日常的な訓練を行っています。

このため、学会発表は、物理学会、応用物理学会、化学会、セラミックス協会をはじめとする国内学会や国際会議で行っています。

また、重要かつ普遍的な研究を行うために、常に国内外の研究者と連携し、我々のグループではカバーしきれない分野については、随時共同研究を行っています。

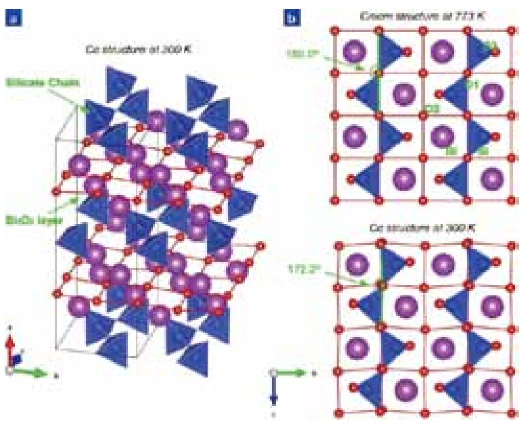


図 1 新規珪酸塩強誘電体の構造。

研究テーマについて

1．強誘電体・圧電体の新物質作製と機構解明

セラミックスの中で最も使われている部材はコンデンサー材料です。酸化物強誘電体材料は 1940 年頃に発見され、1950 年頃からは実用が始まりました。しかし、強誘電性の発現機構については未解明のまま残され現在でも議論が続いています。我々はこれらの問題を解決するための多数の新物質を合成してそれらの構造と物性を解明することで本分野の基礎科学の発展に貢献しました。また、最近はアルミニウム、鉄、酸素等クラーク数上位の元素のみで構成された酸化物強誘電体の探索に取り組んでいます（図 1）

2．エネルギー材料、発光材料

20 年前に我々のグループで発見したリチウムイオン伝導性ペロブスカイト型酸化物に対する解析とメカニズムに関する普遍的情報はその後のリチウムイオン伝導性化合物の設計に活かされています。また、複数の遷移金属を含む酸化物内での価数動に関する知見は、リチウム電池の充放電に伴う正極内での電荷移動のメカニズム解析に役立っています。我々のグループでは現在、電池内での界面、電解質、電極に着目してリチウムイオン電池の実験と解析を行っています。

また、過去 10 年間に培った、物質中の格子波（フォノン）、電子バンド構造、および電子伝導性に関する知見を活かして、各種物質が有する熱電材料に求められる特性を構造化学的観点から解析を進めるとともに、新物質の合成も行っています。さらに、固体化学の知見を活かして多層構造からなる酸化物 EL 低電圧発光デバイスの作製と測定を行っています。

3．磁性・伝導性材料

遷移金属酸化物が示す特性のうちで最も重要な磁性と電子伝導性は固体科学のうち最も重要な分野です。我々は、磁性体のうち、結晶場に着目して興味ある磁気特性を示す物質や、スピン転移を示す物質の構造と電気伝導性に着目して新規物質を提案し、その特性を報告すると同時に、世界の代表的な機関の研究者と共同研究を行うことで議論を深めています。また、磁性を持ちながら強誘電性も持ち合わせる絶縁性物質の合成にも取り組んでいます（図 2）。

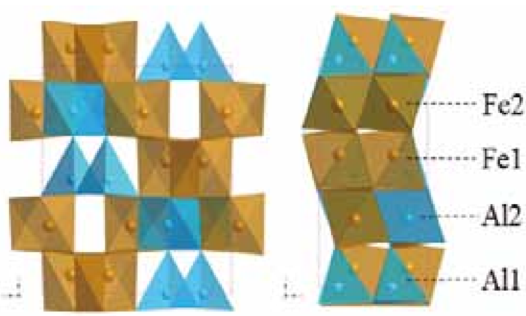


図 2　アルミニウムとシリコンから形成される新規マルチフェロイック物質の構造。

おわりに

自分で考えた新物質を作りその特性を評価するプロセスは物質科学の達人であることを意味します。そこでは物理、化学、結晶学、作製プロセス等、あらゆる分野の知識を必要とします。出身学部は問いません。研究室に入って、日常の議論を通して切磋琢磨し、世界をリードする研究者になることを希望する学生さんを歓迎します。

スピン変換の物質科学とスピントロニクス

物質の電子・原子スピンを操作し、新しい機能性を創出しようとする研究分野―スピントロニクス―が注目を集めています。我々のグループでは、ナノスケール磁性を中心として、電子や原子のスピン物性の解明と、それらを光学的、電気的に操作、検出するための新概念の提案を目標として、スピントロニクスの基礎研究を推進しています。スピントロニクスは、研究分野としての歴史が浅く、今後 10 年くらいの間にも新現象が続々と発見されることが大いに期待できる大変魅力的な分野です。また、基礎研究から応用研究までの一連のプロセスを体験できることも、この分野で研究に携わる醍醐味の一つです。

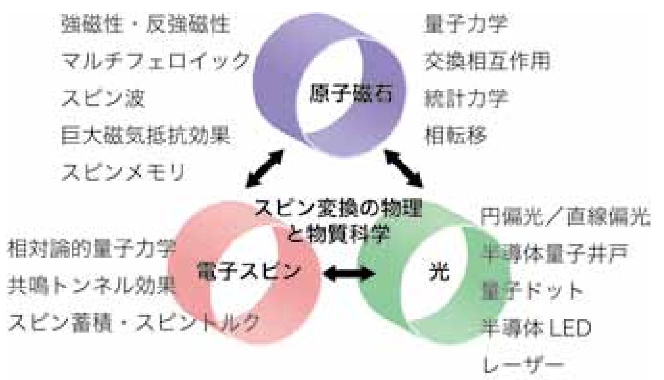


図3　ナノスケール磁性とスピントロニクス ースピン変換の物質科学ー。

スピントロニクス分野ではナノスケール磁性体が主役を演じるため、量子力学や統計力学で解き明かされる物理現象に興味のある学生さんはもちろん、ナノデバイス・電子工学、磁性材料工学、エピタキシャル薄膜成長などに興味のある方も、この分野で研究の楽しさを満喫し、学術を追究することができます。皆さんがこの魅惑的な分野に参入し、果敢にチャレンジすることを期待しています。また、海外の大学への学生の派遣や国際会議での発表も積極的に進めていますので、早くから国際的な研究活動に関わりたい学生さんも大歓迎です。

研究テーマについて

最近、我々が特に注力して取り組んできた研究の一部を以下に紹介します。

1. 電子―原子スピン変換による磁気秩序制御

物質が示す多彩な磁気秩序は、原子が持つスピン角運動量（磁気モーメント）とそれらの間の多様な相互作用によって発現する統計力学的な物理現象です。我々のグループでは、磁性体を構成する原子スピンと伝導電子の持つスピン角運動量との間でスピン角運動量を変換することで磁性体の磁気秩序を制御するための原理の提案とその実証を行っています。具体的には、反強磁性 - 強磁性磁気相転移を示すような物質を薄膜や細線にナノスケール構造化して、スピン偏極した電子を注入することで反強磁性状態を強磁性状態に磁気状態変換する研究に取り組んでいます（図 4）。

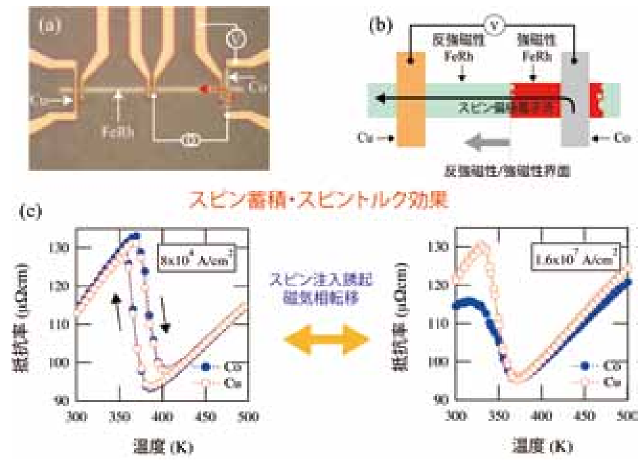


図4　電子スピン注入により誘起される磁気相転移。

2. 原子スピン―格子変換による磁化配向、スピン偏極制御

スピンメモリ（Spin-RAM）などを構成する磁性薄膜の低消費電力・高速磁化制御は、エネルギー・環境問題の克服に向けたイノベーションへの大きな一歩となります。我々のグループでは、強磁性体と強誘電体のヘテロ構造を利用し、強磁性体に格子歪みを誘起することで磁化配向を電圧で制御するための技術開発を行っています（図 5）。これは一種の格子－原子スピン変換のための界面物理現象の探求と技術開発と捉えることもできます。

3. 電子―光スピン変換による光偏光制御

電子が持つスピン角運動量を光に受け渡すことで、電子スピンの光による情報伝送が可能になります。我々のグループでは、電子 - 光スピン変換の原理を用いたスピン発光ダイオード（LED）の技術基盤の構築を行っています。また、フェムト秒レーザーを用い、電子スピンのピコ秒時間スケールでの動的な振舞いを実時間計測する研究にも取り組んでいます。

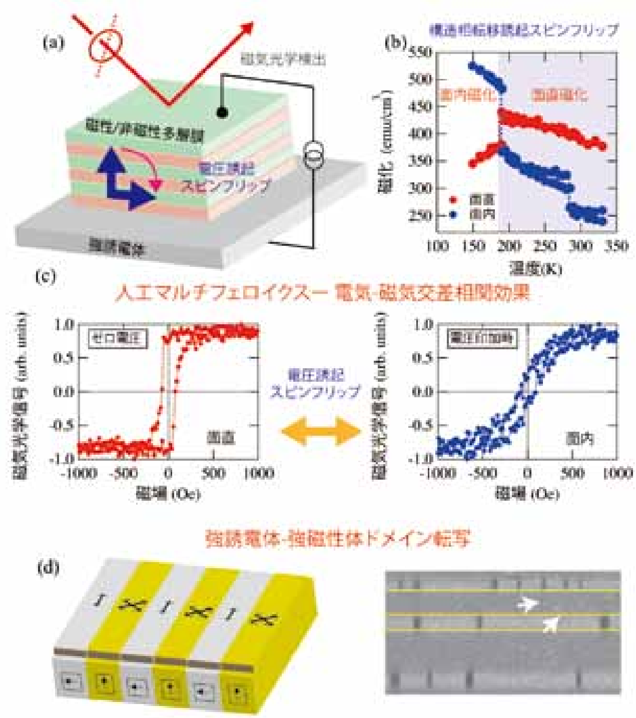


図5　電気-磁気交差相関効果と磁性制御。

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

真島研究室

真島　豊 教授

http://www.msl.titech.ac.jp/~majima/

分子デバイス・単電子デバイスの創製

はじめに

リチャード・ファインマンが 1959 年に“There’s Plenty of Room at the Bottom”(ナノスケール領域にはたくさんの面白いことがある)という講演をしました。この講演では、原子数個というナノスケール領域では、これまでのマクロスケールの世界とは全く異なる性質が現れるだろうと予測しています。そして、将来は原子を 1 つずつ組み上げて思い通りの物質を作れるようになるだろう、と予言しています。エレクトロニクスは、「トランジスタの数は 2 年ごとに倍増する」というムーアの法則に沿って 40 年以上微細化が進んでおり、2030 年には数 nm、すなわち分子程度の大きさで動作するデバイスが実現されます。真島研では、分子やナノ粒子をボトムアップ手法により組み上げて分子デバイス・単電子デバイスを創製し、2030 年に実用化をすることを目的とした研究を進めています。真島研では、これらの研究を通じて、世界を牽引する人材が羽ばたくことを願っています。

研究について

「数ナノメートルのデバイスをトップダウン手法とボトムアップ手法を組み合わせて創り出すために、1.無電解メッキなどの化学的な自己組織化プロセス開発、2.走査型トンネル顕微鏡を用いた単一分子・単一ナノ粒子の表面電子物性評価と機能探索、3.ナノデバイスの電気特性評価と回路化を通じて、分子デバイス・単電子デバイスの実用化に向けて基礎から応用まで一貫して研究しています。

研究テーマについて

無電解メッキによるナノギャップ電極の作製プロセスに関する研究

基板をビーカーに繰り返し浸すボトムアップ手法により、サブナノメートルオーダで精密な構造を有するナノデバイス作製する手法を我々は研究しています。無電解メッキの自己停止反応を利用して、図 1 (b) に示すような 3 nm以下のギャップ長を有するナノギャップ電極を高収率で作製するメッキ手法の研究をしています。また、ナノギャップ電極間にナノ粒子や分子を化学吸着させて選択的に導入するための“自己組織化プロセス”の研究をしています。

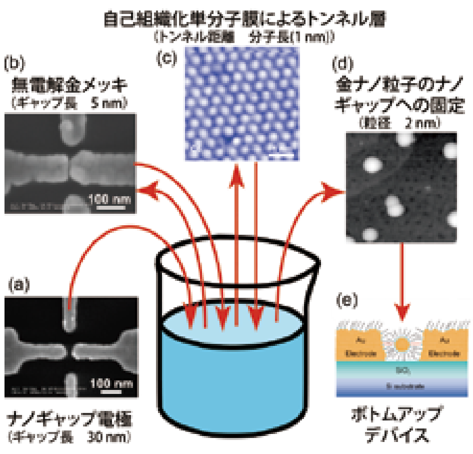
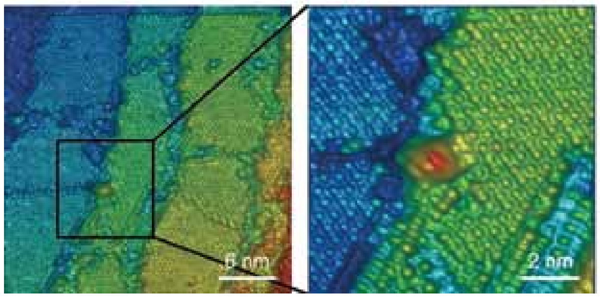


図 1　ボトムアップ手法によるナノデバイスのつくり方。

走査型トンネル顕微鏡を用いた単一分子・単一ナノ粒子の表面電子物性評価と機能探索

走査型トンネル顕微鏡（ＳＴＭ）を使いこなすと、一個の分子やナノ粒子の波動関数を直接観察することができます。図 2 は図 1 (c) に示したアルカンチオール分子のじゅうたん(自己組織化単分子膜)の上に置いた直径 1.1 ｎｍの金属内包フラーレン分子のＳＴＭ像です。我々は、この分子が世界最小のスイッチとして機能することを発見しました。金属内包フラーレンは、縞模様がついた丸い構造として見えています(この縞模様は分子の波動関数です)。このように、分子内やナノ粒子内の波動関数を直接観察して、新しい機能を見出します。



ナノデバイスの電気特性評価と回路化

分子やナノ粒子を、自己組織化プロセスによりナノギャップ電極間に導入してナノデバイスを作製し、その電気特性を計測します。図 3 は、ナノ粒子を用いたボトムアップ単電子トランジスタの SEM 像です。この単電子トランジスタは、上下に 2 つのゲート電極を有しています。紫色の部分では電流が流れず、赤色の部分で電流が最大となります。2 つのゲート電圧によりトランジスタが ON/OFF しており、排他的論理和 (XOR) 回路として動作しています。真島研では、単電子トランジスタに加えて、分子メモリなどのナノデバイスを構築し、新しい機能を発見し、分子デバイス・単電子デバイスを 2030 年の実用化につなげていきます。

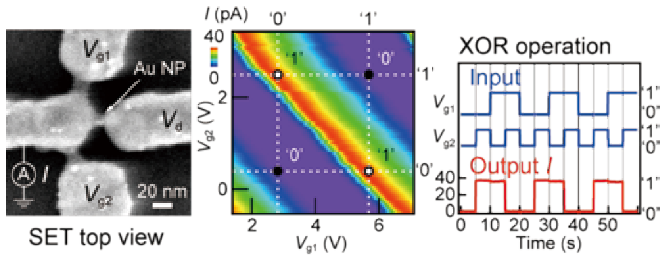


図 3　2 ゲート単電子トランジスタのSEM像、2 次元出力マッピング、XOR回路動作。

おわりに

我々は分子デバイス・単電子デバイスを 2030 年に実用化するという明確な目標を掲げています．この目標を達成するために、無機材料・金属材料・有機材料、化学、物理、電気、生物などのさまざまな分野の人材を募集しています。充実した研究生活を通して、皆さん自身が強くなる“自分磨き”を実感できると思います。

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

阿藤　敏行 准教授

阿藤研究室

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

ナノスケールで起こる物質変化のリアルな描像

本研究室では、衝撃超高圧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１km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圧状態が実現し、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。パルス的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ないます。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。

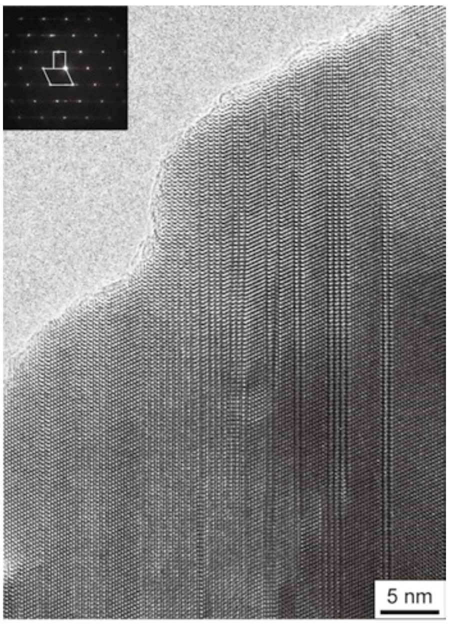


図1　9万気圧に衝撃圧縮したフッ化マンガンの高分解電子顕微鏡像。ナノスケールで高圧相と常圧相がラメラ構造をとっている。

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靭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内で起こる、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、および化学的変化は、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、溶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化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。

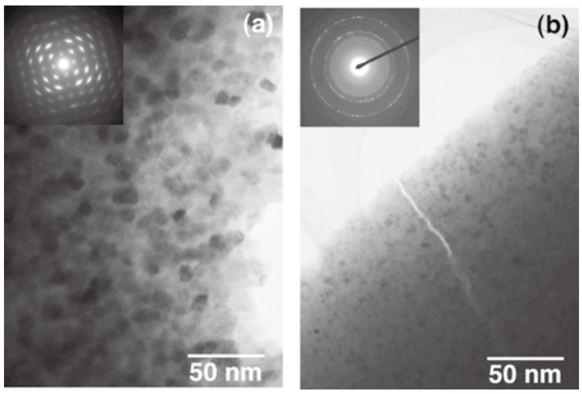


図２ 衝撃圧縮したムライトセラミックス（（a）49GPa（b）65GPa）相転移に伴うムライトのナノ結晶化（a）や微細なγーアルミナとSiO_2ガラスへの分解反応（b）が見られる。

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

里 研究室

里　達雄 教授

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

先進軽合金材料のナノマルチ組織制御法の構築と材料評価

はじめに

我々の身の回りには多くの材料があり，それらを有効に活用することによって豊かな日常生活を送っている. 材料なくしては何も具現化はできない. 特に，金属材料は古くから利用され，近年の大型建造物，自動車，高速鉄道車両，航空宇宙機器，情報通信機器など，多くの分野で利用されている. 材料の重要性が改めて認識され，国際社会で熾烈な研究開発競争が繰り広げられている. 材料には資源問題や環境問題とも直接関わる重要性がある.
当研究室では，構造用の軽合金材料に着目し，高強度，高靭性，高成形性をもつ材料の創製の基礎研究を行い，さらに資源の有効活用の観点から高循環型材料の創製プロセスの研究を行っている. 以下に，代表的な研究課題を紹介する.

軽量高強度高機能合金のナノ組織創製と材料評価／析出相変態現象によるナノ析出制御法の構築

代表的な軽金属であるアルミニウムを対象に，合金組成，マイクロアロイング元素，熱処理プロセスなどの観点から高強度・高延性を実現する微視的ナノマルチ組織創出にチャレンジしている. 析出強化は合金の有効な高強度化法であるが，さらに，微小な原子集団であるナノクラスタが結晶粒内および結晶粒界の組織制御に有効であり，高強度・高延性化を実現できることを最近明らかにしている（図１）. しかしながら，ナノクラスタの形成機構，析出組織微細化機構，マイクロアロイング元素の役割，高強度・高延性化との関係などをさらに解明すれば，従来にないより優れた組織制御法の構築に結び付く. これらは他の合金，たとえば，高強度・高導電性化が求められる銅合金にも拡張できる.

半溶融成形法による循環型ナノへテロ構造合金の創製

構造用金属材料部材の製造において，成形性に優れる特性と同時に成形に要する負荷力やエネルギーを可能な限り少なくすることは重要である. また，製造プロセス時に組織制御も併せて行うことができれば，大きな優位性がある. そこで，当研究室では半溶融成形法を新たに考案し，研究を進めている. さらに，資源有効活用の点から，通常，アルミニウムにとって有害不純物元素である鉄を逆に積極的に活用するプロセスに拡張し，リサイクル性（循環型）を飛躍的に高めることにチャレンジしている. すなわち，加工－半溶融成形法（Deformation-Semisolid-Forming Process, D-SSF）を開発し，有害な鉄系化合物相を微細破砕し，一方，ひずみ導入による母相（α-Al）の微細粒状化を図り，半溶融鋳造，半溶融鍛造，半溶融押出を可能とするナノへテロ構造合金の研究である. この D-SSF プロセスと熱処理とを組合わせることにより，階層的構造のナノマルチ組織合金の創製が可能である. これらは，材料特性のみならず資源有効活用の観点から高い優位性の合金創製であり，先進軽合金材料として期待が大きい.

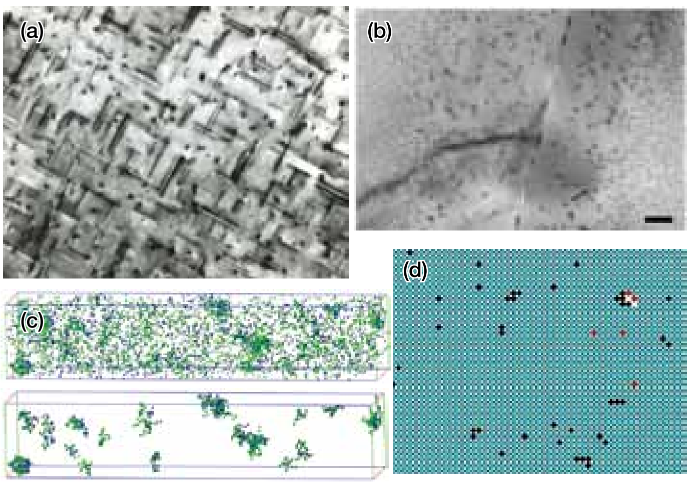


図１　軽量高強度合金のナノ析出組織とナノクラスタ.
(a)Al-Mg-Si 合金の微細均一なナノ析出相，(b)Al-Zn-Mg 合金の粒内析出相と粒界近傍の複雑な組織，(c)Al-Mg-Si 合金で検出されたナノクラスタ (3DAP 像)，(d) 計算機シミュレーションで見出された空孔・マイクロアロイング元素を含むナノクラスタ.

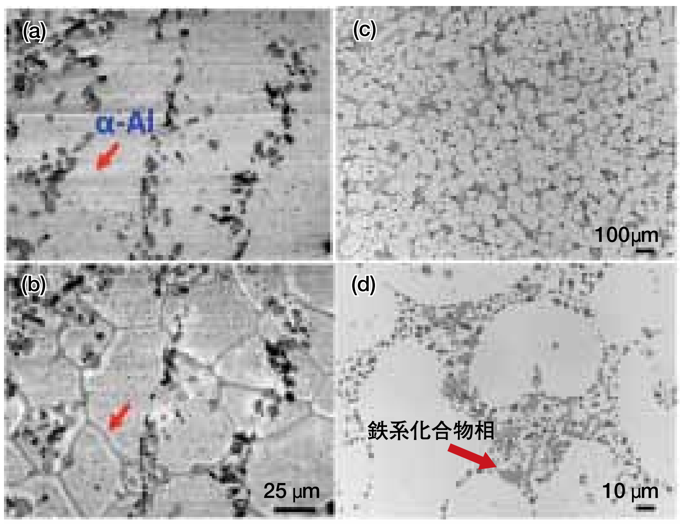


図２　加工ー半溶融成形 (D-SSF) 法によるナノマルチ組織制御.
(a), (b)Al-Si-Mg 合金の半溶融状態への昇温中におこるα-Al 相内の優先溶融現象（矢印），(c), (d)Al-Si-Mg 合金の D-SSF 法による微細粒状組織と微細分散した鉄系化合物相（低倍と高倍）.

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

曽根研究室

曽根　正人 准教授

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

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

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、様々な問題が提案されると考えられるが、ナノメーターオーダーで材料の構造制御を行って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ひとつだろう。当研究室では、新規なナノ材料創製技術を開発し、それによる新材料の開発を行なうとともにマイクロサイズレベルでの材料の機能評価に焦点をあてた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

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 32nm 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。更に驚くべきことは、この埋め込まれた 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。

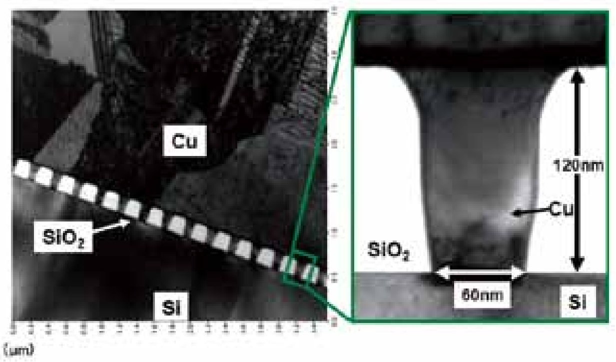


図1　半導体テストチップ（直径60nm・深さ200nm）へ超臨界ナノプレーティング（SNP）法による埋込んだCuのTEM像

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。

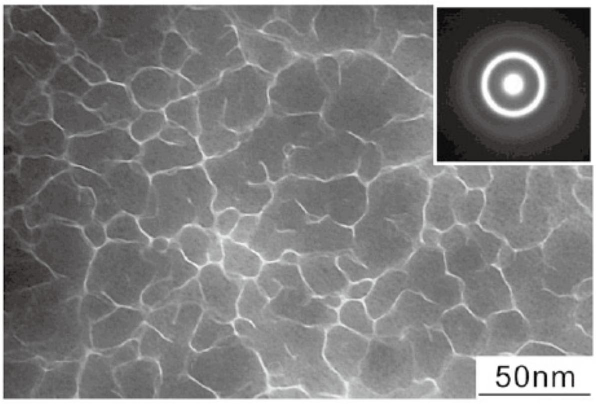


図2　無電解合金めっき法により作製したPd-Ni-P金属ガラスの内部構造のTEM像

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。

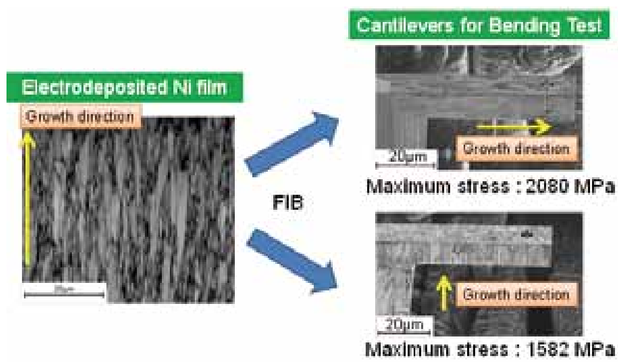


図３. 柱状結晶粒を有する Ni めっき皮膜から結晶成長軸に平行／垂直方向に切り出した片持梁試験片とその曲げ強度

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

若井研究室

若井　史博 教授

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

ナノ・ミクロ構造設計によるセキュアセラミックスの開発

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、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ための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。反面、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の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・ミ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、「セキュア」な部材開発へのアプローチとして、焼結プロセスにおけるミクロスケールの粒子間相互作用をもとに、セラミックス構造設計（Architectural design）の可能性を追求しています。

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・ミ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。

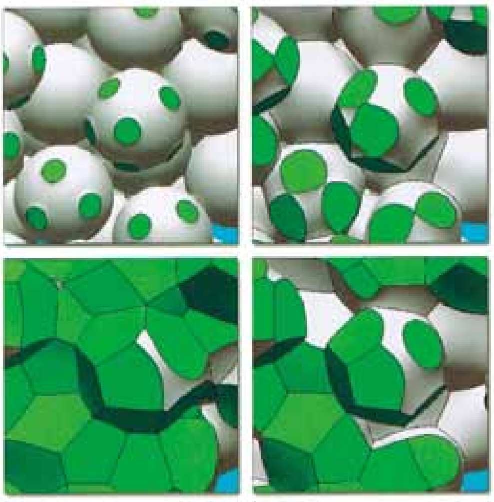


図1　焼結プロセスの３次元シミュレーション
http:www.youtube.com/user/evolver0fan

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・高靭性を示します。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しだいでどんどん広がっていきそうです。

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、超塑性成形の実用化につながるでしょう。

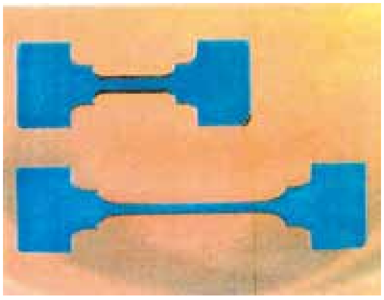


図2　窒化ケイ素の超塑性変形
Nature 1990

界面現象のダイナミクス

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。熱エネルギーを利用して多粒子集合体を緻密な部材へと変換するプロセスが「焼結」です。この本質は粒子間結合の形成であり、結晶粒間のミクロ界面の形成とも言えます。古典的な実験研究の限界を突き破るには理論的な研究やシミュレーションが重要な役割を果たします。混沌としている物質世界もその奥底を流れているものは、実に明快、論理的なものがあることを明らかにします。さらに、私たちは微細加工技術を駆使して、組織形成プロセスにおける新概念やミクロ力学原理を明らかにするための斬新な実験手法の開発に取り組んでいます。

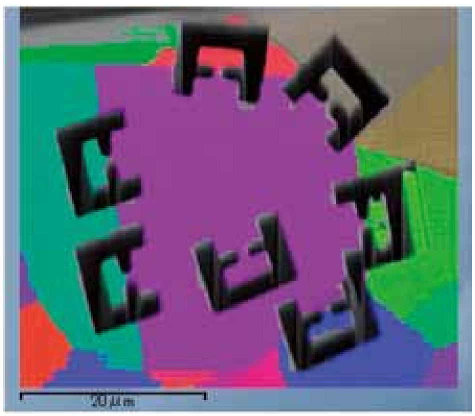


図3　微細加工技術による焼結のミクロ力学原理の検証実験

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

赤津研究室

赤津　隆 准教授

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

局所高応力場で視るセラミックスの破壊と変形

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求し、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。

高靭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。破壊靭性値（Fracture Toughness）を大きくすること、つまり高靭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靭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、セラミックウィスカー（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靭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、その高靭性化機構をよく説明できるウィスカー亀裂面架橋モデルを提唱しています。さらに、ウィスカーの配向状態やウィスカー／マトリックス界面の制御によってより大きな高靭性化が達成できることを明らかにしました。

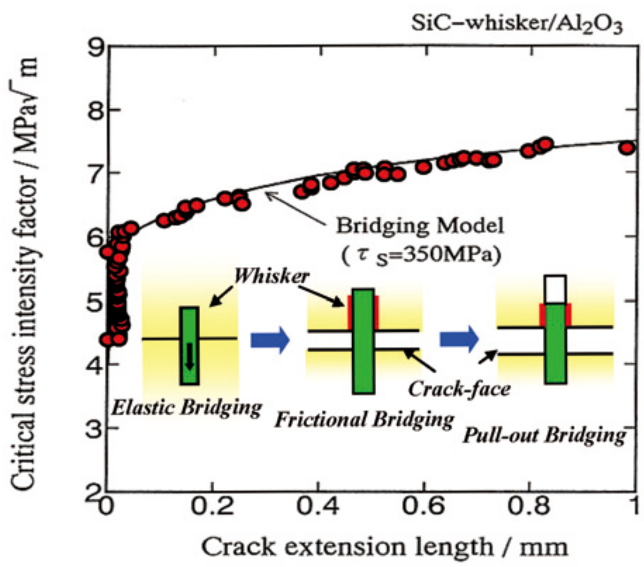


図1　ウィスカー強化セラミック複合材料のR 曲線挙動の実験値（赤点）と亀裂面架橋モデルによる予測値（実線）

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靭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、極微小押込み深さでは材料の不均質性や異方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込み理論よる解析が一般的です。私たちは圧子押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。

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

細野・平松研究室


細野　秀雄　教　授(写真左)
平松　秀典　准教授(写真右)

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

世界の潮流となる新材料を創り出す

1. 研究室の目指すもの

膨大な数の「物質」の中で、人間の社会に直接役立つものが「材料」です。私たちの研究室は、独自に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。

❶物質固有の結晶構造を利用して材料としての新機能を探る

・層状構造を持つ混合アニオン化合物の研究から、新しい高温超伝導体「鉄系超伝導体」を 2008 年に実現しました。1986 年の銅酸化物超伝導体に匹敵する大きな発見と見なされ、世界中で熱い研究が行われています。

・0.4 nm の大きさのかご構造からできている結晶 12CaO・$7Al_2O_3$ (C12A7) をベースに、高輝度電子放出源、有機発光 TV 用高性能電極、アンモニア合成触媒、超伝導などの機能を開拓しました。

❷材料研究の新しい潮流「ユビキタス元素戦略」の全国拠点

・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, Al, Si 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」を私たちは提唱しています。これは、政府の科学政策の大きな柱の一つとなり、2008 年から新しい国家プロジェクトが開始され、2012 年には「元素戦略研究センター」が設置され、2014 年 2 月には新設の専用建物が完成する予定です。全国の大学に先駆けて実現したもので、元素戦略の研究拠点となります。

❸シリコンを凌ぐ半導体デバイスが実現できる新材料を創り出す

・私たちは透明酸化物半導体という新しい研究領域を開拓してきたパイオニアです。その成果の一つが、当研究室が 2004 年に Nature 誌に発表したアモルファス酸化物半導体 IGZO の薄膜トランジスタ (TFT) が、高解像・低消費電力スマートフォーンの実現につながりました。有機 EL-TV 用の新材料を今年から本格的に狙います。

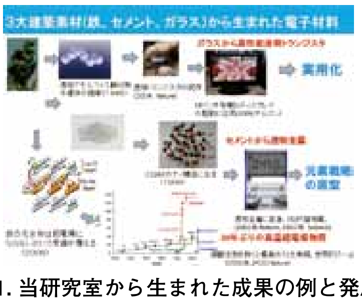


図1. 当研究室から生まれた成果の例と発展

材料探索研究は、既にある材料の改良に終始してしまいがちですが、これまでに創り出された画期的な新材料、例えばナイロン、カーボンファイバー、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こっ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挙げ、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

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いことから、私たちはこれまで酸化物を主軸として研究を行ってきました。その酸化物は、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、以前は殆ど見いだされていませんでした。これはその物質の本質によるものではありません。私たちは、物質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・磁気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。

そして、これからは酸化物だけにこだわらず、周期表にのっているあらゆる元素を対象として探索範囲を拡げ、その物質の持つ結晶構造から電子状態を予測しながら、材料探索研究を行っていきます。ただ試料を作るだけではなく、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（新超伝導体、透明半導体、光機能材料、材料設計）
　　　　　平松（材料探索、薄膜デバイス作製、光電子物性）
　　　　　飯村壮史　助教（新超伝導体、酸化物電子材料）

学生：博士課程 5 名、修士課程 8 名、学部 4 年生 1 名

プロジェクト：

現在、次の 4 つのプロジェクトを通して研究を進めています。

(1) 文部科学省 元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>電子材料領域（期間：2012.8 ～ 2021.3）

(2) JST ACCEL「エレクトライドの物質科学と応用展開」（期間：2013.10 ～ 2018.3）

(3) NEDO 革新的太陽電池プロジェクト（期間：2008.4 ～ 2018.3）

(4) 文部科学省 光アライアンスプログラム（期間：2008 ～ 2017）

これらのプロジェクトでは、特任教授 3 名、特任准教授 1 名、博士研究員 7 名が活躍しています。これらのプロジェクトメンバーだけでなく、同じ材料物理科学専攻の松石 聡 准教授や、物質科学創造専攻の神谷利夫 教授のグループとも緊密な連携をして研究を遂行しています。

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（これまで博士課程学生が Science 誌や Nature Commun. 誌に論文を発表してきました）。
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 11 年間）。

国内学会：　論文賞 3 名、講演賞（応用物理学会、化学会等）11 名
国際学会：　講演賞〔米国材料科学会等〕3 名、ポスター賞　2 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）3 件
先端技術大賞材料分野　3 件

5. 研究テーマ

❶独自の攻め方で新材料を探す：新しい高温超伝導体の探索と薄膜・デバイス化

物質の結晶構造を観、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、アイデアがでてきます。

超伝導は数ある固体物性の中でも最も劇的でかつ明快な現象です。また、超伝導転移温度 (T_c) の高い新物質が見つかれば、その社会的インパクトの大きさは比類ないほど大きなものです。私たちの研究室では、2006 年にまずこれまで磁性原子である鉄の化合物は超伝導にならないという常識を覆し、そして 2008 年には T_c = 26 K の LaFeAsO を報告し、その後世界的ブームを巻き起こしました。現在、最高の T_c は 55 K に達し、銅系材料以外では一番高くなっています。どこまで T_c があがるか世界中で競争になっています (図 2)。

本家である当研究室も秘策を持って新規物質探索を頑張っており、最近では、新しいタイプの超伝導体 $CeNi_{0.8}Bi_2$ や、鉄と同様磁性元素であるコバルトを有するにもかかわらず超伝導を示す新物質 $LaCo_2B_2$ を発見しました。

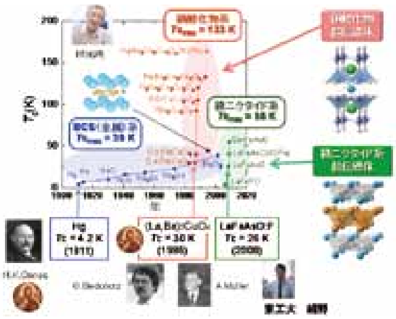


図2. 超伝導の歴史。当研究室が発見した鉄系がどこまで超伝導転移温度があがるか、世界中が注目しています。

鉄系超伝導体の物性研究だけでなく、高磁場発生マグネット・送電線などへの応用面で特に重要となる薄膜作製・デバイス化にも注力しています。図 3 は、私たちが、鉄系超伝導体薄膜分野ではすべて世界に先駆けて実現してきたエピタキシャル薄膜と超伝導量子干渉素子 (SQUID) の例です。最近、高品質化した薄膜を利用して、銅酸化物超伝導体よりも優れた粒界特性を明らかにして（Nature Commun. 誌）、高磁場発生マグネット応用に期待できる高性能線材を開発しました (図 4)。

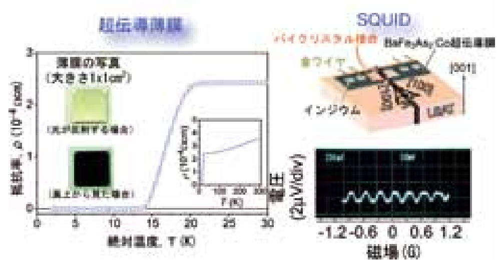


図 3. 世界初の鉄系超伝導薄膜 Co 添加 $SrFe_2As_2$ の超伝導特性と試料の写真 (左)。それをさらに高品質化した $BaFe_2As_2$ 薄膜を利用して作製した超伝導量子干渉素子 (SQUID, 右)。SQUID は磁場を加えることによって周期的な電圧の変調が見えます。

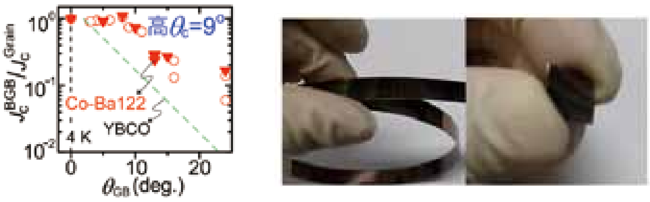


図 4. 高品質 $BaFe_2As_2$:Co 薄膜により明らかになった鉄系超伝導体の銅酸化物よりも優れた粒界特性 (左) と開発した薄膜線材の写真 (右)。

❷ユビキタス（ありふれた）元素戦略：新コンセプト物質エレクトライド (電子化物)

電子が陰イオンとして振舞う物質を「エレクトライド」と称します。$12CaO \cdot 7Al_2O_3$ (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 O^{2-} イオン) を包接できるナノかご構造を持っています。私たちは、合成法を工夫することで、ナノかご構造中に、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 C12A7:e^- を実現しました。この物質は絶縁体ではなく、透明で金属のようによく電気が流れ、低温にすると超伝導を示します。また、この物質にルテニウムを担持すると、優れたアンモニア合成触媒になることを見いだし (Nature Chem. 誌 , 図 5 左)、最近大きな感心を集めています。さらに、アモルファス C12A7 エレクトライドは、IGZO-TFT で駆動する有機 EL の電子注入材料として重要度が増しています。

2011 年には、1600° C で融解した C12A7:e^- の中にも電子が安定に存在し、液体金属として振舞うことを明らかにしました（Science 誌）。これによって「電子の高温溶液」という新しい分野が生まれました。2013 年には、Ca_2N では層間に電子は存在し、金属の銀に匹敵する高い伝導度を示すことを見いだしました（Nature 誌 , 図 5 右）。これによって 2 次元エレクトライドという新領域が誕生しました。学問的にも応用の面でもこれからの飛躍が期待できるフェーズになりつつあります。

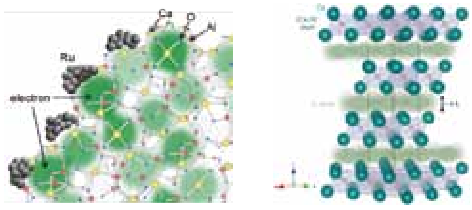


図 5. (左) 空気中の窒素からアンモニアを合成するための優れた触媒作用を示す Ru 担持エレクトライド C12A7:e^-。これまでの触媒の 10 倍の活性を示す。(右) 金属の銀に匹敵する伝導度を示す 2 次元エレクトライド物質 Ca_2N。電子は [Ca_2N] 層の間に存在。

❸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いても、新しい材料を見つけることはほとんど不可能です。私たちは、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拡がっていく様子が見えます。

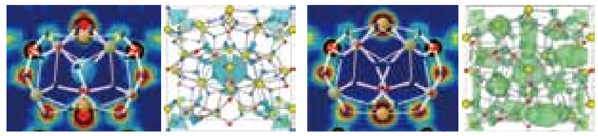


図 6. MEM/Rietveld 解析で観測した電子密度と第一原理計算で求めたかご構造の電子密度。

❹高性能透明トランジスタ

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、透明酸化物エレクトロニクスという新分野を私たちは開拓しました。2004 年にはアモルファス酸化物半導体 (IGZO) の特長を活かして、高性能 TFT を実現しました。2012 年から新型 iPad やスマートフォーンへの搭載が始まり、自分たちの創った新材料で世界を席巻する例になりつつあります (図 7)。

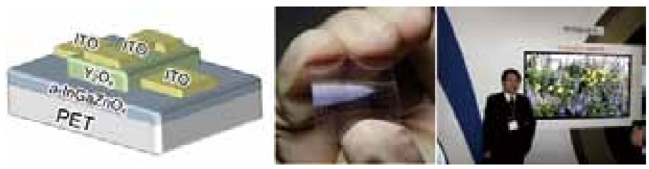


図7. アモルファス酸化物半導体を用いた薄膜トランジスタ（TFT）は、現在まで使われているアモルファスシリコンよりも20倍の移動度など多くの優れた性能を示し、作製も容易なことから次世代の薄型TVを駆動するTFTの本命と目されている（左:TFTの構造, 中央:プラスチック基板上に作製したTFTの写真）。右の写真は、これを使うことで実現した70インチ超高解像3D-LCD。

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

松石研究室

松 石　　聡 准教授

http://www.materia.titech.ac.jp/matsuishi.html

元素戦略のためのアニオン科学

はじめに

今日の社会を支える電子デバイスなどに必要な希少元素の需要の高まりと枯渇が危惧される中、持続可能な社会実現のための新しい物質科学が求められています。このような要求に応えるため、元素のみかけの個性に縛られて物性を考えるのではなく、物質の構造を利用して、ありふれた元素の隠れた性質を引き出すマテリアルデザインが必要です。本研究室では、イオン性をもつ化合物中の陰イオン(アニオン)の働きに着目し、新機能物質の設計・探索および、既存物質への新機能の付与を行います。

変わり種のアニオンを操る

最もありふれた元素のひとつである水素は、あらゆる固体中にまぎれ込んでいます。酸化物の中では、水素は陽イオン(カチオン) H^+ として存在していると考えられがちです。しかしながら、アルカリ金属やアルカリ土類金属などがカチオンとして存在する場合、そのカウンターアニオンとして水素はアニオン(H^-)となることがあります。これまでの研究では、この H^- を使って、2008 年に発見された鉄系超伝導体 LnFeAsO (Ln: 希土類)に、高濃度の電子ドーピングを行い、その電子相図を明らかにしてきました(図 1、2)。従来、この物質系では酸素 O^{2-} の一部をフッ素 F^- で置き換えることによって、電子をドーピングし($O^{2-} \rightarrow F^- + e^-$)、超伝導を発現させていました。しかし、フッ素置換できる酸素サイトは全体のせいぜい 20% であり、超伝導転移温度の最適化や、超伝導発現機構を解明するうえで重要な、電子相図の全体像は明らかになっていませんでした。これに対し、H^- は酸素サイトの 50% 以上を置換することができ、LaFeAsO では、電子濃度に対する超伝導領域が 2 つのドームからなるという、従来の予想を覆す事実を明らかにしました。この水素置換の手法を同じ結晶構造をもつ LaMnAsO に応用すると、母相の反強磁性絶縁体状態を崩し、強磁性金属にすることができました。このように水素置換の方法は、酸化物や酸素を含む混合アニオン化合物の電子状態を劇的に変えることのできる手法として期待できます。このように通常とは異なる価数のアニオンの存在は水素だけではありません。もう一つのありふれた元素である酸素も、通常の O^{2-} のほかに O^-、O_2^{2-} などの状態をとります。また、金属元素の中にもアニオンになるものが多くあります。今後、それらの性質を生かした機能性物質が実現されるかも知れません。

研究テーマについて

透明伝導体や超伝導体をベースに、固体中の電子の機能を利用した新しい材料の創成を行います。現代的な材料研究では、化学的知見に基づいてうち立てた設計指針に対し、第一原理計算を用いて肉付けしていくことが重要です。例えば、先ほどの LnFeAsO 中の酸素サイトを占める水素が H^- となるかどうかは、計算で調べることができます。計算で求めた電子状態密度(図 1 右)は水素の 1s 軌道が酸素の 2p 軌道と同程度の深い準位を作り、1s 軌道は電子が約 2 個入った状態、つまりは H^- の状態になっていることを示しています。また、このとき電気中性を保つ形で Fe の 3d バンドに電子がドープされていることも確認できます。このように、ドーピングの効果など、設計の妥当性を調べた上で、実際の合成を行います。所望の組成に調整した原料を反応させることで、多結晶体および単結晶試料を合成しますが、通常の条件では狙った物質が合成できるとは限りません。そこで、原料を試料セル内に閉じ込めたうえで、合成に有利な高温・高圧状態にする高圧合成法を利用します。合成した試料に対して構造解析や電子物性の評価を行うと同時に、酸素や水素といった軽元素も含めた組成分析も行います。以上の様に、新物質・新機能探索のために、物質設計から実際の物質合成・物性測定までを行う研究室です。

研究体制

本研究室は平成 24 年 10 月に発足した元素戦略研究センターに新設された新しい研究室です。文部科学省 元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>(期間：2012 ～ 2021)のもと、材料物理科学専攻の細野・平松研究室と連携して研究を行なっています。また同プロジェクトは高エネルギー加速器研究機構(KEK)や物質および材料研究機構(NIMS)との連携で行われているので、中性子や放射光を利用した物性測定も積極的に行ないます。

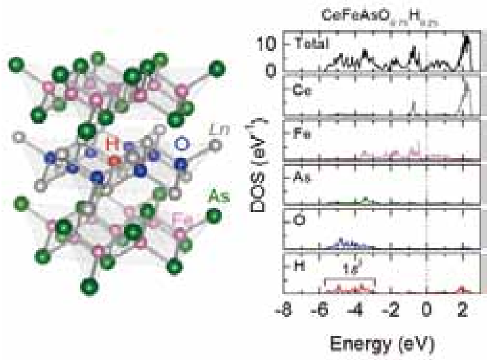


図 1　水素置換した LnFeAsO(Ln: 希土類)の結晶構造(左)と第一原理計算により求めた全・部分電子状態密度(右)

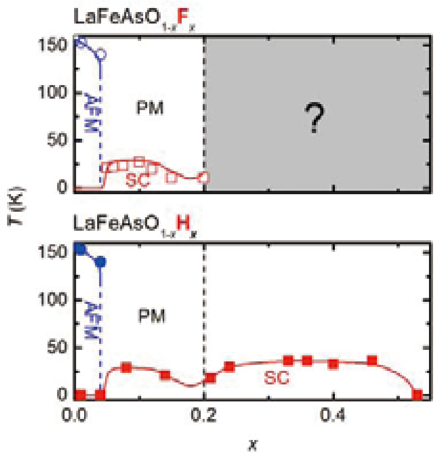


図 2　$LaFeAsO_{1-x}F_x$(上)と $LaFeAsO_{1-x}H_x$(下)の電子相図。
AFM: 反強磁性金属 PM: 常磁性金属 SC: 超伝導体

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

山本研究室

山本　直紀 准教授

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

電子プローブにより金属・半導体ナノ構造の新物性を探索する

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はじめて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、フォトニック結晶中の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。

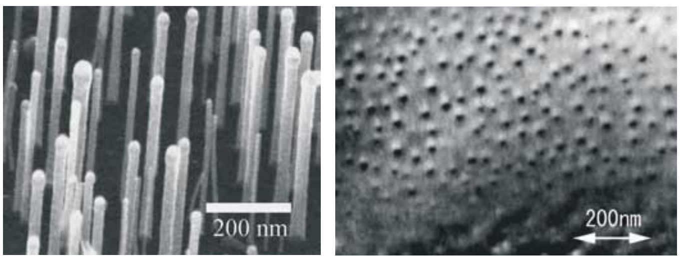


図1　(a) InP ナノワイヤのSEM 像と (b) InAs 量子ドットのTEM 像

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、0.1μm 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。

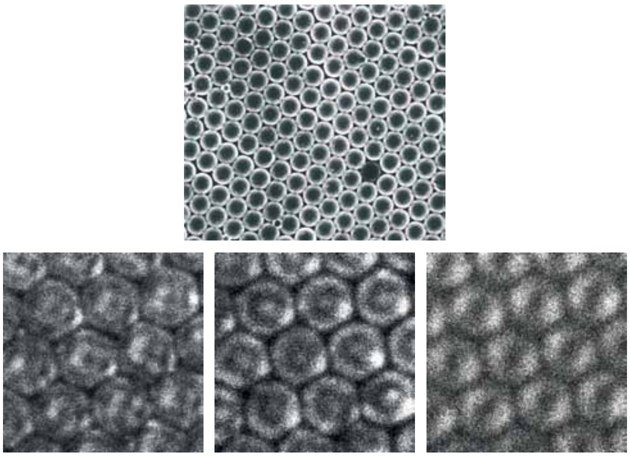


図2　銀微粒子配列（粒径500nm）とピーク波長のフォトンマップ

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て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できる。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）7×7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。

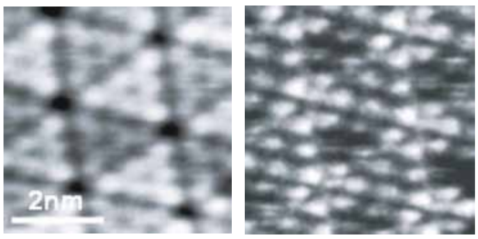


図3　Si（111）7×7表面のSTM 像とフォトンマップ（Vs=−3V,It=1.5nA）

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

内海研究室

内海　研一　教授

物性物理を通して、科学の意味・人間社会との関わりを学ぶ

材料物理を学ぶ若き学生の皆さんに学んで欲しい事を以下に述べます。

いわゆる産業革命以来、科学が技術と結びつき工業製品という形で人間社会と深くかかわりを持ち始めました。人類はその科学技術を駆使することで様々な欲望を実現できる事に気が付き、その結果として必要以上に自信を深め傲慢になり、三十数億年と言われる命の流れの中に人間をどう位置づけるかという点で大いなる勘違いをしてしまっているかもしれません。

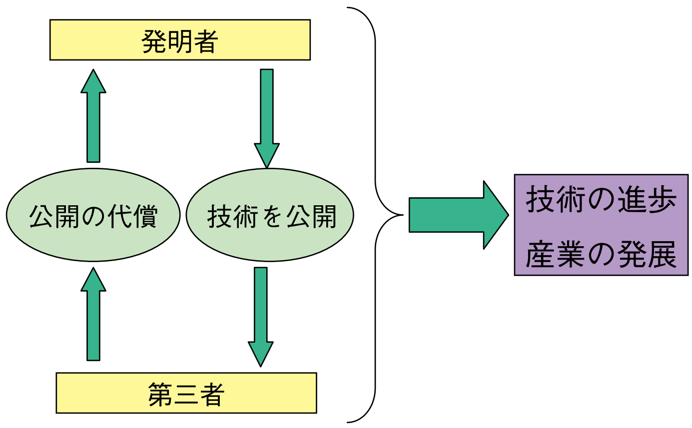
人間の個々の能力は、太古の昔から変わっているとは思えません。一方で科学技術は、その成果が記録として残され、後の世の人間が記録として残された成果の上に新たな成果を積み上げる、という過程を経ることで成長し続けています。このようにして人類は巨大な成果を手に入れ、恐ろしいことにこの巨大な成果を欲望のままに扱おうという人間もいます。今我々が手にしている科学技術は、現在生きている人間だけの所有物ではないのですから、我々の判断だけで使用する事は許されません。皆さんは良識を以って科学技術をコントロールして欲しいと思うのです。皆さんには、科学技術に対する人間としての謙虚な気持ちを忘れずに科学技術の正の成果／負の成果と限界を率直に認識してほしい、そういう真摯な態度を学んでいただきたいと思うのです。

科学技術がもたらしたネガティブな問題のひとつに、ここ何年か環境問題が様々な分野で言われています。この環境問題を無視して工業も技術も科学も存在し得ません。人類を含めた生命システム自体の存在が危ぶまれているのですから。環境を維持するために様々な仕組みが開発されていますがトータルで考えると実は大量のエネルギーを消費していた、というような笑えない話もまだまだあるようです。このような現状で期待されているのが新材料です。生命環境を維持する事に貢献する新しい材料の開発に、若い研究開発者の貢献を期待します。一筋でも良いから生命システムの将来に光明をもたらす材料の研究開発に携わっていただきたい。例えば電気エネルギーを使わずに便利な機能を実現する材料の開発を目指して欲しい。そのような研究開発において理論的な指針を持つために、物性理論、結晶理論、相変態理論など材料物理の基礎を学んでいただきたい。あわせて材料物理を学ぶ意義を掴んでいただきたいのです。

更に皆さんには、材料研究のしっぱなしではなく、それを具体的に生命社会に適用する技術の開発をも視野に入れることが期待されています。例えば、かつて半導体という材料がトランジスタという形態で機能素子として生まれ変わり、その後の成長はそのまま情報産業の成長となりました。

このように技術の開発まで視野に入れる場合、材料物理だけでなく工学的な知識、経済学の知識など幅広い知識が要求されますが、どうしても知っておかなくてはならないのが、知的財産権の保護、特に特許権についての知識です。特許制度、特許法の精神は、発明と呼ばれる創造活動の成果を保護して更に新たな技術の開発を促すというものです。科学技術は過去の人類および現在の人類さらには未来に生まれてくる人類の共有の財産ですから、特許制度を個人的な蓄財に利用する事は厳に慎むべきです。特許制度を活用して皆さんの創造活動の成果を正しく生命社会に活かす事を学んで欲しいのです。

皆さんが材料物理の研究開発を通して生命社会に貢献していく事を、後押しし祈る事が、私の役割と信じています。



【特許法の目指すところ】

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

神戸研究室

神戸　洋史 教授

金属材料と製造技術の革新で地球環境改善に貢献する

地球環境問題が脚光を浴びるようになってから二十数年が経ちます。この間、自動車においては年々厳しくなる燃費規制、排ガス規制などに対応しながら、より付加価値の高いクルマを求めやすい価格で提供することに邁進してきました。自動車の燃費を向上させるには、エンジンの燃焼効率を向上させることやエンジン、トランスミッションなどのいろいろな部位で生じるフリクションを低減させることと並んで、車両重量を軽減することが重要となります。また、従来の内燃機関ではなく、新しい動力を用いた電気自動車やモーターとエンジンを併用するハイブリッド電気自動車、更には、燃料電池車などの自動車が開発され、量産されてきつつあります。これらの自動車を開発していくために、材料が果たすべき役割は非常に大きなものがあり、新しい材料やそれを製造する工法を開発していく必要があります。

車両の軽量化を実現させるためには、従来から使用している材料の高強度化だけではなく、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽合金材料を使いこなしていくことが必要となります。材料をうまく使うためには、それぞれの材料の持つ特徴をうまく活かして適用することが重要であり、アルミニウム合金やマグネシウム合金では形状設計の自由度の高い鋳造法を用いることにより、低コストで軽量化が可能となります。

従来から、エンジンやトランスミッションの部品の多くはアルミニウム合金が適用され、低圧鋳造法やダイカスト法といった鋳造法で製造されてきました。ところが、従来の鋳造法では、得られる形状や材料特性に限界があり、強度や靭性が要求される車体部品やサスペンション部品に適用することが困難でした。この課題を解決するために、新しい工法である「高真空ダイカスト」の開発を行い、更にその工法に最適な材料を開発して適用することで、車体部品やサスペンション部品に適用することが可能となりました。

製品に要求される特性を満足させるためには材料のみならず工法の開発も重要であり、この両方のバランスがとれて初めて部品としての機能が発揮されます。図１に車体部品やサスペンション部品用に開発したAl-10%Si-0.3%Mg合金の伸びに及ぼす鋳造圧力の影響を示します。鋳造圧力はダイカストの製造条件の１つであり、ある条件の範囲に入らないと必要な特性が得られないことが良くわかります。

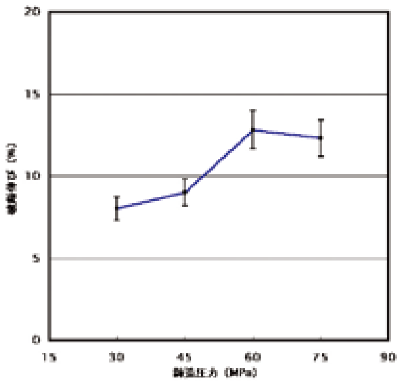


図1　Al-10%Si-0.3%Mg合金の伸びに及ぼす鋳造圧力の影響

このように新しい工法と材料とを開発し、スカイラインのサスペンションメンバー（図２）、GT-Rのストラットハウジング（図３）などに適用してきました。これらの技術開発により、車両の軽量化に寄与することができ、さらに、燃費向上や走行性能向上が図れました。また、GT-Rには図４に示すように、ストラットハウジング以外にもドアインナーとシートバックサポートにもアルミニウム合金ダイカストを適用しています。

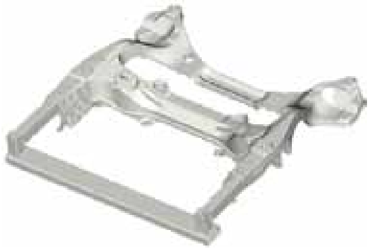


図2　サスペンションメンバー

図3　ストラットハウジング

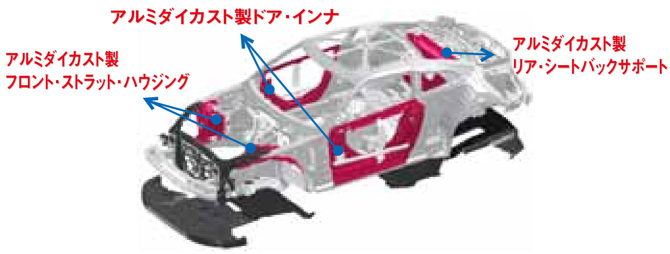


図4　GT-Rの車体に適用したアルミニウム合金ダイカスト

現在、自動車は岐路に立っています。ハイブリッド車に加えて、電気自動車が量産され始めました。従来のガソリンエンジンも更に進化しようとしています。このような新しいシステムに対応した材料と工法の開発がまた必要になってきています。

一方、材料のリサイクルも重要な課題です。アルミニウム合金は電解製錬によって作られるために多くの電力を必要とします。ボーキサイトから新しくアルミニウムを作るためには多くの電力を必要としますが、一度アルミニウムとして使われたものを再溶解してアルミニウムとして用いるとその電力は1/10以下にすることができます。従って、地球環境を考えるとアルミニウム合金のリサイクルが重要です。

現在、アルミニウム合金はリサイクルされて用いられていますが、不純物元素が含まれるために、その品位を落とした使い方をしています。不純物元素をある程度許容して品位を落とさずに使うためには、工法の開発が必要であり、例えば不純物を含む溶湯を急冷することにより、機械的特性に有害な金属間化合物を微細化して無害化するといった技術開発が考えられます。

金属材料や鋳造は紀元前4000年頃から用いられている古い技術です。しかし、まだまだ進化する可能性を秘めており、地球環境改善に貢献できる技術だと思います。新しい発想で、更なる進化を目指していきたいと考えています。

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

吉永研究室

吉永　直樹　教授

鉄のすばらしい性質を極限まで引き出す－理想の組織を求めて－

鉄鋼材料は、古くから人間の生活と共に在る、縁の下の力持ち的な基盤材料なので、鉄鋼材料がどのように進化しているかを実感できる機会はあまり多くないように思われます。「鉄の研究やっています！」と言われたら、「鉄は鉄でしょう？」と返したくなるかも知れません。しかし、自動車一つをとってみても、そこに使われている鉄鋼材料は、ここ数年で著しい変貌を遂げています。

自動車分野におけるもっとも大きな課題として、燃費と衝突安全特性の向上が挙げられます。燃費を支配する因子としては、エンジン性能、タイヤと道路との摩擦などがありますが、車体重量の影響が約４割であると言われており、車体軽量化の意義は非常に大きいと言えます。一方、衝突安全性は、軽量化と共に低下するので、これを向上させる方策が必要となります。車体用材料の多くを占める鉄鋼材料においては、加工しやすい高強度鋼板（以下、ハイテンという）を研究開発し、自動車に適用することが重要となります。数年前までは、車体の骨格用部材には、590MPa（最大引張強度）がわずかに使われる程度であったのに対して、最近では、980MPa以上の強度を有するハイテンが適用されつつあります。一般にハイテン化すると加工性が低下します。車体のどの場所に用いるのかを考慮しつつ、ハイテンの加工性能を適切に高めることが大切です。

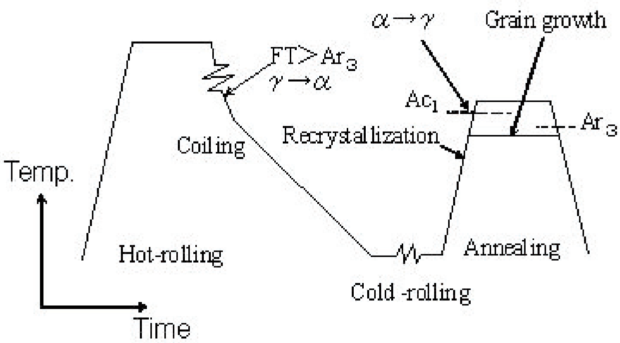


図1　自動車用冷延鋼板の製造工程（模式図）

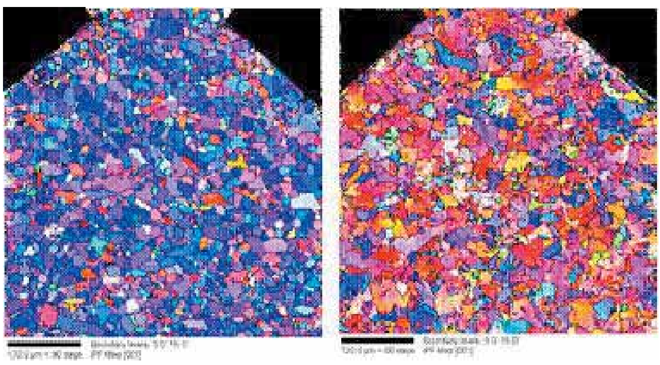


図3　極低炭素鋼の結晶方位変化　左：800℃　右：900℃
青は板面方位//＜111＞を、赤は＜001＞を表す
（黒い部分はビッカース圧痕）

では目的とする強度と加工性を得るための「理想の組織」とは何でしょうか？多くの研究者がさまざまな取り組みを行い、多種多様な鉄鋼材料を開発してきましたが、「理想」というゴールには道半ばなのではないでしょうか？強度一つにしても、未だ理想強度の1/10あたりをうろうろしているに過ぎません。極論ですが、Feをはじめとする数種類の原子の一つ一つを自由に積み重ねて好きなように鉄鋼材料を作ってみろ、と言われても、途方に暮れてしまいます。

鉄の魅力は何と言っても化学成分と加工熱処理との組み合わせによって、魔法のように変化する組織（結晶方位を含む）にあります。自動車に用いる冷間圧延鋼板の製造プロセスを図１に示します。合金設計と併せて、熱間圧延での加工・再結晶、冷却時の変態・析出、冷間圧延加工、さらに焼鈍プロセスでの再結晶、逆変態、変態などを駆使すれば可能性は無限です。一例として、鉄鋼材料の変態組織である、フェライトとベイナイトとの混合組織、マルテンサイト単一組織を示します(図２)。また、図３は、同一の化学成分を有する鋼の結晶方位変化を示しています。熱処理条件を変えただけで、全く違う結晶方位が得られた例です。このような組織変化は、機械的性質を初めとする材料の特性を支配するものです。

先人が築いた叡智の上にさらに基盤的な知見を積み上げ、科学的に解釈し、ときには大胆な発想を組み合わせて、理想の組織に向かって一歩ずつ進んで行きたいと考えています。

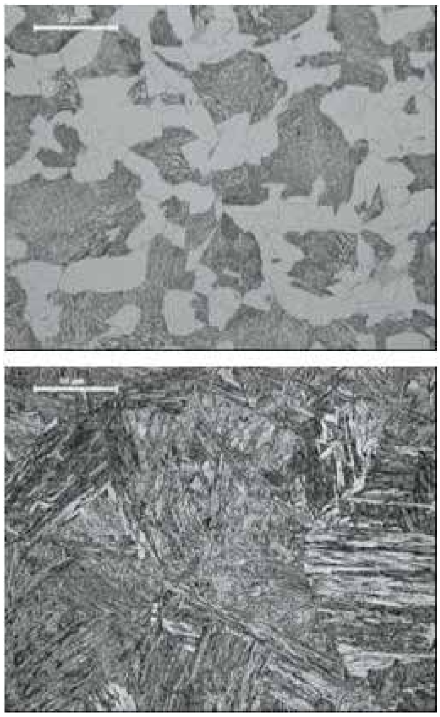


図2　鋼の変態組織の例
上：フェライト（白い部分）＋ベイナイト
下：マルテンサイト

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

日比野研究室

日比野 浩樹 教授

半導体表面にナノ構造を自在につくり、新たな機能を生み出す

はじめに

シリコンMOSトランジスタの微細化が限界に近づきつつある中、それに代わる論理素子やエレクトロニクス材料の探索が活発になっています。当研究室では、ポストシリコン材料・デバイスの創製に寄与することを目指し、ボトムアップ型の自己形成法を用いてナノ構造を精密に制御して作製する技術の開拓と、新しいエレクトロニクス材料の探索に取り組んでいます。

ナノ構造自己形成の精密制御を目指して

自己形成は、物理的、化学的作用によって、構造物が自発的に形成されることを言います。潜在的には、原子レベルでの微細化とウェハスケールでの大規模化を同時に達成できる技術です。自己形成法により、微細加工では達成不可能な構造・サイズ・品質の低次元構造（半導体量子ドット、カーボンナノチューブ、半導体ナノワイヤ等）を作製できます。しかしながら、自己形成法は、トップダウン型の微細加工法に比べ、サイズや位置の制御性に乏しいのが現状です。

そこで、当研究室では、ナノ構造の自己形成メカニズムを、形成過程のその場観察を通して解明し、サイズや位置の精密制御に繋げることを目指しています。この研究において、表面構造の動的変化の観察に適した低エネルギー電子顕微鏡(LEEM)は、大いにその威力を発揮します。

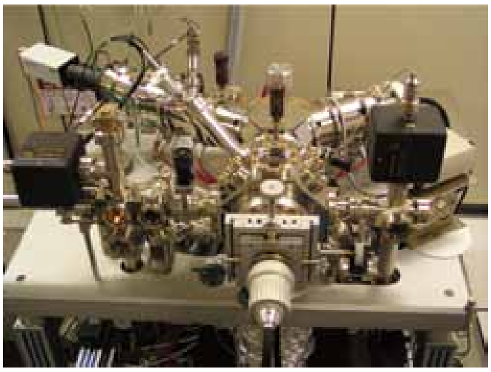


図1　表面ナノ構造の自己形成過程をリアルタイム観察するためのLEEM装置

これまで既に、表面の原子レベルの段差であるステップを制御した半導体基板をテンプレートとして、ナノ粒子をステップに自己組織的に配列することに成功しています。さらに、これらの自己配列ナノ粒子を触媒としてナノワイヤやカーボンナノチューブを成長することにより、三次元的なナノ構造をボトムアップに集積することを試みています。

単結晶グラフェン基板の創製を目指して

新材料探索においては、単一層のグラファイトであるグラフェンに注目しています。2004年に初めて、バルクグラファイトからの機械的な剥離により創出された新しい材料です。以来、優れた電気

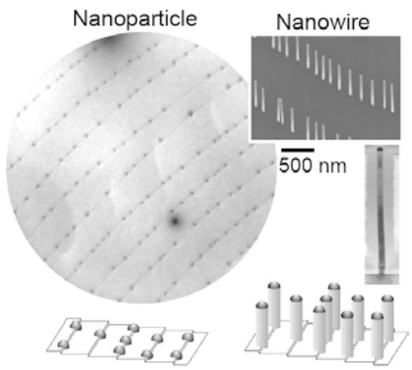


図2　シリコン表面の原子ステップに配列した金ナノ粒子（LEEM像と模式図）と自己配列金ナノ粒子を触媒として成長した直立ガリウムリン・ナノワイヤ（電子顕微鏡像と模式図）。

伝導特性と平面型微細加工技術との整合性から、有力なポストシリコン材料とみなされています。ところが、デバイス応用に不可欠な大面積グラフェン基板の製造技術は未確立です。

シリコンカーバイドの熱分解によるグラフェンのエピタキシャル成長は、手法がシンプルでかつ容易にスケールアップできるため、グラフェンの大面積製造法として有望です。当研究室では、シリコンカーバイドの熱分解法により単結晶グラフェン基板を創製することを目指して、成長機構の理解に基づくグラフェンの層数制御とエピタキシャルグラフェンの物性解明に取り組んでいます。既に、LEEMにより、電子の反射率がエネルギーとともに周期的に変化する仕方から、グラフェン層数をミクロスコピックに決定できることを明らかにしています。

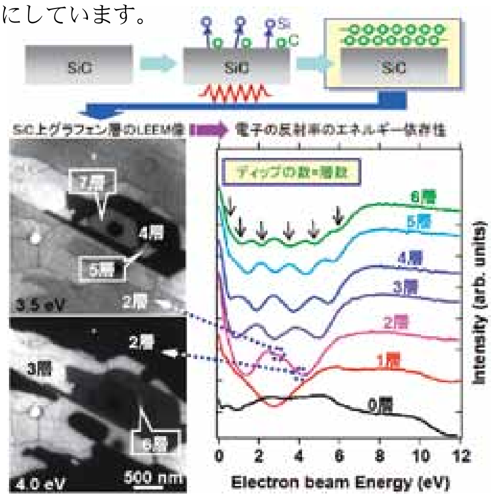


図3　シリコンカーバイド基板上にグラフェンを成長する方法の模式図と、LEEMを用いたグラフェン層数同定法。

おわりに

当研究室のテーマでは、材料から理論、デバイス特性評価といった、異なる技術の連携が不可欠です。そこで、様々な研究者との共同研究を積極的に推進しています。連携の相乗効果が、材料研究にブレークスルーをもたらすことを期待しています。

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

蟹澤研究室

蟹澤　聖 教授

量子材料で新分野を開拓する

今日の携帯電話や小型音楽プレーヤに至る電子機器の進歩の歴史は、材料技術の進歩の歴史と言っても過言ではありません。信号処理装置の心臓部を構成する演算回路は、高純度シリコン結晶の実用化が不可欠でしたし、信号の検出・伝達に欠かせない超高速トランジスタ・半導体レーザには、化合物半導体の実用化が必要でした。集積回路技術やデジタル技術など方式に関わる発明の具現化も、新しい材料の開発・応用と材料加工技術の発展による電子部品の高性能化が支えてきました。

従来の材料技術は，物質固有の性質を巧みに利用することを基礎に発展してきました。微細加工技術が進歩し、ナノメートル(nm)スケールの構造体を作製できる今日では、各物質が固有に持つ性質に加え、大きさが小さいことで顕在化する量子効果による現象も無視できなくなっています。

近年の情報産業では、この量子効果が注目されています。情報の処理や伝送に対する大容量化や高速化などの基本性能向上に加え，携帯性や秘匿性など利便性や安全性に関わる要素技術も、これからの情報社会には欠かせません。これらの高度で多様な社会的要請に対応するためには、技術の進歩にはまだいくつものパラダイムシフトが必要であると考えられます。量子効果は、情報産業に技術革新をもたらすブレークスルーの一つとして期待されているのです。量子効果応用には，電子等の情報担体の数を制御する方法から、担体の取り得る状態を制御する方法への転換が必要です。

当研究室では、分子線エピタキシャル成長(Molecular Beam Epitaxy : MBE)装置と低温走査トンネル顕微鏡(Low-Temperature Scanning Tunneling Microscope : LT-STM)を接続したユニークな実験装置を用い、化合物半導体の清浄表面において量子現象の研究を行っています。MBE法は、原子層の精度で結晶を制御して積層できる、すぐれた結晶成長法です。また、LT-STMは、低温化で熱の影響を抑えて量子効果を際立たせ、電子状態の実空間分布を原子分解能で観測できます。このLT-STMが、清浄表面を保つのに適した超高真空容器の中に封入されており、MBE法で作製された試料表面を汚染無く評価できます。

測定方法を工夫すると，LT-STMを使って表面下の結晶中の電子状態を検出できます。半導体量子構造に適用すれば、量子構造中の低次元電子が、nmスケールの空間で見せる多様な振る舞いを調べることができます。これまでに、ナノ結晶や量子井戸など、様々な量子構造を作製し，構造内部の電子状態を直接的に観測することに成功しています。また、表面は固体内部への窓であると同時に、結晶の周期性がとぎれて新たな性質が現れる場所でもあり、表面特有の興味深い現象を捉えることもできます。量子効果応用の必要性が指摘される現在では、素子の動作制御に不可欠であった物質の表面・界面に関する知見の重要性が、これまで以上に増しています。特に，半導体量子現象のナノ領域の知見を獲得する研究を通じた新分野の開拓が、産業を支える技術の飛躍的な進歩に欠かせないと考えています。

図1　電子状態を原子分解能で観測するための超高真空低温走査トンネル顕微鏡

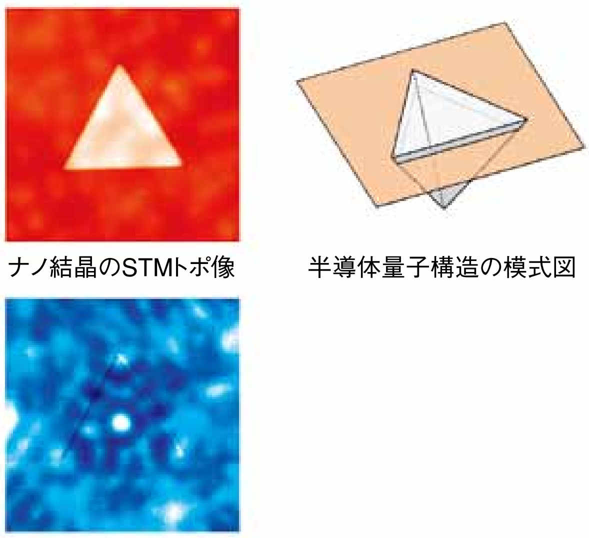


図2　半導体ナノ結晶による量子構造（一辺の長さ48.7 nm）と
観測されたゼロ次元電子状態（5.3 K, +0.08 V）

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

五十嵐研究室

五十嵐 信行 准教授

半導体デバイス研究開発の最前線

1．はじめに

エレクトロニクスは、地球規模の社会・経済システムを支える基盤技術として、また、私たちの快適な暮らしを支える身近な技術として、欠くことのできない技術です。しかも、エレクトロニクスに対するニーズは、ますます高度化・多様化しており、そのハードウエアの基礎である半導体デバイスの研究・開発は、ますます加速しています。

一方で、半導体デバイス開発は大きな転換期にあります。従来の半導体デバイス開発、特に Si デバイスの開発では、デバイスの微細化によって、高機能化を実現してきました。しかし、今日では、微細化による高機能化が不可能なほどデバイスが小さくなったため、微細化によらない、新たな高機能化技術の研究・開発が競って行われています(ポストスケーリング技術と呼ばれています)。また、近年では、先端デバイスの加工寸法は、ナノメートルの領域に入り、半導体デバイスの研究開発には、ナノスケールでの物理・化学現象の理解と制御とが必要となっています。

研究について

私たちは、最先端半導体デバイスの開発における様々な課題を解決する事を目的として、ナノ・原子スケールの空間分解能での物性解析を行うとともに、計測や解析のための技術の研究開発を行っています。実験手法としては、電子線やx線を使い、局所領域の原子配列の解析や電子構造の解析などを行っています。また、第一原理計算を使って、理論・計算の観点からの物性予測や実験結果解析も行っています。

以下に、私たちの研究開発の例を紹介します。これらの計測・解析技術は、先端デバイス開発を支える技術として活用されています。

●ナノスケール構造物性研究

ポストスケーリング技術の代表的な例が、金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）のゲート絶縁膜への、高誘電率（high-k）材料の応用です。この絶縁膜材料として、従来は、SiO_2が用いられてきましたが、SiO_2の薄膜化による性能向上がほぼ限界に達したため、新たな絶縁膜材料(HfO_2などのhigh-k材料)を用いたデバイス特性の向上が図られています。

この研究において、私たちは、極薄膜中での金属原子(Hf)の組成分布の定量計測を初めて実現し、この計測結果の解析から、基本的な物理常数であるHf原子のSiO_2中での拡散定数の決定を行いました。

図１に、HfO_2（1/5分子層）/SiO_2積層構造を有する絶縁膜を、断面方向から観察した例を示します。電子顕微鏡法の１つであるHAADF-STEM法による観察像です。High-kゲート絶縁膜では、特性向上のため、high-k膜とSi基板との間にSiO_2薄膜が挿入されます。一方で、HfO_2/SiO_2積層膜においては、HfがSiO_2中に拡散するため、拡散の程度によって絶縁膜の特性が変化します。従って、設計通りのデバイス特性を実現するためには、この拡散の制御が必要です。私たちは、SiO_2中でのHf原子分布の定量計測技術を確立し、熱処理による分布の変化を明らかにすることによって、Hf分布制御を可能としました。

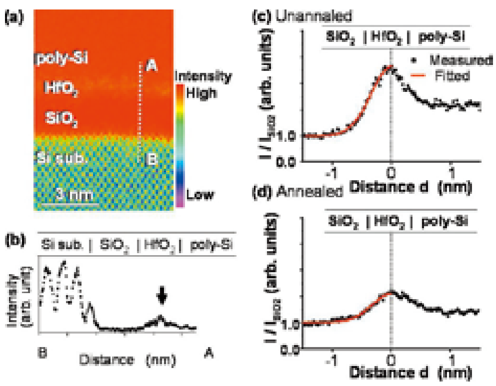


図1　(a) HfO_2/SiO_2積層膜の断面観察例。(b) 観察像の点線ABに沿った強度分布。この強度分布からHfの濃度分布を計算可能である。アニールによるHf濃度分布変化。(c) アニール前、(d) 後。

●結晶の内部ポテンシャル分布の解析

MOSFETにおける電気信号の制御は、Si基板中に作り込まれたpn接合のポテンシャルを制御することによって行われます。従って、このポテンシャル分布がトランジスタの特性を決定します。ところが、従来、このポテンシャル分布を物理的に計測する手段が無く、間接的な測定から、その分布が推定されてきました。

しかし、最先端デバイスでは、ポテンシャル分布の高精度制御が必要であり、その直接的な観察手法が必要とされています。私たちは、電子線ホログラフィー技術を応用し、最先端デバイスでの内部ポテンシャル分布の計測と可視化を初めて実現しました。

図２は、MOSFETの Si 基板中のポテンシャル分布の観察例です。この観察では、デバイスを薄片化し、電子線を照射して、透過した電子の位相分布の計測から、ポテンシャル分布を決定します。観察像とシミュレーション結果とは良く一致しており、共に、試料内部のポテンシャル分布を精確に反映していると考えられます。これらのポテンシャル分布の実測から得られた知見をシミュレーション技術開発やデバイスの設計・プロセス開発に反映させることによって、開発加速が実現しています。

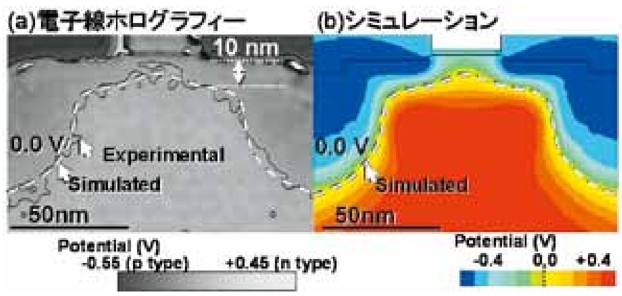


図2　最先端 MOSFET のSi基板中の内部ポテンシャル分布。(a) 実測、(b) シミュレーション。(a) の実線と点線は、それぞれ実測とシミュレーションから得られた0.0Vの等電位線。実測とシミュレーション結果の比較のための目印として、シミュレーションによる等電位線を実測像に重ねて表示した。

平成25年度 修士課程修了生論文題目

論 文 題 目	指導教員
◉ Ag/Si(111)界面構造がAg超薄膜表面に与える影響	平 山・中 辻
◉ 衝撃残留温度の抑制とそれを用いた石英ガラスの高密度化	阿 藤・林
◉ コア/マトリックスモデルを用いた不均質体に対するナノインデンテーション遷移挙動の数値解析	赤 津・若 井
◉ 静電交互吸着法で作製したカーボンナノファイバー強化ジルコニア複合材料の亀裂進展挙動	赤 津・若 井
◉ 製鉄用耐火物MgO-Cレンガのき裂進展特性に及ぼす添加物の影響	赤 津・若 井
◉ 微細結晶粒炭化ケイ素/炭化チタン複合セラミックスの高温変形挙動	若 井・赤 津
◉ ハフニア/炭化ケイ素ナノ複合セラミックスの力学特性および耐酸化性	若 井・赤 津
◉ Control of Pore Structure in Porous Nickel Films Fabricated by Electroplating with Supercritical CO_2 Emulsion	曽 根・里
◉ 循環撹拌型反応システムを用いた超臨界CO_2サスペンション中の電気めっき法による銅埋込配線の研究	曽 根・里
◉ 半溶融鋳造したAl-7%Si-0.6%Mg合金段付き鋳物のミクロ組織と機械的性質	里・曽 根
◉ ナノ多結晶スティショバイトのマイクロサイズ試験片による破壊靱性評価	若 井・赤 津
◉ 電子ドープ型鉄系超伝導体$LnFeAsO_{1-x}H_x$(Ln=La,Sm)における低温構造解析と共置換による物性探査	細 野・平 松
◉ Microstructure and mechanical property of Cu film obtained by electroplating with supercritical CO_2 emulsion （超臨界CO_2エマルションを用いためっき法により得られる銅皮膜の微細構造および機械的特性）	曽 根・里
◉ ニオブ酸ナノシートの水分解活性に対する助触媒ドープ効果	岡 田・松 下
◉ 界面活性剤被覆水熱成長法ナノサイズフェライトの合成とインクジェットパターニング	岡 田・松 下
◉ ソルボサーマル法によるチタニアナノチューブの合成と光触媒活性評価	岡 田・松 下
◉ 層状化合物KFe_2As_2のエピタキシャル薄膜作製とその電気的特性評価	平 松・細 野
◉ 無電解金メッキ法により作製した金ナノギャップ電極の集積化及び単電子・単分子デバイス動作	真 島・伊 藤
◉ ナノデバイスの応用に向けた単一分子とナノ粒子の電気特性評価	真 島・伊 藤
◉ 強磁性体/強誘電体ヘテロ構造の磁気抵抗とスピン偏極の電界制御	谷 山・伊 藤
◉ 垂直磁気異方性を有する強磁性薄膜/強誘電体ヘテロ接合における磁気異方性制御	谷 山・伊 藤
◉ 導電性六方晶$BaTiO_3$の合成と熱電特性評価	伊 藤・谷 山
◉ Cathodoluminescence of surface plasmon polariton induced emission from plasmonic cavities (プラズモニックキャビティの表面プラズモンポラリトン誘起放射によるカソードルミネッセンス)	山 本
◉ MgO表面の方位に依存した分子吸着特性	須 崎・細 野
◉ 非平衡薄膜成長を利用したMgO被覆系の仕事関数変調	須 崎・細 野
◉ 酸化窒素供給による高温ジルコニア表面からの原子状酸素放出の促進	林・阿 藤
◉ NASICON固体電解質及びガス拡散電極を用いたNa-空気電池	林・阿 藤
◉ ナノポーラス結晶$12SrO \cdot 7Al_2O_3$(S12A7)エレクトライド粉末と高密度複合体の作製	林・阿 藤
◉ Half-Heusler型熱電化合物TiNiSnの相安定と相平衡に及ぼすCo添加の影響	木 村・熊 井
◉ Half-Heusler 型(Ti, Zr)NiSn の相平衡に基づく熱電材料設計	木 村・熊 井
◉ $E2_1$型 $(Co, M)_3AlC_{1-x}$ (M: Mn, Fe, Ni) における逆位相境界と機械的性質の関係	木 村・熊 井
◉ 高速固相接合したSS400スタッドとSPCCのミクロ組織と機械的特性	熊 井・木 村
◉ タンデム式縦型高速双ロールキャスト法と熱間圧延接合法で作製した 4045/3003/4045アルミニウム合金クラッド材のミクロ組織と引張特性	熊 井・木 村
◉ 異種金属衝撃圧接におけるメタルジェット放出と波状界面形成機構の数値解析ならびに実験的検証	熊 井・木 村
◉ Sn-Cu-Ni系の固相反応拡散における組織形成挙動	梶 原・加 藤
◉ 等温接合過程における固相Fe族金属と液相低融点金属の反応挙動	梶 原・木 村
◉ Siを微量添加した超微細粒Cuの塑性変形に及ぼす温度とひずみ速度の影響	加 藤・尾 中
◉ 超微細粒Cuの焼鈍に伴なう組織変化 : 応力と昇温速度の影響	加 藤・尾 中
◉ ナノ結晶および超微細粒Niのクリープ挙動	加 藤・尾 中
◉ 繰り返し重ね接合圧延を施されたFCC純金属の蓄積エネルギー変化の評価	尾 中・加 藤
◉ 銅双結晶における圧延時の組織変化の高分解能結晶方位解析による評価	尾 中・加 藤

平成24年度 修士課程修了生論文題目

論文題目	指導教員
銅とアルミニウムを圧延接合した材料における接合界面強度	尾中・加藤
Equal channel angular pressingにおける不均一変形の定量および微細組織の評価	尾中・加藤
繰り返し重ね接合圧延にともなうAl合金/ Cu積層材の結晶粒微細化と電気抵抗率の変化	尾中・加藤
純銅の繰り返し変形に伴う物性変化と走査型電子顕微鏡法による転位組織観察	加藤・尾中
巨大ひずみ加工した超微細粒銅の組織観察および温度とひずみ速度が塑性変形に与える影響	加藤・尾中
Ni/X系の反応拡散における速度論的挙動	梶原・木村
Ni基合金およびPd基合金とSnの反応拡散における組織形成挙動	梶原・木村
AlとCu基合金の固相反応による化合物の生成挙動	梶原・加藤
$E2_1$-Co_3AlC_{1-x} 耐熱合金の組織と機械的特性に及ぼすTiCの影響	木村・熊井
Half-Heusler型ZrNiSnのn型およびp型元素同時添加による熱電特性制御	木村・熊井
α-(Co)析出を制御した$E2_1$型Co_3AlCの耐熱合金設計	木村・熊井
酸化鉄の酸化還元反応焼結を用いた複合組織β-$FeSi_2$熱電材料の創製	木村・熊井
Half-Heusler型ZrNiSn熱電材料の固液反応焼結を利用した作製プロセスに及ぼす(Co, Ir)添加の影響	木村・熊井
Influence of probe shape on microstructure and mechanical properties in friction stir spot welded 6022 aluminum alloy sheets	熊井・木村
急冷凝固したAl-11%Si-2.5%Cu合金の曲げ特性に及ぼす共晶Si粒子形態の影響	熊井・木村
異種金属衝撃圧接材の界面形態に及ぼす衝突条件の影響と波状界面形成機構	熊井・木村
縦型高速双ロールキャスト法によるアルミニウム合金リサイクル材の機械的性質の改善	熊井・木村
Ag(111)超薄膜表面・界面の構造と電子状態に対するBiおよびB原子の影響	平山・谷山
面内方向に格子拡張したパラジウム薄膜に特有な水素吸蔵	平山・谷山
SPSによる結晶配向β”-アルミナ固体電解質の作製	林・阿藤
NASICON固体電解質を用いたアルカリ金属－水－空気電池	林・阿藤
β”アルミナ固体電解質を用いたナトリウム-空気電池	林・阿藤
固相還元溶解除去法によるマイエナイト系粉末へのアニオン（H^-, e^-）ドーピング	林・阿藤
HOPG及び酸化物基板を用いた異種材料界面形成	須崎・細野
Fe_2O_3-Al_2O_3系固溶体薄膜の作製と評価	伊藤・谷山
Fe/$BaTiO_3$薄膜ヘテロ構造の磁気特性と電場効果	谷山・伊藤
中性子と放射光X線によるM型フェライト結晶の磁気構造解析	佐々木・川路
自己触媒型無電解金メッキ法を用いたナノギャップ電極のギャップ長精密制御	真島・伊藤
鉄系超伝導体$BaFe_2As_2$薄膜への不純物添加と磁束ピニング特性との関係	細野・神谷
C12A7エレクトライドガラスの電気物性と局所構造	細野・神谷
ZrCuSiAs型鉄系超伝導体 LnFeAsO (Ln = 希土類) における共置換の効果: 電子ドープ濃度と局所構造の制御	細野・神谷
"Itinerant anti-ferromagnetism in LnCrAsO (Ln = La, Ce, Pr, Nd, Sm) with ZrCuSiAs-type structure（ZrCuSiAs型構造を有するLnCrAsOの遍歴反強磁性）"	細野・神谷
層状複水酸化物の作製とCO_2光還元特性評価	岡田・松下
オレイン酸被覆水熱成長法による機能性酸化物ナノ粒子の合成と両親媒性の発現	岡田・松下
ムライトの衝撃誘起相転移に伴うナノ破砕組織の生成機構	阿藤・林
C12A7:e^-の圧力誘起アモルファス化	阿藤・林
電気めっき法によるエピタキシャル成長を利用したNi単結晶の作製	曽根・里
マイクロサイズ試験片を用いたNi電気めっき膜中の柱状粒の機械的特性評価	曽根・里
マイクロサイズ角柱試験片を用いたNi及びCuの電気めっき膜の機械的特性の評価	曽根・里
3D-FIBトモグラフィーによるナノ多孔体の焼結応力の直接観察	若井・赤津
炭化ホウ素の高温変形に及ぼす粒径の影響	若井・赤津
製鉄用耐火物MgO-Cレンガのき裂進展挙動に及ぼすカーボン量の影響	赤津・若井
先端の鋭い圧子と試料表面との摩擦がナノインデンテーション挙動に及ぼす影響	赤津・若井
Cu_2O薄膜の構造・電気特性に及ぼす熱処理の効果	神谷・細野
アモルファス酸化物半導体a-In-Ga-Zn-Oの不純物水素・酸素とトランジスタ特性	神谷・細野
テレフタル酸亜鉛錯体[$Zn_4O(OOC_6H_4COO)_3$]に吸蔵された有機分子の相転移	川路・佐々木
三方晶系ペロブスカイト型$La_{0.9}Sr_{0.1}Ga_{0.9}Mg_{0.1}O_{2.9}$およびメリライト型 $La_{1+x}Sr_{1-x}Ga_3O_{7+x/2}$の結晶構造とイオン伝導	八島・加藤
層状ペロブスカイト型混合伝導体$PrBa_{1-x}Sr_xCo_2O_{6-\delta}$ ($0 \leqq x \leqq 1$)の結晶構造の組成xおよび温度依存性	八島・加藤
水酸アパタイトおよび炭酸水酸アパタイトの結晶構造とイオン伝導	八島・梶原
金属酸窒化物$ATaO_2N$ (A = Ba, Sr, Ca)の結晶構造と電子密度分布、およびセリアージルコニア$Ce_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ナノ粒子の結晶構造の温度依存性	八島・梶原
$Pr_{1.9}NiO_{4+\delta}$および$YBaCo_4O_{7+\delta}$ 系混合伝導体の結晶構造変化と酸化物イオンの拡散機構	八島・梶原

博士後期課程修了生　博士論文題目

論文題目	指導教員
平成25年度	
Anisotropic Thermal Expansion of K_2NiF_4-Type $CaRAlO_4$ (R: Rare Earths) and Electron Density of Perovskite-Type Oxides Studied by Synchrotron X-Ray and Neutron Powder Diffraction (放射光X線および中性子回折によるK_2NiF_4型$CaRAlO_4$(R: 希土類)の異方性熱膨張およびペロブスカイト型酸化物の電子密度の研究)	八　島
In-situ electron microscope study on a $LiMn_2O_4$ Li-ion battery cathode	山　本
Exploration of new iron pnictide superconductors utilizing high pressure synthesis (高圧合成による鉄ニクタイド系超伝導体の探索)	細　野
タンデム式縦型高速双ロールキャスト法によるアルミニウム合金クラッド材の省工程製造プロセスの開発	熊　井
Mechanical Property Evaluation of Electrodeposited Metals by Using Micro-Compression Test (微小圧縮試験を用いた電析金属の機械的特性評価)	曽　根
Self-terminated Nanogap Electrodes by Electroless Gold Plating (無電解金メッキによる自己停止ナノギャップ電極)	真　島
TFT Modeling of Amorphous IGZO and Quantum Effect in Its Superlattice (アモルファスIGZOのTFTモデリングとその超格子による量子効果)	細　野
平成24年度	
Quantitative Determination of Electron and Hydride Ion Incorporated in Mayenite and Thermionic Electron Emission Properties of Mayenite Electride-Metal Composites (マイエナイト中に包接された電子と水素化物イオンの定量とマイエナイト電子化物-金属複合体の熱電子放出特性)	林
$BaTiO_3$系単結晶および薄膜における構造と物性制御 (Control of structures and properties in $BaTiO_3$-type ferroelectric)	伊　藤
Hydrogen Substitution Effect in ZrCuSiAs-Type　Layered　Transition Metal　Pnictides (ZrCuSiAs型構造を有する遷移金属ニクタイド層状化合物における水素置換効果)	細　野
Low-Temperature Cyclic Deformation and Microstructure of Single-Crystalline,Coarse-Grained and Ultrafine-Grained Aluminum (単結晶, 粗大結晶および超微細結晶粒を持つアルミニウムの低温域における繰り返し変形と内部組織)	加　藤
急冷凝固による鋳造用アルミニウム合金の共晶改良と成形性向上	熊　井
Solidification behavior and internal cracking in high-speed twin-roll cast aluminum alloy strip	熊　井
Study on Chemically Assembled Single-Electron Transistor and Single-Molecular Memory	真　島
Electroplating Reaction with Supercritical Carbon Dioxide Emulsion (超臨界二酸化炭素エマルションを利用した電気めっき反応)	曽　根
平成23年度	
高耐熱・高熱伝導の銀粒子を用いた鉛フリー低温接合材料の開発とその機構解明	川　路
Heteroepitaxial Growth and Superconducting Properties of Iron Pnictide Thin Films (鉄ニクタイド薄膜のヘテロエピタキシャル成長と超伝導物性)	細　野
Study on exploration for superconducting transition metal compounds with low-dimensionality (低次元性を有する超伝導遷移金属化合物の探索に関する研究)	細　野
Photoresponse of Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films and Schottky Junctions (アモルファスIn-Ga-Zn-O薄膜とショットキー接合の光応答)	神　谷
Photovoltaic properties and electronic structure of amorphous oxide semiconductor, In-Ga-Zn-O, based solar cells (アモルファス酸化物半導体In-Ga-Zn-Oを用いた太陽電池とその電子構造)	神　谷
Electroless Ni-P Deposition Using Supercritical Carbon Dioxide Emulsion (超臨界二酸化炭素エマルジョンを用いたNi-Pの無電解析出)	曽　根
Analysis and Evaluation of Morphological Characteristics of Metal Particles with an FCC Structure (FCC構造を持つ金属微粒子の形態的特徴の解析と評価)	尾　中
摩擦攪拌スポット接合したアルミニウム合金板と各種めっき鋼板の異種金属接合界面組織と強度	熊　井
タービンインペラに用いられる精密鋳造Ni基超合金の異材溶接	熊　井

在学生の活躍状況

材料物理科学専攻の学生は世界的な研究成果をあげて活躍しています。以下に一部を紹介します。
詳しくは別冊の専攻パンフレットをご覧ください。

① 学生の受賞

2013年度
応用物理学会 , 第 35 回 講演奨励賞 ; 新学術領域「ナノ構造情報」平成 25 年度若手の会 , 増本賞(優秀ポスター賞)銅賞 ; The 7th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-7), Silver Poster Award; 日本金属学会 , 第 21 回 優秀ポスター賞 ; KFJ International Conference on Organic Materials For Electronics and Photonics(KJF-ICOMEP2013), Excellent Poster Presentation Award;

2012年度
日本化学会 第 2 回 CSJ 化学フェスタ 2012, 優秀発表ポスター賞 ; 日本セラミックス協会 2012 年年会 , 年会優秀ポスター発表賞 優秀賞 ; 第 28 回 日本セラミックス協会 関東支部 研究発表会 , 最優秀発表賞 ; KJF2012, Excellent Poster Presentation Award; International Workshop on Bulk Nanostructured Metals, Poster Session Award: Gold Medal; 日本金属学会 第 19 回優秀ポスター賞 ; 平成 23 年度衝撃波シンポジウム , 優秀ポスター賞 ; 日本鋳造工学会奨励賞 ; 軽金属希望の星賞 ; 他

② 学生による国際会議での発表

2013年度
The 7th International Conference on the Science and Technology of Advanced Ceramics (STAC-7), Yokohama, Japan (5 件); KFJ International Conference on Organic Materials For Electronics and Photonics (KJF-ICOMEP2013), Busan, Korea (4 件); 26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), Tokyo, Japan (3 件); The 8th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2013), Kyoto, Japan (3 件); 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-12), Tsukuba, Japan (2 件); International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013 (NS22013), Tokyo, Japan; 2013 TMS Annual Meeting, San Antonio, USA (2 件); 他 13 件

2012年度
6th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-6), Yokohama, Japan (7 件); MRS Fall meeting, Boston, USA (5 件); 38th International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2012), Toulouse, France (5 件); International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (ICYRAM2012), Biopolis, Singapore (3 件); KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF2012), Sendai, Japan (3 件); 他 26 件

入 試 情 報

正確な情報と詳細は５月に発行される募集要項と入試課HPをご覧ください。

入試課HP　**http://www.titech.ac.jp/graduate_school/admissions/index.html**

大学院修士課程入学試験の特徴

『材料科学』は本質的に学際的な新しい研究領域です。そのため本専攻の入学者選考は、以下のような特長があります。

1. 学部時代の専門によらず、あらゆる学部・学科の卒業生を歓迎しています。
2. 様々な分野の学生諸君が、それぞれの出身学部・学科に最も関連の深い専門科目で受験できるシステムを取り入れています。
3. 入学の門戸は全国の大学に広く解放されています。
4. 学部での成績優秀者は口述試験のみで合格することができます。

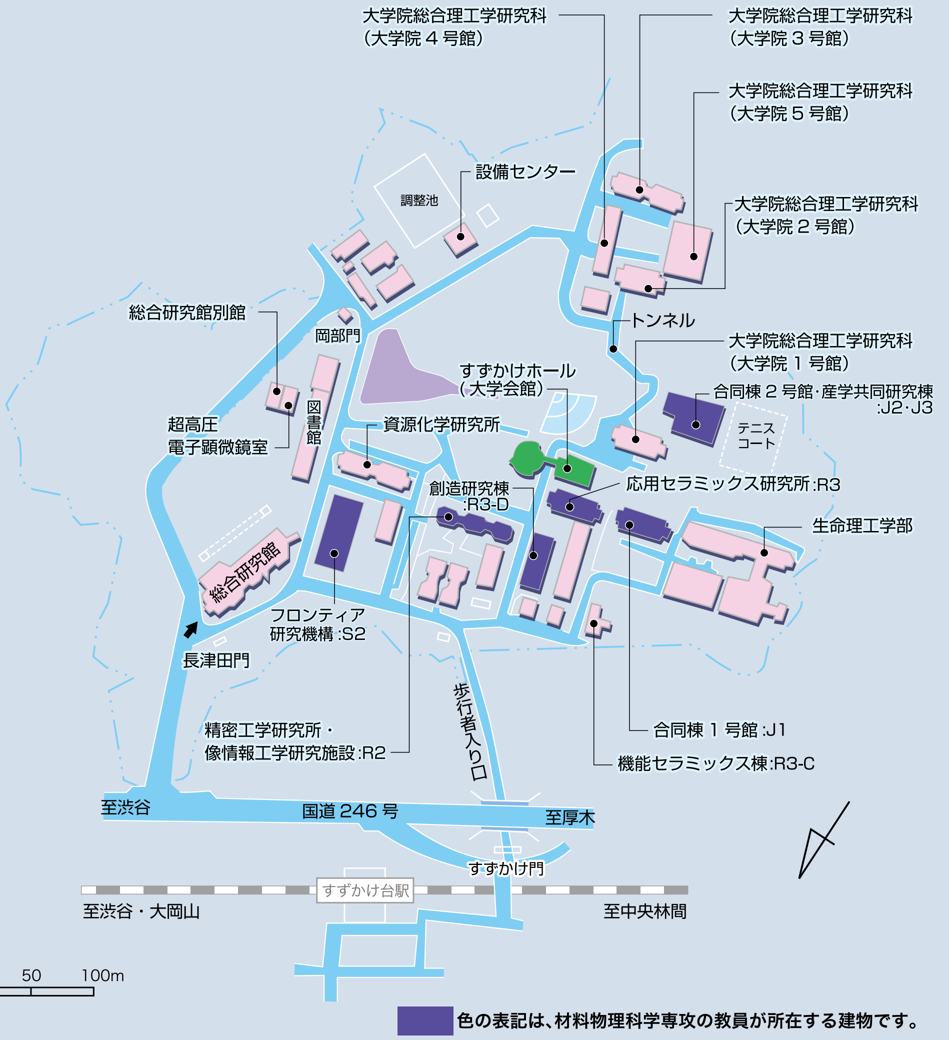
上記の方針の結果、例年、本専攻には物理、化学、金属工学、材料工学、無機材料工学、有機化学、応用物理、機械、電気・電子・情報など様々な学部・学科・高専・専攻科からの卒業生を大勢受け入れています。修士入学許可者の７割以上が他大学出身者によって占められています。

MEMO

すずかけ台キャンパスマップ

合同棟1号館	J1棟
合同棟2号館・産学共同研究棟	J2・J3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	R3棟
創造研究棟	R3-D 棟
フロンティア研究機構	S2棟
すずかけホール 食堂、生協、会議室など	

【交通】
東急田園都市線
すずかけ台駅から徒歩5分



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

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

入試情報

http://www.titech.ac.jp/graduate_school/admissions/index.html