

東京工業大学 工学院  
電気電子系

TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
2019

Department of Electrical and Electronic Engineering

電気電子工学は現代社会の基盤となる科学技術として、豊かで快適な生活を支えています。本学電気電子系は、水晶振動子の発明、光通信の実用化、電力理論の構築といった画期的な研究成果をあげ、例えばインターネットを自由に使える豊かな社会の実現に貢献してきました。

こうした輝かしい伝統を受け継いで、社会に貢献する研究を精力的に継続し、同時に社会の発展を担う人材を輩出することが私達の使命です。電気電子系の教育は、盤石な専門力を身につけるカリキュラムと、世界最先端の研究に没頭できる研究室活動とが両輪です。私たちは皆さんの創造性を引き出して、一流の技術者・科学者として世界で活躍できるよう応援していきます。



工学院 電気電子系  
系主任 安岡 康一

## CONTENTS

電気電子系教員リスト.....	1
電気電子系各コース紹介	
- 電気電子コース.....	3
- エネルギーコース.....	7
- ライフエンジニアリングコース.....	8
- 原子核工学コース.....	9
大学院生活.....	10
卒業後の進路.....	11
受験について.....	12
研究紹介	
- 修士・博士課程における研究活動.....	14
- 各研究室紹介.....	16
キャンパスマップ.....	112

# 電気電子系教員リスト

電気電子系には、大きく分けると「回路グループ」、「波動通信グループ」、「デバイスグループ」、「電子材料・物性グループ」、「電力・エネルギーグループ」の5つのグループがあります。各教員はいずれかのグループに所属しています。詳細はp. 14～15の修士・博士課程における研究活動、およびp. 16以降の研究室紹介をご覧ください。

(教員の所属および担当コースは2019年4月現在です。)

教員名	キャンパス	居室	内線	電子メール	主担当コース	副担当コース
<b>回路グループ</b>						
岡田 健一	大岡山	南3-812	2258	okada@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
伊藤 浩之	すずかけ台	S2-408	5010	ito@pi.titech.ac.jp	電気電子コース	-
<b>波動通信グループ</b>						
青柳 貴洋	大岡山	西9-824	2992	aoyagi.t.aa@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
小川 憲介	大岡山	南9-903	2574	kenogawa@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
表 英毅	大岡山			omote.h.ab@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
阪口 啓	大岡山	南3-912	3910	sakaguchi@mobile.ee.titech.ac.jp	電気電子コース	-
庄司 雄哉	大岡山	南9-904	2578	shoji.y.ad@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
TRAN GIA KHANH	大岡山			khanhtg@mobile.ee.titech.ac.jp	電気電子コース	-
西方 敦博	大岡山	西9-818	3231	nishikata.a.ab@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
西山 伸彦	大岡山	南9-701	3593	nishiyama@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
廣川 二郎	大岡山	南3-907	2567	jiro@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
藤井 輝也	大岡山			fujii.t.aq@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
植之原 裕行	すずかけ台	R2-820	5038	uenohara.h.aa@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
黒澤 実	すずかけ台	G2-614	5598	mkur@ip.titech.ac.jp	電気電子コース	-
小山 二三夫	すずかけ台	R2-603	5068	koyama@pi.titech.ac.jp	電気電子コース	-
田原 麻梨江	すずかけ台	R2-713	5051	tabaru.m.ab@m.titech.ac.jp	ライフエンジニアリングコース	電気電子コース
中村 健太郎	すずかけ台	R2-718	5090	knakamur@sonic.pi.titech.ac.jp	ライフエンジニアリングコース	電気電子コース
宮本 智之	すずかけ台	R2-817	5059	tmiyamot@pi.titech.ac.jp	電気電子コース	-



教員名	キャンパス	居室	内線	電子メール	主担当コース	副担当コース
<b>デバイスグループ</b>						
浅田 雅洋	大岡山	南9-703	2564	asada@ep.titech.ac.jp	電気電子コース	-
岩崎 孝之	大岡山	EEI-401	2169	iwasaki.t.aj@m.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
河野 行雄	大岡山	南9-805	3811	kawano@pe.titech.ac.jp	電気電子コース	-
小寺 哲夫	大岡山	南3-711	3421	kodera.t.ac@m.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
鈴木 左文	大岡山	南9-803	3039	suzuki.s.av@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
波多野 睦子	大岡山	EEI-410	3999	hatano.m.ab@m.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
久本 大	大岡山	南3-815	3696	hisamoto.d.aa@m.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
福田 浩一	大岡山	南9-901	2555	fukuda.k.av@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
宮本 恭幸	大岡山	南9-702	2572	miya@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
石橋 幸治	すずかけ台	理研		kishiba@riken.jp	電気電子コース	-
大見 俊一郎	すずかけ台	J2-1204	5481	ohmi@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
角嶋 邦之	すずかけ台	S2-708	5847	kakushima@ep.titech.ac.jp	電気電子コース	-
筒井 一生	すずかけ台	J2-1103	5462	ktsutsui@ep.titech.ac.jp	電気電子コース	-
若林 整	すずかけ台	G2-1003	5594	wakabayashi.h.ab@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
渡辺 正裕	すずかけ台	J2-1102	5454	watanabe@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
<b>電子材料・物性グループ</b>						
中川 茂樹	大岡山	南3-709	3564	nakagawa@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
PHAM NAM HAI	大岡山	南3-716	3934	pham.n.ab@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
間中 孝彰	大岡山	南3-719	2673	manaka@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
宮島 晋介	大岡山	EEI-408	2807	miyajima.s.aa@m.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
山田 明	大岡山	EEI-409	2698	yamada.a.ac@m.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
飯野 裕明	すずかけ台	J1-207	5181	iino@isl.titech.ac.jp	電気電子コース	-
伊藤 治彦	すずかけ台	G2-1111	5459	ito.h.ai@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
梶川 浩太郎	すずかけ台	G2-1005	5596	kajikawa@ep.titech.ac.jp	ライフエンジニアリングコース	電気電子コース
加藤 隆志	すずかけ台	J1-209	5188	kato.t.be@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
菅原 聡	すずかけ台	J3-1216	5184	sugahara@isl.titech.ac.jp	電気電子コース	-
中本 高道	すずかけ台	R2-516	5017	nakamoto@nt.pi.titech.ac.jp	情報通信系 情報通信コース	電気電子コース
<b>電力・エネルギーグループ</b>						
赤塚 洋	大岡山	北1-413	3379	hakatsuk@lane.iir.titech.ac.jp	原子核工学コース	-
小栗 慶之	大岡山	北2-626	3071	yoguri@lane.iir.titech.ac.jp	原子核工学コース	-
葛本 昌樹	大岡山	EEI-210	3796	kuzumoto@ee.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
竹内 希	大岡山	南3-615	2566	takeuchi@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
千葉 明	大岡山	南3-607	2697	chiba@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
七原 俊也	大岡山	南3-619	2819	nanahara@ee.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
萩原 誠	大岡山	EEI-402	2852	mhagi@akg.ee.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
藤田 英明	大岡山	EEI-404	2696	fujita@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
堀口 剛司	大岡山	EEI-210	3796	horiguchi@akg.ee.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
安岡 康一	大岡山	南3-616	2185	yasuoka@ee.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
沖野 晃俊	すずかけ台	J2-1306	5688	aokino@es.titech.ac.jp	ライフエンジニアリングコース	電気電子コース



# 電気電子コースの概要と修士課程教育カリキュラム

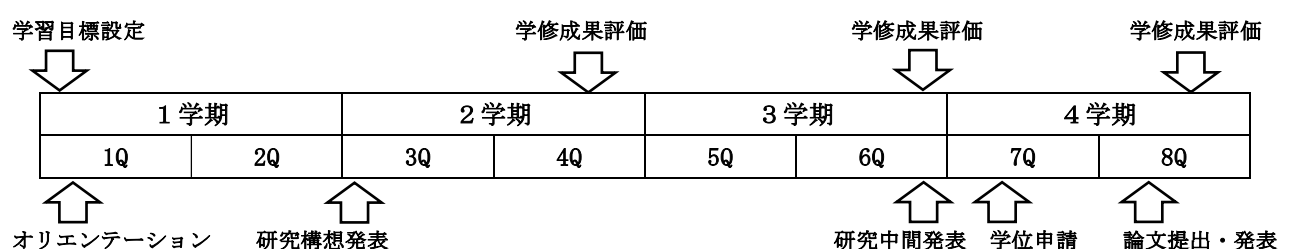
## 概要

平成28年度から本学の新たな教育システムが発足したことに伴い、学部・大学院の一体教育を図るため、それまでの電気電子工学専攻、電子物理工学専攻、物理電子システム創造専攻の電気電子系3専攻を中心とする大学院教育に、学部教育を担う電気電子工学科を加え「電気電子系」が編成されました。「電気電子コース」はその大学院教育を担うコースです。電気電子コースは、現代のエレクトロニクスを牽引する多くの研究分野を擁し、世界最先端の研究を行っています。なお、電気電子系の教員は大岡山キャンパスおよびすずかけ台キャンパスにまたがっており、各科目も両キャンパスで開講されます。

## 修士課程教育カリキュラム

電気電子コースでは、電気電子工学分野における新たな領域を切り開き、グローバルに活躍できる高度な研究者およびリーダーとなる人材を養成するため教育プログラムを設定しています。次ページの表は修士課程に相当する400番台ならびに500番台の講義科目を示します。これらは科目体系図に示されるように、専門分野に応じて体系づけられており、各自の専門性や必要とする分野を考慮して取得することができます。この中から修士課程修了時まで13単位以上を取得することが必要です。また、専門以外の周辺領域への適応力や社会性を涵養するために、文系教養科目やキャリア科目の単位取得が修了要件に含まれています。この他、電気電子工学講究は、修士課程、博士課程の各クオータで全て必修です。講究は所属する研究室内で行われる輪講(ゼミ)等を中心に進められます。

修士論文研究では研究を通じた高度専門知識や先端技術の修得だけでなく、教員や研究室メンバーとの議論や発表を通じて思考力、判断力、交渉力、プレゼンテーション力、コミュニケーション力など社会で必須な能力を向上させることができます。また、研究構想発表会、中間発表会、修士論文発表会では、所属する研究グループ教員全員から研究内容や発表能力について評価を受け、学修に活かす仕組みがあります。このように、修士課程教育は、体系化された授業科目群と修士論文研究を両輪として、学生の能力が最大限活かされる極めて質の高い教育体系となっています。



電気電子工学コース修士課程における修士論文研究の標準的な流れ

## 電気電子コース(修士課程)の講義科目

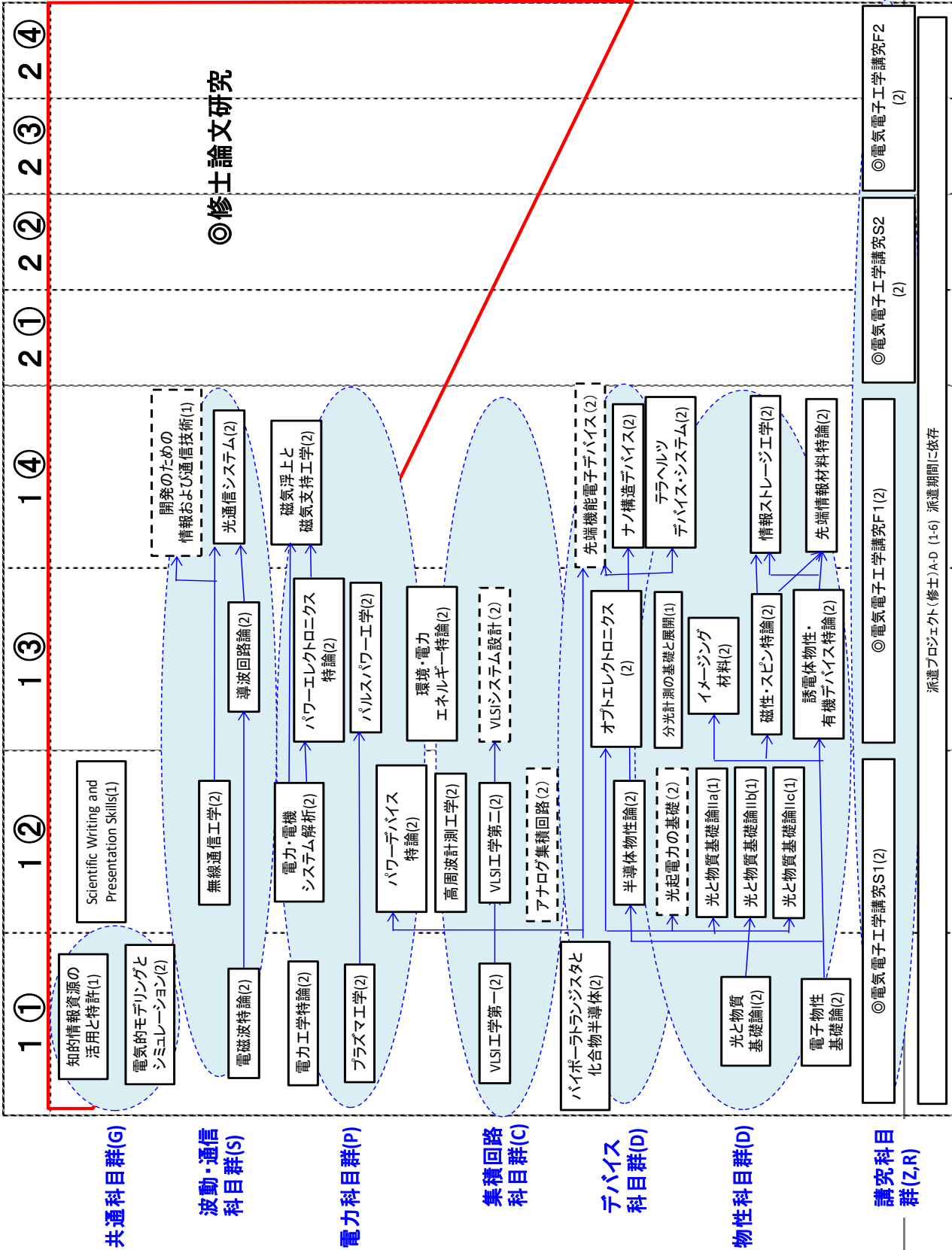
授業科目名	単位*	担当教員
VLSI Technology I (VLSI工学第一)	2-0-0	若林 整, 角嶋 邦之
VLSI Technology II (VLSI工学第二)	2-0-0	若林 整, 石原 昇, 道正 志郎
RF Measurement Engineering (高周波計測工学)	2-0-0	石原 昇, 伊藤 浩之, 非常勤講師
Fundamentals of Electronic Materials (電子物性基礎論)	2-0-0	中川 茂樹, 菅原 聡
Semiconductor Physics (半導体物性論)	2-0-0	山田 明
Imaging Materials (イメージング材料)	2-0-0	飯塚 裕明
Fundamentals of Light and Matter I (光と物質基礎論 I)	2-0-0	梶川 浩太郎, 宗片 比呂夫, 伊藤 治彦
Information Storage Engineering (情報ストレージ工学)	2-0-0	非常勤講師
Bipolar Transistors and Compound Semiconductor Devices (バイポーラトランジスタと化合物半導体)	2-0-0	宮本 恭幸
Optoelectronics (オプトエレクトロニクス)	2-0-0	宮本 智之
Advanced Power Semiconductor Devices (パワーデバイス特論)	2-0-0	非常勤講師
Utilization of Intelligent Information Resources and Patents (知的情報資源の活用と特許)	1-0-0	非常勤講師
Electrical Modeling and Simulation (電氣的モデリングとシミュレーション)	2-0-0	山田 明, 非常勤講師
Electric Power and Motor Drive System Analysis (電力・電機システム解析)	2-0-0	藤田 英明
Advanced Course of Power Electronics (パワーエレクトロニクス特論)	2-0-0	藤田 英明, 萩原 誠
Advanced Electric Power Engineering (電力工学特論)	2-0-0	七原 俊也, 非常勤講師
Plasma Engineering (プラズマ工学)	2-0-0	赤塚 洋, 沖野 晃俊
Pulsed Power Technology (パルスパワー工学)	2-0-0	安岡 康一, 竹内 希
Advanced Electromagnetic Waves (電磁波特論)	2-0-0	廣川 二郎
Guided Wave Circuit Theory (導波回路論)	2-0-0	水本 哲弥
Wireless Communication Engineering (無線通信工学)	2-0-0	阪口 啓
Optical Communication Systems (光通信システム)	2-0-0	植之原 裕行, 小山 二三夫
Dielectric Property and Organic Devices (誘電体物性・有機デバイス特論)	2-0-0	間中 孝彰
Magnetism and Spintronics (磁性・スピン工学特論)	2-0-0	中川 茂樹, Pham Nam Hai
Advanced Materials in Information Technologies (先進情報材料特論)	2-0-0	加藤 隆志
Fundamentals of Light and Matter IIa (光と物質基礎論 II a)	1-0-0	伊藤 治彦
Fundamentals of Light and Matter IIb (光と物質基礎論 II b)	1-0-0	宗片 比呂夫
Fundamentals of Light and Matter IIc (光と物質基礎論 II c)	1-0-0	梶川 浩太郎
Fundamental of spectroscopic measurements and its development (分光計測の基礎と展開)	1-0-0	宗片 比呂夫
Nano-Structure Devices (ナノ構造デバイス)	2-0-0	渡辺 正裕, 石橋 幸治
Terahertz Devices and Systems (テラヘルツデバイス・システム)	2-0-0	河野 行雄
Nano-Materials Electronics (ナノ材料電子) *「東工大ー清華大 大学院合同プログラム」により北京にて開講	2-0-0	中川 茂樹, 間中 孝彰
Magnetic Levitation and Magnetic Suspension (磁気浮上と磁気支持工学)	2-0-0	千葉 明
Environment and Electric Energy (環境・電力エネルギー特論)	2-0-0	葛本 昌樹
Study Abroad (Master Course) A-D (海外留学(修士)A-D) *	0-0-n	各指導教員
Internship (Master Course) A-D (インターンシップ(修士)A-D) *	0-0-n	各指導教員
Seminar S1, F1 on Electrical and Electronic Engineering (電気電子工学講義S1, F1)	0-0-2	各指導教員
Seminar S2, F2 on Electrical and Electronic Engineering (電気電子工学講義S2, F2)	0-0-2	各指導教員

\* 単位の数字は「講義－演習－実験・実習等」による単位数を表す。☆印の単位は派遣期間によりA-Dに対応し、それぞれn(1～6)単位に対応する。

電気電子コース（修士課程）の科目体系図

電気電子コース(修士課程)の科目体系図

学士課程で学んだ、電気・電子工学に関する基礎知識をもとに、波動・通信分野、電力分野、集積回路分野、デバイス分野、物性分野に関し、最新の研究に基づき、より先端的な知識・技術を体系的に学ぶことが出来る。更に講究および特定課題研究(修士)において自ら研究を遂行することにより、専門性を更に深めるとともに、創造力をより高めることができるように構成されている。

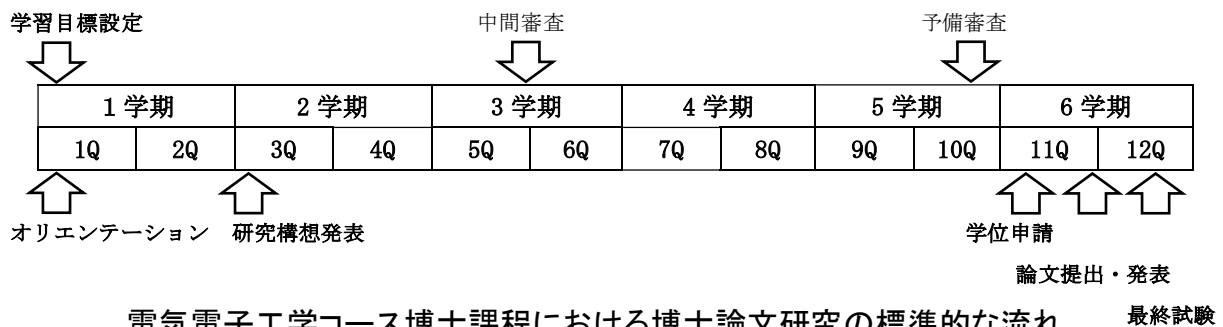




# 電気電子コース 博士課程教育カリキュラム

## 博士課程教育カリキュラム

博士課程では、修士課程での学修成果をベースとして、博士論文研究を中心に、数段高い専門能力、問題発掘・解決能力の開発が行われるとともに、知的自立が一層促されます。専門性を高度に高めるために600番台の講義科目が準備されています。博士学位の取得に向けては、自身の研究の背景、目的等を明確化するために「研究構想発表」を行い、博士論文研究の進捗状況を確認するために「研究中間発表」を行います。学位申請を前提とした「予備審査」を経て博士論文発表ならびに最終試験を行い博士学位の審査が行われます。この博士課程の中でRA・TA活動、国際会議への参加の他に、海外研修または国内企業研修が推奨されており、研究室を越えた教育・研究の機会が提供されます。また、指導教員以外にメンターが1名配置され、複数教員による支援体制ができています。また、博士論文審査においては学外審査員制度により開かれた審査制度になっております。このように博士課程教育においては高度の専門性を身につけた独創性のある国際的リーダーの育成を図っています。



# エネルギーコースの概要

エネルギーは、電気電子系の重要な研究分野の一つです。CO<sub>2</sub>を排出せずにクリーンなエネルギーを創る。エネルギーをロスなく効率良く送る。送られたエネルギーを無駄なく有効に利用する。いずれも現代社会を支え、持続可能な未来社会を実現していくために必要な研究課題です。

しかし、このエネルギーの問題は、電気電子の分野だけでは閉じていません。電力電送(電気)、太陽電池(電子)、燃料電池(機械)、二次電池(化学)など、それぞれの分野で専門性を極めたスペシャリストが問題を的確に捉えるとともに、国・地球レベルで問題を大局的に俯瞰、総合的に解決して行く知識が必要とされます。エネルギーコースでは、物理、化学、材料、機械、電気の各専門の教員が、系の枠組みを超えて協力し合い、専門性と俯瞰力を兼ね備えた人材を育成することを目指しています。

## 1. エネルギーコースの理念

エネルギーコースでは、エネルギー分野において、物理、化学、材料、機械、電気の各ディシプリンを基礎とする高度な専門性を有し、かつ、エネルギーの諸問題を多元的エネルギー学理の視点から判断できる俯瞰力、自立的課題抽出・解決力、及び国際的リーダーシップ力を兼ね備え、社会に貢献するとの高い志を持ってイノベーションを牽引できる人材を養成します。

## 2. エネルギーコースの特徴

### ○高度な専門性と俯瞰力

地球の環境・エネルギー問題を解決するために必要とされる土台は何でしょう？それは、各人が深い基礎知識と専門性を持っていること、その知をイノベーションに繋げられる展開力、応用力にあります。エネルギーコースでは、「専門学理講義群」により深い知識と専門性が身につき、「エネルギー学理講義群」により俯瞰力が身につくように講義が設計されています。人類への貢献を目指す、大学院生諸君の挑戦を期待しています。

### ○多様性

エネルギーコースは、理・工をまたがる様々な分野の研究室から構成されています。しかも、この多様性と幅広いバックグラウンドは、現代のエネルギー学理の探求には不可欠なのです。エネルギー問題でわからないこと、あるいは新しいヒラメキがあったら、学院を超えて専門の先生に質問することができます。これにより、専門性と応用力について学ぶことができます。

### ○グローバルな視点

エネルギー研究では、基礎学力だけでなく、知識を実際に応用する力が重要となります。エネルギーコースでは、企業の研究者・経営者に講義に来てもらうなど、産(企業)と学(大学)とを繋ぐ教育に力をいれています。また、国際舞台で活躍できる人材を育成するため、活発な国際交流のエンカレッジを通して、国際的に通用する人材育成を行います。

## 3. 電気電子系エネルギーコースの担当教員

### ○主担当

波多野睦子教授、山田明教授、萩原誠准教授、藤田英明教授、  
小寺哲夫准教授、宮島晋介准教授、葛本昌樹特定教授、久本大特定教授、  
堀口剛司特定准教授

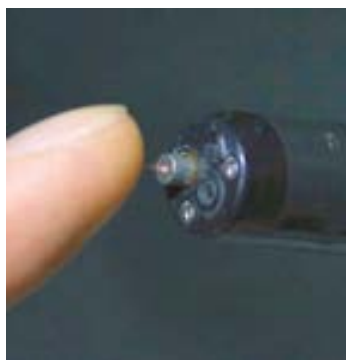
### ○副担当

千葉明教授、七原俊也教授、安岡康一教授、竹内希准教授、岩崎孝之准教授、  
中出雅彦特任教授

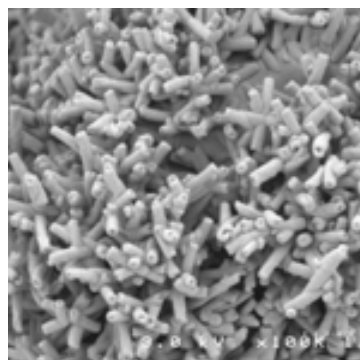
## ライフエンジニアリングコースの概要

豊かな暮らしを実現するために、ひとの健康・医療・環境などに関する工学的研究開発であるライフエンジニアリングの教育と研究を行います。そのために、ヒューマンインターフェース、医療・健康科学、生命倫理、ひとが関わる環境などの基礎学問を修得して、さらに材料・応用化学系、機械系、電気・情報系・生命系などの専門学問領域を横断的に学びます。これにより、ひとの健康を守り、ひとに優しく持続的な社会を実現し、科学技術の発展に貢献できる力を育成いたします。

電気電子系ライフエンジニアリングコースのカリキュラムは、電気電子系の標準課程科目群に加えて、ライフエンジニアリングの習得ために必要な分野を横断的に学ぶ共通科目群で構成されます。これにより、ひとの健康・医療・環境などを知る電気電子系の専門家の育成をめざします。このコースに所属する教員の研究分野は、超音波技術を利用した生体測定、光学バイオセンシングや生体の構造を利用した光学材料の開発、大気圧プラズマを用いた医療機器や分析装置の開発など多岐にわたります。



大気圧プラズマ



蓮の葉を使った黒体メタマテリアル

### 電気電子系ライフエンジニアリングコースの担当教員

#### ○主担当

梶川浩太郎教授、中村健太郎教授、沖野晃俊准教授、田原麻梨江准教授



## 原子核工学コースの概要

原子核工学コースでは、原子核反応・放射線・プラズマの利用、及びそれらを支える理工学分野を体系的に学修し、また研究に取り組むことで、将来エネルギー・環境・医療等の工学的分野及び関連の基礎科学分野で活躍するために必要な知識と実践力の習得を目指します。

本コースは、原子力分野で最先端の研究を行っている科学技術創成研究院先導原子力研究所との密接な連携の下に運営されています。教育カリキュラムにも研究所の最新の知見が反映され、修士・博士論文の研究では研究所での研究活動に密接に関係したテーマが用意されます。この充実した環境の下、安全・安心な社会の構築と世界の持続的発展を目指したバラエティーに富んだ研究を行うことができます。

原子核工学において、電気電子系の技術は原子力を一次エネルギーとする発電だけでなく、プラズマ・レーザー・加速器・粒子ビーム等、先端技術の基盤でもあり、将来のエネルギーである核融合をはじめ、これらを用いた先端的医療技術や材料プロセス等の様々な工業利用にも密接に関係しています。このコースに所属する教員の研究室は大岡山キャンパスにあり、研究分野としては、プラズマ内の原子分子過程、レーザー・分光学を応用したプラズマ診断、低温プラズマの基礎と応用、イオンビームを用いた核融合の基礎研究、加速器を用いた医療用診断・治療技術や高感度元素分析技術の開発等があります。



開放端磁場における  
アークジェットプラズマ



メンテナンス中の160万ボルト  
静電イオン加速器

### 電気電子系原子核工学コースの担当教員

#### ○主担当

小栗慶之教授、赤塚 洋准教授

# 大学院生活

## ●研究室生活

学部と大学院の大きな違いは学修の場です。大学院課程では、体系的なカリキュラムに基づく教育と、研究室教育とを両輪としています。みなさんの大学における学修時間の多くは研究室で費やされると思いますが、研究室教育では世界最先端の研究に取り組みながら高度な専門知識や先端技術を修得し、修士課程在学中に成果をあげて国際会議での発表機会が得られるでしょう。また少人数教育体制を敷くことにより、教員との直接対話や先輩後輩との活発な議論が生まれ、思考力や判断力、交渉力といった社会で必須の能力が身につきます。こうした意味で研究室は皆さんのベースキャンプであり、専門学力を磨くとともに、社会性を身につける場所です。

各研究室(教員単独の研究室のほか、複数名で共同運営している研究室もある)は、電気電子系の5つの専門グループに所属します。後述する構想発表・中間発表・修了発表会などは専門グループ内の研究室が合同で開催するため、所属する研究室以外の教員からも研究指導を受けることができます。

## ●教員や学生との交流

研究室の枠を超えて、同じ専門グループ内、あるいは他の専門部グループとの交流の機会も多数設けられています。たとえば電気系科学技術懇話会では、電気電子系の教員が、学生や教員に科学技術の楽しさを伝え、議論を活性化させて、研究への興味を増幅させています。原則毎月1回、水曜日の夕刻に開催されるので多くの学生・教員が参加しています。このほかに、研究室合同の歓迎会、オリエンテーション、歓送会、OB会なども開かれています。また多くの学生はリサーチアシスタント(RA)やティーチングアシスタント(TA)として雇用され、教員や学生と接する過程で研究者や指導者としての視点を養います。

## ●発表会（構想，中間，学位論文発表会など）

研究活動の報告は、所属する研究グループで、構想発表会、中間発表会、論文発表会の順に行い、発表会ではグループ教員全員から研究内容や発表能力について評価を受け、学修に活かす仕組みができています。また発表会には全ての大学院生も参加が許可され、積極的に質疑に参加するよう促されており、発言力を磨く場としても活用されています。

## 卒業後の進路

### ●就職支援

電気電子系の就職支援活動は、就職支援室のスタッフと就職担当教員を中心に、大岡山、すずかけ台、双方で行われています。主な行事としては、3回の就職説明会と同窓会(楽水会)主催の就職支援行事であるキャリアサロンと技術セミナー、および電気系電子系OB/OGによる会社説明会も随時頻繁に開催されています。楽水会主催のキャリアサロンは、OB・OGによる就職活動時の体験談や入社後の会社生活、社会人になるにあたっての心構えなど、様々なアドバイスをいただける機会として学生に好評の企画です。また、技術セミナー(下の写真)にはさまざまな分野から70社の参加企業があり、数多くの東工大出身者から貴重な会社情報を直接入手できる場として大変好評です。なお、大学推薦の人数枠は十分用意されていますので、大いに活用してください。就職支援室からの情報提供は迅速できめ細かく、常に親身になって就職に関する相談に乗ってくれます。



### ●就職状況

電気・電子技術は、すべての産業に関わっています。このため電気電子系出身者への求人はあらゆる企業から集まり、求人倍率は毎年10倍以上です。業種別の就職先としては、平成28年度の実績で、電気電子系では電気・通信・精密機器関連企業に4割、通信・放送・電力・ガス関連企業に4割、機械関連企業に1割、その他1割となっていますが、近年は就職先企業の分布が大きく変化する傾向がみられます。

大学院修了後の就職について修士・博士ともに不安はまったくありませんが、自分のやりたいことを明確にして、自分の力を発揮できる就職先を決めることが重要です。特に、電気・電子分野以外の企業では業務上の裁量を多く任されるなど、活躍の場が多いので積極的に挑戦してみても良いでしょう。採用試験では専門学力の評価に加えて面接が重視されます。コミュニケーション力、協調性、企画力などが評価対象なので、専門学力とともに研究室での研究活動を通じて、しっかりと身につけておくことが重要です。



## 受験について

電気電子系の研究分野は、材料・物性分野、デバイス分野、波動分野、回路分野、電力・エネルギー・環境分野という広範な学術・研究分野を網羅しているため、電気・情報系分野にとどまらず、幅広い研究分野の優秀な人材を国内外から広く募集し、グローバルに通用する人材として育成しています。

大学院は、修士課程と博士課程に大別されます。

修士課程では、基礎的理解力と応用発展力をもった、グローバルに活躍できる人材を育成することを目指しています。電気情報系学科はもとより、物理系学科、化学系学科、材料系学科、制御系学科などの広範な学科の卒業生を受け入れています。このため、修士課程入試においては、各分野に共通する基礎的科目である数学、電磁気学の二つの必須科目、電気回路または量子力学/物性基礎からなる選択科目および英語（TOEIC/TOEFL等）により学力を判定します。

博士課程では、国際的に第一級の力量を持つ研究者・技術者等を育成することを目指しています。7月と1月の年2回の出願期間が設定されています。博士課程への出願は、志望する指導教員の了解が必要ですので、まずは志望分野の教員に面談の依頼をしてください。

以下では、修士課程入試について説明します。博士課程入試については、電気電子系ホームページをご覧ください。すべての情報は募集要項に記載されています。ここには概要のみを記載していますので、必ず募集要項を確認してください。

### 1. 募集要項

募集要項は、4月上旬にweb（入試課ホームページ）で公表され、4月末より以下の場所で配布しています。また、募集要項の郵送をご希望の方は以下のURLをご覧ください。

[https://www.titech.ac.jp/graduate\\_school/admissions/guide.html](https://www.titech.ac.jp/graduate_school/admissions/guide.html)

配布場所

＜大岡山キャンパス＞

西8号館E棟2階入試課 9:00～17:00（平日のみ）

正門守衛所（正門入りすぐ左）7:00～22:00（土日祝可）

＜すずかけ台キャンパス＞

J1棟1階 学務課 ロビー 9:00～17:00（平日のみ）

出願受付は6/13（木）～6/19（水）です。

募集要項に関するその他の情報などは入試課のホームページをご覧ください。

[https://www.titech.ac.jp/graduate\\_school/news/index.html](https://www.titech.ac.jp/graduate_school/news/index.html)

### 2. 入学試験

選抜は、「A日程」と「B日程」のいずれかの試験により行います。A日程では、基礎・専門学力および適正などに関する口述試験を行います（7月中下旬に実施）。A日程の有資格者には、願書提出後に、その旨通知が届きます。B日程では、数学と電磁気学の必須科目および電気回路または量子力学/物性基礎の選択科目とTOEIC あるいは TOEFLによる英語の成績の換算による

筆答試験(8/16に実施)と志望分野および適正などに関する口頭試問を組み合わせで行います。A日程を欠席したり不合格となった場合でもB日程の試験を受験することができます。なお、A日程の結果は、B日程の可否判定には一切考慮されません。

B日程筆答試験の試験時間は、数学、電磁気学、電気回路または量子力学/物性基礎の選択科目を合わせて合計160分です。また、英語の学力評価には、英語外部テストのスコアを利用します。英語外部テストとは、(1) TOEFL-iBT (2) TOEFL-PBT (3) TOEIC の3種類です。TOEFL-ITP 及びTOEIC-IP, TOEIC S&W等のスコアは利用できません。なお、英語外部テストのスコアは、願書提出期限から2年以内に受験したものに限り有効とします。

### 3. 電気電子系入試説明会/見学会

修士入試の説明会と研究室見学会を3月と5月に開催する予定です。研究室の紹介や見学、入試についての説明が行われます。各研究室が二つの異なるキャンパスに属していることから、それぞれのキャンパスで説明会を開催しますが、日程は続いています。詳しくは系のホームページで報知されますので、そちらをご覧ください。

### 4. 国際大学院プログラム

留学生向けに国際大学院プログラムがあります。日本国内在住の留学生が出願できる種目に国際大学院プログラム(C)の国内出願があります。筆答試験と口頭試問により可否を判定します。筆答試験の出題範囲は一般試験と同様ですが英語での受験が可能です。9月入学の場合は4月に出願となり、4月入学の場合は10月出願となります。詳しくは下記ホームページおよび募集要項を参照してください。

[https://www.titech.ac.jp/english/graduate\\_school/international/index.html](https://www.titech.ac.jp/english/graduate_school/international/index.html)

### 5. 清華大学（中華人民共和国）との大学院合同プログラム

東京工業大学と清華大学(中華人民共和国)が共同で大学院の学生教育を行い、日本語、中国語及び英語の素養を持ち、日中双方の文化・習慣に通暁した優れた理工系の人材を養成し、両国の科学技術及び産業経済の発展に資することを目的として大学院合同プログラムを開設しています。電気電子系では、ナノテクノロジーコースに参加しており、修士課程において、両方の大学院に同時に所属することが可能です。詳しくは下記および募集要項を参照ください。

<http://www.ipo.titech.ac.jp/tsinghua/>

### 6. 国立交通大学（台湾）とのダブルディグリープログラム

東京工業大学電気電子系と国立交通大学(台湾)国際半導体産業学院では、ダブルディグリープログラムとしての大学院修士課程教育を行っています。最短二年間で両方の修士号をとることが可能です。簡易の情報が下記のホームページに掲載されています。詳しくは下記ホームページおよび募集要項を参照してください。

<http://www.titech.ac.jp/enrolled/abroad/programs/degree.html>

### 7. 問合せ

受験に関するお問合せは、下記のメールアドレスにご連絡ください。

[inquiry@ee.e.titech.ac.jp](mailto:inquiry@ee.e.titech.ac.jp)

電気電子系の情報はホームページでご確認ください。

<https://educ.titech.ac.jp/ee/>

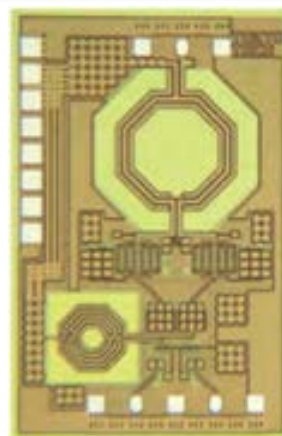
## 修士・博士課程における研究活動

学部と大学院の大きな違いは、みなさんの大学における勉強の多くの時間が研究活動に費やされるということにあるでしょう。電気電子系では、最先端の研究施設と各分野で活躍中の教員の直接指導により、学生でも世界に誇れる研究成果を出し、自分自身で発表することができます。

研究の基本は研究室単位(教員1名の研究室もありますし、2名で共同運営している研究室もあります)ですが、大きく分けると5つのグループがあり、中間発表・修了発表会などは合同で開催しています。

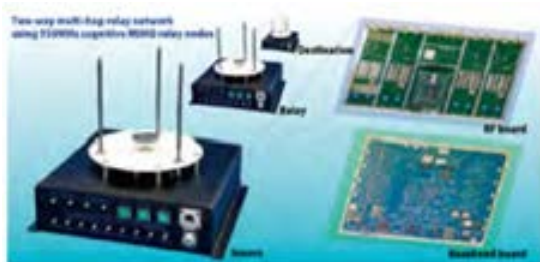
### 回路グループ (p.16~19)

回路グループでは、トランジスタや容量などの素子を巧みに組み合わせることにより、携帯電話、パソコン、テレビ、デジカメ、ゲーム機などのエレクトロニクス機器を作るための研究を行っています。例えば、携帯電話の中で使っている集積回路は、電波から電気信号を取り出す役割りを担っています。その取り出したアナログ信号をデジタル信号に変換し、音声や画像などのさまざまな情報として処理するのが、回路の役割りです。より大量のデータを送受信できる回路や、より低消費電力で動作する回路について研究を行っています。



### 波動通信グループ (p.20~45)

この研究分野に共通するキーワードは「波」であり、奥深い物理の理解から最先端の情報技術までを網羅し、通信は最も身近な応用と位置付けられます。基盤技術としては、光デバイスおよび集積回路、アンテナおよび高周波回路、無線通信工学および信号処理、環境電磁工学などがあります。この分野で活躍しようと思う学生の皆さんは、新材料の開拓や独自設計による

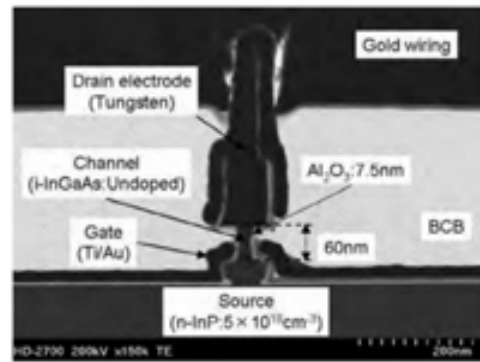


デバイス・装置の実現からシステムの実験、さらには多岐にわたるシミュレーションまで行えます。「波」を使った広い分野をカバーし、「世界で初めて」あるいは「世界で最高」の成果を常に目指した研究にチャレンジしませんか。



## デバイスグループ (p.46~73)

IoTや人工知能を活用し、環境にやさしく、エネルギーを効率的に利用する高度な知識情報社会を将来に渡って持続的に発展させていくには、システムを実現するための基本要素である半導体デバイス技術をさらに高度化していくことに加えて、新しい技術の開拓に果敢にチャレンジすることが重要です。新規半導体材料としてのダイヤモンド、2次元原子薄膜材料、化合物半導体などをベースとした、低消費電力で高速高効率動作するデバイスやセンサ、パワーデバイス等の研究を行っています。また、量子コンピュータなど新原理のデバイスや、光と電波に挟まれた未開拓の周波数帯であるテラヘルツ波のデバイス開発等に取り組んでいます。



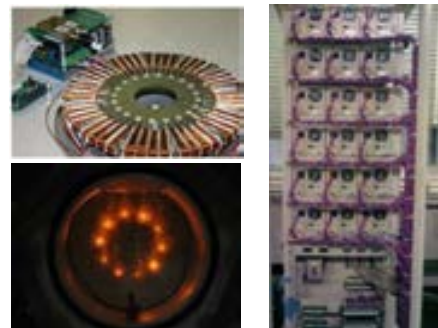
## 電子材料・物性グループ (p.74~93)

新しい電気・電子デバイスの出現は、私たちの生活に大きな変革をもたらします。そのため、革新的な材料開発と先進的なデバイス化技術の開拓に大きな期待が集まっています。集積回路や太陽電池に「半導体」、情報記録媒体に「磁性体」、表示素子に「液晶・有機分子」、バイオデバイスの実現のための「ナノ材料」など、様々です。こうした既存デバイスの特性向上のための材料開発や物性制御に留まらず、新しい機能を持つ材料の創成に挑戦し、世界初の先進的なデバイスを提案し、その動作を実証します。



## 電力・エネルギーグループ (p.94~111)

エネルギーと環境、水と食の安全、そして地球温暖化。世界は今大きな問題に直面しています。我々のグループで開発したプラズマ技術は、難分解性有機物の無害化や新素材開発に応用されています。スマートグリッドと電力用パワーエレクトロニクスは、電力を有効利用する基盤技術として高く注目されています。さらに、太陽光や風力で発電した電力の99%以上を有効利用できる電力変換・制御技術や、レアアース磁石を使用しない高出力・高効率モータ、また、粒子ビーム応用技術など、私たちは電気エネルギーを活用し社会に役立てるための研究を行っています。



# 先端アナログ・RF混載集積回路設計 CMOS集積回路による世界最高速のミリ波無線機

岡田研究室



回路グループ  
電気電子コース  
大岡山・S3-812

准教授 岡田 健一      助教 白根 篤史

研究分野: RF・アナログ・デジタル混載集積回路設計

キーワード: ミリ波無線通信、第5世代携帯(5G)、IoTバッテリーレス無線機、CMOS集積回路、PLL、原子時計、テラヘルツ無線通信・センシング・イメージング

ホームページ: <http://www.ssc.pe.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

岡田研究室では、「RF・アナログ・デジタル混載集積回路設計」に関する研究開発を行っています。微細CMOSを用いたアナログ・デジタル混載システムおよび超高速無線通信システムの可能性の追求に主眼を置き、回路からシステムまでの幅広い取り組みを通じて、世界最高性能を目指すとともに技術の体系化と実用化を図ります。

## 2 最近の研究成果

RF・アナログ・デジタル混載集積回路設計技術は、現在のエレクトロニクスにおいて高性能化、低消費電力化、小面積化、低コスト化を実現する上での重要な基幹技術となっております。私たちは60GHz帯を用いた超高速データ伝送用ミリ波通信システム、リコンフィギュラブルRF-CMOS回路、容量演算や補間技術を用いたデータコンバータ、ダイナミックアナログ回路、0.5V程度の超低電圧で動作する超低電圧・超低電力アナログ回路、センサ情報処理回路などに主眼を置き、エネルギー消費が少なく、環境に優しいグリーンICT社会の実現を目指した研究を行っています。

### ミリ波無線通信システム

私たちは現在、ミリ波帯を用いた無線通信システムを開発しています。特に60GHz帯は世界中の多くの国で幅広い周波数が免許不要で使え、この周波数帯を用いると100Gbps超の超高速無線通信が可能になります。この高い伝送速度はHD映像を非圧縮で無線伝送するワイヤレスHDMIや映画やTVプログラムの瞬時のダウンロードなどを可能にします。

実際に、学生が自分で回路を設計し、最先端のCMOS技術による半導体チップを製作しています(図1)。ミリ波無線機は非常にホットな研究分野で、世界中の大学や企業が競って研究を行っています(図2)。そのような中、当研究室の大学院生がデザインした回路(図3)が、60GHz帯ミリ波無線機として現在の無線LANの100倍程度の速度である世界最速の50Gbpsの通信速度を達成しました。現在は120Gbpsまで記録を更新しています。

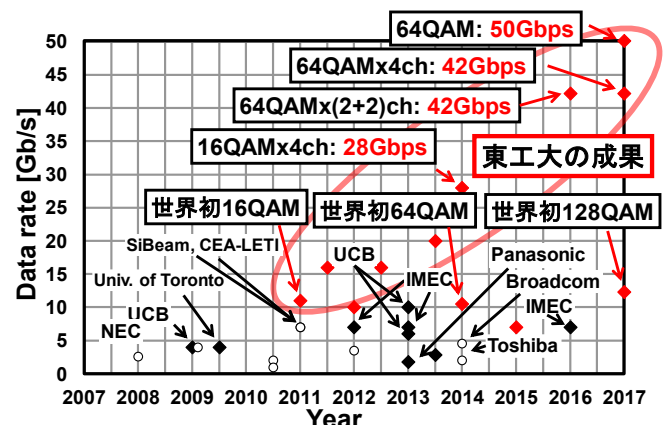


図2. ミリ波無線通信システムの研究競争

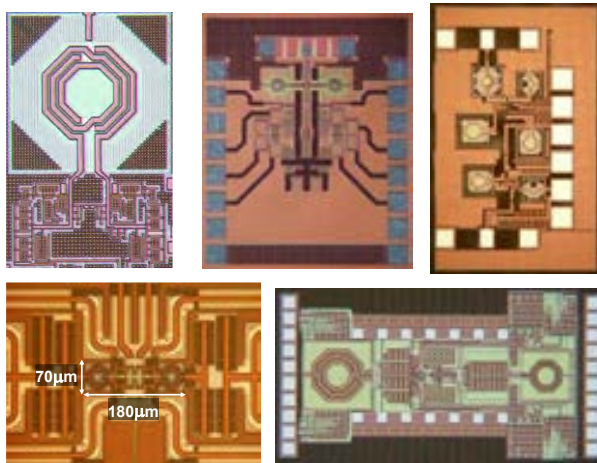


図1. 学生が設計した作品 (60GHz帯無線回路)

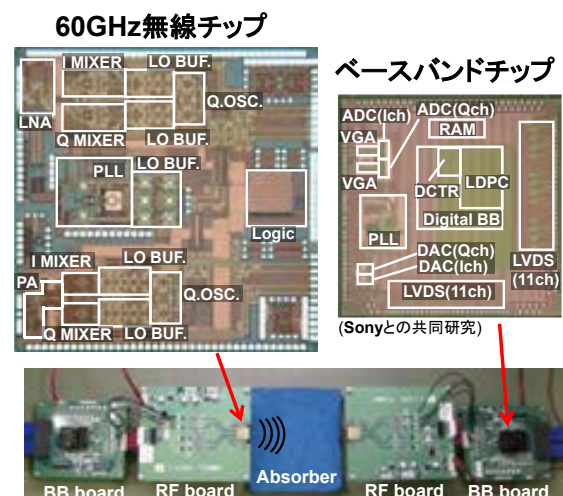


図3. 世界最速を達成したミリ波無線機



## 大岡山・回路グループ

## 衛星通信向け無線システム

世界中のあらゆる場所、あらゆる時に繋がるインターネットの提供を実現するために、地上36,500kmの静止軌道衛星や、地上500km程度の低軌道衛星に向けた無線機の研究を行っています。世界のインターネット普及率は未だに50%程度であり、衛星通信の通信コストを大幅に下げることによって情報格差の解消を目指します。本研究では、衛星に搭載される無線機の高速化、低消費電力化を進めることで、衛星の小型・軽量化を実現します。国内外の企業や大学と連携することで、今後10cm立方の超小型衛星を打ち上げ、宇宙における本無線機の有効性の実証を行っていきます。

超小型衛星通信網の実現のもうひとつの鍵となるのが非常に正確な時を刻む原子時計です。超小型の衛星に原子時計を搭載するためには、従来の大型の原子時計を大幅に小さくし、さらにごく限られた電力で動くようにする必要があります。本研究室では、従来と比較して消費電力と周波数安定度を一桁以上削減した右図に示すような15cm<sup>3</sup>、60mWの低消費電力な小型原子時計の開発に成功しています。さらに本研究は、衛星通信に限らず、これまで原子時計を搭載できなかった自動車やスマートフォンなど、様々な機器での原子時計の利用を可能とし、自動運転やGPSの代替、高精度計測など、これまで実現できなかった社会・技術サービスへ大々的な展開が期待されています。

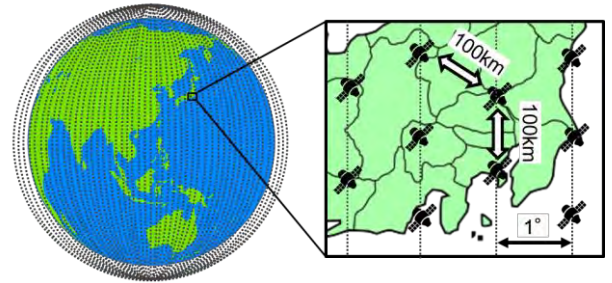


図4. 超小型衛星通信網の実現

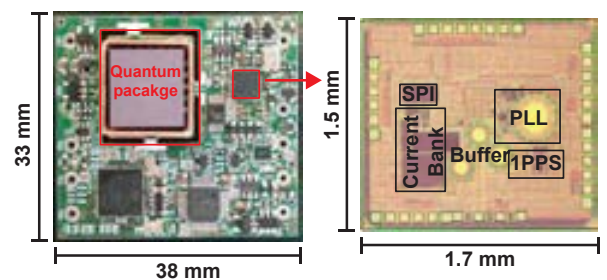


図5. 超低消費電力な小型原子時計

## IoT向け極低消費電力無線端末

あらゆる物にセンサノードを搭載し、様々な情報をインターネットを介して収集するモノのインターネット(IoT)社会が実現しつつあります。センサノードの個数は将来1兆個にも及ぶと言われており、これらのメンテナンスコストをいかに低下させるかがIoT成功の鍵となります。メンテナンスコストを低下させるにはセンサノードの消費電力を低下させ、ノードのバッテリーを長寿命化させることが必須となります。私たちの研究室は、特にセンサノードの通信回路の消費電力を低下させることで、IoTのコスト改善に貢献しております。

図6は本研究室で開発された920MHz帯通信用の無線送受信回路です。無線回路はIEEE 802.15.4gの規格に準拠しており、同規格に向けて設計された送受信機の中でも最も低い消費電力の4.6mWを達成できました。また無線回路の大部分を自動合成により設計する手法を確立しました。自動合成による回路設計は通常のアナログ設計に比べて設計時間やテスト時間を大幅に削減し、設計コストを劇的に下げることができます。

図7は本研究室で開発された2.4GHz帯Bluetooth Low Energy (BLE)に向けた送受信回路です。このBLE無線回路には、デジタル位同期回路一つで無線通信に必要な機能を実現する画期的な手法が採用されています。これによって無線通信に必要な回路を大幅に削減することができ、消費電力をBLE無線回路の中で世界最小の2.3mWにまで低下させることができました。

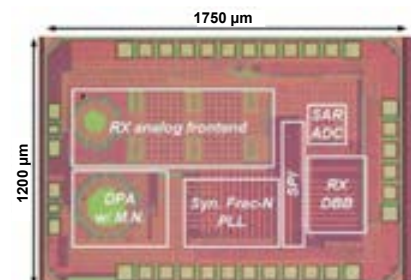


図6. 3.3mWシンセサイザブルTRX

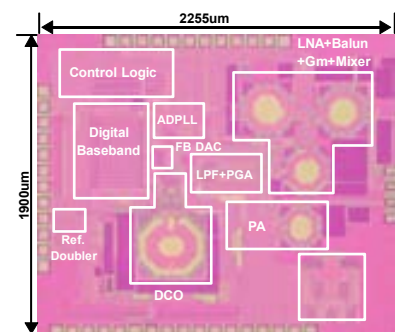


図7. 2.3mW BLE無線回路

## 3 教員からのメッセージ

## 岡田先生より

世界最速の無線チップを作ってみませんか？



# 集積回路技術, 集積化CMOS-MEMS技術 センサ技術, Internet of Things

## 伊藤(浩)研究室



回路グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・S2棟408号室  
准教授 伊藤 浩之 助教 山根 大輔

研究分野 集積回路, 集積化CMOS-MEMS, センシング技術  
キーワード Internet of Things (IoT), アナログ/RF回路, 慣性センサ, IT酪農・畜産・農業, 医療用IT技術  
ホームページ <http://masu-www.pi.titech.ac.jp>

## 1 主な研究テーマ

電子回路技術と集積化CMOS-MEMS技術 (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems) 技術を軸として, 新しいハードウェア技術を創る観点と, 新しい応用分野を切り拓く観点を持って研究を行うことで, 電子回路・MEMS・エレクトロニクスの新分野・新技術を創成していきます. 現在は, Internet of Thing (IoT) 用途の低消費電力無線・センサ回路技術や超高感度MEMS慣性センサ技術, 宇宙での農業を目指した密閉型稲育成システム, 動物の気持ちをセンシングするシステム, 医療用センサ技術などの研究開発を学内外の研究者と密に連携しながら推進しています.

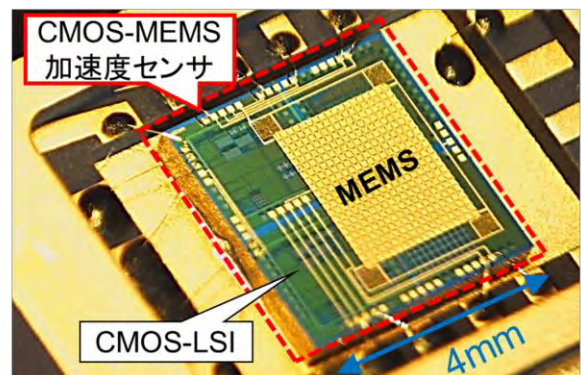
※本研究室は, 未来産業技術研究所の石原昇特任教授, 道正志郎特任教授, 大場隆之特任教授, 町田克之特任教授らと密に連携しながら研究・教育を進めています.

## 2 最近の研究成果

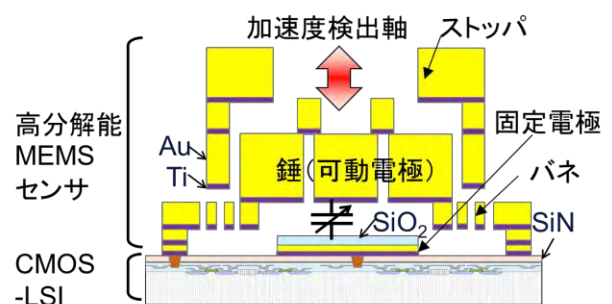
### ■ 超高感度慣性センサ

CMOS-MEMSプロセス, CMOS-MEMS統合解析・設計環境技術による慣性センサの超高感度化と超小型化研究を核として, 材料レイヤ(曾根正人教授)と応用レイヤ(三宅美博教授)と連携して, ナノG<sup>(注1)</sup>計測の実現と応用展開をJST CRESTプロジェクト(益一哉先生代表)として目指しています. 本研究室で開発中のワンチップ慣性センサシステムは, 機械的雑音(ブラウンノイズ)を削減するために比重が大きい材料である金(Au)を利用しているところが特徴です. さらに, 小型で雑音に強いシステムにするために, MEMS慣性センサとセンサインターフェース回路を図1のように集積化しています. また, 材料面からの機械的性質制御や, 慣性センサを利用した身体運動解析に基づくパーキンソン病早期発見支援システムの共同開発も進めています.

注1) 加速度  $1G = 9.8m/s^2$



積層メタル技術(NTT-AT社のMEMSプロセス)とCMOS-LSI技術を融合した超高感度CMOS-MEMS慣性センサの開発



CMOS-MEMS慣性センサの断面構造

図1. CMOS-MEMS慣性センサ

## すずかけ台・回路グループ

### ■ IoT用途の高周波集積回路技術

近い将来に様々なモノに埋め込まれるセンサノードは、バッテリーレスで環境から電力を生成(環境発電)することが強く求められます。この時、センサノード内の無線トランシーバは、極めて低い電力・高い電力効率で通信する必要があります。本研究室では、数十マイクロワット以下の消費電力で動作するRFトランシーバフロントエンド回路や無線通信モジュールを開発しています。図2の回路では100マイクロワット程度の低消費電力動作と多値変調(32-QAM)を両立しています。

さらに、IoT時代に向けた無線通信システムの小型化・低コスト化・高速化に大きく貢献する技術として、外付け部品である水晶発振器を、集積回路に内蔵可能な高周波圧電共振器で置き換えることが可能なシンセサイザ回路技術(図3)の研究開発も進めています。

### ■ アグリエレクトロニクスの研究

センサ・集積回路技術の応用技術として、農業用センシング技術・新システムの研究開発を進めています。稲栽培のレシピ化・365日自動蒔種/収穫などを目的としたSun-Rice計画(大場特任教授との共同研究)、牛などの動物の気持ちをセンシングするシステムの研究開発(東工大COI, 信州大などとの共同研究)などを進めています。

2017年に世界初となる密閉型稲水耕栽培装置(図4)のプロトタイプが完成し、稲が吸収・排出する二酸化炭素や水のリアルタイム計測や、成長量を定量化するためのセンシング技術の開発などを進めています。将来的に、月面や宇宙といったあらゆる場所で、日本人のソウルフードである「米」を食べられるようにすることが目標です。

2018年2月に、すずかけ台キャンパス内で米の収穫に成功し、現在、装置を改良しています。

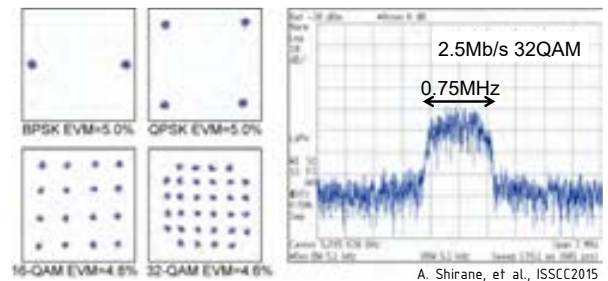
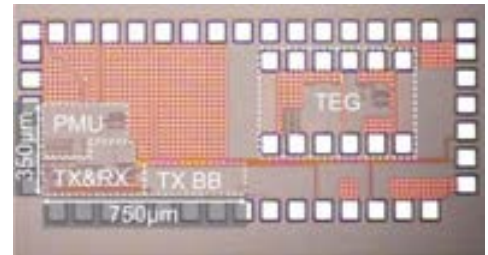


図2. 直交バックスキャタリング回路技術

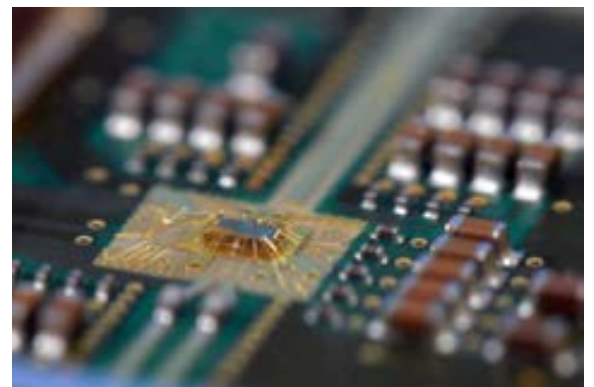


図3. 圧電共振器を用いたシンセサイザ回路



図4. 完全密閉型稲育成装置 SRP-450

## 3 教員からのメッセージ

自分で考えて作った世界初の回路やシステムが動いた時の感動は、言葉で表現できません。この充実感の虜になった教員を筆頭に、チップを創り、プリント基板を掘り、3Dプリンタで部品を作り、システムを組んでいるような研究室です。自分の手を動かしてモノづくりをすることが好きな方は特に楽しめると思います。



Aoyagi Lab. (青柳研)

環境電磁工学 (EMC)

医療・ヘルスケア情報通信 (MICT)

教育工学 (Educational Technology)



電気電子コース 波動光通信グループ  
大岡山・西9号館823/824/825

准教授 青柳貴洋

Assoc. Prof. Takahiro Aoyagi

Research Area: 環境電磁工学 (Electromagnetic Compatibility, EMC), ヘルスケア・医療情報通信工学 (Healthcare and Medical Information Communication Technology, MICT), 教育工学 (Educational Technology, ET)

キーワード: 電磁波工学、電波伝搬、情報通信工学

<http://www.aoyagi.ee.e.titech.ac.jp/>



## 1 Research policy (研究ポリシー)

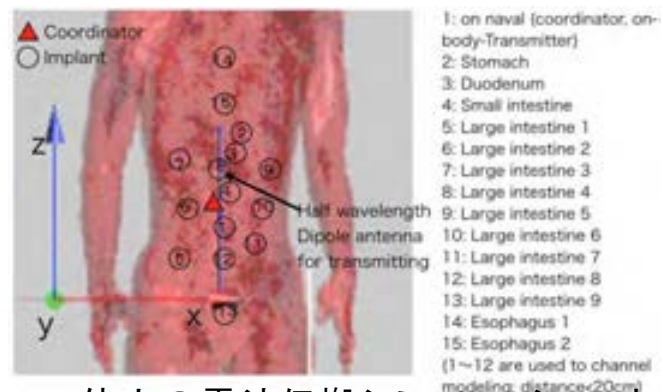
学問分野(電磁波工学、情報通信工学)の進化、発展をはかり医療、ヘルスケア、スポーツ、エンターテイメント、教育学習等の各分野における応用技術を研究するとともに、電磁環境の調和をはかっていきます。

## 2 最近の研究内容

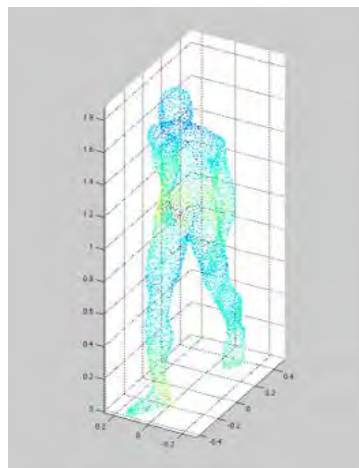
### ■ ボディエリアネットワーク

ボディエリアネットワークは生体(主に人間の身体)の周辺での通信の最適化を目指して設計されたセンサーネットワークです。

より高信頼性、高性能なボディエリアネットワークを構築することにより人々の健康増進、生活習慣病の予防、医療への応用、さらにはスポーツやエンターテイメントでの活用を目指します。青柳研ではボディエリアネットワークの電波伝搬、特にTHzにおけるBAN通信システム開発、通信プロトコル、センサー情報を活用したシステムについて研究を行っています。



- 体内の電波伝搬シミュレーションとチャネルモデル
- マイクロ波による体組織の測定



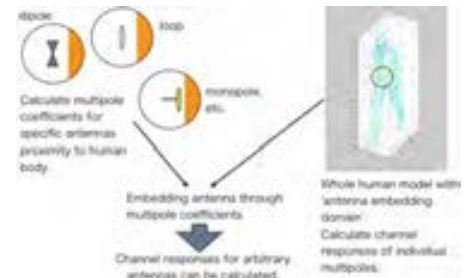
- コンピュータシミュレーションによる無線ボディエリアネットワークの電波伝搬の数値計算と伝搬モデルの作成



## 大岡山・波動通信グループ

## ■ 環境電磁工学

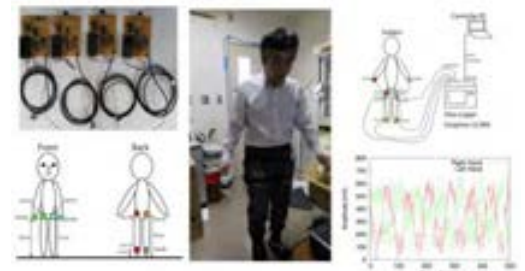
情報通信技術が発達した現代では我々のまわりを多くの電磁波が行き交っています。安全・安心な社会生活をおくるにはこれらの電磁波と存在する全ての電子機器、生体が調和をはかることが重要です。本研究室では主に電磁ノイズの吸収、遮蔽に関する研究を行っています。



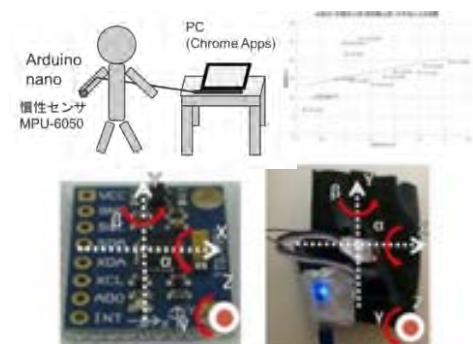
- 無線ボディアエリアネットワークの伝搬チャネルからのアンテナの分離

## ■ ワイヤレスセンサーネットワークを活用した生体情報の収集とヘルスケア、医療、スポーツ等への応用

各種の生体情報(心拍、体温、血圧など)や生体の動作の情報(加速度、角速度など)を取得して分析し、ヘルスケアやスポーツ学習へ応用するための研究を行っています。たとえばセンサーから取得した情報を活用し、動作分析を行うことで健康増進のための動作学習システムへの応用などが可能です。本研究室は基本的なセンサーの開発から無線ボディアエリアネットワークを利用したデータ収集、さらに収集したデータの分析と効果的な利用を行うシステムの開発まで行っています。



- 空中超音波による人体動作の測定



- モーションセンサ付グローブによるフライングディスク投動作解析

## 3 教員からのメッセージ

- 平成28年度から電気電子系の主担当となっています。
- 平成28年度は、博士課程2人、学部生1名、研究生1名が在籍しています。
- 平成29年度から修士学生が在籍する予定です。
- 研究室では、上記の研究テーマについて、手を動かしてものをつくり実験を行う、コンピュータプログラミングにより自作のソフトウェアを開発してシミュレーション計算を行う、数式を使って理論を構築し電波伝搬のモデル化を行う、等の方法により研究をすすめていきます。
- これまでの研究成果についての詳細は東工大リーサチレポジトリ(T2R2)等を参照してください。

## 阪口・タン研究室

第5世代セルラネットワーク (5G)  
ミリ波5Gの応用  
IoT無線センサネットワーク

波動通信グループ  
電気電子コース  
大岡山 南3号館 9階・10階

教授 阪口 啓

准教授 タン ザカン

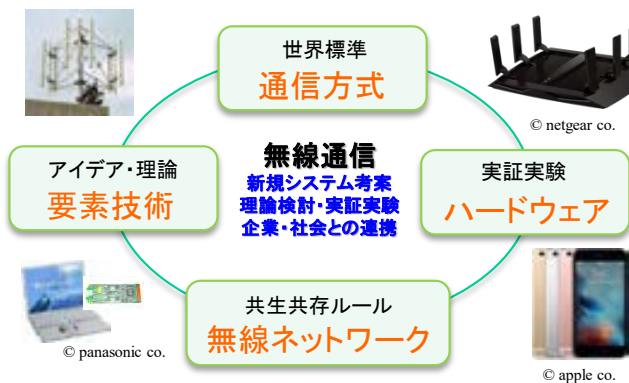
研究分野: 無線通信工学

キーワード: 5G, 無線センサネットワーク, 無線電力伝送, 位置推定

ホームページ: <http://www.sakaguchi-lab.net/>

## 1 主な研究テーマ

携帯電話や無線LANなどの無線通信システムに関する研究・試作・標準化を行っています。



## 第5世代セルラネットワーク(5G)

- ・ミリ波ヘテロジニアスネットワーク
- ・ミリ波エッジクラウド(MEC)

## ミリ波5Gの応用

- ・ミリ波メッシュネットワーク
- ・自動運転のためのミリ波V2X

## IoT無線センサネットワーク

- ・ドローンを用いた超高解像度モニタリング
- ・ワイヤレス給電で駆動するバッテリーレスセンサ

## 2 最近の研究成果

## 第5世代セルラネットワーク(5G)に関する研究

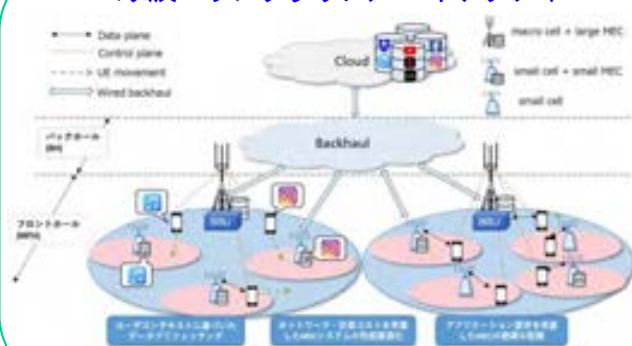
## ミリ波ヘテロジニアスネットワーク

- ・4Gの1000倍のシステム容量を実現する第5世代セルラネットワークのアーキテクチャを提案
- ・ミリ波小セル基地局やエッジクラウドをセルネットワークに統合したヘテロジニアスネットワーク
- ・ユーザの位置などのコンテキスト情報を管理し、それを活用した動的なネットワーク構築を実現するリキッド制御プレーンを考案
- ・2020年の東京オリンピックでの実用化を目指す

## 第5世代セルラネットワークの提案



## ミリ波エッジクラウドアーキテクチャ



## ミリ波エッジクラウド(MEC)

- ・エッジクラウドを用いた5Gセルラネットワークのエコシステムを構築
- ・ユーザコンテキスト情報を利用して、エッジクラウドへデータ/アプリを先送り
- ・低容量なバックホールでもミリ波アクセスをフルに利用できることを確認し、コスト削減への期待
- ・日欧共同プロジェクトMiEdgeにおいて、実証実験を実施



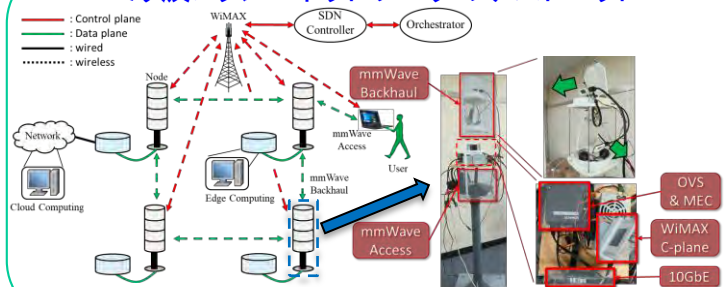
## 大岡山・波動通信グループ

## ミリ波5Gの応用に関する研究

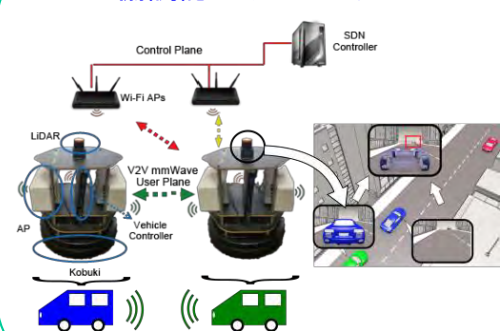
## ミリ波メッシュネットワーク

- 高速なアクセス回線を実現するため、バックホール回線にミリ波を用いることで、多数配置するミリ波小セル基地局間の設置コストの削減を図る
- SDNを活用することにより、動的なトラフィックに対処したフレキシブルなバックホールパスの構築やエッジコンピューティングを実現
- リフレクタアンテナによるカバレッジ拡張とマクロ基地局を用いたSDNネットワーク制御を導入することにより、屋外テストベッド環境を構築

## ミリ波メッシュネットワークのテストベッド



## 協調認知テストベッド



## 自動運転のためのミリ波V2X

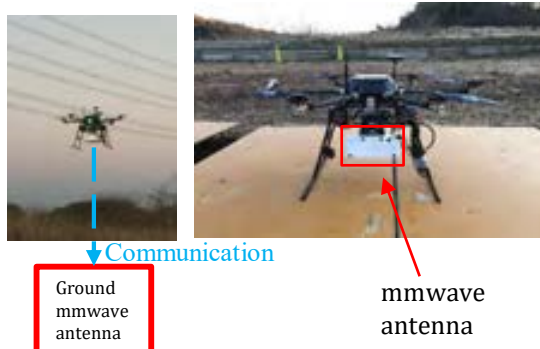
- ミリ波 V2X 通信による協調認知の実現
- コンテキスト情報に基づくSDNネットワーク制御によるダイナミックマップの共有と統合
- 実証実験のためのテストベッド構築

## IoT無線センサネットワークに関する研究

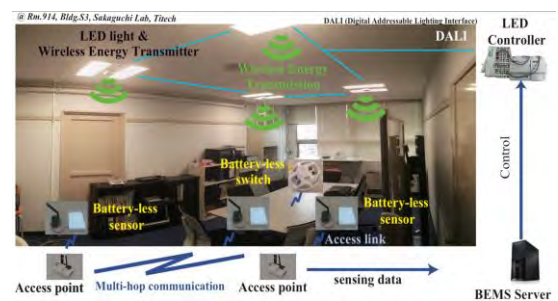
## ドローンを用いた超高解像環境モニタリング

- ミリ波アンテナ搭載ドローンを用いた超高解像環境モニタリング
- 広帯域のミリ波を用いることにより4K非圧縮大容量映像伝送を実現
- 圧縮処理を省いた4K非圧縮映像を伝送することで低遅延伝送の確保を図る

## ミリ波アンテナ搭載ドローン



## LED照明一体型ワイヤレス給電システム



## ワイヤレス給電で駆動するバッテリーレスセンサ

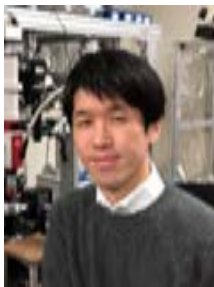
- 電波を用いたワイヤレス給電によって屋内空間でセンサを電線・電池なしで駆動するバッテリーレスセンサネットワークを試作
- バッテリーレス人感センサネットワークを利用したエコ照明制御システムを試作
- 南3号館914号室にLED照明一体型ワイヤレス給電システム実証実験システムを構築

## 3 教員からのメッセージ

本研究室は、現在第5世代セルラネットワークの国際標準化に取り組んでいるため、日本のIT企業だけでなく世界の業界団体や研究機関と協力し研究開発を進めています。よって本研究室は、語学力を活用したい学生、世界がどうなっているのかを間近に感じたい学生には最適と思われます。また本研究室には920MHzや60GHzなどの無線局があり、実際の電波を使って無線通信の実験を行うこともできます。無線通信システムの研究・試作・標準化に携わってみたい方は是非本研究室へお越し下さい。



## 庄司研究室

異種材料集積技術を用いた  
光集積回路

波動通信グループ  
電気電子コース  
大岡山・S9-904

准教授 庄司 雄哉

研究分野: 光回路工学、電磁波回路

キーワード: 光ファイバ通信、光集積回路、オンチップ光配線デバイス

ホームページ: <http://mizumoto-www.pe.titech.ac.jp/index-j.html>

## 1 主な研究テーマ

高機能な光波回路の実現を目指して、光集積回路の開発をメインテーマとして研究を行っています。特に、光アイソレータと光能動素子の集積化、シリコン光回路を中心とする光デバイス集積化による高機能な光回路の開拓、およびその技術を応用したオンチップ光配線用波長選択スイッチの製作といった研究を推進しています。

## 2 最近の研究成果

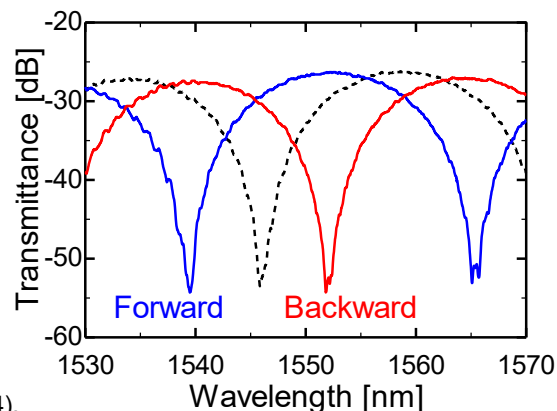
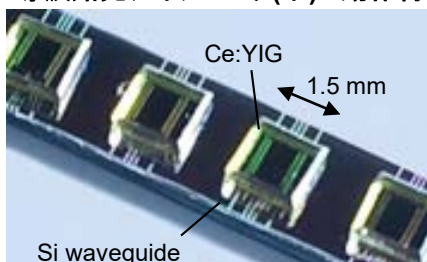
高機能な通信システム・光信号伝送システムを構築するために、光回路の高機能化が求められています。高機能な光回路の形成には、光源である半導体レーザ、光波制御用の光変調器、光スイッチ、合分波器など、多種多様な光デバイスが必要であり、多くの光回路デバイスを一体集積化した光集積回路の開発が重要な鍵を握っています。

光アイソレータは、半導体レーザや光増幅器などの光能動デバイスへの反射戻り光の再入射を防止し、能動デバイスの安定動作に必要な不可欠な光デバイスです。また、光回路中において不要な逆方向伝搬を防ぎ、光回路を所期の特性で動作させるために重要な働きをします。光集積回路の構成に必要な不可欠な導波路型光アイソレータを開発するとともに、光アイソレータを半導体レーザや他の光回路デバイスと一体集積化する技術の開発を進めています。特に、光アイソレータを実現するためには磁気光学ガーネットが必要不可欠で、半導体レーザなどの光能動デバイスと光アイソレータを一体集積化するためには、半導体上に異種結晶・磁気光学ガーネットを一体集積する技術を開発することが重要な鍵となります。本研究室では、異種結晶を直接貼り合わせるダイレクトボンディング法を開発して、これを実現しています。

## ■ 集積型光アイソレータ

集積化を達成するために、光アイソレータの形成に必要な磁性ガーネットを半導体導波路に直接接合する技術(表面活性化直接接合)を開発し、光アイソレータ集積型半導体レーザの開発をすすめています。また、光回路の小型化やSi-LSIの光配線で注目されているシリコンフォトニクス用の光アイソレータの開発も進め、シリコン光回路としては世界初の光アイソレータの動作実証に成功しています[1]。その消光比や動作帯域では世界最高水準を達成し、当分野をリードする研究を行っています[2,3]。また、これを基に、シリコン光集積回路の開拓も進めています。

Si導波路光アイソレータ(下)と動作特性(右)



[1] Y. Shoji, T. Mizumoto, et al., APL, 92, 071117 (2008).

[2] Y. Shirato, Y. Shoji, T. Mizumoto, OFC 2013, OTu2C.5..

[3] Y. Shoji, Y. Shirato, T. Mizumoto, JJAP, 53, 022202 (2014).

## 大岡山・波動通信グループ

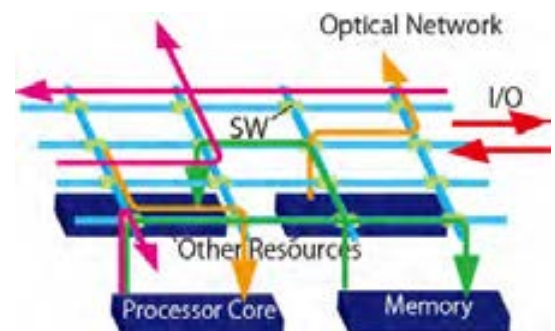
近年スーパーコンピュータやデータセンターにおける処理容量の増大のため、チップ間やボード間といった短距離の光通信応用に対する需要が高まっています。これまでは、単に電気配線をシリコンなどの光導波路へ置き換える研究が進められてきましたが、光導波路は電気配線に比べて回路の占有面積が大きいため、光信号の波長多重技術が重要となります。（波長多重技術を用いると、一本の光導波路に複数の光信号を伝送することができます。）

こうしたオンチップ光配線の次段階として考えられているのが「オンチップ光ネットワーク」の構想です。現在検討されている光配線がポイント・ポイント間の一対一の通信であるのに対し、オンチップ光ネットワークではチップ（またはボード）上にメッシュ状のネットワークノードを構築し波長単位で信号の伝送先を割り当てることで、CPUやメモリ間の通信において柔軟かつ安定な信号伝送を実現できます。このような背景をふまえて、シリコン基板上に集積可能な波長選択光スイッチを提案し製作を行っています。

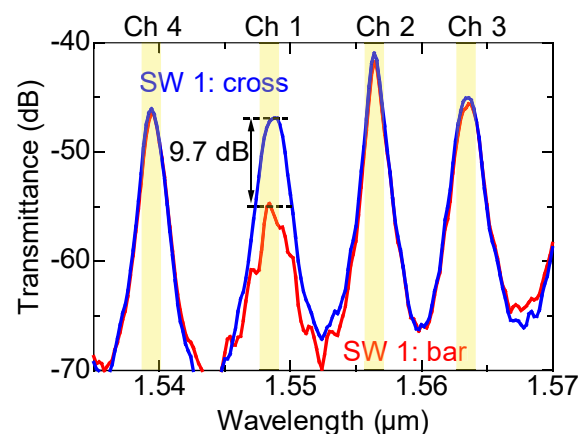
### ■ オンチップ光配線デバイス

シリコン基板上で波長多重された光信号を、波長ごとに経路選択し分配する機能を備えた波長選択スイッチの製作を行っています。特徴として、リング共振器による波長分波とマッハツェンダー干渉計による経路選択により、低いクロストークレベルの伝送特性が期待されます。

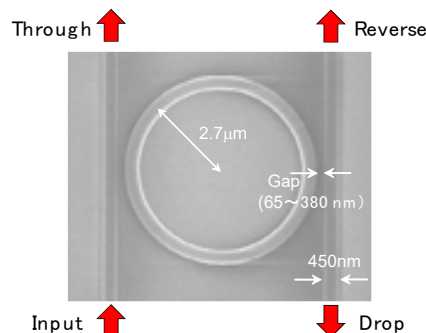
これまでの成果として、シリコン細線導波路を用いて波長選択スイッチを作製し、4チャンネル波長毎のスイッチング特性の実証に成功しています[4]。リング共振器は、リングの直径で分波する波長間隔(FSR)を設計し、バス導波路との結合の強さでフィルタとしてのシャープさが変化します。本デバイスでは、波長1550nm帯の信号に対し、8チャンネル（波長間隔:4nm）の信号分配をターゲットとしており、将来的には40チャンネル（波長間隔:0.8nm）までカバーする動作を目指しています。



オンチップ光ネットワークの概念図



シリコン波長選択スイッチのスイッチング特性の測定結果



シリコン細線導波路を用いた微小リング共振器のSEM像 [4] K. Miura, Y. Shoji, T. Mizumoto, JJAP, 55, 068001 (2016).

### 3 教員からのメッセージ

光技術は、光ファイバによる長距離信号伝送にとどまらず、ユーザへのアクセス系も含めた通信システムで広く使われる技術として発展を続けています。そして、コンパクトな光伝送路や光配線で、高速・大容量な信号伝送が可能であるという光信号伝送の特徴を活かして、コンピュータ間、コンピュータ内のボード間、ボード内のチップ間の信号伝送へ導入されつつあります。さらに、チップ内の信号伝送も光化するシリコンフォトニクスの研究開発が加速されています。

このような背景の中で、光信号を適切に制御し、処理する光回路の機能性を高めることはますます重要になってきています。本研究室は、光デバイスの集積化によって機能集積化された光回路の開発を目標に研究を行っています。研究テーマは、これに関する内容を包含しており、最近の修士研究テーマは「シリコン導波路型光サーキュレータの研究」、「導波路型光アイソレータ製作のための異種結晶ダイレクトボンディングに関する研究」、「自己保持型光スイッチに関する研究」、「オンチップ波長選択スイッチに関する研究」です。わくわくするような研究がやりたい人、好奇心旺盛な人、大歓迎です。



# 西方研究室

## 環境電磁工学(電波吸収、電波遮蔽、電磁波源推定、伝導雑音対策、生体EMC)、高周波材料評価、空間音響



波動通信グループ  
電気電子コース  
大岡山・W9-818

准教授 西方 敦博

研究分野: 環境電磁工学(EMC)、高周波材料評価、空間音響  
キーワード: 電波吸収、電波遮蔽、電磁波源推定、伝導雑音対策、  
生体EMC、導波管法、音源定位

ホームページ: <http://www.ns.cradle.titech.ac.jp/>

### 1 主な研究テーマ

IT化やモバイル通信の発展の影で、電子機器・通信機器の正常な動作を保つための努力が払われています。不要電磁波は目に見えませんが、その対策なしに現代社会は成り立ちません。電波の安全性の確保の問題もあります。当研究室では不要電磁波を抑える・遮る・突き止めるための新しい技術を研究しています。関連して、生体に電波が及ぼす熱影響、高周波材料評価技術も研究しています。また、身近な波である可聴音波の音源推定も扱っています。

- ・ マイクロ波帯～ミリ波帯における複素誘電率・複素透磁率の導波管測定法
- ・ 人工媒質を用いた電波の吸収と遮蔽、能動的伝導雑音対策
- ・ 電磁波および音波の波源推定

★当研究室は、大岡山西9号館W棟にあります。

### 2 最近の研究成果

#### ■ 導波管貫通法による材料定数測定

複素誘電率・複素透磁率の測定法として、方形導波管内部を横断方向に棒状サンプルを貫通させる導波管貫通法を提案しています。この方法が従来の方法と比べて優れている点としては固体、液体、粉体を問わず測定ができ、サンプルの着脱が容易、また比較的少量のサンプルで測定が可能です。この方法を用いて、 $-40^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$ という広い温度範囲での複素誘電率・複素透磁率の測定を実現しました(図1)。この測定法は、自動車の衝突防止レーダが広い温度範囲で安定に動作するための電波吸収材料の開発に応用されています。図2は、どこにでもある標準物質としての水の複素比誘電率を測定した結果(ドット)であり、報告されている周波数分散式の値(実線)と一致することを確認したものです。



図1 導波管貫通法の温度可変測定系

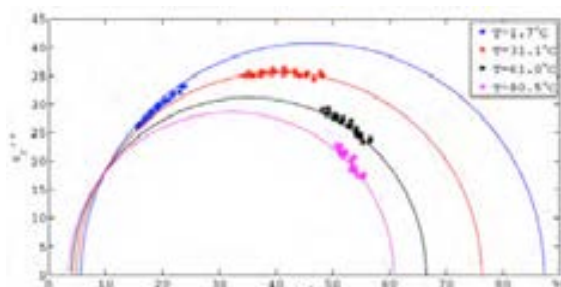


図2 水の複素比誘電率測定結果



図3 円形導波管TE01モード変換器の内部

#### ■ 円形導波管TE01モードを用いた複素誘電率の非破壊測定

平板状または厚い材料の複素誘電率を非破壊測定するために、円形導波管のTE01モードを用いる導波管プローブ法を提案しています。この方法では、円形導波管の端部にサンプルを押し当てて反射係数を測定し、その値から複素誘電率を算出します。この方法の利点は、現在広く用いられている同軸プローブ法の弱点である隙間の影響を抑えられることです。



## 大岡山・波動通信グループ

本方法を実現するカギは、純度の高い円形TE<sub>01</sub>モードを発生させるモード変換器の設計です。図3は方形導波管から2分岐を繰り返す16分岐立体回路の内部構造です。この立体回路によって、円形導波管にモード純度の高い電磁界を発生させ、かつ装置そのものが低反射であることを実現しました。図4にモード変換器の外観を示し、図5に汎用基板材料FR4の測定結果を示します。

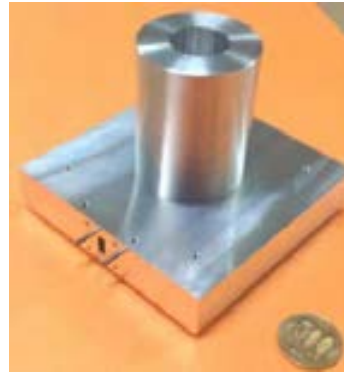
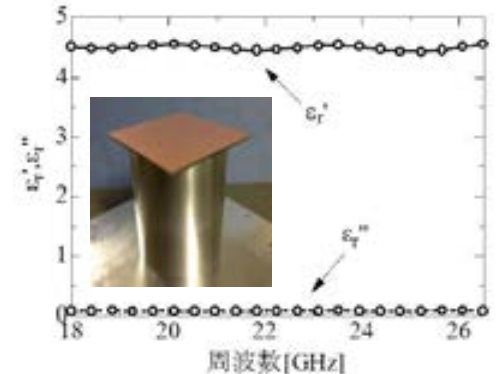
図4 円形導波管TE<sub>01</sub>モード変換器

図5 FR4基板の複素比誘電率の測定結果

## ■ 点音源推定、双極子電磁波源推定

ヒトは2つの耳で、音を聴くだけでなく音の出所を知るという「音源定位」を行うことができます。これを機械に行わせるための計算アルゴリズムを研究しています。図6は、ダミーヘッドというヒトの頭部型のマイクロホンで取得した2チャンネル音声から音源位置を推定した結果を表しており、おでこの左側の赤い領域に波源があるらしいと推定されています（実際にその中央付近に音源があります）。これが実用化されれば聴覚の補助や感覚代行、ロボット用聴覚、遠隔存在感などへの応用が期待できます。一方、2つの耳を2つのアンテナに置き換えると電磁波源の推定が可能です。図7は2つのアンテナを一体化した2ポートアンテナとそれを用いた電気双極子波源の推定結果の一例です。電波の出处が目に見えるようになれば、不要電磁波対策のための強力な道具となることでしょう。

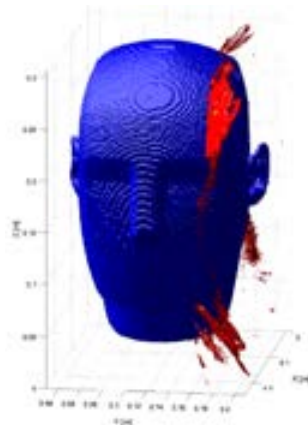


図6 ダミーヘッドによる点音源推定

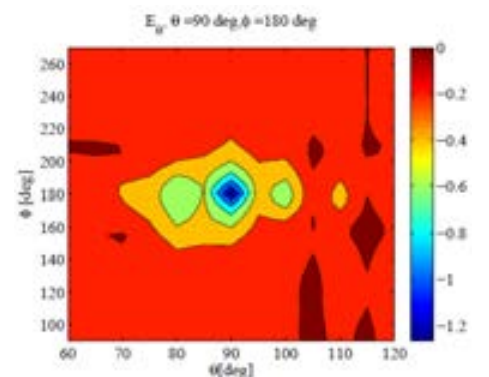


図7 2ポートアンテナ(左)とそれを用いた電気双極子波源の推定結果(右)。青い領域に波源があると正しく推定されている。

## ■ ミリ波帯における生体EMC実験

ミリ波は波長が短く直進性が強いいため、焦点を結ぶと高い電力密度が生じます。今後ミリ波による高速通信やセンシングが普及していくうえで、生体の安全性を確保するための基礎データが求められています。図8は60GHzミリ波の集束ビームを手のひらに当てたときの閾値(気が付くレベル)をボランティア実験によって測定している様子です。人体はミリ波をよく吸収する材料でできているため、体表面から浅い領域で発熱し、比較的小さな電力でも暖かいと感じます。

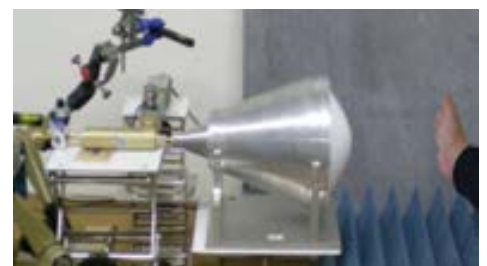


図8 60GHzミリ波の掌へのばく露実験

## 3 教員からのメッセージ

上記の他にも人工媒質による電波吸収体などの研究も行っています。EMCはどちらかというと縁の下の技術領域ですが、課題の宝庫でもあります。この領域に新規アイデアをつぎ込んでブレークスルーを実現するために、一緒に研究しませんか。電磁波や音波などに興味がある方は、ぜひコンタクトをとって見に来てください。

## 西山研究室

次世代光通信・光信号応用のための  
光デバイス/光集積回路、極低電力  
半導体レーザ、Siフォトリクス

波動グループ  
電気電子コース  
大岡山: S9-701

准教授 西山 伸彦

助教 雨宮 智宏

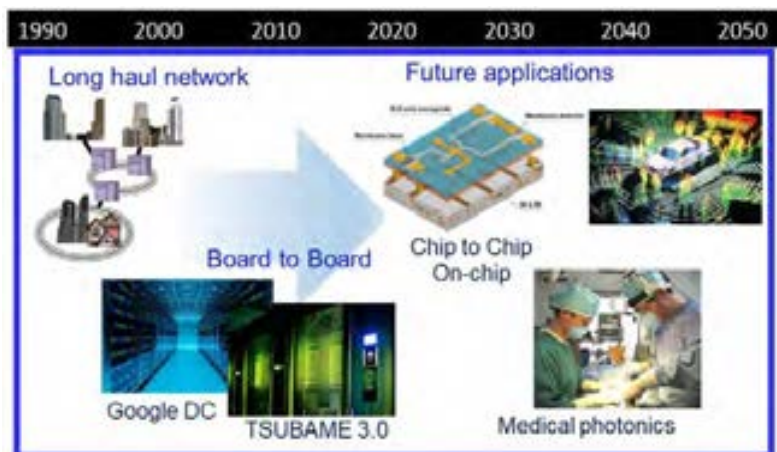
研究分野: 光エレクトロニクス

キーワード: 光通信、光インターコネクション、光レーダー、半導体レーザ、Siフォトリクス、異種材料接合、メタマテリアル、トポロジカル

ホームページ: <http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/>

## 1 主な研究テーマ

人工知能やIoT (Internet of Things) などの言葉をよく耳にするようになりました。この発展を支えているのは、半導体レーザをはじめとする光デバイス・ファイバ通信技術です。光の高速性を利用した並列計算が欠かせないからです。光ファイバ通信と光ファイバ通信用半導体レーザが世界で初めて東工大で実現されて以来、大陸間無中継伝送を利用したインターネットを生み、家庭やキャンパスにまで浸透し、大規模計算サーバにも当たり前のように取り入れられています。その間、様々な技術展開があり、常にその発展を支えてきましたが、今、通信だけでなく自動車自動運転用光レーダーなど、新たなフィールドへの挑戦が始まっています。新製造技術や物理概念も生まれており、探求は尽きることがありません。



そのような背景のもと、当研究室では、LSI同士、さらにはトランジスタ同士をつなぐオンチップ光配線までを視野に入れ、光源である半導体レーザを中心とした**次世代の通信用半導体レーザ・光集積回路**の研究開発を行っています。これまでLSIの微細化・高密度化とともにムーアの法則に従って向上してきたプロセッサの処理能力は、電気配線の伝送遅延および消費電力の急激な増大により限界に近づきつつあります。こうした電気配線による伝送限界を解消する技術として、シリコンプラットフォーム上光配線が注目を集めています。その実現のための基幹技術となるのは、**微細加工技術と異種材料接合技術**（特に普通ではくっつくとは思えないものをくっつけてしまう）。これらの技術は世界的に見てトップクラスを維持しており、学生が自ら利用・研究できます。このコア技術を元に、自動運転車などにむけた**光レーダー用チップ・システム**などにも展開しており、自分で作ったデバイスにより物体測定も可能です。これらのテーマは世の中で実際に利用してことを目的とし、企業との共同研究も積極的に行っており、企業の研究員とともに、研究を進めます。また、**メタマテリアル・トポロジカル**といった新たな物理概念を利用した光デバイスの提案により、今までになかった機能の実現を目指すなどさらなる将来を見据えています。



本研究室では、自ら提案したデバイスを一から作製できます



通信の伝送実験を行っているメンバー

研究テーマは、新規の人工材料および素子から「極めつけ」の性能を有する光デバイスと集積回路まで、**"For the first time"**あるいは**"A record Low/High"**と言えるような目標を設定できる課題を念頭に、学生諸君と決めています。研究室の先輩の成果の一例を以下に挙げます。

- ・ **世界初**の波長1.5-1.6ミクロン帯で連続動作する半導体レーザ
- ・ **世界初**の波長可変半導体レーザ
- ・ **世界初**の半導体薄膜レーザ
- ・ **世界初**の波長1.3ミクロン連続動作する半導体トランジスタレーザ
- ・ **世界初**の3次元シリコン積層光回路

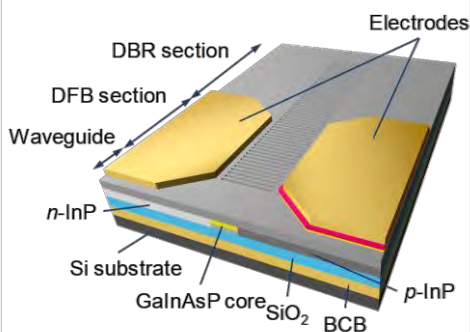


## 大岡山・波動通信グループ

## 2 最近の研究成果

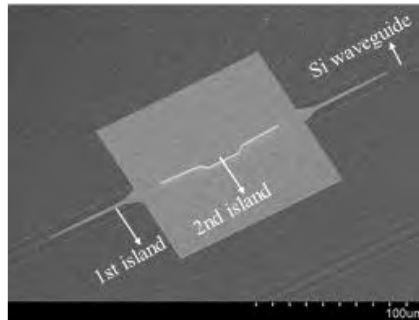
毎年、多くの学生諸君が卒業しており、それぞれが、研究成果を国内学会、国際会議、英文学術誌に発表しています。詳細は下記の研究室ホームページで確認してください。

ホームページ: <http://www.pe.titech.ac.jp/Arailab/>



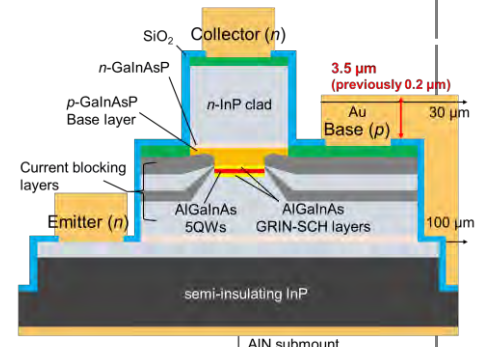
## 半導体薄膜レーザ

*Semiconductors and Semimetals*,  
Vol. 99, 71 (2018).



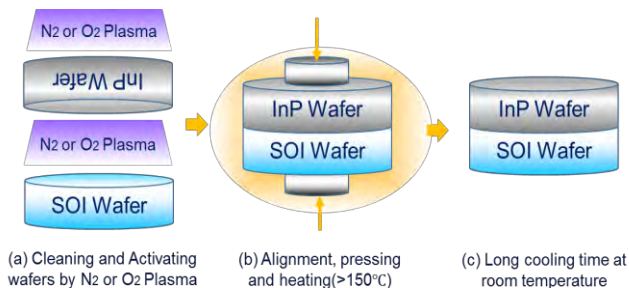
## III-V/InP ハイブリッド光回路

*Japanese Journal of Applied Physics*,  
Vol. 57, No. 9, 094101 (2018).



## トランジスタレーザ

*Japanese Journal of Applied Physics*,  
Vol. 57, No. 1, 012102 (2018).



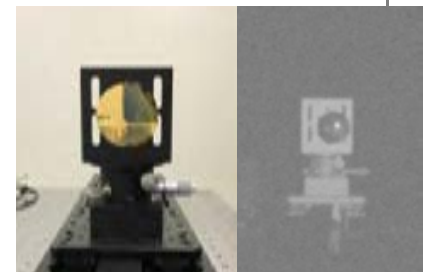
## 常温接合技術

*Proc. Compound Semiconductor Week 2018*,  
Fr15PP-Opt (2018).



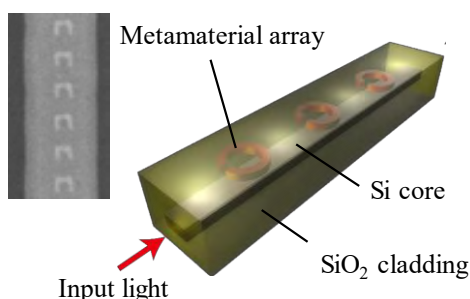
## CoW 接合技術

*Proc. ICMOVPE-XIX*,  
5C-3.4 (2018).



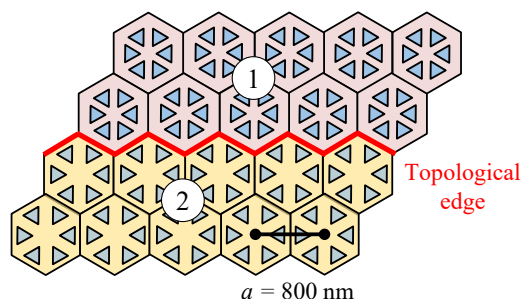
## コヒーレント光レーダシステム

*Proc. CLRC 2018*,  
P1 (2018).



## メタマテリアルフォトンクス

*J. Optical Society of America B*,  
Vol. 35, No. 4, pp. 797 (2018).



## トポロジカルフォトンクス

第66回応用物理会春季学術講演会 (2019)  
11a-W631-4, 11a-W631-6, 11a-W631-7



## 光渦多重伝送技術

*Proc. OFC 2019*,  
M1C.7 (2019).

## 3 教員からのメッセージ

わたしたちも学生時代から、独自の着想やアイデアを基に達成した研究成果を国内学会および国際会議で発表したり、英文学術誌に論文掲載する機会に恵まれ、「学生でも世界初や世界一といえる研究発表ができる」ことに驚き、感激しました。修士課程学生で欧米の国際会議に参加して発表する機会が持てるよう研究・費用両面からサポートしていますので、みなさんにも是非同じような経験をして頂き、大学院修了時には一回り大きくなって巣立って欲しいと願っております。

国際会議だけでなく、博士課程学生では海外の研究室への留学の独自の費用的サポートも行っています。複数の企業の研究者と共同研究、会社あるある話などを含めた研究を離れた楽しい交流も積極的に行っており、卒業時には分野の研究者に名前を覚えてもらっている学生も多いです。



# 廣川研究室

# 世界にない新しい構造の 平面アンテナの研究



波動通信グループ  
電気電子コース  
大岡山・南3-907

教授 廣川 二郎 助教 戸村 崇  
研究分野: 平面アンテナ, 電磁界解析  
キーワード: アンテナ, 無線通信, 電磁波  
ホームページ: <http://www-antenna.ee.titech.ac.jp>

## 1 主な研究テーマ

- ミリ波導波管型高効率平面アンテナ
- アンテナ設計のための高速電磁界解析
- シリコンチップ厚膜誘電体上ミリ波高効率小型アンテナ

## 2 最近の研究成果

### ■ミリ波導波管型高効率平面アンテナ

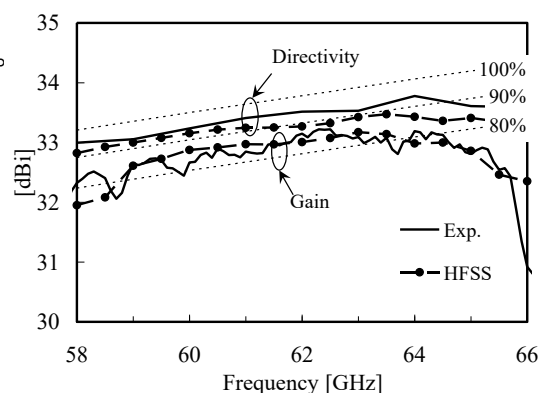
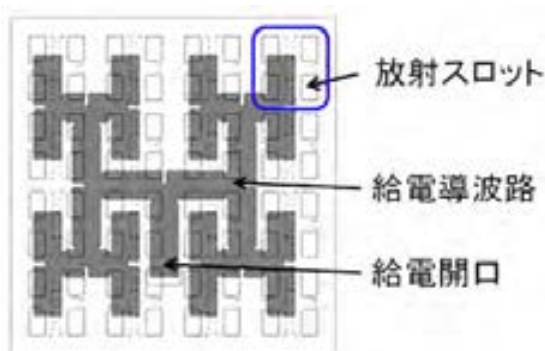
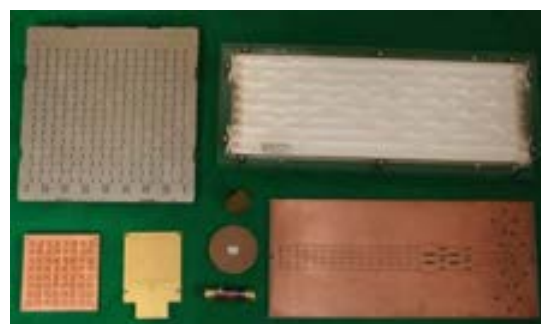
ミリ波は、周波数が30GHz～300GHzで波長がmmオーダの波です。10Gbpsを超える高速な情報伝送をミリ波で行うためのアンテナを研究しています。

電磁波のふるまいはマクスウェルの方程式により決まり、波長で規格化した大きさが同じであれば同じふるまいをします。しかし、ミリ波帯アンテナを実際に作ろうとした場合、機械加工の限界や材料の損失などの問題が電気特性の問題とは別に出ってきます。我々は右の写真に示すように、ミリ波帯での大きさで実際にアンテナを試作し、これらの問題を総合的に解決することを特長としています。

一例を示します。右上の写真の左下にある銅でできた60GHz帯の導波管アンテナの構造は右の図のようになっています。黒い四角で描かれた放射スロットを灰色で示した下層に置かれた給電導波路ですべて同振幅・同位相で励振しています。約0.02mmの寸法精度を得るために、形状をエッチングした厚さ0.3mmの薄板を10枚重ねて拡散接合して製作しています。金属成形でよく用いられる高価な型が不要なので、この積層薄板拡散接合は、安価で高精度な新しい製造法として期待しています。右下の実線の利得の実験値に示すように32dBi以上の高利得かつ80%以上の高効率が約5GHzにわたり広帯域で実現できています。

他にも、銅箔付誘電体基板に2列の金属ポストを配列して導波路を構成したポスト壁導波路を用いたアンテナなども検討しています。

多くの企業とも共同研究を行い、固定無線アクセスシステム用や衛星放送受信用として、社会で使われているものもあります。



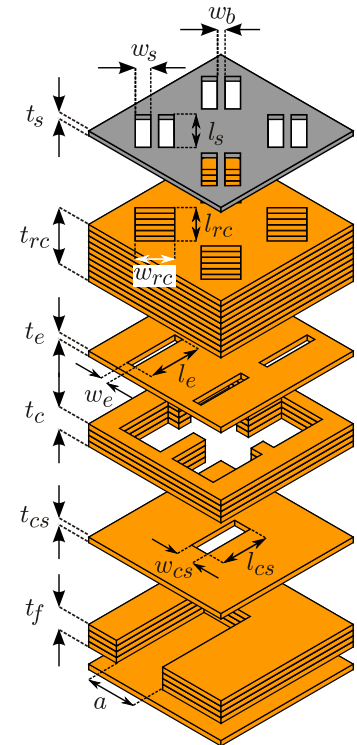
## 大岡山・波動通信グループ

## ■アンテナ設計のための高速電磁界解析

右の図は、前ページ中央の図の青い線で囲まれた放射スロットの構造を表しています。任意形状を解析できる電磁界解析ソフトウェアでも1回の解析に約20分かかってしまいます。放射スロットのパラメータは17あり、それらをすべて変化させて設計するのは非常に時間がかかってしまいます。

この放射素子は、右の図に示すように、6つの領域が組み合わされています。これらの領域はすべて厚さ方向に構造が一様な2次元構造の導波管とみなせます。下から3番目の領域を除き、残り5つの領域は長方形断面ですので、断面形状で決まる電磁界固有モードは三角関数を使って解析的に表せます。しかし、下から3番目の領域はX字型の特殊な断面形状になっており、電磁界固有モードを解析的には表せません。そこで、電磁界固有モードを数値的に求めることとしました。これにより解析時間は約15秒と劇的に短くなりました。17のパラメータをすべて変化させて、約5時間で設計を終了できました。

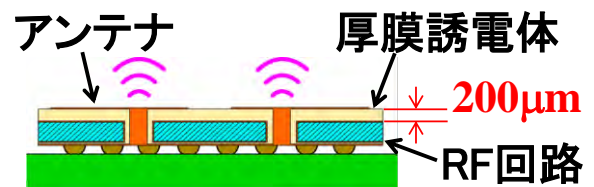
このように、適用できる構造は限られますが、設計に使用できる高速電磁界解析法の研究もしています。



## ■シリコンチップ厚膜誘電体上ミリ波高効率小型アンテナ

60GHz帯において、RF回路チップと一緒に用いる小型アンテナは、RF回路と同一面内にアンテナを設けるオンチップアンテナか、RF回路チップと別体でアンテナを作るオンチップアンテナのいずれかです。オンチップアンテナはアンテナの高さが10 $\mu\text{m}$ と小さいため放射効率が5%程度と低く、オフチップアンテナはRF回路とアンテナの接続が約1dBと大きいです。そこで、右の図のようにシリコンチップに穴を開け、RF回路と反対の面に厚さ200 $\mu\text{m}$ の誘電体層を設けてその上にアンテナを構成することを提案しています。

また、60GHz帯小型アンテナの放射効率を測定する際に、アンテナの利得から換算する方法がほとんど用いられますが、指向性が広く、まわりの影響で指向性にリップルが生じ利得が正確に求められません。そこで、携帯電話端末内のアンテナの放射効率測定に用いられる電波攪拌金属箱により測定し、74%の放射効率を得ました。これにより0.2dBの低損失接続を確認しました。



## 3 教員からのメッセージ

ミリ波帯の高効率平面アンテナに特化し、この分野で世界最先端を走っています。受動素子のアンテナを高効率で実現するためには、損失低減がカギです。はやり流されず、基本を守って研究を行っています。また、将来の製造法の進展を見据えて、金属粉末を用いた3次元印刷などの最新技術を取り込み、ミリ波帯の平面アンテナを実現しています。



## 藤井・表研究室

- ・第5世代移動体通信対応の三次元空間セル構成及びネットワーク連携制御
- ・三次元空間セル構成対応電波伝搬モデル
- ・HAPSセルラシステム



波動通信グループ  
電気電子コース  
大岡山 南3号館 9階・10階

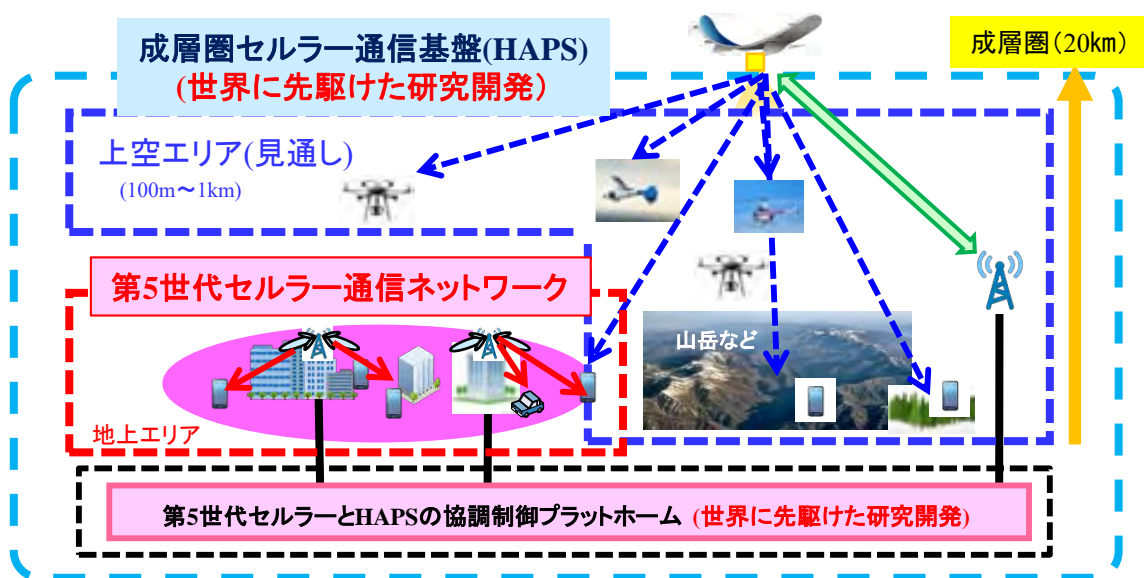
特任教授 藤井 輝也    特任准教授 表 英毅

研究分野: 無線通信工学

キーワード: 5G、三次元空間セル構成、ネットワーク連携、電波伝搬、HAPS

## 1 主な研究テーマ

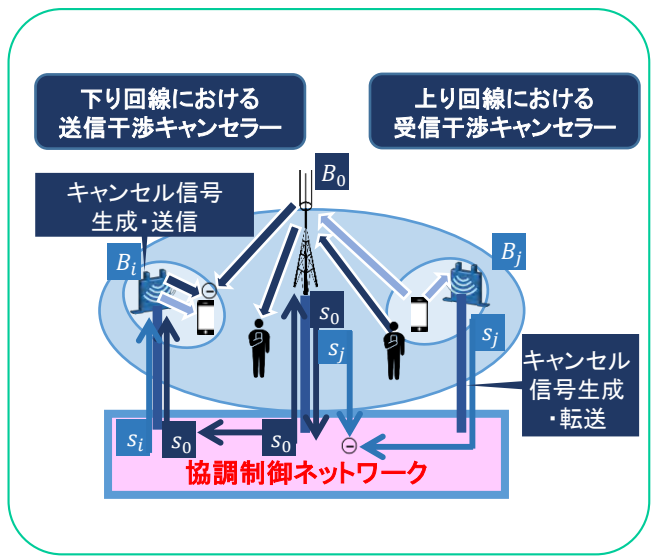
本研究室では、ソフトバンク(株)と共同で第5世代セルラー通信ネットワークと成層圏セルラー通信基盤を協調制御し、通常のスマートフォンを用いて超広域を低遅延でカバーする“三次元空間セル構成”の研究開発を世界に先駆けて実施しています。この技術により、屋外空間(三次元空間)を全て移動通信のサービスエリアにすることが可能となり、その実現に大きな期待が寄せられています。



## 2 最近の研究成果

## 三次元空間セル構成におけるネットワーク連携干渉制御の研究開発

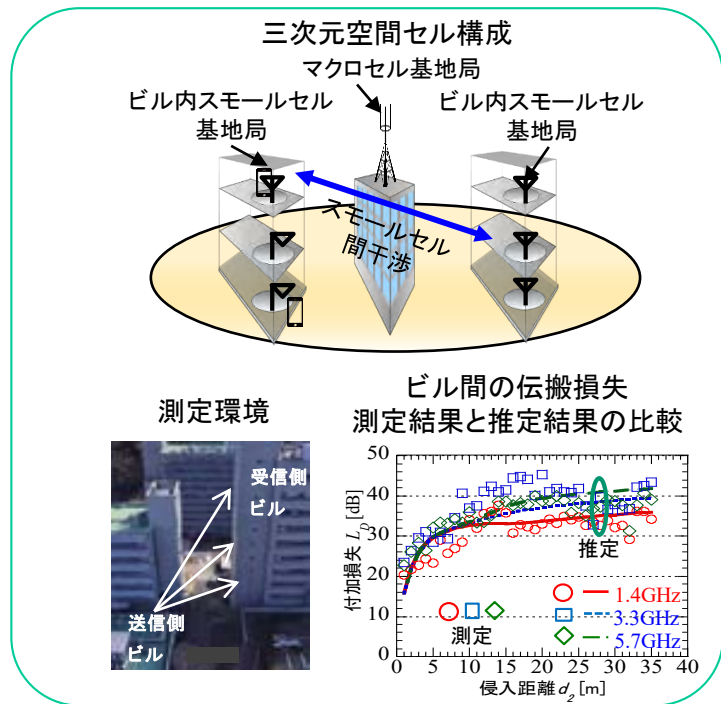
- ・LTE及び第5世代移動体通信を対象としてマクロセル内部に同一周波数を利用するスモールセルを複数設置する三次元空間セル構成において各セルがネットワークを介して連携する、“協調制御ネットワーク”を用いた干渉キャンセル技術を世界に先駆けて発案しました。
- ・下り回線でスモールセル内の端末がマクロセルからの干渉を送信側で抑圧する“スモールセル送信干渉キャンセラー”を、上り回線ではマクロセルがスモールセル内の端末からの干渉を受信側で抑圧する“マクロセル受信干渉キャンセラー”を提案し、評価を行いました。提案技術の適用により、各セルの通信容量(スループット)を大幅に改善できることを明らかにしました。
- ・提案技術を成層圏セルラー通信基盤(HAPS)へ適用する研究を実施します。



## 大岡山・波動通信グループ

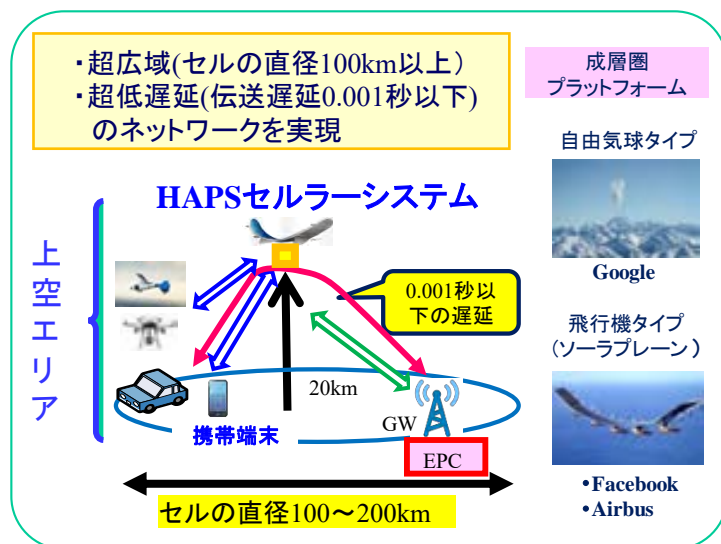
## 三次元空間セル構成における電波伝搬損失モデル化の研究開発

- 三次元空間セル構成を効率よく設計するために不可欠な中高層ビル内に設置したスモールセル間の干渉を高精度に推定する電波伝搬モデル(伝搬損失推定モデル)が不可欠です。
- ビル間の伝搬損失推定モデルの関数形を幾何光学近似を用いた物理モデルにより作成し、それを用いて測定結果を多変量解析して、汎用性のある伝搬損失推定式を世界で初めて開発しました。
- 開発したモデルを無線通信の世界標準機関であるITU-Rに提案する予定です。
- 第5世代移动通信システムで期待されているミリ波帯へ推定式の適用範囲の拡張を図り、この分野のイニシャブを取り続けるため移动通信の全ての周波数に対応できるよう研究を実施する予定です。



## 成層圏セルラー通信基盤(HAPS)の研究開発

- 地上20kmの上空に構築する成層圏セルラー通信基盤(HAPS)を用いて、地上のセルラー携帯端末、上空のドローン等と直接、通信を可能とする“HAPSセルラーシステム”はサービスエリアの拡大、災害時の通信手段として非常に魅力的です。
- 超広域(セルの直径100km以上)、超低遅延(伝送遅延0.001秒以下)の通信ネットワークを実現できます。
- ソフトバンク(株)と共同で、世界に先駆けて、HAPSセルラーシステム(無線中継ネットワーク)実用化に向けた取り組みを実施しています。

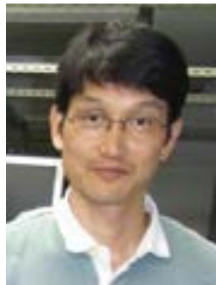


## 3 教員からのメッセージ

本研究室はソフトバンク(株)との共同研講座です。ソフトバンク(株)と共同で、周波数利用率を大幅に改善するセル構成として、高さ方向にもセルを配置する“三次元空間セル構成技術”、屋外の三次元空間を全てサービスエリア化する技術として“成層圏セルラー通信基盤技術(HAPS)”の研究開発を実施しています。また、三次元空間セル構成技術を効率よく設計するためのネットワーク連携制御技術を新たに提案し、世界に先駆けて、ネットワーク連携した三次元空間セル構成技術の研究開発にも取り組んでいます。世界に先駆けた新たな取り組み、それを実現することに関心がある方は是非本研究室へお越しください。



## 植之原研究室

超高速フォトニックネットワーク用光信号  
処理システムと光集積デバイスの実現

波動通信グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・R2-820

教授 植之原 裕行

研究分野: 光エレクトロニクス、光ファイバ通信システム

キーワード: 光信号処理、光信号歪補償、高効率光ノード・スイッチング

ホームページ: <http://vcse1-www.pi.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

光通信システムは長距離・大容量伝送用途として世界に張り巡らされ、インターネット・モバイルネットワークのインフラとして必要不可欠です。しかしながら、信号当たり100Gbps、1本のファイバ当たり10Pbpsを超え、周波数利用効率を向上するための多値変調・マルチキャリア変調方式や、必要な帯域に応じてシステムを変更するフレキシブルなネットワーク構成技術、波形歪を歪量に応じて適応的に等化する技術、効率よく情報を收容する符号化・復号化技術が必須となっています。同時に、高密度集積素子の活用で低消費電力を実現することが求められています。光信号処理技術は、波長多重信号の一括処理や電気／光・光／電気変換の除去、低遅延性が期待でき、その実現を目指して取り組んでいます(図1)。

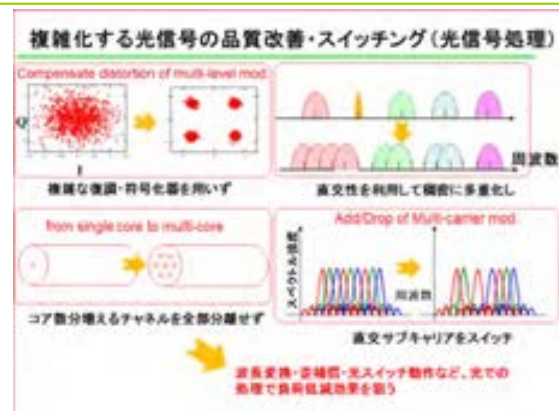


図1 光信号処理技術のコンセプト

## 2 最近の研究成果

## ■光信号処理(光信号歪補償・ラベル識別)技術

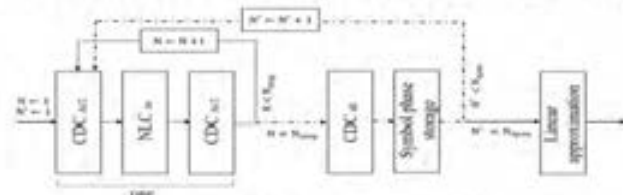
光PSK・QAM信号に対して光ファイバ伝送中の非線形歪を低負荷で補償する逆伝達関数処理の検討を行っている。また受信信号から線形・非線形歪を伝送路を送信器に向かってたどりながら補償計算し、正しい送信信号を推定するデジタル逆伝搬法の考えを利用して、計算地点を間引くことで計算量を減らすと同時に正しい信号を推定できる位相線形推定法についても探索している(図2)。機械学習導入による究極的な性能改善の可能性も模索している。

さらに周波数利用効率向上が可能な直交周波数分割多重(OFDM)信号のサブチャネルをadd/drop可能な光スイッチング技術(図3)、高非線形ファイバ中の四光波混合(FWM)による変調方式・変調ボーレートに対してトランスパレナシーな波長変換を応用した波長デフラグメンテーション技術(図5)、遅延干渉計と先頭ビットプリアンブルを用いた超高速光信号のシリアル／パラレル(SP)変換などの光信号処理技術の実現を目指している。

光OFDMサブチャネル分離回路(図4)、FWM波長変換(図6)、光SP変換については、回路規模を縮小するためのシリコン細線導波路構造の検討を進めている。

## Flow of proposed method

## ・Flow of proposed DBP with linear approximation



$N$ : Steps count variable  
 $N'$ : Spans count variable  
 $N_{\text{step}}$ : Number of steps per one span  
 $N_{\text{span}}$ : Number of target spans

## Dependence of Phase Change

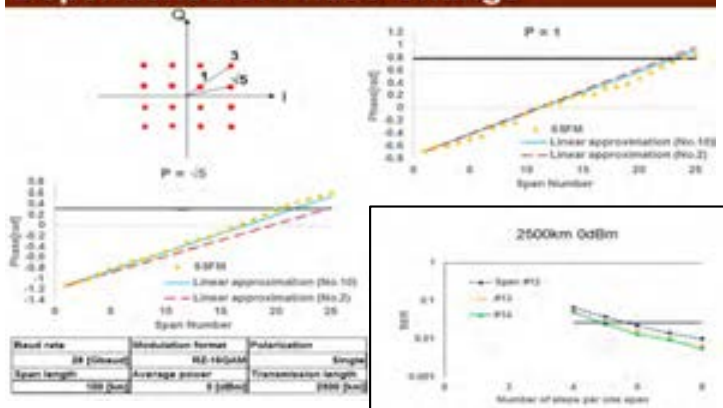


図2 位相線形推定法を用いた光非線形歪補償技術

## すずかけ台・波動通信グループ

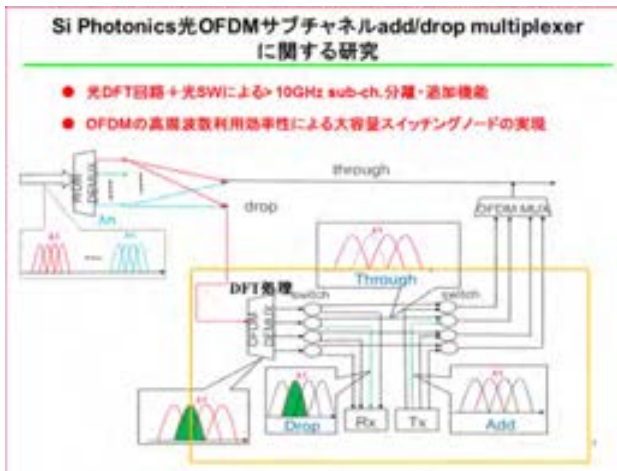


図3 光OFDMサブチャネルadd/drop multiplexer

### ■超高速光ノード／パケットスイッチ・アクセス応用

光OFDMサブチャネル分離回路に意図的に位相シフトを加えることで分散特性を発生させ、線形分散補償を実現するフラクショナルOFDM技術、光スイッチと集積したadd/drop multiplexer(図3)、多ユーザからのRF信号を高密度に收容可能な光アクセス制御技術についての検討を行っている。

また光パスの設定・解放の繰り返しに伴う波長資源の断片化(フラグメンテーション)を光電変換を解さずに解消するデフラグメンテーション技術について検討を進めている。2段コムによるポンプ光発生によって、稠密周波数間隔での波長変換の実現を目指している(図5、図6)。

### ■光信号処理用集積デバイス

光OFDMサブチャネルadd/drop multiplexerを搭載した再構築可能な光分岐挿入装置(ROADM)においては、波長分波・スイッチ・送受信回路の高密度実装が求められる(図4)。また高速光パケットスイッチの超高速ラベル識別回路として光SP変換器を応用する場合、処理ビット数の増加にともない構成要素数が増大するため小型・高密度に作製可能な集積技術が必須である。いずれも各機能をシリコンなどの半導体導波路素子で集積化することによって小型化・機能の高密度実装が可能となる。現在、基本構成要素の試作と機能評価、小型実装を可能とする構成法・偏波無依存動作のための偏波分離回路等の検討を行っている。

光コム・擬似位相整合によるFWM変換効率向上のためのシリコンフォトニクス集積化も検討を進めている。

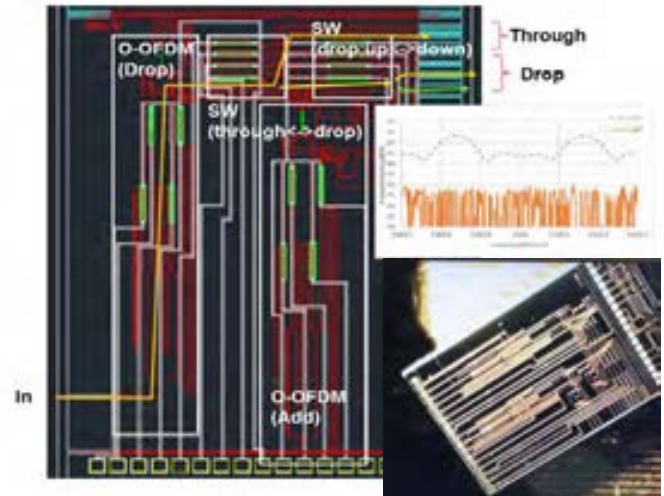


図4 Si photonics集積光OFDMチャネル分離回路のレイアウト・写真・透過率測定結果

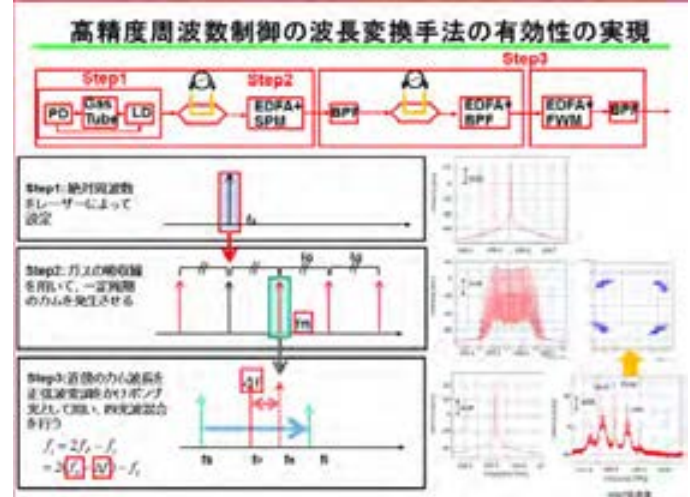


図5 2段コムによるポンプ光を用いた波長デフラグメンテーション技術

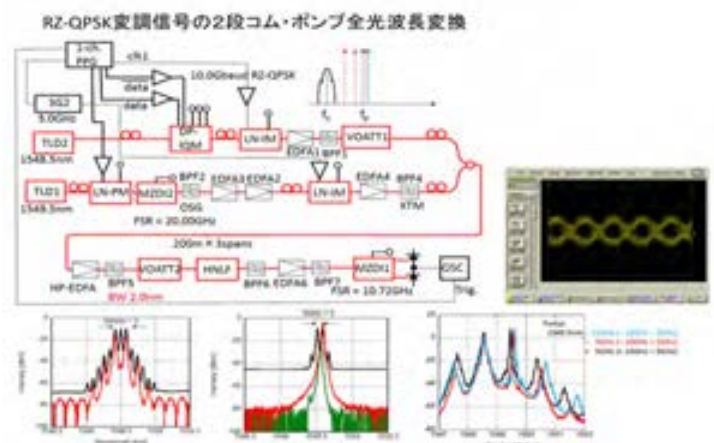


図6 2段コム・ポンプ光を用いたFWM波長変換特性

## 3 教員からのメッセージ

楽しい研究生活を送りましょう！



## 黒澤研究室

## 応用音響システム

・音響放射力アクチュエータ

・高品位オーディオシステム・音響測位



波動通信グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・G2棟614号室

准教授 黒澤 実

研究分野: アクチュエータ、電気音響、音響測位

キーワード: 音響放射力、圧電デバイス、超音波、ロボット、  
高臨場感オーディオ、電流雑音、エコーロケーション

ホームページ: <http://www.kurosawa.ip.titech.ac.jp/>

## 1 研究の概要

電気音響技術の応用となるシステムやデバイスに関する研究を行っている。オーディオシステムの研究は、これまでに顧みられなかった再生音のあり方に関する視点で、音楽では欠かせない和声の再現性に注目している。音響放射力アクチュエータは独自の技術分野確立を目指している。音響測位では独自のデジタル信号処理技術により実時間速度位置計測を実現している。

## 2 研究テーマ

## ■ 音響放射力アクチュエータ

音響放射面から水中に超音波が放射される際に非線形作用による音響放射圧が生ずる。音響放射圧を駆動力源とする、新しい水中での自走型アクチュエータに関する研究開発を進めている。音響放射力アクチュエータは、水中で20cm/s の速度で移動でき、センチメートル～ミリメートルの素子寸法が実現可能である。

現在は、推力発生メカニズムの定量的解析と様々な形態でのアクチュエータ実現に関して研究を行っている。水中を自在に移動できる水中ロボットの実現や、血管内ロボットなど、医療応用をめざした研究開発を進めている。

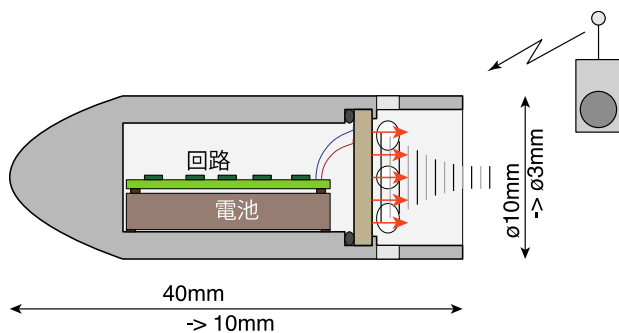


図2. 水中ロボットへの応用

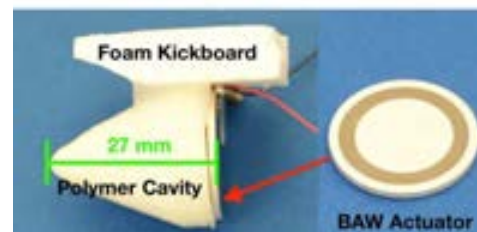
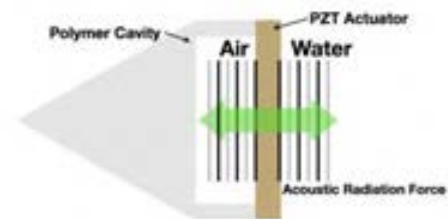
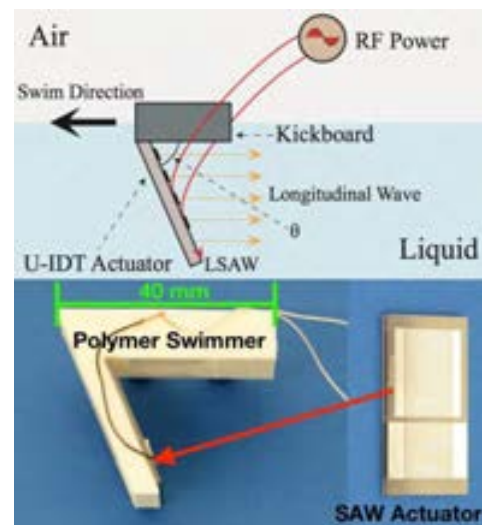


図1. 音響放射力水中アクチュエータ; 弾性表面波素子(上), 厚み振動子(下)

## すずかけ台・波動通信グループ

### ■ 高品位オーディオシステム

進歩した電子回路技術の恩恵を受け、音響信号のデジタルフォーマットは飛躍的に進化を遂げ、広い周波数帯域と高い分解能を実現するに至った。しかし、電気音響機器により再生される音は、現実の音とはひどくかけ離れており、技術進歩の恩恵には浴していない。

高級音響機器や映画館における電気音響機器から再生される音に限らず、館内放送の音、車内放送のアナウンス、テレビの音声など、様々な電気音響機器に共通の問題が存在していると考えられる。特に高解像度画像と共に用いられるシステムにおいては、これまでに無い高臨場感が求められており、電氣的に再生される音の質は大きな問題となっている。

例えば、抵抗器では電流雑音が知られており、抵抗器の中を流れる電流には揺らぎが存在する。この揺らぎが信号に及ぼす影響は未だ検討されたことが無かった。我々はオーディオシステムから、音楽の持つ豊かな和声が再生されることを目指して研究を進めている。

### ■ エコーロケーションシステム

超音波を対象物に放射し、反射波を信号処理することで対象物の位置や動きといった空間情報を取得できる。受波信号の高速な信号処理を実現するため、1ビット $\Delta\Sigma$ 変調信号を用いた簡便な相互相関処理方法を開発している。1ビット信号処理回路をFPGAに実装し、実時間で対象物体の3次元的な位置と速度ベクトルを検知するシステムについて研究を進めている。

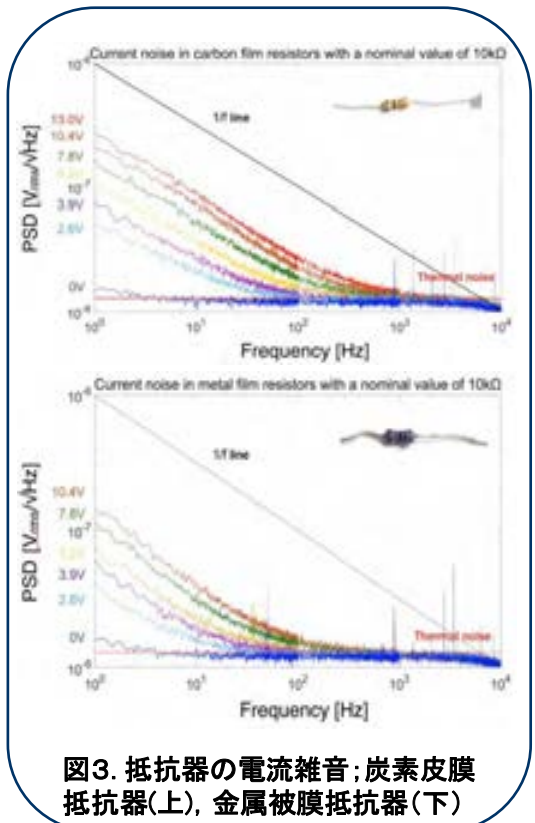


図3. 抵抗器の電流雑音；炭素皮膜抵抗器(上)、金属被膜抵抗器(下)

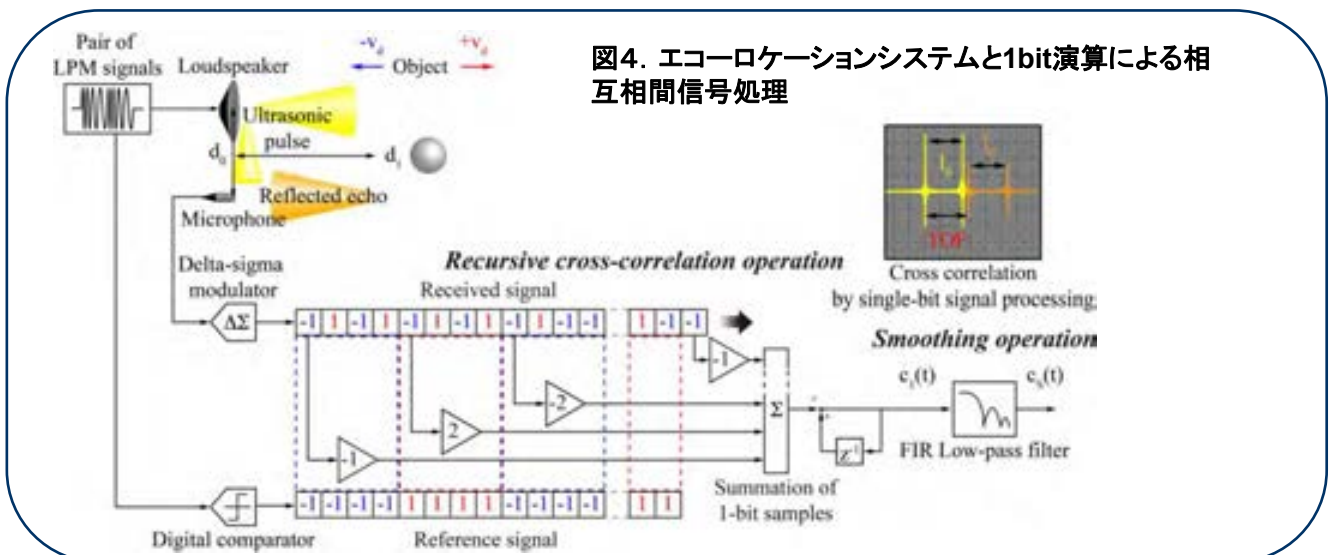


図4. エコーロケーションシステムと1bit演算による相互相関信号処理

## 3 教員からのメッセージ

自分の手を動かして何かを作り上げる喜びと、成功したときの感動を大切に。そのために自ら考え学ぶ努力を。そして世の中に役に立つ技術とは何かを考え実践しよう。研究においてはたくさんの失敗を経験することが大事である。そしてその失敗の原因が何であったのかを突き詰めて、原因と結果の因果関係を明らかにできる能力と表現力を培ってほしい。



## 小山研究室

面発光レーザフォトンクス、  
光ネットワークデバイス、光集積回路、  
光センシング用デバイス

波動通信グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・R2棟603号室

教授 小山 二三夫    助教 坂口 孝浩    助教 中濱 正統

研究分野: 光エレクトロニクス、半導体レーザ、光通信、光センシング  
キーワード: 光通信ネットワーク、半導体レーザ、半導体光集積回路、光マイクロマシン、フォトリソナノ構造、レーザレーダ、医療応用フォトンクス  
ホームページ: <http://vcSEL-www.pi.titech.ac.jp/index-j.html>

## 1 主な研究テーマ

次世代光通信ネットワークや光センシングを切り拓く新しい光デバイスの開発を目指しています。マイクロ／ナノ構造の光共振器、光マイクロマシン、中空光導波路、スローライト導波路、サブ波長回折格子、金属ナノ構造などの新構造を用いて、高性能半導体レーザ、波長可変光素子、光信号処理デバイス、レーザレーダ用ビーム掃引素子などの光デバイスとその集積化の研究に取り組んでいます。

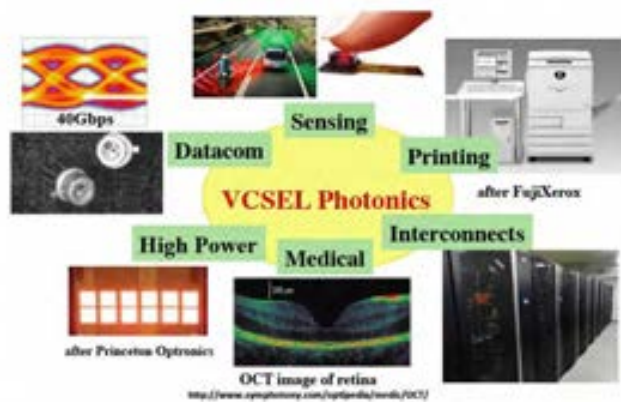


図1 面発光レーザフォトンクスと応用分野

## 2 最近の研究成果

## ■ 超高速面発光レーザフォトンクス

本学で生まれた面発光レーザの極限性能追求とその大規模集積化の研究を進めています。スパコンやデータセンターの装置間・装置内における光インターコネクトへの適用が急速に進められています。近い将来100Gbps超の高速化のニーズは大きいものの、現状技術は10Gbpsの伝送速度に留まっています。本研究室では、図2と図3に示すように、面発光レーザに微小共振器を横方向に集積することで、光学的なフィードバックにより変調帯域を数倍以上に拡大できることを見出しました。通常の半導体レーザでは、変調速度は、光と電子の相互作用による緩和振動周波数と素子の浮遊容量による帯域制限で律速されますが、本手法では、その変調特性を光学的に制御するものであり、材料などの特性で律速される速度限界を打破できます。一方、面発光レーザに光変調器を集積した変調器集積光源の開拓にも取り組んでいます。横方向に結合・伝搬する光の群速度は、通常の伝搬光に比べて、約1/50以下まで減速した光、すなわちスローライトであることがわかっています。1V以下の微小変調器電圧で10  $\mu$ m程度の超小型光変調器を実現しています。これらの研究は、100Gbps級の高速変調を可能にする超高速面発光レーザ光源を可能にします。

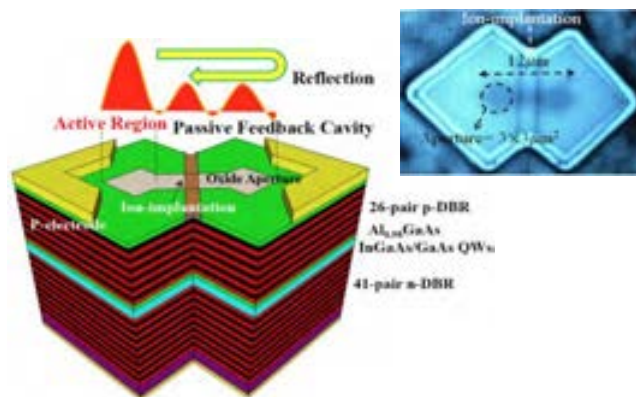


図2 結合共振器面発光レーザ

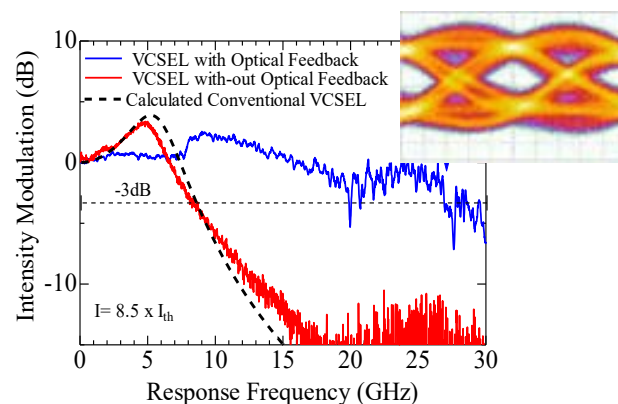


図3 結合共振器面発光レーザの高速変調

## すずかけ台・波動通信グループ

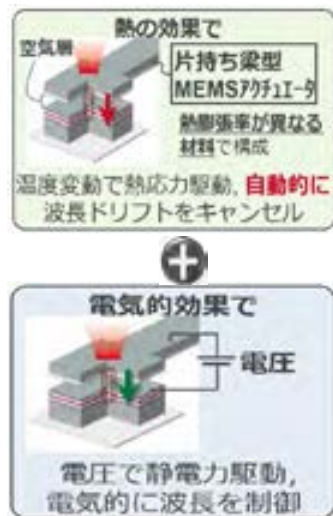


図4 波長温度無依存化と波長可変動作の原理

### ■ 光マイクロマシンと波長可変面発光レーザ

微小機械(マイクロマシン)を半導体レーザに集積して、連続的に波長を広範囲に掃引する機能や波長を自在に制御する新しい半導体レーザの実現に取り組んでいます。例えば、微小な反射鏡を中空に浮かせて、そこに電圧を印可することにより、静電力で鏡の位置を変化させて波長を連続的に動かすことが可能です。また、熱応力による微小アクチュエータを集積して、外部温度変化に対しても絶対波長の動かない新しい半導体レーザ“アサーマル半導体レーザ”を世界に先駆けて実現しています。この新しい光源は、波長多重化による大容量光インターコネクトや高速波長掃引による光干渉断層像などの生体イメージングを可能にします。

### ■ スローライト構造体と高精細ビーム掃引素子

周期構造による光導波路を用いて、光の群速度、位相、遅延時間などを制御する新技術の開拓に取り組んでいます。周期構造クラッド層を含むブラッグ反射鏡光導波路を用いることにより、光の群速度を大幅に低下することが可能です。本研究室では、巨大構造波長分散により大きなビーム掃引角を可能とする掃引デバイスを提案し、1,000を越える解像点数(非機械式では世界最高性能)を実現しています。面発光レーザとの集積化により、自動運転用の車載や、ロボット、ドローンにおける光センシング技術への展開など、これから広範な応用が期待されます。



図5 マイクロマシン面発光レーザ

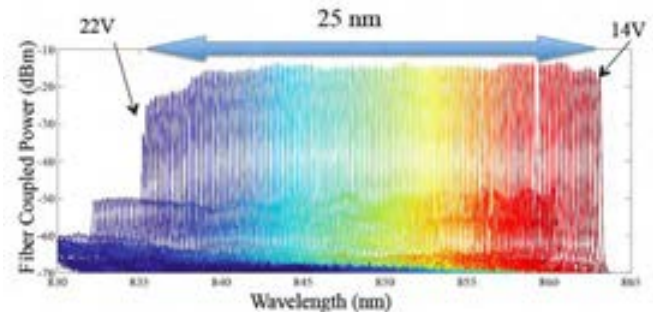


図6 広帯域波長可変動作

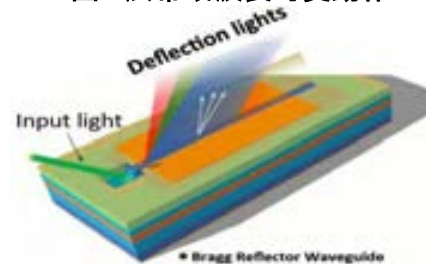


図7 スローライト構造体によるビーム掃引

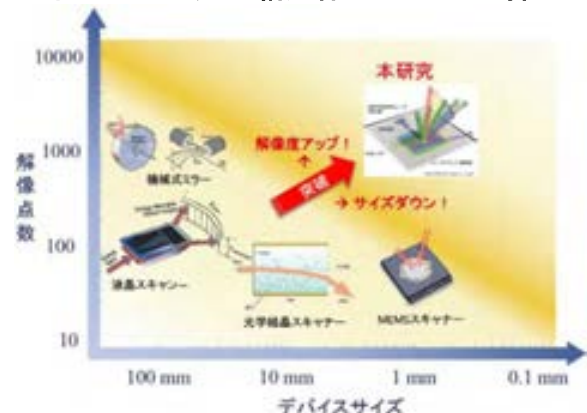


図8 小型・高速化を可能にするビーム掃引デバイス

## 3 教員からのメッセージ

大学院での研究を通じて、自らのポテンシャルをできるだけ高める不断の努力を！ 具体的な研究課題を通じて、“深く”研究するとともに、他の学問分野にも“広く”興味を持って、新しい分野を切り拓く気概を持って研究を進めて欲しいと思います。



## 田原研究室



# 高度医療画像診断、農作物の高精度管理、社会インフラの安全・安心に貢献する波動応用計測



波動グループ  
ライフエンジニアリングコース・電気電子コース  
すずかけ台・R2-713

准教授 田原 麻梨江

研究分野: 生体計測工学、農業計測工学、医用工学、波動工学  
キーワード: 生体情報処理、医用画像、粘弾性、超音波、光干渉断層像、非侵襲、非接触、非金属、果物、内視鏡  
ホームページ: <http://tbr.first.iir.titech.ac.jp/>

## 1 研究内容・目的

近年、病気の早期発見、健康長寿、安全・安心などの関心が高まっています。本研究室では、**図1**のコンセプトのもと、「硬い」「柔らかい」といった弾性特性をキーワードにした計測システムの確立と、それを医療、農業分野、社会インフラへ応用することを目的としています。

波動理論や生体工学などの基礎知識を深めながら、計測用デバイスの製作、計測システムの構築、数値解析や画像処理などの計測技術について学びます。また、青果工場へフィールド調査に行ったり、医師や農業従事者・企業との連携をすることによって実用化を目指しています。

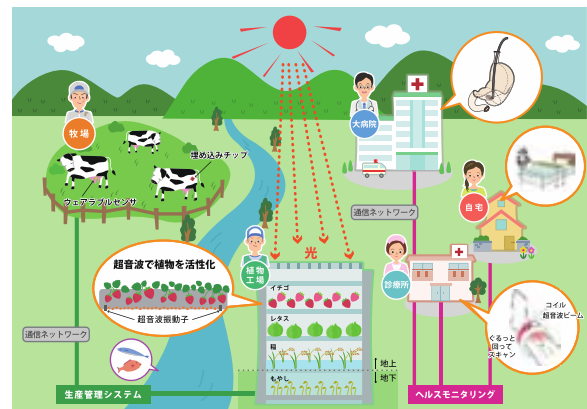


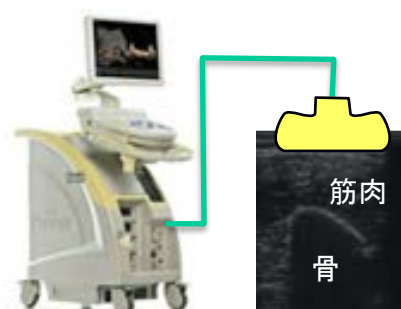
図1: 研究コンセプト

## 2 主な研究テーマ

### ■生体リアルタイムモニタと医療診断

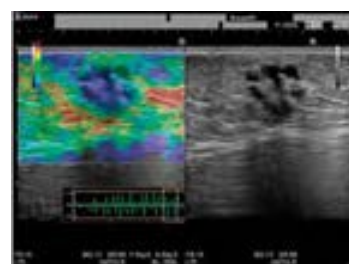
QOL(Quality of Life)の向上や健康寿命を延ばすことへの関心が高まっています。そのため、日頃のトレーニングを効率よく行うための動きセンサや、健康状態をリアルタイムで監視して異常を早期に発見するためのセンサが普及し始めています。筋肉の動きのモニタに関しては、筋電位センサが広く用いられています。

一方、筋肉の形態を画像化することができ、硬さや血流情報などの高機能な情報がセンシングできる超音波センサへの期待も高まっています。従来は医療診断のみで使われていた超音波センサですが、最近、体に貼り付けられるウェアラブルなセンサが開発されており、その用途が模索されています。本研究室では、ウェアラブル超音波センサを用いて筋肉状態をモニタリングして無線で情報を伝送するリアルタイムモニタシステムの実現を目標にして、筋肉の動きや硬さ検出法について基礎研究を行っています(図2)。



Hitachi-Aroka Medical

図2: 超音波診断装置と筋肉画像



<http://www.innervision.co.jp/feature/interview/201304>

図3: エラストグラフィ

## すずかけ台・波動通信グループ

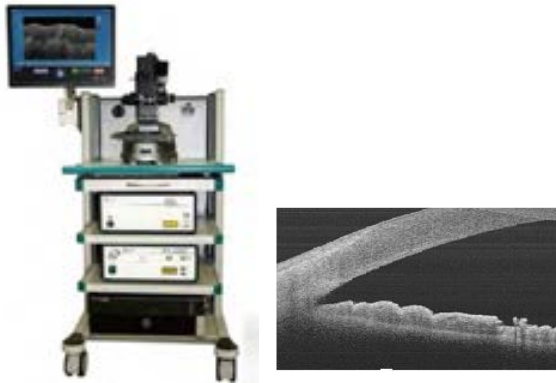


図4: 光干渉断層像と網膜の断層像(santec)

### ～医療診断への応用～

生体組織の硬さ(しこり)は病変の指標でもあります。これまでは、医師が触診で硬さを診断し、組織を切り出して病気の良悪性を判断してきました。

近年、医師の技量に左右されずに硬さを判定するための診断方法(エラストグラフィ)(図3)が開発され臨床応用され始めています。本研究室では体表の組織を観察できる光干渉断層像(図4)や高い周波数の超音波画像との比較などから、疾患の早期発見へ向けた研究を行っています。

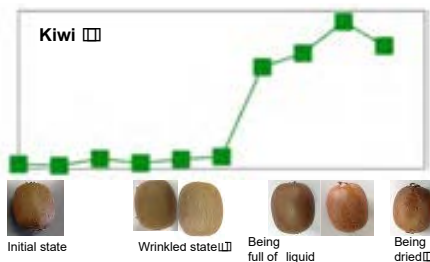


図5: 実験写真と柔らかさの経時変化

### ■青果物の完熟度・糖度の自動判定

農家や青果物工場における高精度管理のため、果物の収穫時期や完熟度・糖度を測定し、自動判定するシステムの需要が高まっています。特に、食品に関しては果物に触れずに測定したいというニーズがありますが、広く普及している一般的な計測器は接触式です。

そこで、果物に触れずに柔らかさを測定する方法を考案しました(図5)。音波を果物に照射すると、ごくわずかに果物が振動します。この振動を検出して特徴を解析すると柔らかさの情報が得られます。四季折々、単価の高い果物を中心に柔らかさと完熟度や糖度の関係について調べています。

### ■戸挟み検出システム

最近、ベビーカ・鞆・紐が電車の扉に挟まれ、引きずられる戸挟み事故が社会的な問題になっています。現在の戸挟み検出法では薄い鞆やベビーカの車輪を検出することが困難です。また、検出感度を上げようとすると戸先ゴムを硬くしなければならず、挟まったものが抜けずにかえって危険となるといった問題があります。

戸挟み事故の撲滅のため、戸先ゴム内の音響特性から柔らかさと感度を両立したセンサを提案しています(図6)。まず、ゴム内部に音を伝搬させます。ゴムに圧力が加わると内部の音響特性が変化します。音響特性の信号解析からゴムへの圧力を検出することができます。ベビーカの車輪などを瞬時に検出するシステムについて検討しています。

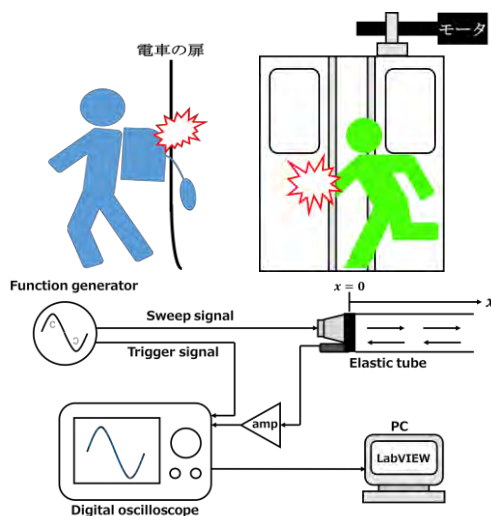


図6: 戸挟みと検出システム

### 3 教員からのメッセージ

「医療や農業に関心がある」、「社会インフラに関心がある」、「音が好き」という方、一緒に研究をしましょう。音波を利用すると、外からは見ることのできない生体の内部の情報を非侵襲的に見ることができたり、果物に触らずに熟し度合いを知ることが可能になります。Every failure is a stepping stone to success! 失敗することを恐れずに、興味のあることにどんどんチャレンジしましょう。



## 中村研究室

# パワー超音波 光および超音波のヘルスケア応用 光ファイバセンシング



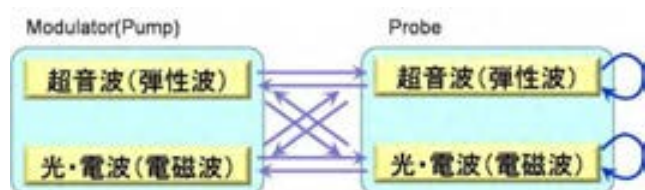
波動通信グループ  
ライフエンジニアリングコース・電気電子コース  
すずかけ台・R2-718

教授 中村健太郎 助教 水野洋輔

研究分野: パワー超音波、医用光超音波技術、光応用センシング  
キーワード: 超音波プロセッシング、超音波浮揚、超音波モータ、  
超音波診断、聴力支援技術、光ファイバセンサ  
ホームページ: <http://www.nakamura.pi.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

超音波や光などの波動現象を用いて、健康や安全に役立つ「ライフエンジニアリング」に関する研究を行っている。特に超音波のエネルギー応用・動力的応用、光と超音波の相互作用の利用、光ファイバのセンシング応用などをテーマに、他の原理では実現できない方式の開拓を行っている。



★当研究室はライフエンジニアリングコースに所属し、機械、材料、生命など他の分野の研究室とも交流しながら分野横断的な活動を行っています。多くが試作、実験中心の研究テーマです。他大学や企業等との共同研究も積極的に行っています。

## 2 最近の研究成果

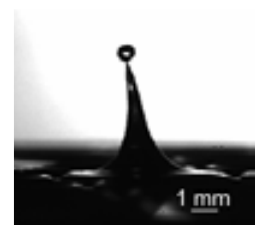
### ■ 超音波浮揚による薬液の非接触ハンドリング

次世代の製薬等のために、超音波の放射力を使って薬液を空中に浮揚させたまま、搬送、混合、分析、分注などの操作を完全非接触で行う技術に関する研究を行っている。非接触とすることで、不純物の混入や分析時のアーチファクトを排除する。

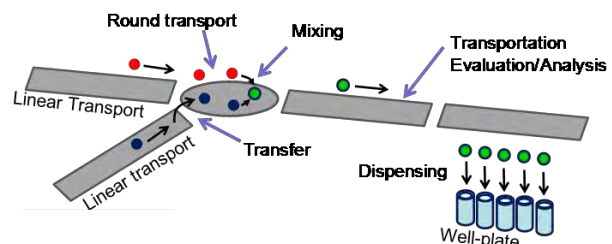
音源と反射器の間に形成される定在波の音圧の節に液滴がトラップされる現象を利用して非接触で操作する。音場モードを動的に制御したり、進行波の利用によって、搬送や混合動作に成功している。容器から必要量の薬液を打ち出すことや、浮揚したまま液量や物性を測定することにも挑戦している。今後、それぞれの動作をより高精度に行うことや、いろいろな処理工程を自由に組み替えられるような、振動系の構成方法確立したい。また、錠剤の高速搬送や検査に対応することも検討したい。



振動面と曲面反射器の間に浮揚する液滴



バースト超音波で打ち出される液滴



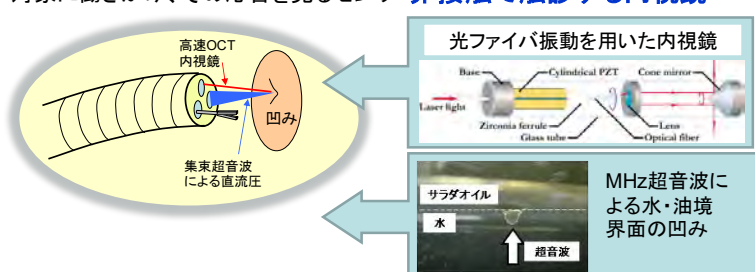
全ての工程を非接触で行うシステム

### ■ 医用・健康に役立つ超音波・光の融合

弾性波である超音波と電磁波である光波を用いることで、それぞれの特徴を生かすと同時に、超音波と光波の相互作用を利用した計測・観測技術を開発している。

右図は、超音波を集束照射することで、その放射力により組織を変形させ、光学的な手法で変形量を正確に測定する内視鏡の構成例である。

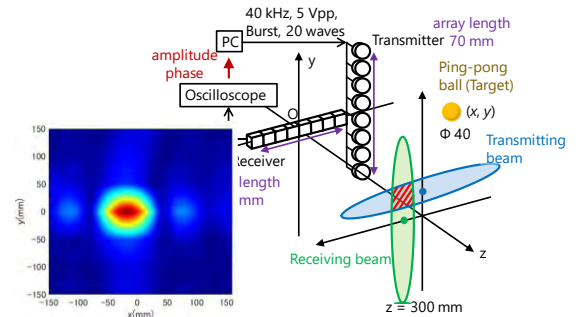
対象に働きかけ、その応答を見るセンサ **非接触で触診する内視鏡**



## すずかけ台・波動通信グループ

### ■ 音響カメラの開発

広い周波数範囲の音波を用いて物体を可視化する「音響カメラ」の開発を行っている。空間分解能は光学カメラに比べると低いですが、豊富な周波数情報を用いることで、新たな価値・意味をもった画像が得られる。すなわち、対象の微細構造が音響共振に反映する、硬さなどの機械物性が分かるなど、光学カメラでは同じに見える場合でお異なった情報が得られる。例えば、煙や濃霧中でのレスキューロボットや、プライバシーを守った見守りシステムなどへの応用が考えられる。



試作した音響カメラ

### ■ 聞こえ支援システム

WHOによると、聞こえに何らかの問題がある人は人口の5%である。日本では600万人以上に相当するが、高齢化を考慮すると1000万人に達するとも考えられている。これまでに聞こえ支援システムを開発し、難聴者が健聴者とともに楽しめるコンサート、バスへの実装試験への協力などの活動を行ってきた。今後、スマートフォンを利用したシステムの開発や、より多くの公共施設等への応用など、社会実装のための活動を行っていく。



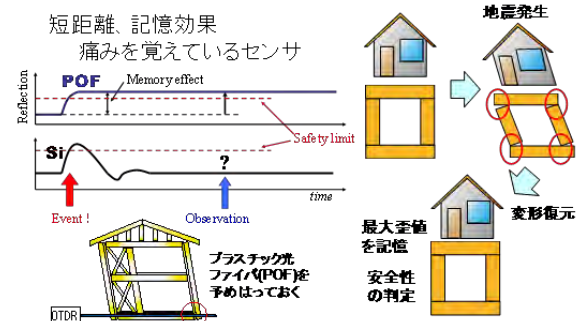
聞こえを支援するシステム

### ■ インフラのヘルスマonitoring、人の健康管理に役立つ光ファイバセンサ技術の開発

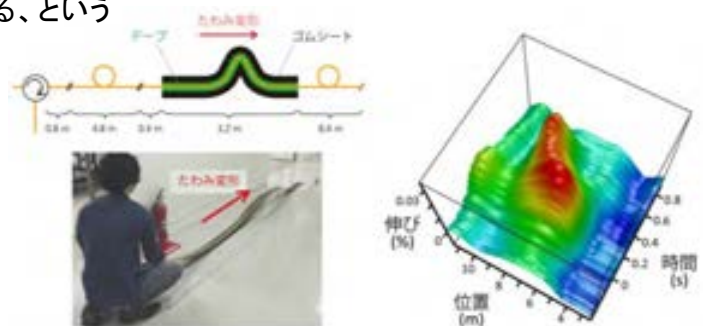
高度成長期に集中的に整備を行った我国の道路やトンネルなど多くの土木建造物で耐久性の問題が急激に起きている。また、地震や台風などの自然災害も避けられない。災害後の建物のダメージの迅速な診断が必要である。光ファイバセンサは、光ファイバをセンサとして、光ファイバのどこにどのような歪や熱が加わったのかがわかる有力な技術である。しかし、測定装置が大がかりなため、小規模構造物にはコスト等の見地から応用しにくかった。

本研究室では、ポリマーファイバを使うことで、その可塑性に着目し、変形や歪をファイバ自体が記憶することを積極的に利用することを提唱しており、その有用性を実証してきた。家屋などにポリマーファイバケーブルのみを敷設しておき、地震の後で1台の検出装置を持って巡回検査することで家屋のダメージを評価する、という使用法が想定され、コスト低減が期待される。

また、最近では、ポリマーファイバ中のブリルアン散乱を観測し、これを用いて歪や温度の分布を連続的に測定することに成功している。世界最高の空間分解能や測定速度を達成しており、実用化に向けた性能向上を進めている。他にも、屈折率センサや電磁界センサ、超音波センサ、それらのヘルスケア応用など、さまざまな独自の光ファイバセンシング技術を開発中である。



ポリマー光ファイバによる「痛みを記憶する」センサ



光ファイバに沿って伝搬するたわみ変形の検出

### 3 教員からのメッセージ

超音波や光の技術を基盤として、健康や快適な暮らしに役立つシステムの開拓に努力しています。電気電子系ライフエンジニアリングコースとして、他の分野・系とも積極的に交流しながら研究を進めています。どれも実験や試作が中心の研究テーマで、他大学や企業等との共同研究もさかんです。



## 宮本智之研究室

## 光無線給電システムの研究



波動通信グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・R2棟817号室

准教授 宮本智之

研究分野: 光エレクトロニクス, 光無線給電システム, 光デバイス  
キーワード: 光無線給電, 面発光レーザー  
ホームページ: <http://vcse1-www.pi.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

本研究室では, 次世代フォトニクス(光エレクトロニクス)システムとして, 光無線給電の構築を進めています。光無線給電の全体システムや, その光源となる面発光レーザーに関する研究まで行っています。

- ★当研究室は東工大すずかけ台キャンパス未来産業技術研究所に属し, 居室はR2棟にあります。
- ★当研究室は, 小山研究室, 植之原研究室と協力して研究活動を進めています。



## 2 最近の研究内容

## ■光無線給電システムの開拓

身近な機器を見てもわかるように, 通信は無線になっている。無線化により, 移動中の利用, 配線敷設や接続が不要, 見栄え・安全性・メンテナンスに優れる, など, 様々な利点が生まれる。一方, 電力供給「給電」は残された有線となっている。給電の制限は, 新機器や新応用の創出なども制約するため, 通信に加えて給電も無線化した真の無線化社会の構築により, モノ・サービスの変革を期待している。

既に無線給電は実用化されている。しかし, 既存の方式である電磁誘導では, 数cmほどの短距離への給電に限られ, 高周波ノイズ発生なども課題である。そこで新たな無線給電として『光ビーム』を用いる光無線給電を提案している(図1)。様々な機器を無線給電化するには, 小型軽量で, 大電力を長距離まで給電可能な光方式が有効と考えている(図2)。

光無線給電は, レーザやLEDなどの光源と太陽電池の組合せという簡単な原理だが, これまではデバイス性能や各種の制御技術が十分でなかったため, 世界的にほとんど研究開発が進んでいない。しかし, 無線化要望の拡大を受け, また, 近年の高性能デバイスやIoTなどの高度技術を組み合わせることで, 光無線給電を最新技術で改めて再定義することにより, 真の無線化社会の実現を目指している。

## Optical Wireless Power Transmission: OWPT

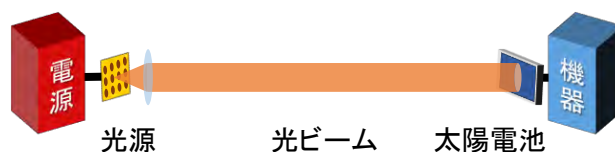


図1 光源と太陽電池による光無線給電

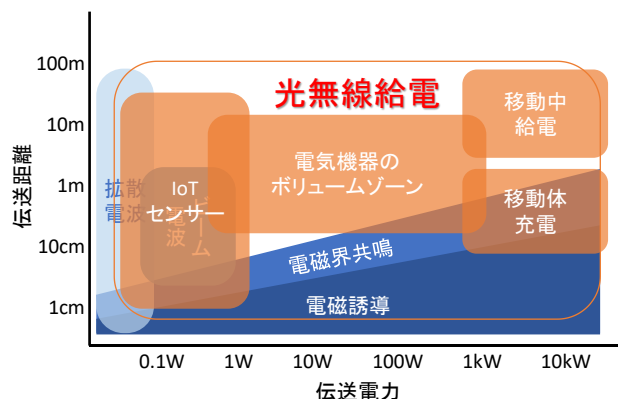


図2 光無線給電は小型軽量・長距離・大電力のため, 様々な機器への利用が期待される。

## すずかけ台・波動通信グループ

### ■光無線給電システムの構築と評価

本研究室では、光無線給電システムの特性評価や構成、課題を検討するために、応用を想定した様々な試作システムを構築している。図3は固定機器間向け構成例であり、近赤外帯面発光レーザーと太陽電池を用いて、5mまでの長距離や10W程度までの給電を達成している。光無線給電において、光源と太陽電池の他に、光学系(レンズ等)も重要である。光学系の最適化により、より長距離、また光の無駄を減らした給電が可能である。なお、このような数m以上の給電は既存方式では難しく、光無線給電の有効性を示している。

光無線給電は、その給電という機能から「給電効率」が重要な指標である。光源と太陽電池のみを考えた場合の給電効率の想定値を表1に示す。現時点では10%程度と低いが、論文報告の最高特性のデバイスでは50%近い効率が期待できる。今後、レーザーも太陽電池も高効率化すると、60-70%も期待できる。なお、効率だけにとらわれず、「無線」という機能性の活用に着目することはより重要であろう。

### ■光無線給電の様々なシステムと機能の開拓

上記のシステムの他にも、様々な応用に向けたシステムや、様々な機能性を研究している。図4はLEDを用いた懐中電灯のようなハンディ型光無線給電である。IoTのような多数端末の利用では、その作業量から、配線ができず、電池交換も課題となる。そのため、遠隔から光照射して充電する方式が有効と考えている。LEDはレーザーより安全性が高く、簡易に利用できる。なお、図に示すように、モジュール製作などに3Dプリンタの活発な利用も行っている。

この他にも、液体レンズによる高速焦点距離可変による物体移動への追従、太陽電池位置・サイズのデプスカメラによる検出、ビーム方向制御と高効率ビーム照射、通常は黒い太陽電池を様々な機器で利用するためのカラー化、高効率給電のための低温下システムの検討などの機能性を検討している。

これら機能性を活用しながら、ロボットアームやドローン等への光無線給電、電波の対応が難しい水中・海中の光無線給電による新応用開拓、光源となる面発光レーザーの高性能化なども進めている。

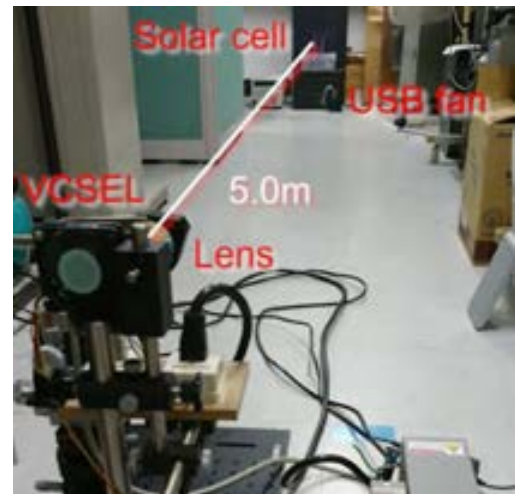


図3 光無線給電の実験例。5m先の太陽電池で受光し、USBファンなどを動作させている。

表1 光無線給電の給電効率

	レーザー効率	太陽電池効率	給電効率 (想定)
現状	市販(近赤外) 35%	市販(Si) 30%	10%
	報告例(近赤外) 72%	報告例(GaAs) 66%	48%
将来	近赤外 85%	GaAs 75%	64%
	紫外GaN 85%	紫外GaN 85%	72%

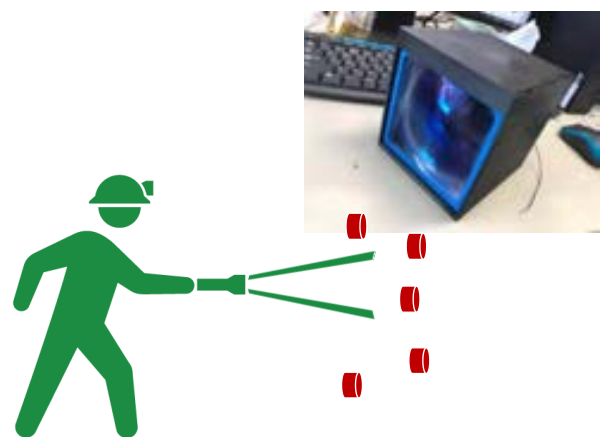


図4 LEDを用いた懐中電灯型光無線給電

## 3 教員からのメッセージ

本研究室では、光無線給電を中心に、そのデバイス・システムの製作・評価から新規応用の創出までの、最新技術を活用したモノを「創る」研究を進めています。光無線給電システムの構築には多様な知識、技術、創造性などが要求されるため、これらの能力を自ら獲得し伸ばす意欲のある学生の参画を期待しています。



## 浅田研究室

半導体ナノ構造による  
テラヘルツデバイスの実現と  
それを用いた未踏周波数の開拓

デバイスグループ  
電気電子コース  
大岡山・S9棟703号室

教授 浅田雅洋

研究分野: 電子デバイス、テラヘルツエレクトロニクス、半導体物理  
キーワード: テラヘルツ波、テラヘルツデバイス、半導体ナノ構造、量子効果  
ホームページ: <http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/>

## 1 主な研究テーマ: テラヘルツデバイス

電波と光の中間にある約0.1~10THzの周波数はテラヘルツ帯とよばれ、これまで未開拓の領域でした。最近この領域は、超高速無線通信、イメージング、分光分析など非常に幅広い応用への可能性が明らかになり、盛んに研究が行われるようになってきました。しかし、テラヘルツ波を発生できる光源や、それを検出する受信器はまだ十分に開発されているとはいえない状況にあります。特に、室温で動作するコンパクトな高出力・高効率の半導体光源や高感度・低雑音の半導体検出器は未だに実現していません。

本研究室では、半導体ナノ構造の中で生じる新しい現象を使って、テラヘルツ波を発生・検出する微細デバイスやその集積回路の実現、さらにはそれらの応用展開を目指しています。これまでに半導体電子デバイスで初めての室温テラヘルツ発振の達成や、それを使った無線伝送実験などを行ってきました。

## 2 最近の研究成果

■電子デバイスで初めて1THzを超える  
室温発振を実現

周波数が1THz前後のテラヘルツ帯(以下、略してTHz帯。サブミリ波帯、遠赤外ともよばれる)は、光と電波の中間の未開拓領域で、半導体による光源で満足なものはまだ存在しません(図1)。

ところが、この周波数帯が開拓されれば、超高速通信やイメージング、分光分析、計測など非常に広い分野で種々の新しい応用が期待されており、光源や検出器などのキーデバイスの開発は必要不可欠となっています。

THz帯の高性能光源や検出器を実現するには、ナノメートルオーダーの極微細構造を形成し、電子の走行時間を大幅に短縮するとともに、ナノ構造に生じる新たな電子物性を用いることが有力な方法の一つと考えられます。

本研究室では、THz波に対する半導体ナノ構造の新しい現象や、ナノ構造によるテラヘルツ発生デバイスの実現を目指した研究を行っています。最近、ナノ構造の一つである共鳴トンネルダイオードを用いたTHz光源を作製し、電子デバイスで初めての室温THz発振に成功しました。さらに、周波数を制限していた電子遅延時間の短縮などを行い、最高発振周波数を更新しました(図2)。

現在、室温で1THzを超える周波数を単独で発生できるのは共鳴トンネルダイオードしかなく、THzギャップを埋める素子として期待されています。

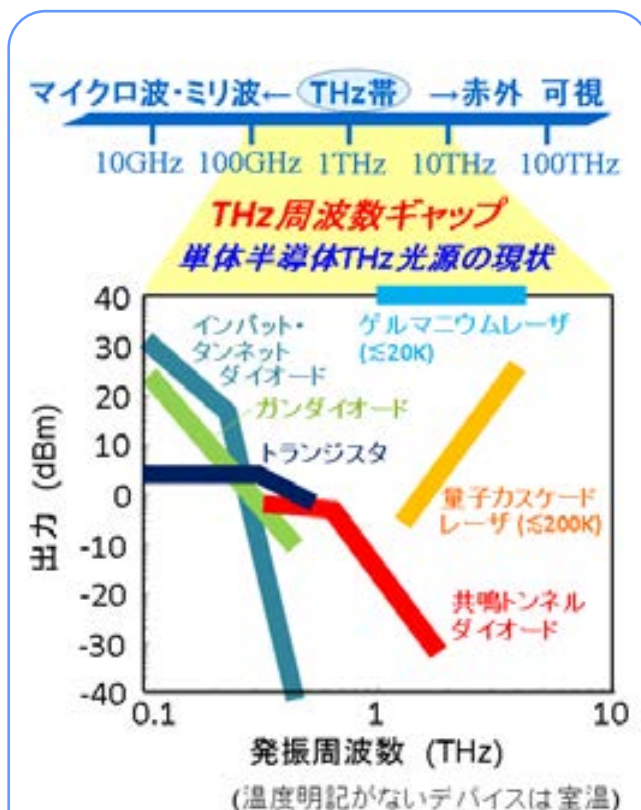


図1 半導体単体のテラヘルツ光源の現状。  
現在、周波数1THz周辺には満足な光源がなく谷間になっており、テラヘルツギャップと呼ばれています。

## 大岡山・デバイスグループ

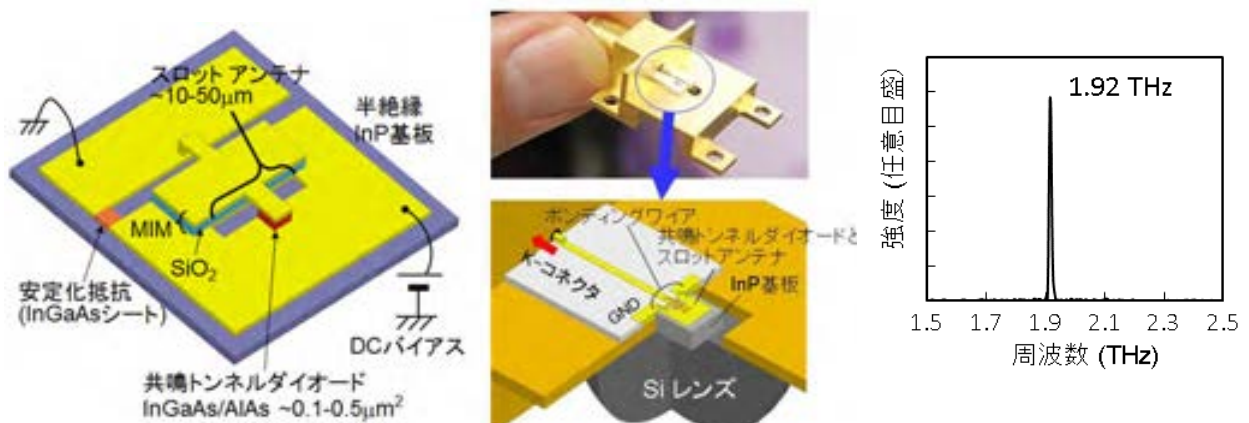


図2 共鳴トンネルダイオードによる、電子デバイスで唯一の1THzを超える室温発振器。素子構造(左)、モジュール化した素子(中央)、現在の最高発振周波数1.92THzの発振スペクトル(右)。

このような共鳴トンネルダイオードによるTHz光源をさらに高周波化・高出力化するための素子構造や、放射する出力ビームを鋭くするための微細アンテナ集積など、高性能化に向けた研究を進めています。

#### ■半導体THz光源の高性能化と応用 (超高速無線通信、分光分析)

THz帯を用いることにより、簡易なシステムで数十～百Gビット/秒の超高速無線通信が可能となります。本研究室では、このような無線通信応用を目指して、共鳴トンネルダイオードのTHz出力に信号を乗せる高速直接変調や、これを用いたTHz送受信系(図3)の研究を行っています。

最近、共鳴トンネルダイオードの高速直接変調に成功し、これによる初期実験として、30Gビット/秒の高速THz無線通信のデモンストレーションを行いました。

THz帯では、超高速無線通信だけでなく、他の周波数では不可能な物質の分光分析が可能です。これには、周波数が連続的に変えられる光源が必要不可欠です。本研究室では、共鳴トンネルダイオードとバラクタダイオードを集積した周波数可変THz光源を実現しました。この素子の周波数範囲拡大や物質分析への応用の研究を行っています。

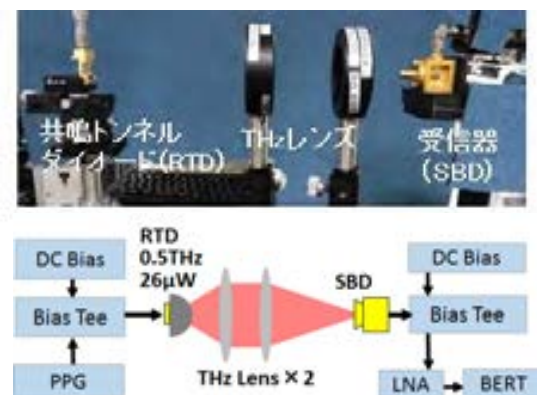


図3 共鳴トンネルダイオード送信器を用いた高速テラヘルツ無線通信系。

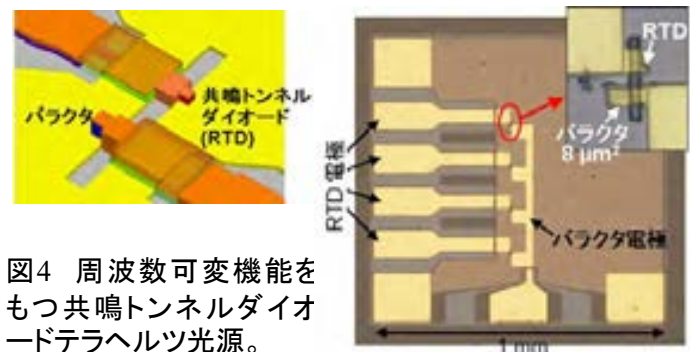


図4 周波数可変機能をもつ共鳴トンネルダイオードテラヘルツ光源。

### 3 教員からのメッセージ

研究はテラヘルツという未知の分野で、物理現象の探索からデバイス作製・応用にまで及んでおり、それぞれ実験あり理論あり。簡単ではないけれど、一歩先には今までになかった最高周波数のデバイスや新しい現象がある。メンバーが協力しあって新しい発見やデバイス実現を目指していきたいと思っています。

研究室メンバーから一言:世界初のデバイスを作れるかも?!(教員:作れます)／電子の気持ちがわかるようになるかも／研究するには最高の環境です／動作時間”0”の超高速デバイスを目指せ(教員:これは…無理です)／メンバーは個性派ぞろい／



## 河野研究室

## カーボンナノ材料、半導体量子構造を用いたテラヘルツデバイス・ナノ計測、2次元層状デバイス



デバイスグループ  
電気電子コース  
大岡山・南9号館805・806

河野研究室

准教授 河野行雄 助教 川那子高暢

研究分野: 半導体デバイス、カーボンナノデバイス、電磁波計測

キーワード: テラヘルツ、フレキシブル・ウェアラブルセンサ、超解像分光画像計測

ホームページ: <http://diana.pe.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

河野研究室では、カーボンナノチューブやグラフェンなどのカーボンナノ材料や半導体量子構造を用いた、赤外・テラヘルツ帯の機能デバイスならびに計測システムの研究を行っています。光と電波に挟まれた未開拓電磁波テラヘルツ波は、今後の物質・生体センシングに有用と期待されており、隣の赤外領域も含めた計測を用いることで、固体材料、分子、工場で生産される様々なプロダクト、さらには生体に関する詳細な情報を得ることができます。材料物性の研究を起点として、センサ、フレキシブル・ウェアラブルカメラ、プラズマプローブ、回折限界を超える分光ナノイメージング、光電界・位相分布のベクトル計測など、多彩で革新的な技術の創出を行っています。同時に、原子層レベルの2次元層状材料に基づく新規プロセス技術開発・電子デバイス応用のテーマにも取り組んでいます。

## 2 最近の研究成果

## ◆テラヘルツ帯フレキシブル・ウェアラブルカメラと全方位検査

多数の単層カーボンナノチューブが集まって形成された薄膜は、テラヘルツ波をよく吸収し、なおかつ自在に曲がる特徴を有します。このカーボンナノチューブ膜を基に、折り曲げ可能なテラヘルツ帯カメラを世界で初めて実現しました (*Nature Photonics* 2016)。このカメラを用い、注射器やペットボトルといった360度歪曲した物体に対しても、破損・異物混入を瞬時に撮像することに成功しました。また、人間の皮膚にウェアラブルカメラを装着し、人体内のテラヘルツ画像観測を行うことも可能にしています。この技術を基に、全方位画像計測による工場での高速検査やその場生体モニタリングへの応用を進めています。

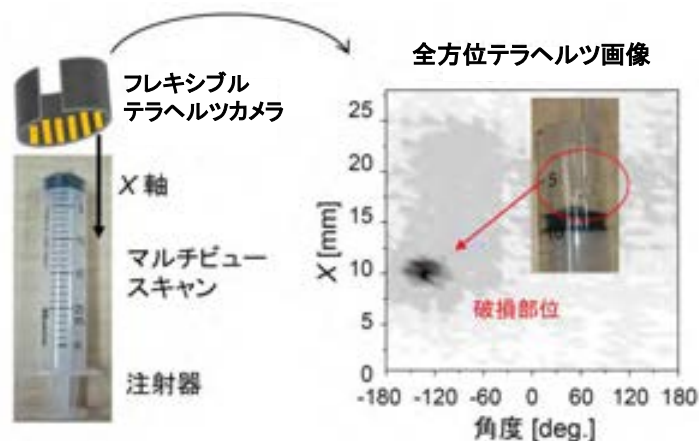


図1 フレキシブルテラヘルツカメラを用いた医療器具(注射器)の360度全方位検査。本撮像デバイスを用いることで、大規模な測定システムなしでの全方位破損検査ができている。

## ◆赤外・テラヘルツ帯超解像分光ナノイメージング

電磁波を用いた通常の画像化技術(イメージング)では、空間分解能が波長程度に限定されるため(回折限界)、粗い画像しか得られません。当研究室では、これを解決するために、回折限界を超える超解像イメージングの開発に取り組んでいます。赤外領域、テラヘルツ領域それぞれの顕微技術を有しており、波長が数十～数百マイクロメートルの赤外・テラヘルツ光に対して、数十～数百ナノメートルの空間分解能を実現しました (*Nature Photonics* 2008, *IEEE Transactions* 2016, *Scientific Reports* 2019)。これらの顕微鏡を用いて、半導体、アンテナ、グラフェン、高分子材料、生体細胞などの検査・分析研究を行っています。現在は、さらなる性能向上、新規な測定手法の開拓、応用研究に取り組んでいます。特に医療応用では臨床医との共同研究を行っており、新たな医療検査法の開拓を目指しています。

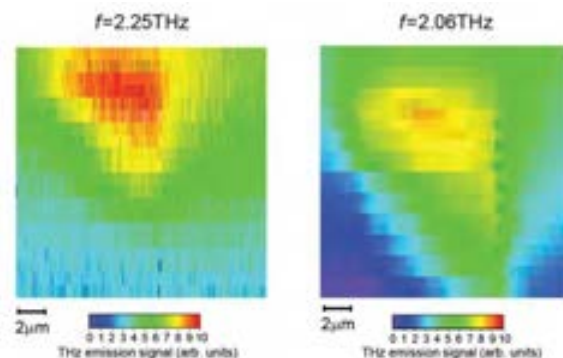


図2 半導体量子素子の電子注入に伴うテラヘルツ発光分布の超解像ナノスケール画像。

## 大岡山・デバイスグループ

## ◆2次元有機・無機界面に関する研究

2次元結晶膜である自己組織化単分子膜(SAM)と無機層状半導体から構成される有機・無機界面の物理現象とデバイス応用の研究を行っています。有機物と無機物を含む2次元材料系は、結晶表面に未結合手が存在しないことから、界面における化学反応や原子拡散といった化学的・物理的相互作用を抑制できるため、原子・分子レベルで急峻かつ平坦な界面構造を実現できると考えられます。特に、素子の性能や機能は単体の材料ではなく、異種材料で発現する界面現象によって決定されるため、界面構造と電気特性の関係を明らかにすることを目的としています。

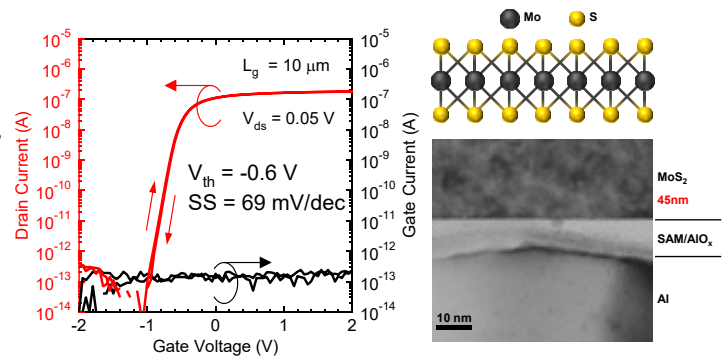


図3 自己組織化単分子膜(SAM)と二硫化モリブデン(MoS<sub>2</sub>)を用いたトランジスタの電気特性と断面透過電子顕微鏡による界面構造

## ◆転写法を用いた素子作製法に関する研究

素子機能に注目したとき、素子を構成する材料、構造およびプロセスが重要な役割を果たします。一方で素子作製には、温度、加工方法、堆積手法および薬品耐性などの様々な制約が存在します。本研究では転写法に基づく異種材料の集積および素子作製を行っています。転写法を用いることで、材料や構造の劣化・損傷を抑制することが可能になると考えられます。本研究では、自己組織化単分子膜を用いた界面の密着性制御を行い、金属層を選択的に除去するadhesion lithographyというパターンニング方法を確立しました。この方法を用いることで、ナノギャップの金属電極構造を作製することが可能になります。さらに、このadhesion lithographyと誘電体エラストマを用いた転写法によってMoS<sub>2</sub>電界効果トランジスタの作製に成功しています。

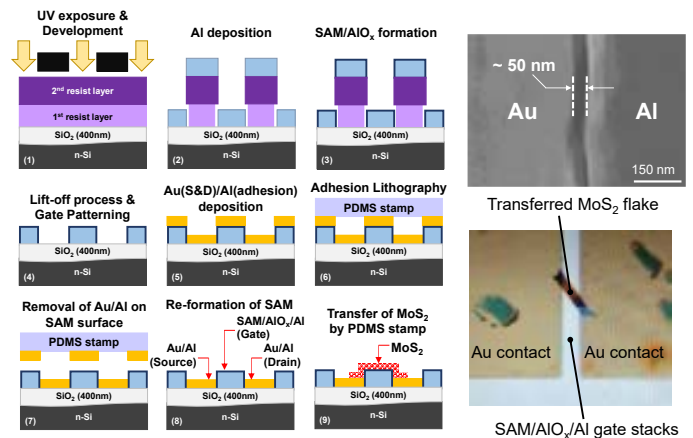


図4 Adhesion lithographyと転写法によるMoS<sub>2</sub>トランジスタの作製

## ◆電界効果ドーピング法に関する研究

物質に他元素や構造欠陥を導入することで、電流の担い手であるキャリアを注入することを化学ドーピング法と言います。これに対し、電界印加によってキャリアを誘起する方法を、電界効果ドーピング法と言います。電界効果ドーピングには、ゲート構造とソース/ドレイン電極から構成されるトランジスタを作製する必要があります。本研究では、ゲート構造とソース/ドレイン電極を先ず作製し、最後に半導体層を転写する“トランジスタスタンプ”というアプローチを実験的に検討しています。この方法によって、遷移金属ダイカルコゲナイドの1つである二セレン化タングステンへの正孔注入を行いました。さらに材料物性、デバイス特性および界面現象を実験的に評価することが可能になります。

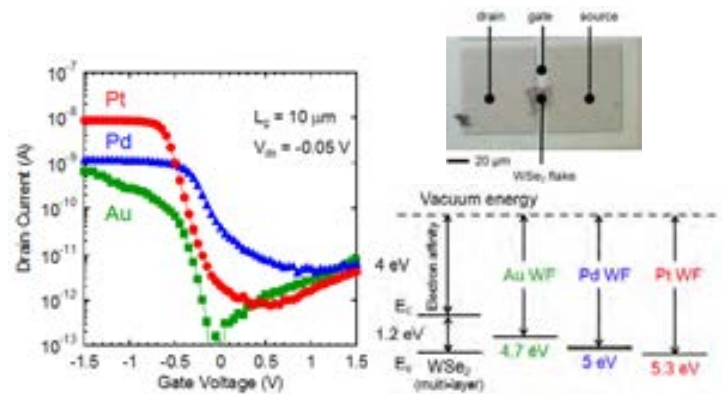


図5 遷移金属ダイカルコゲナイドの1つである二セレン化タングステン(WSe<sub>2</sub>)への正孔注入

## 3 教員からのメッセージ

河野研究室は海外にも広く研究ネットワークを広げ国際共同研究を進めています。留学生も積極的に受け入れています。自然に国際感覚が身に付く環境です。企業や大学病院との共同研究も活発に推進しています。物性、デバイス、計測、分析・検査応用まで幅広く研究を行っていますので、興味のあるテーマに出会えるはずですよ。もっと詳しいことを知りたい人は、いつでも気軽に研究室を訪ねてください。



## 小寺研究室

量子コンピュータデバイス基盤技術、  
量子情報デバイス物理、  
ナノ量子エレクトロニクス

デバイスグループ  
電気電子コース・エネルギーコース  
大岡山・S3-711

准教授 小寺 哲夫

研究分野: 量子技術、固体物理、量子情報デバイス

キーワード: 量子コンピュータ関連基盤技術、スピン量子情報デバイス、  
ナノ量子エレクトロニクス、

ホームページ: <http://www.quantum.ee.e.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

社会のシステムが複雑になってきているため、従来のコンピュータでは解けない問題が増加しています。量子コンピュータが実現されれば、解決できると言われています。量子コンピュータは、「量子力学」の原理を使った新しいコンピュータです。

近年、GoogleやNASA、IBM、Intel、Microsoftなどが研究開発に乗り出し、ある種の量子コンピュータは既に使われ始めています。研究開発を進めて性能を高めていくことで、医薬品の効率的な開発、生命現象の解明、医療画像処理、自動車渋滞の解消、宇宙物理のシミュレーション、投資判断、ロボティクス、人工知能への応用などができると期待されています。

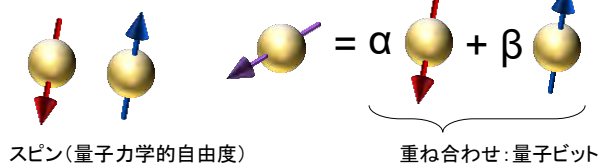
本研究室では、量子コンピュータに繋がる基盤技術という工学的な研究と、関連する物理の解明という基礎学術的な研究の両方を推進したいと思います。特に、半導体ナノ量子構造中のスピンに着目し、研究しています。工学的な研究としては、将来的な素子集積に適したデバイス構造の提案、設計、試作、評価、さらに、制御系の構築、回路、通信との連携も進めます。基礎学術的な研究としては、半導体量子構造における輸送現象、スピンコヒーレンスに関する物理解明に取り組んでいます。

本研究を推進するために、国内外の研究機関や企業との共同研究も積極的に実施しています。

## 量子コンピュータとは

「量子力学」の原理を用いた全く新しいコンピュータ  
→ 従来のコンピュータで解けない複雑な問題を解くことができる

従来のコンピュータ: 0と1のどちらかで情報を符号化  
量子コンピュータ: 0と1の重ね合わせで情報を符号化



## 工学的研究

- ・将来的な量子ビット集積に適した素子構造の提案、設計、試作、評価
- ・制御系の構築、回路、通信との連携

## 基礎学術的研究

- ・半導体量子構造における輸送現象
- ・スピンコヒーレンスに関する物理解明

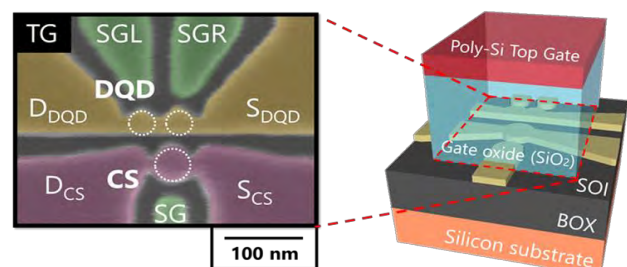
国内外の研究機関および企業と共同研究も推進し、新しい量子情報デバイスの実現を目指しています。  
東京大学、理化学研究所、産業技術総合研究所、日立ケンブリッジ研究所、デルフト工科大学、等。

## 2 最近の研究成果

## ■ MOS型シリコン量子ドットデバイス

スピン量子情報デバイスを実現するために、シリコンを用いた「量子ドット」と呼ばれるデバイスを作製し、評価しています。量子ドットは、大きさが数十ナノメートルの極微細な半導体であり、電子を1つずつ閉じ込めることができます。ナノスケールの空間に電子を閉じ込めることで、電子の持つ量子的な特性を利用できるようになります。

右図は、本研究室で研究をしているMOS型シリコン量子ドットデバイスの模式図と電子顕微鏡写真です。



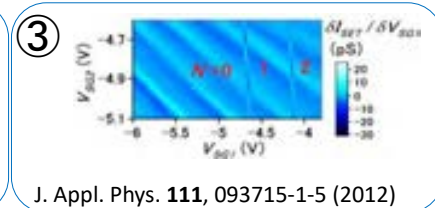
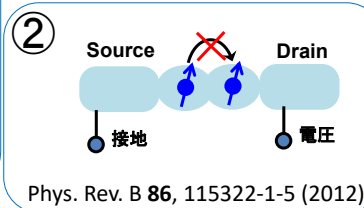
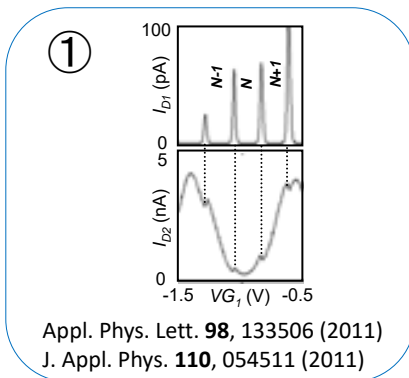
MOS構造を利用したシリコン量子ドットデバイス

## 大岡山・デバイスグループ

素子全体に絶縁膜を介してトップゲートが作製されており、MOS構造となっています。10 nm程度の極微細構造を形成できる電子線リソグラフィや、1 nm単位で制御した酸化技術、ガス種を最適化したエッチング技術などを駆使することにより量子ドットデバイスを作製しています。現在のシリコンテクノロジーとの整合性が良く、将来的な集積化に有利な構造と期待されています。

本研究室では、この量子ドットを評価し、下記を実現してきました。いずれも量子ビットの要素技術となります。

- ①電子数がたった1つだけ異なる状態を検出できる電荷検出計を開発
- ②電子スピンの状態に依存するトンネル現象を観測
- ③量子ドットに1つ電子が入っている単一電子状態を確認

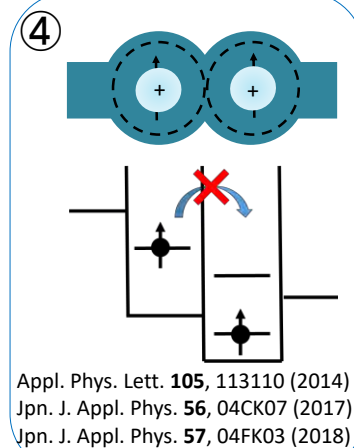


### ■ 正孔により動作するシリコン量子ドットデバイス

正孔により動作するシリコン量子ドットデバイスを作製し、評価を行っています。正孔はp軌道ブロッホ波動関数を持つため、核スピンの影響が少なく、電子と比べて長いスピンコヒーレンス時間を保持できる可能性があります。またスピン軌道相互作用を利用して、電界のみでスピン操作を実現できるため、シンプルなデバイス構造となり、集積化に有利であると考えています。

一方で、スピン軌道相互作用によるデコヒーレンスや、重い正孔と軽い正孔のミキシング等、関連する根幹の物理の解明を目指して研究を進めています。

本研究室では、上記の①から③に対応する要素技術を、正孔に対しても実現しています (④)。特に、物理的に形成したシリコン量子ドットにおいては、電荷検出計の開発、単一正孔状態の実現、スピン依存トンネル現象の観測に世界で初めて成功しました。



### ■ Si/SiGe量子ドットデバイス

共同研究も積極的に推進することで、Si/SiGe量子ドットデバイスに対して、GaAs系量子ビット技術の融合を進めています。GaAs系量子ビット開発を通じて構築した測定系を用いて、シリコン量子ドット中のスピン状態の操作と単発読み出しを行い、コヒーレンス時間がGaAs系の100倍程度 ( $T_2^*$  が2ms程度) であることを実証しました。また、単一量子ビットゲート操作の忠実度として99.9%以上を実現し、量子エラー訂正のしきい値(99%)よりも高い値を実現しました。(東京大学、理化学研究所 樽茶研究室との共同研究)



## 3 教員からのメッセージ

量子コンピュータに繋がる基盤技術という工学的な研究と、関連する物理の解明という基礎学術的な研究の両方を推進していきたいと思っています。新しい研究室ですが、皆さんと一緒にアイデアを出し合って、研究を進めていきたいと思っています。また、他の研究機関との共同研究や国際交流も積極的に実施しています。興味を持たれた方は、いつでも気軽にご連絡ください。



## 鈴木研究室

テラヘルツ帯電子デバイス  
/テラヘルツアプリケーション

デバイスグループ  
電気電子コース  
大岡山・S9-803

准教授 鈴木 左文

研究分野: テラヘルツ帯電子デバイス、テラヘルツ応用

キーワード: テラヘルツ、高電子移動度トランジスタ、共鳴トンネルダイオード  
平面型アンテナ、無線通信

ホームページ: [www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/](http://www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/)

## 1 主な研究テーマ

およそ100ギガヘルツから10テラヘルツの超高周波領域はテラヘルツ帯と呼ばれ、従来の光・電子デバイスは動作できなかったため開発がほとんどされてきませんでした。しかしながら、近年の精力的な研究開発によりテラヘルツ帯で動作するデバイスが徐々に産まれてきており、これらを用いた、超高速無線通信、イメージング、分光分析、物性・天文・生体などいろいろな分野にわたる計測などがデモンストレーションされ始めています。このように少しずつ現実味を帯びてきたテラヘルツアプリケーションですが、皆さんが日常的に意識せずに使うような存在となるにはまだまだ技術的に高い壁がいくつも存在します。本研究室では、それら障壁を打ち破り実際にテラヘルツアプリケーションを身近な存在にすべく、ナノ構造を用いることにより半導体の極限的な性能を引き出しテラヘルツで動作する電子デバイス、および、それらを用いたテラヘルツアプリケーションの研究を行っています。

- ・ 高電子移動度トランジスタを用いたテラヘルツ高感度受信器
- ・ テラヘルツアプリケーション(大容量無線通信、レーダーイメージング、など)

## 2 最近の研究成果

## ■ 高電子移動度トランジスタを用いたテラヘルツ高感度受信器

テラヘルツ帯は非常に単純なことです。周波数が高いことから帯域が大変広く確保することができ、この超広帯域を用いれば簡単な変調方式(例えば0と1のオンオフ)でも100Gbpsを超えるような無線通信が可能です。ところが、デバイスの開発が進んでいるとはいえ、テラヘルツの送信出力は微弱なため、感度の高い検出器が必要となっています。本研究室では高電子移動度トランジスタ(HEMT)に微細なゲートを集積すれば、極短チャネルにおいて電子が無散乱に走行するため高い電流が流れることを利用し、これにテラヘルツ帯の平面構造アンテナを集積した高電流感度の受信器を研究しています。従来はショットキーバリアダイオードなどを用いた受信器が一般的に使われていましたが、高い周波数で動作させるためにはダイオードの面積を小さくしなければならず電流感度は低下してしまう問題がありました。HEMTを用いた受信器ではゲートを短くすることで電流を保ちつつ高周波で動作することが可能になり、従来受信器に比べ10倍以上の感度が期待できます。また、無線通信に用いるには高速応答特性も必要になりますが、開発したデバイスの帯域はおよそ30GHzと広く高速変調された信号も受信可能です。

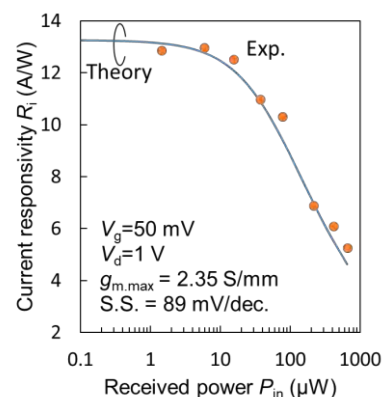
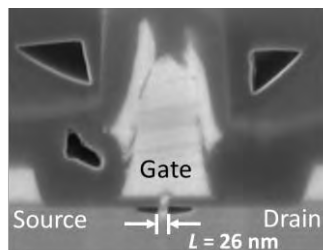
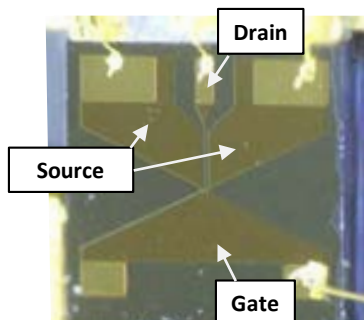


図1 作製したHEMTテラヘルツ受信器とデバイス真性部

図2 HEMT受信器の受信感度特性

## 大岡山・デバイスグループ

## ■ テラヘルツアプリケーションの開拓

## ・様々な多重化(周波数・偏波・OAM)を駆使したテラヘルツ無線通信

開発したHEMT受信器や共鳴トンネルダイオード(RTD)発振器を送信器として利用したテラヘルツ無線通信にチャレンジしています。RTDは現在電子デバイスで世界最高の発振周波数を持ち様々な周波数でキャリア信号を生成することが可能です。キャリア信号を多数使う周波数多重伝送が出来ればテラヘルツの広大な帯域をさらに有効活用することができ、直交した2つの偏波を用いた偏波多重も合わせれば大容量化が加速されます。

また、軌道角運動量を持つらせん状の位相波面の電磁波(光渦)を利用し、異なる軌道角運動量の光渦を用いたOAM(Orbital Angular Momentum)モード多重が、新たな多重の方式として注目され、現在、光および電波領域で期待されています。テラヘルツ波帯で光渦を発生させるにはこれまで、光学的な部品を用いなければならずコンパクトなものではありませんでしたが、我々の研究室では、平面型のラジアルラインスロットアンテナを利用した新たな光渦発生デバイスを提案・開発しており、このデバイスを用いたOAM多重通信を目指した研究も行っています。

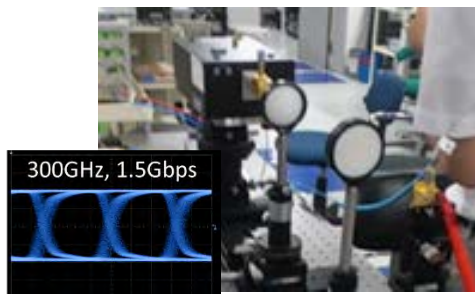


図3 HEMT受信器を用いた無線通信測定系

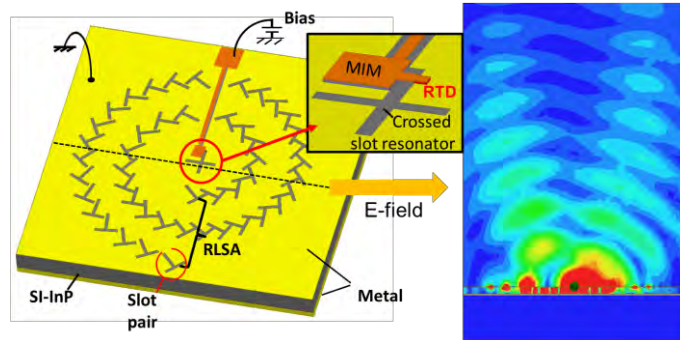


図4 光渦放射RTDテラヘルツ発振器

## ・テラヘルツレーダーイメージング

現在、ミリ波レーダーやライダー(光による画像検出・測距)が、車載レーダーやセキュリティチェックのために開発され一部導入されています。テラヘルツを用いたレーダーは、近年研究開発が始まったところですが、ミリ波よりも波長が短く高分解能にでき、粉塵や雪などでライダーの光が散乱されてしまう状況下でも影響をあまり受けずに測定が可能というメリットがあります。我々の研究室では、振幅変調連続波方式(AMCW)を用いたテラヘルツレーダーを研究しており、ミリメートルクラスの分解能を達成しています。

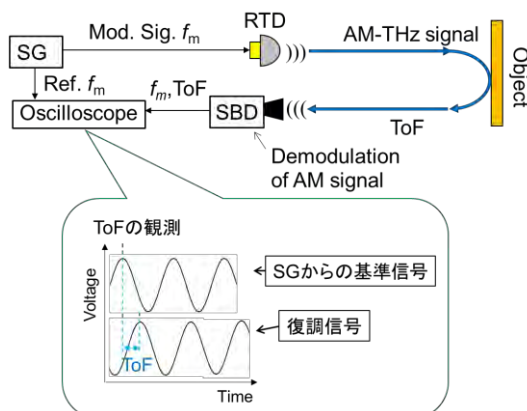


図5 AMCW方式テラヘルツレーダーシステム

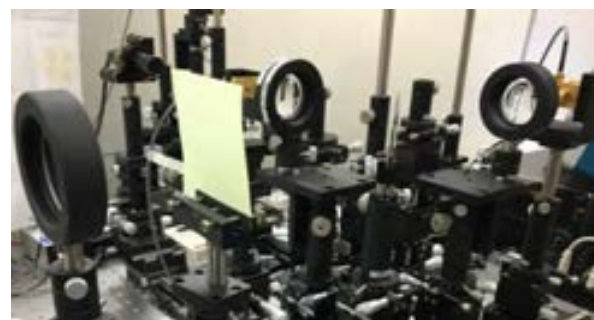


図6 構築したテラヘルツレーダーシステム

## 3 教員からのメッセージ

世界最速の電子デバイスとそれを用いた回路を作製し、新たなテラヘルツ応用にチャレンジしてみませんか。新しいことへのチャレンジはトラブル続きですが一つ一つアイデアを出しながら解決していく達成感があります。微細デバイス設計・作製からTHz計測・応用まで色々なことに触れて知識をつけてほしいと思います。



## 波多野・岩崎研究室

## IV族半導体(ダイヤモンド, SiC)を用いた量子センサ、固体量子光源、パワー/エネルギーデバイス



デバイスグループ  
エネルギーコース・電気電子コース  
大岡山・EEI-410/ EEI-403

教授 波多野 睦子 准教授 岩崎 孝之

研究分野: 電子デバイス、電子材料、応用物性、量子技術、固体物理  
キーワード: センサデバイス、パワーデバイス、固体量子光源、ダイヤモンド  
ホームページ: <http://www.dia.pe.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

情報化社会を支える新しい量子センサおよび低炭素社会に貢献する環境・エネルギーを重視したデバイスの技術革新を創出していきます。主に優れた物性値を活かしたダイヤモンド、SiCなどをベースとした、材料・物性・デバイスのブレークスルーとなる基礎研究、さらにパワー、量子センサのデバイスをターゲットした応用研究を進めていきます。

★当研究室の居室は  
環境エネルギー  
イノベーション棟  
(EEI棟)にあります。



## 2 最近の研究成果

## ■ 量子センシングデバイス

細胞計測から、MRI・脳磁・心磁等の生体計測まで、高感度磁気センサのニーズがあります。当研究室では、常温で動作し、高い空間分解能を有し、2次元イメージングが可能である磁気センサの開発を目標としています。特に常温固体中で優れたスピン特性を持つことが知られているダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)センタを用いています。他のセンサと比較して右表に示すような優位性が期待できます。NVセンタは原子レベルの構造であり、ナノスケールからマクロスケールまで様々な対象を計測することができます。下図は、当研究室で取り組んでいる高感度磁気センサ、微小核磁気共鳴、およびデバイス量子センシングなどの応用例になります。

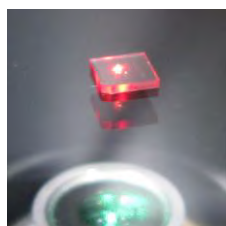


ダイヤモンド中の  
窒素空孔(NV)センタ

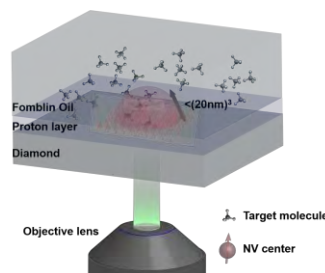
ダイヤモンド磁気  
センサデバイスの特徴

センサ	SQUID	MRセンサ	ダイヤモンドセンサ (本研究)
性能			
感度	◎	△	○
常温大気中動作	×	○	○
空間分解能	×	○	○
2次元検出 (磁場ベクトル可視化)	×	△	○

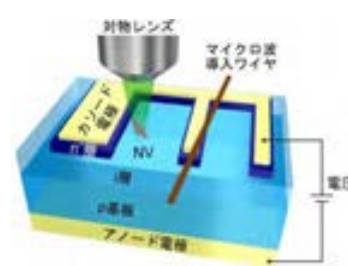
## NVセンタによるセンシングの応用例



超高感度量子磁気センサ



微小体積核磁気共鳴(NMR)



デバイス量子センシング

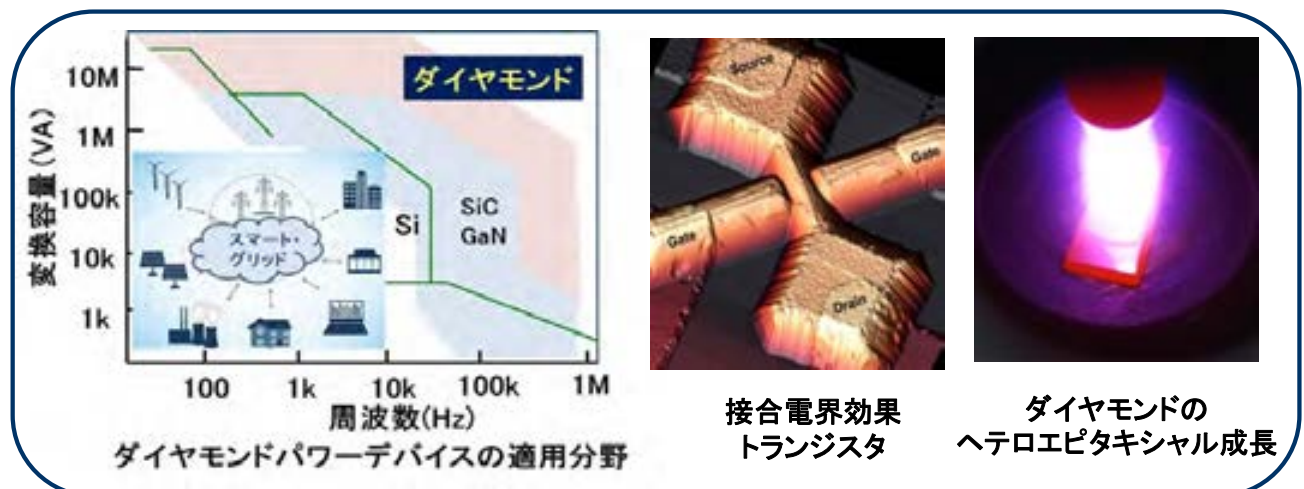
成果論文例: APEX 10, 0455501, 2017, Appl. Phys. Lett. 111, 043103, 2017, & ACS Nano 11, 1238, 2017.

## 大岡山・デバイスグループ

## ■ パワーデバイス

パワーデバイスは、送電、自動車、鉄道、太陽光発電、風力発電、家電などへの応用のニーズが高い電子素子であり、スマートグリッド化のキーデバイスです。高効率の電力変換が可能で超低損失なパワーデバイスの開発により、省エネルギーを推進し、二酸化炭素ガスの排出を大幅に削減することができるようになります(下図)。現在、主流であるシリコンを用いたパワーデバイスは電力変換の損失も多いなど性能の限界が近づいています。このような課題を解決するために、新しい材料として炭化珪素や窒化ガリウムによるデバイスが一部実用化されつつあります。

ダイヤモンドはこれらの材料よりもさらに高い絶縁破壊電界(Siの100倍)や熱の逃しやすさ(熱伝導率がSiの14倍)など究極の物性値を持つために、高電圧をかけても壊れず、また大電流を流したときに発生するジュール熱を効率的に逃がすことができます。しかしこれまで、トランジスタの基本構造の形成や基板の大面積化が困難であり、デバイス化に課題がありました。当研究室では、電力損失を一桁以上低減できる、「オン抵抗 $0.05\text{ m}\Omega\text{ cm}^2$ 以下、耐圧 $2\text{ kV}$ 以上」と定め、トランジスタや大面積基板化という、ダイヤモンドのデバイス化への本質的な課題を解決していきます。これまでに世界で初めてダイヤモンドによる接合電界効果トランジスタの開発に成功しています。

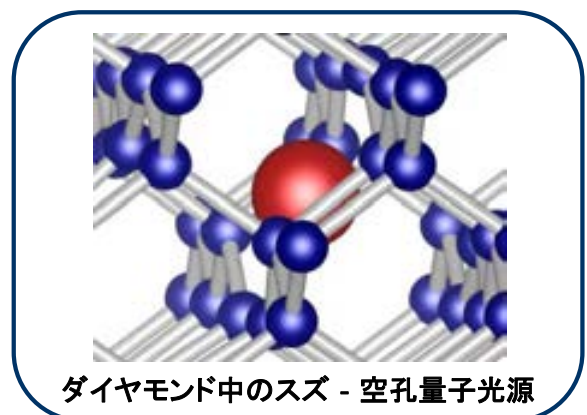


成果論文例: IEEE Electron Device Lett. 34, 1175, 2013 & 35, 241, 2014.

## ■ 固体量子光源

ダイヤモンド中の不純物と空孔が結びついた原子レベルの構造は、単一光子発光を示す量子光源として機能します。NVセンターは量子光源の代表例であり、量子センサや量子ネットワーク用の光源・量子メモリとしての応用が期待されています。本研究室では、より優れた特性を有する量子光源の創出を目的とし、これまでにゲルマニウム-空孔(GeV)センターおよびスズ-空孔(SnV)センターを報告しています。特に、SnVセンターはNVセンターよりも優れた光学特性を有しており、さらに長いスピンコヒーレンス時間も期待できる新しい量子光源として世界からも注目されています。

成果論文例: Phys. Rev. Lett. 119, 253601, 2017 & Sci. Rep. 5, 12882, 2015.



## 3 教員からのメッセージ

量子センサおよび電子デバイスのさらなる進化を実現するために、一緒に研究してくださる元氣な方、いつでも訪ねて来てください。デバイスの新機能の創製や飛躍的な性能向上には、新材料や物性のナノスケールのサイエンスと、それを効果的に利用するブレークスルーテクノロジーが重要です。実用化を目指した工学研究と数十年先を見据えた基礎研究の両方を推進しています。一緒にチャレンジしませんか？



## 久本研究室

半導体プロセス・デバイスの研究  
(パワーデバイス、超低電力集積  
デバイス)

デバイスグループ  
エネルギーコース・電気電子コース  
大岡山・南3-815

特定教授 久本 大

研究分野: 半導体プロセス、半導体デバイス

キーワード: パワーデバイス、低電力デバイス、FinFET、Steep Slope  
デバイス、SiC・シリコン、デバイス信頼性

## 1 主な研究テーマ

環境・エネルギーを重視した持続可能な社会に貢献するため、半導体デバイス技術を基に社会イノベーションを創出していきます。今日の社会で基幹となっているエネルギー分野を支えるパワーエレクトロニクスの将来を担う「ワイドギャップ半導体デバイス」と、ICT分野を支えるULSIの将来を担う「低電力集積デバイス」の基礎研究を通して、新たなエレクトロニクスの応用分野の開拓を目指します。

★当研究室は、東工大と日立製作所の産学連携の一環として開設しています。大岡山デバイスグループのなかで、波多野・小寺研究室と連携して研究を進めています。

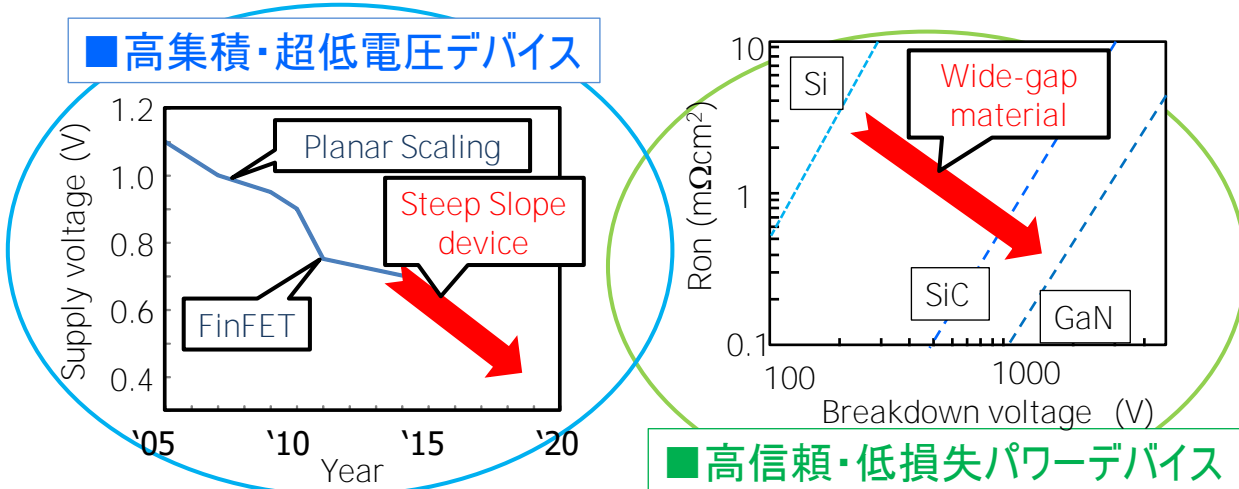


図1 本研究室のスコープ分野

## 2 最近の研究成果

本研究室では、産学の連携のもと、デバイス信頼性の解析を基に、新たなデバイスの創造を目指しています。日立製作所研究開発グループにおける関係する研究成果について紹介いたします。

## ■ パワーデバイス

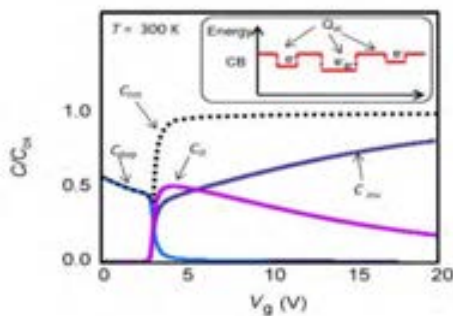
パワーデバイスは、発電・送電、鉄道、データセンタの電源などの社会インフラをはじめ、自動車や家電など、幅広い分野で使われている低消費電力化のためのキーデバイスです。多くの応用製品において、超低損失なデバイスの開発やインバータ化などで、高効率の電力変換が行われ、省エネルギーを推進し、二酸化炭素ガスの排出を大幅に削減できるようになってきています。現在、主流であるシリコン(Si)を用いたパワーデバイスの効率をさらに向上するため、ワイドギャップ半導体である炭化珪素(SiC)を用いたパワーデバイスの実用化を目指し研究開発を進めています。(図2)

出典: D. Hisamoto, et al., IEEE Electron Device Letters, vol. 36, no. 5, pp. 490-492, 2015.

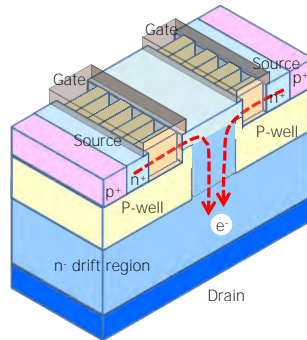
N. Tega, et al., in Proc. ISPSD, pp. 81-84, 2015.

久本 大、電子デバイス界面テクノロジー研究会予稿集, pp. 55-58, 2016.

## 大岡山・デバイスグループ



4H-SiC MOSのSiC-酸化膜界面に形成される伝導帯下端の揺らぎによる電荷トラップモデルと電荷容量特性。チャネルキャリアが減少し、特性が大幅に劣化している。



高信頼性と高性能化を両立する新たなトレンチ型SiC MOSFETと耐圧を示す電流電圧特性。ゲートリーク電流が、測定限界以下に抑制されている。

(TED-MOS: Trench-etched double-diffused MOSFET)

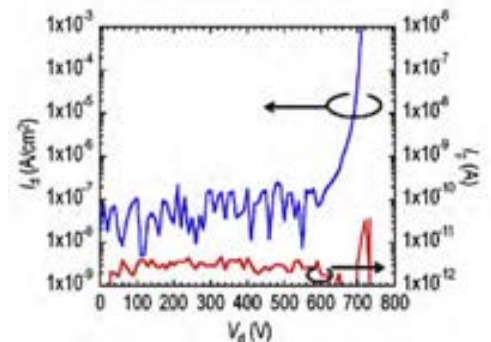
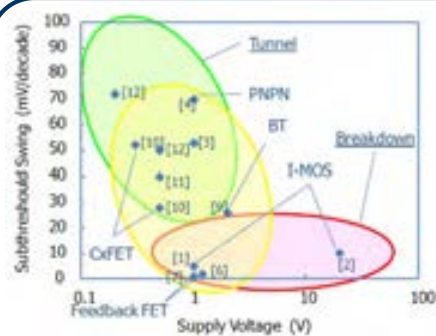


図2 SiC パワーデバイス

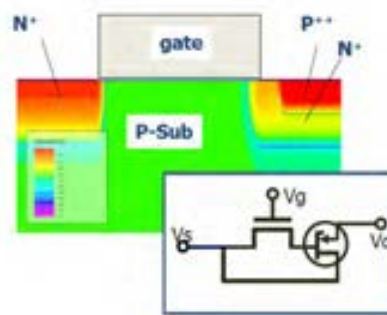
### ■ 超低電力集積デバイス

高集積デバイスの性能向上は、MOSFETの微細化によって支えられてきました。しかし、MOSFETのスイッチング特性(Subthreshold Swing)には、60mV/桁という理論限界があるため、電源電圧の低減の大きな制約になってきています。そのため、MOSFETに代わる動作原理を導入することで、より急峻なスイッチング特性(Steep Slope)が求められています。Steep Slopeを実現するトンネル現象を利用したデバイスの実用化を目指し、研究開発を進めています。(図3)

出典: 久本 大, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp. SS-98-99, CI-4, 2015.  
D. Hisamoto, et al., in IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, pp. 5-6, 2012.



これまで発表されているSteep Slopeデバイス(実験)と印加電圧の関係。Swingと電圧の間にトレードオフが表れている。



トンネル注入型素子を用いた新たなSteep Slopeデバイス構造とSwing特性の印加電圧依存性。低電圧(~0.2V)においても60mV/桁(理論限界)以下が達成されている。

(Cx-FET: Complex CMOS)

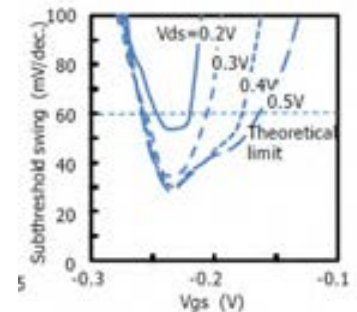


図3 シリコンSteep Slopeデバイス

### 3 教員からのメッセージ

半導体デバイスの面白いところは、基礎研究と産業である実製品との距離が非常に近いところにあります。信頼性の物理メカニズムを解析しているとき、新しいデバイスを生み出すことにつながっています。何かを見出したとき、何かを考え出したとき、そのデバイスがダイレクトに世の中に広がり、世界を席巻することができる、魅力的な分野の一つです。



## 福田研究室

半導体デバイスの  
シミュレーションとモデリング

デバイスグループ  
電気電子コース  
大岡山・南9棟、産総研つくば中央事業所

特定教授 福田 浩一

研究分野: 半導体デバイスシミュレーション、半導体デバイスモデリング

キーワード: デバイスシミュレーション、半導体デバイス  
トンネルFET

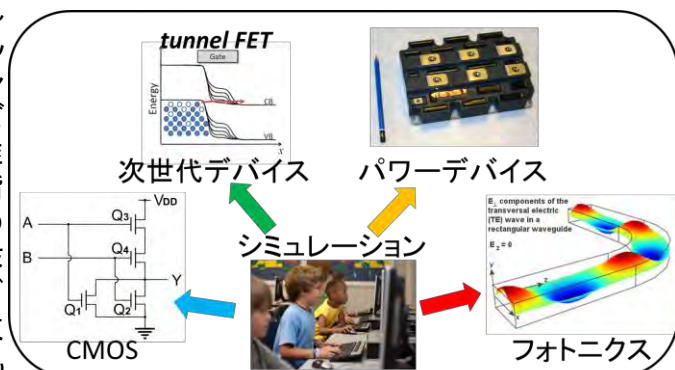
ホームページ

## 1 主な研究テーマ

日常にInternetが浸透し(IoT)、そこで必要とされる半導体デバイスの研究は激化しています。皆さんはすべての半導体デバイスの研究開発にコンピュータ・シミュレーションが使われていることをご存知ですか？半導体デバイスの物理動作は複雑かつデリケートで、研究から量産まであらゆる段階でシミュレーションが必要です。本研究室ではその半導体デバイスのシミュレーションを研究しています。シミュレーションを用いたデバイスのモデリングはもちろん、シミュレーションそのものの理論や技術まで全ての側面が研究対象となります。あなたもこの分野の研究を志してみませんか？

★当研究室は国立研究開発法人産業技術総合研究所との連携大学院制度によるものです。

★また通常は宮本恭幸研究室と帯同しています。



## 2 最近の研究成果

## ■ トンネルFETのモデリング

トンネルFETは、トンネル電流をゲートでコントロールする新原理トランジスタです。現在LSIで主流であるMOSFETより急峻なスイッチングが可能で、次世代デバイスの候補として多くの研究機関が注目しています。図1はトンネルFETの構造例と動作原理を説明したものです。

産総研でのトンネルFETの研究を元に立ち上げたトンネルFETのデバイスシミュレーションは、新デバイスのアイデア検証から実験結果の解釈まで、様々な場面でキーとなる役割を果たしています。東工大のデバイスグループでもトンネルFETを研究しており、実験と連携したモデリングの成果が期待できます。

新しい動作をするトランジスタを回路でどう応用していくのか、その検討を可能にするために、回路シミュレーション用のモデルも新たに開発しました。デバイスシミュレーションで得られた知見を、回路用の動作モデルの研究に結び付けます。このモデルは東工大を始めとする様々な大学で、回路の研究に活用されています。(Fukuda et al. JAP 2013, Fukuda et al. IWCE 2015など)

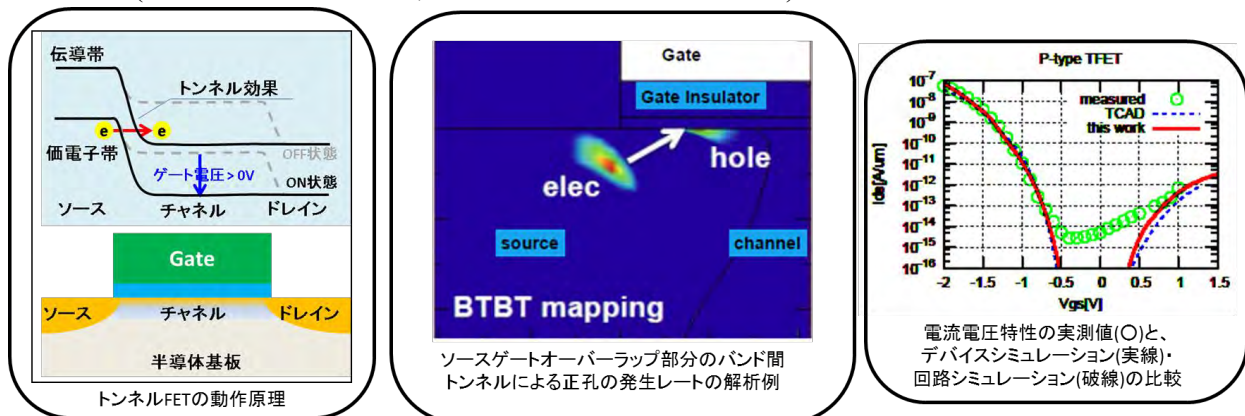
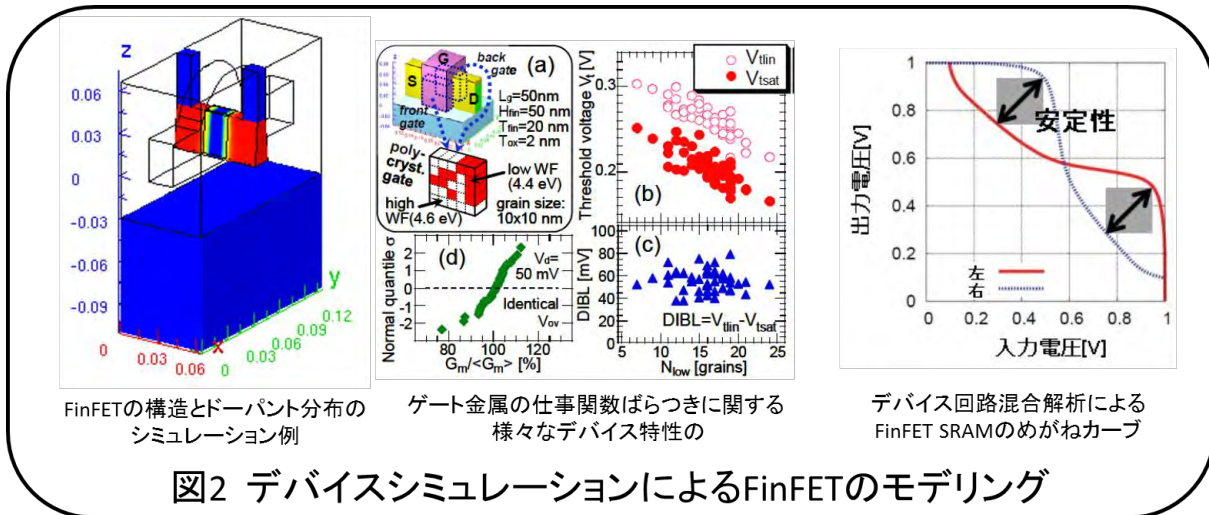


図1 デバイスシミュレーションによるトンネルFETのモデリング

## 大岡山・デバイスグループ

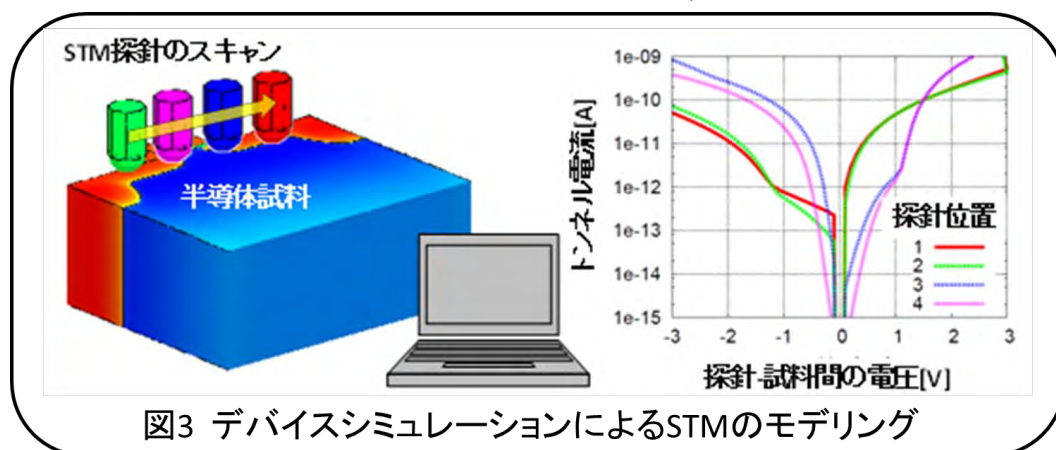


## ■ 新構造デバイスのモデリング

CMOSの微細化限界を延命するための新構造のMOSFETにFinFETがあります。FinFETはこれまでシリコン基板に水平に作られてきたMOSFETを、垂直に立てた立体型トランジスタとも呼ばれています。FinFETはチャンネルの不純物を薄く出来るので、不純物の個数ばらつきによる素子特性バラツキを抑制できることが知られています。しかし金属ゲートの仕事関数が、面方位などでばらつく影響が次の課題となることが明らかになりました。デバイスシミュレーションはこのようなデバイスバラツキの解析にも用いられています(図2)。(Matsukawa et al., VLSI Technology Sympo. 2014 など)

## ■ 走査型トンネル顕微鏡(STM)のモデリング

走査型トンネル顕微鏡(STM)は試料と探針間に流れるトンネル電流を測定することで、試料の界面付近の状態を測定することが出来る強力な物理計測手法です。半導体デバイス内の微細な不純物分布の測定にも用いられています。しかしSTMは探針が試料に近づくと、探針自体のポテンシャルが試料表面の状態を変えてしまうため、正確な情報の抽出の妨げになっていました。そこでデバイスシミュレーションを、STMの探針まで含めて実施することで、探針の静電ポテンシャルが試料に与える影響や、トンネル電流が試料内部のキャリア分布に変化を与える効果を計算できるようにしました。半導体デバイスにとどまらず、その計測技術にも役立ったよい例となりました。(Fukuda et al., JAP 2014 など)



## 3 教員からのメッセージ

半導体デバイスのシミュレーションは研究機関から産業界まで、幅広く必要とされるキー技術であり、それに特化した国際学会もあるほどの分野である一方で、案外プレイヤーの少ない分野でもあります。コンピュータの好きな方、プログラムを書いてみたい方にはうってつけの研究分野ではないでしょうか。あなたのアイデアを自分のプログラムで実現し、学会に発表していく、そんな研究者としての実力を、本研究室で身につけませんか。



## 宮本(恭)研究室

III-V族半導体等を用いた  
高速・低消費電力電子デバイス

デバイスグループ  
電気電子コース  
大岡山・S9-702

教授 宮本恭幸

研究分野: 化合物半導体電子デバイス 微細加工プロセス

キーワード: InGaAs MOSFET、GaN HEMT、低消費電力デバイス、トンネルFET

ホームページ: <http://www.pe.titech.ac.jp/Furuya-MiyamotoLab/index.htm>

## 1 主な研究テーマ

高度情報化社会では、情報処理量の増大によりIT機器の消費電力が増え続けています。この消費電力の削減には、電子回路をつくる電子デバイスにおいて、高性能を保ちつつ、消費電力をさげる構造を導入する必要があります。

当研究室では、低消費電力で動作する高速電子デバイス実現の為に、移動度に優れ、半導体ヘテロ構造の導入が可能なIII-V族半導体を中心として、低電圧時での高電流密度や低電圧での待機時低消費電力の研究を行っています。また、耐圧の点で優れたGaNデバイスについての研究も行っています。

## 2 最近の研究成果

## InGaAs MOSFET

電源電圧=ドレイン電圧を小さくして、大きな電流を流す為には、まずチャネル長を短くすることと移動度を上げることが必要になります。

大学研究室においてチャネル長を短くするのに最も有力なのは、電子ビーム露光法(EBL)による方法であり、当研究室は、数十nmという微細な構造形成が可能になっています。

また移動度を上げる材料としてシリコンに代わるInGaAsが有望視されており、この構造も当研究室では有機金属気相成長装置という装置で望む薄膜構造をエピタキシャル成長できます。

さらに高い電流密度を保つ為にはソースから十分な電子が供給される必要があります。そこで、エピタキシャル成長による高濃度ソースを持ったInGaAs MOSFETを提案・作製しています。チャネル長50nmのFETでは、ドレイン電圧0.5Vにおいて2.4A/mmという世界最高の高電流密度を示せました。これは国際半導体技術ロードマップ(ITRS)において2018年以降に予定されているInGaAs MOSFETの目標値(2.2A/mm@0.63V)を始めて上回ったものです。

またさらなる微細化(現在最小値13nm)やナノシート構造と呼ばれる三次元構造デバイスの研究も行っています。

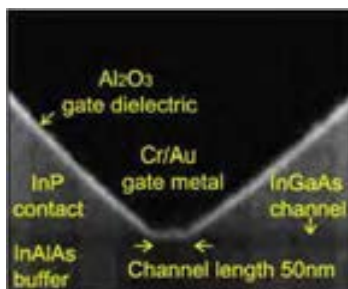


図1 チャネル長50nm素子の電子顕微鏡断面写真

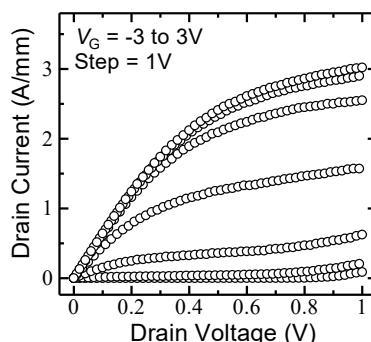


図2 チャネル長50nmの素子のI-V特性

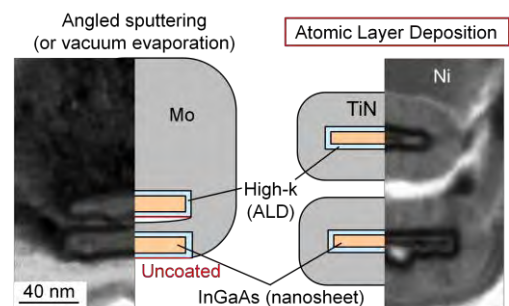


図3 InGaAs ナノシート構造のチャネル部分TEM像

## 大岡山・デバイスグループ

## InGaAsトンネルFET

InGaAsをチャネルとすることはドレイン電圧を低くしても高い電流を得るには有用ですが、しきい値を小さくしつつ、オフ状態でのリーク電流(待機時電流)を下げる必要もあります。しきい値以下のリーク電流の変化は、サブスレッショルドスロープと呼ばれるゲート電圧の60mV変化で一桁以下しか減少しないという熱限界があり、この限界を打ち破ることが必要です。バンド間トンネリングによりキャリアを注入するトンネルFETはこの限界を打ち破れると期待されていますが、一般的なシリコンはトンネル抵抗が高く、高電流密度を実現することが困難です。そこで当研究室では、GaAsSb/InGaAsによるタイプIIと呼ばれる価電子帯と伝導帯があらかじめ近づいたヘテロ接合を導入し、ダブルゲート構造を持つ縦型トランジスタ構造を作製しています。図5に示すように10nmのメサ幅が実現され、さらに図6に示すようにゲート絶縁膜を選ぶことで、56mV/decという熱限界を破るサブスレッショルドスロープが観測されています。

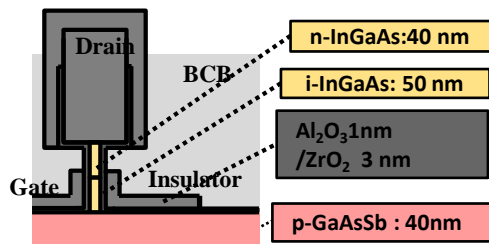


図4 10nm幅のメサを持つ縦型InGaAs TFETの透過電子顕微鏡断面像

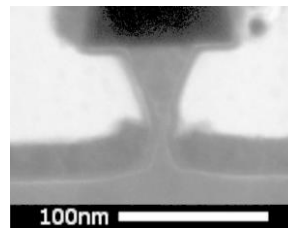


図5 10nm幅のメサを持つ縦型InGaAs TFETの透過電子顕微鏡断面像

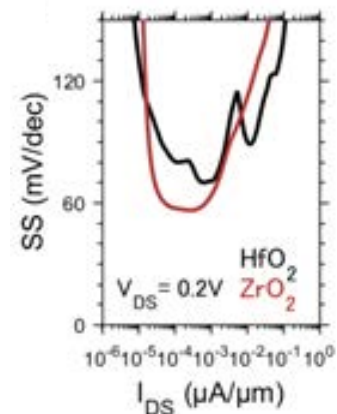


図6 GaAsSb/InGaAsチャネル縦型トンネルFETのサブスレッショルド特性

## GaN系HEMTの高性能化

高電圧/ハイパワーの領域では、耐圧の点でSiよりもバンドギャップが広いGaNを用いたデバイスが有望です。そこで、GaN系HEMTにおいて、高性能化のためのシミュレーションによる設計とその実証(富士通との共同研究/86GHzで3.6W/mmの高出力)、集積化したマルチレベルインバータ回路の実現(藤田研/三菱電機との共同研究)、デジタルスイッチの導入によるパワーアンプ効率改善(岡田研との共同研究)、通常と異なる結晶面を持った新エピタキシャル構造のためのプロセス開発(住友電工との共同研究)など、様々な試みを行っています。

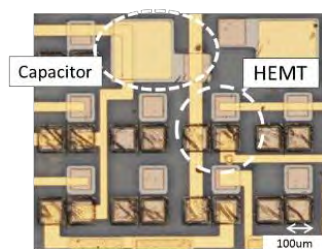


図7 GaN HEMTによるマルチレベルインバータ集積回路

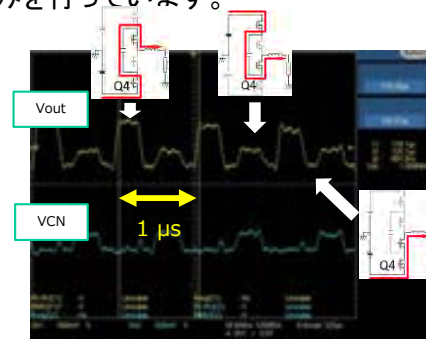


図8 GaN HEMTマルチレベルインバータ集積回路の動作特性

## 3 教員からのメッセージ

自分で思いついた新しい素子を、自分で設計し、自分の手で作製し、自分でその素子の測定・評価をするということは、技術者・研究者としての楽しみの一つです。我々の研究室においては、他ではなかなか使えない世界最高水準の電子ビーム露光装置や結晶成長装置などを目一杯使って、その楽しさを味わって貰いたいと思っています。



## 石橋研究室

ハイブリッドナノ構造の形成と量子  
ナノデバイスへの応用

和光キャンパス南地区 研究交流棟前にて

理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室  
(埼玉県和光市広沢2-1)

主任研究員 石橋幸治

研究分野: ナノ物理、ナノデバイス、量子情報デバイス、量子技術  
キーワード: 量子操作、量子ドット、人工原子、単電子デバイス、  
コヒーレント制御、トポロジカル超伝導、カーボンナノ  
チューブ、半導体ナノワイアホームページ: [http://www.riken.jp/research/labs/chief/adv\\_device/](http://www.riken.jp/research/labs/chief/adv_device/)

## 1 主な研究テーマ

ナノスケールの構造を作製する技術を開発するとともに、そこに現れる量子効果を探索し、量子物理学の原理に基づいた新しいデバイスや量子技術を研究しています。その典型例は量子コンピュータの基本デバイスである量子ビットです。量子ビットは人工的な2準位系であり2準位を持つ人工原子です。それを実現するために量子ドットに閉じ込めた1個の電子のスピンの励起子を使い、光や電磁波との相互作用を利用してコヒーレントに量子ビットを操作する技術を開発します。これらの量子ビットと共振器を強く相互作用させる技術を開発し、将来は超伝導型量子ビットなどと組み合わせたハイブリッド量子プロセッサの実現を目指しています。また、量子技術を電荷、テラヘルツ波、磁束などの極限計測へ応用することも目指しています。量子技術に必須な高いコヒーレンスを求め、より小さな構造を実現する原子操作技術やトポロジカル超伝導接合の研究なども行っています。



試料作製のためのナノ加工はナノサイエンス実験棟で行います。



100mK以下の極低温を発生する希釈冷凍機(最低温部)

## 2 最近の研究成果

## ■ 量子ドットとマイクロ波共振器の相互作用

ハイブリッド量子プロセッサのイメージを図1に示します。ここでは、ロジック動作を行う超伝導型量子ビット、量子メモリとして働くスピン型量子ビット、さらに、プロセッサ内の量子情報と光子を変換し外部との通信を可能にするインターフェース、そしてこれらを制御する古典的なトランジスタ回路からなります。これを実現するためには様々な物理機能を利用しますが、その一つが量子ビットと共振器の量子的な相互作用です。スピン型の量子ビットでは大きな相互作用を得るために単スピンと電界の相互作用が必要です。普通、スピンは電界で制御できませんが、そのためにスピン軌道相互作用や2電子系の一重項・3重項状態を使うことを検討しています。図2はコプレーナ導波路型マイクロ波共振器をチップ上に作製し、電界強度が大きくなるとスピン軌道相互作用が大きなInSb半導体ナノワイアで作った2重結合量子ドットを設置し、量子ドットと共振器の相互作用に関して予備的な実験を行うための試料構造です。測定では極低温に置かれた共振器を透過してくるマイクロ波の強度と位相を測定します。1個の電子が片方のドットに局在した場合(Aの場合)とドット間をトンネルにより行ったり来たりできる場合(Bの場合)で共振周波数が異なることが分かりました。量子的な相互作用を実現できているのかどうかはまだわかりませんが、このような共振特性の測定から量子ドットの状態を調べる手法は量子ビットの非破壊読出しの観点からも重要です。

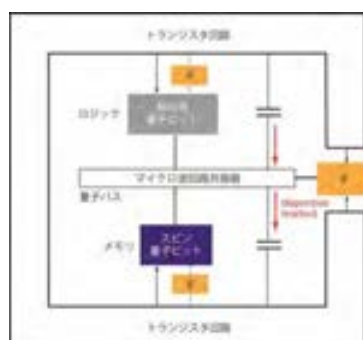


図1: ハイブリッド量子プロセッサのイメージ

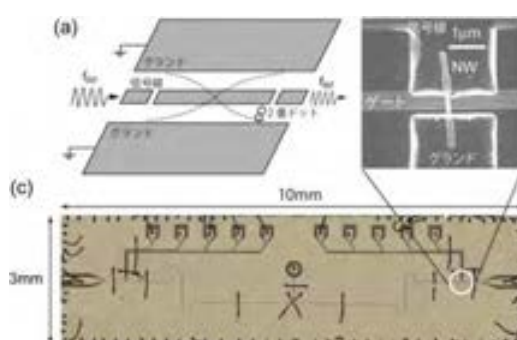


図2: マイクロ波コプレーナ導波路共振器中に置かれた2重結合量子ドット

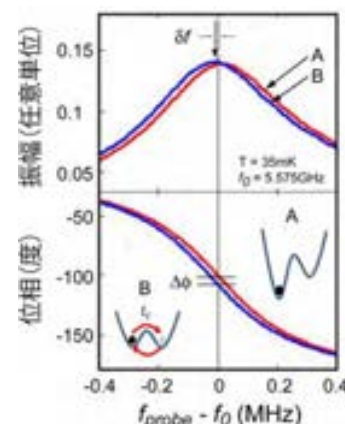


図3: 電荷状態に依存した共振特性

## 理化学研究所・デバイスグループ

## ■カーボンナノチューブ/分子ヘテロ接合とその応用

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)は1ナノメートル程度の直径を持つことから、これをBuilding Blockとすればリソグラフィーでは実現ができないくらい小さな分子スケールのナノ構造を作製することができます。SWCNTに対してトンネル障壁となるような構造を分子で作ることができれば、半導体ヘテロ構造と同じように1次元的なバンドエンジニアリングが可能です。このような構造は極めて微細であるので大きな量子効果をより高温で発現させることができます。図4はこのような構造の基本ユニットとなる分子でSWCNTをつないだ構造です。ここで分子はトンネル障壁の役割を果たします。図5は3つのSWCNTを分子でつないだ構造です。分子がトンネル障壁として働くことからこの構造は1次元量子ドットとして動作することが期待できます。1本のSWCNTの両端を分子で修飾した構造は分子と結合している化学結合を選ぶことにより単一量子ドットや2重量子ドットを作ることができます。図6は1次元量子ドット内の状態密度を走査トンネル分光(STS)法によって測定した結果です。カルボキシル基を用いて分子を結合した場合には調和振動子のような閉じ込めポテンシャルを持つ単一量子ドットが形成できます。また、この量子ドットからは励起子発光が観測されています。この発光は光通信波長帯でおこり、量子通信に必要な単一光子発生への応用が期待できます。また、1次元量子ドットで生成される励起子の物性や制御にも興味があります。

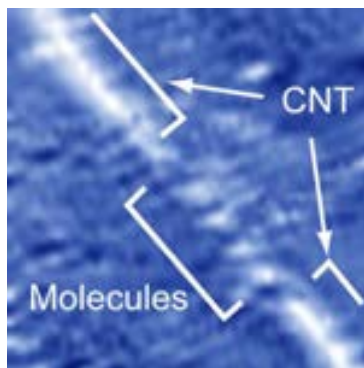


図4: 分子との化学結合をもちいて2つのカーボンナノチューブをつないだ構造の走査トンネル顕微鏡像

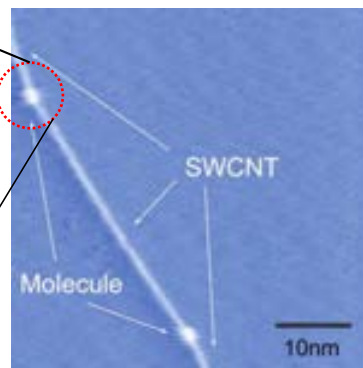


図5: 3つのカーボンナノチューブを分子でつないだ1次元量子構造

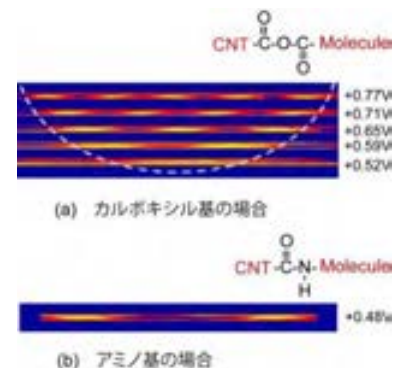


図6: 両端を分子で修飾したカーボンナノチューブ量子ドットの状態密度分布 (STS測定による実測結果)

## ■ 極限量子計測への応用 -THz波の量子検出の例-

ここでは量子効果を使った極限計測の例として、テラヘルツ (THz) 波を光子として検出する量子応答メカニズムとその応用について紹介します。カーボンナノチューブで作った量子ドットでは人工原子としてのエネルギースケールがTHzの周波数になるため、THz波を光子として吸収したり放出したりする量子的な応答が可能です。実際、図7に示すようにTHz波を量子ドットに照射するとTHz光子の吸収を伴うピークが観測されます(矢印)。このメカニズムは光アシストトンネルと呼ばれ、超伝導/絶縁体トンネル接合においてマイクロ波の量子検出に使われています。量子ドットではインピーダンス整合の問題があるためそのまま高感度検出に応用することはできませんが、量子ドットを複数個組み合わせたデバイスを作製することによりこの課題を克服することを検討しています。そこで、カーボンナノチューブで量子ドットを複数集積化したデバイスや簡単な回路を作製するための方法として、イオンビームを局所的に照射することによりトンネル障壁を形成する技術の開発を行っています(図8)。

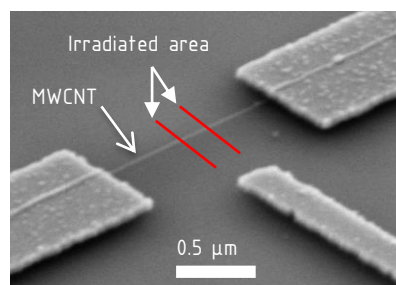
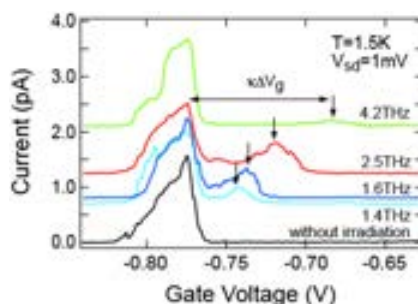


図7(左): 単層カーボンナノチューブ量子ドットにTHz波を照射した時の電流応答

図8(右): 多層カーボンナノチューブの一部に集束イオンビームなどを用いて局所的にトンネル障壁を形成して量子ドットを形成します。この方法を使えば好きな場所にトンネル障壁を作ることができるので、デバイスや回路へ向けた自由度が広がります。

## 3 教員からのメッセージ

1電子レベルで量子状態を操作する研究ですから、量子物理学に興味があり、単に本を読んでいるだけではなくそれを体験し、実際にそれを使ってデバイスを作りたいと思う人にはとても面白い研究だと思います。ただ、日々の研究はうまくいかないことの連続です。めったに思った通りの結果は得られない、というのが実感でしょう。それだけに、うまくいった時の感動は大きいものです。



# 大見研究室 – 新機能集積化デバイスの創製 – 高機能誘電体薄膜を用いた新構造デバイス –



デバイスグループ  
電気電子コース  
すずかけ台・J2-1204

准教授 大見俊一郎

研究分野: 集積化電子デバイス、半導体デバイス・プロセス

キーワード: シリコンデバイス、有機半導体デバイス、不揮発性メモリ、  
高誘電率薄膜、強誘電体、シリサイド、原子レベル平坦化

ホームページ: <http://www.sdm.ee.e.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

集積化により高性能化する新機能デバイスの創製を目的とした、新しいデバイス構造と作製技術に関する研究を推進する。特に、シリコン酸化膜( $\text{SiO}_2$ )よりも高い誘電率を持つ高誘電率薄膜や、分極特性によるメモリ機能を有する強誘電体薄膜などの高機能誘電体薄膜を用いて、学問に基づく新構造デバイスの実現を目指す。

研究テーマは、超高速・低消費電力で動作するCMOSとMONOS不揮発性メモリを実現する極微細シリコンデバイス、シリコンにはない特徴を持つフレキシブル有機半導体デバイス、ユニバーサルメモリを目指した1トランジスタ型強誘電体メモリである。本学すずかけ台キャンパスに構築されたクリーンルーム(CR)設備、超純水装置、高純度ガス供給設備などの、恵まれた実験環境を有効に利用して研究を進める。

### 高機能誘電体を用いた新構造デバイス

極微細シリコンデバイス  
フレキシブル有機半導体デバイス  
1トランジスタ型強誘電体メモリ

### 学問に基づく新しいデバイスの創製



## 2 最近の研究成果

### ■ 極微細シリコンデバイス

MOSFETのシリコン(Si)チャネル構造を立体化した、3次元ゲートMOSTランジスタへの高誘電率窒化ハフニウム( $\text{HfN}$ )ゲート絶縁膜の形成と、in-situ プロセスで形成したHf系MONOS型不揮発性メモリに関する研究を進めている(図1)。電子サイクロトロン共鳴(ECR)スパッタ法を用いて $\text{HfN}_x$  薄膜の窒素組成を制御することにより、ゲート電極( $x < 1$ )とゲート絶縁膜( $x > 1$ )をin-situプロセスで形成し、 $\text{SiO}_2$ 換算膜厚0.5 nmでリーク電流を劇的に低減したゲートスタック構造を実現している。

また、Si表面原子レベル平坦化プロセスに関する研究を行っている(図2)。高誘電率ゲート絶縁膜を用いたMOSFETおよびMONOS型不揮発性メモリのデバイス特性が向上することを明らかにしている。

さらに、トランジスタの直列抵抗を低減するために、耐熱性に優れたプラチナシリサイド(PtSi)と、低仕事関数を有するハフニウムシリサイド(HfSi)を混晶化したPtHfSiを形成し、 $n^+$ および $p^+$ -Siに対するコンタクト抵抗を $10^{-9} \Omega\text{cm}^2$ に低減することに成功している(図3)。

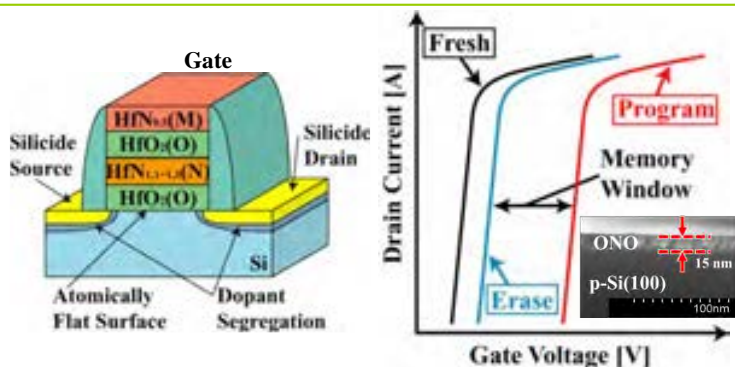


図1 Hf系MONOS型不揮発性メモリのin-situプロセスによる形成

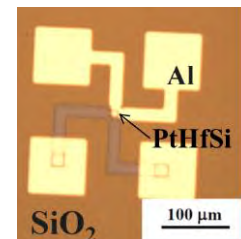
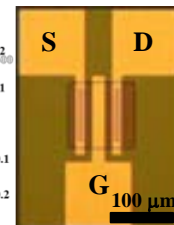
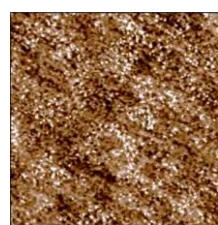


図2 原子レベル平坦Si(100)表面とHf系MONOSデバイス

図3 PtHfSiのコンタクト抵抗測定素子

# すずかけ台・デバイスグループ

## ■ フレキシブル有機半導体デバイス

有機半導体は、フレキシブルで低温形成が可能などの、Siにはない特徴を有しており、新しいエレクトロニクス分野の創製が期待されている。しかし、Siデバイスで用いられるリソグラフィプロセスが適用できないため、有機半導体トランジスタ(OFET)の微細化、高集積化が課題となっている。本研究では、リソグラフィを用いたトップゲート型単一有機半導体フレキシブルCMOSに関する研究を進めている(図4)。

代表的な有機半導体であるペンタセン( $C_{22}H_{14}$ )やルブレン( $C_{42}H_{28}$ )は、ホール移動度に対して電子移動度が著しく低いため、N-OFETにはフラーレン( $C_{60}$ )などの別の材料を用いる必要があり、高集積化が困難となっている。そこで、低い仕事関数(2.4 eV)を有し、大気中で安定な窒素添加 $LaB_6$ を、ペンタセンの電子供給層として用いることで、光照射下において大気中での電子電流の測定に成功している(図5)。また、非晶質ルブレンが絶縁性を示すことを明らかにし、非晶質ルブレンをゲート絶縁膜に用いたトップゲート型ペンタセンOFETの動作を初めて実現している。

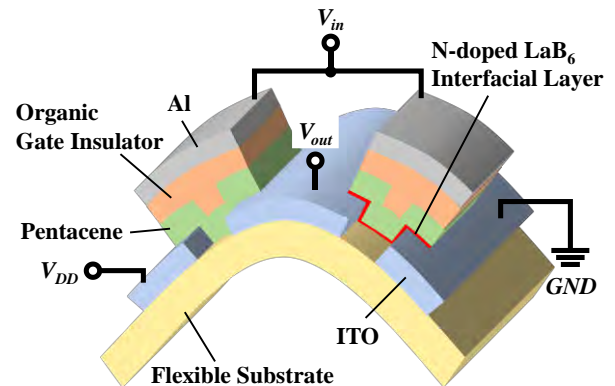


図4 トップゲート型単一有機半導体フレキシブルCMOS

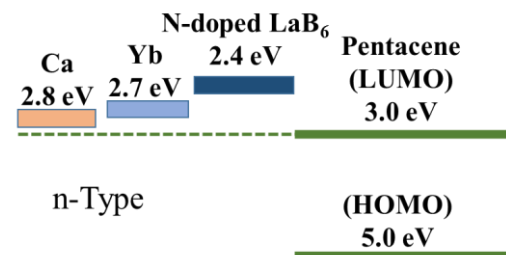


図5 ペンタセンと低仕事関数金属のバンド構造

## ■ 1トランジスタ型強誘電体メモリ

新規ユニバーサルメモリの創製を目的として、1トランジスタ型Hf系強誘電体メモリに関する研究を進めている。高誘電率ゲート絶縁膜として用いられる $HfO_2$ は結晶化させることにより、10 nm級の極薄膜においても強誘電性を示すため、高速化・低電圧動作化が期待される。しかし、結晶化に高温熱処理が必要なため、Siとの界面に低誘電率層が形成され、減分極電界によるメモリ保持特性の劣化が課題となっている。本研究では、低誘電率界面層の形成を抑制し、メモリ保持特性の向上を目的とした、 $HfO_2$ 薄膜のSi基板上への直接形成に関する研究を行っている。

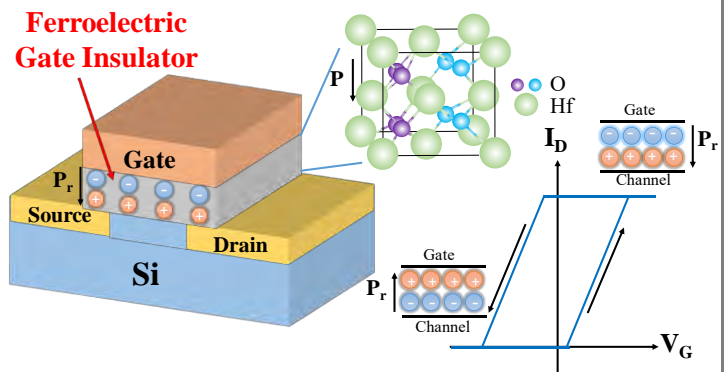


図6 1トランジスタ型Hf系強誘電体メモリ

## 3 教員からのメッセージ

自分で考えたデバイスを自分で試作できる。本学の恵まれた実験環境を活かして、思いっきり研究を楽しもう。夢にみるくらい考え抜けば、君のアイデアが世界を変えるかもしれない。

## 4 参考文献

- (1) S. Kudoh, and S. Ohmi, "Influence of Si(100) surface flattening process on nonvolatile memory characteristics of Hf-based MONOS structures", 75<sup>th</sup> Device Research Conference, pp. 119-120 (2017).
- (2) S. Ohmi, M. Hiroki, and Y. Maeda, "Narrow Line Crystallization of Rubrene Thin Film Enhanced by Yb Interfacial Layer for Single Crystal Channel OFET Application", 75<sup>th</sup> Device Research Conference, pp. 183-184 (2017).
- (3) Y. Maeda, S. Ohmi, T. Goto and T. Ohmi, "Effect of Nitrogen-Doped  $LaB_6$  Interfacial Layer on Device Characteristics of Pentacene-Based OFET", IEICE Trans. Electron., **E100-C**, pp. 463-467 (2017).
- (4) S. Ohmi, Y. Tsukamoto, W. Zuo and Y. Masahiro, "Evaluation of Contact Resistivity of PtHfSi to p-Si(100) with Dopant Segregation Process", IEEE International Interconnect Technology Conference, 11-20 (2017).
- (5) M. Hiroki, Y. Maeda, and S. Ohmi, "Top-gate pentacene-based OFET with amorphous rubrene gate insulator", Jpn. J. Appl. Phys., **57**, 02CA08 (2018).



## 角嶋研究室

半導体技術を利用した  
機能デバイスの創出

デバイスグループ  
電気電子コース  
すずかけ台・S2棟708号室

准教授 角嶋 邦之

研究分野: 電子デバイス、半導体プロセス  
キーワード: パワーデバイス、エネルギー貯蔵、医療用センサ  
ホームページ: <http://www.iwailab.ep.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

半導体プロセス技術は原子レベルの精密な加工可能です。電子デバイスの動作はナノメートルオーダーの加工技術に加えて、新材料導入によって性能向上がなされています。本研究室では集積回路用の最先端Siデバイス、メモリの研究に加え、パワーデバイスの高性能化の研究を行っております。さらに、半導体プロセス技術を利用したエネルギー貯蔵デバイス、医療用センサの研究を行っております。学生が自ら設計を行い、試作から測定、解析に至るまですべて研究室で行っています。本研究室は筒井研究室、若林研究室と共同して実験室を運営しています。



## 2 最近の研究成果

## ■ シリコンパワーデバイス

ゲート絶縁型バイポーラトランジスタでは少数キャリア寿命の最適設計がスイッチング損失を左右します。そのため、少数キャリア寿命の精度の高い抽出法が必要になりますが、本研究室では新しいテストパターンとその電気特性から高い精度で寿命を得ることに成功しています。図1はシリコンウエハの熱酸化条件によって正孔キャリア寿命を抽出した結果です。キャリア寿命の劣化が少ないプロセス条件を明らかにすることができます。

この手法はシリコンカーバイドやダイヤモンド半導体にも応用展開することができます。

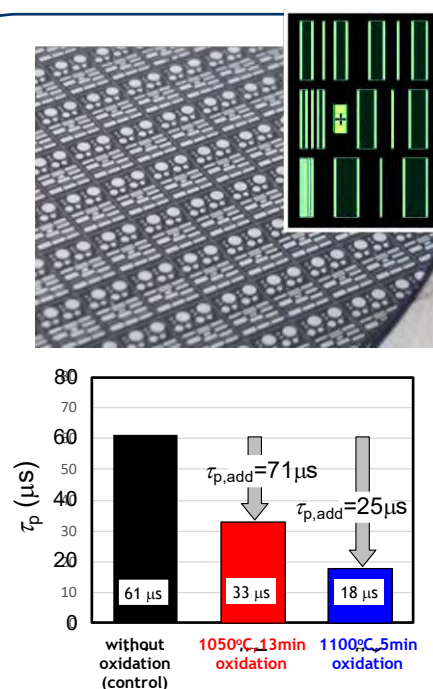


図1 少数キャリア寿命の高精度抽出

## すずかけ台・デバイスグループ

### ■ シリコンカーバイド(SiC)パワーデバイス

シリコンカーバイド(SiC)は高電圧領域で高効率に電力変換を行うデバイスとして期待されています。性能や信頼性を左右する高品質ゲート絶縁膜の研究、およびSiC内部の結晶欠陥の電氣的評価技術の確立を目指しています。

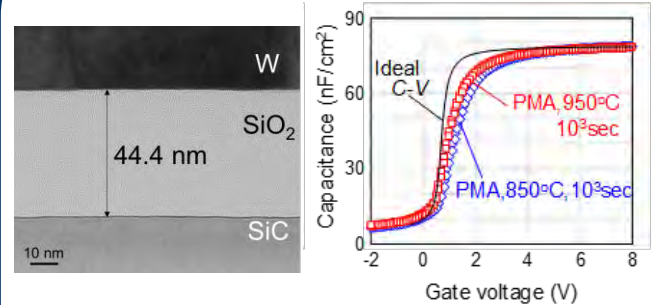


図2 SiCのMOSキャパシタの断面構造と電気特性

### ■ オンチップ電気二重層キャパシタ

IoTデバイスなど急な動作で電力が不足することがあります。そのためにオンチップキャパシタに蓄電する技術が必須ですが、大容量化ができる電気二重層キャパシタを試作しています。

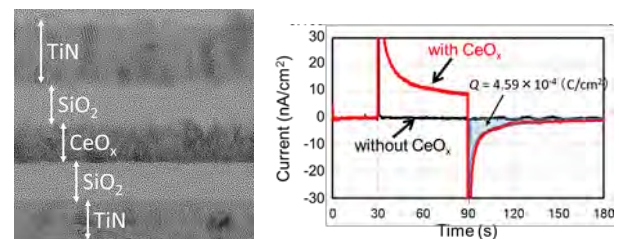


図3 試作した電気二重層キャパシタと充放電特性

### ■ 医療用センサの開発

医療機器の高感度化は測定の高速化により低被爆化が実現できます。本研究室では半導体プロセス技術を利用して、新しい医療用センサーの開発を行っています。



図4 医療用センサと検出回路との実装

## 3 教員からのメッセージ

本研究室ではウェハレベルからスタートして加工プロセスを進めてデバイス試作を行い、電気測定に物理分析、解析ソフトウェア開発に至るまで一貫して行います。探求的要素の強い研究内容になりますが、自由な発想をもって世界トップのデータを出したいと考えております。



## 筒井研究室

新材料・新機能素子技術による電子デバイス：  
ナノデバイスからパワーデバイスまで

デバイスグループ  
電気電子コース  
すずかけ台・J2棟1103号室

教授 筒井 一生      助教 星井 拓也

研究分野: 電子デバイス、電子材料・プロセス、結晶成長  
キーワード: パワーデバイス(Si, AlGaIn/GaN)、立体チャネルトランジスタ、  
半導体中不純物の原子レベル3D解析  
ホームページ: <http://www.tsutsui.ep.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究分野とめざすもの

シリコン大規模集積回路(LSI)からパワーデバイスまで、半導体電子デバイスは大きな進歩を遂げ、それは将来にわたり我々の社会を支える高度な基盤技術です。本研究室では、新しい材料技術、デバイス技術、プロセス技術によるブレークスルーの提案、ひいては技術のパラダイムシフトの誘導をめざして研究を進めています。研究テーマとしては、ロングレンジの独自の研究から、近い将来の明確なターゲットを産学連携で推進するものまで、同時にとり組んでいます。また、これらの研究テーマの多くは、角嶋研究室、若林研究室等との連携で進めています。

## 2 最近の研究テーマ

## ■ 半導体パワーデバイスの高性能化技術・新デバイス構造

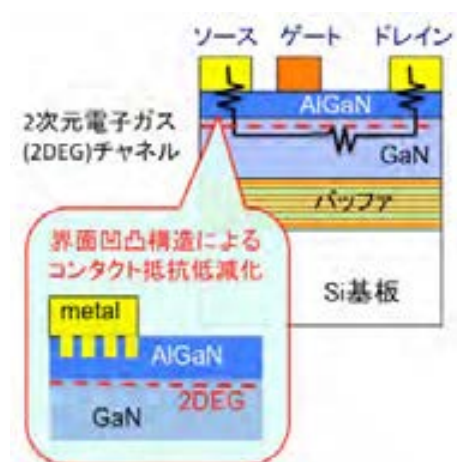
電力の制御に使われるパワーデバイスは、エネルギー・地球環境問題の克服につながる大きな役割を担っています。当研究室では種々の半導体によるデバイスの新技術の研究に取り組んでいます。

## (1) AlGaIn/GaN系パワーデバイス

高性能パワーデバイス用半導体として窒化ガリウム系材料があり、AlGaIn/GaNのヘテロ界面に発生する二次元電子ガスをチャネルに使う高電子移動度トランジスタ(HEMT)は高速パワーデバイスとして有望です。パワーデバイスでは、オン状態での素子抵抗を徹底的に下げて低損失化を図ることと同時にオフ状態では高い耐圧と低い漏れ電流を維持することが必要です。

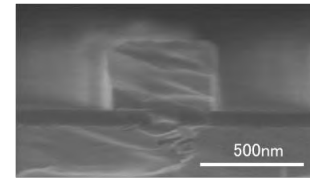
オン状態の素子抵抗低減には、ソース、ドレインのオーミックコンタクト電極の接触抵抗を下げる技術の開発が重要であり、コンタクト形成のメカニズムに立ち戻る観点からの研究を進めています。例えば、AlGaIn層への凹凸構造導入などの新技術も提案し、有用性を明らかにしています。

さらに、将来技術として、トランジスタを従来の平面構造から立体構造にして、AlGaIn/GaN系パワーデバイスの特性を飛躍的に高めることを目指した研究も行っています。



HEMT構造と新コンタクト形成技術

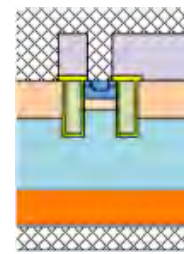
## すずかけ台・デバイスグループ



GaN選択成長によるFin構造

### (2) シリコンパワーデバイス (IGBT)

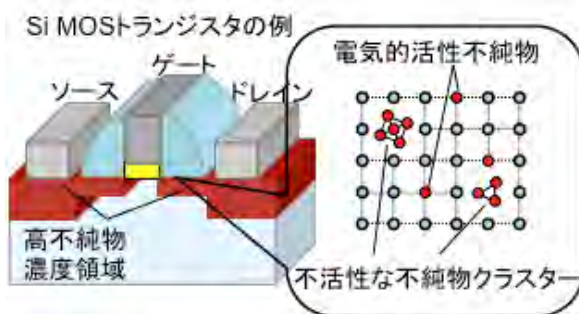
現在最も広く使われているパワーデバイスの一つは、半導体シリコンの絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)です。そのため、IGBTの低損失化の追求は、インバータ等の電力変換システムの高効率化を通して世界の省エネルギーに大きく貢献できます。当研究室では、IGBTのゲート部分を微細化することによって格段に低損失な高性能IGBTを目指す研究にシミュレーションと実験の両面から取り組んでいます。



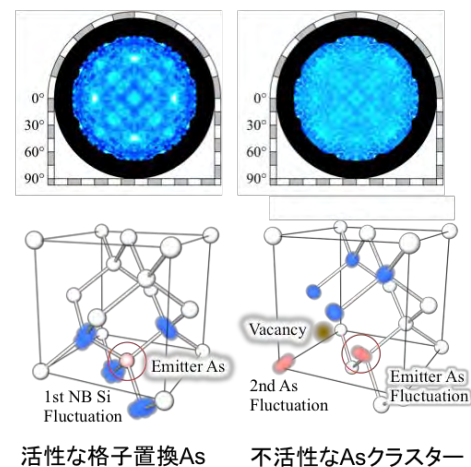
トレンチIGBT

### ■原子ホログラフィー技術による半導体中の不純物の3次元構造の解明

半導体に不純物をドーピングしてp形、n形の導電性を制御するのは半導体デバイスの重要な基礎技術ですが、デバイスの高性能化を果たすためには、この不純物ドーピングにも極限的な特性が求められます。デバイスの低損失化のために非常に高濃度の不純物ドーピングを行うと、不純物原子が半導体結晶の格子構造にきちんと取り込まれず原子クラスター等を作り電気的特性が劣化します。しかしこのメカニズムは十分に解明されていません。この課題解決を目指し、大型放射光施設 (SPring-8等) での光電子ホログラフィーなどの新しい手法を使い、不純物の3次元的な原子配列構造を解明する研究を行っています。



半導体中不純物の結晶中での配置構造



Si中のAsの光電子ホログラムとAs原子配列構造

### 3 教員からのメッセージ

新しい物を作り出す研究は思い通りには行かないことの方がずっと多いものです。常に自分の頭でよく考え、ねばり強く取り組んでみてください。あるときそこから小さな、しかしわくわくさせるような輝きが見えるときが来ます。研究はそういう非常に個人的体験である一方で、他の研究者との関わりのなかで自分の活動と存在を形にしてゆく社会的な面があります。国内、海外の学会で自分の研究成果を発表する機会も多くあります。これも自分の世界がひろがるエキサイティングな体験になるはずです。そしてそれらは、皆さんが将来社会で活躍できる大きな糧になります。



## 若林研究室

シリコン・トランジスタ技術を基礎  
とした低電力・高性能な  
知的システムデバイスの先行研究

すずかけ台・デバイスグループ  
電気電子コース  
すずかけ台G2棟1002号室

教授 若林整

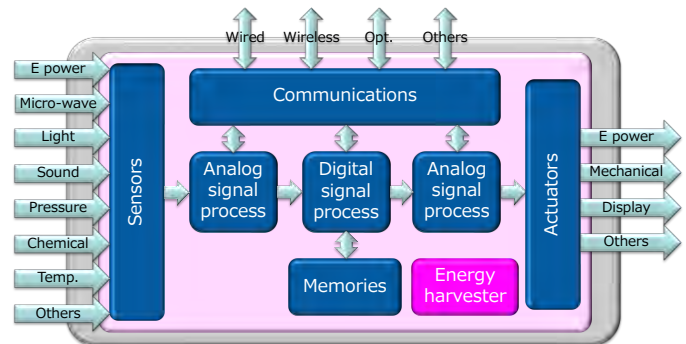
研究分野：電子デバイス

キーワード：Advanced 3D MISFET (Silicon),  
2D FET (MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, HfS<sub>2</sub>, Black Phosphorous, etc.)

ホームページ：<http://search.star.titech.ac.jp>

## 1 背景および主な研究テーマ

皆さんの生活に溶け込んだ電子機器に用いられているシリコン・トランジスタからなる集積回路(Integrated Circuits: IC)は、Moore's lawの通りScaling conceptに支えられてLSI (Large Scale Integration)からVLSI (Very LSI), ULSI (Ultra LSI)へと進化しています。さらにSmartphone等に搭載されている様に、高周波通信素子や撮像素子(Image sensor), Motion sensor等のインターフェースを機能モジュールとして混載するMore than Moore領域へ応用範囲が急速に拡大しています。当研究室では、シリコン・トランジスタ技術[10-18]を基礎として、アプリケーションを意識した高集積・低消費電力・高性能を目指した知的システムデバイスの先行研究を行っています。

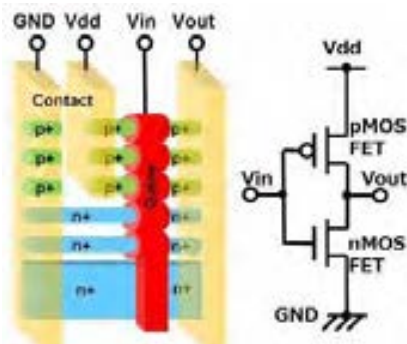


図：知的システムデバイスの信号処理フローと発電システムのブロック図。

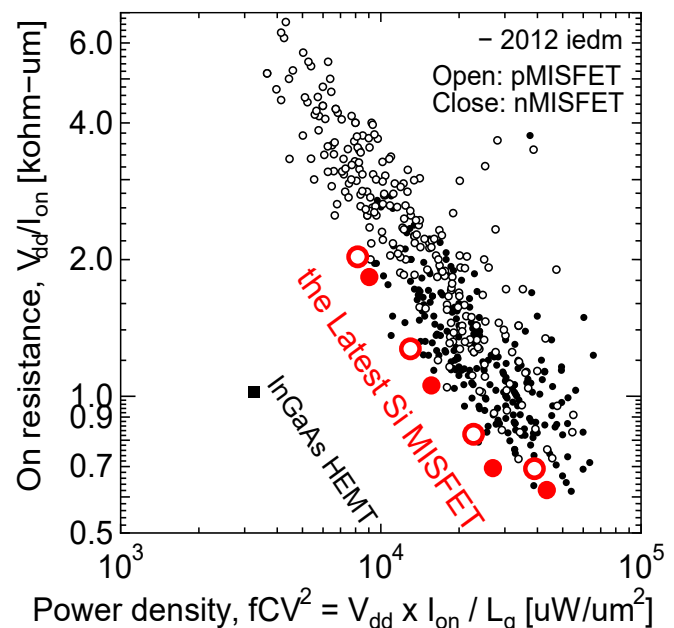
## 2 最近の研究成果

## ■ LSI用高度3D高集積化MISFET技術先行研究

現在でも世界最小のトランジスタの部類にあるゲート電極長が5 nmのシリコンCMOS [15-17]を含む様々な高性能CMOSデバイス動作を実証した経験を基礎に、さらなる高集積化・低消費電力化[18]・高性能化に加え、多機能化を目指した先行研究を行います[1,3,6,8]。例えば右図Benchmark等も用いて研究の意義を明確にしながらデバイス・シミュレーション等を駆使して、効率的にデバイス動作を実証して行きます。特に、高度に3次元高集積化した構造を持つMISFETの性能向上を実現する技術について、公開論文や独自の技術開発だけでなく特許情報等も活用して研究を推進します。



図：高度3次元高集積化シリコンMISFETの例。

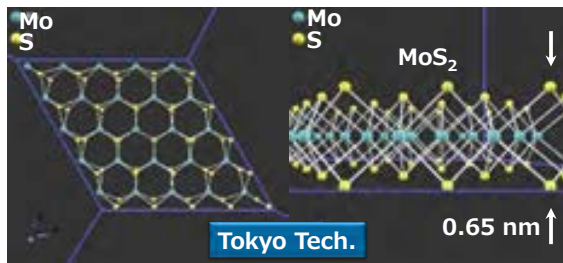


図：シリコンMISFETの性能推移。駆動時抵抗の駆動時消費電力面密度依存性。駆動エネルギー効率を向上させるには左下の方向へ研究を進める必要がある。

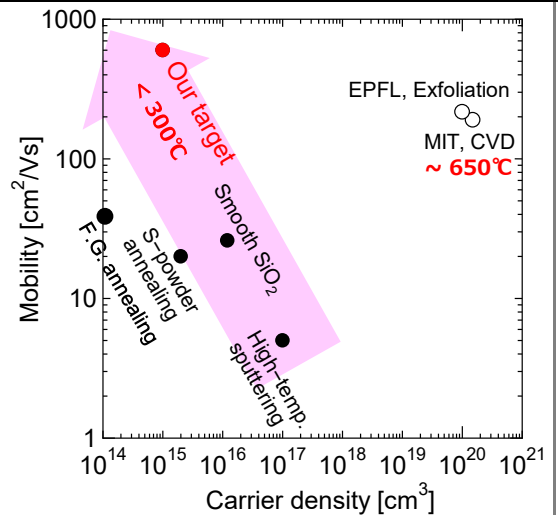
## すずかけ台・デバイスグループ

### ■ 2D FETの応用に関する先行研究

バンドギャップが0 eVであるグラフェンに代わる原子層状半導体である遷移金属ダイカルコゲナイド( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{HfS}_2$ 等)を用いた電子デバイスの研究を行っています[2,4,5,7,9]。新材料による新たなデバイス物理を実証・構築し、LSIやディスプレイなどへ応用することを目指して、研究を拡大・加速します。



図：2D層状半導体の例。



図：スパッタ多結晶 $\text{MoS}_2$ 膜高品質化。

### ■ 参考文献

1. 若林整、「SoC向け先端デバイスの研究開発動向」、SEMICON Japan 2015, 2015/12/18, Invited.
2. H. Wakabayashi, "Advanced CMOS Device Technologies Discussed Also with Transition-Metal Di-Chalcogenide (TMDC) Channel," 228th ECS meeting 2015, MA2015-02 1098, Invited.
3. 若林整、「先端Si-LSIデバイスの現状と今後の展望」、(公社)精密工学会『プラナリゼーションCMPとその応用技術専門委員会』第142回研究会、Invited.
4. T. Ohashi, H. Wakabayashi, et.al. "Multi-layered  $\text{MoS}_2$  film formed by high-temperature sputtering for enhancement-mode nMOSFETs," 2015 JJAP, 54 04DN08, doi:10.7567/JJAP.54.04DN08.
5. H. Wakabayashi, "Two dimensional material device technologies," IEEE, EDS, WIMNACT45, Feb.2015, Invited.
6. H. Wakabayashi, "Advanced Scaling and Wiring Technology," Tutorials, ADMETAplus2014, Invited.
7. T. Ohashi, H. Wakabayashi, et. al., "Multi-Layered  $\text{MoS}_2$  Thin Film Formed by High-Temperature Sputtering for Enhancement-Mode nMOSFETs," SSDM 2014, pp. 1074-1075.
8. H. Wakabayashi, "Progress&Benchmarking of CMOS-Device Technologies," ICEP2014, FA2-1, Invited.
9. H. Wakabayashi, "Progress and prospects of silicon transistors based on junction technologies," IWJT 2013, pp. 98-103, Invited.
10. 若林整：「V.19.3.1: 論理素子」、「化学便覧応用化学編第7 版」、招待寄稿, 2013.
11. 若林整：「シリコントランジスタのあゆみと将来」、総合報告(招待解説論文), 応用物理, 82 巻, 4 号, 292 頁, 2013.
12. H. Wakabayashi, "More-than-Moore Devices based on Advanced CMOS Technologies" (Keynote Address), 2012 AWAD, June 2012, Invited.
13. H. Wakabayashi, "CMOS-Device Technology Benchmarks for Low-Power Logic LSIs", G-COE PICE Int'l Symp. and IEEE EDS Mini-Colloquium on Advanced Hybrid Nano Devices: Prospects by World's Leading Scientists, October 2011, Invited.
14. H. Wakabayashi, "SONY's outstanding work involving HK-MG on Silicon," 7th International Symposium on Advanced Gate Stack Technology, SEMATECH, 2010, Invited.
15. H. Wakabayashi, et al., "Characteristics and Modeling of Sub-10-nm Planar Bulk CMOS Devices Fabricated by Lateral Source/Drain Junction Control," IEEE T-ED, Vol. 53, Issue 9, 2006, pp. 1961-1970, Invited.
16. 朝日新聞朝刊一面Top「トランジスタ最小化に成功」外、「Sub-10-nm CMOSデバイス」、2003年12月8,9日.
17. 「電子ビームリソグラフィーで作られた世界最小5 nmトランジスタ」、集英社イミダス2006, p. 859.
18. H. Wakabayashi, D.A. Antoniadis, et. al., "Supply-Voltage Optimization for Below-70-nm Technology-Node MOSFETs," IEEE T-SM, Vol.15, No.2, 2002, p. 151-156, Invited.

### 3

### 教員からのメッセージ

日々指数関数的に増える情報資源を自然に活用する人に優しく豊かな社会の実現に向けて、集積回路技術への期待が高まっています。その一助となることを目指して、実用研究と将来を見据えた探索研究について領域を柔軟に設定して研究を進めます。他方、筒井研究室及び角嶋研究室と強く連携して研究を進めます。すずかけ台の明るく清々しい環境での自由闊達な活動を好む学部/修士/博士学生および研究員を募集しています！ 共同/委託研究も広く募集していますので、お気軽に御連絡下さい！ (wakabayashi.h.ab@m.titech.ac.jp, 226-8502 横浜市緑区長津田町4259-G2-22, G2棟10階1003号室、Tel/Fax: 045-924-5594)



# 渡辺研究室

## ヘテロ・ナノ結晶の創製と 量子ナノ構造光・電子機能デバイス



デバイスグループ  
電気電子コース  
すずかけ台・J2棟1102号室

准教授 渡辺 正裕

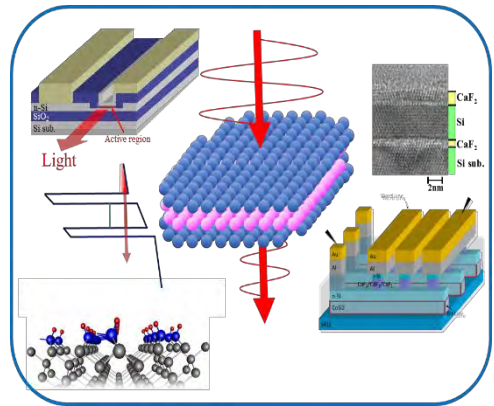
研究分野: 光・電子機能デバイス、量子効果デバイス、ヘテロ結晶成長  
ナノプロセス工学、ナノ構造の光・電子機能

キーワード: ナノ構造、ヘテロ接合、量子効果、集積回路、二次元薄膜、機能設計学、  
金属／絶縁体ヘテロ接合、シリコン光・電子集積

ホームページ: <http://www.pe.titech.ac.jp/watanabelab/>

### 1 研究目的

革新的機能創出を志向する、新しい集積デバイスのコンセプト提案と設計論の構築、その実験的検証を主軸として研究教育活動を進めています。金属・絶縁体・半導体など、性質が異なる複数の材料を接合したナノメートル厚の二次元積層薄膜、あるいは微結晶を形成する技術を創り出すとともに、その新しく創り出された人工結晶(≡ヘテロ・ナノ結晶)の中で生じる光及び電子の相互作用を支配する量子物性を利用して、高度な情報処理やエネルギー変換の極限機能を引き出す固体デバイス設計論の構築及び原理実証を行います。これらの研究活動を通じて、未来社会を支えるエレクトロニクス・システム構築へ向けたデバイス設計学理の構築と基盤技術の開拓に資するとともに、多様な人々と協力して問題解決を主導するリーダーの育成に貢献します。

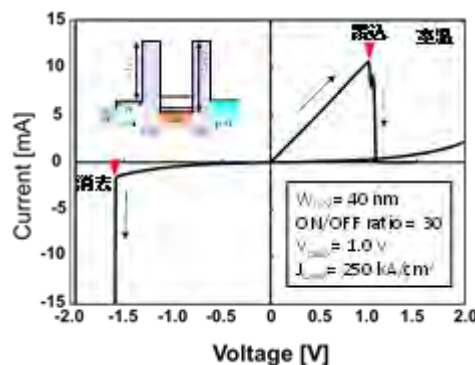


### 2 研究テーマ

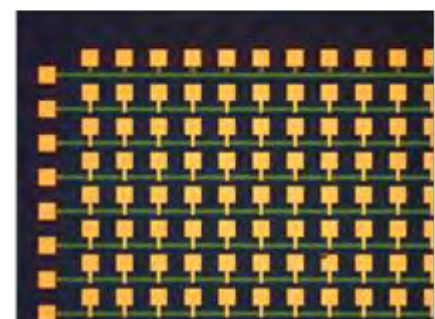
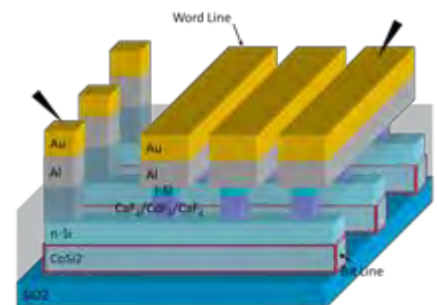
#### ■ 超高集積・高速メモリ・スイッチングデバイス

本研究で提案する人工結晶を用いた共鳴トンネル素子は、異種材料の組み合わせと、ナノサイズの構造に特有の強い量子閉じ込め効果によって、室温においても顕著な電流スイッチング特性を示すことが本研究室よりはじめて見いだされました。この共鳴トンネル構造に、量子井戸への電荷蓄積／放出現象を適切に組み合わせると、電源を切っても記憶が消えない不揮発型メモリ素子可以实现できます。この素子は、極限的な低消費電力性と、微細化・集積化に適した原理的優位性を併せ持っており、将来の極限集積メモリや高速三端子素子実現への基本要素になると考えています。本研究テーマでは、集積回路に適合する異種

材料で構成された共鳴トンネル抵抗変化スイッチング素子を提案・作製し、特性の理論解析及び実験的な特性説明等を通して、未来の集積デバイス実現への基礎的課題を明らかにします。



室温でメモリサイクル動作を示す提案素子のI-V特性(実測)  
(グラフ中左上の図は単体素子のバンドプロファイル)



クロスポイント型集積構造 (概略図: 上, 実際に作製した構造の顕微鏡写真: 下)

## すずかけ台・デバイスグループ

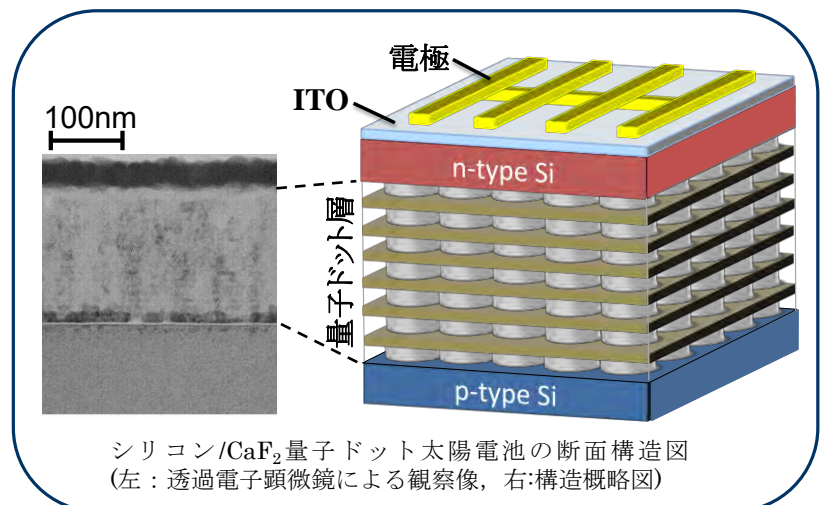
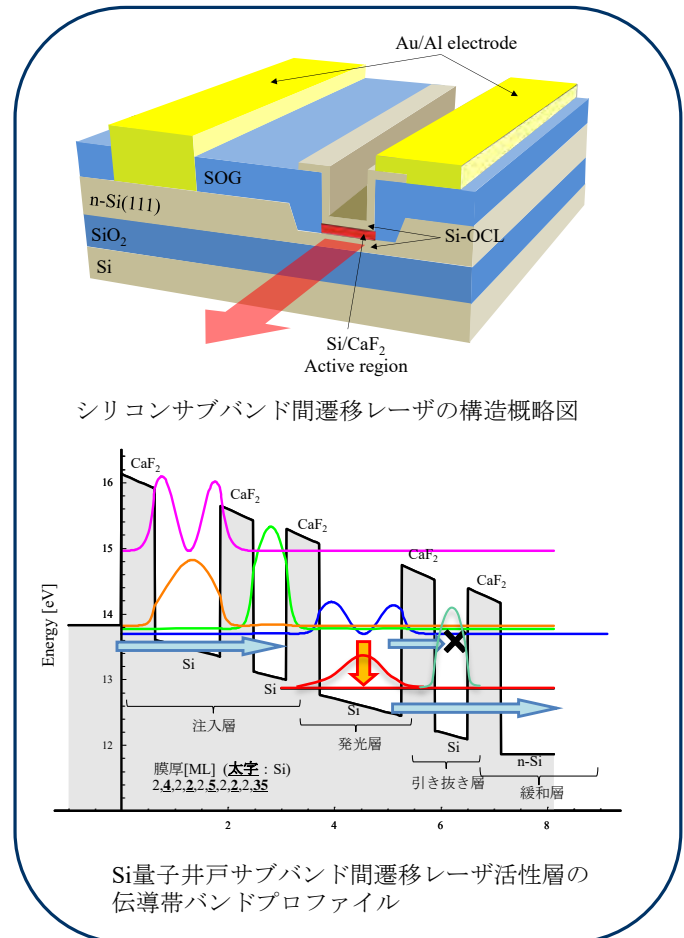
### ■ シリコン集積サブバンド間遷移レーザー

量子井戸中に形成されたエネルギー準位間の光遷移(ミサブバンド間遷移)の原理を利用すると、「光らない」半導体の代表格であるシリコンにおいても発光遷移が期待でき、しかもバンド内の電子・ホール の応答速度は高速であるため、シリコンLSIと集積可能な高速応答レーザーを実現できる可能性があります。本研究では、シリコンと積層結晶形成可能な異種材料群を組み合わせた量子井戸の構造設計により、可視～赤外をはじめとする広範な波長での発光遷移を設計可能な量子井戸構造を提案し、そのレーザー発振の可能性に関する理論予測や、結晶成長・素子形成技術に関する研究を行っています。近年、電流注入と、光導波路を両立できる素子構造を形成する技術の開発に成功したことから、シリコン量子薄膜の電流注入発光特性の解明へと研究の段階は着実に進展しています。

### ■ 量子ドット太陽電池

量子ドット構造は、量子閉じ込めによる禁制帯幅制御や、フォノン散乱制御など、太陽電池の変換効率を根本的に増大させる可能性のある基本原理を内蔵しています。

このミクロな視点に基づく基本原理を、実用的な太陽電池の変換効率向上につなげるためには、材料や結晶構造、ナノ構造の設計などを個別に検討することに加え、変換効率を最大化するためのデバイス構造や形成プロセスを見出す研究が必要とされています。本研究では、単結晶で構成可能なシリコン量子ドット超格子を用いて、変換効率増大に資すると期待される現象の原理実証、および、高効率なセル構造の提案や素子構造形成技術等に関する研究を行います。



## 3 教員からのメッセージ

人々の夢や社会の要請が科学技術、中でもエレクトロニクスの中で現実になっていく様を私たちは目の当たりにしてきました。まさに、これからが本番です！新しい機能を設計し、形あるものとして実現することに興味のある方はぜひいらっしやってください。根本原理から自然現象を理解し、その知識を使って、目的の電子機能を、もろもろの制約条件を克服しつつ、現実の物質を駆使して構成的に組み立てていく方法論は、デバイス工学の醍醐味です。一緒に学び、チャレンジしましょう。



# スピントロニクスと磁性応用素子

## 中川研究室



電子材料・物性グループ  
電気電子コース  
大岡山・S3-709

教授 中川 茂樹 助教 高村 陽太

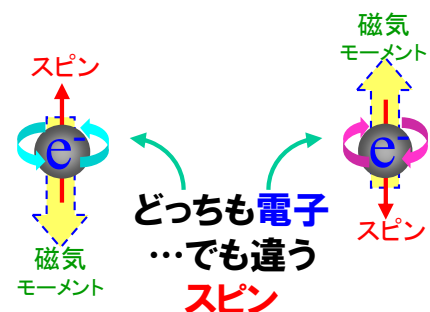
研究分野: スピントロニクス、磁性デバイス、磁気記録・記憶  
キーワード: ピエゾ・スピントロニクス, 超伝導スピントロニクス  
磁気抵抗ランダムアクセスメモリ

ホームページ: <http://www.spin.pe.titech.ac.jp/index.html>

### 1 主な研究テーマ

当研究室では「電子スピンに着目した次世代材料・デバイスの開発」を目的に、伝統的な永久磁石材料から、最新のスピントロニクス材料・デバイスまで幅広い分野の研究を行っております。

電子スピンは磁気モーメントと密接な関係を持っていますから、スピンの制御は物質の磁化の制御を行うことを意味します。ナノメータサイズの薄膜や人工構造を作製することにより、既存の材料に垂直磁気異方性などの新たな機能を付加し、磁気抵抗メモリ等の不揮発性低消費電力デバイスを実現します。

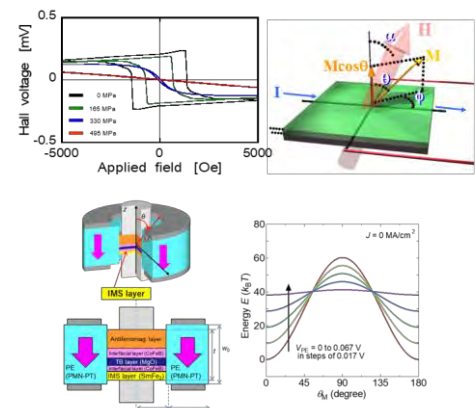


### 2 最近の研究成果

#### ■ ピエゾエレクトロニクス・磁気トンネル接合

次世代の不揮発性メモリである磁気抵抗メモリMRAMは、磁化反転動作時に非常に多くの電力を消費するため、不揮発性による消費電力削減効果は未だ限定的です。また、この消費電力を下げるために磁化反転に対するエネルギー障壁を低減させると、今度は磁化の熱擾乱耐性が損なわれてしまいます。

そこで、我々の研究室では、磁化反転の時にのみ、ピエゾ効果と逆磁歪効果を利用してエネルギーバリアを一時的に低減させる応力アシスト反転磁化反転(SAMR)を考案しました。さらに、高効率に圧力を印加でき、集積可能なピエゾエレクトロニクス磁気抵抗デバイス(PE-MTJ)を他の研究室と共同で提案しました。最近、このPE-MTJに要求される新規材料やデバイス動作実証、シミュレーションの研究を行っています。



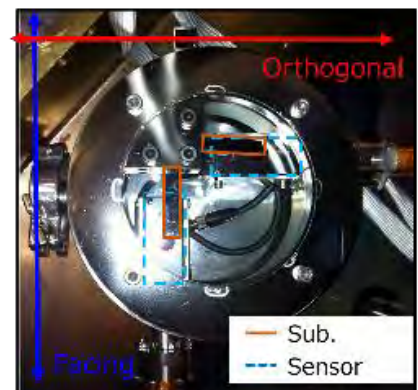
#### ■ 超伝導スピントロニクス

超大規模なデータセンターやクラウドサーバにおいて、システム全体を液体窒素温度以下に冷却し、室温では到底実現不可能な超高速動作を実現し、冷凍機を含めた総消費電力の削減する「クライオジェニックコンピューティング」構想が提案されています。

このような低温化で動作する高性能メモリとして、超伝導体とスピントロニクス材料を組み合わせた超伝導スピンバルブに注目し、物性・材料・デバイスの研究を行っています。

#### ■ 新規スピントロニクス材料の開発と物性制御

界面効果を利用したスピントロニクス材料の物性制御や反強磁性を示す究極のスピン分極率材料、新規永久磁石薄膜などの研究も精力的に行っています。また、成膜柱の応力を計測できる超高感度応力計測システムを備えたスパッタ装置を利用して、薄膜形成過程の解き明かそうとしています。



超高感度応力観測システム

## 大岡山・電子材料・物性グループ

## ■ 垂直磁化型スピントロニクス

従来の電子デバイスは電子の電荷のみを利用したものがほとんどで、電子のスピンは積極的に利用されてきませんでした。強磁性体を電子デバイスに取り入れることで、電子スピンの向き(アップとダウン)を区別できるようにすれば、スピン依存トンネル、スピンフィルタ、スピン注入トルクなどの様々な現象を利用した新しい機能デバイスを実現することができます。特に重要な応用先として、電源を遮断しても情報を失わない垂直磁化型磁気抵抗メモリ(MRAM)に注目しています。

## 【希土類遷移金属を用いた垂直磁化型磁気トンネル接合】

右上図は、本研究室で作製したMRAMの基本メモリ素子である垂直磁化トンネル接合(p-MTJ)の模式図と実際の断面透過電子顕微鏡(TEM)像です。大きな磁気抵抗効果を得るためには、MgO膜の(100)配向が必要ですが、きれいな(100)配向が得られています。このp-MTJ構造で64%の磁気抵抗効果を得ることに成功しました。

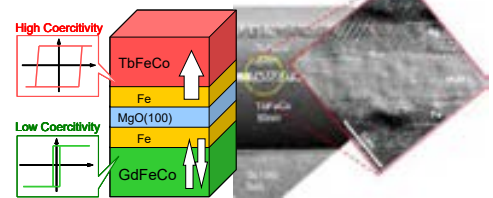
## 【垂直磁化型ハーフメタル強磁性体】

ハーフメタル強磁性体(HMF)は、片方のスピンの電子しか伝導に寄与しない究極の高スピン偏極材料です。MTJに応用すれば理論上無限大の磁気抵抗比が得られる夢の材料です。本研究室では、このような材料として $\text{Co}_2\text{FeSi}$ や $\text{Co}_2\text{MnSi}$ などのCo基フルホイスラー合金に注目し、これに垂直磁気異方性を付与する研究を行っています。超格子構造や酸化物とのヘテロ構造を形成し、界面に生じる新しい磁気異方性を利用することで、垂直磁化を実現しました。(右図)ごく最近では、上下両方の電極が垂直磁化したフルホイスラー合金で構成したMTJ構造の作製に成功し、磁化の平行/反平行状態を制御することに成功しました。

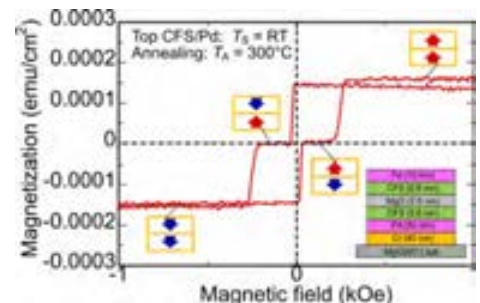
## 【応力アシスト磁化反転とpiezoelectronic磁気抵抗デバイス】

MRAMは、磁化反転動作時に大きな電力を消費するため、不揮発性による消費電力削減効果は未だ限定的です。また、この消費電力を下げるために磁化反転に対するエネルギー障壁を低減させると、今度は磁化の熱擾乱耐性が損なわれてしまいます。そこで、我々の研究室では、磁化反転の時にのみ、piezo効果と逆磁歪効果を利用してエネルギー障壁を一時的に低減させる応力アシスト磁化反転(SAMR)法を考案しました。さらに、高効率に圧力を印加でき、集積可能なpiezoelectronic磁気抵抗変化デバイス構造を他の研究室と共同で提案しました。また、本デバイスに必要となる垂直磁化した超磁歪材料の開発や、シミュレーションを用いたSAMRの消費電力削減効果の評価を行っています。

## Perpendicular Magnetic Tunnel Junction for future MRAM

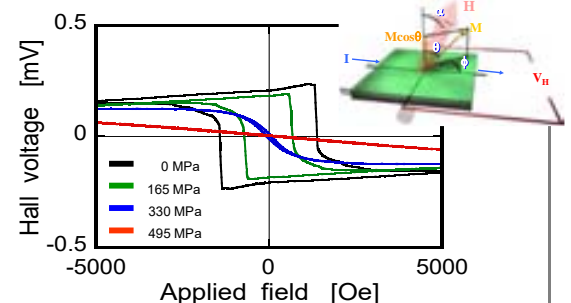


垂直磁化p-MTJの構造図と断面TEM像  
JAP 103, 07A911 (2008).



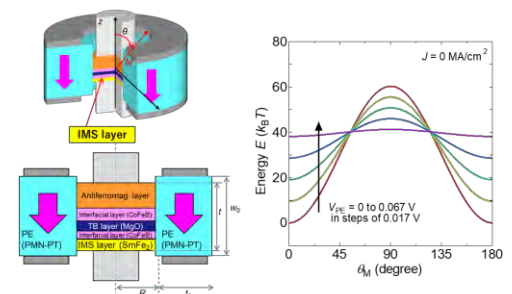
垂直磁化型フルホイスラー合金電極を有したMTJの磁化特性

AIP Advances 8, 055923 (2018).



垂直磁化型超磁歪材料薄膜

IEEE Trans. on Magn. 44, 2487 (2008).



piezoelectronic磁気抵抗変化素子  
SSE 128, 194 (2017).

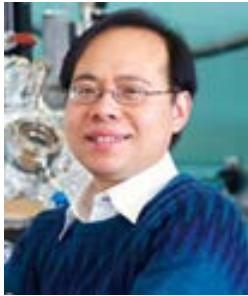
## 3 教員からのメッセージ

電子材料の持つ新しい特性の探索や、新たな作製・加工技術の開発を通して、今後増えてくるであろう様々な新しい現象を「子供の時のような好奇心で受け止め、理解して応用できる力」をつけてもらいたいものと考えています。

今、多くの新しい機能がスピンと磁性に関する分野から生まれています。研究室は和気あいあいでお互いに協力し合って、「よく学び、よく実験し、よく楽しむ」というポリシーを実践しながら研究室生活を送っています。一緒に新しい世界に一石を投じる研究をしてみませんか？



## PHAM研究室

電子スピンを用いた次世代エレクトロニクス  
の材料とデバイスの研究開発

大岡山・電子材料・物性グループ

PHAM研究室  
准教授 PHAM NAM HAI

研究分野: 半導体・トポロジカルスピントロニクス  
 キーワード: 強磁性半導体、トポロジカル絶縁体、SOT-MRAM、スピンバルブ、  
 スピントランジスタ、単電子スピントランジスタ  
 ホームページ: <http://magn.pe.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

半導体と強磁性体は情報化社会を支える材料としてそれぞれ大きな役割を果たしています。半導体は集積回路や光通信素子などの様々なデバイスに応用されている。これらの半導体デバイスにおいては機能が高速な電子の電荷によって支えられているため、動作が非常に高速である。一方、強磁性体はハードディスクなどの情報記録媒体に広く利用されており、これらの磁性体デバイスには電子の「スピン」を持つ「不揮発性」という特徴が生かされている。もし半導体と磁性体の特徴を融合することができれば、磁性体の不揮発性を持ち併せたようなエネルギー使用効率が高くて高い半導体デバイスが実現できると期待される。当研究室では、強磁性体と半導体の長所を両方持ち合わせる新しい材料の創製およびそれを利用する新しいデバイス構造の提案と実証を行う。例えば以下のような研究テーマを遂行している。

- ✓ 新型強磁性半導体の創製とそのスピン依存伝導特性の評価
- ✓ 強磁性半導体を用いたバイポーラスピントランジスタ、電界効果スピンとランジスタの作製と評価
- ✓ トポロジカル絶縁体を用いた次世代スピン軌道トルク磁気抵抗メモリ(SOT-MRAM)の開発
- ✓ 磁性体/半導体を用いたスピンバルブ・スピントランジスタの作製と評価
- ✓ 磁性ナノ粒子を用いた単電子スピントランジスタの作製と評価

## 2 最近の研究成果

## 次世代強磁性半導体: Fe系強磁性半導体の創製

当研究室では、従来の強磁性半導体の問題点を全て解決できる次世代強磁性半導体、Fe系強磁性半導体の研究開発を行っている。Fe系強磁性半導体はMn系強磁性半導体よりも、次の点で優れている。

- ◆ p型だけではなくn型強磁性半導体も作製できる
- ◆ 室温で動作可能な強磁性半導体を作製できる
- ◆ バンド構造と強磁性の発生メカニズムの解明が容易である

当研究室は世界で初めてn型電子誘起強磁性半導体(In,Fe)Asの開発に成功した。当時はn型電子誘起強磁性半導体は実現不可能だと言われたため、この開発の意義が大きい。n型強磁性半導体ができたことで、初めて強磁性p-n接合など、強磁性半導体デバイスが作製できるようになった。

[参考文献: Nature Communications 7, 13810 (2016)]

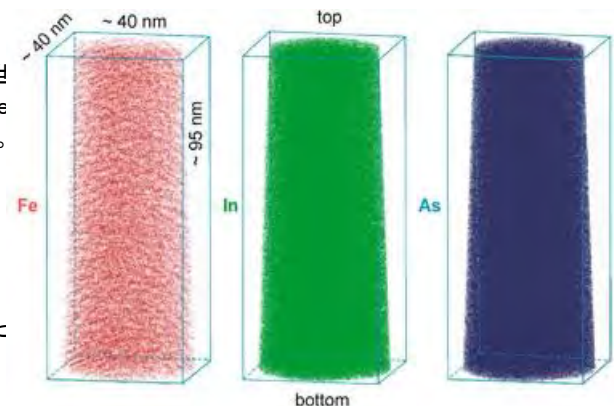


図1. 開発した(In,Fe)As結晶の原子分布。

## トポロジカル絶縁体を用いた次世代スピン軌道トルク磁気抵抗メモリ(SOT-MRAM)の開発

近年、電子回路の低消費電力化の観点から超高速、超高密度、高耐久性の不揮発性メモリが求められる。磁気抵抗メモリ(MRAM)は、ランダムアクセスメモリの一種であり、不揮発性に加えて、高速動作、極めて高い耐久性など、大変優れた特性を持つ。第一世代のMRAMのメモリ素子(磁気トンネル接合: MTJ)では、磁界印加による磁化反転法が用いられている。近年、第二世代の書き込み技術として、スピン・トランスファー・トルク法(Spin transfer torque; STT)が研究開発され、製品に使われ始めている。我々はスピンホール効果によって発生した純スピン流によるスピン軌道トルク(Spin orbit torque: SOT)を用いた磁化反転技術に着目している。SOT法では、スピンホール効果のスピンホール角( $\theta_{SH}$ ) > 1 および、高い電気伝導性を示すスピンホール材料を開発できれば、MRAM素子の磁化反転に必要な電流を1桁、エネルギーを2桁以上も下げることができる。また、200 psという超高速で磁化反転できる。Pham研ではスピン流発生源として世界最高性能のトポロジカル絶縁体の開発に成功し、世界をリードしている。

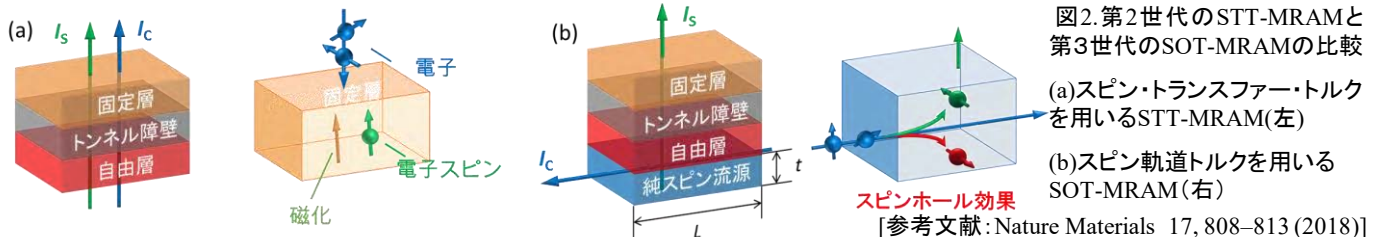


図2. 第2世代のSTT-MRAMと第3世代のSOT-MRAMの比較

- (a) スピン・トランスファー・トルクを用いたSTT-MRAM(左)
- (b) スピン軌道トルクを用いたSOT-MRAM(右)

[参考文献: Nature Materials 17, 808–813 (2018)]

## 大岡山・電子材料・物性グループ

## 単電子スピントランジスタの作製と評価

ナノ微粒子のサイズがナノレベルと小さいことから、様々な量子サイズ効果が出現している。たとえば、同じ微粒子に2個の電子を閉じ込めると、2個の電子の間にクーロン反発力が発生するため、静電エネルギーが余計にU分だけ高くなる。従って、先に1個の電子を微粒子に注入しておいた場合、バイアス電圧が $\sim U/e$ と比べて十分小さければ、2個目の電子が微粒子にトンネルできない「クーロンブロックード」(Coulomb Blockade)現象が発生する。つまり、同じ微粒子に2個以上の電子が存在できない。従って、微粒子をチャンネルとするトランジスタを作製できれば、電子1個ずつ伝導させる「単電子トランジスタ」を作製できる。当研究室では、さらに強磁性の特長を生かして、トンネル電流の大きさを強磁性微粒子の磁化の向きで変化させられる「単電子スピントランジスタ」(Single Electron Spin Transistor; SEST)を提案、作製および評価を行っている。図3に実際に作製したSESTの走査型電子顕微鏡による平面像を示す。

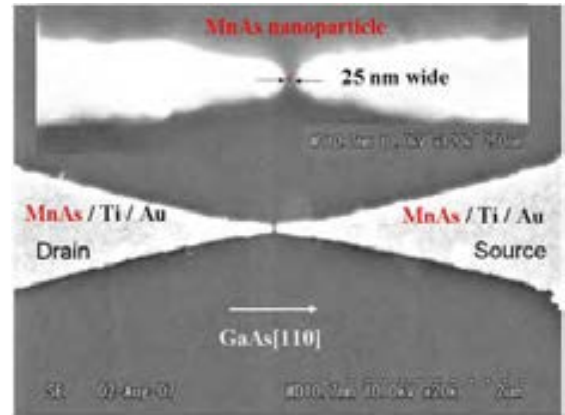


図3. 作製したSESTの走査型電子顕微鏡による平面像

このように、本研究室では、ナノプロセス技術を駆使し、ナノレベルのSESTが作製できる。さらに、SEST素子において、単電子効果に起因する微分電流電圧特性のクーロン階段およびTMRの振動現象を観測した(図4)。また理論との比較から微粒子中の電子スピンの緩和時間を割り出した。その結果、MnAs微粒子が低温において10  $\mu$ sと極めて長いスピン緩和時間(現時点では世界記録)を持つことを見出した。[参考文献: Nature Nanotech. 5, 593-596 (2010)]

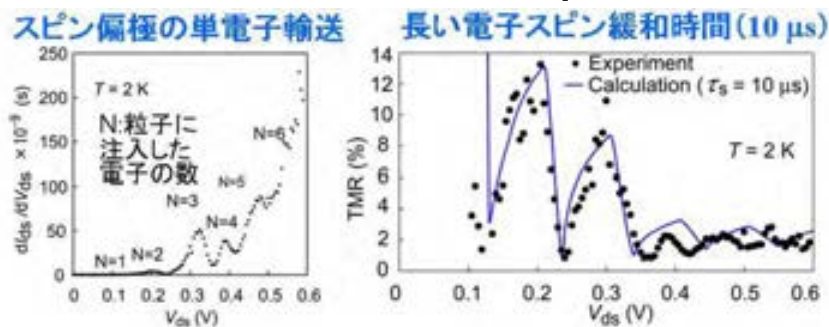


図4. SESTにおける微分電流電圧特性のクーロン階段(左)およびTMRの振動現象(右)の観測。TMR振動の実験を理論でフィッティングした結果、10  $\mu$ sと強磁性金属ナノ微粒子において世界最長のスピン緩和時間を実現した。

## 磁性体/半導体を用いるスピンプルプ・スピントランジスタの開発

スピントランジスタは、出力電流がゲート電圧だけでなくソース/ドレイン強磁性電極の磁化方向にも依存するため、高密度高速不揮発性メモリや再構成可能な論理回路への応用が期待されている。スピントランジスタの実現には半導体チャンネルへのスピン注入と半導体チャンネルでのスピン輸送の高効率化が必須である一方で、従来のスピンプルプデバイスにおける磁気抵抗比は1%以下しか得られていなかった。Pham研究室では、ナノプロセス技術を駆使し、半導体チャンネル長が数100 nm~数10 nmの微細なスピンプルプ構造を作製し、Siチャンネルでは3.6%、GaAsチャンネルでは12%という世界最高性能の磁気抵抗比を達成した。今後にはゲート電極を有するスピントランジスタの実現を目指す。

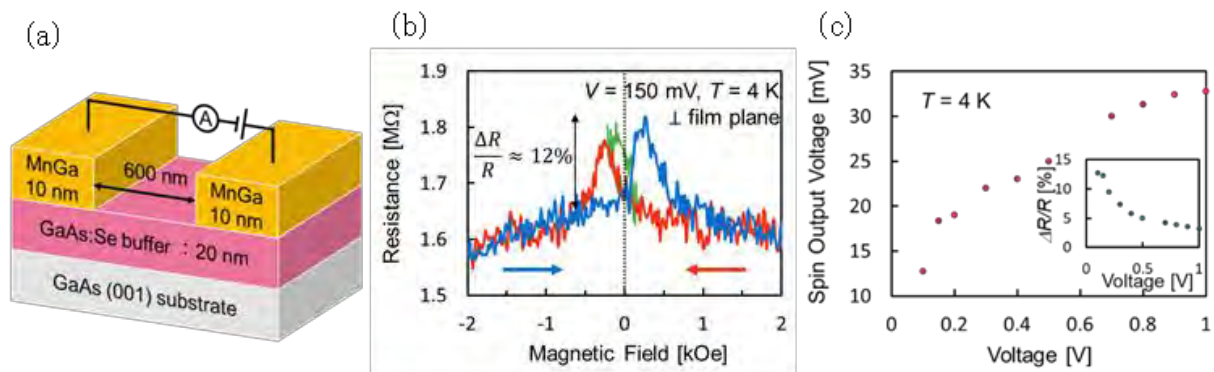


図5. (a) MnGa垂直磁化膜とGaAs半導体を用いたスピンプルプデバイス。(b) 観測した磁気抵抗効果のおよび(c)スピン依存出力電圧の例。いずれも世界最高特性を達成している。

## 3 教員からのメッセージ

当研究室では、上記の研究テーマ以外に未公開の先端的な研究課題は多数あります。PHAM研究室では若い学生の想像力が最大限に活用でき、未踏の研究にチャレンジできます。



# 有機エレクトロニクス、有機半導体 間中研究室 デバイス、新規測定技術



電子材料・物性グループ  
電気電子コース  
大岡山・S3-719

教授 間中 孝彰 助教 田口 大

研究分野: 有機エレクトロニクス、誘電体物性  
キーワード: 有機トランジスタ、有機EL、有機太陽電池、非線形光学  
ホームページ: <http://www.pe.titech.ac.jp/IwamotoLab/>

## 1 主な研究テーマ

現在、有機材料のもつ「柔らかい・軽い」といった性質を背景として、ユビキタス社会を支える新規な有機デバイスに関する研究が世界中で行われています。絶縁体というイメージが強い有機物ですが、ホール・電子輸送性材料や電極材料などが実用化されており、半導体や電気伝導体としての機能を持っていることも事実です。とはいえ、有機材料を扱う際の基本は誘電性であり、この誘電性を軸に多くの現象を捉えることが、有機材料の本質を活かしたデバイス設計には重要であると考えています。

間中研究室では、誘電体の持つ重要な性質である「分極」と「電気伝導」というコンセプトを柱に、誘電体工学の立場から有機材料の電子物性の基礎と応用に関する以下のような研究を展開しています。

- 時間分解顕微EFISHG測定による有機半導体材料中のキャリア輸送評価
- 各種有機デバイス(有機トランジスタ、有機太陽電池、有機EL)に関する研究
- 電気測定と光学測定を組み合わせた有機デバイスの動作機構に関する研究
- 高分子半導体の高次構造(キラル構造、1軸配向膜)を利用した新規デバイス

## 2 最近の研究成果

### ■ 時間分解顕微EFISHG測定による有機半導体材料中のキャリア輸送評価

材料中を流れる電流(伝導電流)は、電荷の流れですが、電荷は小さく直接観測することは不可能です。有機材料を用いたデバイスでは、動作機構が解明されていない点も多く、キャリアの流れを可視化することは、動作機構の解明や特性向上の鍵となります。我々は、光第2次高調波発生(SHG)が材料中の分極から発生することに着目し、この分極を可視化することでデバイス中の電荷を観測するという新しい手法を開発しました。有機材料は誘電体のように振舞うため、外部からの印加電界や注入されたキャリアによって分極されやすく、SHGは有機デバイスを評価する技術として、非常に適していると言えます。

右図は、実際にペンタセンFETにおいて観測されたキャリア挙動の様子です。ソース電極から注入されたキャリアがチャンネル中を拡がり、ドレイン電極に近づいていく様子が確認できます。このように、デバイス中における分極の伝播を通して、キャリアの動きを光学的手法によって可視化するシステムを世界で初めて実現しました。我々が開発した新規計測手法は、有機FETの動作に関して、電極依存性や絶縁膜依存性、輸送異方性など、様々な情報を得ることができ、動作機構解明やデバイス動作を最適化する上で非常に有効な手法として期待されています。また、有機FETの動作を記述するモデルとして、異なる誘電体の界面における電荷蓄積を表現するMaxwell-Wagner効果を基礎とした動作機構を提案し、実際に有機FETの動作を再現することにも成功しました。これは、有機半導体を半導体というよりも絶縁体に近い材料として扱う、オリジナリティの高い研究です。

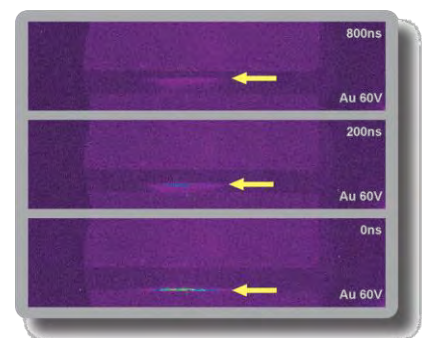


図1. 時間分解顕微SHG測定で観測される、デバイス中におけるキャリアの流れ。

T. Manaka, E. Lim, R. Tamura, M. Iwamoto, Nature Photon., Vol. 1, pp.581-584 (2007).

T. Manaka, F. Liu, W. Weis, M. Iwamoto, Phys. Rev. B Rapid Commun., Vol. 78, Article No. 121302 (2008).

R. Tamura, E. Lim, T. Manaka, M. Iwamoto, J. Appl. Phys., Vol.100, Article No. 114515 (2006).

## 大岡山・電子材料・物性グループ

## ■ 各種有機デバイス（有機トランジスタ、有機太陽電池、有機EL）に関する研究

近年、有機半導体材料を用いたデバイスに関する研究が盛んに行われています。前述の「柔らかい・軽い」といった性質以外にも有機材料は分子の多様性と設計の自由度という特徴を持っています。一方で、有機半導体は絶縁体（誘電体）に近い性質を持っています。我々はこのような材料の特徴を生かしたデバイス研究を行っています。

## ・有機トランジスタ

高い移動度を持つ材料が注目されています。同じ材料を用いても、膜質によって移動度が大きく変化して、最近では溶液プロセスによって作製された単結晶が用いられることも多くなりました。有機半導体は弱い結合で結晶を作るため、作製プロセスによって結晶構造が変わります。我々は、作製プロセスを制御し、より高い移動度を持つデバイスの作製を試みています。また、強誘電性絶縁膜を用いたデバイスについても研究しています。

## ・有機EL

有機ELでは、電極からの効率良い電荷注入が要求されます。我々の研究室では、様々な材料で界面修飾したデバイスを評価し、特にデバイス特性改善の原因を探る研究を進めています。右図は、透明電極上にペンタセンを挿入したデバイス特性で、動作電圧の低下などが確認されています。

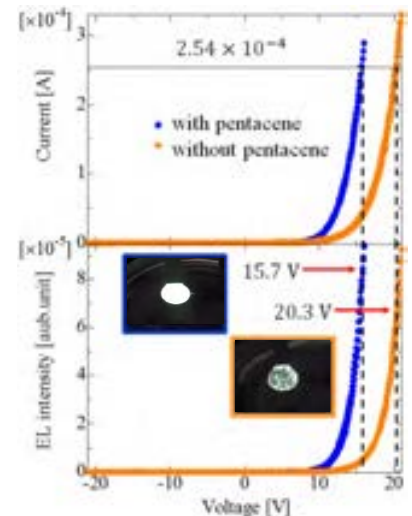


図2. 透明電極上にペンタセンを挿入した有機ELデバイスの特性

## ・有機太陽電池

有機太陽電池において、塗布型電極材料であるPEDOT-PSSや、光電変換層への添加剤導入が効率を大きく改善します。我々は、この効率改善の原因を探り、より高い効率を目指した研究を行っています。また、有機・無機のハイブリッド太陽電池である、ペロブスカイト太陽電池に関する研究も行っています。

## ■ 電気測定と光学測定を組み合わせた有機デバイスの動作機構に関する研究

有機ELや有機太陽電池などの様々なデバイスが注目されています。有機ELなどは実用化段階にあると言えますが、他のデバイスにおいては効率や寿命などの点において多くの課題が残っています。このような有機デバイスの多くは積層構造となっているため、Maxwell-Wagner効果によって各層の界面に蓄積した電荷がデバイス内部の電界を変化させます。そのため、各層ごとの評価がデバイス動作の理解には欠かせませんが、単純な電気測定では各層の分離評価ができません。そこで、われわれは有機トランジスタで成功したEFISHG法による各層の電界評価を試みました。光学的手法は、材料の光学スペクトルに対応した信号が得られるため、積層構造でも特定の層に注目した測定が可能となります。また、電荷輸送の駆動力となる電界を直接評価することは絶縁体のように振る舞う有機半導体では非常に重要となります。実際、図3に示すような測定系で積層構造素子の界面に蓄積される電荷などの情報を直接評価することに成功しました。

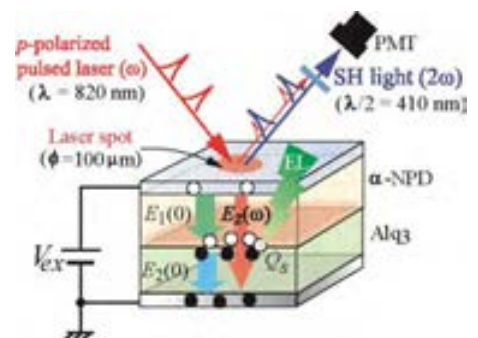


図3. 有機積層デバイス用内部電界評価システム

D. Taguchi, T. Shino, T. Manaka, M. Iwamoto, Appl. Phys. Lett., Vol.95, Article No. 263310 (2009).

D. Taguchi, M. Weis, X. Chen, J. Li, W. Martin, T. Manaka, M. Iwamoto, Appl. Phys. Lett., Vol.98, Article No. 133507 (2009).

## 3 教員からのメッセージ

有機半導体は奥が深く、日々新しい発見があります。また、有機材料から作られる有機デバイスも、研究対象として興味は尽きません。当研究室は「知恵を絞ってオリジナリティーの高い研究をする」というモットーで運営しています。もちろん、常に世界に目を向けつつ、いかに独創性を出していくか、ということも重要です。そのためには、基礎をしっかりと理解し、自分で考える癖をつける必要があります。これらは、社会に出ても必要なスキルであり、研究を進めながら身につけて欲しいと思います。有機エレクトロニクスは比較的新しい分野で、実験が好きな人でも理論が好きな人でも活躍する場所は様々あります。皆さんと、このような材料の面白さを共有したいと思っています。



## 山田・宮島研究室

## 様々な半導体材料の太陽電池応用



電子材料・物性グループ  
エネルギーコース・電気電子コース  
大岡山・EEI-409/ EEI-408

教授 山田明 准教授 宮島晋介 助教 中田和吉

研究分野: 半導体物性、太陽電池、  
キーワード: 薄膜太陽電池、結晶Si太陽電池、酸化物材料  
ペロブスカイト材料

ホームページ: <http://solid.pe.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

クリーンなエネルギー源として太陽光発電に寄せられる期待が高まっています。日本では、2017年度末で49 GW程度の太陽光発電システムが導入され、累積導入量は年々増加しています。しかし、いっそうの加速度的普及を目指すには、さらなる低コスト化、高効率化が必要となります。本研究室では、第1世代のシリコン太陽電池に加えて、第2世代の高効率化合物薄膜太陽電池、さらには有機無機ハイブリッド材料を用いた太陽電池の開発を進めています。また、デバイス研究と共に材料物性に関する研究も進めています。

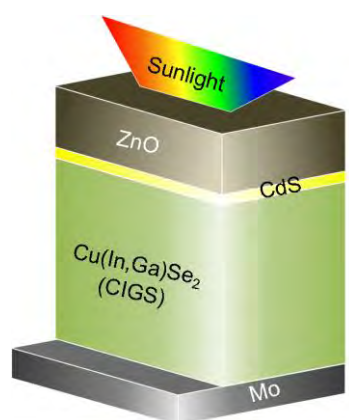
1. 高効率カルコパイライト化合物薄膜太陽電池(CIGS)
2. カルコパイライト系タンデム太陽電池
3. シリコン系太陽電池(シリコンヘテロ接合太陽電池)
4. 光無線給電用受光器(ワイドギャップペロブスカイト材料)

## 2 最近の研究成果

## ◆ 高効率カルコパイライト化合物薄膜太陽電池(CIGS)

$\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIGS)はカルコパイライトと呼ばれる結晶構造を有する半導体材料です。この材料系は、Ga/In比を変化させることによりバンドギャップを 1.0 eVから1.4 eVの範囲で制御可能なため太陽電池応用に適しており、光のエネルギーを電気エネルギーに変える変換効率が20%を超える太陽電池が実現されています。

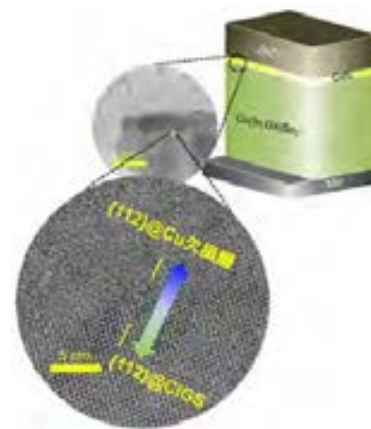
山田・宮島研では、このCIGS薄膜太陽電池の開発を行っています。太陽電池の開発には電気電子工学的な視点と材料工学的な視点が必要とされますが、私達は光の入射側のpn接合界面が重要であるとの観点から、電気電子工学的なアプローチに基づき、バンドギャップが広い $\text{Cu}(\text{In,Ga})_3\text{Se}_5$ 材料を接合界面に挿入することを提案、変換効率19.8%を達成することに成功しています。



CIGS太陽電池の構造



CIGS製膜用MBE装置

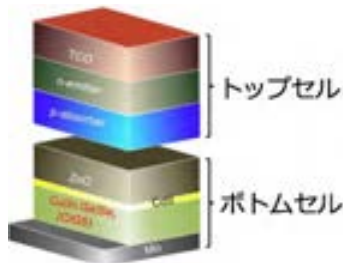


CdS/CIGSの界面評価

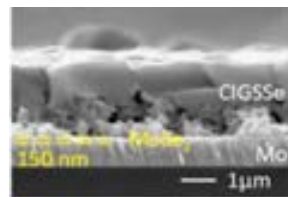
## 大岡山・電子材料・物性グループ

## ◆カルコパイライト系タンデム太陽電池

現在の社会は、石油や天然ガスなどの化石燃料から得られるエネルギーに依存しています。そこで、運輸・産業・民生が必要とするエネルギーを電気自動車・電気飛行機、電化工場・電化住宅の普及により、太陽光発電からの電気エネルギーでまかなう脱化石燃料社会が実現できないでしょうか。そうすれば大幅なCO<sub>2</sub>削減が可能です。このためには超高効率な太陽電池が必要とされ、2種類以上の太陽電池を組み合わせたタンデム太陽電池が有望です。私達は、この次世代太陽電池であるタンデム太陽電池の実現に必要な要素技術を開発しています。



タンデム太陽電池の構造

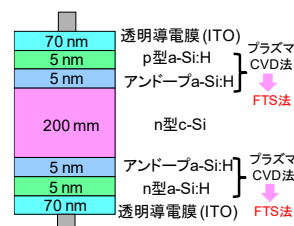
Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub>ワイドギャップ材料の開発

タンデム用透明導電膜の開発

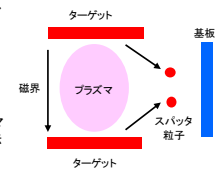
## ◆爆発性・毒性ガスを使用しないシリコン太陽電池作製プロセスの開発

現在の太陽電池の主流は結晶シリコン(c-Si)太陽電池です。本グループではシリコンヘテロ接合太陽電池において20%を超える変換効率を実現してきました。ただし、この太陽電池は爆発性の強いSiH<sub>4</sub>や毒性の強いPH<sub>3</sub>、B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>などの危険なガスを使用して作製されていますので、これらのガスを使用しない方法を検討しています。具体的には、対向ターゲットスパッタ(FTS)法による高品質な水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)の形成、n型a-Si:Hおよびp型a-Si:Hの代替材料(TiO<sub>2</sub>:Nb、GaN系材料、モリブデン酸化物、タングステン酸化物、銅酸化物)の低ダメージ形成技術の開発を行い、太陽電池の試作を進めています。

シリコンヘテロ接合太陽電池



対向ターゲットスパッタ(FTS)法



対向ターゲットスパッタ装置

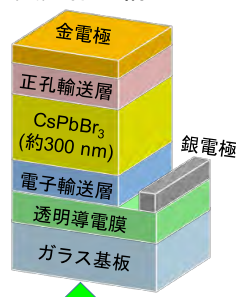
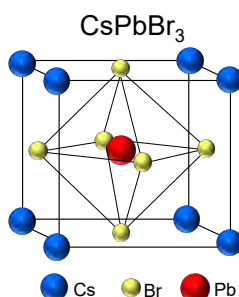


プラズマCVD・FTSスパッタ複合装置

## ◆光無線給電用受光器(ペロブスカイト材料)など

光を用いたワイヤレス給電方法の効率化を目指して、ワイドギャップ材料を用いた単色光受光器の検討を進めています。太陽電池材料として近年注目を集めているペロブスカイト材料(CsPbBr<sub>3</sub>など)の高品質化とそれを用いた高効率受光器を開発しています。また、ペロブスカイト太陽電池に関する基礎的な研究についても並行して進めています。

受光器の構造



単色光

ペロブスカイト膜作製装置



## 3 教員からのメッセージ

山田・宮島研究室は、国内で実際に太陽電池を試作できる数少ない研究室の一つです。また、Si系、化合物系、酸化物、有機材料など様々な材料を取り扱っています。太陽電池や受光器の作製、評価に必要な設備はすべて整っています。国外研究機関との連携も行っており、最近ではアジア諸国(タイ、韓国、中国、インドネシア、マレーシアなど)との連携を行っています。



## 飯野研究室

## 大面積イメージングデバイスを目指した有機半導体材料・有機デバイスの研究



物性・材料グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・J1棟207号室

准教授 飯野裕明

研究分野: 有機エレクトロニクス、イメージングデバイス

キーワード: 液晶性有機半導体、有機薄膜トランジスタ、有機EL素子、有機光電変換素子

ホームページ: <http://www.isl.titech.ac.jp/~iino/index.html>

## 1 研究目的

情報の入出力に用いられるイメージングデバイスの実現を目指して、大面積の半導体薄膜を簡易な製膜プロセスで作製可能な有機半導体材料の開発とデバイス応用の研究を行なっています。材料としては新しい有機半導体である『液晶性有機半導体』に注目しています。液晶性有機半導体の材料開発、物性・電気特性評価からプロセス開発、デバイス応用までを検討し、印刷プロセスを利用して、安価なプラスチック基板上にフレキシブルで軽量のディスプレイや発光素子、光電変換素子等のイメージングデバイスの開発に取り組みます。

本研究室では材料の開発から基礎物性の評価、デバイス応用までを研究グループ内で一貫して進めています。

## 2 主な研究テーマと最近の研究成果

## ■液晶性有機半導体材料の開発

液晶性有機半導体とは、液晶性を示す有機半導体のことです。液晶性とは液体のような流動性と結晶のように分子が自発的に並ぶ特徴を有します(図1)。液晶ディスプレイにはこの性質から導かれる光学的な特徴である複屈折が利用されています。一方、半導体の性質を持つ有機物質に液晶性を持たせた材料では分子が自発的に並ぶため、配向性と秩序性をもった高品質の有機半導体薄膜を容易に作製することができることになります。また、液晶性有機半導体は結晶薄膜としても利用可能です。この研究では有機トランジスタ、有機光センサ、有機EL素子、有機薄膜太陽電池等への応用を目指した新規材料の開発を行ないます。

## ■材料の基礎物性の評価

開発した液晶性有機半導体をデバイスに应用するためには図2のように材料の電荷輸送特性や電極との界面特性を電気的な測定を通じて明らかにする必要があります。また、材料開発を進める上でも合成した物質の基礎特性を調べることは、材料設計の指針を得る上でも重要となります。この研究では、移動度の評価や界面特性の評価ばかりでなく、その物理的理解を深めることを目指します。

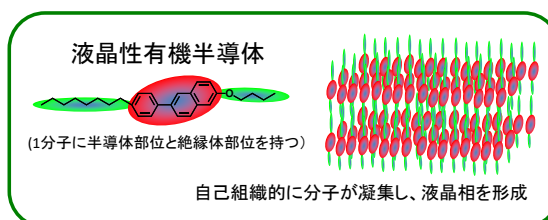


図1 代表的な液晶物質の分子構造と液晶相の凝集状態(スメクチック相)。自己組織的に分子が凝集し層構造の凝集構造を形成する。

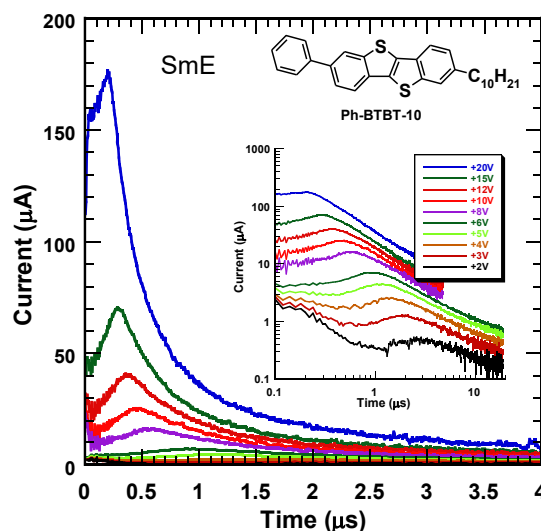


図2 Time-of-Flight法による液晶物質の移動度の評価例。Ph-BTBT-10は液晶物質の中で現在最も高い移動度を示す。  
ITO//ITO,  $d=15.84\mu\text{m}$ ,  $S=16\text{mm}^2$ ,  $\lambda=337\text{nm}$

## すずかけ台・物性・材料グループ

## ■プロセス技術の開発

材料をデバイスへ応用するためには、材料の薄膜形成やパターニングが必要となります。液晶性有機半導体は容易に有機溶媒に溶かして溶液にすることができるため、種々の塗布技術やインクジェット法を含む種々の印刷法を適用することが可能となります。さらに、液晶物質は適度な流動性と分子配向した均一な液晶薄膜を結晶薄膜の前駆状態として利用することも可能で、分子レベルで均一な結晶性の高い多結晶薄膜を溶液プロセスであるスピコート法により作製する技術の開発に成功しています(図3)<sup>1)</sup>。今後は、インクジェット法や印刷法を利用したプラスチック基板上への薄膜作製技術の確立を目指します。

## ■デバイス応用

液晶性有機半導体は、従来の非液晶性の有機半導体材料と同様、有機トランジスタ、有機EL素子、有機光センサ、太陽電池へなどの種々のデバイスへ応用することが可能です。最も、手短な応用は有機トランジスタです。液晶薄膜を前駆状態に用いた結晶薄膜は均一性、表面平坦性に優れ、素子ごとのばらつきの少ないトランジスタを容易に作製することができます。図4は、有機トランジスタ用に当研究グループで開発した液晶性有機半導体(Ph-BTBT-10)を用いて作製した、FET(電界効果トランジスタ)の伝達特性の一例です。多結晶薄膜にもかかわらず、ボトムゲート・ボトムコンタクト構造で移動度 $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超すFETの作製に成功しています。現在、有機ダイオード有機EL素子、有機光センサ、有機薄膜太陽電池等への応用にも取り組んでいます。

## ■参考文献

- 1) H. Iino and J. Hanna, "Availability of liquid crystallinity in solution process for polycrystalline thin films", *Advanced Materials*, **23**, 1748-1751 (2011).
- 2) H. Iino, T. Usui, and J. Hanna, "Liquid crystals for organic thin-film transistors", *Nature Communications*, **6**, 6828 (2015).

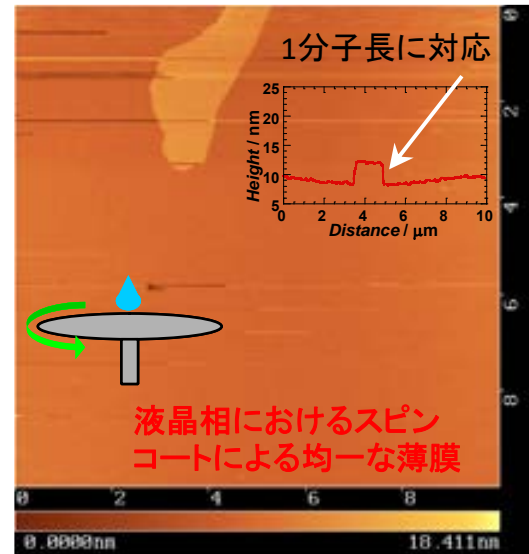


図3 溶液から液晶相を経由して作製した液晶性有機半導体の多結晶薄膜の例。表面形状を原子間力顕微鏡で観測すると分子長に対応するステップしか観測されず、非常に均一な膜であることがわかる。<sup>1)</sup>

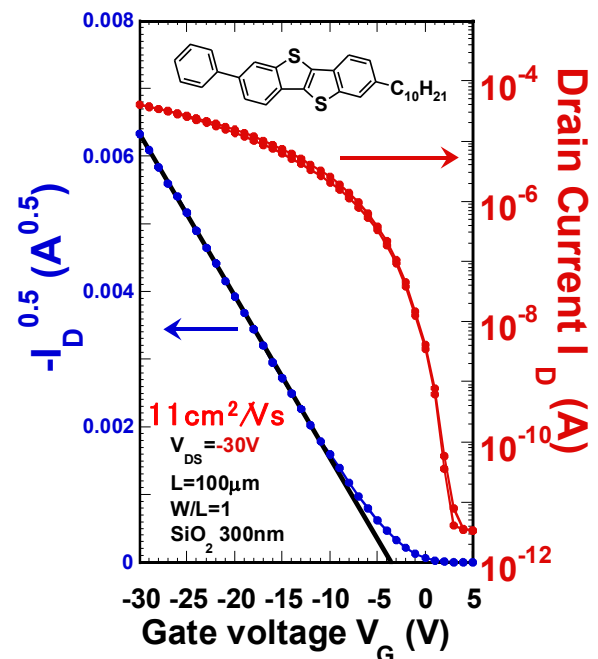


図4 液晶性有機半導体(Ph-BTBT-10)の多結晶薄膜を用いて作製した有機FETの伝達特性の例。簡易な溶液プロセスで作製した多結晶薄膜としては非常に高い移動度( $>10\text{cm}^2/\text{Vs}$ )を有するトランジスタが実現でき、画像表示デバイス用の薄膜トランジスタ(TFT)の材料として期待されている。<sup>2)</sup>

## 3 教員からのメッセージ

本研究室で研究している有機エレクトロニクスは物理、化学、電気の分野にまたがっており、様々な分野の研究者が力を合わせて研究を推進しています。様々な分野に挑戦したい皆さんの積極的な参加を期待しています。



## 伊藤治彦研究室

## ナノ量子フォトニクス



物性・材料グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・G2棟1111号室

研究分野: アトムフォトニクス, ナノフォトニクス, 量子エレクトロニクス  
キーワード: 原子操作, ナノ光相互作用, 原子・スピン機能素子,  
レーザー冷却, 近接場光  
ホームページ: <http://www.ito.ep.titech.ac.jp/>

## 1 研究テーマ

情報処理システムの高機能集積化が進み, ナノメートルを超えて原子スケールへのダウンサイジングが必要となってきました. 究極的には1個の原子で構成される素子に行き着きます. こうした極小の世界では従来の電子・光デバイスの動作原理が破綻し, 量子力学や近接場光学に則った原理で動作させなければなりません. 本研究室では, レーザー冷却技術とナノ寸法の局所的な光の場である近接場光を用いて原子を個別選択的に制御し, 原子の量子性やスピンを機能化したデバイスおよび近接場光の特性を生かしたナノ光相互作用で動作するデバイスの開発に取り組んでいます. レーザー光に代わる次世代の光技術の担い手と期待されるナノの光で科学の未来を描きます.

## 2 最近の研究から

## ■ ナノ空間をデザインする

原子を個別的に制御する空間を, ナノの光で創りだします. 例えば, 図1のように, 8個の格子点に配置した近接場光によって原子を力学的に閉じ込めます. これまでに, シリコン基板を微細加工して, 中央に原子捕獲用のナノスペースを有する十字構造体を作製しています. 図2に断面を示します. 下方からレーザー光を照射すると, 斜面部のAu層に沿って表面プラズモン-ポラリトン(SPP)が伝播し, 境界端面で近接場光が発生する仕組みです. 原子の量子性を機能化する素子の端緒として, 量子ジャンプによって超高速動作する光子ゲートなどへ応用します

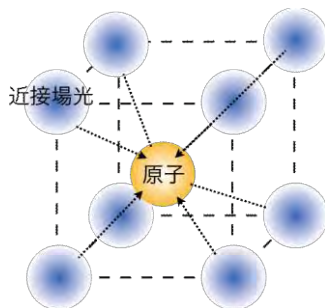


図1 近接場光光子

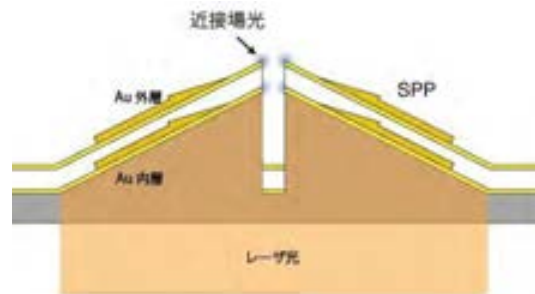


図2 単一原子トラップ

## ■ ド・ブロイ波の回折限界を超えて

ナノ光トラップに原子を送り込んだり, 原子レベルでナノ構造をつくるのに用いる近接場光レンズの開発を行います. シリコン微細加工によって作製した中空逆ピラミッド構造の底面微小開口の周囲に近接場光を誘起し, 入射原子を双極子斥力によって収束して出力します. レーザー冷却原子を用いると, 数ナノメートルのスポットに集められることを数値シミュレーションによって確かめています. このデバイスでは, ド・ブロイ波のスケーリングという新しいコンセプトを用いるのが特徴です. 図3にフォーカシングの様子を示します



図3 原子のナノフォーカシング

## すずかけ台・物性・材料グループ

### ■ スピクラスターの実現に向けて

回折限界を超えて超高密度光記録を行うために近接場光を利用します。1nm<sup>2</sup>以上の面密度で記録できるならば、人間の脳の容量に匹敵するといわれる1Pb/in<sup>2</sup>ストレージの実現も夢ではありません。そのための記録素子として、少数個の原子で構成したスピクラスターの形成に取り組んでいます。レーザ冷却したアルカリ金属原子を光ポンピング法によってスピン偏極し、相互作用しにくい希ガス原子をコートした基板上で自己組織化します。クラスター化に必要な多体衝突を起こさせるために、図4に示すエバネッセント光ファネルを用いて入射原子の高密度化を行います。図5は、密度汎関数理論を用いて計算した<sup>87</sup>Rb<sub>4</sub>クラスターのスピン1重項状態・3重項状態・5重項状態(立体)の形状です。近接場光で1重項-3重項変化を起こす方法を開発します。

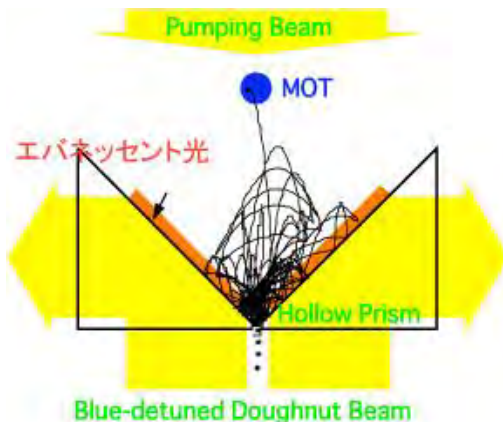


図4 エバネッセント光ファネル

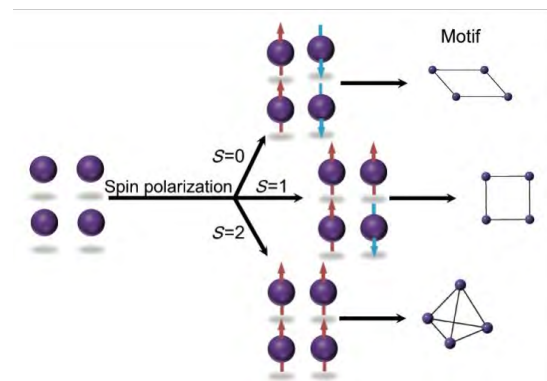


図5 スピクラスターの形成

### ■ ナノの光の幾何学的特性を調べる

近接場光の発生は、物質形状に強く依存します。ナノスリットでは、端部に誘起された電気双極子モーメントによって二重ピークの強度分布が得られるはずですが、急峻でないと明瞭さが失われます。このような幾何学的な性質をシミュレーションと実験の両面から調べ、近接場光に所期の機能をもたせるにはどうすればよいかを探索します。そして、ナノスリット構造に誘起した近接場光による原子の高精度偏向(図6)や高空間分解検出(図6)などへ応用します。また、ナノ光解析に適した高速シミュレーション技法を開発します。

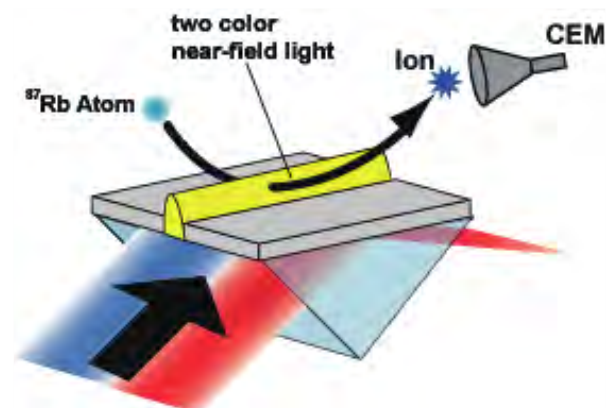


図6 ナノスリット原子センサー

## 3 教員からのメッセージ

本研究室で扱う多彩なテーマは、オンリーワンのキャラクターが強いものです。結果を出すのに時間がかかるし、ときには新奇なものに対する強い抵抗があります。しかし、できそうにないことを実現する、それが科学の飛躍的な発展につながります。私たちと一緒に、誰もやったことがない先進的なテーマにチャレンジしてみませんか。

## 4 参考図書・ビデオ

- サイエンスZERO「ナノの世界に輝く光-近接場光」NHKオンデマンド, 2010
- ナノ光工学ハンドブック, 2.8節「原子への力学的作用」, 11.1節「原子操作」, 朝倉書店, 2002
- ナノテクノロジーハンドブック, 1編創る, 7.2節「近接場原子光学パターンニング」, オーム社, 2003
- 光ナノテクノロジー, 基礎編「光と原子」, 応用編「ナノの光で原子を操る」, アドスリー, 2005
- 科学立国日本を築く, 第8章「光で粒子・分子・原子の動きを操る」, 日刊工業新聞社, 2006
- 解く! 量子力学, 講談社サイエンティフィク, 2008(電子版あり)
- 解く! 先端技術の量子力学, 講談社サイエンティフィク, 2010
- 近接場光のセンシング・イメージング技術への応用, 第11章「近接場光を用いた原子の制御と検出」シーエムシー出版, 2010



## 梶川研究室

## 表面プラズモンとメタマテリアルをつかったナノフォトニクス



電子材料・物性グループ  
ライフエンジニアリングコース・電気電子コース  
すずかけ台・G2棟1005号室

教授 梶川浩太郎

助教 當麻真奈

研究分野: ナノフォトニクス、プラズモニクス、非線形光学  
キーワード: 表面プラズモン、メタマテリアル、ランダムレーザー  
バイオセンシング、物体の透明化・不可視化、黒体  
3次元金属ナノ構造配列、自己集合構造

ホームページ: <http://www.opt.ip.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

光が持つエネルギーを貯めたり、加工したり、好きなように伝搬させたり放出させたりする技術が注目を集めています。これらは、表面プラズモンという金属中の電子波を使えば可能となります。私たちは表面プラズモンを巧みに操った光学技術、プラズモニクスやメタマテリアル技術の開発を行っています。

具体的なテーマは以下の通りです。

1. 表面プラズモンを使った電磁誘起透明化
2. 物質を透明にする手法の理論と実験
3. 生物が持つ微細な構造を使ったバイオ・メタマテリアル
4. DNAやタンパク質、ウイルスを検出するデバイス
5. ランダムレーザー

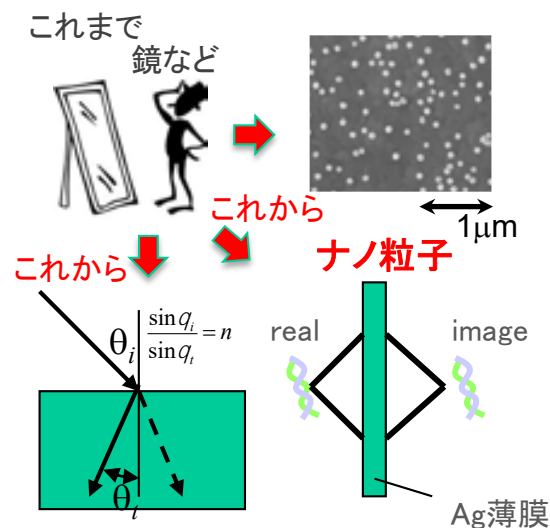
## 2 最近の研究成果

## ■ 表面プラズモン、メタマテリアルとは？

金属中の自由電子は電気を流すことでよく知られています。でも、電気を流す自由電子は通常光とは相性がよくないので、光は金属中に入らずに反射されています。鏡がそうですね。

金属でも、表面に特殊な構造を施したり、ナノメートルサイズの小さい金属の粒では、光と相性がよくなります。これを用いた光の技術を**プラズモニクス**と呼びます。**プラズモニクス**では、半導体や誘電体で実現できない様々な光学的な性質を実現することができます。

たとえば、ナノメートルの微小領域に光を閉じ込め伝搬させたり、高感度なDNAや蛋白質の検出を行ったりできます。



負の屈折

完全レンズ

光学材料、素子としての金属の これまでとこれから

また、微細な人工構造により、自然界の物質が持つことができない光学的な性質を持たせた物質があります。これを**メタマテリアル**と呼びます。メタとは「超」という意味なので、「超物質」ということです。

**メタマテリアル**では負の屈折率を持つ物質、光が進む速度がとても遅い物質、包むと中の物が見えなくしてしまう薄い構造（クローキングと呼びます）、逆に非常に薄いのに光をほとんど吸収する黒体構造等、がメタマテリアルによって実現できます。また、右からへは光を伝搬させられるけど左から右へは伝搬させられない不思議な物質などもあります。

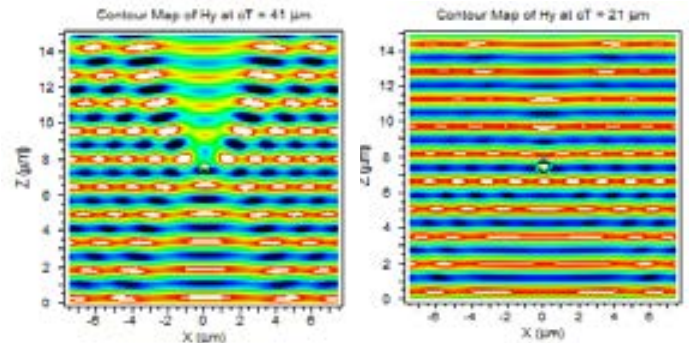
## すずかけ台・電子材料・物性グループ

### ■ モノを見えなくする技術の開発(透明化・不可視化)

光を通さない、普通の金属の細線や薄膜をメタマテリアルで塗布してあげる透けて向こうが見えるようになる... 私たちの研究室では、メタマテリアルを使って**透明ではないモノを透明にする「クローキング」**の研究をしています。

光のクローキングの研究は世界中の研究者が一生懸命研究していますが、ほとんどは理論の研究です。私たちの研究室では、理論だけでなく**実験でクローキングを実証**する研究を行っています。

また、光を吸収する構造のそばに、別の構造を近づけるだけで、全体が透明になる「**電磁誘起透明化**」現象の研究を行っています。これを使って、光集積デバイスや高感度なバイオ素子の研究を行っています。



クローキング(透明化)なし  
強い散乱があり中央の物質が「見える」

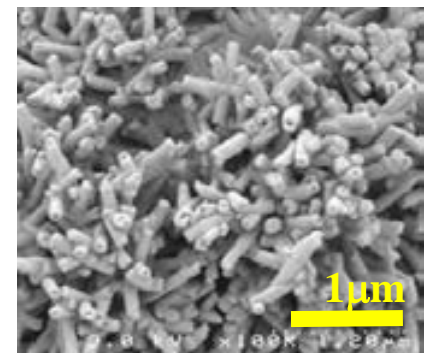
クローキング(透明化)あり  
散乱無く波面が乱れない  
中央の物質が「見えない」

### ■ バイオ・メタマテリアル (Scientific Reports 5 15992 (2015))

昨年、私たちの研究室では自然界の物質(葉や羽など)を使えば、簡単に**極薄の黒体**を作れることを発表しました。金でできている「超薄膜」を蓮の葉の表面にコートすれば、光をほとんど吸収して黒体となることがわかったのです。

黒体というと単に黒いものというイメージがありますが、実は黒体は以下の大切な性質を持ちます。

- ・広い波長にわたって、どのような角度で入射した光も反射せずに吸収します。光検出器や太陽電池等の光から電気や熱へのエネルギー変換の効率化に役立ちます。また、光を利用した物質生産(人工光合成や光化学反応)にも役立ちます。



ハスの葉黒体メタマテリアルの電子顕微鏡写真。

- ・「光を吸収するものほどよく発光する」というキルヒホッフの法則があります。赤外光源などの発光素子に用いることができます。赤外線の利用は、今競争が激しい分野の一つです。

- ・条件によっては、モノを隠したり、見えなくしたりすることができます。映像や視覚分野での利用が期待できます。

### ■ プラズモニックバイオセンサ

疾病に関係する生体分子を高感度に検出するバイオセンサ技術はプラズモニクスの重要な応用分野になっています。

私たちは、誘電体微粒子膜を用いて作製した金属ナノ構造体配列を利用して、より簡単に使えるプラズモニックバイオセンサの開発を行っています。

合わせて、作製した金属ナノ構造体の呈色や光吸収といったメタマテリアルとしての性質も研究しています。



金属ナノ構造体配列を使ったプラズモニックバイオセンサ。

## 3 教員からのメッセージ

私たちは広い分野を研究対象としていますのでメンバーの専門分野は様々です。皆さんの得意なそれぞれの分野で個性を発揮してもらっています。本研究室は、電気電子系ライフエンジニアリングコースと電気電子コースのどちらのコースの学生も受け入れることができます。



## 加藤研究室

 $\pi$  共役分子を用いた光電子デバイス、有機半導体材料の開発

電子材料・物性グループ

電気電子コース

すずかけ台

特任教授 加藤 隆志

研究分野: 光デバイス、電子デバイス、 $\pi$ 共役分子

キーワード: 有機半導体、光機能性材料、プリンテッド・エレクトロニクス

## 1 主な研究テーマ

$\pi$  共役分子の集合状態を制御することで、従来にない革新的な光・電子デバイスの実現を目指します。特に、次世代のディスプレイ材料ならびに有機エレクトロニクス材料を目指した応用研究を進めています。

★当研究室は飯野研究室と密に連携して運営していきます。

 $\pi$  共役分子

次世代光・電子デバイス

集集体制御  
高機能化

- ・プリンテッド
- ・フレキシブル
- ・軽量

## 2 最近の研究成果

## ■ 光機能性材料の配列制御技術

有機分子は特定の配列に固定されることで、従来にない新しい性質を示します。これまで、色素分子を様々な配列に連結したモデル化合物を合成し、配列様式が光学および電子的性質を大きく変えることがわかりました。現在は、結晶および液晶場などの利用により色素分子の集合状態を制御して、新しい光電子材料を開発することを目指しています。

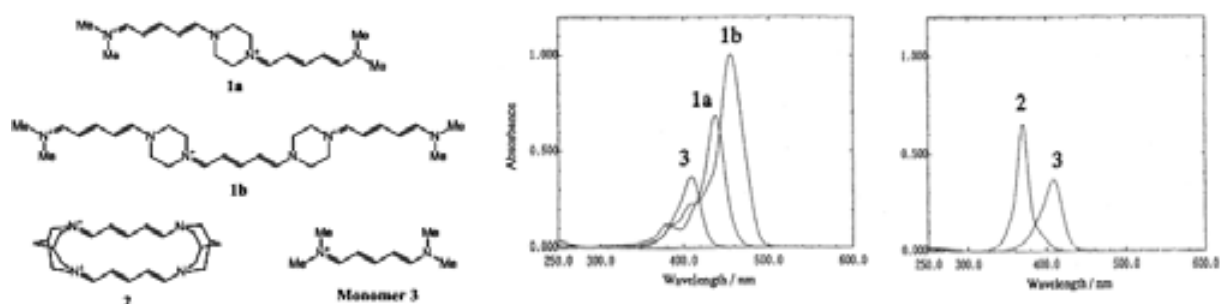


図1. 色素の配列の違いによる吸収スペクトル変化

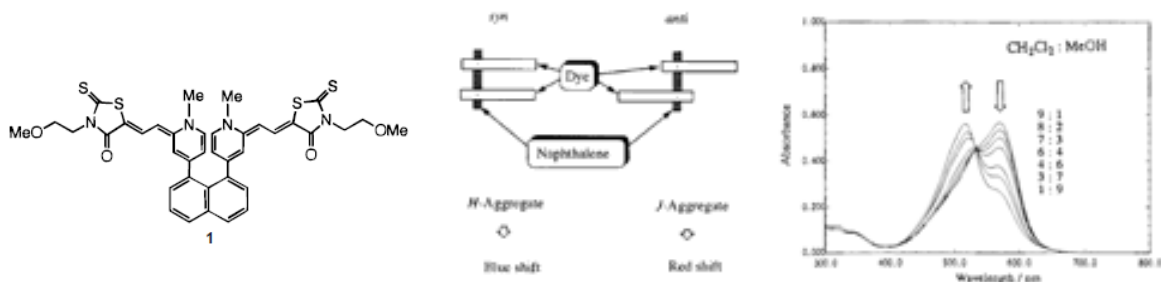


図2. 連結型メロシアニン色素における吸収スペクトル変化

## すずかけ台・電子材料・物性グループ

### ■ 次世代表示材料の開発

インターネットの普及により、デジタル情報を手軽に表示させる技術に注目が集まっています。これまで、次世代ディスプレイ用材料として期待される2色性色素を開発してきました。現在は、さらに次世代の表示用材料の開発にも取り組んでおり、今後の発展が期待されるプリンテッドエレクトロニクスとの融合を目指しています。

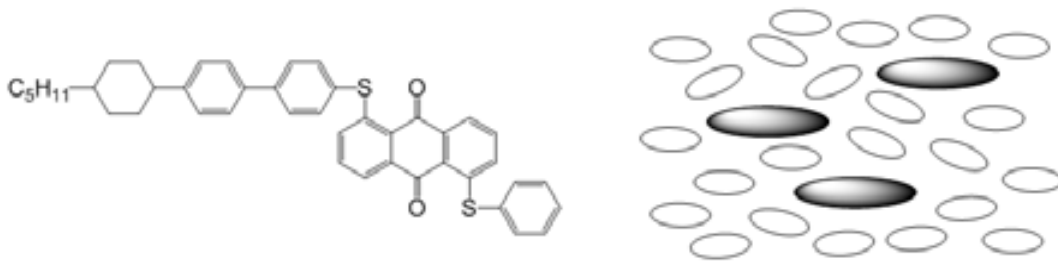


図3. 新しく開発したアントラキノン系2色性色素

### ■ 有機半導体材料の配列制御

プリンテッドエレクトロニクスの実現に向けて、有機半導体材料への注目が高まっております。有機半導体材料は、その配列を精密に制御することが必要です。これまで、ルブレン誘導体について大面積の単結晶作製技術の開発に取り組んでしてきました。今後は、さらに実用性を見据えた有機半導体材料の配列制御技術の開発に取り組んでいきます。

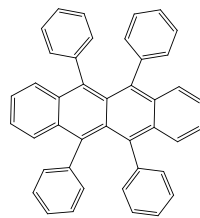


図4. ルブレンの構造式

## 3 教員からのメッセージ

有機化学は暗記ではなく、無限の可能性を秘めた研究分野です。 $\pi$ 共役分子は、多様な光および電子との相互作用を持つ大変魅力的な機能性材料です。大発見の期待を胸に、新しい光電子材料の開発を一緒に考えていきましょう。



## 菅原研究室

## 低消費エネルギー/高エネルギー効率集積回路技術と、集積回路技術を応用した環境発電デバイス



電子材料・物性グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・J3-1216

准教授 菅原 聡

研究分野: 集積デバイス・回路, 熱電発電モジュール, 新機能デバイス・回路  
キーワード: CMOS, 不揮発性メモリ, 低消費電力アーキテクチャ, 熱電材料  
熱電発電モジュール, 磁気抵抗デバイス, 新原理トランジスタ  
ホームページ: <http://www.isl.titech.ac.jp/~sugaharalab/>

## 1 主な研究テーマ

本研究室では、VLSIと呼ばれる集積回路技術に関する研究を行っています。具体的には、ハイエンドに用いる高性能ロジックシステムや、ウェアラブルデバイスなどの低電圧ロジックシステムに用いるメモリ技術を中心とした新しい低消費エネルギー/高エネルギー効率CMOS技術と、将来のより高性能なVLSIを実現するために有用・必要となる新概念の高性能トランジスタ技術について研究・開発を進めています。また、ウェアラブルデバイスへの電力供給源として、人体から放出される熱によって発電を行う熱電発電技術の開発を行っています。これはVLSIのプロセス技術を利用したウェアラブルデバイスに適した新しい熱電発電モジュールの研究です。

## 2 最近の研究成果

## ■低消費エネルギー/高エネルギー効率CMOS技術

近年のパーソナルコンピュータやサーバに搭載されているマイクロプロセッサや、スマートフォンなどに搭載されているシステム・オン・チップ（SoC）では、トランジスタのリーク（漏れ）電流によって待機時に消費する電力が著しく大きく、その削減が重要な課題となっています。何も対策を講じなければ、この待機時電力は演算処理を行っているときの電力と同レベルとなるととても大きなもので、マイクロプロセッサやSoCの性能を左右する重要な要因の1つとなっています。本研究室では、情報の不揮発記憶を利用して、このような待機時電力を効率よく削減する技術を開発しています。不揮発性メモリとCMOSとの融合回路である不揮発性SRAM、不揮発性フリップフロップといった記憶回路と不揮発性パワーゲーティングというアーキテクチャを用いて、無駄なエネルギー消費を最大限に削除できるCMOSロジックシステムの実現を目指しています。また、高性能なウェアラブルデバイスに用いるSoCに対応したCMOS技術の研究も行っています。低電圧駆動でも安定に動作して、エネルギー効率を極限まで高めたCMOS技術を開発します。

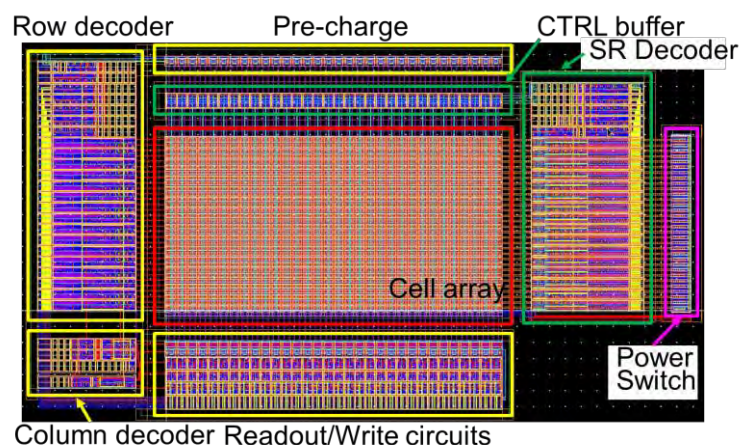
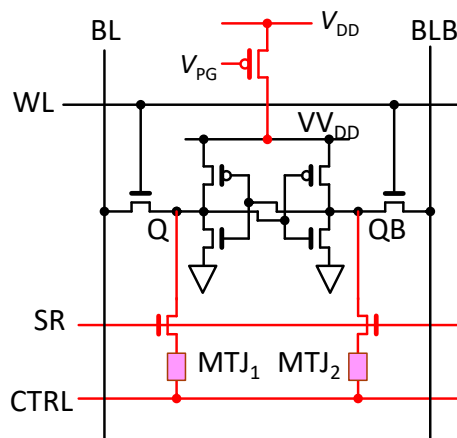


図1 (a) 強磁性トンネル接合(MTJ)を用いた不揮発性SRAMセル, (b) 不揮発性SRAMの試作チップ

# すずかけ台・電子材料・物性グループ

## ■新型熱電発電モジュール

ウェアラブルデバイスのエネルギー供給源として人体から放出される熱を利用した発電技術の研究開発を行っています。VLSIに用いられるリソグラフィーによる微細加工技術を用いることで、出力を最大限に引き出すことの可能な薄膜熱電材料を用いた新しい熱電発電モジュールを開発しています。また、VLSIプロセス技術を用いて、ホイスラー合金という無害で高性能な熱電材料の薄膜形成技術の研究も行っています。これらの技術を用いて、バッテリーを必要としないまたは充電頻度の極めて少ないウェアラブルデバイスの実現を目指しています。

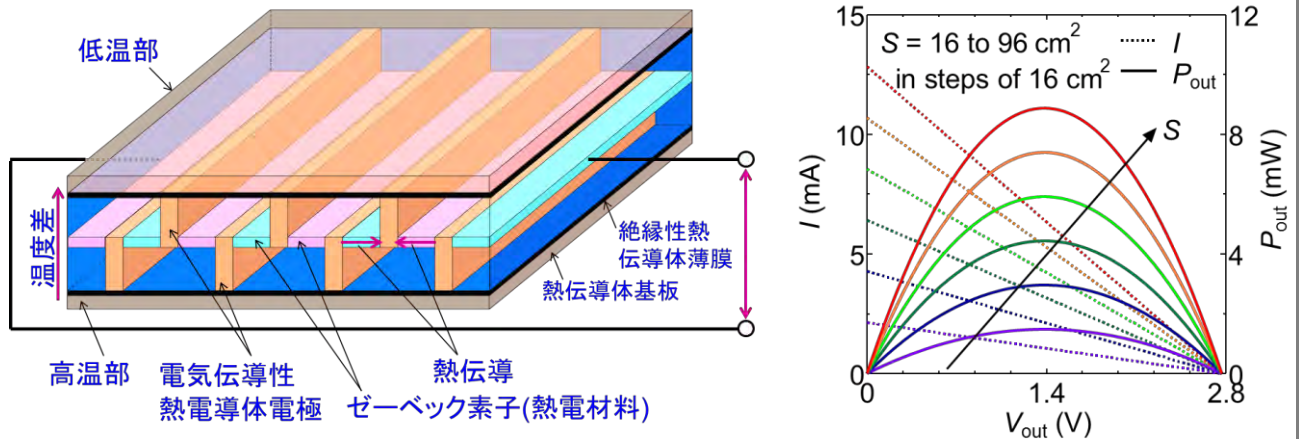


図2(a) 薄膜熱電材料を用いたマイクロ熱電発電モジュールと、(b) その出力特性。

## ■新原理高機能・高性能トランジスタ

将来のVLSIに有用な新原理に基づく高機能トランジスタや高性能トランジスタの研究・開発を行っています。強磁性体によってソースとドレインを構成したスピンMOSFETと呼ばれるデバイスは、電子のスピンを利用した情報の不揮発記憶が可能な高機能トランジスタです。これを用いることでCMOSロジックシステムの低消費電力化に有用な回路を構成することができます。このスピンMOSFETを実現するためにシリコンチャンネルへスピンを注入する技術の開発などを進めています。また、圧電体ゲートと圧電抵抗チャンネルを用いた圧電エレクトロニクストランジスタ(PET)と呼ばれる高性能トランジスタの研究を進めています。これは圧電抵抗チャンネルの金属-絶縁体転移を圧電体ゲートで制御することで、低リークでしかも0.1~0.2V程度の低電圧で極めて高い電流駆動能力を実現できる究極のロジックデバイスとなる可能性があります。

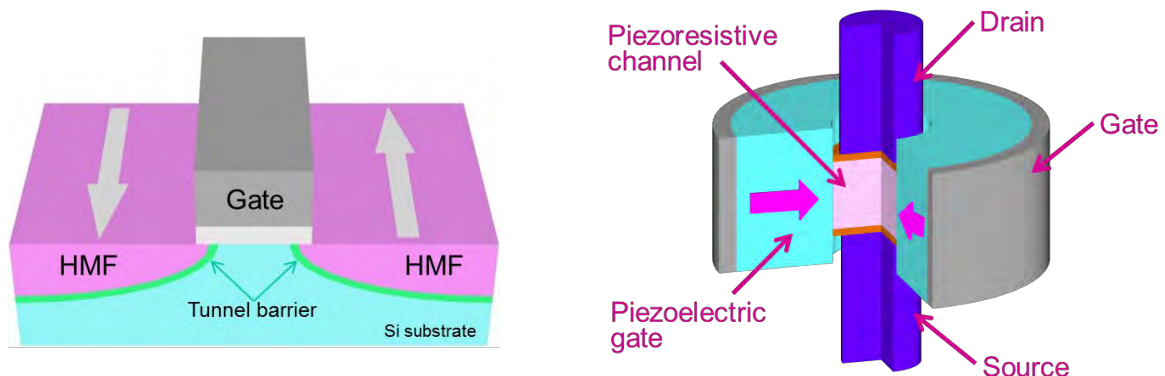


図3 (a) ハーフメタル強磁性体(HMF)ソースドレイン・スピンMOSFET. (b) 圧電エレクトロニクス・トランジスタ。

## 3 教員からのメッセージ

本研究室では新たな研究分野を自らの手で開拓して行くというフロンティア精神を重視して研究を進めています。皆さんからのアイデアも大歓迎です。最先端の研究活動と実りある学生生活をエンジョイしましょう！



## 中本研究室

## ヒューマン嗅覚インタフェース



電子材料・物性グループ  
情報通信コース(主担当)・電気電子コース(副担当)  
すずかけ台・R2棟516号室

教授 中本 高道

研究分野: センサ、電子計測、組み込みシステム、ヒューマンインタフェース  
キーワード: 匂いセンサ、嗅覚ディスプレイ、感性情報センシング、  
バイオセンサ、嗅覚IoT

ホームページ: <http://silvia.me.ee.titech.ac.jp/>

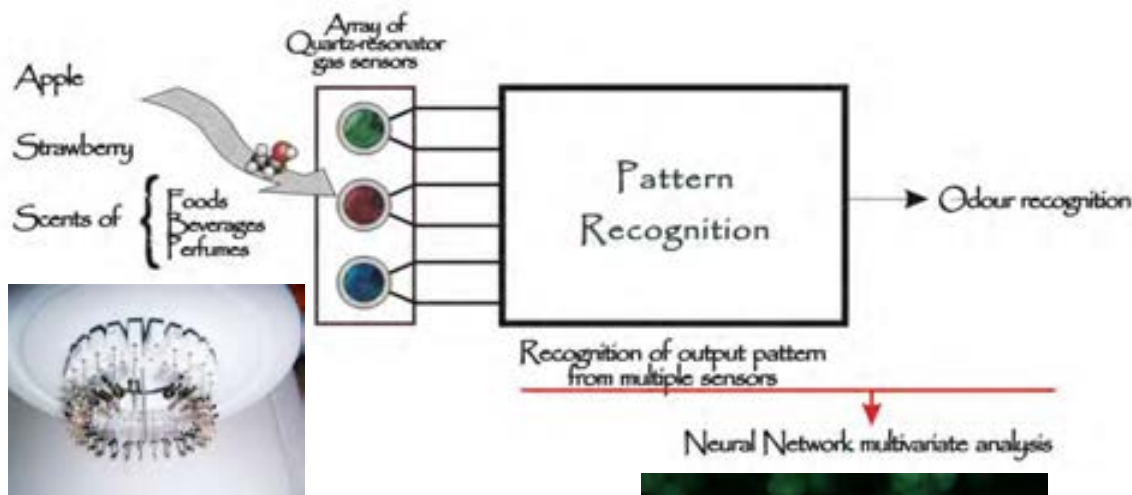
## 1 研究内容・目的

中本研究室では、感性情報のセンシング、情報処理、感性情報を再現するヒューマンインターフェースを目指し、その中でも嗅覚に注目して研究を行っています。視覚情報の場合ビデオカメラでキャプチャしてテレビ画面で情報再現を行うように、匂いセンサや嗅覚ディスプレイで嗅覚情報のセンシング、記録、再現を実現することを目指します。また、香る料理ゲーム等の嗅覚を利用したマルチメディアコンテンツも研究し、その実演も多く行います。さらに匂いバイオセンサやセンサ情報処理システム・アルゴリズムの研究も行っています。

## 2 研究テーマ

## ■ 匂いセンシングシステム

多数のセンサの応答パターンをパターン認識することにより、匂いの種類を識別する。センサ素子としては水晶振動子センサを多く用いるが、近年は嗅覚受容体を発現させた細胞をセンサ素子として用いる研究も行っている。嗅覚受容体を用いることにより、生物に近い性能を持つセンサを実現できる可能性がある。



水晶振動子センサアレイ

匂いバイオセンサのカビ臭  
に対する応答  
(細胞提供: 東大神崎研)



## すずかけ台・電子材料・物性グループ

## ■ 嗅覚ディスプレイ

多成分の香りを任意の比率で調合させることにより多様な香りを提示可能。ゲーム、デジタルサイネージ用のコンテンツを作成し、国内だけでなく海外でもリサーチデモを行う。嗅覚VRはバーチャルリアリティ分野でも注目されている。テレビ・新聞取材も多い。



デスクトップ型嗅覚ディスプレイ  
(既にメーカーが外販)



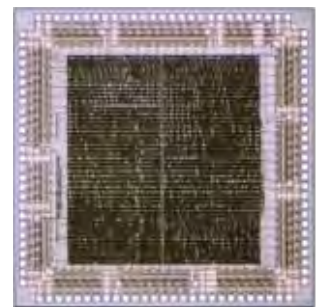
HMD  
ウェアブル嗅覚  
ディスプレイ



バーチャルアイスクリームショップ  
(嗅覚ディスプレイコンテンツ)

## ■ 匂い認識チップ

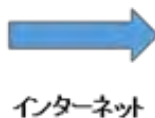
小型匂いセンシングシステムに組み込むセンサ情報処理回路（デジタル回路）の設計・試作。計測回路、周波数解析等を行う前処理回路、パターン認識・学習を行う機械学習回路を設計し、ASICやFPGAに実装する。回路の全体制御にはCPUコアも使用。



匂い認識チップ写真 (VDECによる試作)

## ■ 嗅覚IoT (Internet of Things)

匂いセンサでセンシングした匂いを遠隔地で映像と共に再現  
センシング側



再現側



海外テレビでも放映

## 3 教員からのメッセージ

この分野は境界領域で、情報エレクトロニクスだけでなく、生物、化学、環境計測、機械、制御、医学、歯学、芸術等の分野と関連があります。これらの情報・電気以外の分野の他大学や企業との共同研究も多いです。幅広くやってみたい人は、ぜひ当研究室にきてください。当研究室ではモノづくりをする機会が多く、計測や組み込みシステム、FPGAの知識、さらに感性情報処理、ヒューマンインターフェースの素養が身につきます。また、パターン認識や機械学習に関連する研究テーマもあります。さらに、国内外の学会発表の機会も豊富にあります。国内だけでなく海外でのresearch demoやテレビ取材など自分の研究を実演を通じてアピールする機会があります。海外との交流も多く、たくさんの留学生も研究に参加しています。



# 赤塚研究室 Plasma Spectroscopy and Plasma Physics

## プラズマ分光学とプラズマ物理学



電気電子系  
原子核工学コース  
大岡山・N1-413  
准教授 赤塚 洋

研究分野: プラズマ理工学、プラズマ分光学、原子力工学  
キーワード: 分光計測、原子分子過程、衝突輻射モデル、非平衡分布、  
希薄超音速電磁流体、宇宙理工学、原子炉廃止措置  
ホームページ: <http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~hakatsuk/>

### 1 主な研究テーマ

#### 1. プラズマ分光計測法の開発、その基礎となる原子分子過程の解明

放電プラズマは、電子工学や材料工学に応用される一方、地球環境や上層大気現象でも重要です。これらの発光分光計測から、電子温度・密度、さらにラジカル温度・密度を求める方法を研究しています。分光学や量子力学を必要とするスペクトル解析や、励起状態密度のプラズマ化学的な理論解析、非平衡性、等の研究に取り組んでいます。

#### 2. 超音速プラズマ流と粒子シミュレーション

我々の実験室で所有する希薄気体風洞で、超音速アークプラズマジェットを定常生成可能です。人工衛星用スラスター(電気推進機)に応用の可能性があります。磁場を上手く応用すると速度上昇が期待できますが、解析は大変複雑です。実験と理論計算を組合せ、加速現象・空間電位変化の解明などのプラズマ物理学・プラズマ工学を研究します。

#### 3. プラズマの原子炉廃止措置への応用

事故を起こした原子炉の廃止措置時の解体およびその表面除染に、水中アーク放電プラズマの応用可能性があり、その計測や輸送現象などを研究しています。

### 2 最近の研究成果

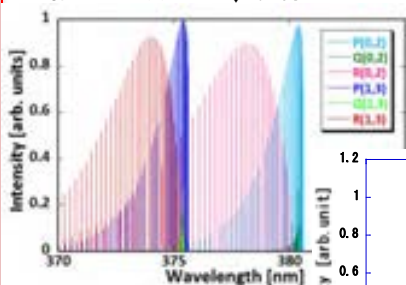
#### 放電プラズマ中の分子スペクトルの理論計算と振動・回転温度の測定、およびその結果を利用したプラズマの熱構造解明と非平衡性の起源に関する研究

分子気体を含むプラズマは、分子の線スペクトルを多数放出しますが、一般的分光器では分解能が不足し、振動・回転励起分布の実測は困難でした。我々は上準位の振動・回転温度を仮定すれば、発光スペクトルを理論計算できることに着目し、種々の分子励起状態の振動・回転温度を測定可能としました。特に $N_2$  2PSの回転温度はガス温度の近似値となることを見出し、これにより多数のプロセスプラズマの熱的構造を理解できるようになりました。また同一プラズマ中でも振動・回転温度が異なる励起種を見出し、生成消滅の素過程の違いが反映されることから、励起状態生成消滅の素過程の解明にも取り組んでいます。

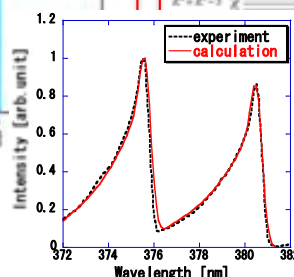
##### $N_2$ 2PSの場合

振動回転分布を温度 $T_v$ 、 $T_r$ のBoltzmann分布と仮定すれば、発光線強度が計算可能

分解能が無限なら...↓ 実際は↓

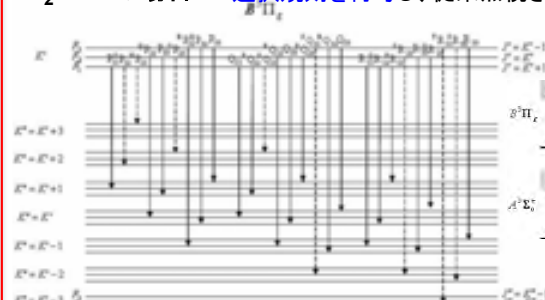


理論は非常によく実験と一致。ベストフィットにより振動・回転温度が求まる→

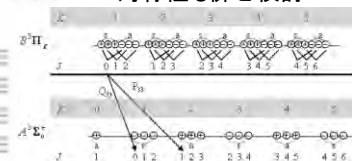


##### $N_2$ 1PSの場合

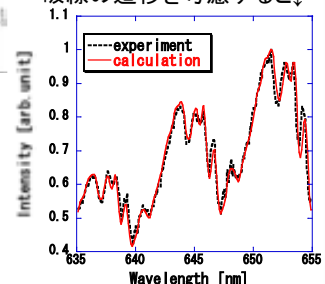
選択規則を再考し、従来無視された破線の遷移も含めた



対称性も併せ検討



破線の遷移を考慮すると↓

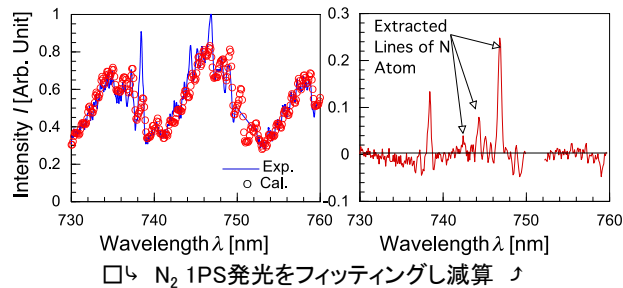
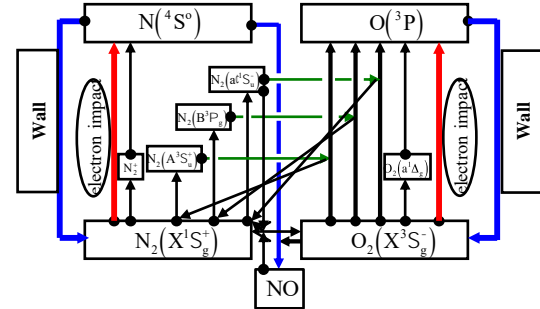


従来の拙い1PS計算例→実験に合わない

## 大岡山・電力・エネルギーグループ

## アクチノメトリー法によるプラズマ中の非発光ラジカル密度の測定、および励起種密度に関するモデリング

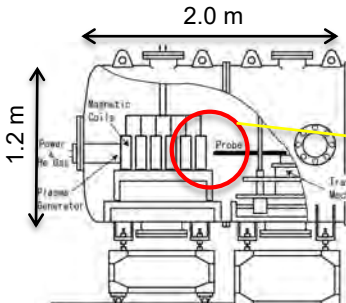
プラズマプロセスでは、化学反応性を有するラジカルの密度のモニタが重要となります。アクチノメトリー法を用いると、O原子やN原子など、自らは発光しない反応性ラジカル密度が計測できます。ただし様々な仮定を適用しており、励起状態生成消滅の理論モデリングによる数密度の放電条件への変化による考察を併せて行うことが必須で、窒素・酸素混合放電プラズマ中の励起種生成につき、化学カインティックモデルを生成・検討しています。

 $N_2$  1PSに埋もれたN原子発光線抽出 $N_2$ - $O_2$  混合プラズマ中の原子種の主要な生成消滅過程

## 人工衛星電気推進機の基礎～希薄弱電離超音速プラズマへの電磁場の影響

衛星電気推進機、磁場核融合炉周辺領域、宇宙地球科学など、基礎現象として重要な希薄超音速プラズマ流につき、実験研究を行っています。希薄気体風洞を利用してアークジェットを定常生成し、電磁場の影響を調べています。

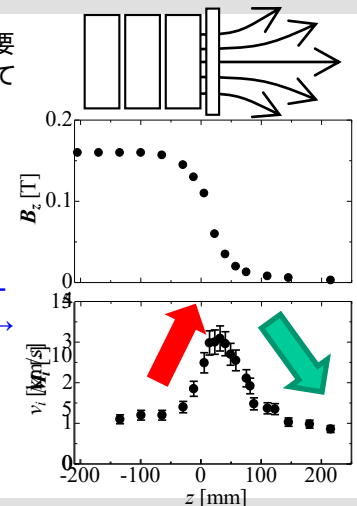
希薄気体風洞



磁気ノズルから噴出される超音速膨張アークジェット



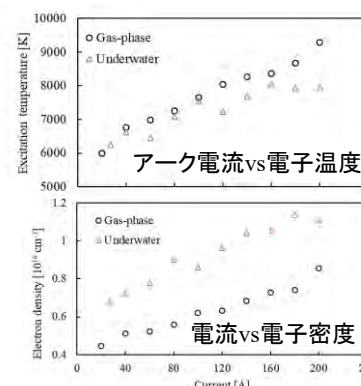
磁気ノズル近傍で測定された磁場強度とイオンマッハ数



## 原子炉廃止措置工学～水中アーク放電プラズマを利用したの廃炉、表面除染

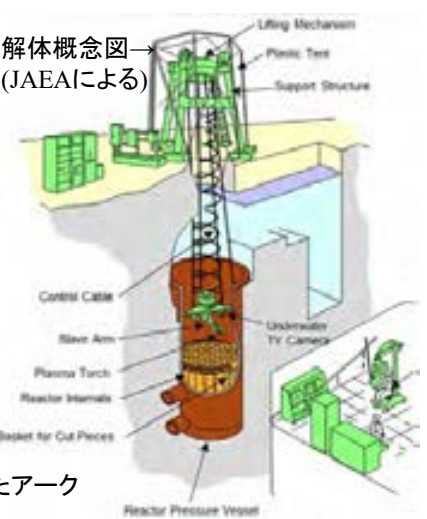
福島第一原発の事故以来、事故炉の廃止措置法確立が課題です。ロボットアームでの遠隔取り出しのために、適切な大きさに切断・破碎の必要があります。遮蔽や放射能拡散防止、燃料冷却等の効果を期待して、解体は水中で行うことが望ましく、水中アーク放電が期待されます。応用例の少ない水中アーク放電の特性を、まずは基礎的に調べています。

解体等の直接の廃止措置工学に加えて、窒素を含む反応性プラズマによる表面除染の可能性も合わせて調べています。



←水中に噴出したアーク

解体概念図 (JAEAによる)



## 3 教員からのメッセージ

- 学生の皆さんには、プラズマ理工学の幅広い分野の基礎研究を通じて、電気電子工学や原子核工学はもちろん、それらに限られない幅広い分野で活躍できる能力と、それを発展させる能力を持って欲しいと考えています。
- 平成30年度は、修士課程9人、卒研生2人が在籍しています。
- 就職先: 南海電鉄、東京都、アズビル、横河電機、都立産業技術研究センター、アクロスゲートグローバルソフトウェア、等



# 小栗研究室 Ion beams: Technology towards the future

## 未来を拓くイオンビーム技術



電力グループ  
原子核工学コース  
大岡山・N1-626

教授 小栗慶之

研究分野: 核融合学、原子力学、プラズマ科学、量子ビーム科学、医用システム  
キーワード: 慣性核融合、放射線工学・ビーム科学、高エネルギー密度科学、量子ビーム  
医療応用、低侵襲治療システム  
ホームページ: <http://www.nr.titech.ac.jp/~yoguri/>

### 1 主な研究テーマ

#### 1. イオンビームを用いた核融合・高密度エネルギー状態の研究

大強度高エネルギー重イオンビームを用いた核融合の開発に関連する高密度プラズマとビームの相互作用、特にエネルギー付与について調べます。

#### 2. 小型加速器を用いた医療用診断・治療技術の基礎研究

陽子ビームを金属標的に照射して発生させた単色X線を、患者に優しい透視撮影や深部ガン治療等に应用するための基礎研究を行います。

#### 3. イオンビームを用いた高感度・精密元素分析技術の開発とその応用

イオンビームを試料に照射して精密な元素分析を行うための技術開発、及び環境・材料科学等に関連する試料を用いたその実証実験を行います。

#### 4. 加速器工学の研究開発

上記の研究に不可欠な高効率負イオン源、短パルスビーム発生装置等、加速器システムを構成する重要な機器の研究開発を行います。

写真: 研究室で維持管理する160万ボルト静電重イオン加速器

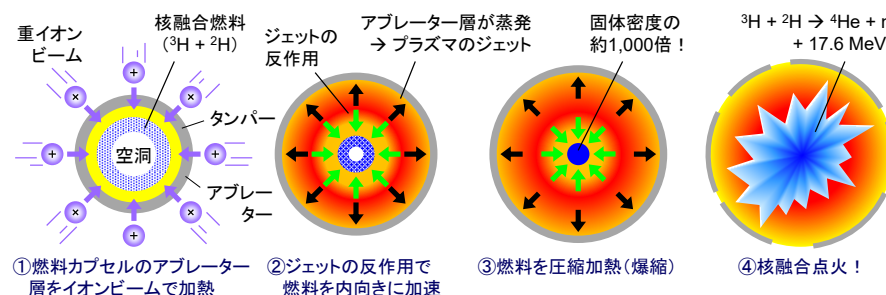
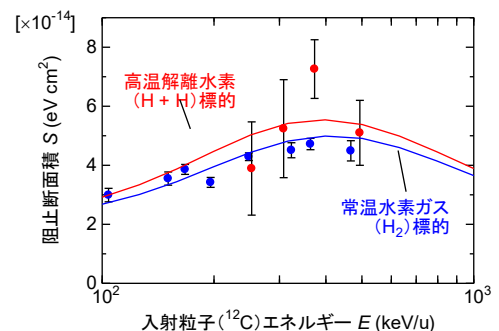


### 2 最近の研究成果

#### 慣性核融合に関連した高密度プラズマへの重イオンビームのエネルギー付与

重イオンビームを用いた慣性核融合(下図)では、燃料標的の温度上昇に伴ってその電子状態が変化するため、入射ビームによる標的の加熱効率が変化します。この変化に関するデータがないと、燃料標的の詳細設計ができません。研究室の重イオン加速器とプラズマ発生装置(右下の図)を用いて、この基礎データを取る実験を進めています。

右上の図は電磁駆動衝撃波管で発生した解離水素(水素原子)標的中の $^{12}\text{C}$ イオンの阻止断面積を測定した例で、標的が常温の場合に比べ、阻止断面積が増加する傾向が見られました。

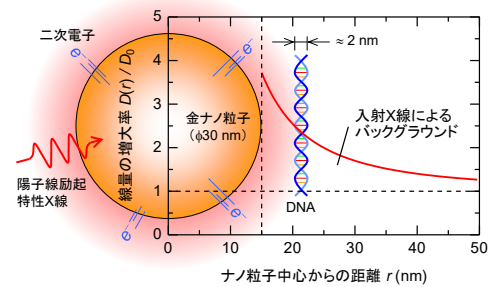
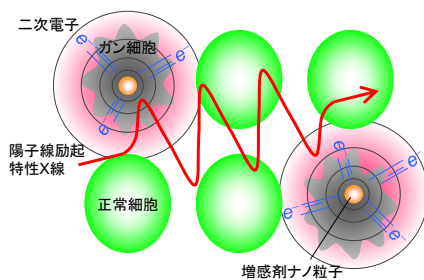
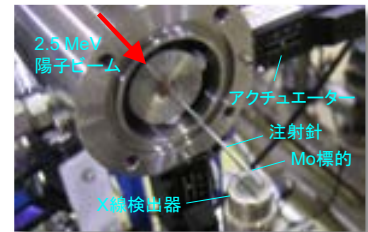


## 大岡山・電力・エネルギーグループ

## 小型加速器を用いた低侵襲深部ガン治療技術の基礎研究

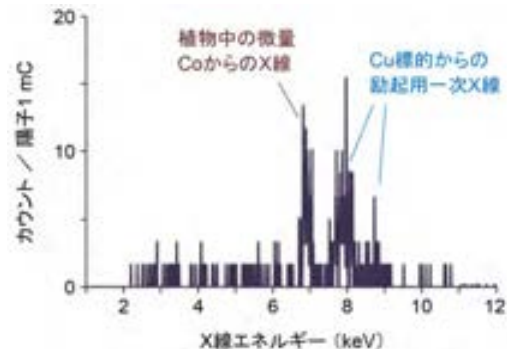
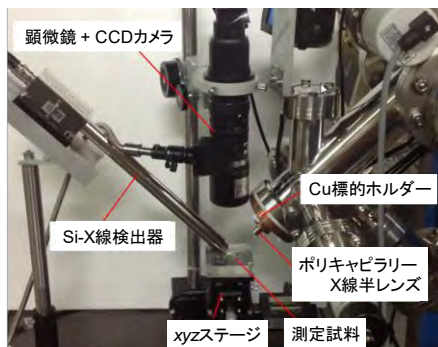
小型加速器からのMeV級陽子ビームを金属標的に照射すると、単色のX線を効率良く発生できます。ガン細胞に予め金属ナノ粒子を含む薬剤を摂り込ませておき、その金属に選択的に吸収されるエネルギーの単色X線を照射すると、粒子から飛程の短い多量の二次電子が出ます。これらを使って左下の図のようにガン細胞のみを内部から照射する技術の基礎研究を行います。

照射は右図の注射針型線源を患部に刺入して行います。ファントム実験と計算により、右下の図のようにナノ粒子の周囲のみで高線量が得られ、正常細胞への影響(副作用)が少ない治療が原理的に可能なが分りました。



## イオンビーム・X線を用いた高感度・精密元素分析技術の開発とその応用

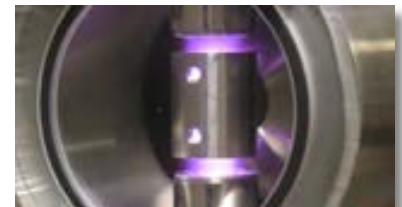
環境・材料・考古学等に関連の試料にイオンビームやX線を照射して精密元素分析を行う手法を開発します。左図は微量元素を低線量で測定できる陽子線励起蛍光X線分析装置で、右図は生きたままの植物を測定した例です。



## 高効率PIG負イオン源の開発

原料ガス中の直流放電で発生する低温・弱電離プラズマを希土類永久磁石で発生した磁場で閉じ込め、プラズマ内で起こる解離性電子付着反応等により負イオン発生させます。右図はイオン源プラズマの様子で、このプラズマから負イオンを引出し、加速器に入射して実験に供します。

電極の寸法形状、磁場分布、原料ガス圧力、放電電圧等を最適化し、高出力・高電力効率・長寿命を目指した研究開発を行います。



## 3 教員からのメッセージ

- 研究室での活動には物理・化学の知識も必要です。また、放射線・高電圧・レーザー・重量物等の危険物を扱うため、安全には十分な注意を要します。よって早めに登校し、昼間のうちに実験室での作業を完了せねばなりません。
- 平成30年度は博士課程1名、修士課程7名、学部4年生2名が在籍しています。
- 就職先: 日立製作所、東芝、三菱電機、東北電力、東京大学、筑波大学、KEK、放射線医学総合研究所 他



## 葛本・堀口研究室

パワー半導体デバイスモデルの構築  
とパワエレ機器高機能化への応用

電力グループ  
大岡山・EEI-210

連携教授 葛本 昌樹 連携准教授 堀口 剛司

研究分野: パワーエレクトロニクス、電子デバイス

キーワード: パワーデバイス、デバイスモデル、Si・SiC、トランジスタ、ダイオード、シミュレーション

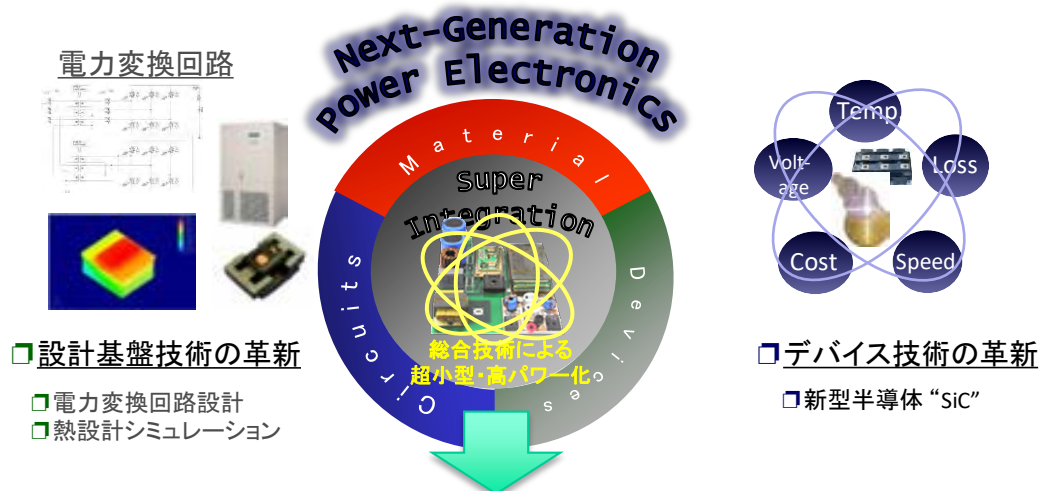
## 1 主な研究テーマ

- ・パワーエレクトロニクスのキーデバイスであるパワー半導体の過渡応答を表現するデバイスモデルを構築
- ・デバイスモデルを用いたスイッチング損失、EMIノイズなどパワエレ機器の解析評価手法を開発

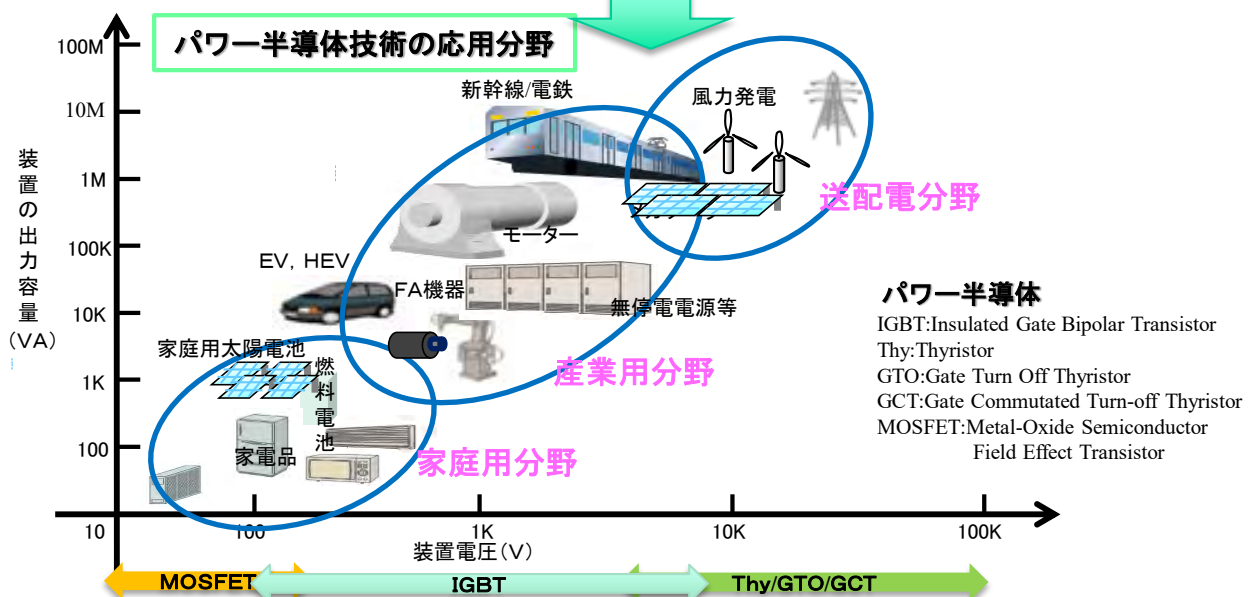
## 2 最近の研究成果

## 次世代パワーエレクトロニクス技術

電力変換器の革新→環境・エネルギー問題への貢献



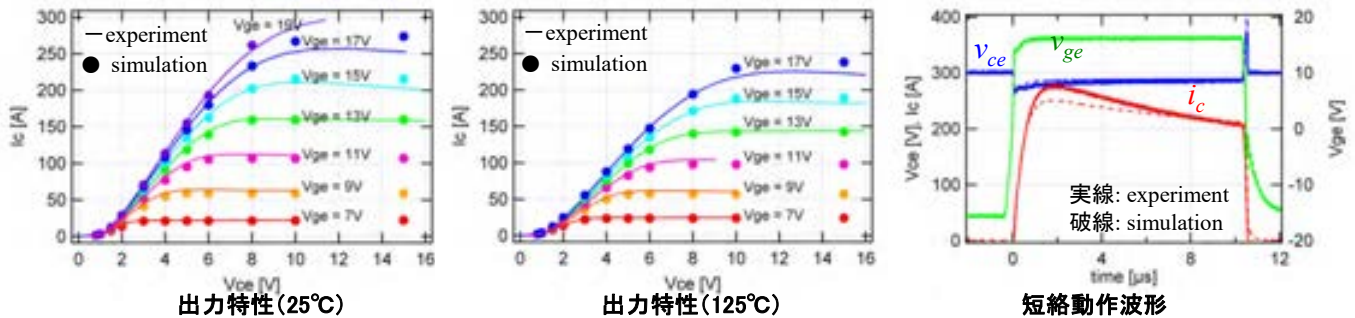
## 高度な設計に不可欠なパワー半導体の動特性シミュレーション



## 大岡山・電力・エネルギーグループ

パワーデバイスの物理モデルの構築  
電気自動車、新エネルギー機器の電力変換回路を設計するためPSpice等の  
回路シミュレータ上で動作するデバイスモデルを開発を開発

## IGBT物理モデルを用いた静特性と短絡動作解析 (定格: 600-V, 30-A)



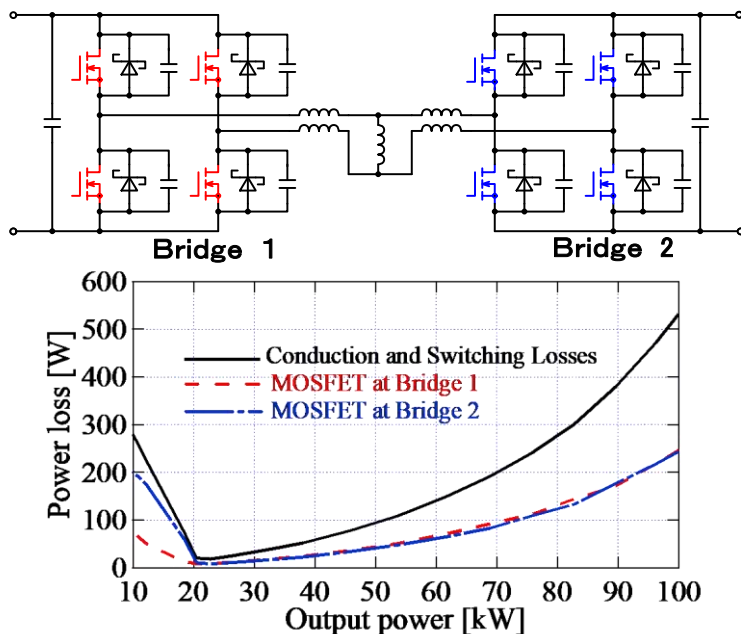
シミュレーション結果は実験結果を良好に再現

- 出力特性: 7%の誤差で再現
- アーム短絡動作: 9%の誤差で再現 (コレクタ電流ピーク値)

T. Horiguchi, S. Kinouchi, Y. Nakayama, T. Oi, H. Urushibata, S. Okamoto, S. Tominaga, and H. Akagi, "A High-Speed Protection Circuit for IGBTs Subjected to Hard-Switching Faults", IEEE Trans. IA., vol. 51, no. 2, pp.1774–1781, Mar./Apr., 2015

## SiC-MOSFET準物理モデルを用いた応用解析事例

## ■ DC/DCコンバータ(100kW)の損失解析



双方向DC/DCコンバータ回路図  
(SiC-MOSFET, 1200V, 400A)

DC/DCコンバータのSiC-MOSFET  
損失解析結果

- 回路の動作特性を詳細に解析可能
- 解析結果を回路、熱設計に展開

小杉、中村、葛本、赤木、堀口、木ノ内、宮崎 「SiC-MOSFETモデルを用いた双方向DC/DCコンバータの損失解析」  
電子デバイス/半導体電力変換合同研究会、EDD-15-092, SPC-15-174(2015)

## 3 教員からのメッセージ

パワーエレクトロニクスの研究室である赤木・萩原研究室、藤田研究室と連携した研究室です。居室、実験室等を含め全ての活動を赤木・萩原研究室、藤田研究室と連携して進めています。環境エネルギー分野で注目されるパワーエレクトロニクスの発展を担ってきたのがパワー半導体デバイスです。パワーデバイスを高度に活用するためには、回路設計者が容易に使うことのできるデバイスモデル構築が重要です。IGBTからSiC-MOSFET対応へと研究を進めています。



## 千葉研究室

## 次世代自動車用モータ、磁気浮上ベアリングレスモータ、ロボット駆動用モータなどモータ・発電機



電力グループ  
電気電子コース  
大岡山・S3-601/607/608

教授 千葉 明 助教 杉元 紘也

研究分野: 電気機器、メカトロニクス、制御工学、磁気浮上  
キーワード: レアアースフリーモータ、スイッチドリラクタンスモータ、ベアリングレスモータ、磁気軸受、次世代自動車  
ホームページ: <http://www.chiba.ee.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

省エネルギー、温室効果ガス削減に貢献する革新的モータの研究開発を行っています。次世代自動車やハイブリッド自動車のモータへの応用を目指して、レアアース磁石を用いずに、高性能を実現するスイッチドリラクタンスモータの解析、設計、試作、実験、評価を行っています。また、次世代モータとして、機械的ベアリングを用いずに、電磁力によって回転軸を磁気支持する磁気浮上ベアリングレスモータの基礎研究を行っています。

本研究室の研究テーマは、電気、機械、情報、電子を融合した内容であり、幅広い知識と技術を身に付けることができます。また、実機を設計・試作し、実験することを大切にしています。モータの研究を通して、ものづくりの重要性を学ぶことができます。

省エネルギー

温室効果  
ガス削減

次世代の革新的モータ  
高効率・低消費電力

## 研究テーマ

1. 次世代自動車用モータ
2. 磁気浮上ベアリングレスモータ

## 2 最近の研究成果

## ■ EV/HEV用スイッチドリラクタンスモータ(SRM)

スイッチドリラクタンスモータ(SRM)は、固定子及び回転子が鉄心と巻線のみで構成され、永久磁石を使用しないため、安価で堅牢である利点があります。現状、市販のハイブリッド自動車の主機モータには、永久磁石が使用されていますが、レアアースの供給不安や価格変動の問題から、永久磁石を用いないSRMへの関心が高まっています。しかしSRMは、以下の4点の課題があり、ハイブリッド自動車用への応用は難しいとされていました。(i) 低トルク密度、(ii) 低効率、(iii) インバータが特殊、(iv) 振動・騒音が大きい。

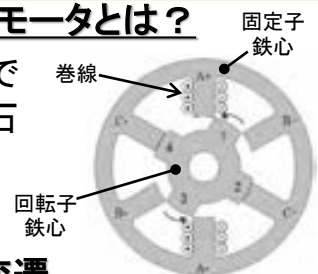
本研究テーマでは、これらの困難な課題に果敢にチャレンジし、これまで(i)(ii)を解決するモータ構造に関する研究開発を行いました。設計段階では、モータの3Dモデルを作成し、磁界解析ソフトを用いて、シミュレーションを行い、構造を検討します。一方、この分野は、良いシミュレーション結果が出たとしても、その結果のみでは評価されず、実験結果が重要です。そこで、ハイブリッド自動車用と同じ体格で、同じトルク、出力を発生させることが可能な、60 kWの実サイズの試作機を製作し、実験的に有効性を実証しました。

この研究成果は、SRMが永久磁石モータに匹敵する性能を出すことが可能であることが、実サイズの試作機で実験的に実証された世界初の事例であり、世界中の企業や大学から注目を集めています。

## スイッチドリラクタンスモータとは？

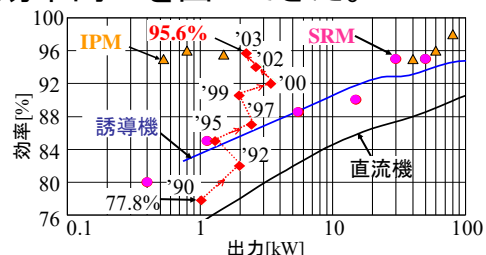
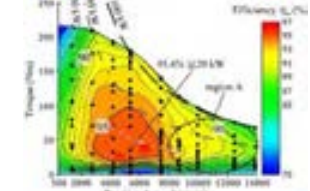
✓ 鉄心と巻線のみで構成され、永久磁石を用いない

✓ 堅牢、安価



## SRMの効率向上の変遷

鉄心材料や巻線の工夫により、SRMの効率向上を図ってきた。

ハイブリッド自動車用主機モータへの応用  
トルク、出力、効率目標を達成

## 大岡山・電力・エネルギーグループ

## ■ スイッチドリラクタンスモータの振動・騒音低減

SRMの振動・騒音は20年以上前からの課題であり、低減方法に関する論文は多数存在しますが、顕著な低減効果はありませんでした。

本研究室では、2012年頃から本研究テーマに取り組んでいましたが、最初の2年間は成果が出ませんでした。2014年頃に、固定子ヨーク部のラジアル力の和の脈動を低減するように電流を流すことで、振動・騒音が低減可能となる革新的方法を提案し、実験的に有効性を実証しました。

本研究テーマでは、SRMの振動・騒音が大幅に低減可能となるメカニズムを数式による基礎理論の構築、磁界解析を用いた数値シミュレーションによる検証、試作機を用いた実験的検証により明らかにすることができました。この研究成果は、学術的な価値だけでなく、産業応用においても多大な貢献となっています。

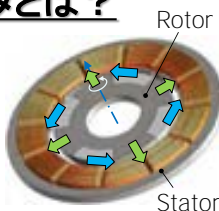
## ■ 磁気浮上ベアリングレスモータ

近年、モータの小型化・高速化・高効率化が進み、今後もその要求が高まると見られています。しかし、現状の機械的ベアリングでは、一般的に、高速回転時に機械損が増加するため、回転速度が制限されています。そこで、本研究室では、機械的ベアリングが不要で、電磁力により回転軸を非接触で磁気支持可能なベアリングレスモータの研究開発を行っています。

ベアリングレスモータは、長寿命・メンテナンスフリーという利点があるため、高速回転用途に限らず、ベアリングの故障が多い用途、長時間の連続運転が要求される用途やメンテナンスが困難な場所に設置される場合にも大変有効です。したがって、冷却ファンや風力発電機などへの応用を目指して、研究開発を行っています。

## ベアリングレスモータとは？

機械的なベアリングが不要で、電磁力により回転軸を磁気支持



## ベアリングレスモータの利点

長寿命

メンテナンスフリー

無摩擦・無摩耗

潤滑油レス

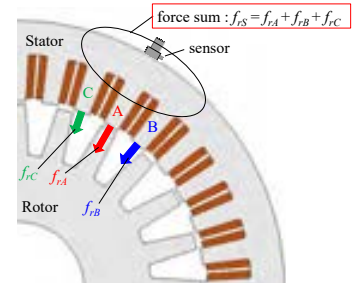
高付加価値の創出で、次世代の高効率・高性能モータとして期待されている

画期的な制御方法を提案し、大幅な振動・騒音の低減に成功

スイッチドリラクタンスモータの試作機



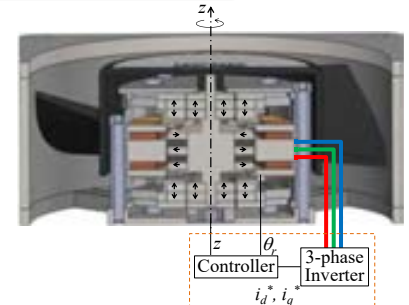
固定子ヨークのラジアル力の和の脈動を低減



## 冷却ファンへの応用



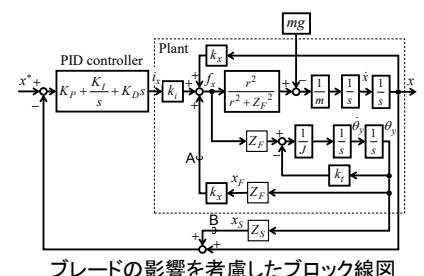
試作した固定子



## 風力発電機への応用



直径1mのブレードを取付けた試作機



## 3 教員からのメッセージ

千葉研究室では、ものづくりを重視した次世代の革新的モータの研究開発を通じて、設計から解析、試作、実験、評価まで幅広く携わることができます。スイッチドリラクタンスモータの研究では、困難な課題にチャレンジし、独創的なアイデアを実際に形にできる点が面白いと思います。ベアリングレスモータの研究では、なかなか磁気浮上せず、何度も失敗と改良を続けて、最後に磁気浮上に成功した時の感動は計り知れないものです。世界で活躍する一流のモータ技術者になるために、千葉研究室で共に貴重な時間を過ごしましょう！



## 七原研究室

風力・太陽光発電などの  
再生可能エネルギーと電力システム  
の協調を目指して

電力グループ  
電気電子コース・エネルギーコース  
大岡山・S3-609

教授 七原 俊也      助教 河辺 賢一

研究分野: 電力システム工学, 電力工学, 発電工学(再生可能エネルギー発電)

キーワード: 電力システム, 風力発電, 太陽光発電, スマートグリッド, 需給運用・制御, 発電出力変動, 電力品質, 安定性解析, 安定化制御, パワーエレクトロニクス応用機器

ホームページ: <http://www.pwrsys.ee.titech.ac.jp>

## 1 主な研究テーマ

環境問題や化石燃料枯渇問題への意識の高まりから、再生可能エネルギー（以下、再エネ）の電力システムへの導入が進んでいます。しかし、太陽光発電や風力発電などの再エネは、出力が天候に応じて変動するだけでなく、外乱に対する応答特性が火力・原子力・水力発電と大きく異なります。そのため、電力システムの解析・運用・制御における新たな課題が生じています。

当研究室では、電力システムへの再エネの大量導入に係る諸課題の解決を主な研究テーマとして、将来の電力システム（図1）を構成する多様な要素技術の利用を視野にいれ、その解決に取り組んでいます。

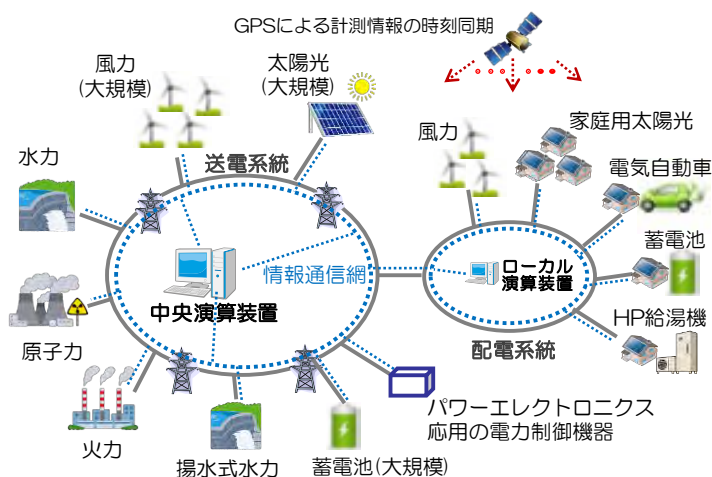


図1 将来の電力システムのイメージ

## 2 最近の研究成果

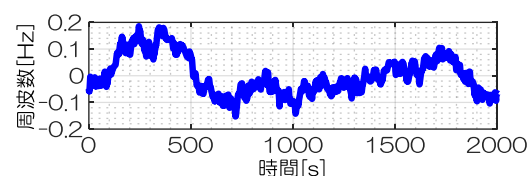
## ■ 再エネ導入時の周波数安定性の安定化手法の開発

電力システムの運用では、システム全体の電力の需要と供給のバランスが崩れると、交流電圧の周波数が基準値から変動し、電力品質の低下や停電につながる恐れがあります。再エネは、天候により出力が大きく変動することから、その普及を進めるためには、火力発電機他、蓄電池などの新技術を利用した新しい周波数制御システムを開発していく必要があります。

さらに、再エネは、従来の同期発電機と異なって慣性力をもたない発電方式であるため、電源脱落時の周波数変化率(RoCoF: Rate of Change of Frequency)が大きくなってしまい、停電リスクが高まるという課題があり、これに対しても新しい対策が必要であると考えています。

そこで当研究室では、上記の課題解決を目的として、以下の研究課題に取り組んでいます。

- ・ パワースペクトル解析に基づく周波数制御システムの最適化に関する研究（図2）
- ・ 蓄電池と火力発電機を協調した周波数制御システムの開発
- ・ 電源脱落時における風力発電システムの慣性制御による周波数安定化システムの開発



電力システムの周波数シミュレーション結果

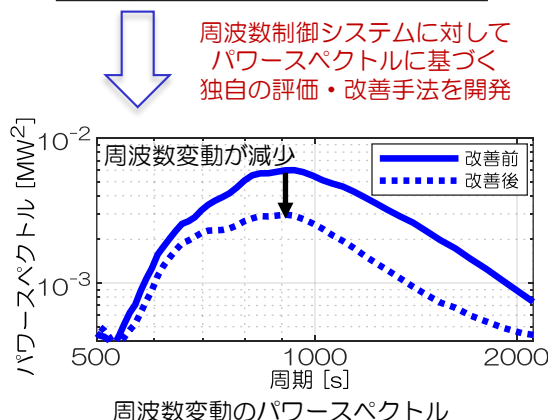


図2 周波数制御システムの最適化による変動のパワースペクトルの改善

# 大岡山・電力・エネルギーグループ

## ■ 高速情報通信技術を利用した同期・電圧安定性の安定化手法の開発

送電線への雷撃などの事故時には、同期発電機群の同期外れ現象や、電圧回復遅延現象などによって停電にいたる場合があります。電力システムの運用では、これらに対する安定性を維持することも必要不可欠です。再エネの連系に伴い、これらの安定性が損なわれることが指摘されており、その対策が必要です。

一方で、広域間の高速情報通信技術を電力システムの安定化システムに適用することが期待され、これを想定した新たな系統安定化理論の構築が求められています。

当研究室では、再エネ導入時の同期・電圧安定性の維持を目的として、以下の研究課題に取り組んでいます。

- ・ 広域系統情報を利用した同期発電機の励磁制御システムの開発
- ・ 広域制御技術を利用した再エネ用スマートインバータの緊急制御手法の開発(図3)

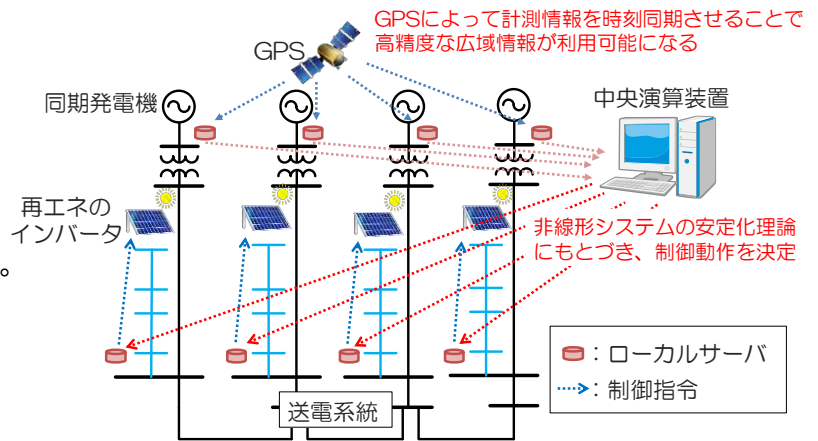


図3 当研究室で提案するスマートインバータによる広域安定化制御システムの概念図

## ■ 再エネ大量導入時の最適需給運用計画手法の開発

電力システムの需給運用では、火力発電機等によって10分程度以内に出力調整可能な発電余力を確保しています。これにより、電力需要の予測外れや電源停止などの事態に備えています。再エネ連系時には、天候急変に備えて更なる発電余力が必要となりますが、これは火力発電機を低出力帯で運転することにつながり、発電効率の低下(経済性の悪化)を招きます。

当研究室では、再エネが大量導入された電力システムの需給運用における供給信頼度や経済性の両立を目的として、以下の研究課題に取り組んでいます。

- ・ 再エネの出力予測誤差を考慮した需給運用計画手法の開発(図4)
- ・ 再エネの出力制御を考慮した需給運用計画手法の開発
- ・ 負荷の消費電力制御やエネルギー貯蔵装置を考慮した需給運用計画手法の開発

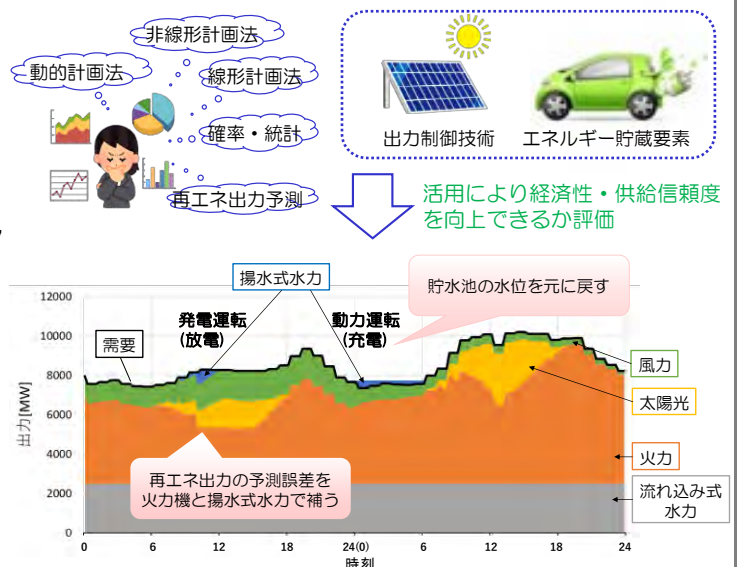


図4 再エネ連系時の需給運用シミュレーションの例

## 3 教員からのメッセージ

電力システムは現代社会の基盤をなす重要なインフラであり、これまでに長い年月をかけて構築されてきました。一方、近年の電力システムを取り巻く状況は、太陽光発電や風力発電の大量導入、発送電分離等による電力事業への市場原理の導入など、大きく変わりつつあります。当研究室では、このような状況下での新しい電力システム工学を確立すべく、太陽光発電や風力発電の大量導入の影響解明とその対策を中心課題に据え、研究を進めています。新たな分野の開拓に興味を持つ意欲的な学生が仲間に加わってくれることを期待しています。



## 萩原研究室

## パワーエレクトロニクスの電力システム・電気鉄道・産業用途への応用



電力グループ  
エネルギーコース・電気電子コース  
大岡山・EEI-402

准教授 萩原 誠

研究分野: パワーエレクトロニクス

キーワード: 高圧・大容量双方向チョップ回路, 高圧SiC-MOSFET, 電池電力貯蔵装置, ハイブリッド直流遮断器, メガソーラー用インバータ, 非接触給電システム

ホームページ: <http://www.pel.ee.e.titech.ac.jp/jp/>

## 1 主な研究テーマ

- ・ バッテリー車載型直流電気鉄道への適用を目的とした補助変換器を用いた双方向チョップ回路
- ・ 次世代パワーデバイスである6.5kV SiC-MOSFETパワーモジュールの連続スイッチング試験
- ・ 次世代多端子直流送電システムに適用可能な直流遮断器評価装置

## 2 最近の研究成果

### バッテリー車載型直流電気鉄道への適用を目的とした補助変換器を用いた双方向チョップ回路



インダクタの小型・軽量化が実現可能な補助変換器を用いた双方向チョップの外観図

近年、バッテリーを車載したバッテリー車載型直流電気鉄道の導入が進んでいます。バッテリーを車載することで、省エネルギーの実現、回生電力の有効利用が可能、架線を使用しないため景観向上などの利点が生じます。一方、架線電圧(1500 V)と電池電圧(600~700 V)は電圧値が異なるため、双方向チョップを用いて電圧変換を行う必要があります。従来型双方向チョップに使用するインダクタの重量・体積は数100 kgから1トン以上になる場合もあり、バッテリー車載型直流電気鉄道の導入を阻害するという問題がありました。

本研究室では、インダクタの小型・軽量化が実現可能な補助変換器を用いた双方向チョップ回路を提案し、実験による検討を行っております。これは、従来型双方向チョップ回路と比較して、インダクタ重量・体積を1/50以下に低減できる点に特長があります。また、補助変換器が直流遮断器としての機能を有するため、従来回路で必要不可欠な機械的直流遮断器が不要となります。上記技術は今後普及拡大が期待される電気自動車への適用も可能であるため、省エネルギー社会の実現に重要な役割を果たすと考えます。

### 次世代パワーデバイスである6.5kV SiC-MOSFETパワーモジュールの連続スイッチング試験



6.5 kV SiCパワーモジュール用連続スイッチング試験回路の外観

従来、パワーデバイスの材料として安価で加工性の良いシリコン(Si)が使用されてきましたが、近年炭化珪素(SiC)を用いた次世代パワーデバイスであるSiC-MOSFETが注目を集めております。日本では3.3 kV SiC-MOSFETパワーモジュールを用いたモータドライブシステムが、電気鉄道用途として適用されています。一方、電力用途では6.5 kV耐圧を有するパワーデバイスの適用が期待されています。現在はシリコンを用いた6.5 kV IGBTが実用化されていますが、スイッチング損失低減の観点から数100 Hz以下に制限されるという問題点が存在してきました。

本研究室では、6.5 kV SiCパワーモジュールを用いた連続スイッチング試験回路に関して検討しております。SiCパワーモジュールは低損失であるため、スイッチング周波数を3 kHz以上に増加させることが可能です。本研究室では左図に示す直流3.5 kV、変換器容量520 kVA、スイッチング周波数3.15 kHzの単相インバータ回路を構築し、連続スイッチング試験を実施しました。詳細な損失解析を行った結果、任意の負荷力率角において変換器効率99%以上が実現できることを明らかにしました。

# 大岡山・電力・エネルギーグループ

## 次世代マルチレベル変換器を使用した高圧モータドライブ駆動システム



次世代マルチレベル変換器



各種モータ(誘導電動機, 同期電動機)

ファン・ブローヤやポンプなどは、可変速運転を行うことによって大幅な省エネが達成できます。しかし、高圧・大容量インバータの開発・実用化は遅れています。従来、インバータの高圧化には多巻線変圧器を使用することで対応してきました。しかし、この複雑な巻線構造の変圧器は高コストで、信頼性が低いという課題がありました。

本研究室では、左図に示す次世代マルチレベル変換器を用いた誘導電動機・同期電動機駆動システムを設計・製作し、良好な特性を実証しました。2014年にはIEEE IAS IPCC Third Prize Paper Award を受賞しました。

## 有効電力を調整可能なSDBC (Single-Delta Bridge-Cell) 変換器に関する研究



有効電力を調整可能なSDBC変換器の外観

近年、系統安定度向上、電圧調整を目的とし数10 MVA級無効電力補償装置の導入が進んでおります。従来、無効電力補償装置用半導体電力変換器として変換器用変圧器を用いた方式が適用されてきましたが、近年変圧器を用いずに高圧系統に連系可能なモジュラー・マルチレベル・カスケード変換器(MMCC)の適用が始まっております。特に、単一デルタ結線を有するMMCCの一方式であるSDBC変換器は、無効電力補償装置としての特性に優れていることから、複数のメーカーが実用化、もしくは実用化を目指しております。

一方、SDBC変換器は無効電力を調整できますが、有効電力を調整できないという課題がありました。有効電力調整能力を具備することで蓄電システムとしての機能が実現でき、適用先がより広がります。本研究ではSDBC変換器に単相高周波変圧器を挿入することで有効電力を調整可能な革新的回路方式を提案しております。提案方式の有効性・妥当性は、110 V、10 kVAミニモデルを用いた実験により確認しております。

## HVDC遮断器への適用を目的とした直流遮断器評価装置



直流遮断器評価装置の外観

直流電気鉄道や実用化が期待される多端子直流送電システムでは、短絡事故が発生した場合に回路を遮断する直流遮断器の設置が必要不可欠です。直流遮断器は事故時に数kAの大電流が流れ、同時に数100 kVの高電圧が印加されます。一方、直流遮断器を評価する際、上記の高電圧・大電流を正確に模擬する必要があります。従来の直流遮断器評価装置は、大型なインダクタが必要、低い電圧・電流調整能力、機械的部品の磨耗という課題がありました。

本研究室では、最新の半導体電力変換技術をベースとした直流300V、50A定格(本実験室で可能な最大容量)の新直流遮断器評価装置を設計・製作し、実験により動作原理検証を行っております。現在、数100 A/msの事故電流の模擬に成功しており、更なる大電流化・高電圧化を目指し研究を行っております。

## 3 教員からのメッセージ

パワーエレクトロニクス技術は、コンピュータ・OA機器から家電製品、一般産業、交通(ハイブリッド・電気自動車、鉄道、船舶、飛行機)、再生可能エネルギー、電力システムまで幅広く応用されており、電気電子工学の基幹技術になっています。今後は、現在主流のSi(シリコン)に代わり、SiC(炭化珪素)やGaN(窒化ガリウム)などのワイドバンドギャップ半導体を使用した次世代パワーデバイスの本格的な実用化に伴って、パワーエレクトロニクス技術のさらなる発展と応用技術の拡大が期待されています。



## 藤田研究室

パワーエレクトロニクス  
モータドライブ応用  
電力エネルギーシステム

電力グループ  
エネルギーコース・電気電子コース  
大岡山・EEI-404

教授 藤田 英明

助教 佐野 憲一郎

研究分野: パワーエレクトロニクス, 電気機器, 電力システム  
キーワード: 太陽光発電, モータドライブ応用, 高効率電力変換器  
ホームページ: <http://www.akg.ee.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

- 最新の半導体デバイスと新しい回路方式を活用した高効率・小型電力変換装置の開発
- 新しい回路トポロジーを用いた太陽光・風力・小規模水力発電用高効率・低コスト電力変換器
- インダクタやコンデンサ容量を低減した新しい電力変換器の回路方式と制御方式

## 2 最近の研究成果

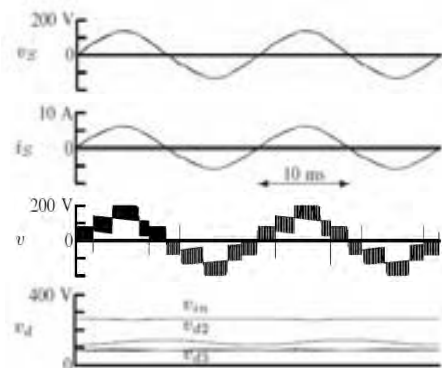
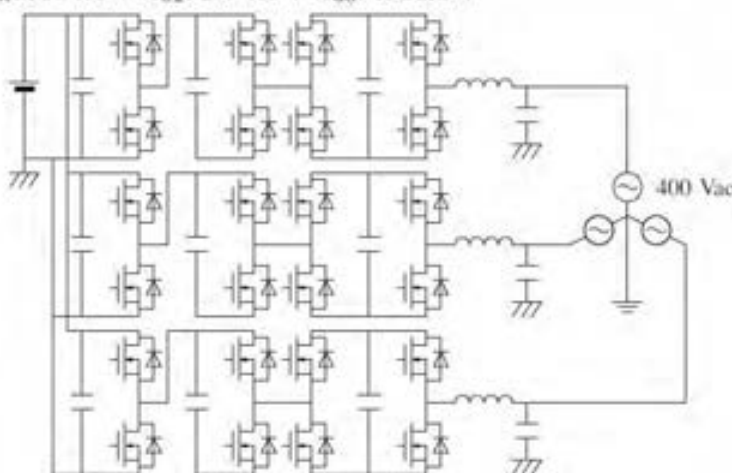
## ■太陽光発電用高効率 Zig-Zag Connected Chopper 変換器

太陽光発電では、太陽電池が発電した直流電力を種々の機器で使えるように、交流電力に変換するインバータが必要です。インバータには、日の出や雨天の弱い日射から、日中の強い日差しまで、広い動作状態で高効率に電力を変換する能力が求められます。また、太陽電池からの漏れ電流は、太陽電池の寿命を短くすることが知られており、トランスなどを用いて漏れ電流を抑制する対策が取られていますが、変換効率の低下と大型化を引き起こします。

当研究室では、チョップパ回路を組み合わせた新しい回路トポロジー Zig-Zag Connected Chopper (ZCC) 変換器を開発しました。このZCC変換器は、トランスを用いることなく、漏れ電流を抑制できるだけでなく、比較的low周波のスイッチングでも、交流電流を正弦波に制御できる特長があります。その結果、研究室での試作装置では、98.2%の最高効率を実現しました。既に、この回路方式は、ヨーロッパ・アメリカ向けの太陽光発電用インバータに適用されています。



$v_{in}$ : 520-800 V  $v_{d2}$ : 260-400 V  $v_{d3}$ : 130-250 V



# 大岡山・電力・エネルギーグループ

## ■完全光絶縁共振形ゲートドライブ回路

パワーエレクトロニクス回路では、パワーMOSFETやIGBTなどの半導体スイッチングデバイスを高速にターンオン・ターンオフすることが重要です。このためには、ゲートドライブ回路が用いられます。最近の高速かつ高耐圧な半導体スイッチングデバイスを駆動する場合、制御回路や電源回路との間に高周波成分に対しても高い絶縁能力が求められます。制御信号については、これまでも光ファイバーなどを用いた絶縁方式がありましたが、電源回路との絶縁はいまだに変圧器を用いておりこれを通過する漏れ電流の低減が課題でした。

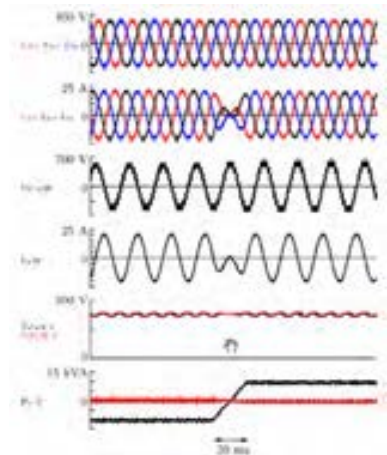
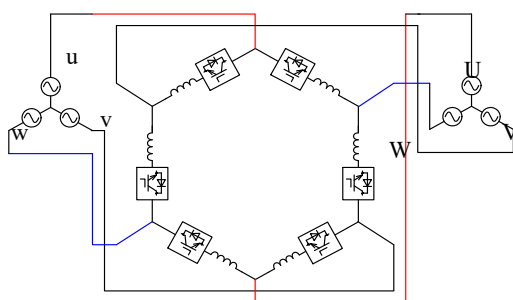
当研究室では、共振形ゲートドライブ回路の技術を研究してきました。これは、ゲート容量(キャパシタンス)の共振現象を活用して、理論的な損失なしに、半導体スイッチングデバイスをオン・オフする新しい回路方式です。その結果、新しいゲートドライブ回路は、レーザーダイオード(発光素子)とフォトダイオード(受光素子)が伝えられるわずかな電力だけで動作することができます。新型スイッチング素子のゲートドライブ回路として実用化されています。



## ■カスケード電力変換器を用いたパワーフローコントローラ

送電・配電システムには、高い安全性と信頼性が要求されます。このためには、電力の需要と供給が一致している必要がありますが、現在の複雑な電力システムの信頼性と安全性を向上するためには、系統内の電力潮流(パワーフロー)を積極的に制御することが重要な課題の一つです。

これを実現するシステムとして、6台のカスケード変換器を用いたパワーフローコントローラを提案しています。これは、変換器を六角形に接続した新しい回路トポロジーに特長があり、高速な電力潮流の制御と同時に、各カスケード変換器の直流コンデンサ電圧を安定に制御することができます。その結果、系統電圧の一周期 20 msで電力潮流を急激に反転するような高速制御を可能にしました。



## 3 教員からのメッセージ

当研究室では、回路解析から回路の設計、試作、制御アルゴリズムの開発までを行っています。これらのすべてが得意な人は少ないと思いますが、むしろ「新しいものを創り出してみたい」という気持ちが重要だと考えています。どうせ研究するのなら、ここでしかできない、他の大学・研究室には真似のできない創造的かつ独創的な装置・システムを生み出す研究を行っていきたいと考えています。

こういった研究の成果は、実社会で実用化・製品化されてはじめて意味を持ちます。当研究室の研究課題の多くは、共同研究等のテーマで、研究室で開発した新しい技術は、数年後には、実用化されていることも少なくありません。自分たちで開発した技術や機器が実際に使われるのはとても嬉しいものです。





電力・エネルギーグループ  
電気電子コース・エネルギーコース  
大岡山・S3-616/S3-615/S3-614

教授 安岡 康一 准教授 竹内 希 助教 全俊豪

研究分野: プラズマ工学、高電圧工学、電力工学、静電気工学

キーワード: 気液界面プラズマ、大気圧プラズマ、材料改質、水浄化、  
エネルギーキャリア、ハイブリッド直流遮断器

ホームページ: <http://www.plasma.ee.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

### 1. プラズマによる炭素系材料改質

グラフェンなどの炭素系材料は、優れた電気・熱的特徴を有するため、燃料電池の触媒担持体や導電インクなどへの応用が期待されています。しかし、炭素系材料は一般的に疎水性を示し、溶液中での使用が困難です。そこで、気液界面プラズマにより生成されるOHラジカルを利用して親水性を付与するといった、炭素系材料の改質を行っています。

### 2. 新型エネルギーキャリアの創出

低炭素社会の実現に向けてエネルギー貯蔵システムが必要とされる中、窒化マグネシウムという物質を新型エネルギーキャリアとして着目しています。窒化マグネシウムは乾燥雰囲気下で化学的に安定であり、さらに常温で水と容易に反応してエネルギーキャリアとして有望なアンモニアを生成します。本研究室では、大気圧プラズマにより酸化マグネシウムの窒化を行い、窒化マグネシウムを合成する研究を進めています。エネルギー貯蔵システム全体で二酸化炭素を排出しないクーリンエネルギーサイクルを目指しています。

### 3. 気液界面プラズマを用いた水の浄化および反応過程の解明

水溶性の難分解性有機物を、水中気泡内プラズマやソリューションプラズマといった気液界面プラズマで分解し、水の浄化が可能です。実用化に向けて分解速度・分解効率を最大化するとともに、プラズマ、処理液、およびそれらの界面での基礎反応過程と、それぞれの相互作用の理解を目標としています。

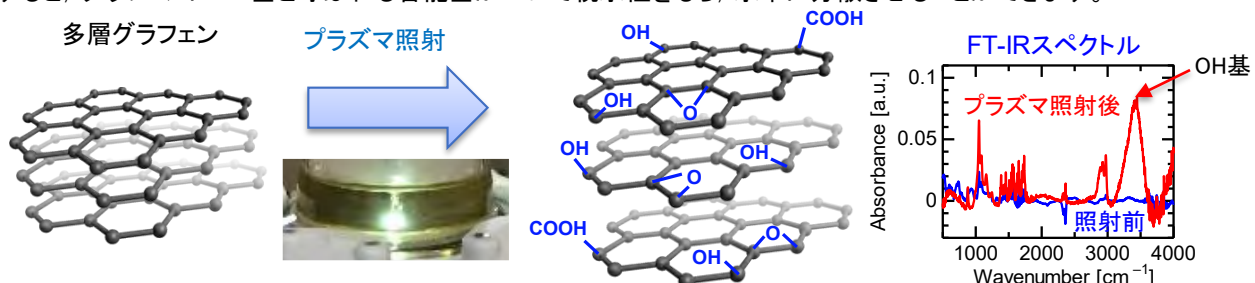
### 4. ハイブリッド直流遮断器

大規模太陽光発電や洋上風力発電といった分散型電源の普及や、直流送配電の増加に伴い、直流遮断器の需要が高まっています。事故発生時には遮断器により電流を直ちに遮断する必要がありますが、直流は電流零点をもたないため、電流遮断が困難です。そこで、通常時の電力損失が小さく、かつ事故電流の高速遮断が可能な、電気接点と並列に半導体素子を挿入したハイブリッド直流遮断器の研究を進めています。

## 2 最近の研究成果

### プラズマによる炭素系材料改質

グラフェンは疎水性を示すため、水中に分散させることができません。しかし、グラフェンを含んだ溶液にプラズマを照射すると、グラフェンにOH基と呼ばれる官能基がついて親水性をもち、水中に分散させることができます。



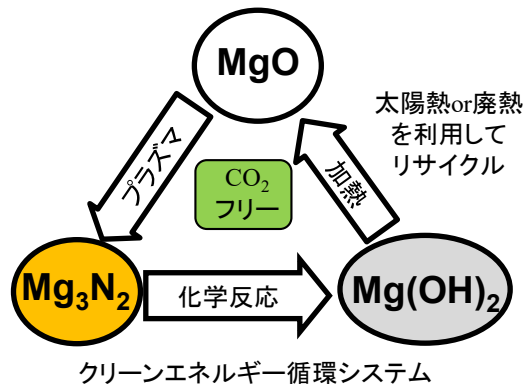
## 大岡山・電力・エネルギーグループ

## 大気圧プラズマを用いた新型エネルギーキャリアの合成

大気圧プラズマにより酸化マグネシウムの窒化を行い、窒化マグネシウムを合成する研究を進めています。エネルギー貯蔵システム全体で二酸化炭素を排出しない**クーリンエネルギーサイクル**を目指しています。



大気圧誘電体バリア放電を用いたエネルギーキャリア合成



合成前 プラズマ合成後



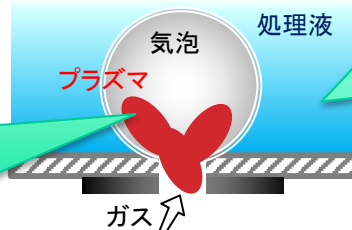
アンモニア濃度の測定

## 気液界面プラズマを用いた水の浄化および反応過程の解明

水の浄化に用いることが可能な水中気泡内プラズマなどの**気液界面プラズマ**において、プラズマ、処理液、およびそれらの界面での**基礎反応過程**と、それぞれの相互作用の理解を目指して研究を進めています。

## プラズマ

- ・ 活性種・高エネルギー粒子の生成
- ・ プラズマ生成条件による反応過程の変化



## 処理液

- ・ 活性種による有機物の分解
- ・ 導電率、粘性の変化

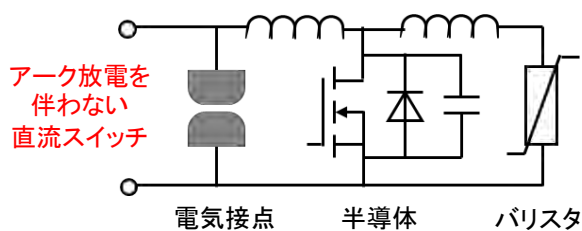


コンデンサをプラズマと電源の間に挿入して交流電圧を印加することで、水中気泡内プラズマの多並列駆動が可能です。

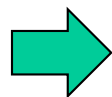
## アークレス直流スイッチ、アークレス直流遮断器の開発

**ハイブリッド直流遮断器**は、電気接点と半導体素子、およびバリスタと呼ばれる素子が並列に並んだ構成です。通常時は電気接点を電流が流れますが、接点を機械的に開極することで、接点間にアーク放電プラズマが発生し、このときに発生するアーク電圧で半導体素子がオンします。すると、電気接点を流れていた電流が半導体素子に転流し、半導体素子をオフすることで**直流電流の高速遮断**が可能です。バリスタは、半導体素子オフ時に発生するサージを吸収します。最近の研究成果では特定条件下で接点間にアーク放電プラズマを発生しない**アークレス転流**が可能であることがわかりました。世界で初めての電気接点を用いたアークレス直流スイッチ、アークレス直流遮断器の開発を目指しています。

## 直流ハイブリッド遮断器の構成

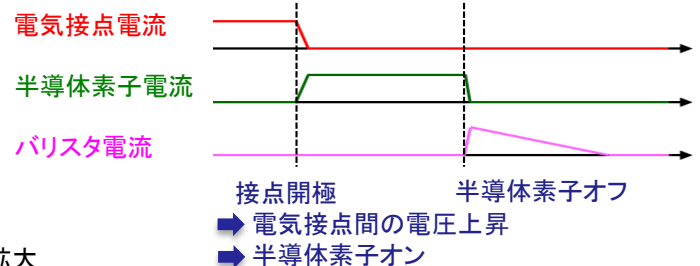


- ✓ 低導通損失
- ✓ 高速電流遮断
- ✓ 電磁ノイズなし



直流システムの利用拡大

## 接点電流の半導体素子への転流動作



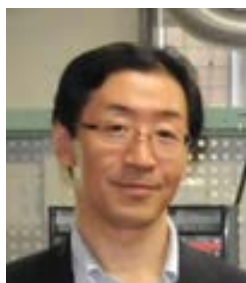
## 3 教員からのメッセージ

- 安岡研・竹内研では、各学生がそれぞれの研究テーマを進めながら専門知識や技術を身につけ、思考力や判断力、交渉力、国際性などを養います。楽しく、厳しく、下克上が伝統の研究室です。
- 平成30年度は、博士課程4人、修士課程13人、学部生2人が在籍しています。
- 就職先： JR東海、日産自動車、新日鉄住金、東京ガス、ニコン、フジクラ、三菱電機、など



# 沖野研究室

# 新しい大気圧プラズマ装置の開発と 医療・環境・材料分野への応用



電力グループ  
ライフエンジニアリングコース・電気電子コース  
すずかけ台・J2棟1306号室

准教授 沖野 晃俊

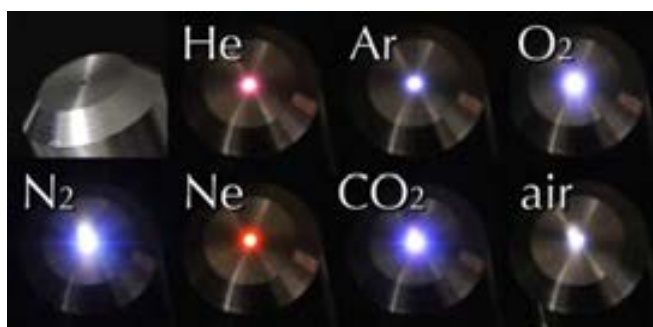
研究分野: 零下から高温までの新しい大気圧プラズマ装置の開発と  
医療・環境・材料分野への応用

キーワード: 大気圧プラズマ, プラズマ医療, 環境分析, 表面処理

ホームページ: <http://ap.first.iir.titech.ac.jp/>

## 1 新しい大気圧プラズマ装置

大気圧下で生成されるプラズマは、連続的で高速なプラズマ処理を実現できるため、産業応用に有利なツールになります。しかし、大気圧下での安定なプラズマ生成は容易ではないため、従来の装置にはいくつかの制限がありました。沖野研究室では、酸素、窒素、空気、二酸化炭素など、様々なガスを安定にプラズマ化できる「マルチガスプラズマ」、人体にも安全にプラズマ照射できる「ダメージフリープラズマ」、零下から高温まで精密にガス温度を制御できる「温度制御プラズマ」などの新しい大気圧プラズマ装置を開発してきました。これらの技術により、従来の半導体やセラミックス等だけでなく、プラスチック、紙、繊維、液体、生体等のあらゆる物質へのプラズマ照射が可能となり、大気圧プラズマ応用の範囲が飛躍的に広がっています。



左上: 様々なガスのプラズマを生成できる

マルチガスプラズマジェット

上: 温度制御プラズマでは零下90℃から  
250℃までのプラズマを生成可能

左: 人体や様々な素材に高密度プラズマ  
を照射可能

## 2 大気圧プラズマの応用研究

沖野研究室では、上記のような様々な大気圧プラズマを開発しており、それぞれの特性に適した様々な分野に応用する研究を行っています。

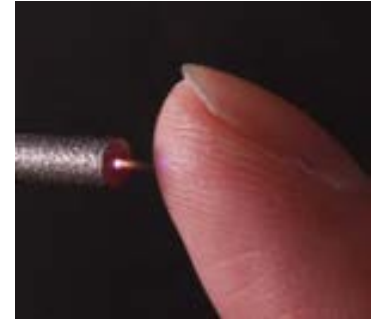
### ■ 医療関連分野への応用

プラズマ中にはラジカルやイオンなどの様々な活性粒子が存在します。この粒子により、プラズマは殺菌、止血、細胞活性化、創傷治療などの効果を持つことが明らかになってきました。そこで我々は、国立がん研究センター等と共同で、上記のプラズマ装置を駆使した医療関連機器や新技術の開発を行っています。

殺菌では、様々なガスと温度のプラズマを使用して、ドライ、もしくは水中の殺菌を行っています。ターゲットは、医療機器のほか、食品や農業への応用です。

## すずかけ台・電力・エネルギーグループ

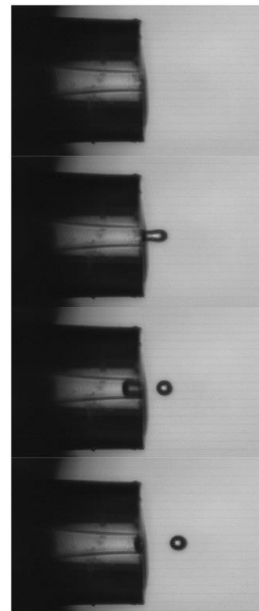
大気圧プラズマを照射すると止血効果が得られますが、従来の熱焼灼とは違って照射部に熱損傷を与えないため、短期間での創傷回復が期待できます。この長所を活かした、プラズマ内視鏡治療装置を開発するプロジェクトを進めています。内視鏡の鉗子口は内径約3mmなので、写真のような小型の温度制御マルチガスプラズマジェットを金属の3Dプリンタを使用して作成し、内視鏡用の止血・治療装置としての実用化をめざしています。



### ■ 環境分野への応用

沖野研では、プラズマを用いた新しい分析装置の開発を行っています。右図のように直径30ミクロン程度の微小な液滴に一つの細胞を封入して高温プラズマに導入することで、特定の細胞中の微量元素を測定する装置を開発しています。今後はiPS細胞やがん細胞などの分析を行い、再生医療の分野貢献したいと得ています。

プラズマを物質に照射すると、表面に付着した物質が脱離されます。この物質をイオン化して質量分析する装置を開発しています。低温プラズマでソフトにイオン化することで、付着物を分解することなく質量分析することが可能になります。これにより、皮膚などに付着した化学物質を超高感度かつ非接触で分析する事が可能になりました。右写真のようなプラズマ脱離・イオン化プローブを作成する事で、汗による疾病の診断や化粧品などの分析、さらには大気粉塵等の分析が可能になります。



左: 微小な液滴に細胞やナノ粒子を包含させてプラズマ中に射出して分析

上: 低温プラズマを皮膚に照射して付着物を脱離・イオン化

### ■ 材料分野への応用

プラズマを物質の表面に照射すると、プラズマ中の活性種によって、表面付着物が除去されます。さらに、活性種は物質表面と相互作用して表面の官能基を変化させます。また、プラズマ中に物質を混合すると、表面をコーティングすることも可能です。これらの手法で材料の表面を改質し、接着性や塗装性を向上させたり、防汚性や撥水性を付与する研究を行っています。

現在は、自動車や航空機に使用する、高強度接着手法の開発などを実施しています。



表面処理用に開発した、リニア型プラズマ装置

## 3 教員からのメッセージ

沖野研究室では、学内生のほか、全国の大学や高専等の全ての学部、学科、専攻の皆さんを歓迎しています。プラズマに興味を持つ人なら、これまでの専門は問いません。各自の得意分野を活かしてプラズマの研究を行って下さい。大気圧プラズマや各種の装置開発に興味があり、いろいろな事にチャレンジしてみたい人はぜひ見学にお越し下さい。



# キャンパスマップ

## 大岡山キャンパス



大岡山キャンパスの電気電子系研究室は、南3号館、南9号館、西8号館、EEI棟、北1号館、および北2号館にあります。

## すずかけ台キャンパス

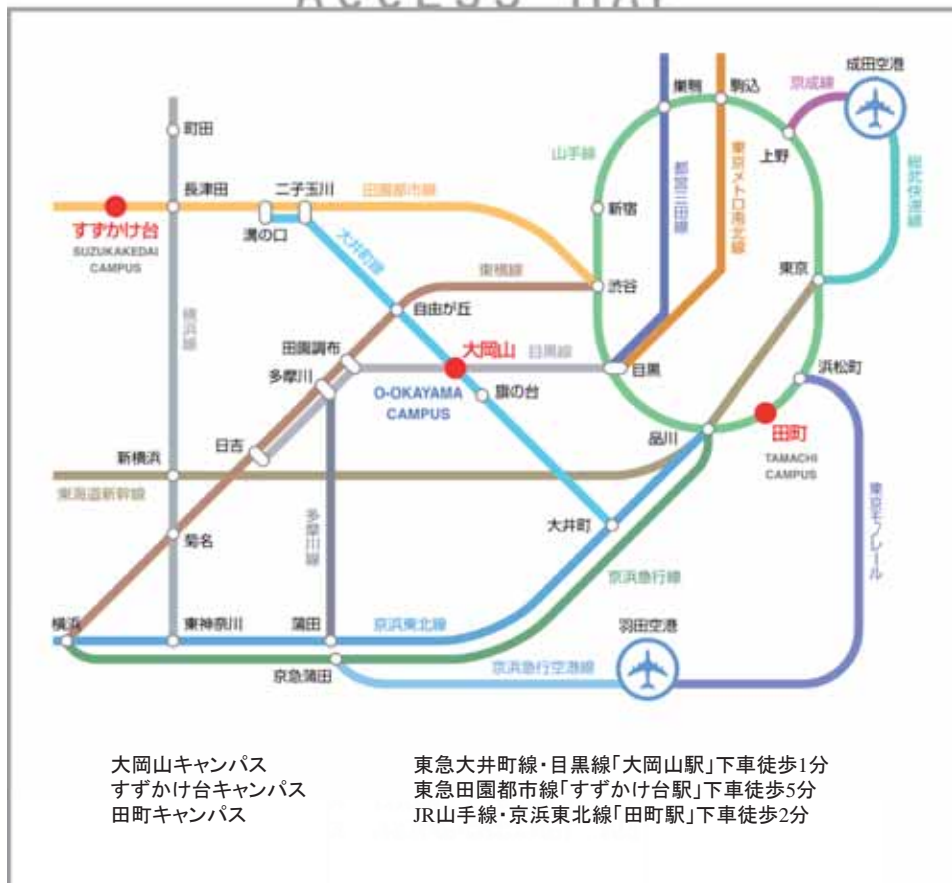


すずかけ台キャンパスの電気電子系研究室は、G2棟、J1棟、J2棟、J3棟、S1棟、およびR2棟にあります。





## ACCESS MAP



## 東京工業大学

工学院 電気電子系 事務室

〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1-S3-39 TEL. 03-5734-2853

電子メール: [inquiry@ee.e.titech.ac.jp](mailto:inquiry@ee.e.titech.ac.jp)

電気電子系入試についてさらに詳しく:

<http://educ.titech.ac.jp/ee/admissions/>