

東京工業大学 工学院  
電気電子系

TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
2024

Department of Electrical and Electronic Engineering

多様化, 高度化している現代社会に適応するためには, 多くの知識が必要とされています。私たちの電気電子系は, エネルギー技術, エレクトロニクス, 通信技術など社会での基幹となる技術を広く深く教育, 研究しています。電気電子系のそれぞれの研究室は, それぞれの研究分野において世界最先端の研究をリードしています。その一端に触れる研究活動の経験, 今後の社会の発展に貢献するための能力を育む電気電子系での学修は, 学生の皆さんの将来にきっと役立つと考えます。



工学院 電気電子系  
系主任 廣川 二郎

## 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.....	108

# 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2024年2月現在の情報での、2024年4月1日時点の予定です。)

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	-
白根 篤史	大岡山	南9-901	3764	shirane@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
徳田 崇	大岡山	南9-801	2211	tokuda@ee.e.titech.ac.jp	ライフエンジニアリングコース	電気電子コース
ZHANG YUNCHENG	大岡山				電気電子コース	-
伊藤 浩之	すずかけ台	J2-706	5010	ito@pi.titech.ac.jp	電気電子コース	-
李 尚曄	すずかけ台	J2-701	5031	lee.s.af@m.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	-
雨宮 智宏	大岡山	南9-707	2555	amemiya.t.ab@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
太田 喜元	大岡山	南3-1021	2780	ohta.y.ad@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@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
戸村 崇	大岡山	南3-819	2563	tomura@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
TRAN GIA KHANH	大岡山	南3-911	2860	khanhtg@mobile.ee.titech.ac.jp	電気電子コース	-
中川 茂	大岡山	南9-905	7631	snakagawa@ee.e.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	jjiro@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
藤井 輝也	大岡山	南3-1022	3822	fujii.t.aq@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
LI ZONGDIAN	大岡山	南3-911	3910	lizd@mobile.ee.titech.ac.jp	電気電子コース	-
林 文博	大岡山	南9-906	3097	lin.w.ab@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
相川 洋平	すずかけ台	R2-819	5026	aikawa.y.aa@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	-
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	knakamura@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	-
和田 有司	すずかけ台	R2-714	5052	ywada@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
<b>デバイスグループ</b>						
岩崎 孝之	大岡山	EEI-403	2169	iwasaki.t.aj@m.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
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	safumi@ee.e.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
宮本 恭幸	大岡山	南9-702	2572	miya@ee.e.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>						
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	-
川那子 高暢	すずかけ台	S2-707	5847	kawanago.t.ab@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
星井 拓也	すずかけ台	S2-708	5847	hoshii.t.aa@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
宗田 伊理也	すずかけ台	S2-707	5847	muneta.i.aa@m.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>						
高村 陽太	大岡山	南3-703	2795	takamura@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
田口 大	大岡山	南3-614	2562	taguchi.d.aa@m.titech.ac.jp	電気電子コース	-
中川 茂樹	大岡山	南3-709	3564	nakagawa@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
西村 昂人	大岡山	EEl-401	2662	nishimura.t.ak@m.titech.ac.jp	エネルギーコース	-
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	EEl-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	EEl-409	2698	yamada.a.ac@m.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
荒井 慧悟	すずかけ台	G2-1107	5030	arai.k.ar@m.titech.ac.jp	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	電気電子コース	-
MARIA VANESSA BALOIS OGUCHI	すずかけ台	G2-1007	5592		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	-
當麻 真奈	すずかけ台	J2-1205	5013	toma@ee.e.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	電気電子コース
浦壁 隆浩	大岡山	北3-210	3796	urakabe@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
河辺 賢一	大岡山	南3-619	2335	kawabe@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
清田 恭平	大岡山	南3-610	2697	kiyota@ee.e.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
佐野 憲一郎	大岡山	EEl-407	3596	sano@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	エネルギーコース
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
筒井 幸雄	大岡山	南3-612	3798	tsutsui.y.ad@m.titech.ac.jp	電気電子コース	機械系機械コース
萩原 誠	大岡山	EEl-402	2852	mhagi@akg.ee.titech.ac.jp	エネルギーコース	電気電子コース
原田 茂樹	大岡山	北3-210	3796	harada@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
藤井 勇介	大岡山	南3-601	2697	fujii@ee.e.titech.ac.jp	電気電子コース	-
藤田 英明	大岡山	EEl-404	2696	fujita@ee.e.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

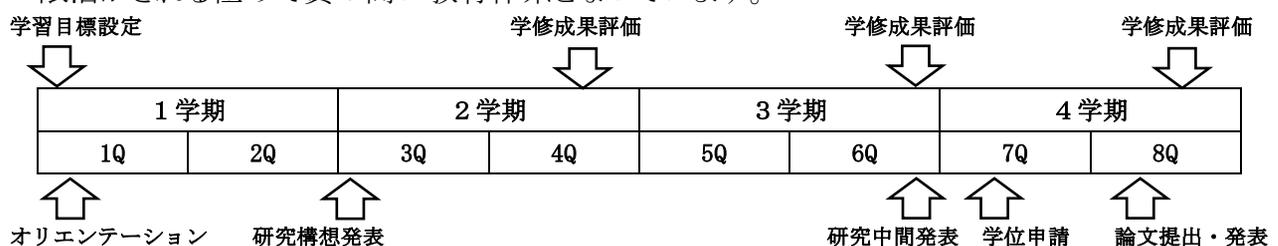
## 概要

「電気電子コース」は、エレクトロニクスやそれに関連した知識・技術を学ぶ「電気電子系」の中で、大学院教育を担うコースです。現代のエレクトロニクスを牽引する社会基盤を構成するエネルギー、通信、回路・システム、デバイス、材料を中心とする電気電子工学分野の教育と研究を行い、基礎的理解力と応用発展力および独創性を備え、グローバルに活躍できる人材を養成することを目的としています。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、講義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、文系教養科目やアントレプレナーシップ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ーで全て必修です。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になっています。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。



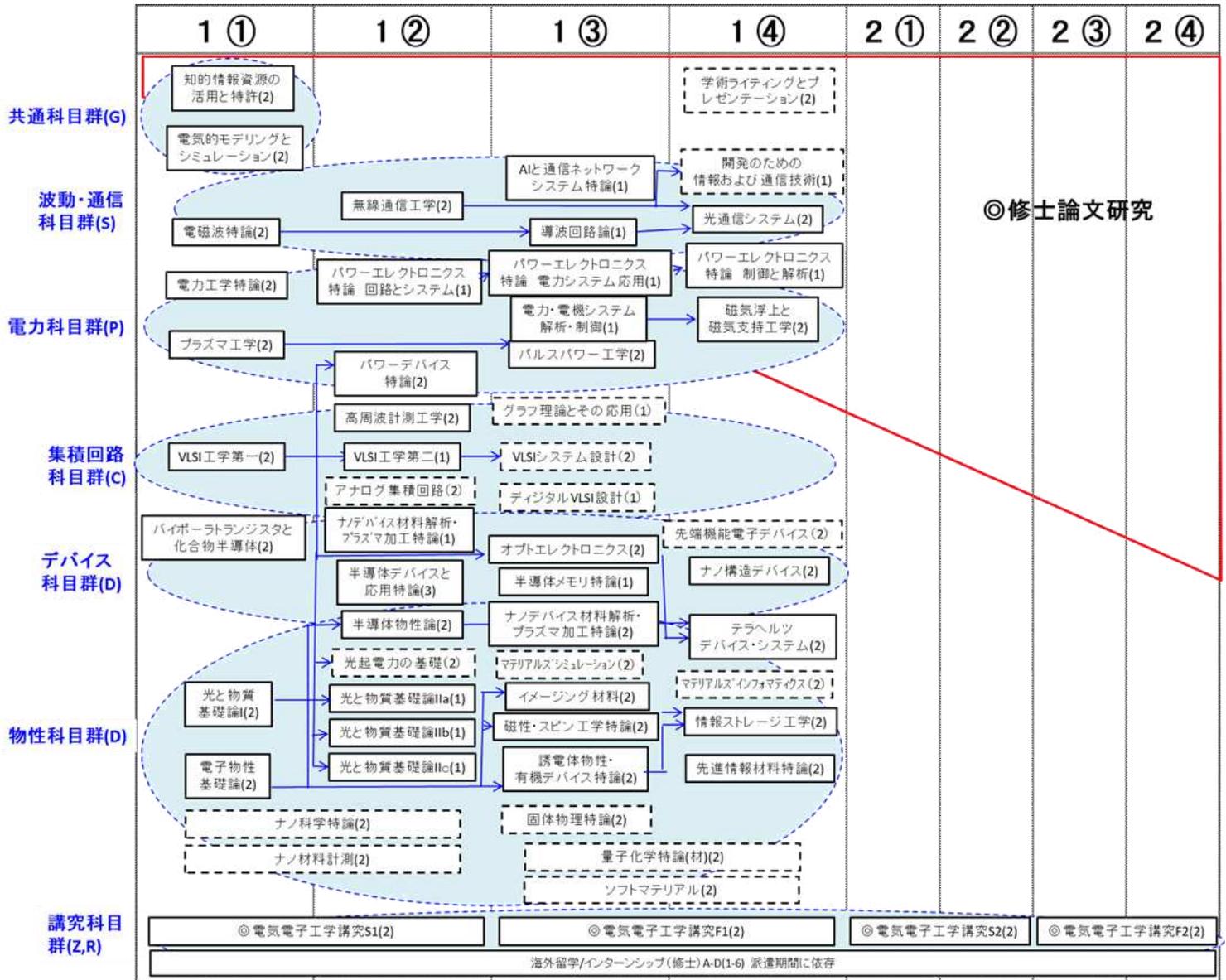
電気電子工学コース修士課程における修士論文研究の標準的な流れ

# 電気電子コース(修士課程)の講義科目

授業科目名	授業科目名
VLSI Technology I (VLSI工学第一)	Academic Presentation I, II (アカデミックプレゼンテーションI, II, III, IV)
RF Measurement Engineering (高周波計測工学)	Ota City Start-up Experience Off-Campus Project (大田区起業体験オフキャンパスプロジェクト)
Fundamentals of Electronic Materials (電子物性基礎論)	Advanced Electromagnetic Waves (電磁波特論)
Semiconductor Physics (半導体物性論)	Guided Wave Circuit Theory (導波回路論)
Imaging Materials (イメージング材料)	Wireless Communication Engineering (無線通信工学)
Fundamentals of Light and Matter I (光と物質基礎論 I)	Optical Communication Systems (光通信システム)
Information Storage Engineering (情報ストレージ工学)	Seminar for Cultivating International Understanding I, II (国際交流演習I, II)
Special Seminar on Semiconductor Memory (半導体メモリ特論)	Dielectric Property and Organic Devices (誘電体物性・有機デバイス特論)
Bipolar Transistors and Compound Semiconductor Devices (バイポーラトランジスタと化合物半導体)	Magnetism and Spintronics (磁性・スピントロニクス特論)
Special Topics on Semiconductor Devices and Applications (半導体デバイスと応用特論) *台湾国立交通大学とのダブルディグリープログラムによる	Advanced Materials in Information Technologies (先進情報材料特論)
Optoelectronics (オプトエレクトロニクス)	Fundamentals of Light and Matter IIa (光と物質基礎論 II a)
Advanced Power Semiconductor Devices (パワーデバイス特論)	Fundamentals of Light and Matter IIb (光と物質基礎論 II b)
Utilization of Intelligent Information Resources and Patents (知的情報資源の活用と特許)	Fundamentals of Light and Matter IIc (光と物質基礎論 II c)
Electrical Modeling and Simulation (電気的モデリングとシミュレーション)	Nano-Structure Devices (ナノ構造デバイス)
Control and analysis of power and motor drive systems (電力・電機システム解析・制御)	Nano-Materials Electronics (ナノ材料電子) *「東工大-清華大 大学院合同プログラム」により北京にて開講
Power electronics circuits and systems (パワーエレクトロニクス特論 回路とシステム)	Advanced Topics on Material Analysis and Basics of Plasma Processing for Nano Devices (ナノデバイス材料解析・プラズマ加工特論)
Power electronics application to power systems (パワーエレクトロニクス特論 電力システム応用)	Magnetic Levitation and Magnetic Suspension (磁気浮上と磁気支持工学)
Power electronics control and analysis (パワーエレクトロニクス特論 制御と解析)	AI & network communication systems (AIと通信ネットワークシステム特論)
Advanced Electric Power Engineering (電力工学特論)	Study Abroad (Master Course) A-D (海外留学(修士)A-D) *
Plasma Engineering (プラズマ工学)	Internship (Master Course) A-D (インターンシップ(修士)A-D) *
Pulsed Power Technology (パルスパワー工学)	Seminar S1, F1 on Electrical and Electronic Engineering (電気電子工学講究S1, F1)
International Communication I, II (国際コミュニケーションI, II, III, IV)	Seminar S2, F2 on Electrical and Electronic Engineering (電気電子工学講究S2, F2)

※ 電気電子コース開講科目かつコース標準学修課程の専門課程のみを記載している。☆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。

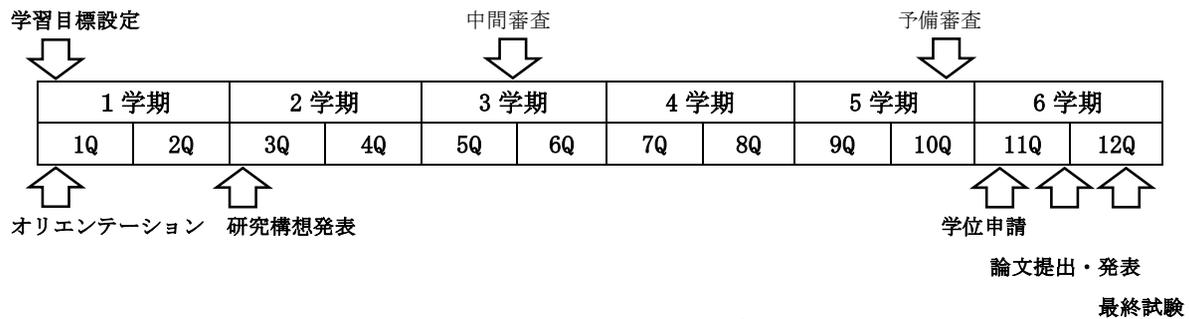
# 電気電子コース（修士課程）の科目体系図



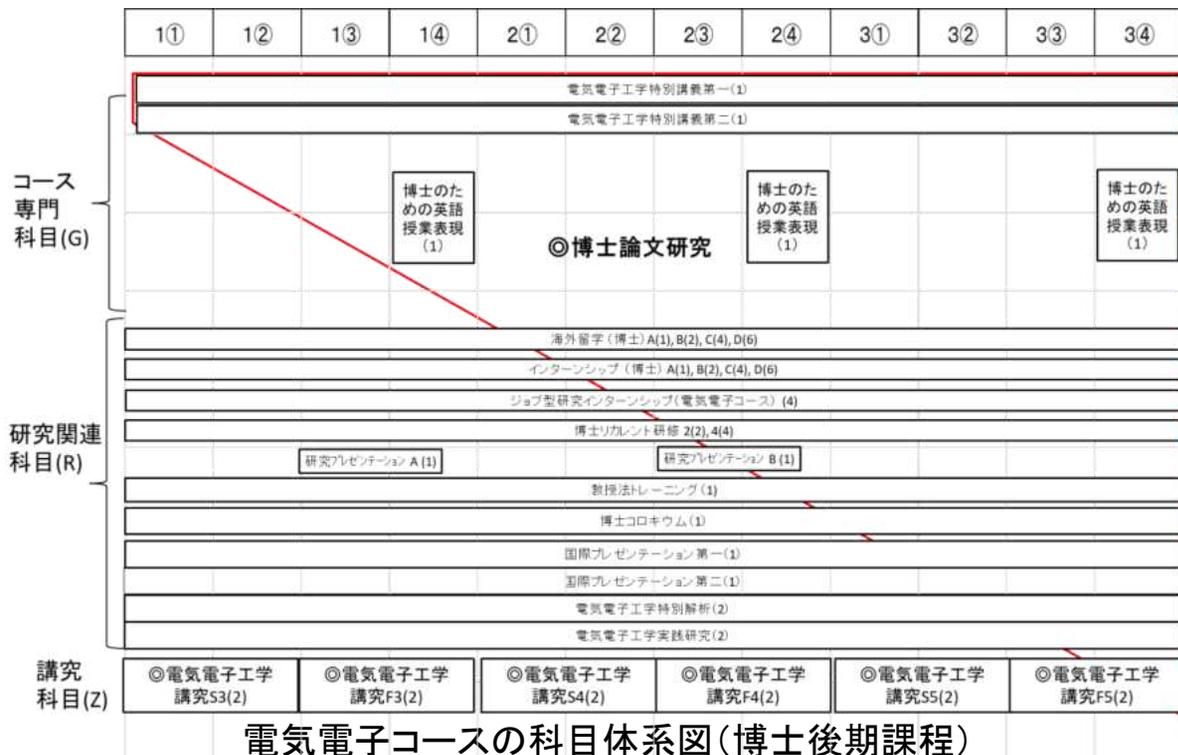
# 電気電子コース 博士課程教育カリキュラム

## 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」(科目:研究プレゼンテーションA)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」(科目:研究プレゼンテーションB)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、指導教員以外にアカデミックアドバイザーが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。



## 電気電子工学コース博士課程における博士論文研究の標準的な流れ



電気電子コースの科目体系図(博士後期課程)

# 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か？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、宮島晋介准教授、清田恭平准教授

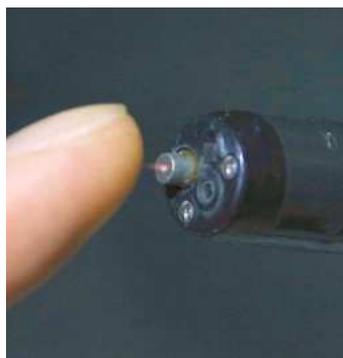
### ○副担当

千葉明教授、藤田英明教授、小寺哲夫准教授、竹内希准教授、岩崎孝之准教授  
河辺賢一准教授、佐野憲一朗テニユアトラック助教

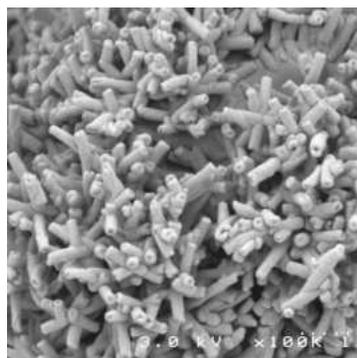
## ライフエンジニアリングコースの概要

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の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

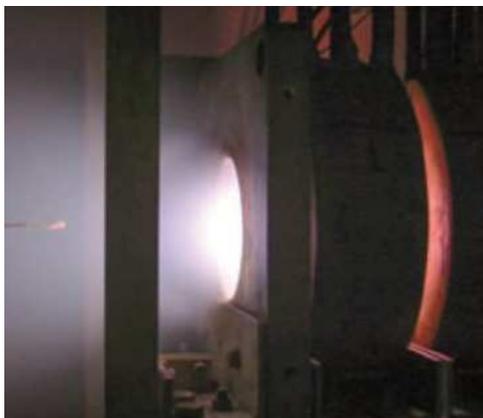
徳田崇教授、中村健太郎教授、沖野晃俊准教授、田原麻梨江准教授

## 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、エネルギー工学および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ゼロカーボンエネルギー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、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、核融合炉周辺領域プラズマ、水中アークプラズマによる原子炉廃止措置、等があります。



核融合炉周辺を模擬した開放端磁場のアークジェットプラズマ



原子炉廃止措置のための水中アークプラズマ

### 電気電子系原子核工学コースの担当教員

#### ○主担当

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。

### ●学生の主な就職先

JFEスチール / JR東海 / JR東日本 / KDDI / NHK / NTTドコモ / NTT東日本 / キーエンス / キオクシア / キヤノン / サンディスク / セイコーエプソン / ソニー / ソフトバンク / ダイキン工業 / TDK / トヨタ自動車 / パナソニック / ファナック / リコー / ルネサスエレクトロニクス / ローム / 古河電気工業 / 三菱重工業 / 三菱電機 / 新日鐵住金 / 村田製作所 / 東京ガス / 東京電力 / 日産自動車 / 日本電気 (NEC) / 日本電信電話 (NTT 研究所) / 日立製作所 / 富士通 / 豊田自動織機 / 本田技研工業

## 受験について

電気電子系の研究分野は、回路分野、波動・光および通信分野、デバイス分野、材料・物性分野、電力・エネルギー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外部テストスコア(TOEIC/TOEFL)により学力を判定します。

博士課程では、国際的にトップランナーとして活躍できる研究者・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月末より配布が開始される予定です。詳細は以下のURLでご確認ください。

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

[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)。A日程の有資格者には願書提出後に通知が届きます。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英語外部テストスコアによる筆答試験(8月中旬)および志望分野や適正などに関する口頭試問を行います。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日程の合否判定では考慮されません。

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) the revised TOEFL Paper-delivered Test (3) TOEFL-PBT (4) TOEIC の4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。詳細については募集要項をご確認ください。

### 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。各研究室が二つのキャンパスに分かれているので、それぞれのキャンパスで説明会を開催します。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のは国際大学院プログラム(C)です。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。電気電子系は、ナノテクノロジーコースに参加しており、両大学の修士課程に同時に所属し、標準2年半で両大学からそれぞれ修士の学位を取得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してください。

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

### 6. 国立陽明交通大学（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陽明交通大学(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。台湾側志望教員と東工大志望教員が共同で研究できることが前提となります。詳しくは下記ホームページをご参照の上、記載された問い合わせ先にお問い合わせください。

<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/>

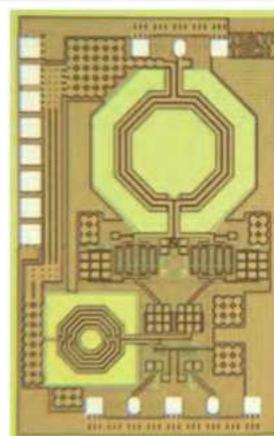
## 修士・博士課程における研究活動

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。

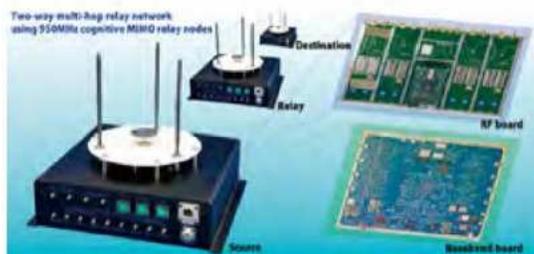
### 回路グループ (p.16~23)

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.24~51)

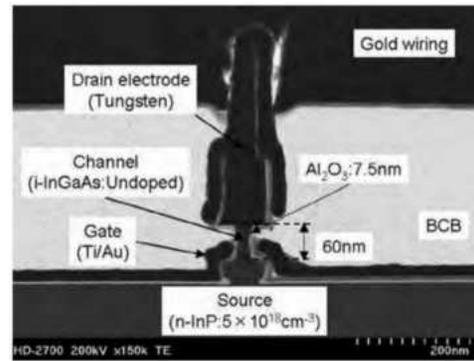
この研究分野に共通するキーワードは「波」であり、奥深い物理の理解から最先端の情報技術までを網羅し、通信は最も身近な応用と位置付けられます。基盤技術としては、光デバイスおよび集積回路、アンテナおよび高周波回路、無線通信工学および信号処理、環境電磁工学などがあります。この分野で活躍しようと思う学生の皆さんは、新材料の開拓や独自設計による



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。

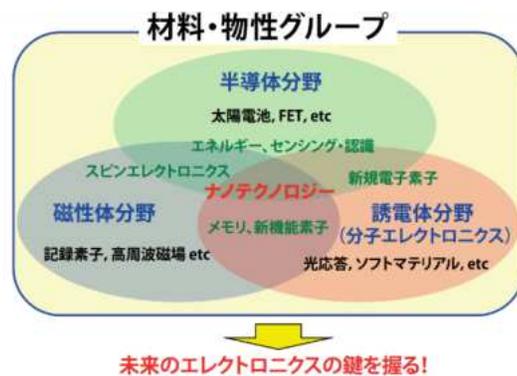
## デバイスグループ (p.52~67)

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。



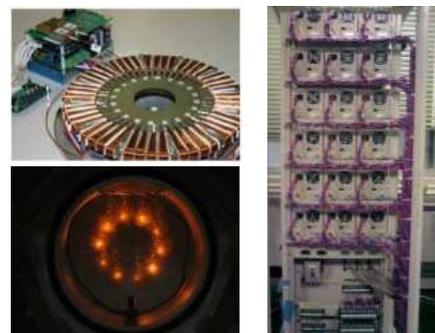
## 材料・物性グループ (p.68~89)

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.90~107)

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。



# RF・アナログ・デジタル混載集積回路設計 岡田研究室 CMOS集積回路による世界最高速のミリ波無線機



回路G  
電気電子コース  
大岡山・S3-812

教授 岡田 健一

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世代移动通信システム(5G)、CMOS集積回路、6G、テラヘルツ無線通信・センシング・イメージング、IoT/バッテリーレス無線機、PLL、原子時計  
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の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

### 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の研究をしています。第5世代移动通信システム(5G)やその先の6Gを見据えて最先端のCMOS技術による半導体チップによりミリ波無線機を作成するための研究を行っています。

実際に、学生が自分で回路を設計し、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が、60GHz帯ミリ波無線機として世界最速の50Gbpsの通信速度を達成し、また、100GHz帯を用いることで世界最速となる120GbpsのCMOS無線機を実現しています(図3)。

ミリ波を使いこなしていく上では、フェーズドアレイによるアクティブアンテナ技術が必須となっています。国内企業との連携により5G向けフェーズドアレイ無線機の研究開発を行っています(図4)。

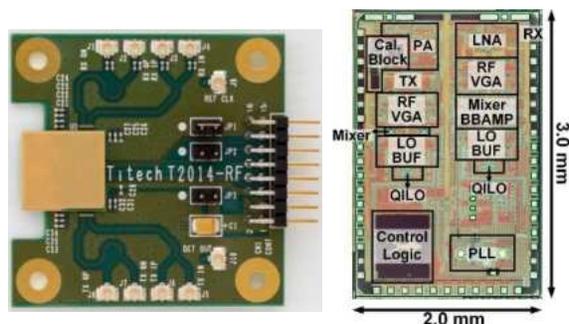


図1. 60GHz帯CMOSミリ波無線機

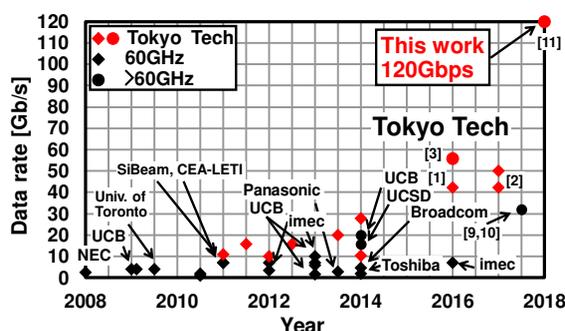


図2. ミリ波無線通信システムの研究競争

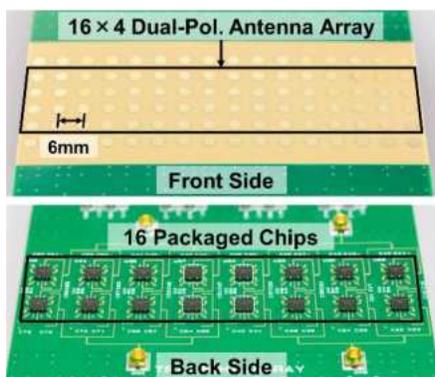


図4. 5G向けミリ波フェーズドアレイ無線機

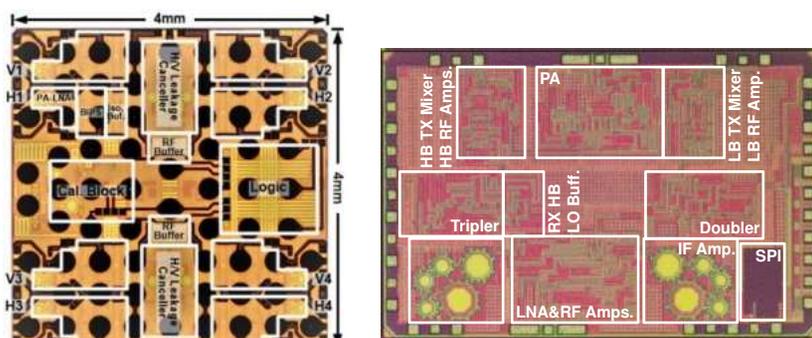


図3. 世界最速を達成したCMOSミリ波無線機

## 大岡山・回路グループ

## 6G向けテラヘルツ無線システム

ミリ波帯(30-300GHz)では非常に広い周波数帯域幅が利用でき、超高速無線通信の実現が可能です。5Gでは主として100GHz以下の周波数帯が用いられていますが、6Gではさらなる高速化が期待できる100GHz以上のテラヘルツ帯の利用が検討されています。本研究室では、CMOS集積回路の動作周波数限界に迫る300GHz帯無線機(図5)をはじめ、世界で初めてCMOS技術によるテラヘルツ帯フェーズドレイ無線機を実現しています(図6)。現在は、さらなる高速化、多素子化、低消費電力化にあわせ、携帯端末に搭載可能とするための超高集積実装技術の研究も行っています。

## 原子時計

量子コンピュータや量子センサ等の量子科学技術への期待が高まっています。本研究室では、セシウム原子の遷移周波数を用いて非常に正確に時を刻む原子時計の研究を行っています。自動車、携帯電話基地局、超小型の衛星等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図7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。小型化かつ低消費電力化が実現できたことで、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。

## 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8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、デジタル位相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おります。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。

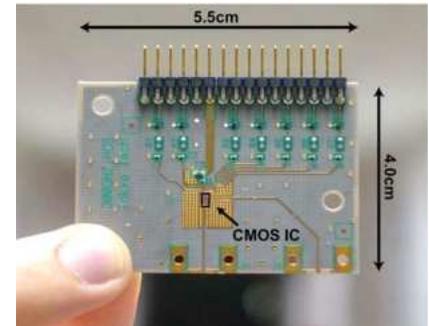


図5. 300GHz帯CMOS無線機

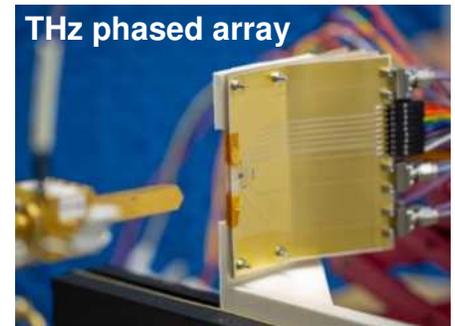


図6. 世界初CMOSテラヘルツ帯フェーズドレイ無線機

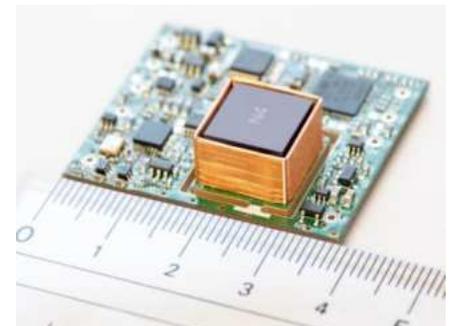


図7. 超低消費電力な小型原子時計

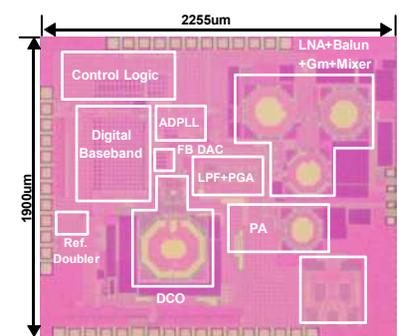


図8. 2.3mW BLE無線回路

## 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？

# 白根研究室 宇宙へ展開する無線通信および無線電力伝送を実現する集積回路の研究



回路G  
電気電子コース  
大岡山・S9-901号室

准教授 白根 篤史

研究分野: 無線通信・無線電力伝送向け集積回路の研究

キーワード: CMOS集積回路、宇宙無線通信、5G/6G、IoT、無線電力伝送、高放射線耐性無線機、機械学習による無線指紋

ホームページ: <https://researchmap.jp/a.shirane>

## 1 主な研究テーマ

本研究室では、「無線通信・無線電力伝送向け集積回路」に関する研究開発を行っています。無線通信のカバレッジを現在よりもさらに拡張し、宇宙まで展開するための無線通信向け集積回路や、カーボンニュートラル時代を切り拓く無線電力伝送を利用した電源を必要としない無線機の実現を目指しています。

子供、孫、さらにその先の世代まで持続的に豊かで安心して生活できる地球環境を守ると同時に、経済、社会の成長を実現していくため、本研究室は、さらなる無線通信の進化、そして地球に優しいグリーンな無線機の研究によって社会に貢献していきます。無線通信のカバレッジを拡張し、宇宙までネットワークを広げることで、あらゆる場所で、あらゆるヒト・モノが、どんなときでもインターネットにつながる可以实现を目指しています。さらに、今後ますます増大していくデータトラフィックに伴い、通信による電力消費量は飛躍的に増大していきます。本研究室は、無線電力伝送技術を活用することで、地球環境に優しい、真にグリーンな無線機および無線通信集積回路の研究に取り組んでいます。

## 2 最近の研究成果

### 超小型衛星搭載に向けた無線機

現在、宇宙における新たな通信ネットワークとして期待される低軌道衛星コンステレーション(図1)の実現に向け、宇宙でも動作可能な無線機および無線通信向け集積回路の研究開発を行っています。このようなネットワークの実現の鍵となるのが、衛星に搭載される無線機の小型・軽量化、高放射線耐性、低消費電力化になります。本研究室では、学内の電気系、機械系の研究者や、国内の研究機関、企業と協力しながら研究を進めています。2022年には、JAXAの革新的衛星技術実証3号機に私たちが作成した無線機を搭載し、560km上空の低軌道に打ち上げる予定です。

宇宙展開膜フェーズドアレイ無線機の研究では、図2に示すように大きく展開する膜面上でフェーズドアレイ無線機を構成し、打上時には小さく畳んでおき、軌道投入後に大面積のアンテナを実現し、高速無線通信を可能にします。本研究では、展開後の膜面の非平面性を許容し、各アンテナ素子の振幅・位相によって非平面アレイを補償することで、飛躍的な小型・軽量化を実現します。これまでに、Ka帯で動作する非平面フェーズドアレイ無線機を作成し、補償技術の有効性を実証し、2022年には宇宙実証を行う予定です。

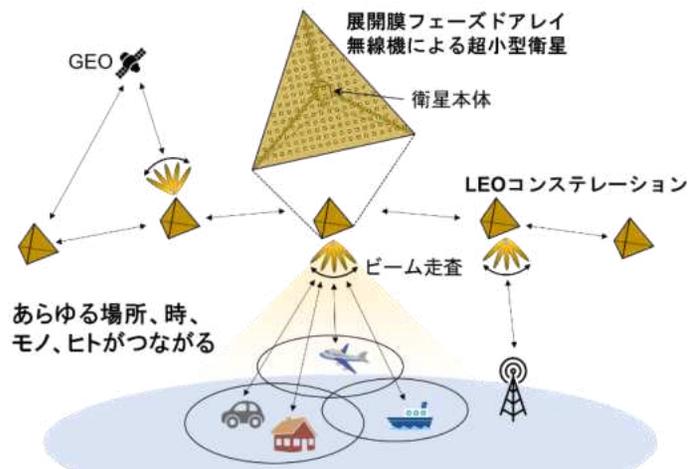


図1. 6G時代の展開型超小型衛星による低軌道コンステレーション構想

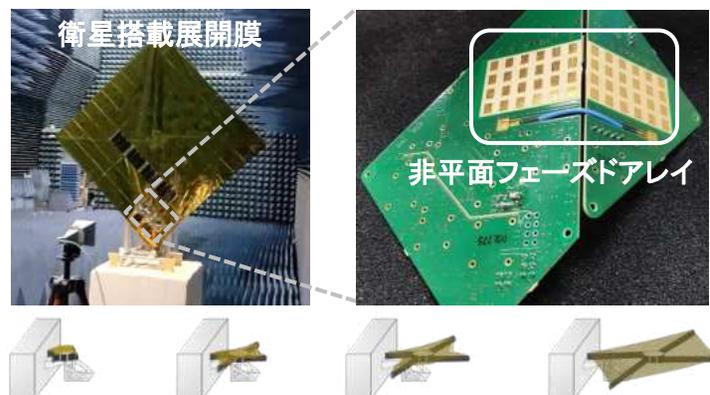


図2. 宇宙展開型非平面フェーズドアレイ無線機(2022年打上予定)

# 大岡山・回路グループ

高放射線耐性無線ICの研究では、宇宙の過酷な環境下においても長期間動作可能な無線機の実現を目指しています。宇宙環境における放射線は無線ICを徐々に劣化させ、無線機の機能に問題を引き起こします。本研究室が作成した無線IC(図3)は、これまでの数十倍以上の放射線耐性を実現し、無線機の軌道寿命を大幅に延ばすことに成功しました。また、超小型衛星の限られた電力リソースでも動作可能とするために、市販の無線ICの十分の一以下の消費電力を実現しています。このような無線ICの高放射線耐性および低消費電力といったコア技術の研究開発を通して、これからの宇宙に展開する無線通信の進化を開拓していきます。

## 電源不要の5G無線通信回路

宇宙だけでなく、地上においても無線通信の速度、エリアカバレッジの進化を進めるとともに、地球環境に優しい無線機、無線システムの研究に取り組んでいます。もとより宇宙における衛星搭載無線機は、太陽光によって動作するため、地上で温室効果ガスを排出しない地球に優しい通信インフラです。一方で、地上の通信インフラは、カーボンニュートラルに向け多くの課題が存在し、さらなる無線機の低消費電力化や、再生可能エネルギーの利用が強く求められています。私たちの研究では、無線電力伝送をキー技術として、超低消費電力無線機、さらに、無線電力伝送による再生可能エネルギーの有効利用を実現していきます。

これまでに本研究室は、電源不要で動作可能なミリ波帯5G中継無線機の開発に成功しています。本無線機(図4)は、無線電力伝送を利用することで電源を不要とし、28GHz帯の電波を中継、ビームフォーミングすることでこれまで電波が届かなかったエリアにおいてもミリ波帯5Gの通信を可能とします。従来、ビームフォーミングを実現するミリ波帯5Gフェーズドアレイは、アンテナ1素子につき数百ミリワットの電力を消費するため、無線電力伝送によって生成される電力では動作が困難でした。本研究では、新たに考案したベクトル加算型バックスキッタリング技術を用いることで、3桁以上小さい素子あたり30マイクロワットの消費電力でビームフォーミングを実現することに成功しました。作成した無線機(図5)は、安価で量産が可能なシリコンCMOSプロセスによるICによって実現し、24GHz帯における無線電力伝送および28GHz帯の5G準拠の無線通信に成功しています。

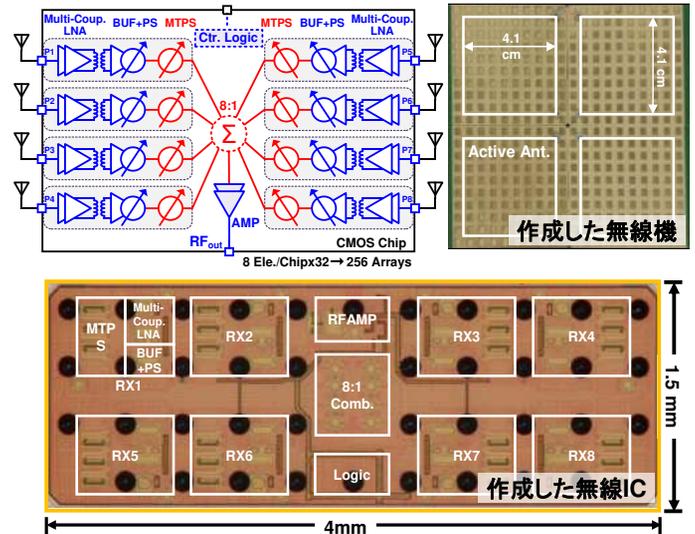


図3. 高放射線耐性かつ超低消費電力な超小型衛星向けKa帯無線ICおよびフェーズドアレイ無線機

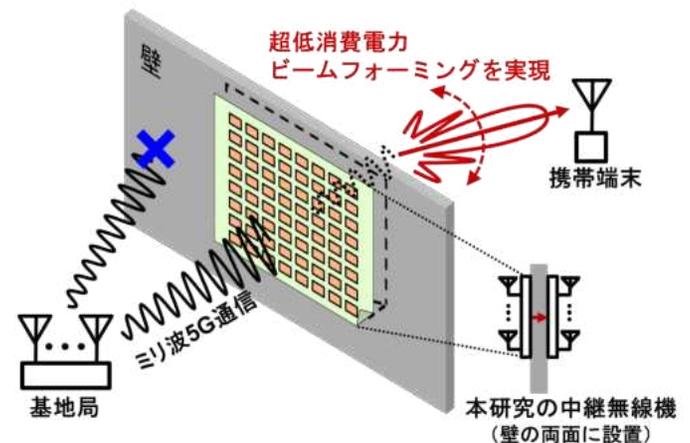


図4. 電源不要の無線電力伝送型ミリ波5G無線中継機

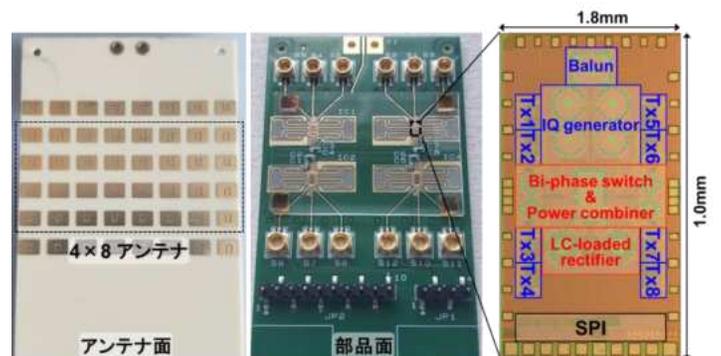


図5. 作成した無線電力伝送型5G無線機と送受信無線IC

## 3 教員からのメッセージ

本研究室は、2022年に発足した新しい研究室です。宇宙に自作の回路を打ち上げたい、電源線の無い世界を作りたい、うるさい先輩のいないところで研究したい、といったチャレンジ精神旺盛な学生は、是非一緒に研究しましょう！また、一緒に宇宙への無線通信の展開、無線電力伝送の社会実装に取り組んでいただける研究機関や民間企業とのコラボレーションも積極的に進めております。

# 徳田研究室 集積回路/材料/構造のシナジーによる バイオ・IoT向けマイクロデバイス技術



**回路G**  
 ライフエンジニアリングコース・電気電子コース  
 大岡山・S9-801

**教授 徳田 崇**

研究分野: 集積回路ベースマイクロデバイス・システム  
 キーワード: CMOS センサ、イメージセンサ、光半導体、バイオメディカルデバイス、IoTデバイス、ワイヤレス電力伝送・通信  
 ホームページ: <http://www.tokuda-lab.ee.e.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

集積回路技術は、なじみのある情報通信技術だけでなく、生体センシングや生体インターフェース向けのプラットフォームとしても期待されています。徳田研究室では、CMOS集積回路技術に、独自のデバイス構造、材料技術を組み合わせることで新しいデバイス・システムを創出します。生体埋め込みを含むバイオメディカル分野、電気製品ではない”あらゆるモノ”を情報化するIoTなど、これまではエレクトロニクスデバイスが利用されていなかった分野を開拓します。

- 研究テーマ例:
- ・CMOS集積化光給電・エネルギーハーベスティング技術
  - ・埋め込み型神経インターフェースデバイス
  - ・超小型バッテリーレスIoT/IoE向けマイクロノード
  - ・生体埋め込みグルコースセンサ
  - ・オンチップ光・電気バイオイメージセンサ

## 2 最近の研究成果

### CMOS集積化光給電・ワイヤレスデバイス技術

現在、多くのワイヤレス給電技術では電磁波(RF)を用いたエネルギー伝送が利用されていますが、1mmより小さい超小型デバイスを遠隔駆動するには、光電力伝送が優れます。図1は、集積化光給電技術によって実現した、超小型の生体(マウスの脳など)光刺激デバイスです。生体に埋め込んで、外部から赤外光を受けてそのエネルギーを蓄積し、青色の光パルスを発します。1.25mm角のCMOS集積回路チップに、超小型の光起電力(太陽電池)セル17個と制御回路を集積化しています。外部から光照射で発電しますが、高い電圧と大きな電流を必要とするLEDを駆動できる電力は得られませんので、集積化したキャパシタをいったん充電します。充電状態を集積回路が判定し、条件が整えば光パルスを発します。回路の製造には汎用のCMOS製造プロセスを用いますが、さらに研究室でのポストプロセスを行うことで、LEDの駆動に適した回路構成を実現しています。本デバイスは、生体埋め込み光刺激デバイスとして世界最小・最軽量です。研究室では、図1のデバイスのようなシンプルなだけでなく、多様な生体埋め込みセンサデバイスの駆動技術としての展開を進めています。さらに本研究室ではこの光電力伝送技術をさらに改良し、環境光での動作を実現します。環境光で駆動できれば、バッテリーレス・超小型でも短い時間なら高出力が得られるため、IoT・IoEへの展開が期待されます。図2はその基礎実証例として開発した、バッテリーレス光ビーコン送出デバイスです。

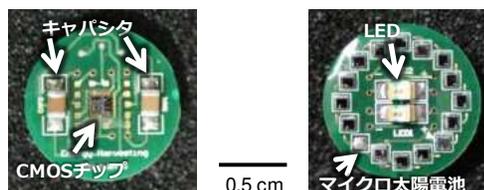
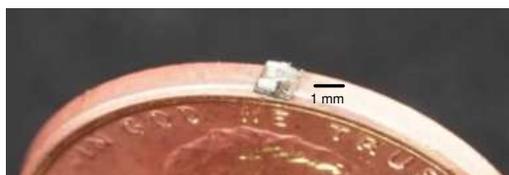
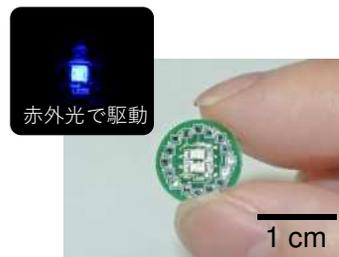
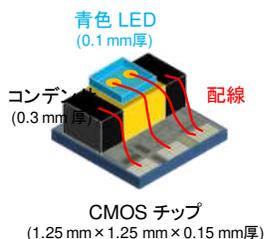


図1. 超小型生体埋め込み光刺激デバイス  
 ・光を受けてLEDを駆動するCMOSチップをコアとして実現  
 ・世界最小サイズ・重量(1mm<sup>3</sup>, 2.3mg)

図2. バッテリーレス光ビーコン送出デバイス  
 ・光から電力を得て高出力の光ビーコンを送信  
 ・得られる電力に適応的に動作速度が変化

## 大岡山・回路グループ

## 新機能CMOSイメージセンサ

集積回路をセンサとして利用する代表的な例がイメージセンサです。通常のイメージセンサでは、レンズを使って外界の光学像をセンサ上に結像させて光のパターンを計測します。本研究室ではイメージセンサの回路・構造に独自の工夫を施して新しい機能を備えたイメージセンサを実現しています。

図3は、CMOSイメージセンサ画素にオンチップ電気計測機能を集積化したセンサです。普通のカメラとしてではなく、このセンサ表面と計測対象(培養細胞や、生体組織)を接触させて、光だけでなく電気的なイメージングを行うことができます。独自の画素回路・構造と読み出し回路を組み合わせています。表面をむき出しにするパッケージングを施し、表面に投射された光のパターンだけでなく、表面に置いた物体(細胞など)の電位や寄生容量を計測することができます。また設計によっては、チップの画素から外部に電流を流すことも可能です。これを用いることでオンチップでの電気化学計測や、別のチップの集積化(図5のデバイス)も可能となります。

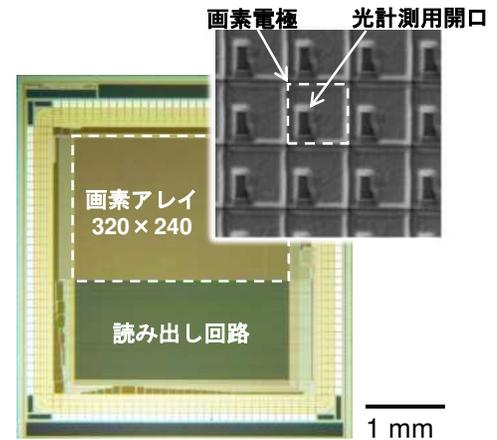


図3. オンチップ光・電位イメージセンサ  
 ・CMOSイメージセンサ画素に電位計測機能を搭載  
 ・細胞・生体イメージング等への応用が可能

## 生体埋め込みデバイス

CMOS集積回路デバイス・センサを生体内で用いる研究に取り組んでいます。どうしても生体の中でしか測定できない情報や、どうしても生体内からしか行えない刺激、最小限の侵襲で計測できるデバイスを実現しようとしています。

図4は、超小型のCMOSイメージセンサと励起光源、グルコース計測用の蛍光物質を集積化した生体埋め込みグルコースセンサです。皮下に埋め込んで、体液(細胞間質液)のグルコース濃度を計測することで、血糖値の推定を行います。社会的な期待が大きい、完全埋め込み型血糖モニタリングに向けての原理実証を行ったものです。図1のワイヤレス光電力伝送技術を組み合わせることで、グルコースだけでなく、多様な計測機能を備えた超小型生体埋め込みセンサの実現を目指しています。

図5は、図1のデバイスと同じように生体内での神経光刺激を目的としたデバイスです。いずれもマウスの脳における光遺伝学(バイオ分野の技術)を用いた脳科学研究への応用を想定しています。このうち図5のデバイスでは、少し広い脳の範囲の中で、0.2mm程度の分解能で光刺激を行うことができます。このデバイスは、図3に示した光・電位イメージセンサの派生型と、InGaN LEDアレイウエハを集積化して実現したものです。

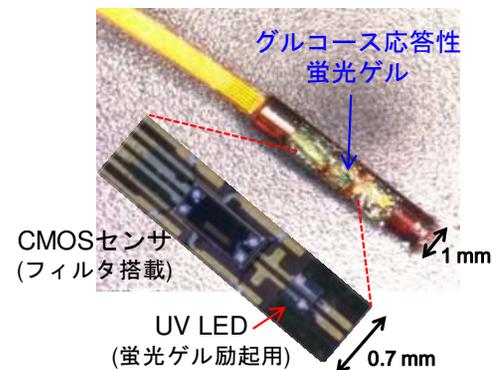


図4. 生体埋め込みグルコースセンサ  
 ・生体埋め込みイメージセンサ+グルコース応答性蛍光ハイドロゲルにより、超小型グルコースセンサを実現  
 ・光駆動技術の組み合わせにより完全ワイヤレス化を目指す

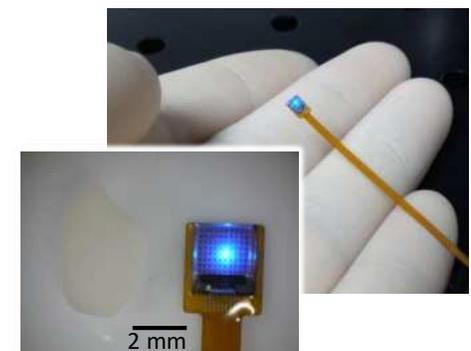


図5. 光遺伝学向け神経光刺激デバイス  
 ・バイオ分野における光遺伝学実験に利用  
 ・マウス等の脳表において高分解能で光刺激

## 3 教員からのメッセージ

成熟したと思われるがちなエレクトロニクス技術ですが、大きなフロンティアがたくさんあります。その一つがバイオメディカル分野であり、バッテリーレス超小型デバイスです。2019年発足、2020年学生受け入れ開始の新しい本研究室で、一緒に知恵を絞り、手を動かして新しいテクノロジーを生み出していきましょう。

# 伊藤(浩)研究室 集積回路技術, 集積化CMOS-MEMS技術 センサ技術, Intelligence of Things



回路グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・J2棟706号室  
准教授 伊藤 浩之

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 Intelligence 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://www.ateal.first.iir.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

集積回路技術と集積化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、Intelligence 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、動物の状態や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。

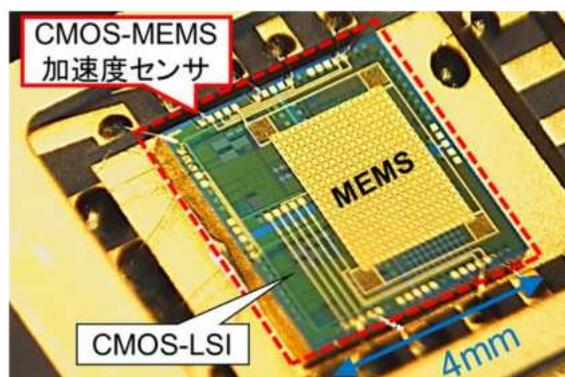
※本研究室は、科学技術創成研究院 ナノセンシング研究ユニットとして、町田克之特任教授、道正志郎特任教授らと研究・教育を進めています。

## 2 最近の研究成果

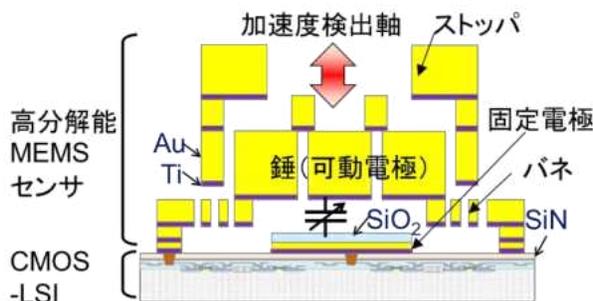
### ■ 超高感度慣性センサ

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(ブラウンアンノイズ)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<sup>2</sup>



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用途のアナログ/RF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サブマイクロワットで動作するセンサ回路を開発しています。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、集積回路内に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。

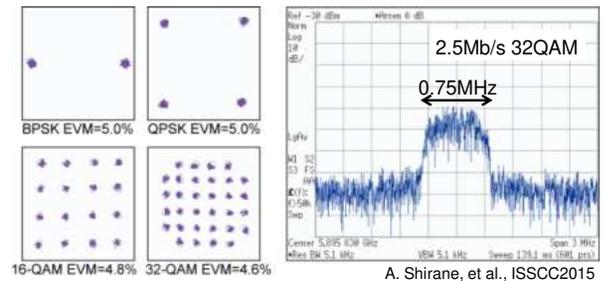
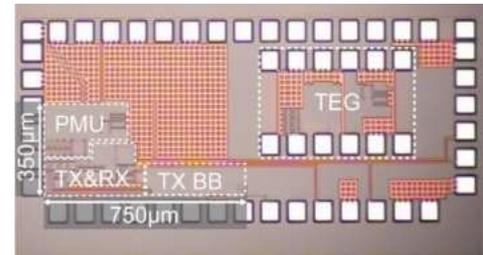


図2. 直交ボックスキャタリング回路技術

## 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、牛などの動物の状態や気持ちをIoTやAIを駆使して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。

我々が目指しているモニタリングシステム(図4)は、世界的な人口増加や、都市化率増加, 先進国の高齢化などにより多くの問題に直面している「畜産」の持続性に貢献するために、多くのコスト・労力が必要な家畜の監視を省力化・効率化し、かつ発情や各種リスクを早期検知・予知することによって生産性を高めながらアニマルウェルフェアや生産環境を改善することを目指しています。

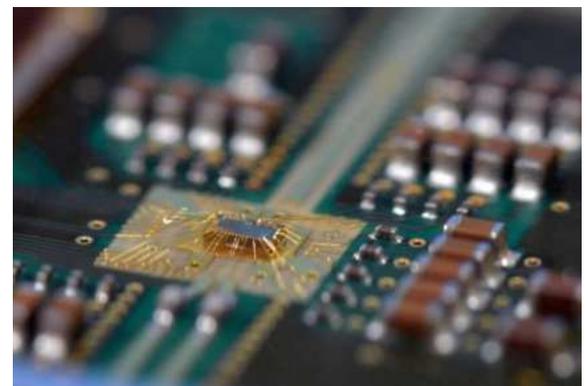


図3. 圧電共振器を用いたシンセサイザ回路

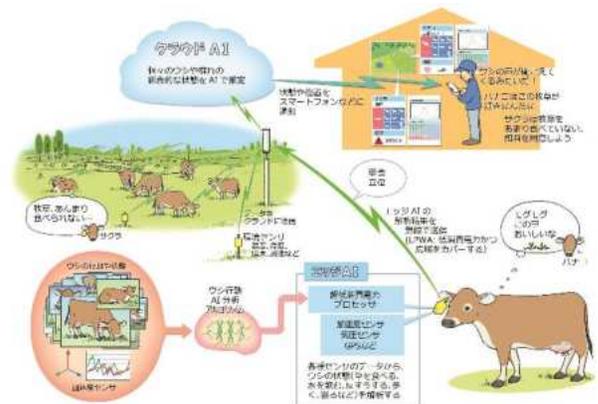


図4. 牛リアルタイムモニタリングシステム

## 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、言葉で表現しきれません。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, Electromagnetic Compatibility)



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),

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)

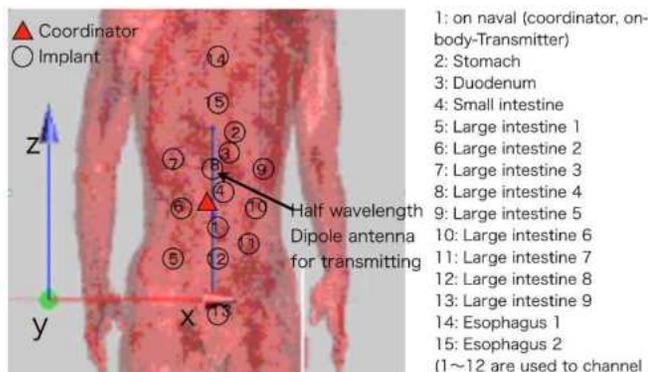
学問分野(環境電磁工学、電磁波工学、情報通信工学)の進化、発展をはかり医療、ヘルスケア、スポーツ、エンターテイメント、教育学習等の各分野における応用技術を研究するとともに、電磁環境の調和をはかっていきます。

2 最近の研究内容

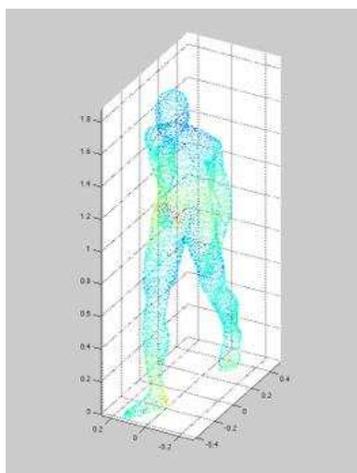
■ ボディエリアネットワーク

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と生活習慣病の予防、医療への応用、さらにはスポーツやエンターテイン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モデリング、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

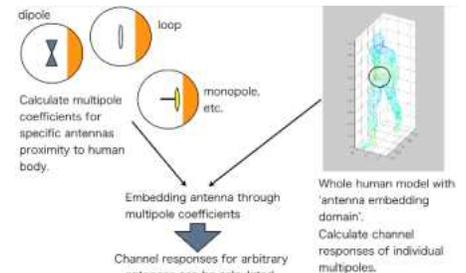
## ■ 環境電磁工学

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。

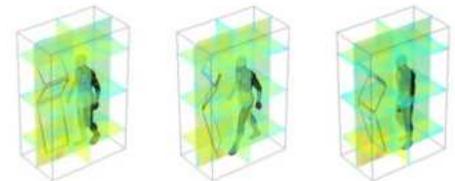
本研究室では主に電磁ノイズの吸収、遮蔽とリバーブレーションチャンバー等の測定場・測定法に関する研究を行っています。

## ■ 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

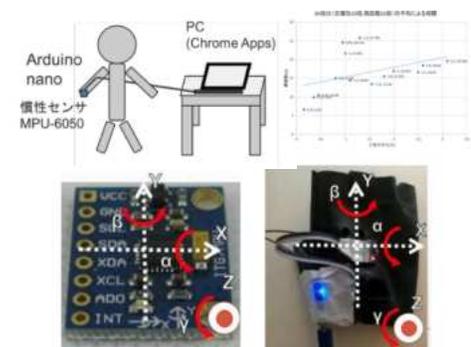
各種の生体情報(心拍、体温、血圧など)や生体の動作の情報(加速度、角速度など)を取得して分析し、ヘルスケアやスポーツ学習へ応用するための研究を行っています。たとえばセンサーから取得した情報を活用し、動作分析を行うことで健康増進のための動作学習システムへの応用などが可能です。本研究室は基本的なセンサーの開発から無線ボディアエリアネットワークを利用したデータ収集、さらに収集したデータの分析と効果的な利用を行うシステムの開発まで行っています。



- 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



- リバーブレーションチャンバー(共鳴箱)内部の電磁界分布と解析・設計法に関する研究



- 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

- 令和2年度は、修士課程8名、学部生2名が在籍していました。
- 令和3年度は、博士課程1名、修士課程8名、学部生若干名が在籍予定です。
- 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。
- 分野によらず基礎となる理論を元に意欲的に研究をすすめたい皆さんをお待ちしています。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。

# 雨宮研究室

# 分野横断型フォトニクス技術の開拓



波動グループ  
電気電子コース  
大岡山

准教授 雨宮 智宏

研究分野: フォトニクス全般  
キーワード: 光インフォマティクス、半導体光技術、光メタマテリアル、トポロジカルフォトニクス、フェムト秒レーザー光造形、光リソグラフィ  
ホームページ: 近日公開

## 1 研究概要

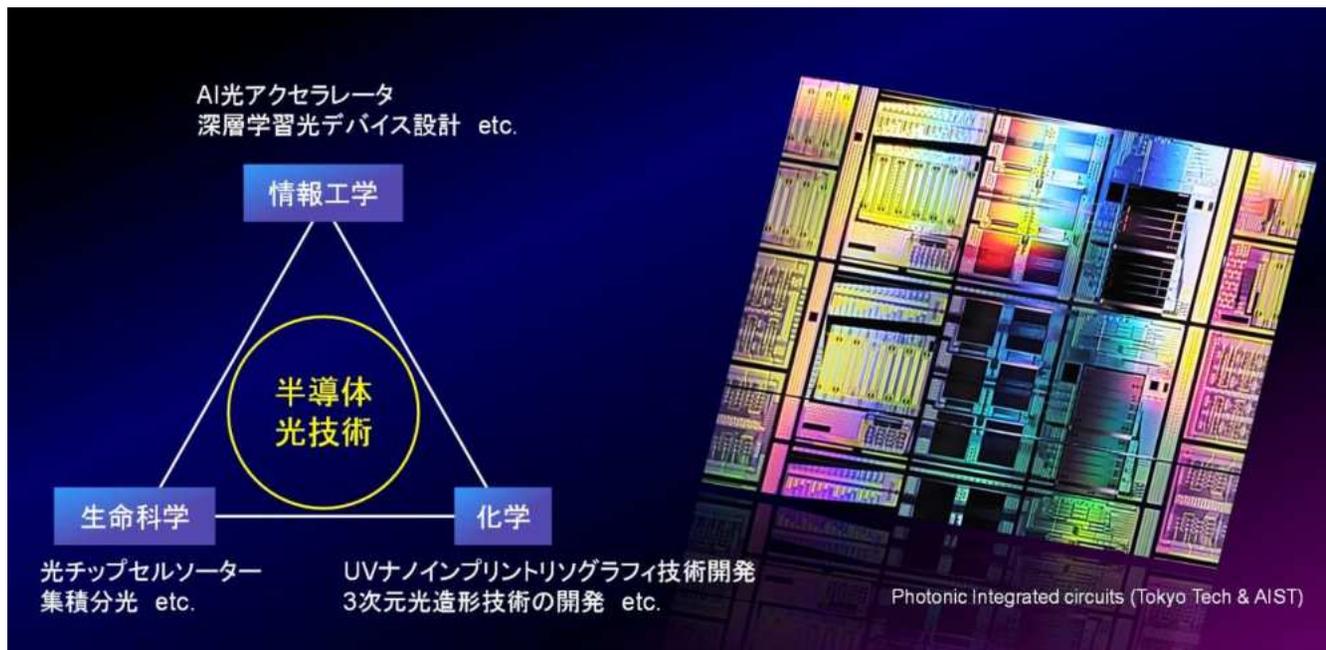
当研究室では、半導体光技術をベースとして、情報工学、応用化学、生命科学と連携した分野横断研究を推進します（下図参照）。学生の皆様には、自身でデザインした光デバイスを一から作り上げ、世界に大きなインパクトを与えるとともに、将来的な業界のリーダーに育てて欲しいと考えています。

半導体光技術の分野は、社会基盤の一つである高速・大容量の光通信システムの発展を支えていることから、世界中の研究者が集まる非常に活発な領域であり、相応の高度な結果が要求される傾向にあります。このような背景と併せて、研究成果がダイレクトに製品へ繋がり易いことから、研究成果の報告も各国の企業や大学コンソーシアム等の比較的規模の大きな研究機関が中心です。

このような機関と素子性能を直接競っていくことは現実的には難しいことから、大学の特徴を活かすことで、新しいコンセプトに基づいた次世代の光デバイス（そして、性能面・コスト面などから企業で研究対象とするには難しいデバイス）を中心に据えております。新しい原理、新しい構造、新しいプロセス技術を最大限に活用することで、今まで誰も考えたことのないデバイスを考案し、その可能性と実用性を追求するような、大学でなければできない研究を推進したいと考えております。

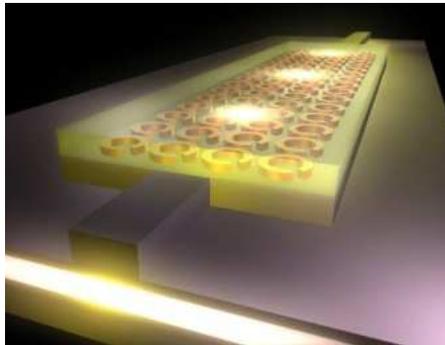


半導体光技術としては、国内でも有数の設備および知見を有します

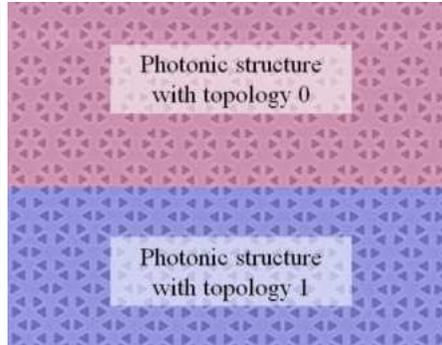


# 大岡山・波動通信グループ

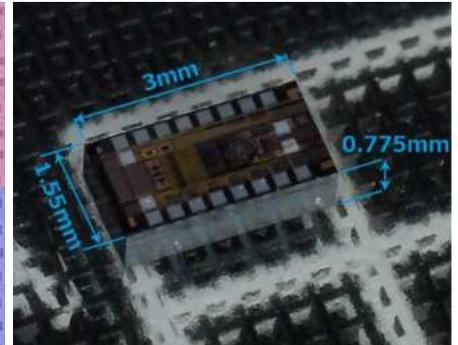
## 2 主な研究テーマ



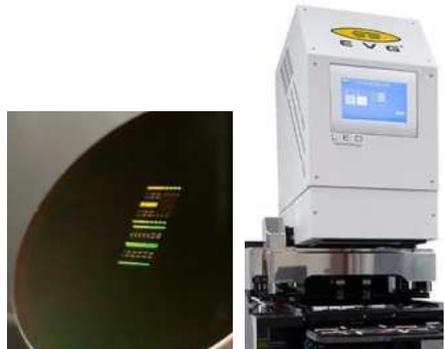
**メタマテリアルフォトンクス**  
メタマテリアルを用いることで、各種光デバイスを革新します



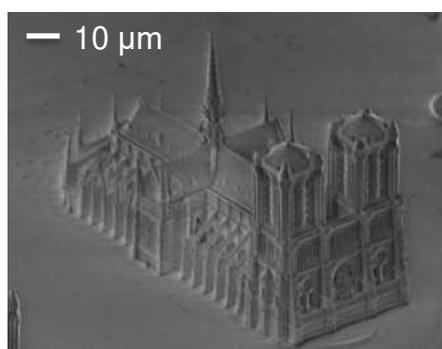
**トポロジカルフォトンクス**  
光分野に純粋数学を融合することで、従来の概念を超えた光物理学を探求します



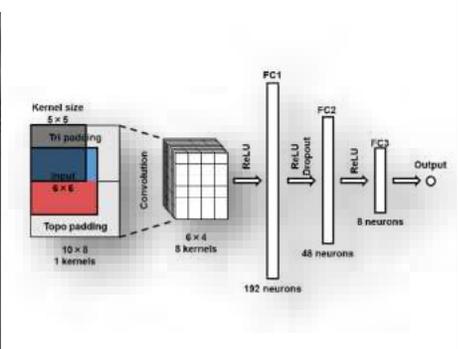
**ポルテックスフォトンクス**  
光渦を用いることで、光通信の大容量化や光分析技術の向上を目指します



**大口径光集積プロセス開発**  
UVナノインプリントリソグラフィによる大口径光集積プロセス技術を開発します



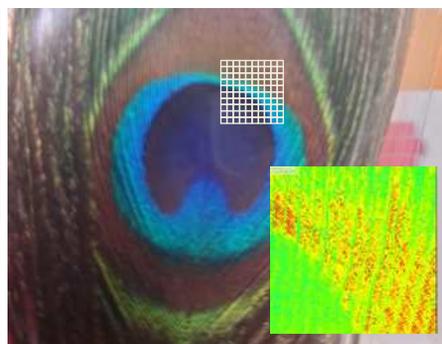
**3次元光造形技術の開発**  
フェムト秒レーザーによる光デバイス用3次元加工技術を開発します



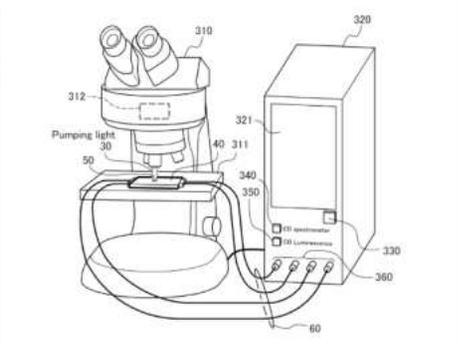
**光インフォーマティクス技術開発**  
AIを活用した光デバイスの設計技術や光アクセラレータを開発します



**光分析機器の開発・実用化**  
高速・高精細にフォトニックバンドを計測する技術を開発・実用化します



**画像処理機器の開発・実用化**  
対象の構造由来の情報を可視化することで、新たな画像技術を創出します



**集積分光機器の開発・実用化**  
チップ型集積分光デバイスの開発と装置化を行います

## 3 教員からのメッセージ

2023年度より新しく立ち上がる研究室です。当研究室では、半導体光技術を活かして、情報工学、応用化学、生命科学と連携した分野横断研究を推進します。基礎研究から実用開発に至るまで、自らデザインした光デバイスを一から作ることで、世界に大きなインパクトを与えることを目指します。研究室の立ち上げから関わってみたいという熱いところざしを持つ学生の皆様、最高の環境で多くのことを学びながら、大学時代の数年間を過ごしてみませんか？



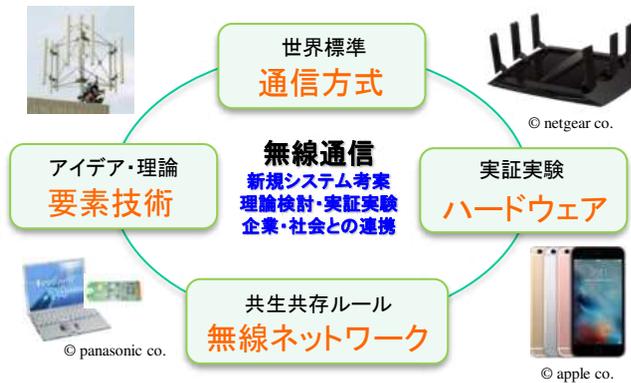
波動・光および通信グループ  
 電気電子コース  
 大岡山 南3号館 9階・10階

教授 阪口 啓 准教授 タン ザカン 助教 LI ZONGDIAN

研究分野: 無線通信工学  
 キーワード: B5G、無線センサネットワーク、自動運転、無線電力伝送  
 ホームページ: <https://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。



Beyond 5Gセルラネットワーク(B5G)

- ・ミリ波ヘテロジニアスネットワーク
- ・B5Gによるスーパースマートタウンの実証

ミリ波5Gの応用

- ・ミリ波ドローン基地局による動的ネットワーク
- ・スマートモビリティ教育研究フィールド

IoT無線センサネットワーク

- ・遠距離大容量ドローン映像伝送システム
- ・ワイヤレス給電で駆動するバッテリーレスセンサ

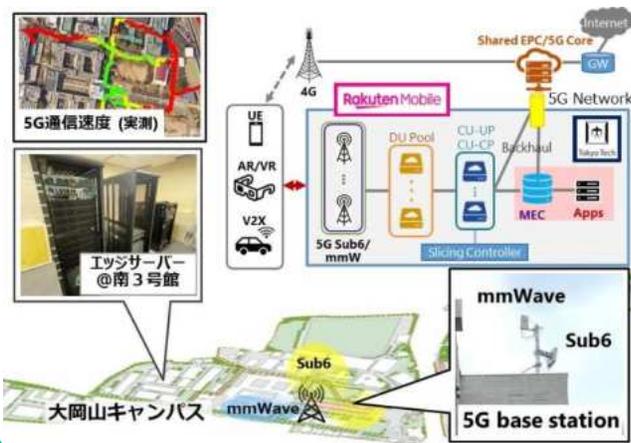
2 最近の研究成果

Beyond 5Gセルラネットワーク(B5G)の研究

B5Gによるスーパースマートタウンの実証

- ・モバイルオペレータとの協働により、B5G(Sub6、ミリ波)の実証フィールドを構築中
- ・仮想化ネットワークとエッジコンピューティングの連携により、リアルタイムアプリケーションを実現
- ・ARグラスを用いたナビゲーションシステム等、B5Gのポテンシャルを最大限引き出すための実証実験を推進

大岡山B5G/6G実証フィールド



大岡山ミリ波リピーターの導入



ミリ波中継システムの設計・実証

- ・複数リピーターを活用したMassive Relay MIMOシステムを構築中
- ・ユーザーと建物の位置情報などを用いたユーザースケジューリングにより通信容量を増加
- ・大岡山キャンパスにおいてミリ波リピーターの実機を活用したエリア展開を実証
- ・実測とシミュレーション結果を活用した置局提案手法を構築中

# 大岡山・波動通信グループ

## 次世代高度道路交通システム(ITS)に関する研究

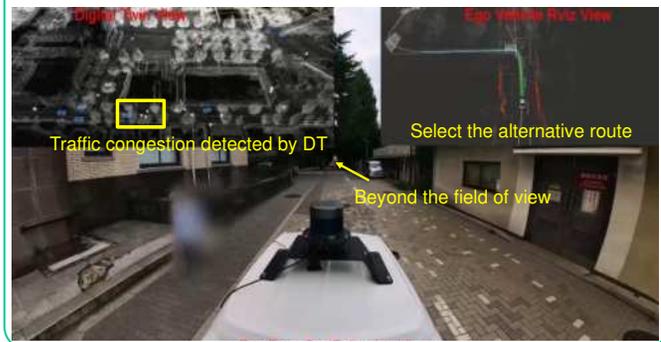
### スマートモビリティ教育研究フィールド

- ミリ波 V2X 通信による協調認知：カメラ映像とLiDAR点群データの共有
- 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
- RSUカメラシステムとエッジコンピューティングによる効率的な車両認識
- V2Xを活用した次世代交通基盤

### ミリ波通信システムとセンサネットワーク



### デジタルツインを活用した協調自動運転システム



### デジタルツインを用いたITSアプリケーション

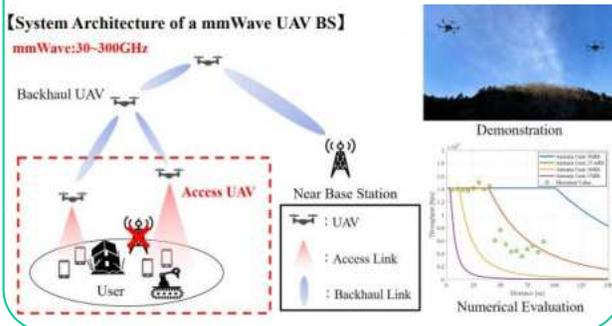
- 動的な交通環境をセンシングしリアルタイムにサイバー空間上にデジタルツインを構築
- 自動運転の安全性と移動効率を向上させるためにデジタルツインデータを使用して交通状況を予測
- 次世代ITSを実現するデジタルツインに基づく「カーシェアリング」や「スマート交差点衝突回避」など様々なアプリケーションを開発

## 非地上系無線通信ネットワークに関する研究

### UAVミリ波メッシュネットワークの構築

- ミリ波搭載飛行型メッシュ基地局ネットワーク提唱
- 屋外環境での実証実験を行い、有効性の検証
- 実験結果を解析し、位置誤差などを考慮したUAVミリ波通信の電波伝搬特性の考察
- 更に電力反射板(IRS)を活用し、見通し内環境の確保で、ユーザへの受信電力特性向上の実現

### システムアーキテクチャと実証実験・数値解析



### HAPSを用いた位置推定シミュレータ



### 高高度センサを用いた波発推定システム

- UAV/HAPS/LEO等の高高度プラットフォームをセンサとして活用し、波源分布の推定の試み
- UAVセンサの軌道最適化により、見通外環境においても改善した位置推定精度の実現
- HAPSセンサでは高高度からの位置推定を行うことで都市部等の建物密集地帯でも広範囲に及ぶ位置推定の実現

## 3 教員からのメッセージ

本研究室は、これまで第5世代セルラネットワークの国際標準化に取り組みその実用化に貢献してきました。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されます。また本学にはミリ波/Sub6を含むプライベート5Gネットワーク、760MHz/60GHzを含むスマートモビリティ教育研究フィールドが展開されており、実際に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

次世代通信に向けた光集積回路と  
磁性体を用いた新機能光デバイス

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、光演算

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

## 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、磁性体を用いた光アイソレータや不揮発光スイッチなどの新機能光デバイスの研究、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や光演算回路・光ニューラルネットワークに関する研究を推進しています。

## 2 最近の研究成果

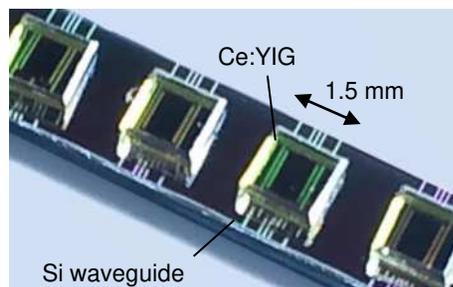
高機能な通信システム・光信号伝送システムを構築するために、光回路の高機能化が求められています。高機能な光回路の形成には、光源である半導体レーザー、光波制御用の光変調器、光スイッチ、合分波器など、多種多様な光デバイスが必要であり、多くの光回路デバイスを一体集積化した光集積回路の開発が重要な鍵を握っています。

## ■ 集積型光アイソレータ

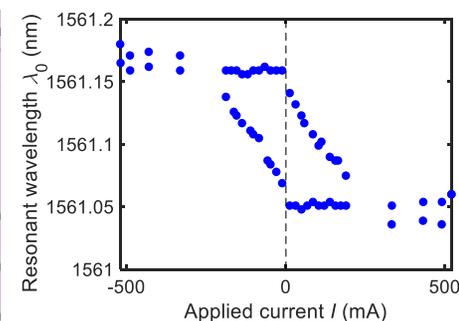
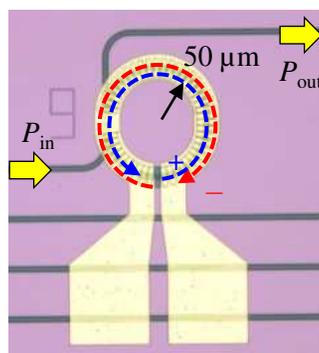
光アイソレータは、半導体レーザーや光増幅器などの光能動デバイスへの反射戻り光の再入射を防止し、能動デバイスの安定動作に必要な不可欠な光デバイスです。集積化を達成するために、光アイソレータの形成に必要な不可欠な磁性ガーネットを半導体導波路に直接接合する技術(表面活性化直接接合)を開発しています。光回路の小型化やSi-LSIの光配線で注目されているシリコンフォトニクス用の光アイソレータの開発も進め、シリコン光回路としては世界初の光アイソレータの動作実証に成功しています[1]。その消光比や動作帯域では世界最高水準を達成し、当分野をリードする研究を行っています[2,3]。また、これを基に、シリコン光集積回路の開拓も進めています。

## ■ 不揮発光スイッチ

磁気不揮発性を利用してスイッチ状態を無電力で保持する不揮発光スイッチを提案し、その開発を進めています[4-6]。光ネットワークの大容量化、低消費電力化に貢献する要素デバイスとして期待されます。また、近年研究が盛んな光ニューラルネットワークへの応用も視野に入れています。膨大な数を必要とする重みづけ素子を不揮発化することで、光信号による高速かつ低消費電力な積和演算回路を実現する光アクセラレータに利用することが期待されます。



シリコン導波路光アイソレータ



不揮発光スイッチ(左)と動作特性(右)

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

[2] Y. Shoji, T. Mizumoto, STAM, 15, 014602 (2014).

[3] S. Liu et al., Optica, 10, 373 (2023).

[4] Y. Shoji, T. Mizumoto, Opt. Mater. Exp., 8, 2387 (2018).

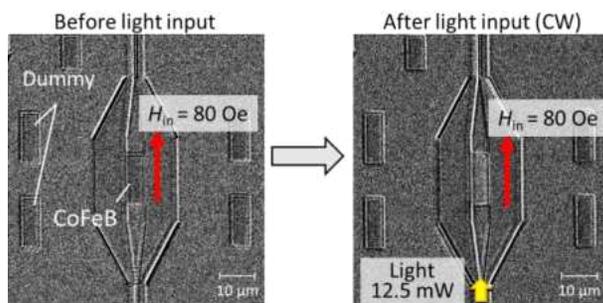
[5] K. Okazeri et al., PTL, 30, 371 (2018).

[6] T. Murai et al., Opt. Exp., 28, 31675 (2020).

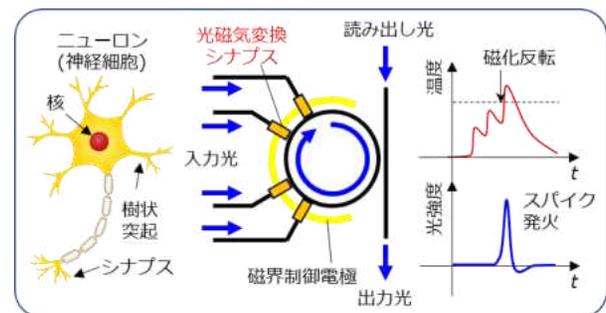
## 大岡山・波動通信グループ

## ■ 光メモリと光ニューロン

光ニューラルネットワークにおいて深層学習と呼ばれるような多層なネットワーク構造を実現するためには非線形な光応答を示す活性化素子が必要です。『光メモリ』は光による書き込みと読み出しを行う素子であり、我々は磁性体の光磁気変換を用いた導波路型光メモリを研究しています[7]。左下の図は光導波路中の伝搬光によって磁性体の磁化反転を起こすことに成功したものです。この光磁気変換を利用してシナプスのような情報伝達を行う光ニューロンを提案し、その研究に取り組んでいます。この方式を用いると、時系列にやってくる光パルス列の重なりによってスパイク状の光応答を出力するスパイクングニューラルネットワークにも応用が期待できます。そのほか、光熱変換を用いた差動光演算回路など、さまざまな計算モデルに対応した光演算回路の研究を行っています。



導波路型光メモリの書き込み動作

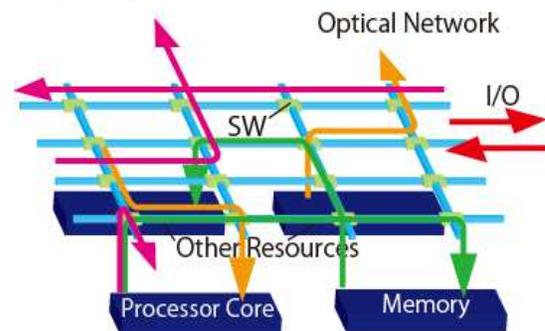


光磁気変換を用いた光ニューロン

## ■ オンチップ光配線デバイス

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ので、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[8]。



オンチップ光ネットワークの概念図

[7] T. Murai et al., Opt. Express, 30, 180054 (2022).

[8] 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、チップ内の演算回路も光化する光コンピューティング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。基本的には光デバイスという「ものづくり」の研究スタイルです。「設計」「試作」「測定」の一連の実験サイクルを学内の設備で実施でき、思いついたことをすぐにトライできることが本研究室の特徴です。自由な発想とチャレンジ精神を尊重します。実験が好きな人、自主的・意欲的に研究に取り組める人を歓迎します。

## 中川茂研究室

## 未来のコンピューターを実現するフォトニクス



波動通信G  
電気電子コース  
大岡山・南9号館 905/906号室

教授 中川 茂 助教 林 文博

研究分野: フォトニックデバイス、集積フォトニクス  
キーワード: フォトニック量子コンピューター, イオントラップ型量子コンピューター, フォトニック・リザーバコンピューティング, 垂直微小共振器量子ドット単一フォトン源, フォトニック・アクティブ共振器  
ホームページ: <http://photonics.ee.e.titech.ac.jp/>

## 1 研究概要

1世紀以上にわたって進化してきたコンピューターは、今後ますます多様な分野でデータを分析するために活用され、社会が直面する困難な課題を解決するために人間の頭脳の機能を拡張します。コンピューターを実現する技術は進化を続け、特に20世紀後半からはCMOSの微細化と共に性能が向上しました。CMOSのスケールアップが物理的な限界に近づき、CMOSコンピューターの性能向上が減速しつつある2010年頃から、あらたにスケールアップする次世代コンピューターの研究も盛んに進んでいます。実用化に向けて研究が加速しているのが量子コンピューターとAIハードウェアです。

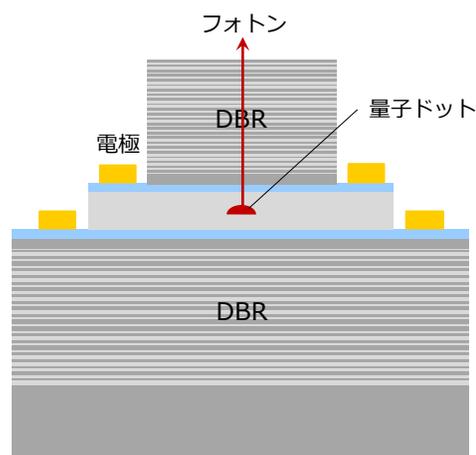
2000年以降、フォトニクスによるデータ伝送がコンピューターのスケールアップを実現しています。次世代のコンピューターでは、フォトニクスはデータ処理を実行することで新たな可能性を拓きます。次世代のコンピューターは、CMOSコンピューターと同様、スケールアップを続けることができるかが鍵です。当研究室では、スケールアップする次世代のコンピューターを実現するフォトニクスを研究しています。具体的には、フォトニック量子コンピューターを実現する垂直微小共振器量子ドット単一フォトン源、イオントラップ型量子コンピューターへ向けたフォトニックナノデバイス、およびAIハードウェアとしてフォトニック・リザーバコンピューティングを実現するフォトニック・アクティブ共振器です。

## 2 主な研究テーマ

### ■ フォトニック量子コンピューターを実現する垂直微小共振器量子ドット単一フォトン源

シリコンフォトニクスに基づく量子プロセッサを活用するフォトニック量子コンピューターは、室温で動作し、半導体微細加工技術で製造されるので、スケールアップ可能性のある量子コンピューターのアプローチの一つとして世界で活発に研究が進んでいます。フォトニック量子コンピューターに不可欠なのが量子情報を担うフォトンが発生する単一フォトン源です。電流駆動により、通信波長帯で同一波長のフォトンをおんデマンドに発生する単一フォトン源の実現を目指します。

エラー訂正による誤り耐性を持つ量子コンピューターの実用化には100万量子ビット以上が必要です。フォトニック量子コンピューターでは100万以上の同一フォトンが必要です。100万以上の同一フォトンを高効率で発生するために、垂直微小共振器と量子ドットを組み合わせた単一フォトン源を研究しています。

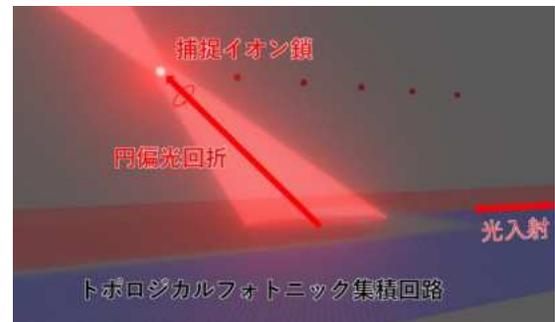


垂直微小共振器量子ドット単一フォトン源

## 大岡山・波動通信グループ

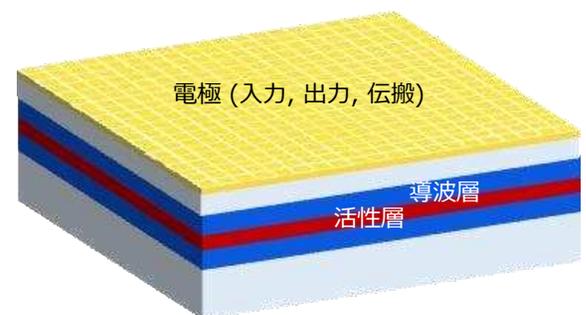
■ イオントラップ型量子コンピュータへ向けた  
フォトニックナノデバイス

外界とは隔絶された環境に少数のイオンを捕捉するイオントラップは理想的な量子系の一つに数えられ、量子コンピュータを実現する有力な候補です。近年では同系の小型化/大規模化を目指してイオンの操作に必要な光機能を集積光回路に組み込む検討が進んでいます。一方で、量子計算へ応用するためには、イオンへ照射する光の空間分布や偏光状態の制御といった高度な光機能を、集積光回路としては挑戦的な波長帯である可視～近紫外帯域で行う実現する必要があります。我々はトポロジカルフォトンクス等最新のナノフォトニック技術を駆使し、高度な量子操作が可能な集積光素子/回路の実現を目指します。

トポロジカルフォトンクス集積回路に基づく  
光回路一体型オンチップイオントラップ素子■ フォトニック・リザーバコンピュティングを  
実現するフォトニック・アクティブ共振器

時系列情報を処理し動的パターン認識を実現する動的AIは、起こりうる可能性の高いリスクや価値を予測します。リザーバコンピュティングは、実在する物理系をリザーバとして活用し、動的パターン認識を実現します。実在する物理系として集積フォトンクスを連続媒質型のリザーバとして用いることで、スケールアップするフォトニック・リザーバコンピュティングの実現を目指します。

リザーバは入力信号を短期記憶し、非線形変換で高次元にマッピングします。量子井戸からなる活性層、光を閉じ込め伝搬する導波層、ミラーで構成されるフォトニック・アクティブ共振器で、電流による信号の入出力、光波による信号の処理を行うことで、リザーバの要件を全て実現し、次世代のコンピューターの一つとして性能がスケールアップするリザーバコンピュティングを研究しています。



フォトニック・アクティブ共振器

## 3 教員からのメッセージ

これまでCMOSトランジスターとともに進化してきたコンピューターは、今まさに変革の時を迎え、次世代のコンピューターの研究も加速しています。21世紀に入り、フォトンクスによるデータ伝送がCMOSコンピューターの高性能化を実現してきました。当研究室では、次世代のコンピューターをフォトンクスによるデータ処理で実現することを目指します。

世の中の変化はますます加速していきます。その中で、皆さん自身が新たな技術を研究できる可能性が大いにあります。これからの技術革新をリードし、即戦力として活躍できる人になるために、未来のコンピューターを実現するフォトンクスの研究と一緒に取り組みませんか？多くの人と一緒に取り組んで結果を出すことが重要です。研究室、大学、分野をまたいだ取り組み、産業界、海外との取り組みを積極的に進めていきます。

中川茂研究室のモットーは「失敗の薦め」です。失敗を恐れず、失敗を予想し、素早く失敗することで、意味のある結果を出すことが重要で、そのために、助けを求めること、みんなで支えることを大切にしています。

## 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・光および通信グループ  
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かめたものです。



図1 導波管貫通法の温度可変測定系

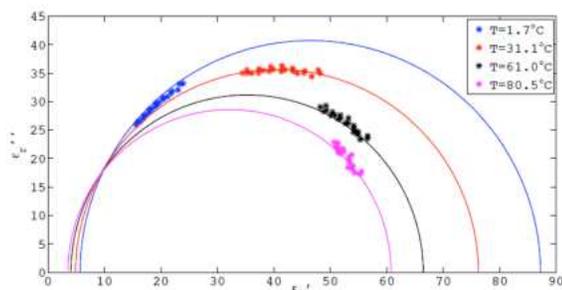


図2 水の複素比誘電率測定結果



図3 円形導波管TE<sub>01</sub>モード変換器の内部

■ 円形導波管TE<sub>01</sub>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TE<sub>01</sub>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。

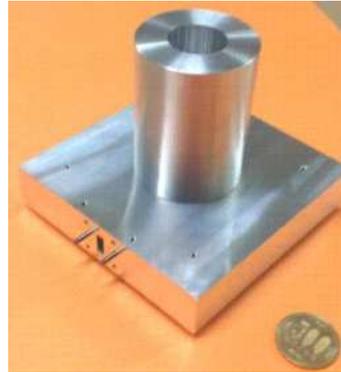
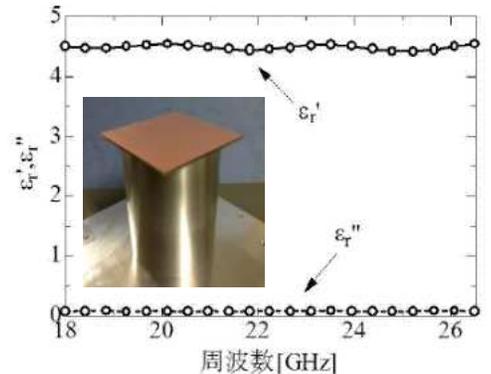
図4 円形導波管TE<sub>01</sub>モード変換器

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。

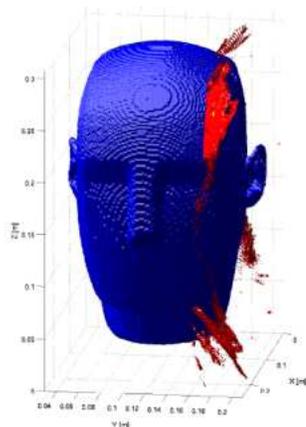


図6 ダミーヘッドによる点音源推定

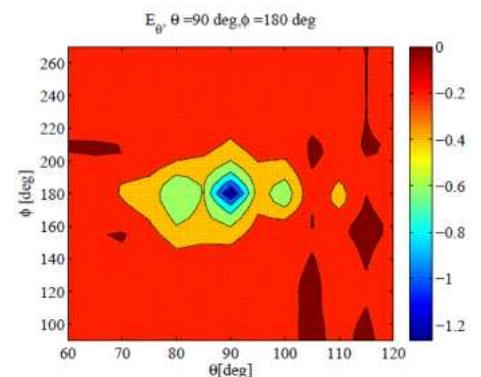


図7 2ポートアンテナ(左)とそれを用いた電気双極子波源の推定結果(右)。青い領域に波源があると正しく推定されている。

## ■ 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

上記以外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フォトニクス



波動グループ  
電気電子コース  
大岡山: S9-701

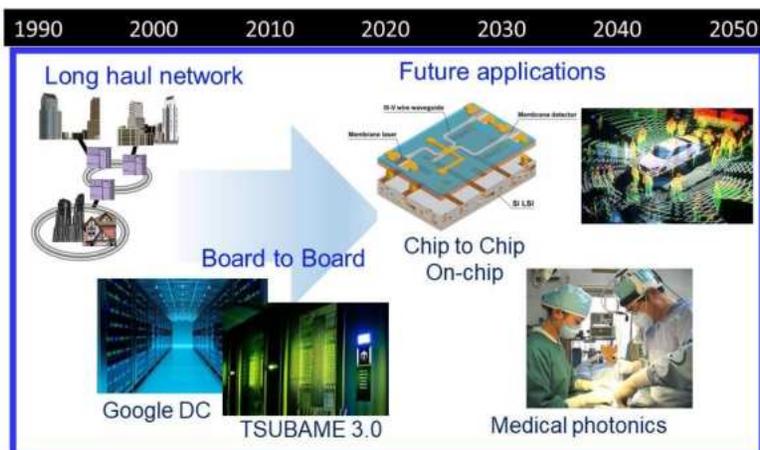
教授 西山 伸彦

研究分野: 光エレクトロニクス  
キーワード: 半導体レーザ、大規模光集積回路、異種材料接合、Siフォトニクス、光通信、光インターコネクション、光レーダー

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

### 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・大規模光集積回路**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、**毎秒10テラビット級トランシーバ**、自動運転車などにむけた**光レーダー用チップ・システム**、**ダイヤモンドセンシング**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。

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、学生諸君と決めております。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



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

# 大岡山・波動通信グループ

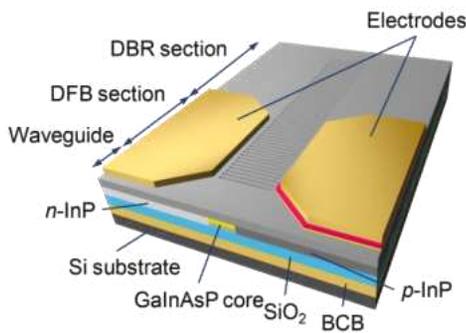
## 2 最近の研究成果

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。異種材料集積技術を利用してシリコンプラットフォーム上にIII-V族半導体レーザや異なる誘電体を集積した大規模光回路によって、様々なアプリケーションの実証を目指しています。

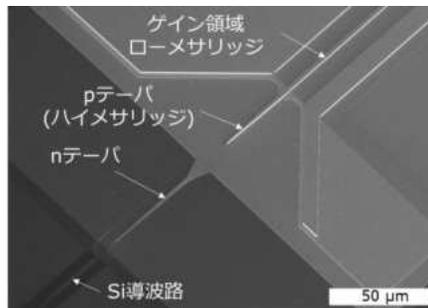
特に超高速トランシーバは、将来の6G、分散コンピューティングに向けた必須技術であり、企業群とともに実用化に向けた研究を推進しています。また、薄膜レーザおよび薄膜光集積回路は、LSI上光インターコネクションとともに、その低消費電力性を活かした光ニューラルネットワーク用ReLU関数としての適用や、無線信号を光ファイバに載せて伝送するRadio-over-Fiber技術にも適用しています。

それぞれの詳細は下記の研究室ホームページで確認してください。

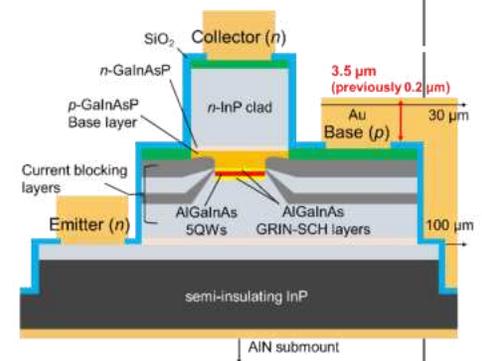
ホームページ: <http://www.opto.ee.e.titech.ac.jp/>



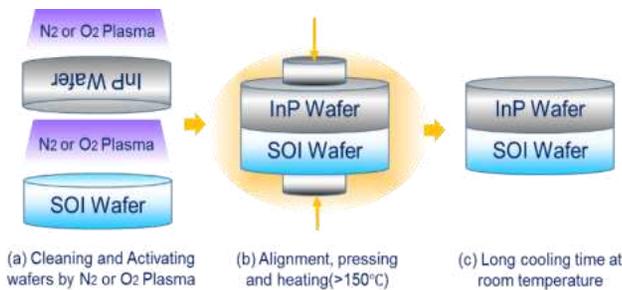
シリコン基板上  
半導体薄膜レーザ



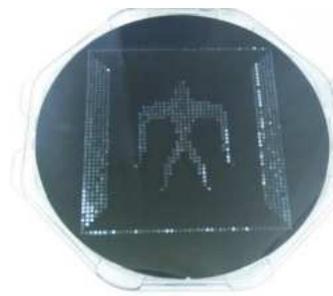
III-V/InP  
ハイブリッド光集積回路



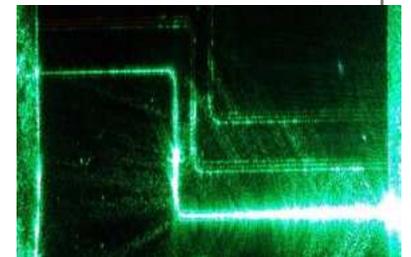
トランジスタレーザ



常温接合技術



CoW 接合技術



NV-ダイヤモンド集積光回路

## 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。特に、当研究室はものづくりにこだわり、設計から結晶成長、作製、システム測定までできる環境は、世界的に見てもまれです。みなさんにも是非同様な経験をして頂き、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憶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・光および通信グループ  
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

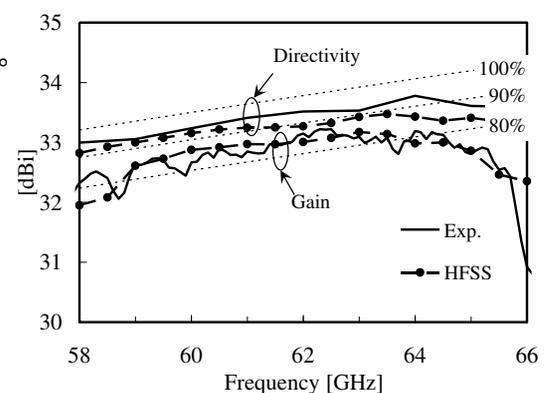
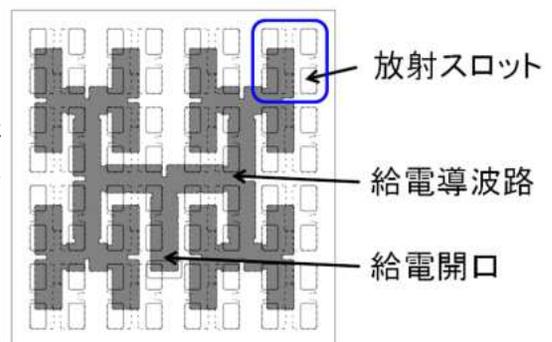
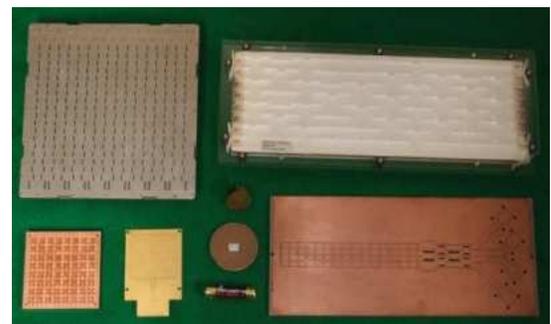
ミリ波は、周波数が30GHz~300GHzで波長がmmオーダの波です。10Gbpsを超える高速な情報伝送をミリ波で行うためのアンテナを研究しています。

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。



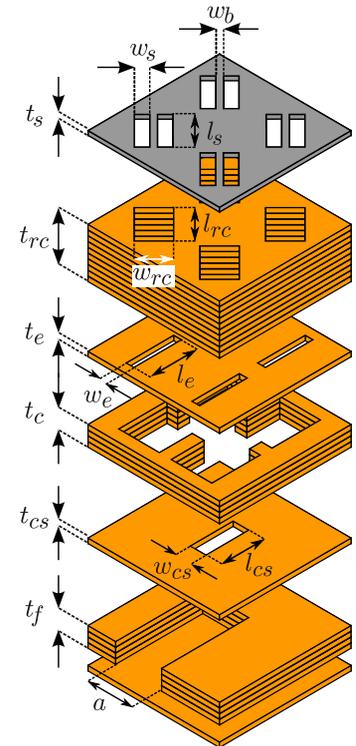
## 大岡山・波動通信グループ

## ■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。

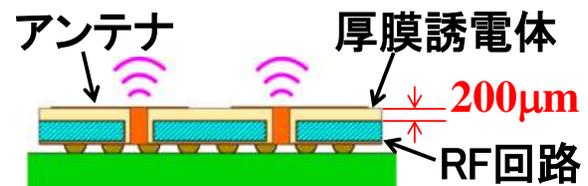
このように、適用できる構造は限られますが、設計に使用できる高速電磁界解析法の研究もしています。



## ■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・太田研究室

- ・第5.5/6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セルラーシステム



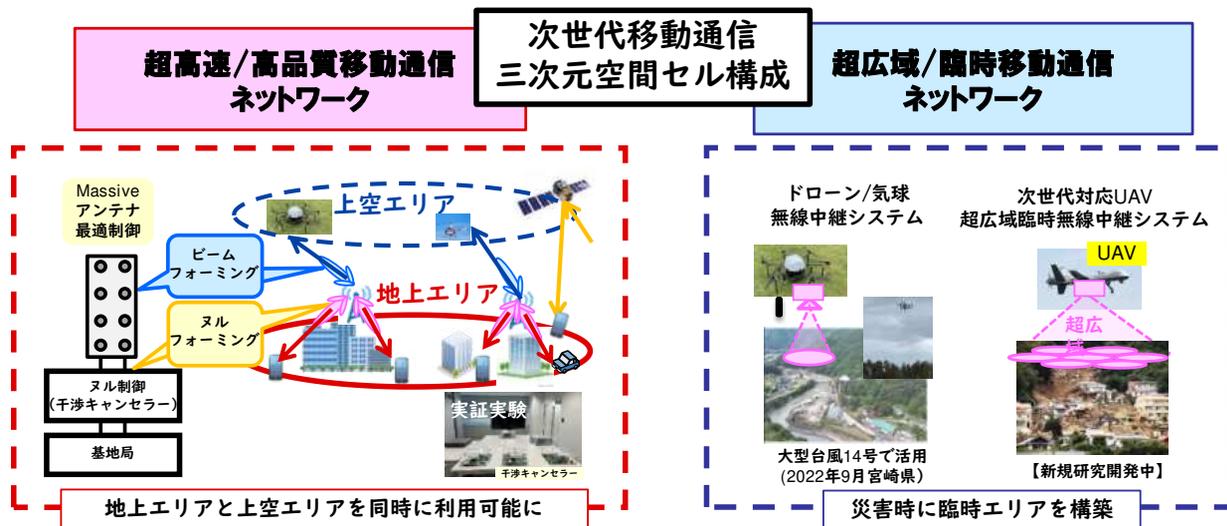
波動・光および通信グループ  
電気電子コース  
大岡山 南3号館 10階

特任教授 藤井 輝也 特任准教授 太田 喜元

研究分野: 無線通信工学  
キーワード: 5.5/6G、移動通信三次元空間セル構成、電波伝搬、Massiveアンテナシステム、HAPS  
ホームページ: <http://sb.mobile.ee.e.titech.ac.jp/>

## 1 主な研究テーマ

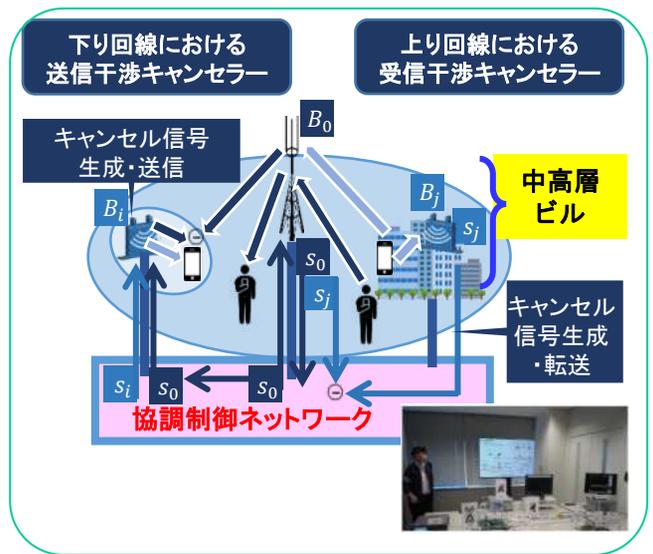
本研究室ではソフトバンク(株)と共同で、第5.5/6世代セルラー通信ネットワークを対象として“超高速/高品質移動通信ネットワーク”とそれを基盤とした災害時対応の“超広域/臨時移動通信ネットワーク”の研究開発を世界に先駆けて実施しています。本技術により地上から上空までの「三次元空間」を全て移動通信のサービスエリアとして構築し、通常の携帯端末で利用することを可能とします。次世代の“ライフライン”としてその実現に大きな期待が寄せられています。



## 2 最近の研究成果

### 移動通信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

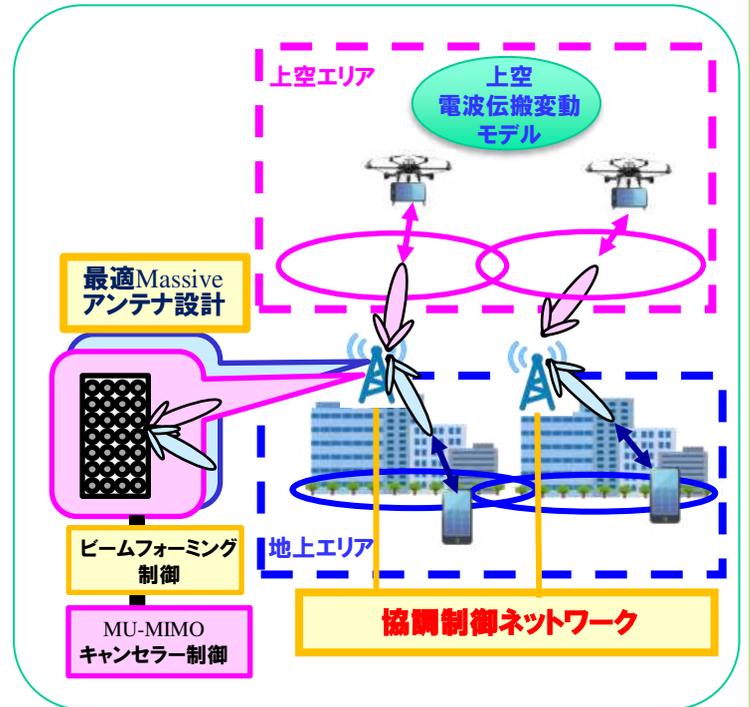
- ・LTE及び第5世代移動体通信を対象としてマクロセル内部に中高層ビル上層階で同一周波数を利用するスモールセルを複数設置する三次元空間HetNet構成において各セルがネットワークを介して連携する、“協調制御ネットワーク”を用いた干渉キャンセル技術を世界に先駆けて発案しました。
- ・三次元空間HetNet構成で下り回線ではスモールセル内の端末がマクロセルからの干渉を送信側で抑圧する“スモールセル送信干渉キャンセラー”を、上り回線ではマクロセルがスモールセル内の端末からの干渉を受信側で抑圧する“マクロセル受信干渉キャンセラー”を提案し、評価を行いました。提案技術の適用により、各セルの通信容量(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。



## 大岡山・波動通信グループ

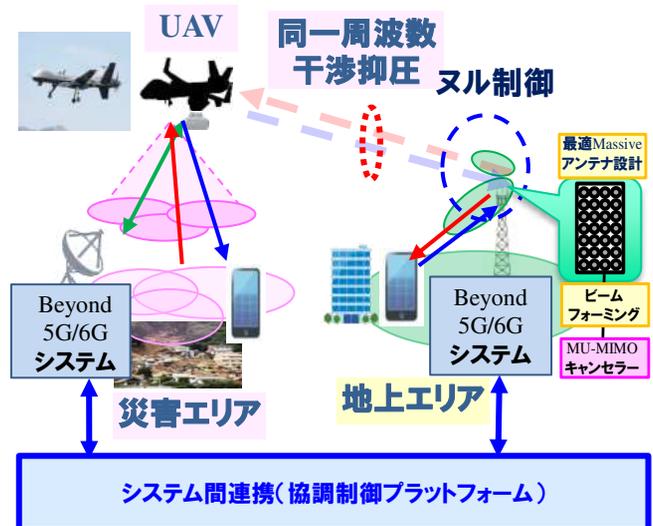
## 地上と上空を周波数共用する移動通信三次元空間セル構成の研究開発

- ドローンや空飛ぶ自動車の発展に伴い、上空での無線通信の需要は今後も増加していくことが考えられます。
- 5GのMassiveアンテナによるビームフォーミング技術を活用することで、地上と上空のサービスエリアを同時に構築する“三次元空間セル構成”を世界で初めて発案しました。
- 各基地局が地上と上空で同一周波数を同時に利用(共用)することで、周波数利用効率を従来の2倍に向上させることができます。
- 電波の到来角度広がり考慮した“Massive アンテナ”の最適化設計に取り組んでいます。
- 無線通信で不可欠な上空の電波伝搬変動モデルの構築を行っています。



## 災害対応の超広域／臨時移動通信ネットワークの研究開発

- 大地震などの災害時にエリアを3,000m以上の高度で飛行広域にわたり不通となった携帯通信する無人航空機(UAV)に搭載した無線中継装置による“臨時サービスエリア”を迅速に構築する臨時移動通信システムを提案しています。
- 周波数有効利用の観点からは地上セルラシステムとUAVが同一端末を用いて、同一周波数を共用することが期待されています。5G/6GシステムのTDD伝送方式を用いて地上システムとUAVのサービスリンクを同一周波数で共用する技術を世界に先駆けて提案しました。
- 超広域(セルの直径20km以上)、超高速の通信ネットワークを迅速に実現できます。



## 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できるセル構成として、第5.5/6世代を対象として高さ方向にもセルを配置する“移動通信三次元空間セル構成技術”、また災害時に移動通信の“臨時サービスエリア”を無人航空機(UAV)に搭載した無線中継装置を用いて迅速に構築する臨時移動通信ネットワークを提案しています。これらの提案技術を効率よく設計するために不可欠なネットワーク連携制御技術を提案し、災害時にも通常通りの高速・高品質の移動通信を実現する「ネットワーク連携移動通信三次元空間セル構成技術」の研究開発に取り組んでいます。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



波動通信G  
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://vcsel-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、高速化するモバイルの信号を光ファイバを介して低遅延で目的地に転送し、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法、波形歪を歪量に応じて適応的に等化する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)。

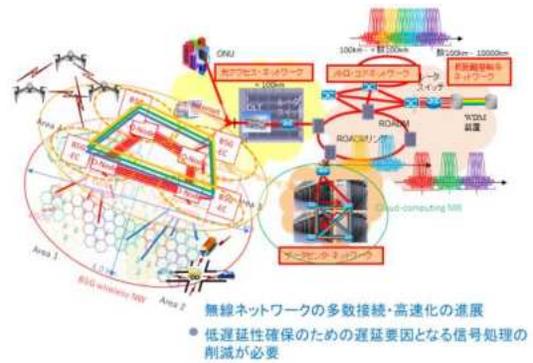


図1 テーマで扱う光ネットワーク領域

2 最近の研究成果

■ 光信号歪補償技術

光PSK・QAM信号に対して光ファイバ伝送中の非線形歪補償の性能向上・計算負荷低減の検討を行っている。受信信号に対して線形・非線形逆特性を送信器に向かいながら伝送路に沿って補償計算し、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、計算地点を間引いたり電界振幅の平均化・重みづけ処理を行うことで、計算量削減・品質改善性能向上可能な位相線形推定・強度平均化法について実証してきた。今後は2次元畳み込みニューラルネットワーク導入による究極的な性能改善の可能性も追究する(図2)。

■ マイクロデータセンタ間エッジ連携・リソース分離ネットワーク用大容量低遅延光スイッチング技術・光集積素子

高速・低遅延性を要求するBeyond 5G/6G無線ネットワークからのデータを分散配置された小規模(マイクロ)データセンタ間をつなぎ、エッジ連携によるリソース分離の効果による大容量・低遅延通信の実現を目指している(NICT委託研究)。待ち行列理論を用いたPON・SS構成のアクセスネットワークにおける低遅延性のための要求容量を解析し

ている。またマルチコアファイバ(MCF)による空間並列性の特徴を用い、レイヤ2ラベルを用いた低遅延処理を導入して、silicon photonicsによる小型・高密度光集積素子を介したシステム実現を検討している(図3~6)。

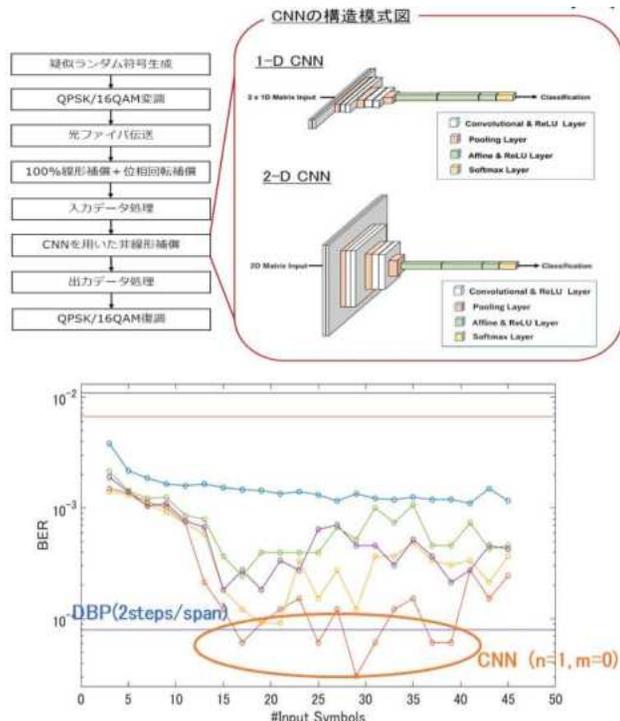


図2 光ファイバ伝送非線形歪のCNNによる補償性能 (上)層構成 (下)補償性能

# すずかけ台・波動通信グループ

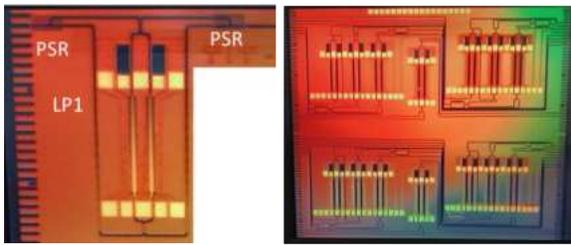


図3 silicon photonics光スイッチング集積素子  
(左)低偏波依存構造 (中)4コア用集積(右)スイッチ動作時間波形(低偏波構造有無の比較)

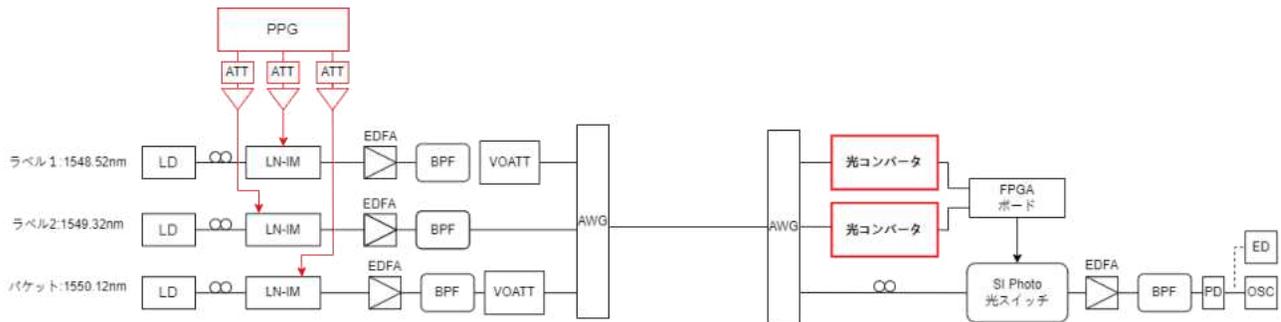
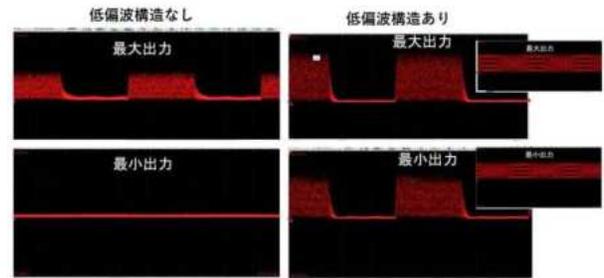


図4 波長ラベルを用いた低遅延スイッチングシステムの測定系

## ■高周波数利用効率のための直交化波長多重信号のスイッチング技術と光集積化

周波数利用効率の向上手段として、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)の実現を目指している。光OFDMチャネル分離素子の小型・高密度化を目的として、silicon photonics技術によるFFT光集積素子の検討を進めている。サブチャネルに独立の信号を割り当て、異なる遅延に対しても受信時の復調を可能とする識別子・信号処理技術の実現可能性を検討している。

さらに、異なる透過率特性のバンドパスフィルタの組み合わせによる高密度・非直交化波長多重信号のクロストーク抑制技術についても探求している。

## ■全光信号処理技術

次世代コンピューティングを支える要素技術を目指し、光回路を用いた超低遅延な信号処理技術の基本検討を進めている。

遅延干渉計を多段接続することで、光信号の尤度を算出するデバイスを作製した。当該デバイスを用いて、符号識別、digital-to-analog変換、デコーダ、PAM4信号の各シンボルの復調、光アクセラレータなどについて実現可能性を追究している。

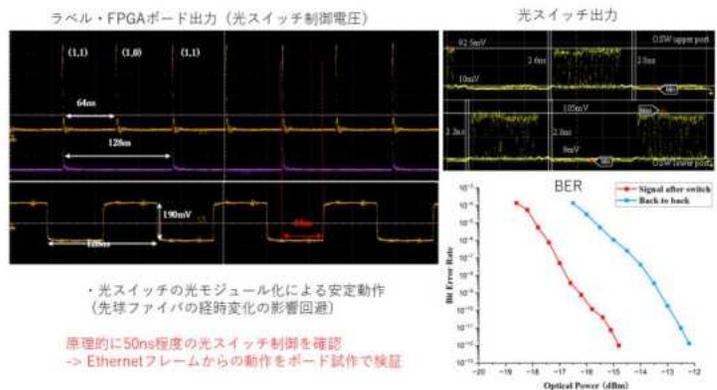


図5 波長ラベルを用いた低遅延スイッチングシステム動作結果



図6 多入出力光スイッチングシステム測定系写真

## 3 教員からのメッセージ

学生時代は、大いに挑戦ができる時間です。楽しく有意義な研究生を送りましょう！



波動・光および通信グループ  
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。

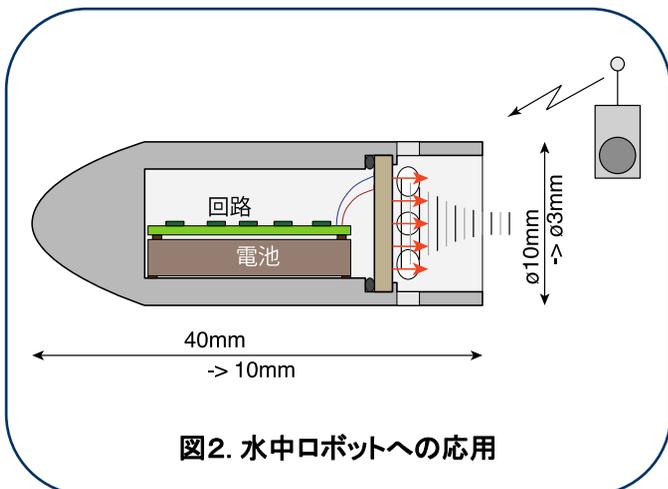


図2. 水中ロボットへの応用

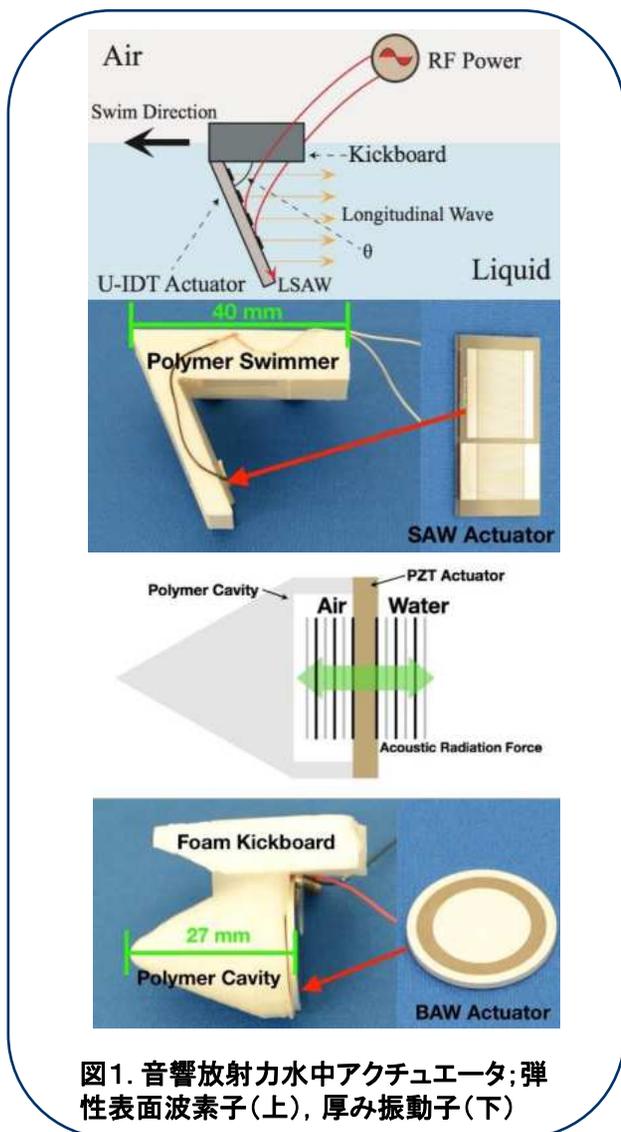


図1. 音響放射力水中アクチュエータ; 弾性表面波素子(上), 厚み振動子(下)

# 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。受信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。

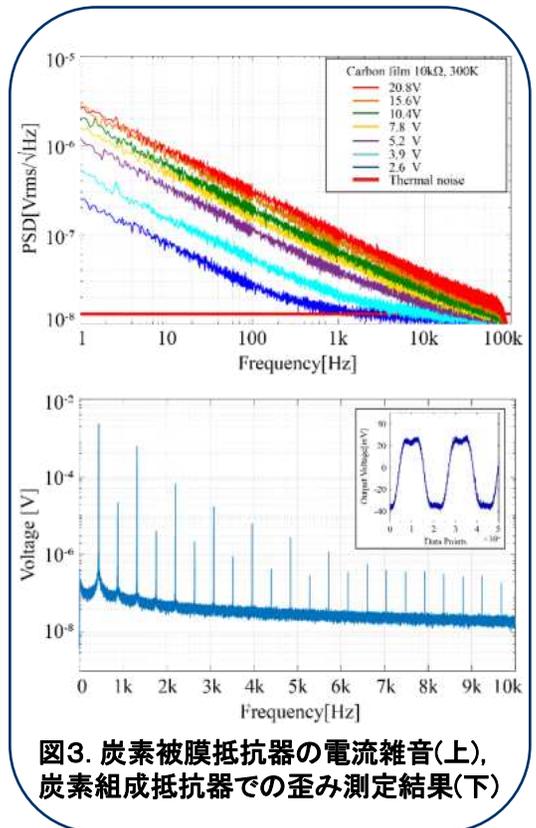


図3. 炭素被膜抵抗器の電流雑音(上), 炭素組成抵抗器での歪み測定結果(下)

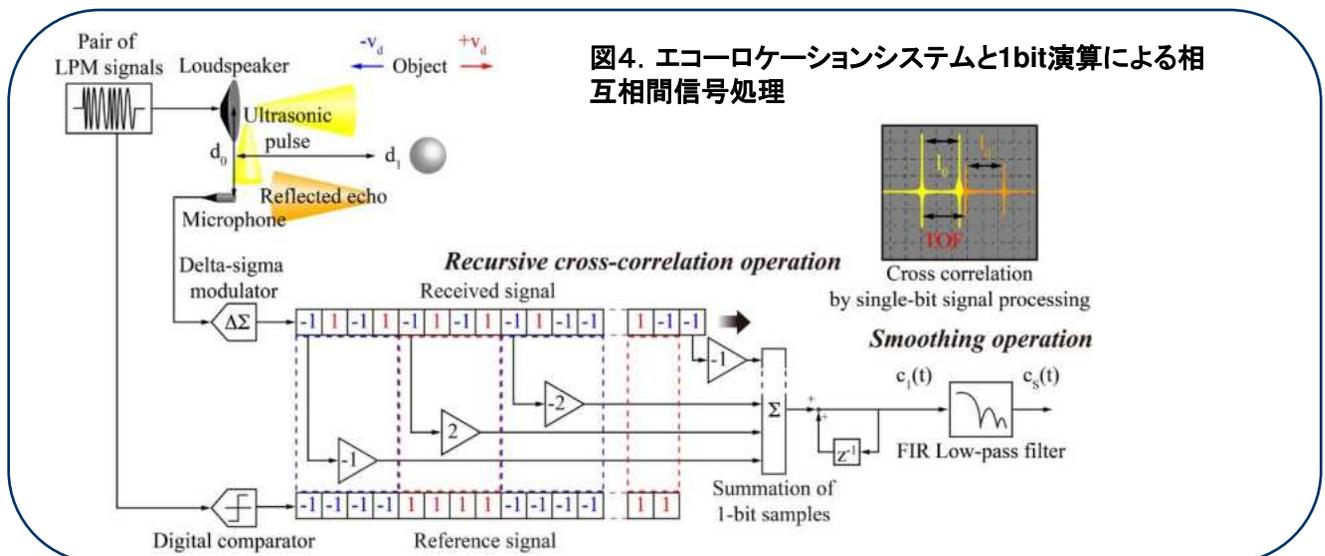


図4. エコーロケーションシステムと1bit演算による相互相関信号処理

## 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。



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。

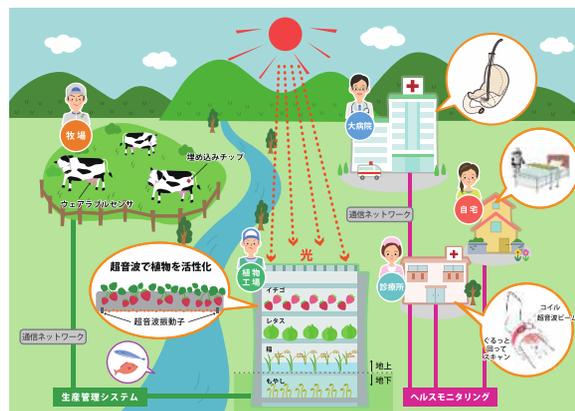


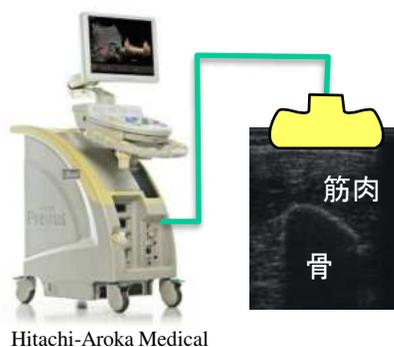
図1: 研究コンセプト

2 主な研究テーマ

■生体リアルタイムモニタと医療診断

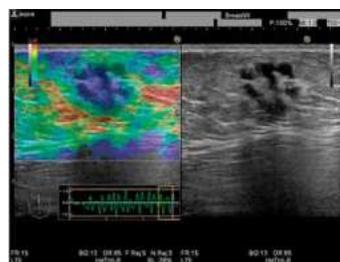
QOL(Quality of Life)の向上や健康寿命を延ばすことへの関心が高まっています。そのため、日頃のトレーニングを効率よく行うための動きセンサや、健康状態をリアルタイムで監視して異常を早期に発見するためのセンサが普及し始めています。筋肉の動きのモニタに関しては、筋電位センサが広く用いられています。

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

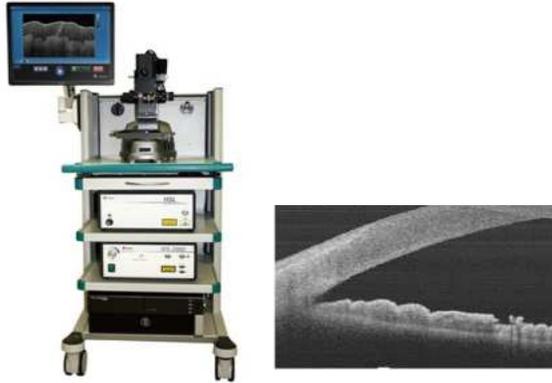


図4: 光干渉断層像と網膜の断層像(santec)

～医療診断への応用～

生体組織の硬さ(しこり)は病変化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。

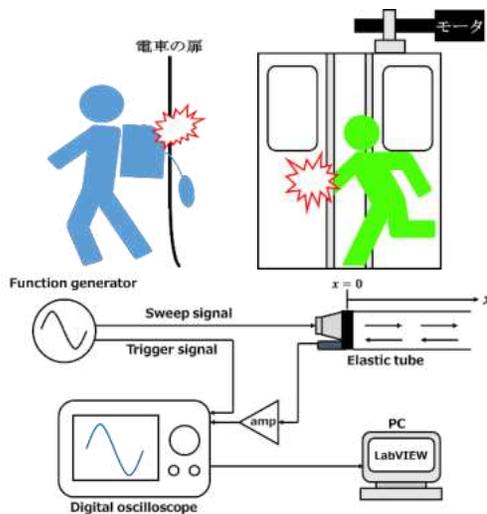


図6: 戸挟みと検出システム

### ■戸挟み検出システム

最近、ベビーカ・靴・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靴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う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。

## 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、外からは見ることで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



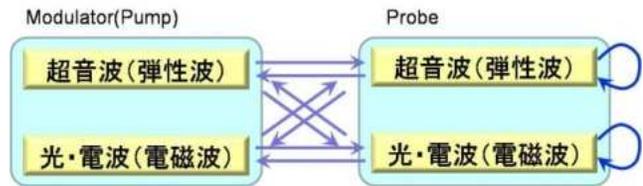
波動通信グループ  
ライフエンジニアリングコース・電気電子コース  
すずかけ台・R2-718

教授 中村健太郎

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。



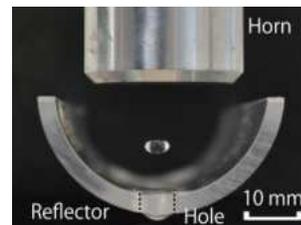
★ライフエンジニアリングコースに所属し、機械、材料、生命など他の分野の研究室とも交流しながら分野横断的な活動を行っている。多くが試作、実験中心の研究テーマ。他大学や企業等との共同研究も実施している。(2029.3定年退職予定)

2 最近の研究成果

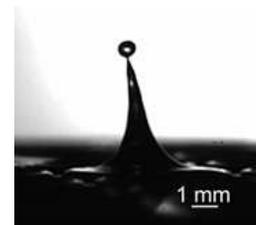
■ 超音波浮揚による薬液の非接触ハンドリング

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。

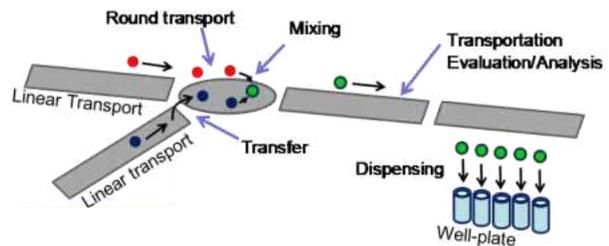
音源と反射器の間に形成される定在波の音圧の節に液滴がトラップされる現象を利用して非接触で操作する。音場モードを動的に制御したり、進行波の利用によって、搬送や混合動作に成功している。容器から必要量の薬液を打ち出すことや、浮揚したまま液量や物性を測定することにも挑戦している。今後、それぞれの動作をより高精度に行うことや、いろいろな処理工程を自由に組み替えられるような、振動系の構成方法を確立したい。また、錠剤の高速搬送や検査に対応することも検討したい。



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



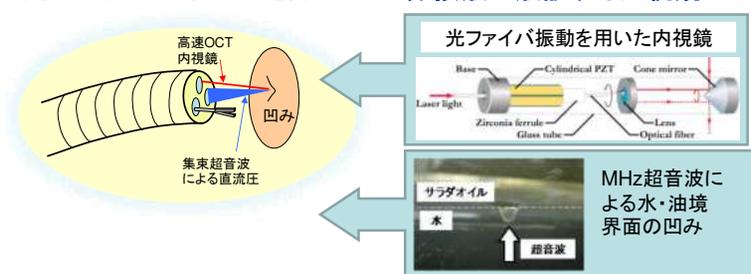
全ての工程を非接触で行うシステム

■ 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。

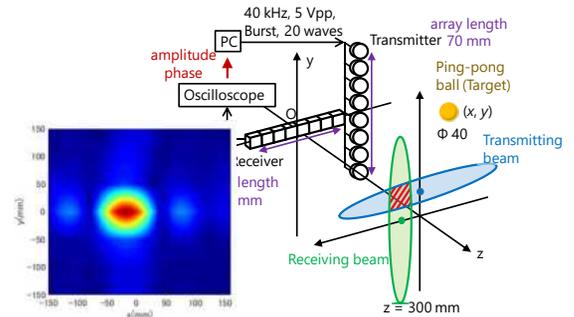
対象に働きかけ、その応答を見るセンサ 非接触で触診する内視鏡



# 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、スマートホ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。



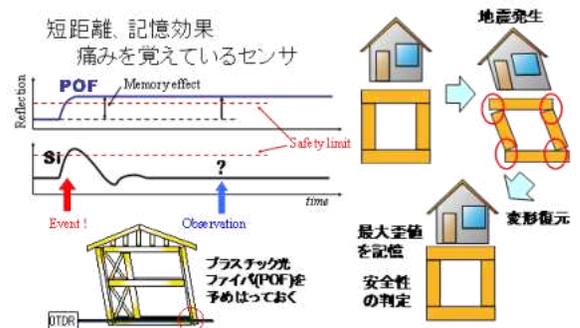
聞こえを支援するシステム

## ■ 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

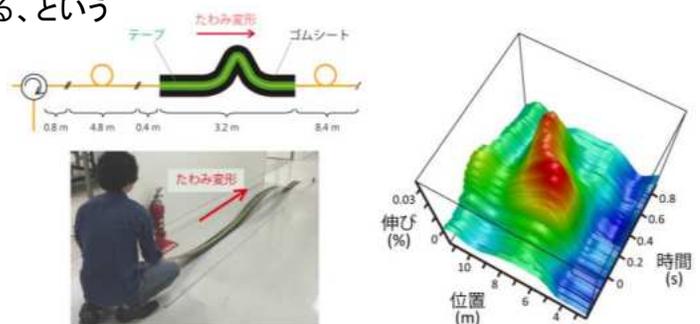
高度成長期に集中的に整備を行った我国の道路やトンネルなど多くの土木建造物で耐久性の問題が急激に起きている。また、地震や台風などの自然災害も避けられない。災害後の建物のダメージの迅速な診断が必要である。光ファイバセンサは、光ファイバをセンサとして、光ファイバのどこにどのような歪や熱が加わったのかがわかる有力な技術である。しかし、測定装置が大がかりなため、小規模構造物にはコスト等の見地から応用しにくかった。

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。

# 光無線給電システムの研究

## 宮本智之研究室



波動・光および通信グループ  
電気電子コース  
すずかけ台・R2棟817号室

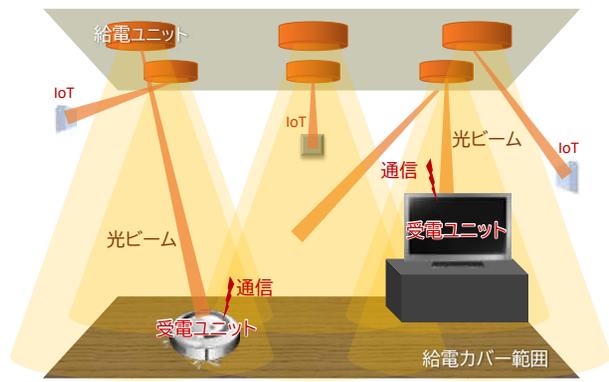
准教授 宮本智之

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, ドローン, EV, IoT, 水中, 宇宙, 面発光レーザー  
ホームページ: <http://vcsel-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)として注目される、光無線給電システムの構築を目指しています。光無線給電の多様なシステムおよびその機能要素に関する研究を行っています。

- ★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、植之原研究室と協力して光分野の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、通信は無線になった。無線は、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、などの様々な利点から社会を大きく変えた。しかし、電力供給「給電」は有線が基本のままである。この給電の有線は、新機器や新応用の創出も制約するため、給電も無線化した真の無線化社会の構築により、さらに社会は大きく変わると期待する。

既に無線給電は実用化されている。ただし、既存の電磁誘導方式などでは、数cmほどの短距離給電に限られ、高周波電磁ノイズ発生なども課題である。そこで『光ビーム』を用いる光無線給電(OWPT)が注目されている(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、電磁ノイズなく給電可能なOWPT方式が有望となる(図2)。

光無線給電の基本構成は、レーザーなどのビーム光源と太陽電池を組合せる。簡単な原理だが、これまではデバイス性能などが十分でなく、世界的にも研究開発は非常に少なかった。しかし、無線化への要望の拡大や近年のデバイスの高性能化、また人工知能や高機能センサ技術を組み合わせることで、光無線給電は改めて最新技術として再定義され、有効な無線給電方式として注目され、研究開発も活性化している。

#### Optical Wireless Power Transmission: OWPT



図1 ビーム光源と太陽電池による光無線給電

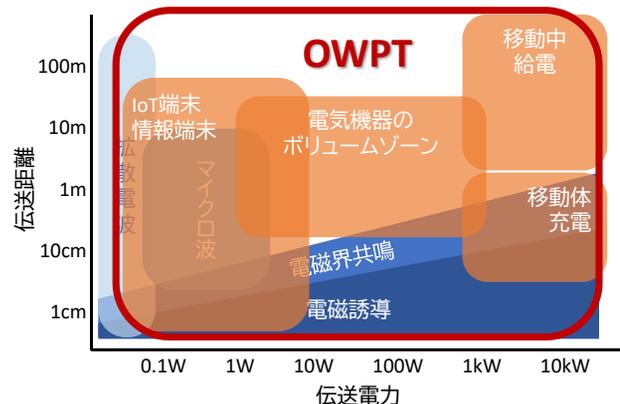


図2 光無線給電は小型軽量・長距離・大電力のため、様々な機器・場面への利用が期待される。

# 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実現に向けて、システム構成検討や特性評価、また課題抽出などを進めている。様々な応用の基盤となる基礎システムの検討から、具体的な応用を想定した実用向け応用システムなどの構築を研究している。

図3は、光無線給電の基盤システム構築の例で、近赤外帯面発光レーザーと太陽電池により、10 cm角程度の小型モジュールで数m以上の長距離と10 W程度の給電を実証した例である。このような特性は既存無線給電方式では難しく、光無線給電の有効性を示している。

この基本技術をもとに、多数のIoT端末への給電、回転機構への給電、数m以上の長距離給電、ドローン・ロボット・電気自動車などの移動体への移動中給電(図4)、宇宙応用のほか、電波は通らず光は通る水中の光無線給電などの新応用開拓を進めている。

## ■様々な機能要素の開拓

高度な機能や多様な応用に向けて、システムを構築するための様々な機能要素の研究を進めている。

レーザに比べて安全・低コストに有利な高効率LEDのビーム光源応用の検討、また、多様な条件下で効率的な光利用を可能とするフライアイレンズ系の利用、また、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、通常は黒い太陽電池外観を民生機器向けにカラー化、などの光利用に関わるビーム系・光学系(レンズ系)の開拓・最適化などを進めている。

また、太陽電池位置やそのサイズを、3DカメラとAIにより検出・追従することや、物体検知による光ビーム安全確保、複数光源制御による高機能化(図4左下)などの多様な機能要素開拓を進めている。

## ■光無線給電の効率改善

給電効率は重要な指標である。光源と太陽電池のみを考えた給電効率の想定値を表1に示す。市販デバイスでは10%程度、最高特性デバイスでは50%近い効率が期待できる。将来的には70%に到達すると期待している。光学系を含む機能要素も合わせた高効率化を進めている。しかし、10%程度の効率であっても、今までにない長距離対応の無線給電という機能性に注目することがより重要と考えている。

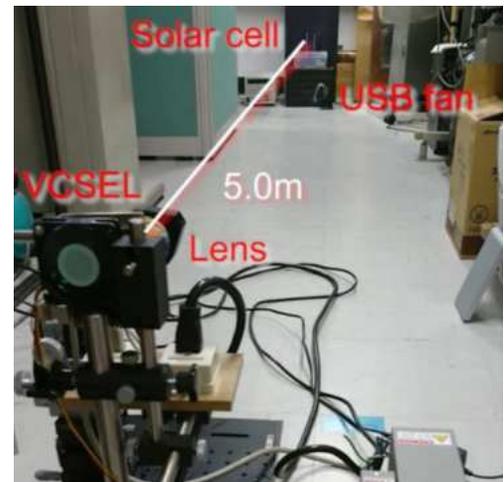


図3 光無線給電の実験例。5m先の太陽電池で受光してUSBファンなどを動作させている。

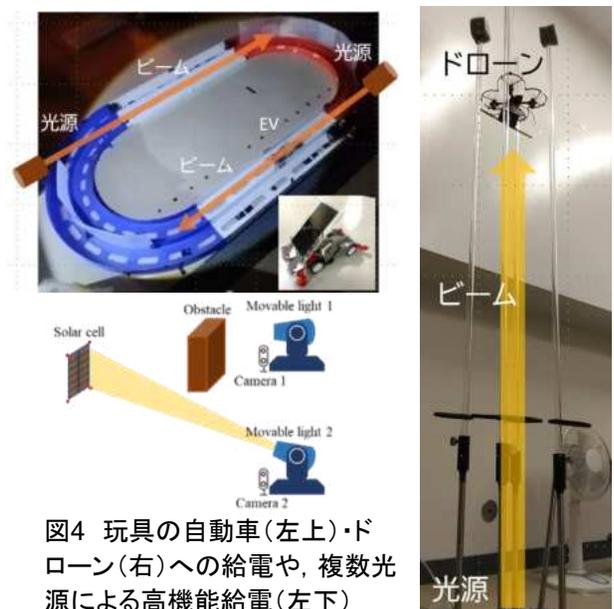


図4 玩具の自動車(左上)・ドローン(右)への給電や、複数光源による高機能給電(左下)

表1 光無線給電の給電効率

	レーザ効率	太陽電池効率	給電効率(想定)
現状	市販(近赤外) 40%	市販(Si) 40%	16%
	報告例(近赤外) 75.5%	報告例(GaAs) 68.9%	52%
将来	展望 85%	展望 85%	72%

※レンズ系や伝搬損で実効率はさらに低下

## 3 教員からのメッセージ

本研究室では、次の社会の構築に重要な役割を果たす光無線給電について、そのシステム・機能要素の構築・製作・評価から新規応用の創出まで、最新技術を活用したモノを「創る」研究を進めています。この光無線給電システム・機能要素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、自らこれらの能力を獲得し伸ばす意欲のある学生の参画を期待しています。

# 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。こういった問題は「量子力学」の原理を使った新しいコンピュータである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。

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。

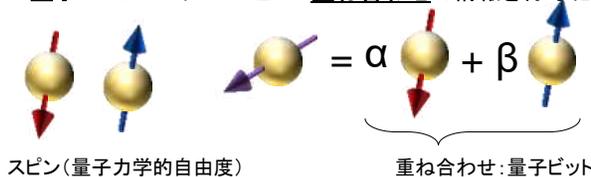
本研究室では、量子コンピュータ実現に繋がる基盤技術という工学的な研究と、関連する物理の解明という基礎学術的な研究の両方を推進しています。特に、半導体ナノ量子構造中のスピンに着目し、研究しており、工学的な研究としては、将来的な素子集積に適したデバイス構造の提案、設計、試作、評価、さらに、制御系の構築、回路、通信との連携も進めています。基礎学術的な研究としては、半導体量子構造における輸送現象、スピンコヒーレンスに関する物理解明に取り組んでいます。

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、国家研究プロジェクト(ムーンショット、Q-LEAP)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

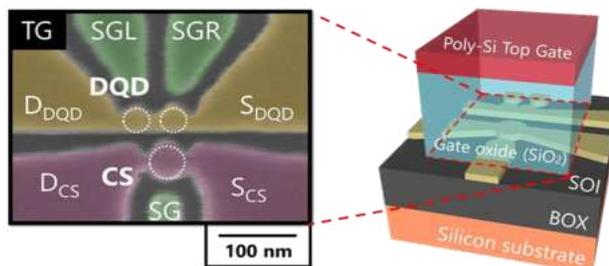
国内外の研究機関および企業と共同研究も推進し、新しい量子情報デバイスの実現を目指しています。  
東京大学、理化学研究所、産業技術総合研究所、日立ケンブリッジ研究所、デルフト工科大学、等。

## 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。

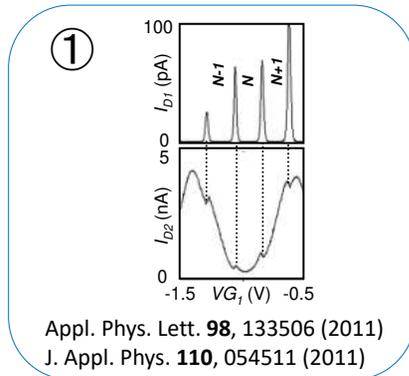
右図は、本研究室で研究をしているMOS型シリコン量子ドットデバイスの模式図と電子顕微鏡写真です。



MOS構造を利用したシリコン量子ドットデバイス

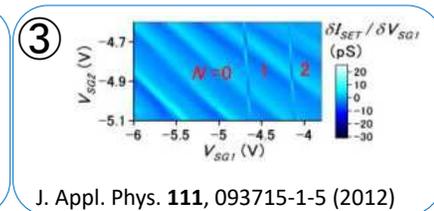
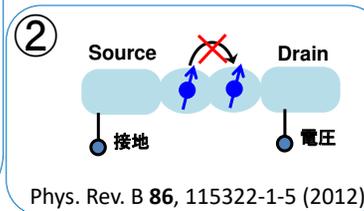
## 大岡山・デバイスグループ

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。(産業技術総合研究所との共同研究)



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

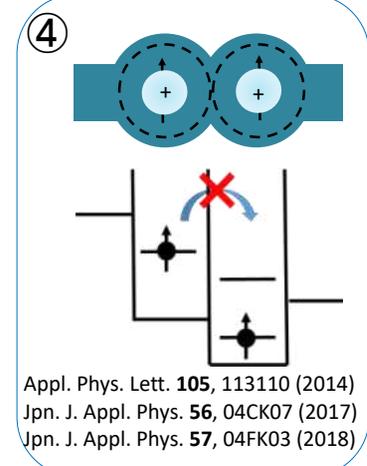


### ■ 正孔により動作するシリコン量子ドットデバイス

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。正孔のspinは、spin軌道相互作用を利用して、電界のみで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。

また、spin軌道相互作用や、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。また、spin依存トンネル現象の観測(④)にも成功しました。最近、spin操作を示す信号の観測やその時間分解測定、さらにはspinコヒーレンスに影響を及ぼす電荷ノイズの評価を実現しました。これらは大学院生が修士論文研究として実施し、優秀修士論文賞を2021年から2023年の3年連続で受賞しました。



### ■ 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の研究も進めています。Si/SiGe量子ドット中のspin状態の操作と単発読み出しを行い、位相緩和時間 $T_2^*$ が $20\mu\text{s}$ 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。最近、量子非破壊測定の実験にも成功しました。(理化学研究所榊茶研究室との共同研究, *Nat. Nanotechnol.* **13**, 102 (2018).)



### ■ 2020年以降に発表した学術論文の例

*Phys. Rev. Applied* **21**, 024034 (2024), *Appl. Phys. Express*, **17**, 022002 (2024),  
*AIP Advances* **13**, 035219 (2023), *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SC1086 (2023),  
*Nature Nanotechnol.* **18**, 721 (2023), *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SC1020 (2023),  
*Phys. Rev. X* **12**, 031035 (2022), *Sci. Rep.* **12**, 10444 (2022),  
*IEICE Trans. Electron.* E105-C, **5**, 194 (2022),  
*Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, SC1040 (2022), *Sci. Rep.* **11**, 19406 (2021), *Sci. Rep.* **11**, 5863 (2021), *Sci. Rep.* **11**, 20039 (2021), *Nat. Commun.*, **11**, 1144 (2020), *Nano Letters* **20**, 2, 947 (2020), *Sci. Rep.*, **10**, 22202 (2020), *Sci. Rep.*, **10**, 3481 (2020), *Appl. Phys. Express*, **13**, 121004 (2020), *Appl. Phys. Lett.* **117**, 094001 (2020) 等。

## 3 教員からのメッセージ

皆さんと一緒にアイデアを出し合って、チャレンジングな最先端研究を楽しく進めていきたいと思っております。当研究室の大学院生は、アメリカ、オーストラリア、オランダ、フランス、カナダ等で開催された国際会議や国内会議において発表を行い、受賞もするなど、活躍しています。また、他の研究機関や民間企業との共同研究、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。



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: テラヘルツデバイス、動的メタマテリアル、  
テラヘルツ応用(無線通信、レーダー、3次元イメージング)

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

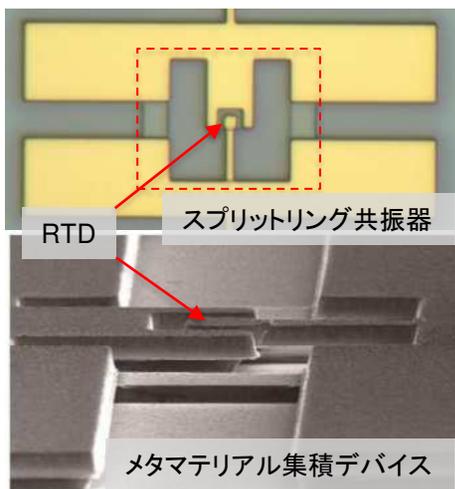
およそ100ギガヘルツから10テラヘルツの超高周波領域はテラヘルツ帯と呼ばれ、従来の光・電子デバイスは動作できなかったため開発がほとんどされてきませんでした。しかしながら、近年の精力的な研究開発によりテラヘルツ帯で動作するデバイスが徐々に生まれてきており、これらを用いた、超高速無線通信、イメージング、分光分析、物性・天文・生体などいろいろな分野にわたる計測などがデモンストレーションされ始めています。このように少しずつ現実味を帯びてきたテラヘルツアプリケーションですが、皆さんが日常的に意識せずに使うような存在となるにはまだまだ技術的に高い壁がいくつも存在します。本研究室では、それら障壁を打ち破り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

- 共鳴トンネルダイオードを用いた高機能テラヘルツ発振器
- テラヘルツ動的メタマテリアル
- テラヘルツアプリケーション(大容量無線通信、レーダー、3次元イメージング)

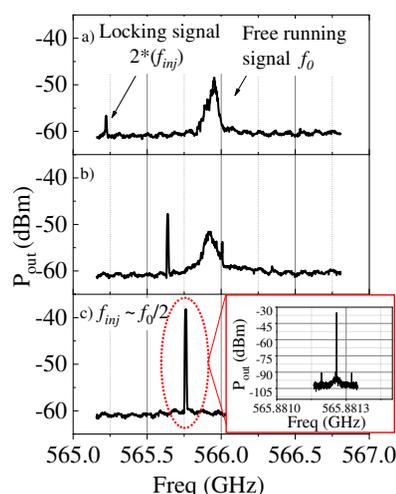
## 2 最近の研究成果

### ■ 共鳴トンネルダイオードを用いた高機能テラヘルツ発振器・動的メタマテリアル

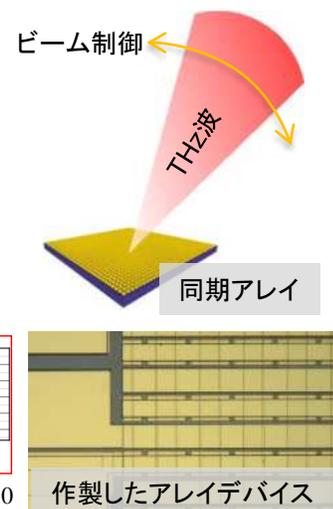
テラヘルツ帯は非常に高周波であるため、高い発振周波数を得るには“超速い”電子デバイスが必要です。半導体の量子構造を用いた共鳴トンネルダイオード(RTD)は、電流電圧特性に微分負性抵抗を持ち、電磁波を増幅・発振させることが可能で、本研究室と浅田研究室とのこれまでの研究により電子の遅延時間を極限的に減らすことによりテラヘルツ動作を実現しました。現在、我々のRTDデバイスはあらゆる電子デバイスの中で世界最高の約2THzの発振を達成しています。本研究室では、このRTDの可能性をさらに広げるため、新たなメタマテリアル共振器との集積や、注入同期現象を用いた位相制御による出力合成・ビームフォーミングなどを現在研究しています。



作製したRTD・メタマテリアル集積構造



注入同期と大規模アレイの位相制御によるビームフォーミング



## 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

## ・ 1THz超高周波帯や周波数多重を駆使したテラヘルツ無線通信

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。そこで開発したRTD発振器を送信器として利用したテラヘルツ無線通信を研究しています。特に、小型電子デバイスではまだ例の無い1THzを超えるキャリアを用いた無線通信は、テラヘルツの広大な帯域を開拓する上で非常に重要なマイルストーンとなっており、そのため、この高周波通信に現在チャレンジし、テラヘルツ無線通信の可能性を明らかにすることを目標に研究推進しています。

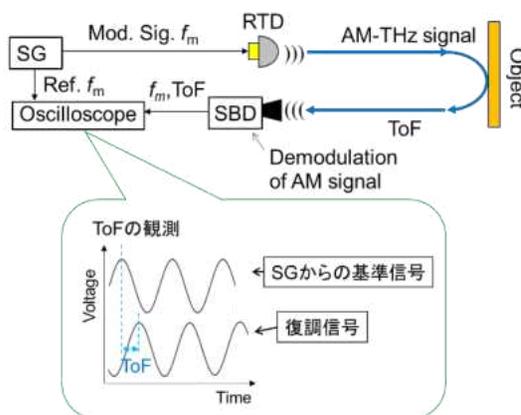


無線通信用RTD発振器とパッケージ

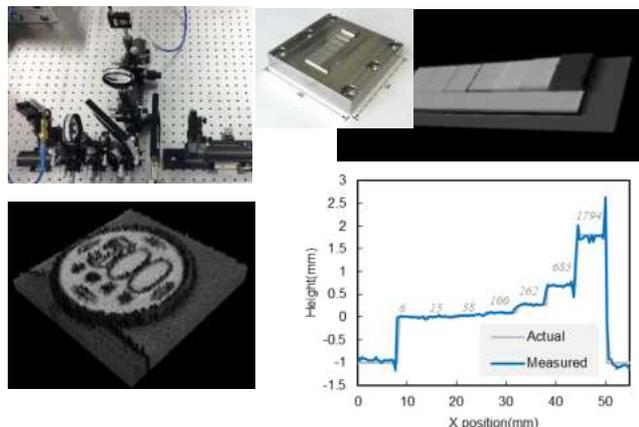
構築したテラヘルツ無線多重通信のシステムと多値伝送時のアイパターン

## ・ テラヘルツレーダー・3Dイメージング

テラヘルツはプラスチック、紙、服などのソフトマテリアルを透過する性質を持ち、セキュリティや非破壊検査への利用が期待されています。さらに、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。そのため、我々の研究室では、RTD発振器の高速変調特性を利用し、新たに考案した振幅変調連続波方式（AMCW）やサブキャリアを用いた周波数変調連続波方式（FMCW）によるテラヘルツ距離測定システムを研究しています。現在までに数10～100マイクロメートルの分解能のレーダーや、横方向分解能500マイクロメートルの3Dイメージングを達成しています。



AMCW方式テラヘルツレーダーシステム



構築した3Dイメージングシステム・測定データ

## 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。



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: 量子技術、電子材料、応用物性、固体物理  
キーワード: センサデバイス、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量子センサおよび量子ネットワークの構築に貢献するデバイス・システムの技術革新を創出していきます。優れた物性を有するダイヤモンドをベースとした、材料・物性・デバイス・システムのブレークスルーとなる基礎研究、さらに生体磁気、エネルギーなどの量子センサの様々な応用研究や将来の情報通信技術である量子ネットワークをターゲットとした研究を進めていきます。

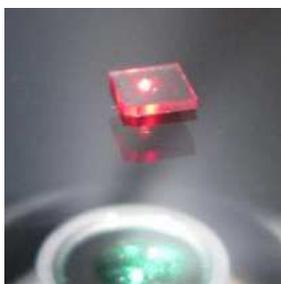
★当研究室の居室は環境エネルギーイノベーション棟 (EEI棟)にあります。



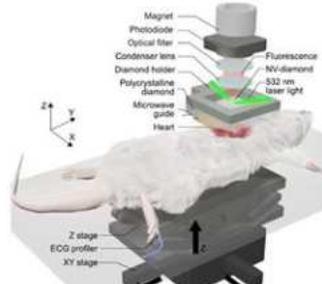
## 2 最近の研究成果

### ■ 量子センシング

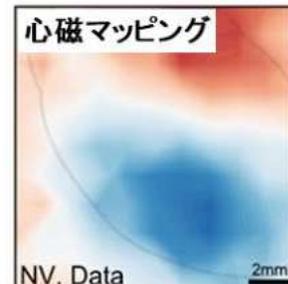
細胞計測から、MRI・脳磁・心磁等の生体計測まで、高感度磁気センサのニーズがあります。当研究室では、常温で動作し、高い空間分解能を有し、2次元イメージングが可能である磁気センサの開発を目標としています。特に常温固体中で優れたスピン特性を持つことが知られているダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)センターを用いています。NVセンターは、ダイヤモンド格子内で窒素および空孔からなるペアであり、そのスピン特性を用いることで高感度なセンサとして機能します。NVセンターは、高い空間分解能での計測やベクトル計測が可能といった優位性が期待できます。NVセンタは原子レベルの構造であり、ナノスケールからマクロスケールまで様々な対象を計測することができます。当研究室では、NVセンターを用いた高感度磁気センサシステムの構築、生体磁気計測、電気自動車用バッテリーの計測など、様々な応用に向けた研究を行っています。



ダイヤモンド量子センサ

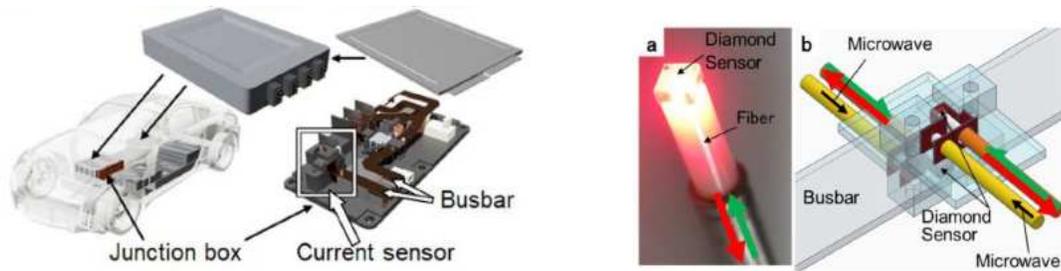


ダイヤモンド量子センサによるラットの心磁計測



成果論文例: ACS Nano 11, 1238, 2017, Sci. Rep. 10, 11611, 2020, & Commun. Phys. 5, 200, 2022.

## 大岡山・デバイスグループ



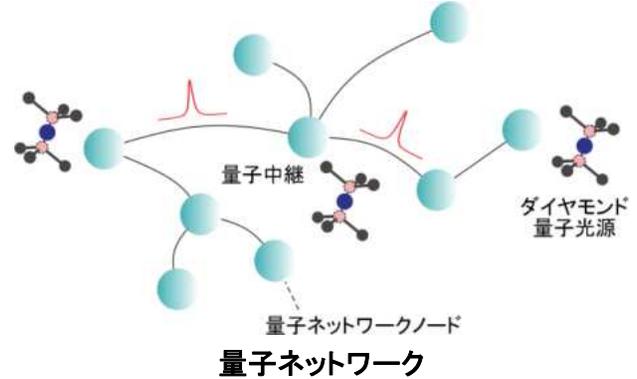
ダイヤモンド量子センサを用いた電気自動車バッテリーのモニタリング

成果論文例: Appl. Phys. Lett. 118, 034001, 2021 & Sci. Rep. 12, 13991, 2022.

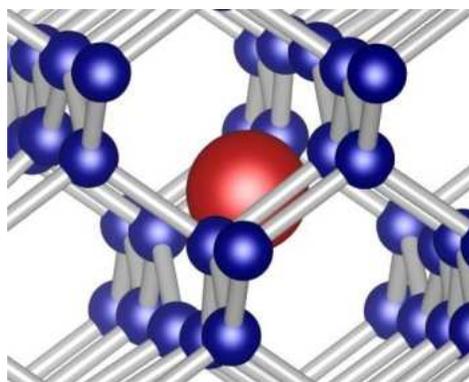
## ■ 量子ネットワークに向けた固体量子光源

量子ネットワークは量子もつれを用いて情報の転送を行う安全な情報ネットワークです。長距離の量子もつれ生成には、量子中継を含めた各点において優れた光学特性およびスピン特性を有する量子光源が要求されます。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、さらに、電子スピン・核スピンに量子情報を保持することができます。

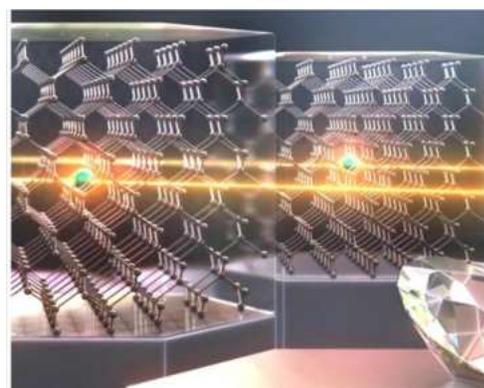
ダイヤモンド量子光源の中でも、IV族元素を用いたダイヤモンド量子光源は、構造の反転対称性から安定な発光を有するという特長を有しています。その中でも特に、重いIV族元素であるスズ(Sn)、鉛(Pb)を用いたスズ-空孔(SnV)および鉛-空孔(PbV)センターはケルビン温度領域においても長い電子スピニコヒーレンスが期待され、優れた光学特性およびスピン特性を両立する可能性のある世界でも注目されている量子光源です。当研究室では、量子ネットワークの構築に向け、SnVセンターおよびPbVセンターの光学特性・スピン特性の研究を進めています。



量子ネットワーク



SnVセンターの原子レベル構造



SnVセンターからの同一光子生成

成果論文例: Phys. Rev. Lett. 119, 253601, 2017, Phys. Rev. Appl. 19, 024061, 2023, & Phys. Rev. Lett. 132, 073601, 2024.

## 3 教員からのメッセージ

量子センサおよび量子ネットワークを実現するために、一緒に研究して下さる元気な方、いつでも訪ねて来て下さい。量子技術を用いた新しい応用の創製や飛躍的な性能向上には、新材料の物性の理解および高度な技術、さらに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。

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Ga<sub>N</sub>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、まずチャン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ン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。チャンネル長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。

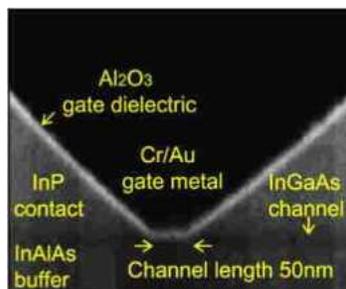


図1 チャンネル長50nm素子の電子顕微鏡断面写真

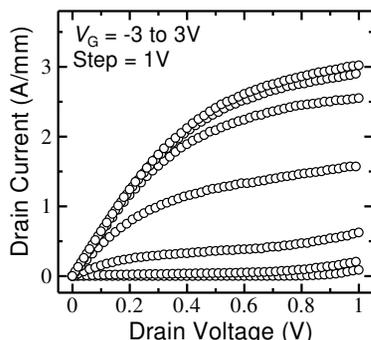


図2 チャンネル長50nmの素子のI-V特性

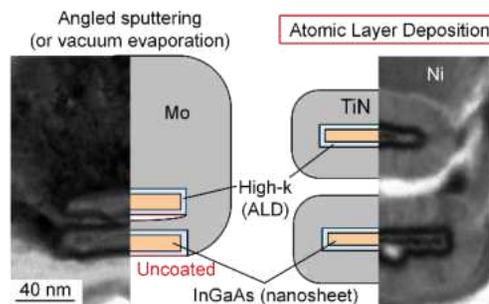


図3 InGaAs ナノシート構造のチャンネル部分TEM像

## 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。

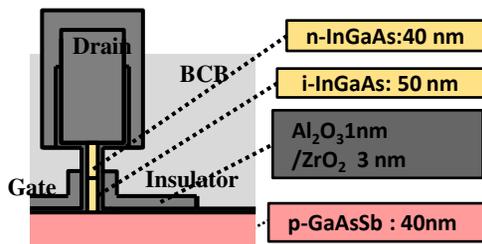


図4 10nm幅のメサを持つ縦型InGaAs TFETの透過電子顕微鏡断面像

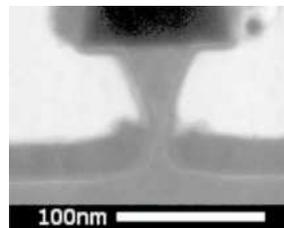


図5 10nm幅のメサを持つ縦型InGaAs TFETの透過電子顕微鏡断面像

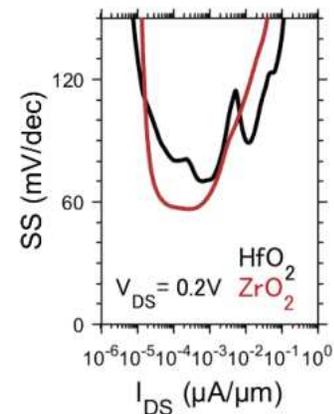


図6 GaAsSb/InGaAsチャネル縦型トンネルFETのサブスレッショルド特性

## 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)、結晶成長構造による高周波特性改善(NTT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。

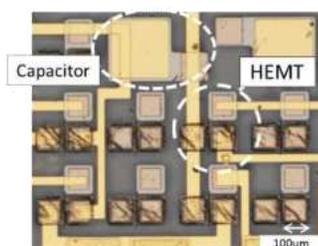


図7 GaN HEMTによるマルチレベルインバータ集積回路

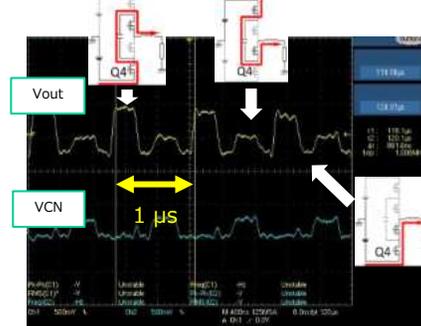


図8 GaN HEMTマルチレベルインバータ集積回路の動作特性

## 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、その楽しみを味わって貰いたいと思っています。

# 新機能集積化デバイス 大見研究室 – 多様な薄膜の機能による知的デバイスの創製 –



デバイスG  
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、不揮発性メモリ、有機半導体デバイス、  
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し、将来のカーボンニュートラル社会に貢献する。特に、シリコン酸化膜(SiO<sub>2</sub>)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。



## 2 最近の研究成果

### ■ 多様な薄膜の物性を活かした新構造シリコンデバイス

集積回路に用いられる主要なトランジスタであるMOSFETの高性能化を目的として、高誘電率窒化ハフニウム(HfN)ゲート絶縁膜を用いた、新構造MOSトランジスタに関する研究を行っている。さらに、Hf系強誘電体を用いたFeNOS型不揮発性多値メモリに関する研究を進めている(図1)。

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<sup>+</sup>およびp<sup>+</sup>-Siに対するコンタクト抵抗を10<sup>-9</sup>Ωcm<sup>2</sup>に低減することに成功している(図3)。

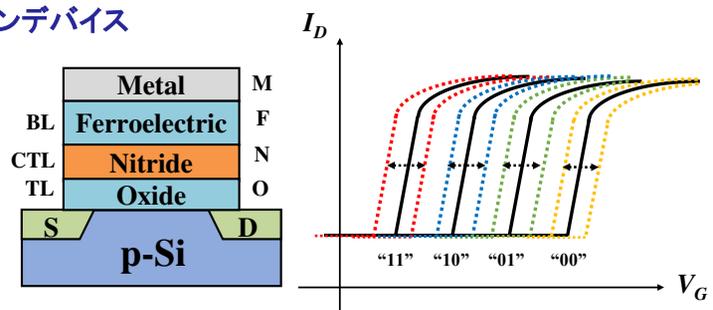


図1 FeNOS型不揮発性多値メモリ

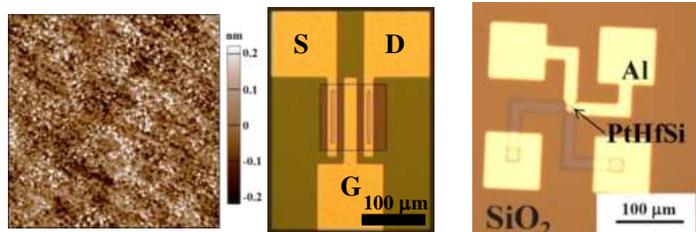


図2 原子レベル平坦Si(100)表面と Hf系MONOSデバイス

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

## ■ フレキシブルで軽い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により、有機半導体ペンタセン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の研究を進めている(図4)。

また、ペンタセンを用いたフラッシュメモリの高速・低電圧動作に関する研究を行っている。低い仕事関数(2.4 eV)を有し、大気中で安定な窒素添加LaB<sub>6</sub>金属薄膜をフローティングゲートとして用い、窒素添加LaB<sub>6</sub>を窒化したLaB<sub>x</sub>N<sub>y</sub>絶縁膜をトンネル層とブロック層として用いることにより、有機半導体フラッシュメモリを実現している。

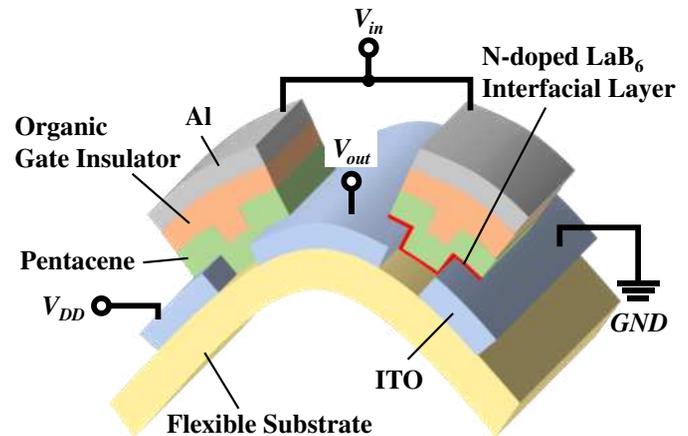


図4 トップゲート型単一有機半導体CMOS

## ■ 知的演算を実現する強誘電体ゲートトランジスタ

強誘電体の自発分極を利用したメモリである強誘電体メモリは、高速性と低消費電力特性をあわせもつ究極のメモリ材料である。本研究では、知的演算を実現する、Hf系強誘電体を用いた新構造強誘電体ゲートトランジスタに関する研究を進めている(図5)。高誘電率ゲート絶縁膜として用いられるHfO<sub>2</sub>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・低電圧動作が可能である。

本研究では、強誘電性ノンドープHfO<sub>2</sub>薄膜および強誘電性HfN薄膜を用いた強誘電体ゲートトランジスタに関する検討を行っている。強誘電体ゲートトランジスタの動作実証と、パルス入力による部分分極反転を利用した高精度なしきい値電圧の制御を実現している。

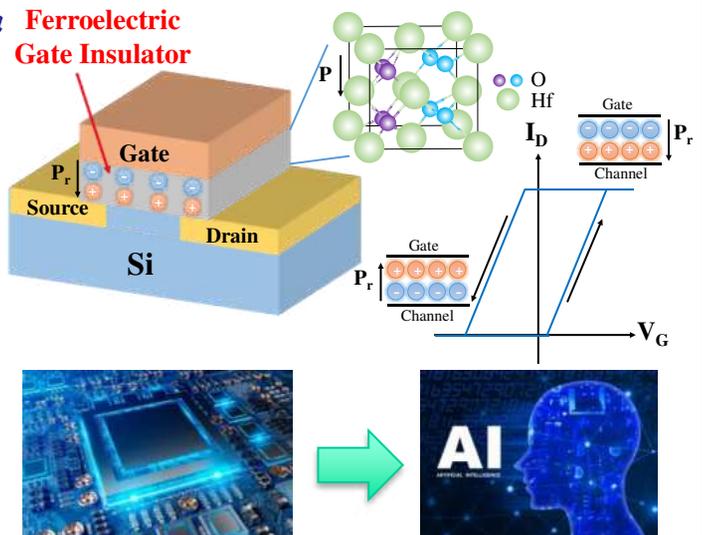


図5 Hf系強誘電体を用いた強誘電体ゲートトランジスタ

## 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. Ohmi, H. Morita, M. Hayashi, A. Ihara, and J.Y. Pyo, "Ferroelectric Nondoped HfO<sub>2</sub> Blocking Layer Formation for Hf-based FeNOS Analog Memory Applications", 78<sup>th</sup> Device Research Conference, pp. 67–68 (2021)..
- (2) S. Ohmi, A. Ihara, M. Tanuma, J.Y. Pyo, and J.W. Shin, "MFSFET with Ferroelectric HfN for Analog Memory Application", 80<sup>th</sup> Device Research Conf., Conf. Dig., pp. 77–78 (2022).
- (3) S. Ohmi, M. Tanuma, and J.W. Shin, "Precise V<sub>TH</sub> Control of MFSFET with 5 nm-thick FeND-HfO<sub>2</sub> Realized by Kr-Plasma Sputtering for Pt Gate Electrode Deposition", 81<sup>st</sup> Device Research Conf., Conf. Dig., pp. 120–121 (2023).
- (4) E.-K. HONG, K.E. PARK, and S. OHMI, "Sputtering Gas Pressure Dependence on the LaB<sub>x</sub>N<sub>y</sub> Insulator Formation for Pentacene-Based Back-Gate Type Floating-Gate Memory with an Amorphous Rubrene Passivation Layer", IEICE Trans. Electron., E105-C, pp. 589–595 (2022).
- (5) 大見俊一郎, "ハフニウム系強誘電体薄膜の不揮発性メモリトランジスタ応用", 応用物理, 93, 1, pp. 12–18 (2024).

## 角嶋研究室

半導体技術を利用した  
機能デバイスの創出

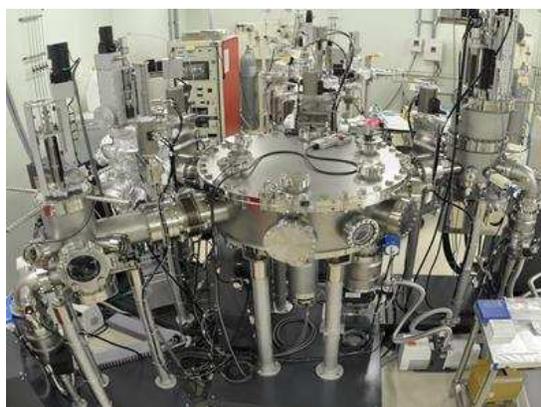
デバイスグループ  
電気電子コース  
すずかけ台・S2棟708号室

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。

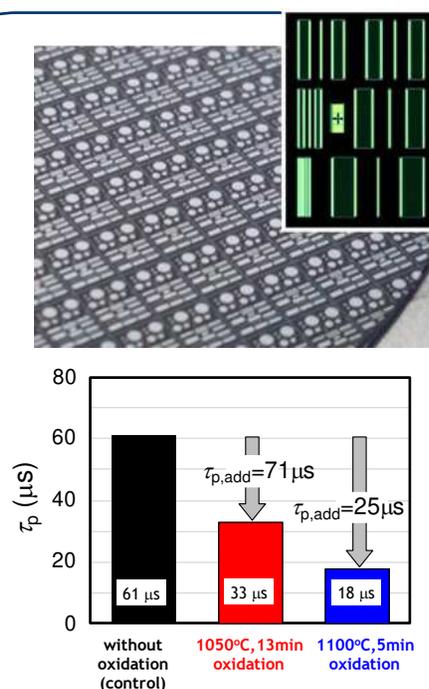


図1 少数キャリア寿命の高精度抽出

## 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気的評価技術の確立を目指しています。

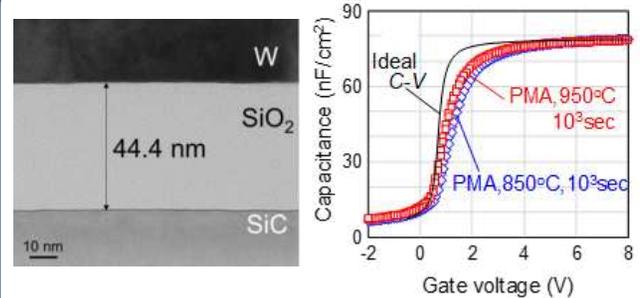


図2 SiCのMOSキャパシタの断面構造と電気特性

### ■ 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。

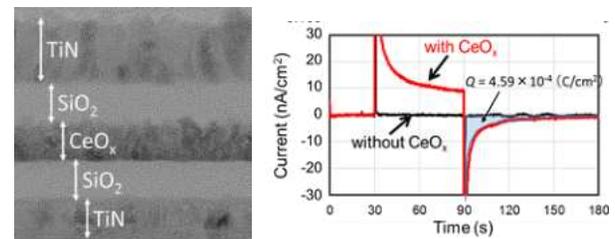


図3 試作した電気二重層キャパシタと充放電特性

### ■ 医療用センサの開発

医療機器の高感度化は測定の高速度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。



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

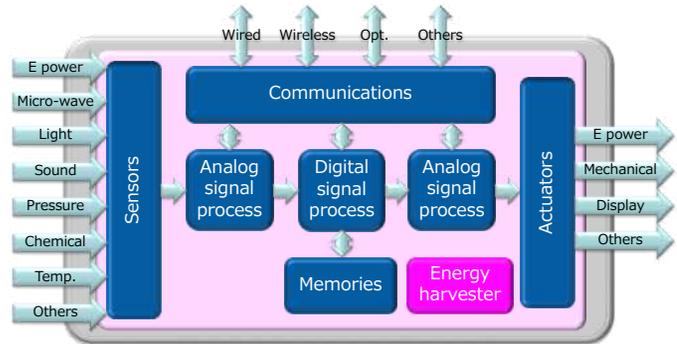
研究分野：電子デバイス

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。

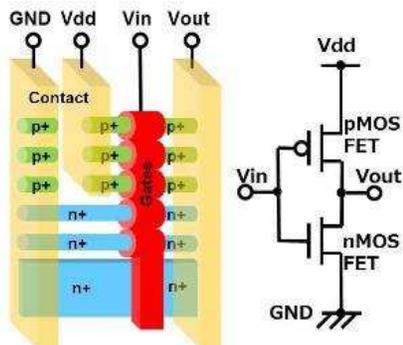


図：知的システムデバイスの信号処理フローと発電システムのブロック図。

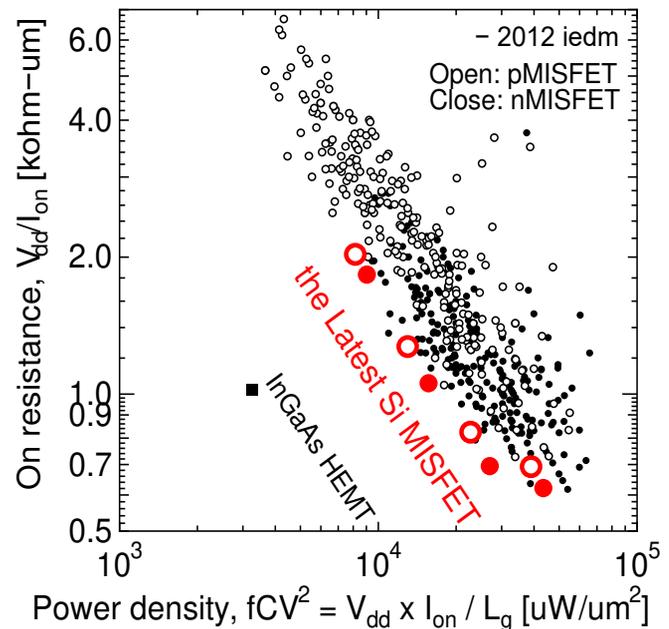
2 最近の研究成果

■ 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。

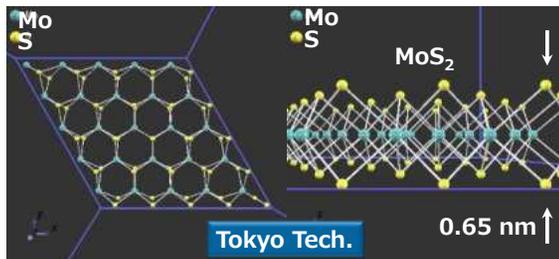


図：シリコンMISFETの性能推移。駆動時抵抗の駆動時消費電力面密度依存性。駆動エネルギー効率を向上させるには左下の方向へ研究を進める必要がある。

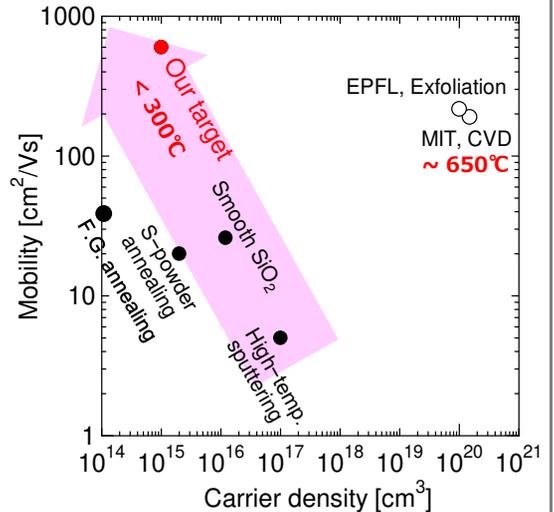
## すずかけ台・デバイスグループ

### ■ 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 Dichalcogenide (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&Benchmarkingof 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)



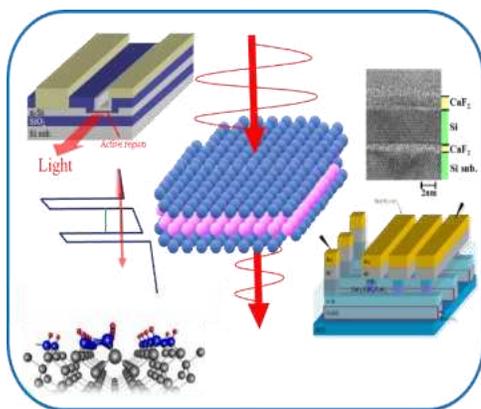
デバイスグループ  
電気電子コース  
すずかけ台・J2棟1102号室

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、半導体デバイスの物理  
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

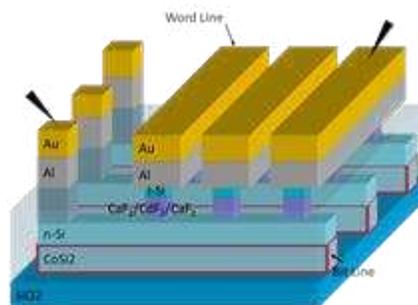
革新的機能創出を志向する、新しい集積デバイスのコンセプト提案と設計論の構築、その実験的検証を主軸として研究教育活動を進めています。金属・絶縁体・半導体など、性質が異なる複数の材料を接合したナノメートル厚の二次元積層薄膜、あるいは微結晶を形成する技術を創り出すとともに、その新しく創り出された人工結晶(≡ヘテロ・ナノ結晶)の中で生じる光及び電子の相互作用を支配する量子物性を利用して、高度な情報処理やエネルギー変換の極限機能を引き出す固体デバイス設計論の構築及び原理実証を行います。これらの研究活動を通じて、未来社会を支えるエレクトロニクス・システム構築へ向けたデバイス設計学理の構築と基盤技術の開拓に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



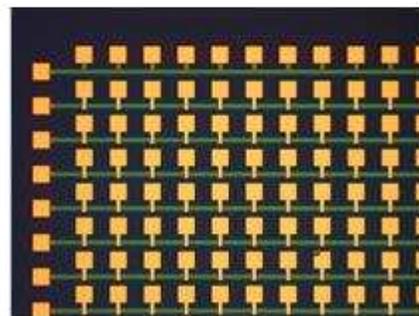
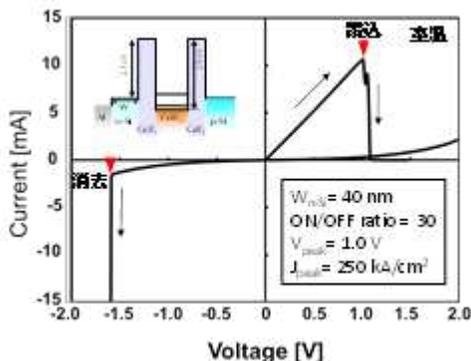
2 研究テーマ

■ 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が実現できます。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。



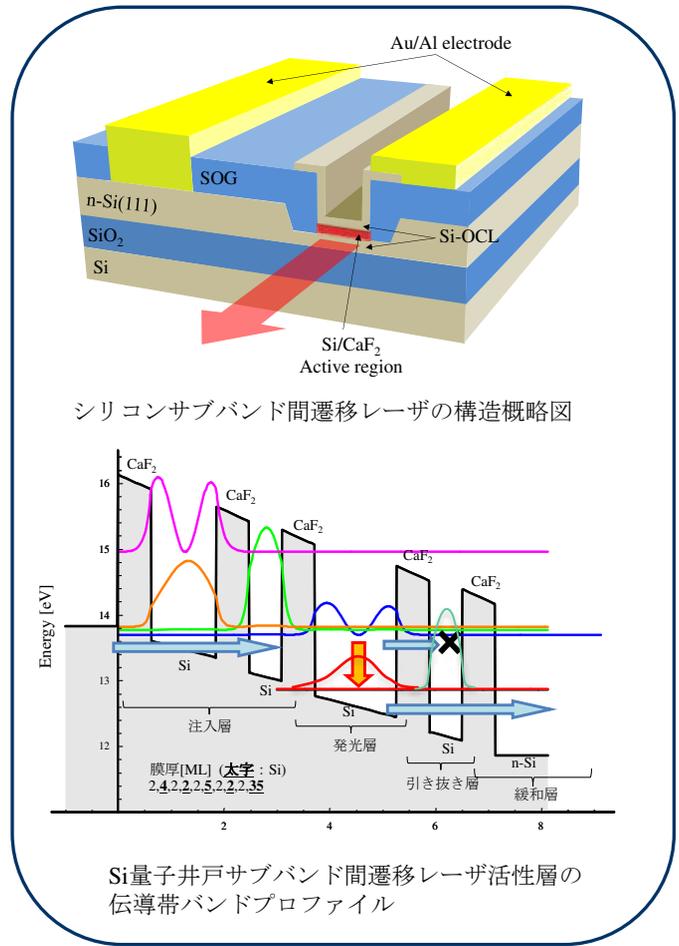
クロスポイント型集積構造 (概略図: 上, 実際に作製した構造の顕微鏡写真: 下)

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)

# 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

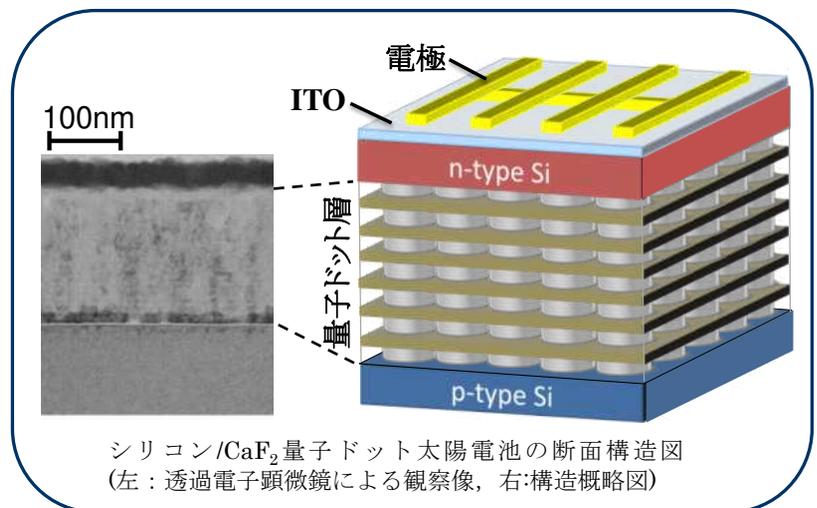
量子井戸中に形成されたエネルギー準位間の光遷移(≡サブバンド間遷移)の原理を利用すると、「光らない」半導体の代表格であるシリコンにおいても発光遷移が期待でき、しかもバンド内の電子・ホール の応答速度は高速であるため、シリコンLSIと集積可能な高速応答レーザを実現できる可能性があります。本研究では、シリコンと積層結晶形成可能な異種材料群を組み合わせた量子井戸の構造設計により、可視～赤外をはじめとする広範な波長での発光遷移を設計可能な量子井戸構造を提案し、そのレーザ発振の可能性に関する理論予測や、結晶成長・素子形成技術に関する研究を行っています。近年、電流注入と、光導波路を両立できる素子構造を形成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



電子材料・物性G  
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、磁気記録・記憶、パワーマグネティクス  
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

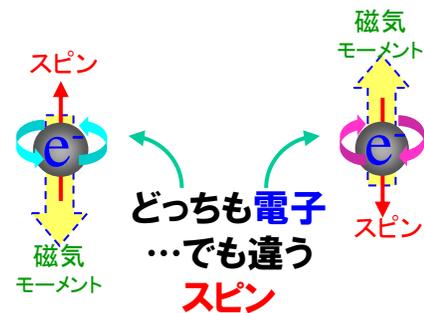
磁気抵抗ランダムアクセスメモリ、エネルギー変換用磁性材料  
ホームページ: <http://www.spin.pe.titech.ac.jp>

1 主な研究テーマ

当研究室は電子スピンや磁性の機能を利用した次世代材料・電子デバイスを生み出すことを目的として活動しています。

特に高効率な情報処理や大容量記憶を実現するスピントロニクス素子やカーボンニュートラルの実現に向けた高効率なエネルギー変換磁性材料であるパワーマグネティクスの研究を材料・デバイス技術レイヤーで展開しています。

この他にも当研究室で開発された対向ターゲットスパッタ技術を磁性元素を含む熱電変換材料などに応用する研究も行っています。

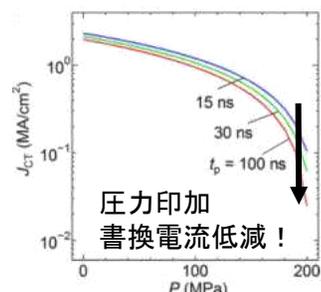
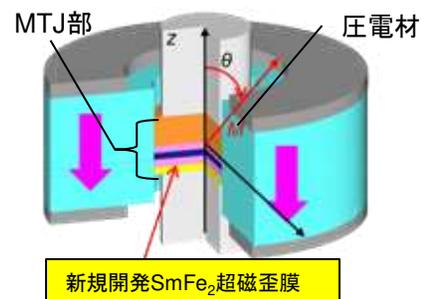


2 最近の研究成果

■ピエゾエレクトロニック・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ランダムアクセスメモリ(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いまだ限定的です。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、長期間の記録情報保持が難しくなってしまいます。

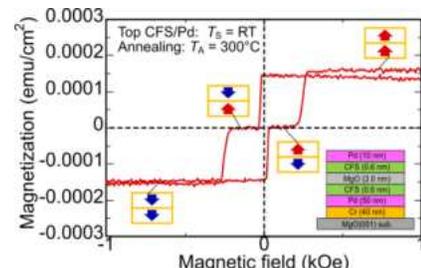
そこで、我々の研究室では、磁化反転の時にのみ、逆ピエゾ効果と逆磁歪効果を利用してエネルギー障壁を一時的に低減させる応力アシスト磁化反転(SAMR)を考案しました。さらに、高効率に圧力を印加でき、集積可能なピエゾエレクトロニック磁気抵抗デバイス(PE-MTJ, 右図)を他の研究室と共同で提案しました。最近、このPE-MTJの圧力印加構造の高性能化や本研究室で開発した垂直磁化層であるSmFe<sub>2</sub>を含むMTJの実現、応力アシスト・スピン注入磁化反転の原理検証の研究を行っています。



ピエゾエレクトロニック磁気抵抗変化素子SSE 128, 194 (2017).

■ 垂直磁化型ハーフメタル強磁性材料

ハーフメタル強磁性体(HMF)は、片方のスピンの電子しか電気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Co<sub>2</sub>FeSiやCo<sub>2</sub>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。最近では共同研究によりスピン軌道相互トルクを利用した磁化反転にも成功しています。



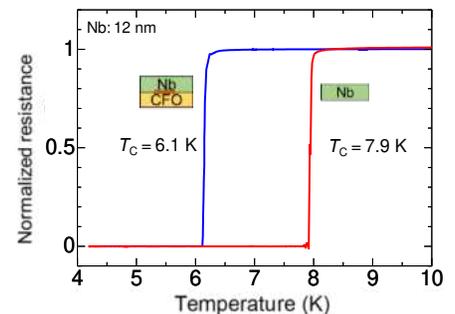
垂直磁化型フルホイスラー合金MTJ AIP Advances 8, 055923 (2018).

## 大岡山・材料・物性グループ

## ■ 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。

このような低温下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。



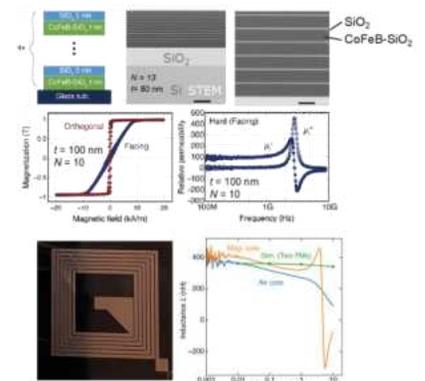
CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (CFO)による超伝導Nb薄膜の転移温度制御

## ■ 3次元磁気メモリの垂直磁化材料の開発

次世代の情報ストレージとして期待される3次元磁気メモリの材料研究を行っています。こちらのプロジェクトは全国8箇所の大学・研究機関と共同で遂行しています。

## ■ 高周波パワーマグネティクス材料

カーボンニュートラルを実現する高効率エネルギー変換技術であるパワーエレクトロニクスでは、回路動作の高周波数化によって小型化や高効率化、軽量化が実現できますが、GaNやSiCなどのワイドギャップ半導体の高周波動作化に対応した磁性材料の開発が喫緊の課題です。本研究室では対向ターゲット式スパッタ法により機能的で高品質な軟磁性ナノグラニューラ薄膜を開発しております。当研究室内だけにとどまらず、全国の大学の研究室や民間企業とも連携して研究を進めています。



Y. Takamura, et al., IEEE Trans. Magn. 2023.

## ■ 熱電フルホイスラー合金薄膜

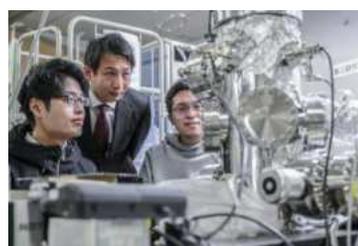
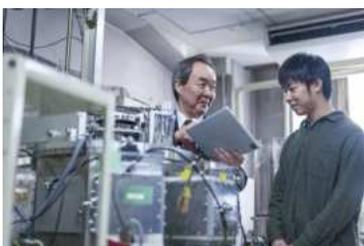
本研究室ではスピントロニクスの研究で培ったCo基フルホイスラー合金の知見を活かし、無害な熱電発電材料として期待されているFe基フルホイスラー合金薄膜の研究にも取り組んでいます。

## 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、今後ますます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？

当研究室では共同研究を積極的に行っており、学生の皆さんも参加しています。チームで研究する力を身につけるとともに、他研究室・他大学・他研究機関・民間企業の様々な人と関わる中で多くの刺激を受け、成長することができます。一方で、自分だけが担当する研究では、自ら仮説を立て、計画し、検証し、その結果を進捗発表していただきます。これらの経験を通じて、社会をリードし新たな道を開拓できる人材に育てて欲しいと願っています。





大岡山・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、スピナルブ、スピトランジスタ、単電子スピトランジスタ  
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、動作が大変高速である。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の持つ「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極め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る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/半導体を用いるスピナルブ・スピ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)]

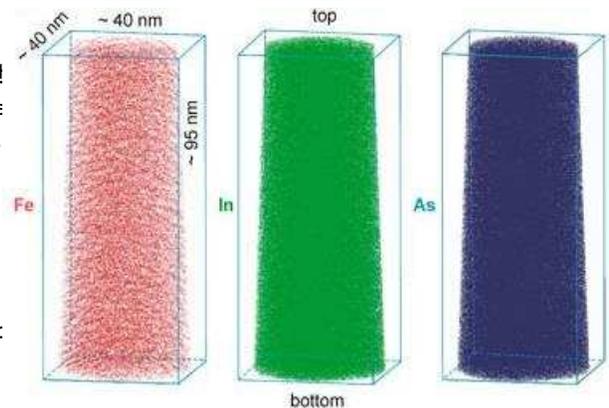


図1. 開発した(In,Fe)As結晶の原子分布。

### トポロジカル絶縁体を用いる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種類であり、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。

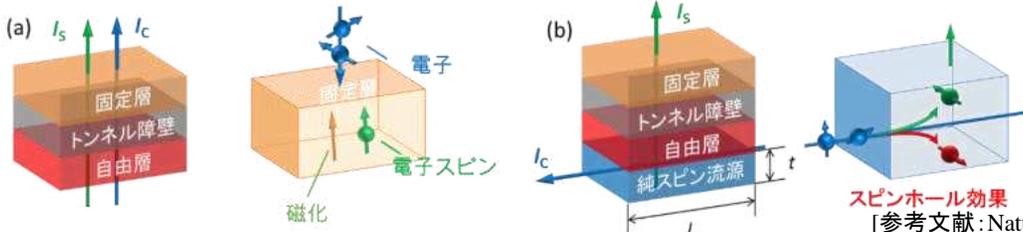


図2. 第2世代のSTT-MRAMと第3世代のSOT-MRAMの比較

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

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

# 大岡山・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」(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。

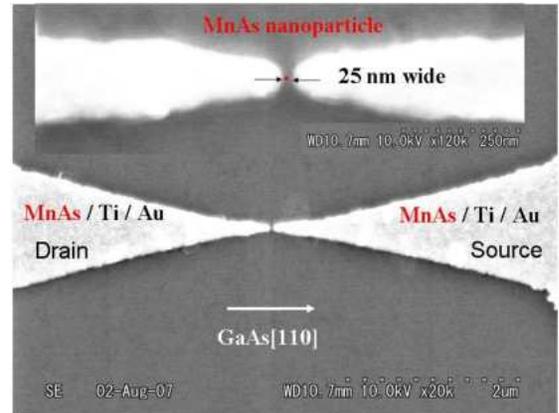


図3. 作製したSESTの走査型電子顕微鏡による平面像

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)]

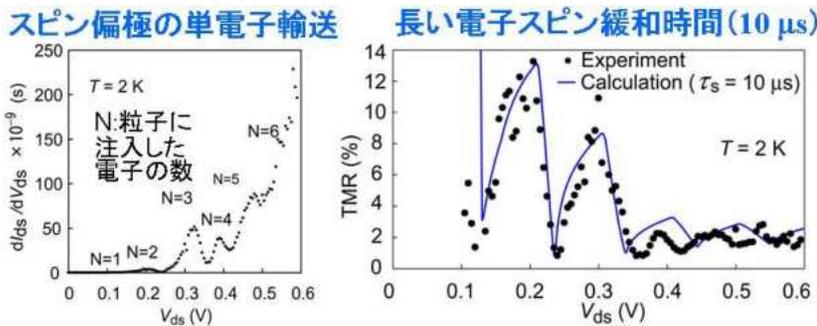


図4. SESTにおける微分電流電圧特性のクーロン階段(左)およびTMRの振動現象(右)の観測。TMR振動の実験を理論でフィッティングした結果、10  $\mu$ sと強磁性金属ナノ微粒子において世界最長のスピン緩和時間を実現した。

## 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。

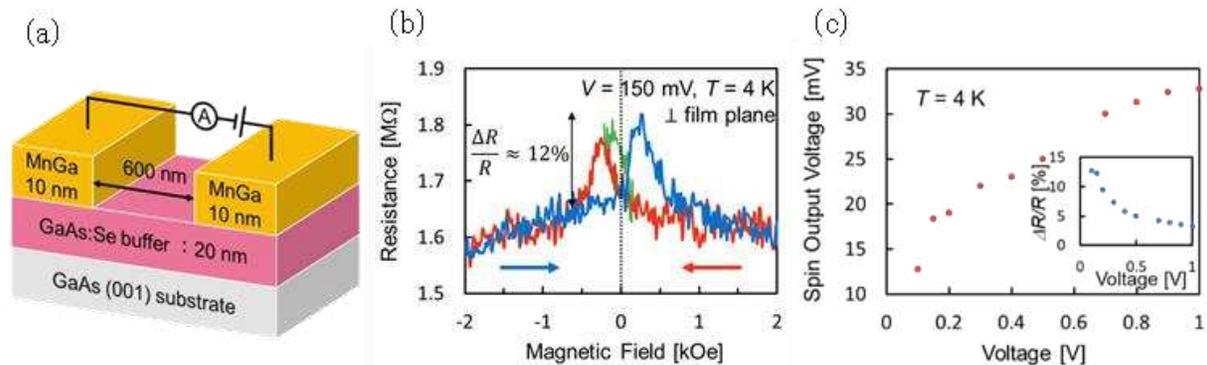


図5. (a) MnGa垂直磁化膜とGaAs半導体を用いたスピンプルプデバイス。(b) 観測した磁気抵抗効果のおよび(c)スピン依存出力電圧の例。いずれも世界最高特性を達成している。

## 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・田口研究室 デバイス、新規測定技術



材料・物性グループ  
電気電子コース  
大岡山・S3-719, S3-614

教授 間中 孝彰 准教授 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、誘電分極、誘電体、絶縁体、摩擦発電  
ホームページ: <http://www.pe.titech.ac.jp/lwamotoLab/>

## 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ます。有機材料を扱う際の基本を誘電性にとり、いろいろな現象に挑戦することが有機材料の本質を活かしたデバイス設計に重要であると考えています。

間中・田口研究室では、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、有機メモリ)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
- 物理的刺激による発電(摩擦発電など)に関する研究

## 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。

図1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。

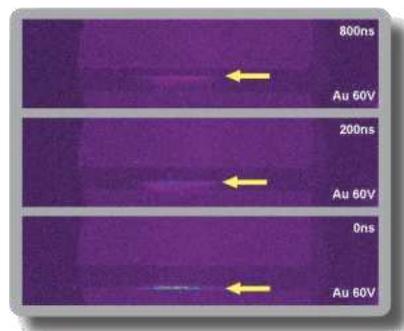


図1. 時間分解顕微SHG測定で観測される、デバイス中におけるキャリアの流れ。

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・材料・物性グループ

## ■ 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

分子の多様性は、有機エレクトロニクスの特徴の1つですが、同じ分子でも、配列制御によって性能向上や新機能の発現が期待できます。われわれは、高分子半導体の配向を制御し、そこから発現される様々な機能に着目した研究を行っています。

例えば、 $\pi$ 共役系高分子の1つであるポリジアセチレンは紫外線によって重合しますが、この際に円偏光を用いて重合を行うことで、キラリティを誘起できることを発見しました(図2)。キラル高分子は、らせん構造などの高次構造を持つものも多く、薄膜状のインダクタなどへの応用などが期待されます。また、円偏光によるキラル形成メカニズムに関する研究も行っています。

高分子半導体の移動度は、高分子主鎖を一方向に揃えることで向上するため、高分子配向に関する研究も盛んに行われています。このような高分子配向膜では、キャリア輸送に異方性が現れ、この移動度異方性を理解することが、性能向上には欠かせません。われわれは、発光性高分子半導体の1軸配向膜を作製し、配向した薄膜を流れるキャリアの可視化に成功しました(図3)。

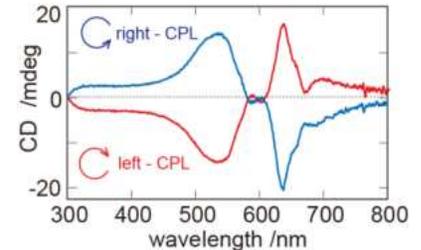


図2. キラルPDAのCDスペクトル

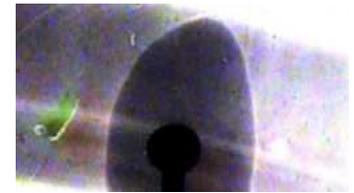


図3. 可視化された異方性のあるキャリア輸送

T. Manaka, H. Kon, Y. Ohshima, G. Zou, M. Iwamoto, Chem. Lett., Vol. 35, No. 9, pp.1028-1029 (2006).

T. Manaka, K. Matsubara, K. Abe, M. Iwamoto, Appl. Phys. Express, Vol. 6, No. 10, pp. 101601/1-3 (2013).

## ■ 物理的刺激による発電（摩擦発電など）に関する研究

電気電子材料として、有機材料はいろいろなところで利用されています。はじめ絶縁体として電流を遮断する機能が着目されました。都市部の電力供給を支える電力ケーブルの絶縁体として、例えばポリエチレンが利用されます。引き続いて電気伝導体・半導体としての物性研究から有機デバイスに展開されました。そこでは電流を絶縁する能力だけではなく、ペンタセンなどの有機半導体や高分子半導体のもつ電気伝導性、つまり電流を積極的に流す機能が主役です。

そして今、新たな展開として、私たちの研究室では誘電体の立場から発電材料としての電気電子材料を追求しています。物理的刺激により誘電体に分極エネルギーを蓄え、それを外部回路に電力供給する材料として誘電体をみれば、電荷変位と双極子回転の2つが発電のマイクロ起源です。私たちの研究室のもつ、2つの発電起源を可視化する手法は世界初のオリジナルの技術です。

誘電物理に立脚して発電材料を究め、最高の発電材料に求められる物性パラメータは何か、どんなデバイス構造・プロセスが発電源として適ったものであるのか、そして、そこから電力を引き出してエネルギーを余すことなく利用する回路システムはどうなるのか・・・さらにその先のテーマを求めて研究しています。

D. Taguchi, T. Manaka, M. Iwamoto, Appl. Phys. Lett., Vol. 114, Issue 23, 233301 (2019).

D. Taguchi, T. Manaka, M. Iwamoto, Appl. Phys. Lett., Vol.119, Issue 5, 053302 (2021).

(招待論文)田口大, 間中孝彰, 岩本光正, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J103-C, No.9, pp.395-402 (2020).

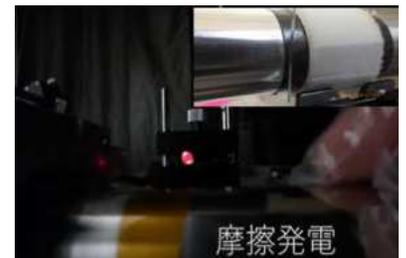


図4.摩擦発電の様子

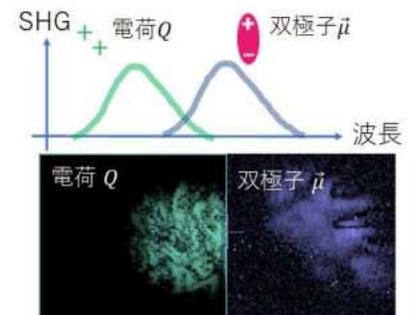


図5. 摩擦発電のマイクロ起源(電荷と双極子)の可視化

## 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、ということが重要です。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 西村昂人

研究分野: 半導体物性、太陽電池、光無線給電  
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、2019年度末で60GW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。

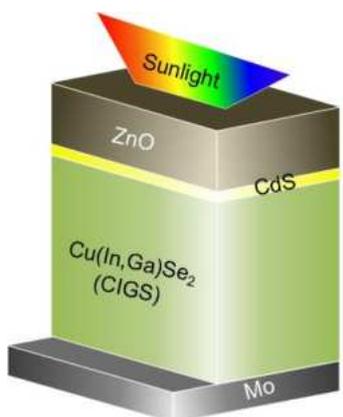
1. 高効率カルコパイライト化合物薄膜太陽電池 (CIGS)
2. カルコパイライト系新材料の開発
3. シリコン系太陽電池の安全な形成技術開発(シリコンヘテロ接合太陽電池、TOPCon型太陽電池)
4. 光無線給電用受光器(ワイドギャップペロブスカイト材料)

## 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)

$\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{SSe})_2$  (CIGSSe)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。

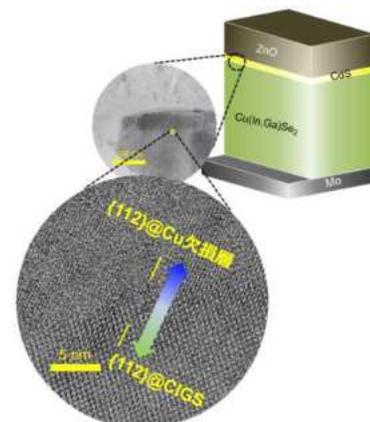
山田・宮島研では、このCIGS薄膜太陽電池の開発を行っています。太陽電池の開発には電気電子工学的な視点と材料工学的な視点が必要とされます。私達は光の入射側のpn接合界面が重要であるとの観点から、バンドギャップが広い $\text{Cu}(\text{In,Ga})_3\text{Se}_5$ 材料を接合界面に挿入することを提案、変換効率19.8%を達成することに成功しています。



CIGS太陽電池の構造



CIGS製膜用MBE装置

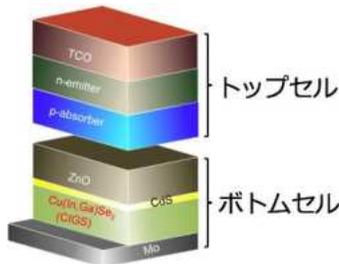


CdS/CIGSの界面評価

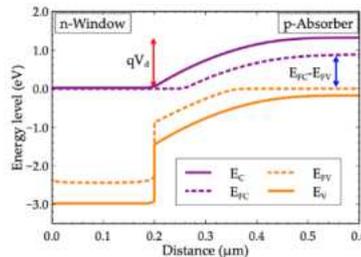
# 大岡山・材料・物性グループ

## ◆カルコパイライト系新材料の開発

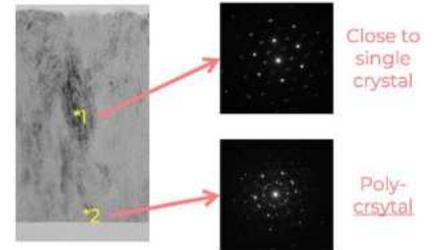
現在の社会は、石油や天然ガスなどの化石燃料から得られるエネルギーに依存しています。そこで、運輸・産業・民生が必要とするエネルギーを電気自動車・電気飛行機、電化工場・電化住宅の普及により、太陽光発電からの電気エネルギーでまかなうカーボンニュートラルな社会が実現できないでしょうか。そうすれば大幅なCO<sub>2</sub>削減が可能です。このためには超高効率な太陽電池が必要とされます。私たちは、そのための新しい材料系の開発を行っています。



高効率太陽電池の一例、  
タンデム太陽電池の構造



太陽電池のシミュレーション

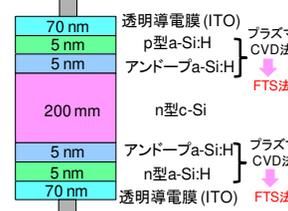


新しい透明導電膜材料の開発

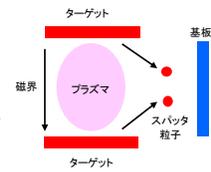
## ◆爆発性・毒性ガスを使用しないシリコン太陽電池 作製プロセスの開発

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)の形成とそれを応用した太陽電池の形成(シリコンヘテロ接合太陽電池、TOPCon型太陽電池)を行っています。また、より低ダメージな膜形成に向けて、対向ターゲットスパッタプロセスのプロセスシミュレーションも行っています。

### 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

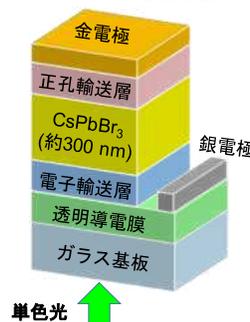
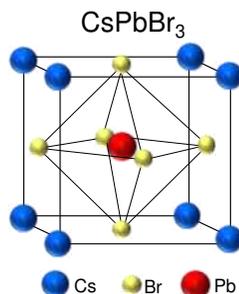
プラズマCVD・RFスパッタ複合装置



## ◆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高効率化を目指して、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。

### 受光器の構造



### 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・宮島研究室では太陽電池や受光器デバイスを自ら試作することが可能です。Si系、化合物系、酸化物系、有機系など様々な材料を取り扱っており、薄膜の作製・評価からデバイスの形成まで一貫して研究室内で行うことができます。



材料・物性グループ  
電気電子コース  
すずかけ台

准教授 荒井 慧悟

研究分野: 量子制御、量子センシング・イメージング、量子インフォマティクス  
キーワード: 固体量子センサ、ダイヤモンド、量子トランスフォーメーション  
次世代IoT・グリーンテクノロジー  
ホームページ: <https://keigoarai.net>

## 1 主な研究テーマ

人工知能・IoT・5G等が牽引するSociety5.0/DXの先にはSociety6.0の世界が待っています。この未来社会を支える技術のひとつは、情報処理サプライチェーンを統合的に高度化する「量子」であり、世界中が量子センサ・量子コンピュータ・量子ネットワークに投資を加速しています。

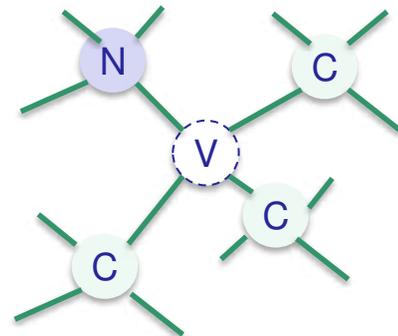
2022年度に発足した本研究室は、数ある量子技術のなかでも特に量子センシングに注目し、そこに情報科学(インフォマティクス)を融合することで、「量子トランスフォーメーション」と呼べるようなイノベーションの創出を目指します。

量子センシングは、量子コヒーレンスや量子もつれなどの量子的な効果を用いて物理量を精緻に計測する手法です。なかでも量子磁場センサとえば、極低温で動作する超電導量子干渉計やガラスセルに閉じ込めた原子ガスを用いる光ポンピング磁力計などが有名ですが、本研究室では、室温で安定して動作するという特長を持つ、**ダイヤモンド中の窒素・空孔中心(NVセンター)**を主に研究しています。

さらに、量子センシングの性能をより一層に向上していくため、統計処理や画像処理等の基礎概念から機械学習や量子計算、ノイズ理論といった最新の概念に至るまで、幅広いインフォマティクスを複合的に取り入れていきます。



量子が主軸の研究テーマ



ダイヤモンド中のNVセンター

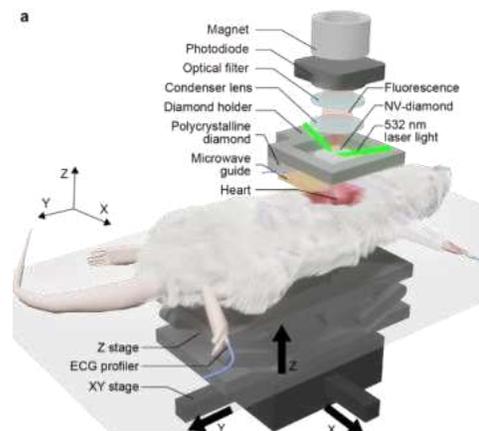
## 2 最近の研究成果

### ■ 超高感度量子センサ

ダイヤモンド量子センシングは、常温で高い感度を発揮できることが強みです。そのため、これまで核スピンやたんぱく質等の原子スケールから、生体磁気や鉱物磁性、電流・温度モニタリング等のマクロスケールまで、様々なシステムの計測が実証されてきました。

本研究では、センサの空間分解能を飛躍的に向上させ、ラットの心臓が作る磁場を世界で初めてミリメートル・スケールでイメージングすることに成功しました。さらに、得られた磁場画像に多数のパラメータからなる線形回帰分析を適用することで、磁場の源である電流ダイポールおよび電流分布を高精度に決定する手法を開発しています。

今後も量子メモリ・量子エンタングルメントの活用による高感度化や、圧縮センシングによる高速化など、情報科学を積極的に取り入れて、量子センサの高性能化を狙います。



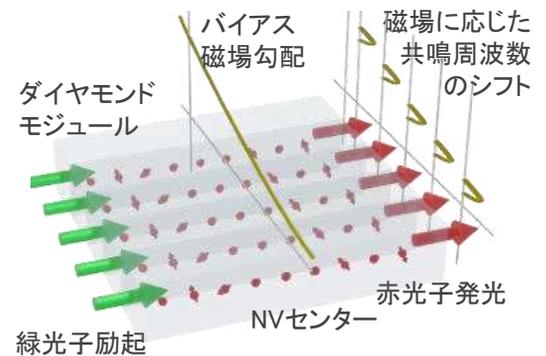
ラット心磁イメージングの概要

## すずかけ台・材料・物性グループ

### ■ マルチモダル量子センサ

ダイヤモンド量子センシングのもう一つの強みは、**磁場・電場・温度・圧力・回転**など様々な物理量を同時に計測できることです。同一地点で複数物理量を同時にマッピングできるようになると、次世代IoT社会において**サイバー・フィジカル空間**がより一層進化し、エネルギー利用効率化等の応用に付加価値を提供する技術になる可能性が拓けます。

本研究では、ダイヤモンドを複数モジュールに分割して、複数の物理量を同時に計測できるマルチモダル量子センサを開発しています。各モジュールは、磁場勾配をかけることによって駆動周波数を少しずつずらして独立に制御します。今後は、各モジュールを有効に活用するためにも、**量子計算**や**線形計画法**等の利用を模索しています。



マルチモダル量子センサのデザイン

### ■ 高温・高圧量子センサ

ダイヤモンドは高温・高圧という極限環境下でも安定した物性を持ちます。そのため、ダイヤモンド量子センサは幅広い温度・圧力でも機能するという稀有な特長を持ちます。高温・高圧という環境は、例えば超電導や固体電池、地球科学など、様々な基礎科学の分野で研究対象とされており、そこに高性能センサを提供する価値は高いと考えられます。

本研究では、 $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ・ $\sim 60\text{GPa}$ の環境でも動作する高温・高圧量子センサの開発を目指しています。高温はレーザー加熱やSiCヒーターを、高圧は**ダイヤモンド・アンビルセル**を用いて実現します。この極限環境下では、NVセンター自身の振る舞いも良くわかっておらず、基礎物理学の観点からも世界の研究者が注目しているトピックです。



高温・高圧量子センサの実験装置

## 3 教員からのメッセージ

COVID-19により、安心・安全社会の大切さを思い知らされました。このかけがえのない社会を守るうえで電気電子工学が持つ役割の重要性はとて大きいものです。当研究室は、異分野の多くの人々と協力し、**持続可能社会の創成をリードできる電気電子工学人財の育成**を重要ミッションのひとつと捉えています。

そのためには、研究活動を単に知識や技術の吸収の場と捉えるのではなく、**仲間と協働で新たな付加価値を創造する場**へと昇華するしるしを模索します。なぜなら、単なる知識の伝授は、費やした時間に比例する効果しか期待できませんが、仲間同士が触発し合えば、各々の指数関数的成長が期待できるからです。

また、みなさんが卒業・修了後にどのようなキャリアを歩んでも様々なフィールドで活躍できるように、私自身が戦略コンサルファームで培った知識・経験も総動員して、下記にいくつか例を挙げるような**トランスファラブル能力**を総合的に伸ばせる環境づくりを目指します。

- **論点思考力**: 社会へ付加価値を提供するにはどのような問題が本当に重要なのかを見極めるため、知的生産を強みとするビジネス業界で取り入れられている論点・仮説の思考法を、実践レベルで体系的に発信します。
- **言語化力**: コミュニケーションの根底にあるのは、自らの思考を論理的にわかりやすく言葉にする力です。どの業界でも通用する論理的ライティング・プレゼン力を日頃から精力的に指導します。
- **プロフェッショナリズム**: すべてが結果で評価される厳しい知的生産(研究開発等)の世界において、他者と円満・円滑に協働し、健康的かつ持続的に活躍していくための思考法をお伝えします。

「量子と情報」という本研究室の主要テーマは、昨今注目を集めている次世代社会のキーワードです。この熱いテーマを恰好の題材として、上記の目標と一緒に追求していきましょう。



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: <https://www.first.iir.titech.ac.jp/~iino>

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な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。

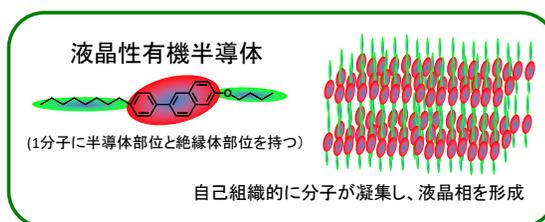


図1 代表的な液晶物質の分子構造と液晶相の凝集状態(スメクチック相)。自己組織的に分子が凝集し層構造の凝集構造を形成する。

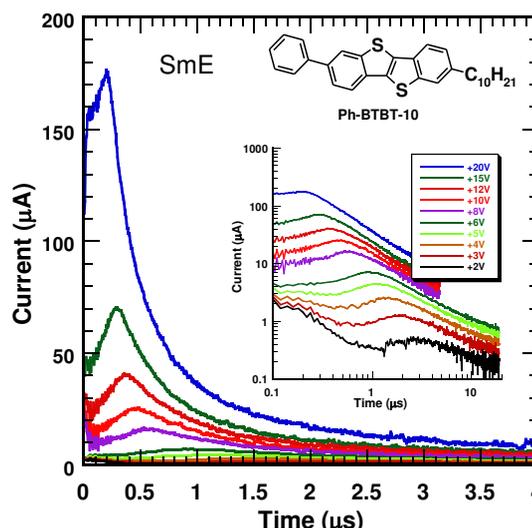


図2 Time-of-Flight法による液晶物質の移動度の評価例。Ph-BTBT-10は液晶物質の中で現在最も高い移動度を示す。

## すずかけ台・材料・物性グループ

## ■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。

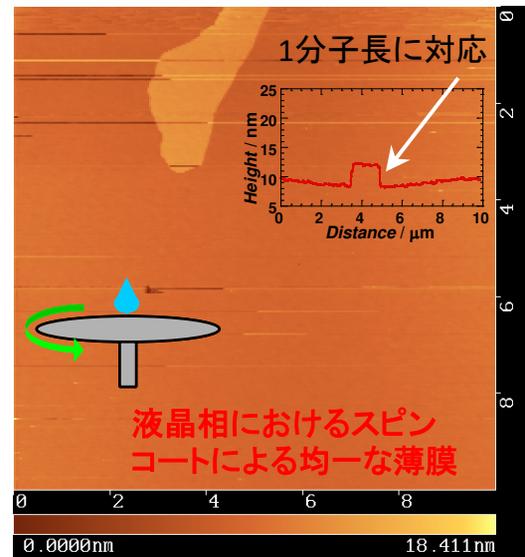


図3 溶液から液晶相を経由して作製した液晶性有機半導体の多結晶薄膜の例。表面形状を原子間力顕微鏡で観測すると分子長に対応するステップしか観測されず、非常に均一な膜であることがわかる。<sup>1)</sup>

## ■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 $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ を越す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。

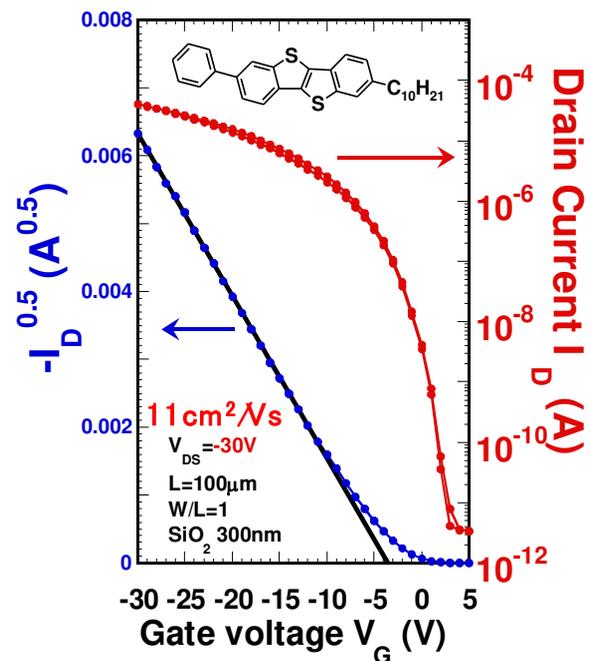


図4 液晶性有機半導体(Ph-BTBT-10)の多結晶薄膜を用いて作製した有機FETの伝達特性の例。簡易な溶液プロセスで作製した多結晶薄膜としては非常に高い移動度( $>10\text{cm}^2/\text{Vs}$ )を有するトランジスタが実現でき、画像表示デバイス用の薄膜トランジスタ(TFT)の材料として期待されている。<sup>2)</sup>

## ■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).

## 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

准教授 伊藤治彦

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

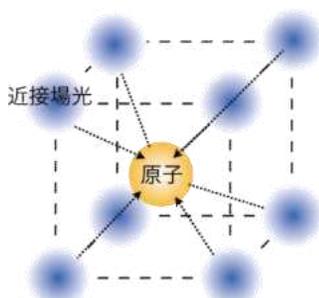


図1 近接場光光子

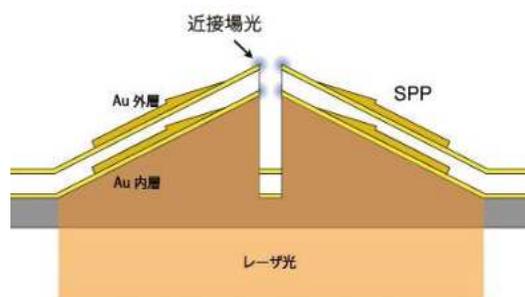


図2 単一原子トラップ

### ■ 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・ブロイ波のスクワイジ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

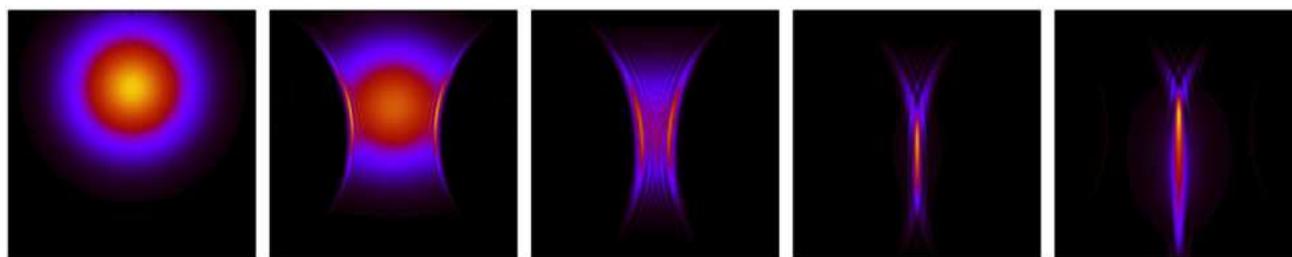


図3 原子のナノフォーカシング

## すずかけ台・材料・物性グループ

### ■ スピクラスタの実現に向けて

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。

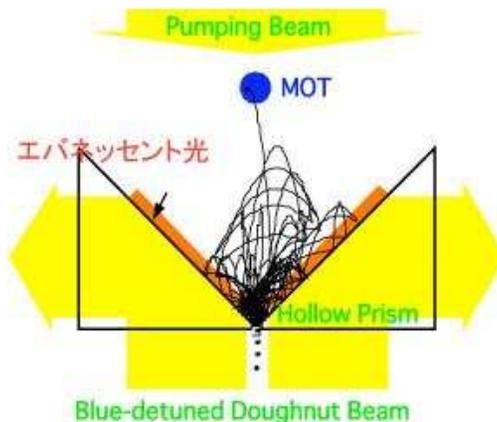


図4 エバネッセント光ファネル

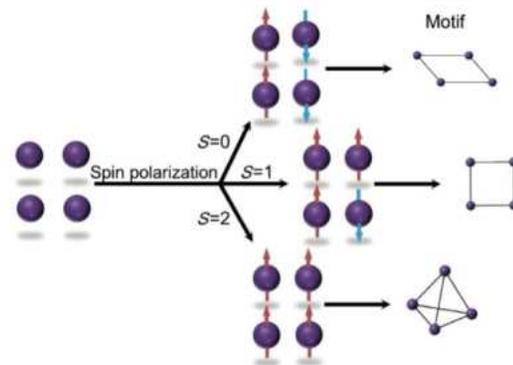


図5 スピクラスタの形成

### ■ 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求します。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。

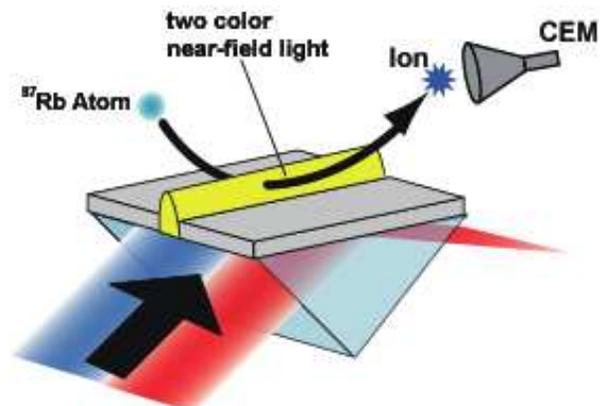


図6 ナノスリット原子センサー

## 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ック, 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ック, 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



材料・物性グループ  
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 Maria Vanessa Balois-Oguchi

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、機械学習、光冷却、  
物体の透明化・不可視化、黒体、バイオセンシング、  
表面増強ラマン散乱分光

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. 分子内および分子間分析のための表面増強ラマン分光法

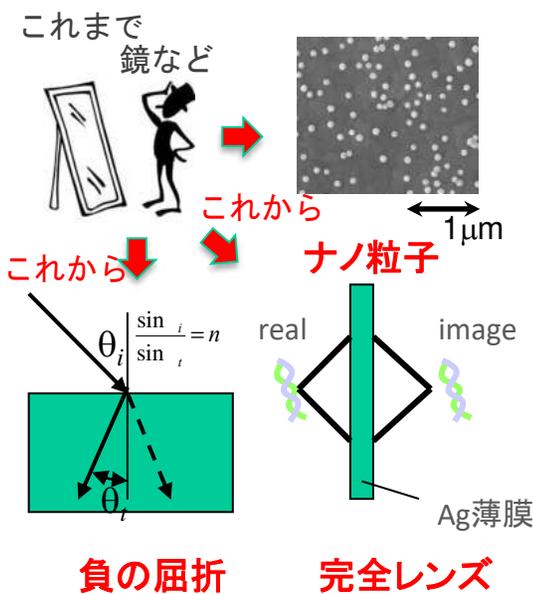
## 2 最近の研究成果

### ■ 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。



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、包むと中の物を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。

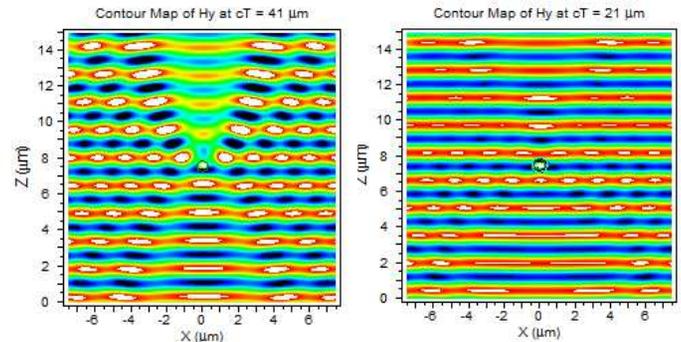
## すずかけ台・材料・物性グループ

### ■ 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材料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、メタ材料を使って**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」

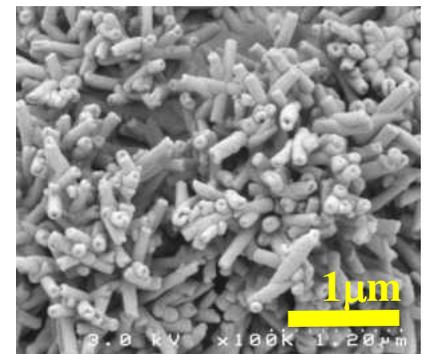
クローキング(透明化)あり  
散乱無く波面が乱れない  
中央の物質が「見えない」

### ■ バイオ・メタ材料 (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。



ハスの葉黒体メタ材料の電子顕微鏡写真。

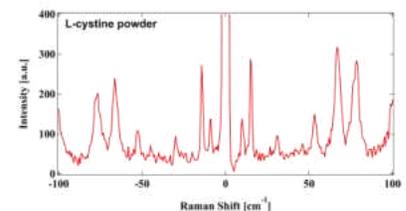
- ・「光を吸収するものほどよく発光する」というキルヒホッフの法則があります。赤外光源などの発光素子に用いることができます。赤外線の利用は、今競争が激しい分野の一つです。

- ・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。

### ■ 分子内および分子間分析のための表面増強ラマン分光法

表面増強ラマン分光法(SERS)のような増強分光法は、**分子内および分子間相互作用**の物理的・化学的特性に関する豊富な情報を得るために、光と物質の相互作用を利用する。

当研究室では、ギャップモード配置のプラズモニック・ナノ構造を設計・利用して、**ラマン分光スペクトルのフィンガープリント領域**( $200\text{cm}^{-1} \sim 2000\text{cm}^{-1}$ )と**低周波領域**( $5\text{cm}^{-1} \sim 200\text{cm}^{-1}$ )の両方を増強し、(1)試料の特性評価(温度やひずみなど)、(2)センシング(ウイルス検出など)に役立てたいと考えている。



L-シスチン粉末試料からの低周波ラマン

## 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。



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つになっています。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。

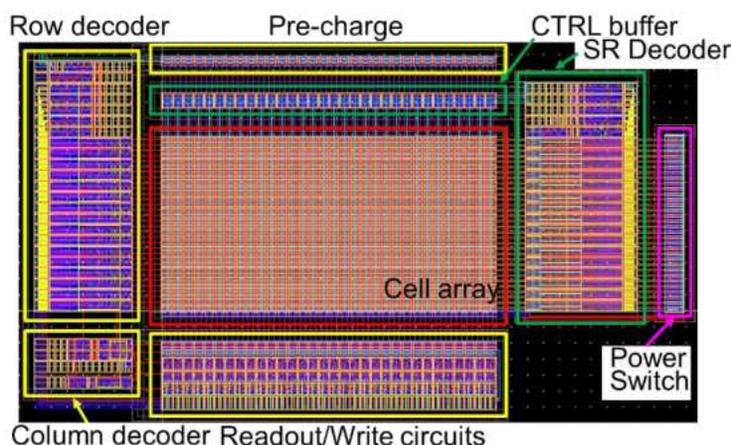
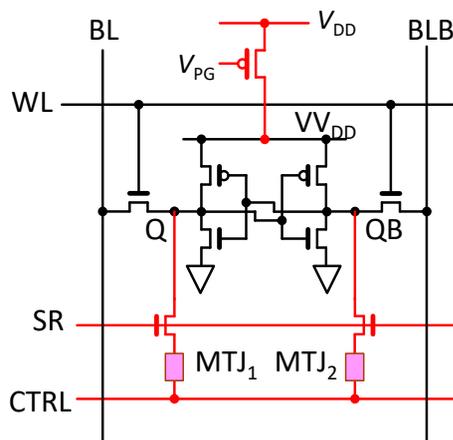


図1 (a) 強磁性トンネル接合 (MTJ) を用いた不揮発性SRAMセル, (b) 不揮発性SRAMの試作チップ

## すずかけ台・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。

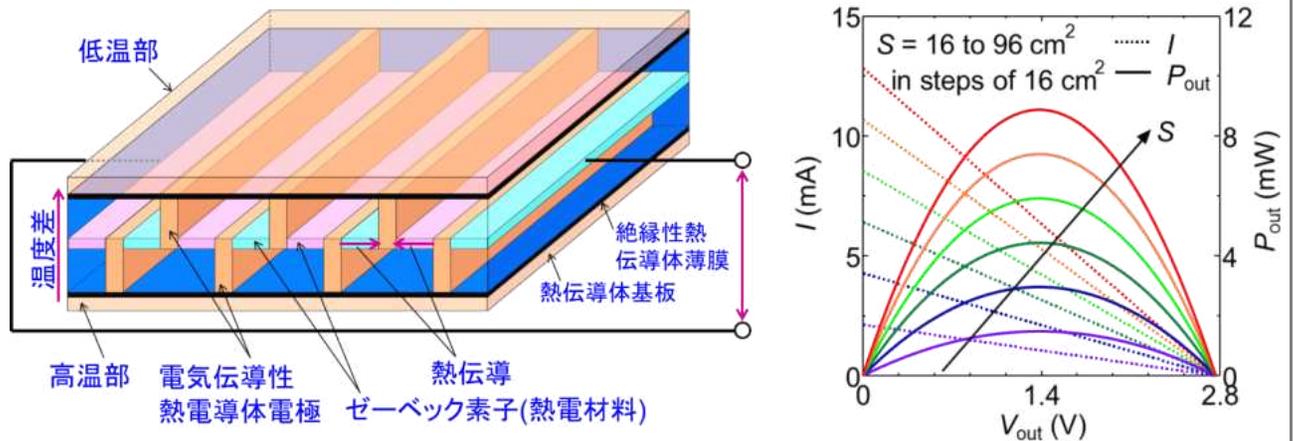


図2(a) 薄膜熱電材料を用いたマイクロ熱電発電モジュールと、(b) その出力特性。

## ■ 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ックトランジスタ (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。

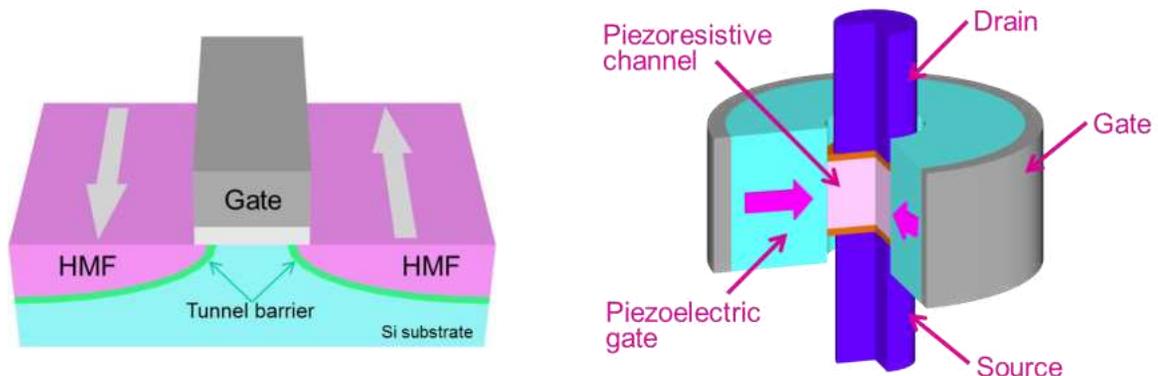


図3 (a) ハーフメタル強磁性体(HMF)ソースドレイン・スピンMOSFET. (b) ピエゾエレクトロニック・トランジスタ。

## 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！

## 當麻研究室

ナノフォトニクスで叶える  
バイオ計測

材料・物性グループ  
電気電子コース  
すずかけ台

准教授 當麻真奈

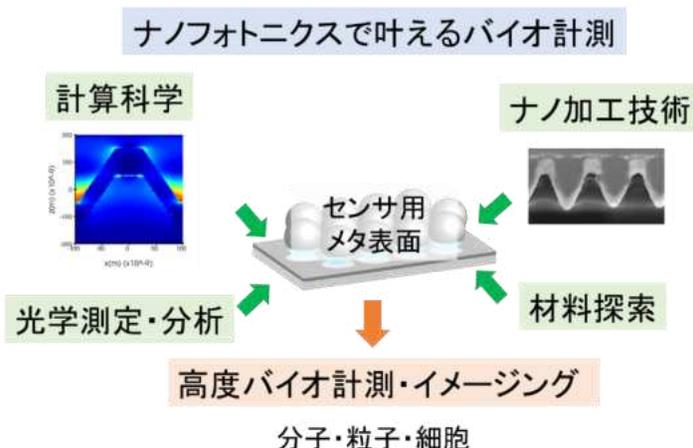
研究分野: ナノフォトニクス、プラズモニクス、界面科学  
キーワード: 表面プラズモン、メタ表面、自己集合構造、  
バイオセンサ、モバイルヘルス、環境モニタリング、食品検査  
プラズモニックカラー

## 1 主な研究テーマ

ナノ工学の分野では、光の波長以下のナノ構造を配列することによって、材料本来のものとは異なる“人工的な”光学特性を持つ表面が注目を集めています。このような表面はメタ表面とも呼ばれ、微細構造の設計によって、多様な光学特性を持つ表面を創り出すことが可能です。

私たちの研究室では、このメタ表面を使って、新しいバイオ計測法を創製することを目指しています。具体的には、計算科学、ナノ加工、材料探索、光学測定・分析、装置設計、データ処理などを駆使して、高度なバイオ計測・イメージングを実現します。

これにより、これまで専用の装置で検出されていたバイオセンサを手持のモバイル端末でもできるようになったり、今までになかったイメージング法により新しい知見が得られると考えています。



## 2 最近の研究成果

## ■ 発色・光吸収する金属ナノ構造配列

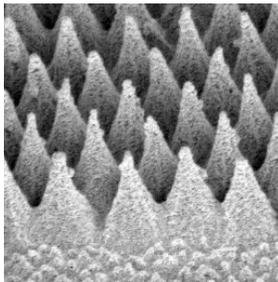
新しいバイオ計測・イメージング法を開発するには、測定を行うセンサ基板の開発が重要です。私たちの研究室では、微細な構造配列を持つ表面における光学現象に着目しています。金は金色、銀は銀色というように、通常金属の表面には金属光沢が見られますが、光の波長(数百ナノメートル)以下の大きさの微細構造を持つ金属表面では、全く異なる“色”が現れます。これは、金属の自由電子と光の電磁波との相互作用によって引き起こされる表面プラズモン共鳴によって、特定の波長の光が吸収されるために起こります。プラズモンによる光吸収は、色素のように退色が起こりません。また、強い光吸収をナノメートルの極薄い膜で実現できるため、色材や印刷材料としても研究が進められています。

## すずかけ台・材料・物性グループ

## ■ 金属ナノ構造配列の作製

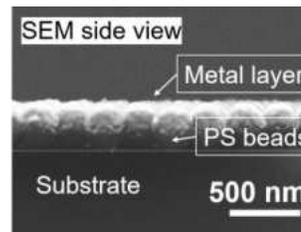
ナノメートルスケールで制御された金属ナノ構造配列を作製するには、一般的に電子線リソグラフィなどの大型の設備を必要としますが、私たちの研究室では、誘電体ナノ粒子の自己集合構造を使って大面積に様々な光学特性を持つ金属ナノ構造配列の作製に成功しています。

## ■ 黒色の金ナノ円錐アレイ



Nano Lett. (2013)

## ■ 発色する金属ナノドームアレイ



## 発色体

JJAP (2019)

MCLC. (2021)

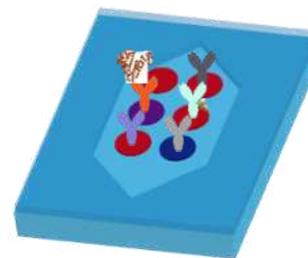
## ■ モバイルバイオセンサ

私たちの研究室では、発色する金属ナノ構造表面を使って、スマートフォンなどのモバイル端末で、疾病や健康状態に関する生体分子を検出するバイオセンサ技術の開発を進めています。

これまで病院や専門の検査機関で行われてきた検査を、モバイル端末を使って自宅で行うための技術はモバイルヘルスとも呼ばれ、コロナ禍で在宅医療の重要性が増している今、大きな注目を集めている分野です。

また、生活の中で使用できるバイオセンサ技術は、超スマート社会においてもフィジカル空間からの生体情報の取得に役立つと考えられます。

## モバイル型バイオセンサー

色が変わる  
センサチップスマートフォンによる  
測定・解析

## 3 教員からのメッセージ

当研究室は2023年に発足する新しい研究室です。ナノフォトニクスによるバイオ計測法は物理・化学・生物の研究要素を含む境界領域研究ですので、研究室での研究活動を通して、複雑な問題を解決するための幅広い視野と融合知を自然と身に着けることができます。また、ヨーロッパの研究機関との研究交流を予定しており、国際感覚や人間力に富む人材を育成することを目指しています。自分の強みを活かしつつ、電気・電子工学の枠組みに捕らわれず新しい研究課題にチャレンジしたい、国際的な経験をしてみたい、と考えている学生を広く募集します。

## 中本研究室

## ヒューマン嗅覚インタフェース



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)  
 ずずかけ台・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/>

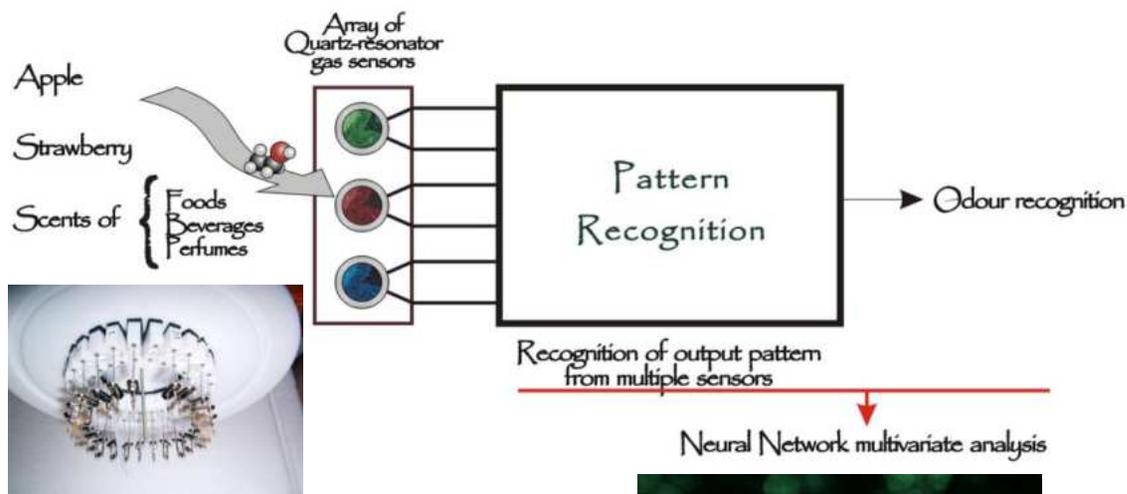
## 1 研究内容・目的

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・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)



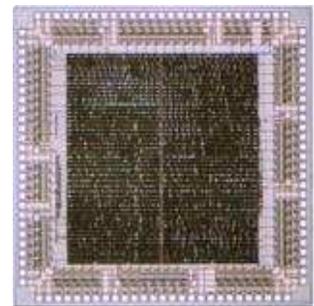
HMD  
ウェアブル嗅覚ディスプレイ



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



インターネット



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。

# Plasma Electronics 赤塚研究室 プラズマエレクトロニクス



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

研究分野: プラズマエレクトロニクス、プラズマ分光学  
キーワード: プラズマ計測、分光計測、原子分子過程、衝突輻射モデル、非平衡分布、半導体プロセスプラズマ  
ホームページ: <https://akatsuka.zc.iir.titech.ac.jp/>

## 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、プラズマ化学

放電プラズマは、半導体製作プロセスや材料工学・医歯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発光スペクトル解析や、励起状態密度のモデル解析等、プラズマ化学の研究に取り組んでいます。

### 2. 産業応用プロセスプラズマの計測と数値シミュレーション、プラズマ物理学

半導体エッチングや、薄膜デポジションなど電子工業の現場では、プラズマ装置が日々稼働しています。ガソリンエンジンなどでもスパークを飛ばすとプラズマが生じます。その中の電子温度・密度やガスの温度、ラジカル密度、空間電位の解明などをプラズマ物理学の手法で数値シミュレーションをおこない、さらに計測実験と比較し、理解に努めています。

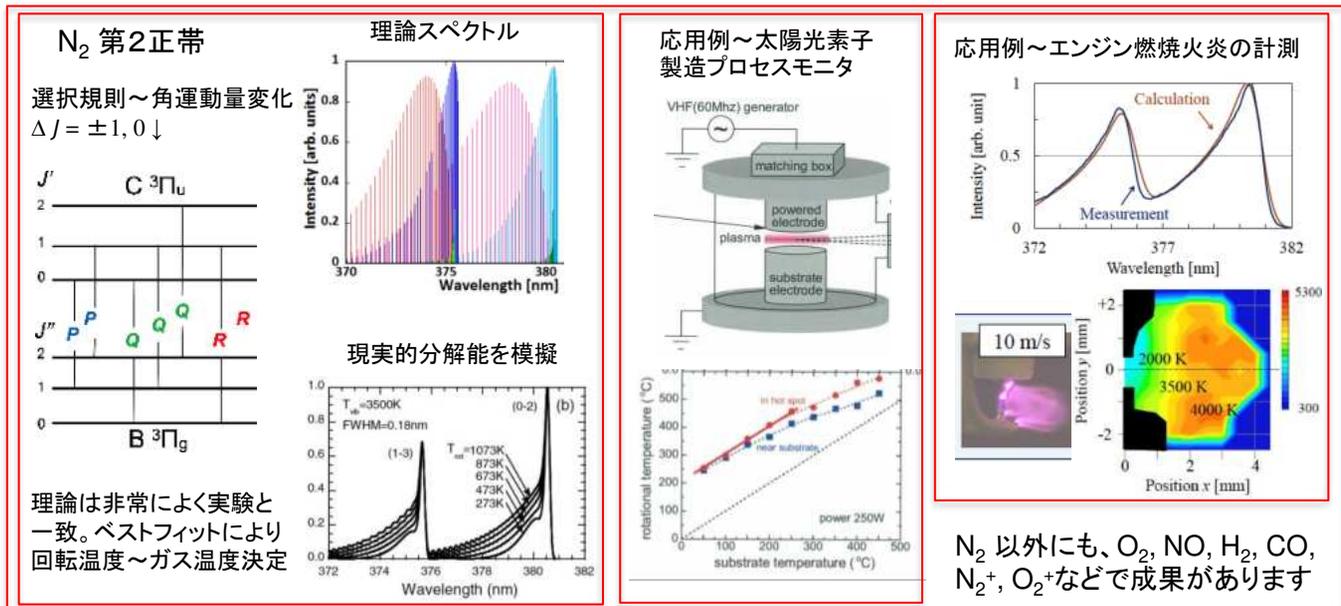
### 3. プラズマ中の非平衡性とエントロピー～統計熱力学と情報理論

プラズマの電子エネルギーや励起状態分布は、一般にマックスウェル・ボルツマン分布にはなりません。そのような非平衡な場合、「温度」をどのように定義するのか、情報理論に基づき種々のエントロピーを用いて、「温度」を再考します。

## 2 最近の研究成果

### プロセスプラズマの発光分光計測～さまざまなプラズマパラメータの決定～プロセス制御

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。特に中性分子の回転温度はガス温度の近似値となることを見出し、これによりプラズマの熱的構造を理解できるようになりました。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。一方、分子イオンの回転温度は全く異なる分布となり、電界強度やイオン温度を示している可能性を見出しています。



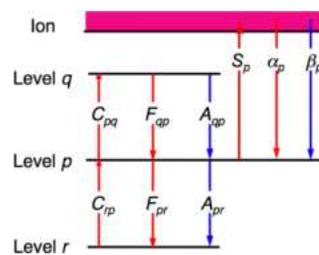
電気電子系 原子核工学コース/電気電子コース  
融合理工学系 原子核工学コース

電子温度・密度の発光分光計測～励起状態生成消滅の衝突輻射モデルとその応用

非平衡プラズマ中の励起状態は、ボルツマン分布に従わないため、その数密度の電子温度・密度の関数とした理論計算には、素過程～電子衝突と輻射遷移～に立脚した「衝突輻射(CR)モデル」が必要です。従来から我々の得意分野でした。

逆に、分光測定された励起状態数密度から、電子温度・密度の導出が原理的に可能です。これにより従来困難だった電子温度・密度の分光測定を可能としました。トモグラフィ(断層)計測による空間分解測定法も開発し、「応用物理学会注目講演」としてプレスリリースされ、注目されています。

半導体プロセスモニタへの応用を念頭に、アルバック社との共同研究に取り組んでいます。



励起状態の生成消滅～電子衝突(赤)と輻射遷移(青)でおおよそ記述可能～衝突輻射モデル

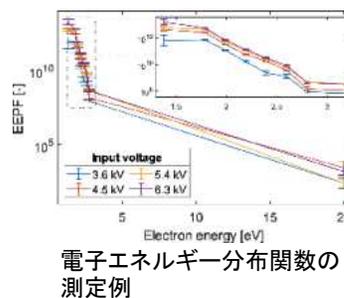
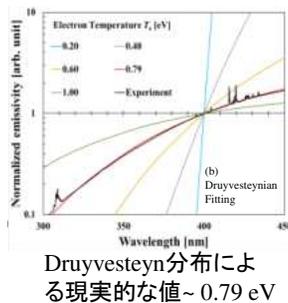
トモグラフィック計測で、空間分布も計測可能に←応用物理学会プレスリリース

エッチング用ICPプラズマの電子温度の空間分布分光計測

連続スペクトルを用いた大気圧低温プラズマの電子温度・密度の発光分光計測

近年、大気圧下で発生でき、触っても火傷しない様な「低温大気圧プラズマ源」が開発され、医歯学への応用が期待されています。しかし、簡便な装置では電子温度・密度計測が不可で、応用導入が遅れています。

これに対して、我々は連続スペクトル計測を適用し、簡便な計測法を提案・実証しました。大気圧の場合、電子エネルギー分布関数を適切に仮定することにより、適切な電子温度・密度が導出されることがわかりました。



さらに、機械学習の手法を用い、電子エネルギー分布関数も求められます。

研究室OBによるこれらの成果は、第20回プラズマエレクトロニクス賞(2022)、第44回応用物理学会優秀論文賞(2023)を授与され、高く評価されています。

プラズマ中の非平衡性と、エントロピー～統計熱力学と情報理論

プラズマを構成する各粒子は、特性スケール長や特性時間の差により、一般にエネルギー分布がボルツマン分布から外れた非平衡状態となります。

そのような場合、系の「温度」をどのように定義すれば、数理物理学的に妥当か、統計熱力学やエントロピー理論を用い、非平衡状態の「温度」につき、理論研究を行っています。

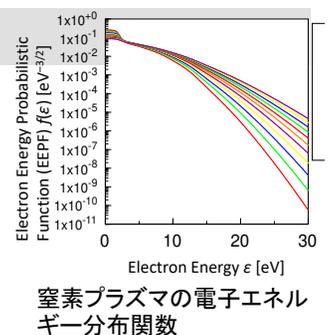
例えば、窒素プラズマの電子エネルギー分布関数  $f$  は、2項近似 Boltzmann 方程式(1)の解となり、右上図のようになります。

$$-\frac{d}{d\varepsilon} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{E}{N} \right)^2 \frac{\varepsilon}{\sigma_c + \sum_i \sigma_{si}} \frac{df}{d\varepsilon} + \frac{2m}{M} \sigma_c \varepsilon^2 \left( f + \frac{kT_e}{e} \frac{df}{d\varepsilon} \right) \right] + \sum_i \varepsilon \frac{N_i}{N} \sigma_{si}(\varepsilon) f(\varepsilon) = 0$$

$$-\sum_i (\varepsilon + \varepsilon_{si}) \frac{N_i}{N} \sigma_{si}(\varepsilon + \varepsilon_{si}) f(\varepsilon + \varepsilon_{si}) = 0$$

一方、温度  $T$  の定義は  $\frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_{V,N}$

もし、Gibbsエントロピーが適用できれば、右下の式から温度を再定義できそうですが、それで良いかは不明です。TsallisやRenyiなど、種々のエントロピーの可能性を、統計熱力学・情報理論の立場から検討します。



$$S = -k \int_0^\infty F(\varepsilon) \ln[f(\varepsilon)] d\varepsilon$$

$$U = \langle \varepsilon \rangle = \int_0^\infty \varepsilon F(\varepsilon) d\varepsilon$$

$$F(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon} f(\varepsilon)$$

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、それに限ら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。
- 本学のアルバック協働研究拠点をベースに、一部は、企業とも共同で研究を遂行しています。
- 令和5年度は、博士課程3人、修士課程7人、卒研2人が在籍しています。
- 就職先：核融合科学研究所, 東京エレクトロン, NTT西日本, 村田製作所, ソニー, キオクシア, DNP, 富士フイルム, など

**浦壁・原田研究室**  
 (三菱電機パワーエレクトロニクス  
 基盤技術共同研究講座)

**パワーエレクトロニクスの  
 基盤・要素技術**



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-210

特任教授 浦壁 隆浩 特任准教授 原田 茂樹

研究分野: パワーエレクトロニクス

キーワード: パワーデバイスシミュレーション, 小型・高効率電力変換器  
 ゲート駆動回路

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

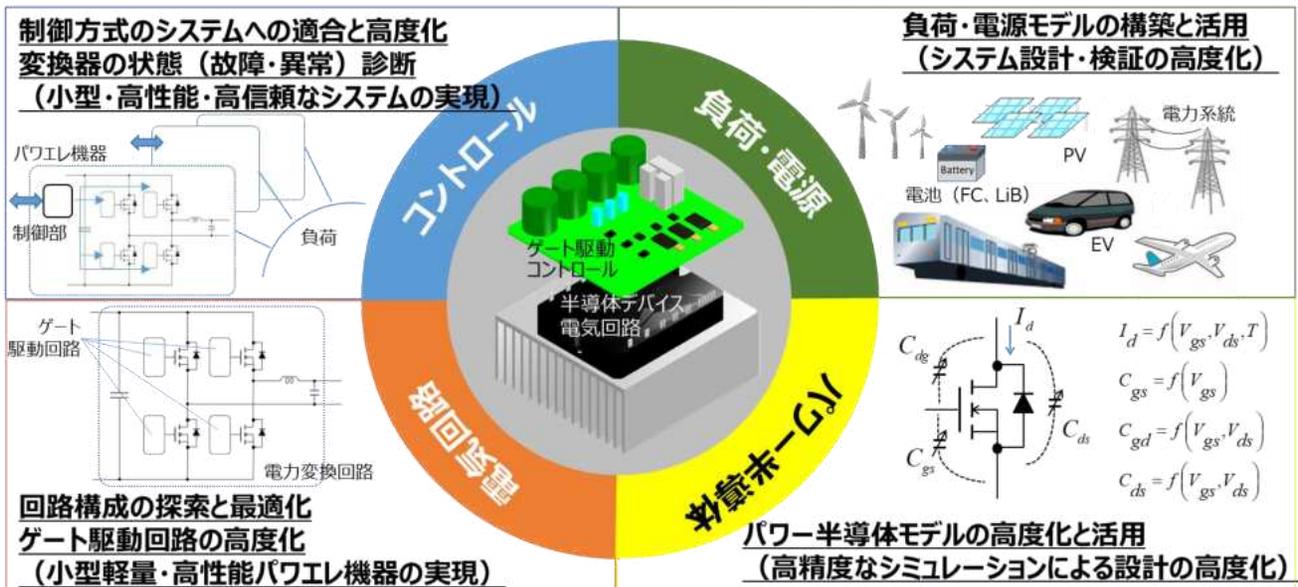
**1 主な研究テーマ**

- パワー半導体デバイスの過渡応答を表現するデバイスモデルの構築
- 直列接続されたパワー半導体デバイスのゲート駆動回路方式の研究

**2 最近の研究成果**

**研究室の概要**

本研究室は、三菱電機と東京工業大学の共同の研究室です。多様化と高度化を深める社会ニーズを洞察し先進のパワーエレクトロニクス機器の創出を目的として設置されています。パワーエレクトロニクス機器は、家電製品や電力送電装置といった小さなものから大きなものまで、社会の様々なところで活躍しており、その進化により社会がさらに便利に省エネになってきています。共同研究講座では、藤田研、萩原研、佐野研も参加して、将来に備えたパワーエレクトロニクスの電気回路・制御技術の研究に取り組んでいます。浦壁・原田研では、機器設計・開発を効率的に行うために重要なパワーデバイスモデルの構築や、パワーデバイスやパワーエレクトロニクス機器を有効に使いこなすためのパワーデバイスシミュレーション技術やゲート駆動回路技術の研究に取り組んでいます。



# 大岡山・電力・エネルギーグループ

## 温度特性を考慮したGaNデバイスモデルを構築(研究成果その1)

パワーデバイスは、機器の電力変換特性を決定する重要な構成因子です。近年、次世代パワーデバイスの窒化ガリウム(GaN)を適用した製品が多く見られるようになりました。GaNは、従来のシリコン(Si)と比較して、高速動作が可能・低損失といった特長があります。GaNを適用した高性能(低損失・高速駆動でコンパクト)な機器を設計・開発を効率的にするには、高速な過渡特性まで再現できる高精度なGaNデバイスモデルを用いたシミュレーション検証が重要です。

デバイスの物理特性に捕らわれず任意の数式で表現するビヘイビアモデルの手法を用い、25~150°Cの順方向静特性を表現できるGaNデバイスモデルを開発しました。25~150°Cの範囲において、各温度の実測とモデルの平均二乗偏差の平均値が1.47A(定格60Aに対して2.5%の精度)であることを示しました。(1)式は順方向特性のモデル式、図1はモデルと実測の100°Cの $V_{DS}$ - $I_D$ 特性を示す。

$$I_D = F_{temp1}(V_{GS}, T) \times F_{25C1}(V_{GS}) \times \left( 2 - e^{\frac{-V_{DS}}{F_{25C2}(V_{GS})}} \right) \times \tanh \left( -\frac{V_{DS}}{F_{25C3}(V_{GS})} \times F_{temp2}(V_{GS}, T) \right) \quad \dots(1)$$

— : 25°Cにて最適化したパラメータ  
— : 温度補正用のパラメータ

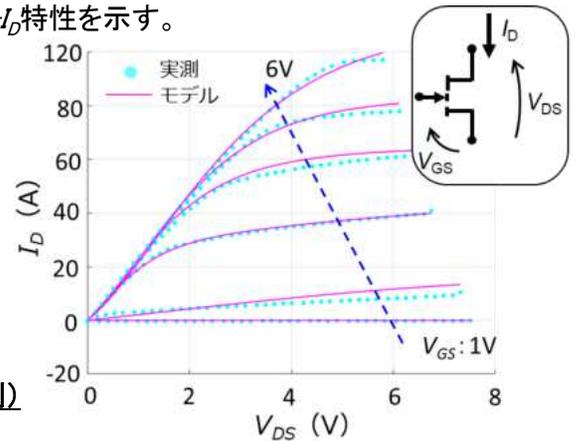


図1 100°Cの $V_{DS}$ と $I_D$ の関係(一例)

## ゲート磁気結合方式を用いたSiC-MOSFET/SiC-SBDパワーモジュール直列駆動(研究成果その2)

パワー半導体素子を直列に接続して1つのデバイスのように扱えたら、パワーエレクトロニクス機器の耐圧を上げるだけでなく、損失を抑えることができます。しかし、直列素子間の電圧バランスを均等にするには困難です。直列駆動を実現するために、ゲート配線をトランスで結合する磁気結合方式<sup>(1)</sup>が提案されていますが、トランスのインダクタンスにより発生するゲート電圧振動の抑制、さらなる電圧アンバランスの改善が課題となっています。

そこで、磁気結合方式に、ゲート電圧の振動を抑制するダンピングゲート駆動方法と、電圧のアンバランスをさらに改善するDG端子間にコンデンサCdgを追加する構成を併用する方式を提案しました。3.3kV-SiCモジュールを用いた試験機により、直列接続にて1800Vのスイッチング試験を行いました。上下素子のゲート信号の伝送差を150nsとし、電圧アンバランスが発生する条件において、オン動作パルス幅を変化させて、①磁気結合、②磁気結合+ダンピング、③磁気結合+ダンピング+Cdgの電圧アンバランス度を評価した結果、①>②>③でアンバランスが改善されることを確認しました。なお、どの方式も適用しない場合の電圧アンバランス度は80%となります。

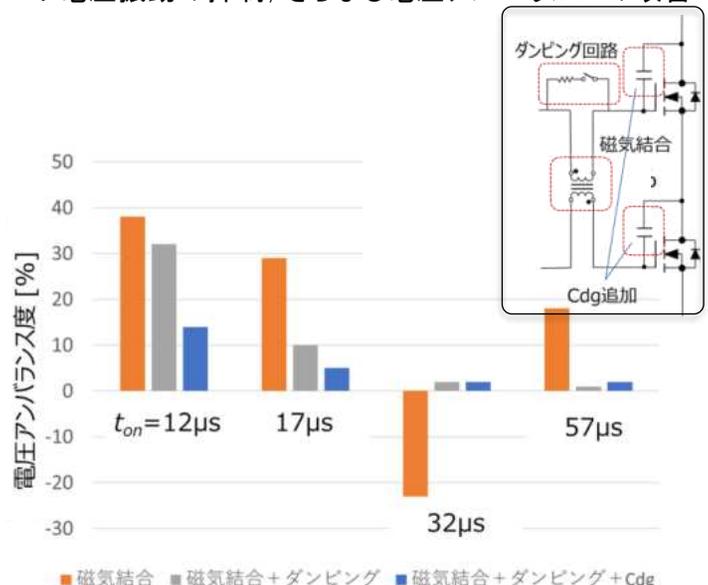


図2 オン動作パルス幅ごとの電圧アンバランス度(ゲート信号伝送差150nsの条件)

(1) Kiyooki Sasagawa, Yasushi Abe, and Kouki Matsuse, "Voltage-Balancing Method for IGBTs Connected in Series", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 40, NO. 4, JULY/AUGUST 2004, 1025-1032 (2004)

### 3 教員からのメッセージ

当研究室は、三菱電機との共同の研究室です。三菱電機は家電、自動車、電車、電力向けのパワーエレクトロニクス機器を開発・設計・生産をしています。当研究室では企業の研究者との交流が活発であること、研究テーマが製品や企業の開発に直接結び付いていることから、研究がどう社会の役に立つのかを感じながら、研究活動を行うことができます。一緒に、新しいアイデアで、パワーエレクトロニクス研究を進化させ、社会に貢献していきましょう。



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・S3-609

准教授 河辺 賢一

研究分野: 電力システム工学

キーワード: 電力システムの解析・運用・制御, 風力発電, 太陽光発電, 蓄電池, 同期発電機, パワーエレクトロニクス応用機器, 数値解析(シミュレーション)

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。

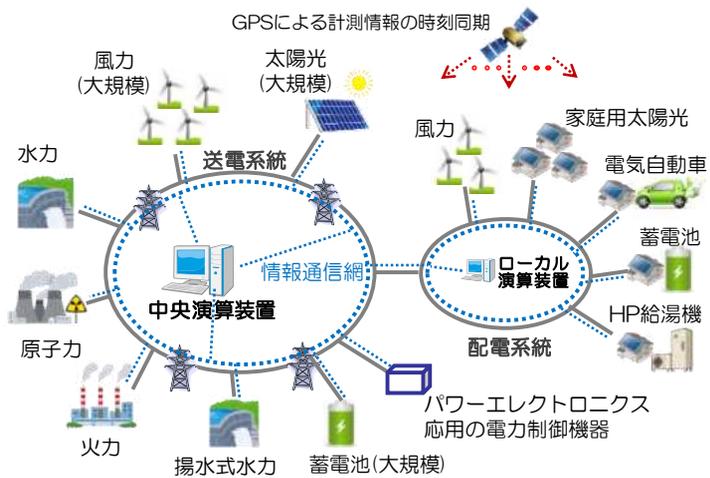


図1 将来の電力システムのイメージ

## 2 最近の研究成果

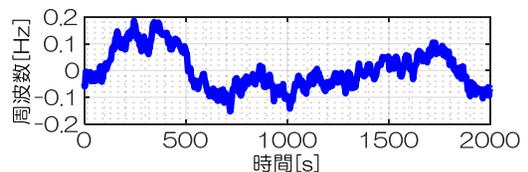
### ■ 再エネ導入時の周波数安定性の安定化手法の開発

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、火力発電機の外、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。

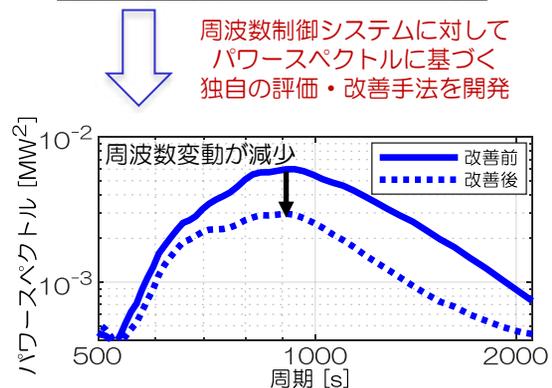
さらに、再エネは、従来の同期発電機と異なって慣性力をもたない発電方式であるため、電源脱落時の周波数変化率(RoCoF: Rate of Change of Frequency)が大きくなってしまい、停電リスクが高まるという課題があり、これに対しても新しい対策が必要であると考えています。

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



周波数制御システムに対して  
パワースペクトルに基づく  
独自の評価・改善手法を開発

周波数変動のパワースペクトル

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システム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。

- ・ 広域システム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)

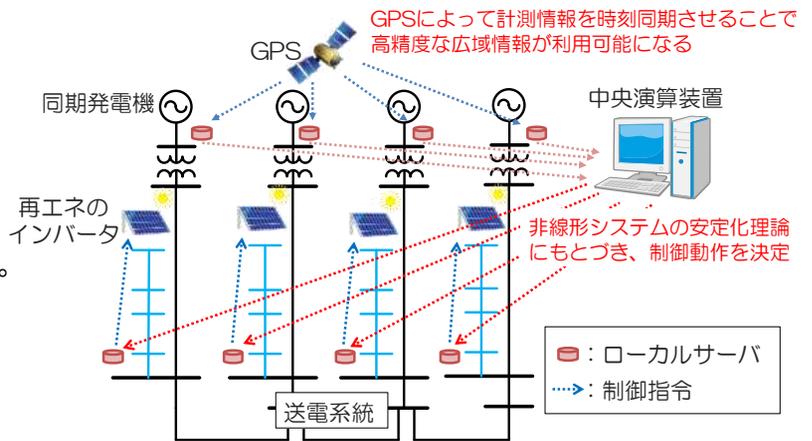


図3 当研究室で提案するスマートインバータによる広域安定化制御システムの概念図

## ■ 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

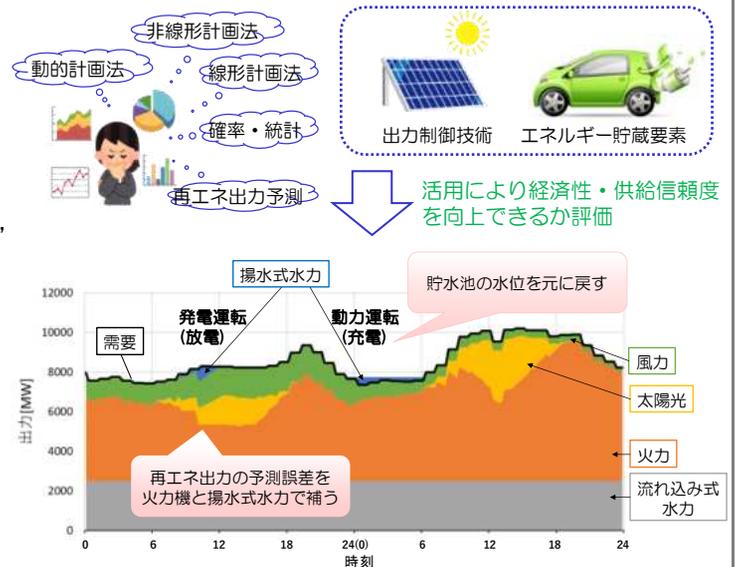


図4 再エネ連系時の需給運用シミュレーションの例

## 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。



電力・エネルギーG  
電気電子コース・エネルギーコース  
大岡山・S3-615

准教授 竹内 希

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. 気液界面プラズマを用いた水の浄化

プラズマは高エネルギーの電子やイオン、反応性の高い活性種を高密度に生成することができます。難分解性有機物を含んだ処理水に対してプラズマを生成すると、これら高エネルギー・高反応性の粒子による有機物分解が可能で、近年話題となっている有機フッ素化合物類(PFAS)や、海上油田などで大量に放出される酢酸を分解対象として、実用化に向けて分解速度・分解効率を向上すべく研究を続けています。

### 3. 気液界面プラズマの反応過程の解明

プラズマと液体との界面では、気相から液相または液相から気相への活性種などの輸送の他、気相活性種の界面への衝突による液相活性種の直接生成や、PFASなどの界面活性剤の吸着とプラズマによる分解など、興味深い現象が起きています。ただし、その多くは詳細が未解明であり、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。

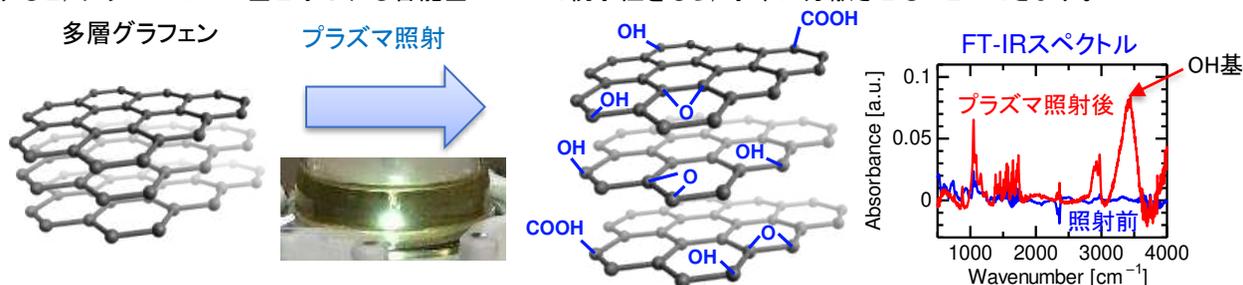
### 4. ハイブリッド直流遮断器

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、ヒューズ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

## 気液界面プラズマを用いた水の浄化

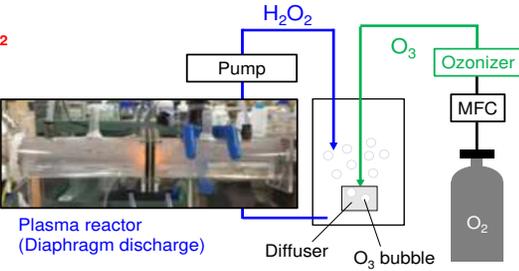
プラズマにより生成されるOHラジカルなどの活性種を用いて、水中に含まれる難分解性有機物を分解し、水を浄化しています。高速・高効率処理を目的としたプラズマ・オゾン併用方式では、ダイヤフラム放電プラズマを用いて過酸化水素を高速生成し、オゾナイザにより生成したオゾンと反応させて、OHラジカルを生成しています。処理液を電極として生成する気液界面プラズマでは、近年問題となっている有機フッ素化合物PFASの効率的な分解が可能です。

**Reproduction of  $\cdot\text{OH}$  from  $\text{H}_2\text{O}_2$**

$$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{O}_3 \rightarrow 2\cdot\text{OH} + 3\text{O}_2$$

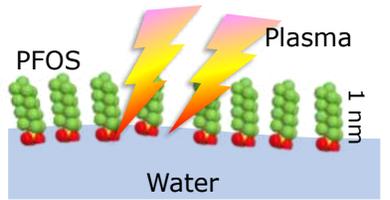
By plasma (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)      By ozonizer (O<sub>3</sub>)





Plasma reactor (Diaphragm discharge)

Diffuser      O<sub>3</sub> bubble



PFOS      Plasma

Water

プラズマ・オゾン併用方式      気液界面プラズマによるPFAS分解

## 気液界面プラズマの反応過程の解明

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標としています。

**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



気泡      処理液

プラズマ

ガス

**処理液**

- 活性種による有機物の分解
- 導電率、粘性の変化



10 mm

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。

## 高電圧大電流用ハイブリッド直流遮断器の開発

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。最近では電気接点の代わりにヒューズを使った高電圧大電流の直流が遮断可能なハイブリッド直流遮断器を開発しています。

### ヒューズ半導体ハイブリッド遮断器の構成



ヒューズ

- ◎ 限流効果が大
- ◎ 低い運用コスト



半導体

- ◎ 高い遮断性能



高度に融合

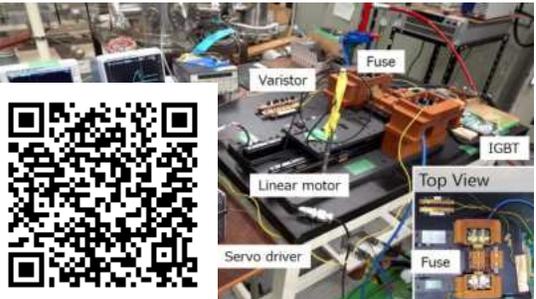


リアモータ

- ◎ 高速高精度位置決め制御

### 遮断再投入試験の様子





## 3 教員からのメッセージ

- 竹内研究室では、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。
- 令和3年度は、博士課程3人、修士課程9人、学部生2人が在籍しています。
- 就職先: 東京電力, 東京ガス, ルネサスエレクトロニクス, など



電力グループ  
電気電子コース・エネルギーコース  
大岡山・南3号館6階601/607/610など

教授 千葉 明 准教授 清田 恭平 助教 藤井 勇介

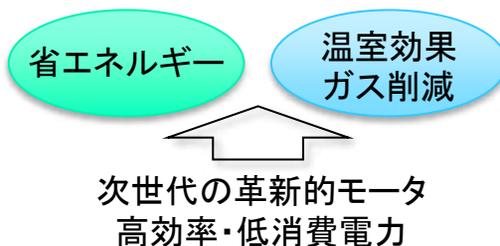
研究分野: 電気機器、メカトロニクス、制御工学、磁気浮上  
キーワード: スイッチドリラクタンスモータ、ベアリングレスモータ、磁気軸受、次世代自動車駆動モータ

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スイッチドリラクタンスモータ、誘導機、IPMモータの解析、制御、試作、実験、評価を行っています。また、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(本学発明)の研究・開発を行っており、昨年は世界最大出力のベアリングレスモータを設計しました。

本研究室の研究テーマは、電気、機械、情報、制御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。モータの研究を通して、ものづくりを学ぶことができます。



### 研究テーマ

1. 次世代自動車駆動モータ
2. 磁気浮上ベアリングレスモータ
3. その他ロボット駆動など

## 2 最近の研究成果

### ■ 永久磁石が不要なリラクタンスモータ

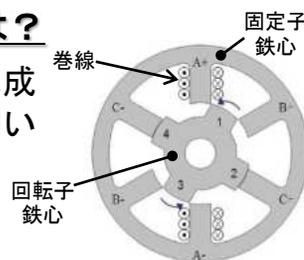
現状、市販のハイブリッド自動車や電気自動車の主機モータには、永久磁石が使用されていますが、レアアースの供給不安や価格変動の問題があります。リラクタンスモータは、固定子及び回転子が鉄心と巻線のみで構成され、永久磁石を使用しないため、安価で堅牢である利点があり、とくにリラクタンスモータの1種であるスイッチドリラクタンスモータ(SRM)に関心が高まっています。しかしSRMは、(i)低トルク密度、(ii)低効率、(iii)振動・騒音が大きい、といった大きな課題があり、ハイブリッド自動車用への応用は難しいとされていました。本研究室では、これらの困難な課題に果敢にチャレンジし、上記を解決するモータ構造や制御に関する研究開発を行っています。

SRMの振動・騒音に対しては、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、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を通して、メカニズムや有効性を実証しました。

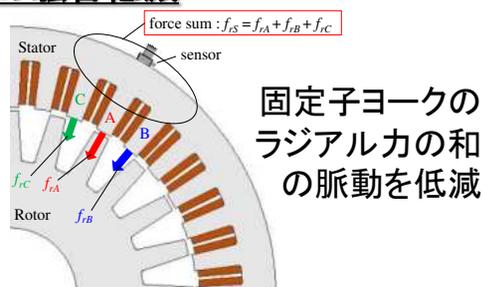
効率の向上に対しては、同期リラクタンスモータという、同一の鉄心構造を利用する、SRMと動作原理が全く異なるモータの動作を追加で行えるようにすることで、自動車用途で重要な、高効率で動作できる領域の拡大を目指しています。

### リラクタンスモータとは？

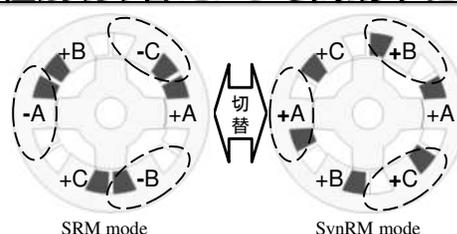
- ✓ 鉄心と巻線のみで構成され、永久磁石を用いない
- ✓ 堅牢、安価



### SRMの騒音低減



### モータ種別切り替えによる高効率化



各モードで高効率となる領域に応じてモータ種別を巻線により切り替え

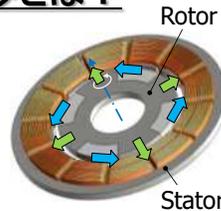
# 大岡山・電力・エネルギーグループ

## ■ 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を発明し、先駆的な研究を行ってきました。当初の世の中の反応は「興味深い」程度のものでしたが、現在では、世界各国の研究者がベアリングレスモータの研究開発を行っています。モータは回転トルクを出すだけでなく、自らを磁気浮上する能力が有ることに気がつきました。長寿命のファン、大型空調設備、半導体・液晶製造用のポンプ、次世代自動車などに応用が期待されています。

### ベアリングレスモータとは？

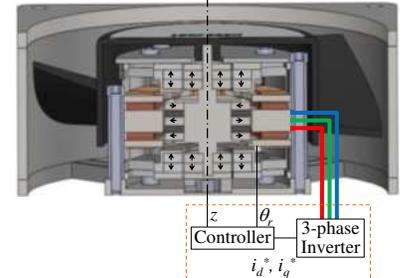
機械的なベアリングが不要で、電磁力により回転軸を磁気支持



### 冷却ファンへの応用



試作した固定子



### ベアリングレスモータの利点

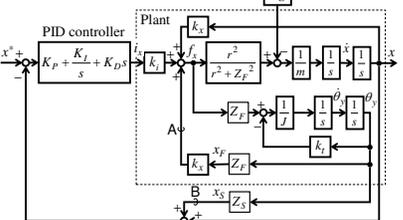


高付加価値の創出で、次世代の高効率・高性能モータとして期待されている

### 風力発電機への応用



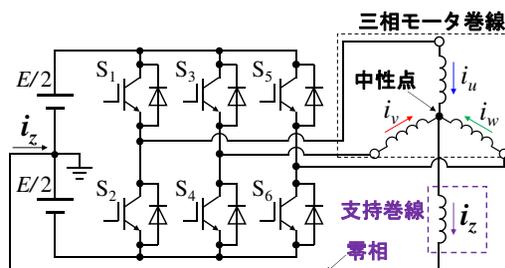
直径1mのブレードを取付けた試作機



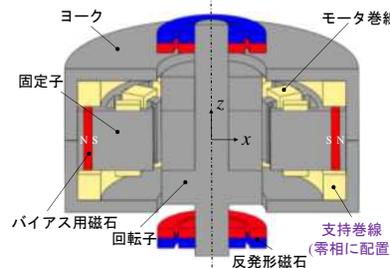
ブレードの影響を考慮したブロック線図

## ■ 零相電流を用いたモータ制御

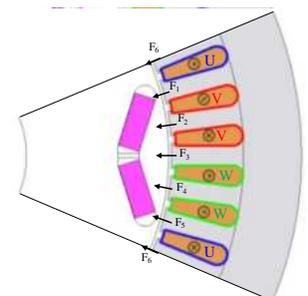
従来の三相交流モータでは、3本あるモータ巻線の一端を共通(中性点)とした、スター結線が用いられていますが、制御の自由度が1つ減ってしまいます。そこで本研究室では、中性点に新しく追加の配線や巻線を接続することにより、制御の自由度を1つ追加できる回路を提案しています。この回路を用いることにより、例えば、零相電流を磁気支持に応用することで、磁気支持用の追加装置不要かつモータの設計自由度拡張を可能とした、低コストなベアリングレスモータの実現が期待されています。また、モータのトルク・効率に影響を及ぼすことなく、アクティブにモータの振動を低減することを目指しています。



零相電流を用いた回路構成



1軸制御ベアリングレスモータ(零相電流で磁気支持)



零相電流を用いたラジアル力低減

## 3 教員からのメッセージ

千葉・清田研究室では、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、電磁界解析、実物の試作、AIを活用した制御、プログラミング、実験、評価まで幅広く携わることができます。国内、海外の企業との共同研究も盛んで、就職の面接に強くなります。研究資金も多く、博士課程の学生さんには経済的な援助をしたいと思っています。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・清田研究室で共に貴重な時間を過ごしましょう！

# 筒井・遠藤研究室

# 人協働ロボットの軽量化を目指す 超軽量アクチュエータの研究



電力グループ  
電気電子コース  
大岡山・石川台1号館502/503,5号館201,南3号館604/612

特任教授 筒井 幸雄 特任准教授 遠藤 央

研究分野: メカトロニクス, ロボット工学, 電気機器  
キーワード: 軽量アクチュエータ, 軽量モータ, マニピュレータ  
産業用ロボット

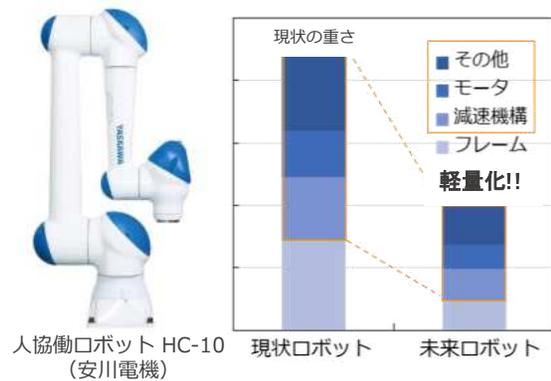
ホームページ: <https://www.yaskawa-tokyotech.org>

## 1 主な研究テーマ

産業用ロボットは、近年「人協働ロボット」として新たな使用方法／用途へ裾野を広げています。人協働ロボットは従来の産業用ロボットとは違い、作業者などの人間と同じ空間での利用を前提としているため、安全性の担保が重要となります。そのため、一般的な産業用ロボットに比べて、安全機能の付与や、機能の制限が施されています。この人協働ロボットを更に発展させるために、本研究室では「軽量化」をキーワードとして研究活動を推進しています。軽量のロボットは潜在的な危険性を軽減することができるため、従来の人協働ロボットに比べ、更に幅広い場面や用途で活躍できると考えています。

本研究室は東京工業大学と株式会社安川電機によるYASKAWA未来技術共同研究講座の一環として2020年に設立されました。未来の人協働ロボットに向けて、新材料の利用やアルゴリズムを用いた設計による超軽量アクチュエータや高トルク密度のモータの実現などに挑戦しています。コアとなる技術は主にメカトロニクスです。

このメカトロニクスという言葉は、安川電機によって作られた Mechanism と Electronics をつなげた造語で、今では全世界的に使われる用語となりました。本研究室は、この言葉と同様に、電気電子系・機械系の2系にまたがり設置されています。学生も電気電子コースおよび機械コースから本研究室に所属しています。電気電子コース学生は千葉・清田研究室と合同で研究を進めます。さらに、共同研究講座全体としては電気電子系千葉明教授を代表とし、清田恭平准教授、物質理工学院森伸介准教授、合田義弘准教授、科学技術創成研究院進士忠彦教授、工学院機械系菅原雄介准教授と連携しています。



人協働ロボット用超軽量アクチュエータの研究

YASKAWA未来技術共同研究講座

筒井 幸雄 特任教授 工学院 電気電子系

遠藤 央 特任准教授 工学院 機械系

代表 千葉 明教授 工学院 電気電子系

進士 忠彦教授 科学技術創成研究院

菅原 雄介准教授 工学院 機械系

清田 恭平准教授 工学院 電気電子系

合田 義弘准教授 物質理工学院 材料系

森 伸介准教授 物質理工学院 応用化学系

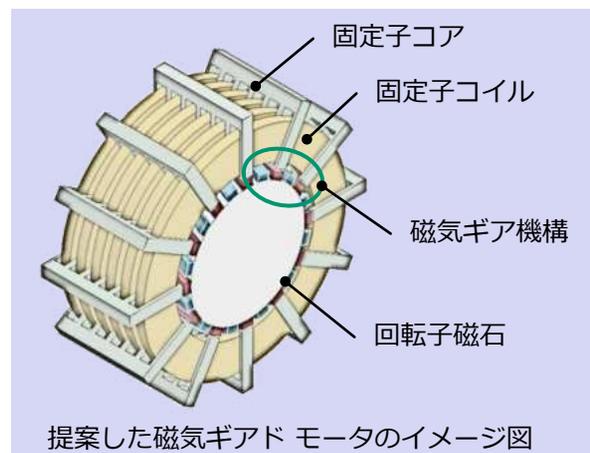
多様な分野・多様な要素技術からのアプローチにより実現を目指す

## 2 最近の研究成果

### ■高トルク密度を実現する磁気ギアドモータの検討

産業用ロボットの関節を動かすためには大きなトルクが必要となるため、通常はモータとギア（減速機）を組み合わせたものが用いられます。しかし、ギアの重さがロボットの軽量化や安全性・応答性向上の妨げになっていることに加えて、トルクのロスや振動の発生、潤滑油などのメンテナンスが必要といった問題も有しています。

本研究では、磁力により非接触で減速機能を実現する磁気ギアに着目し、磁気ギアとモータを融合した新しいタイプのモータ構造を提案しました。電磁界解析で基本的な動作を検証しており、今後は更なる高トルク化・軽量化を目指します。

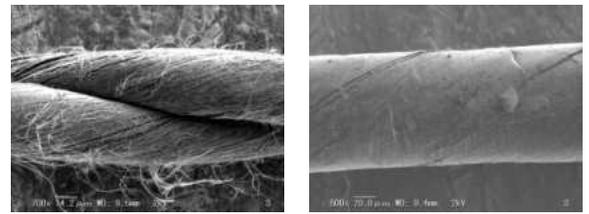


## 大岡山・電力・エネルギーグループ

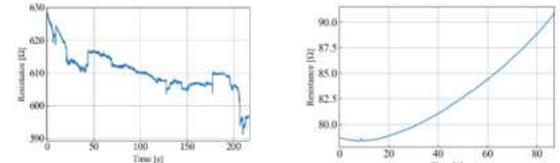
## ■カーボンナノチューブ(CNT)の利活用による軽量化

一般に、金属では高い導電性や強度を実現すると密度が上がり、全体の質量が大きくなるのがわかっています。そのため、金属製の部品では軽量 vs 性能は両立しないケースが多数あります。近年、非金属物質としてナノカーボン物質と分類される炭素由来の材料についての精製方法や物性の研究が多数され、実用の段階にきています。ナノカーボン物質は性能と軽量であることを両立できることがわかっています。

本研究ではその中でもCNTに着目し、電磁モータへの利用を実用レベルで議論し、高性能かつ軽量のモータを構築することを目的とします。10年程度前より応用物理の分野では夢の材料としてCNT自体の性能は活発に議論されてきました。しかしながら電磁モータ適用という観点では十分な議論はありません。そこで本研究は安川電機との共同研究講座等立場も活かし、実用的な観点での議論を進めています。具体的には設計に必要なパラメータの解明や実用化のためのCNTの巻線化技術などをCNTの開発に先がけて進めています。



カーボンナノチューブ撚線の走査電子顕微鏡画像

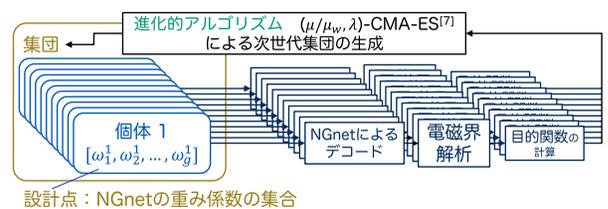


実用に向けた特性試験結果の一例

## ■経験や先入観にとらわれない次世代の軽量モータのGenerative Design

産業用ロボットだけでなく産業に用いられるメカトロニクス機器では、それに搭載されるモータが大型になることで、モータを保持する他の構造も堅牢・強固になる必要があります。したがって、モータが大型になることによる重量の増加はモータ自体の重量増加には留まらず、構造自体の重量の増加を招きます。逆説的にはモータを小型軽量化することで、モータだけでなく、構造全体の軽量化が実現できます。本研究では電磁モータを対象とし、従来にない軽量のモータの構造を研究しています。

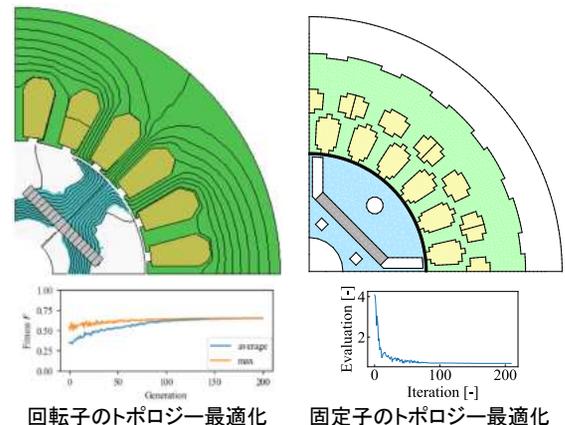
モータの設計は用途にあわせて、ロータの面積や長さ、形状、材料、ステータのコイル巻数や配置、形状、長さ、厚さなど多様なパラメータを決めます。この多数の設計パラメータの決定は、エンジニアの知識と経験に依存しているのが現状です。エンジニア依存の設計は個人やグループの能力の発展に伴い、成果品の性能も向上する強みがあります。しかし一方で、進化的変化が起きづらいことがわかっています。そこで本研究では、設計者の知識や経験に依らず、人工知能などの機械学習に代表される計算機ベースの設計により、今までにないデザインのモータをねらいます。ここでは最適化アルゴリズムを用いたロータおよびステータの最適設計の例を示しています。最適化することにより軽量かつ高出力なモータを実現しました。



目的関数

$$\text{minimize } \frac{M_i}{M_{\text{ref}}} + \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_{\text{ave},i} \geq \tau_{\text{des}} \\ k \left(1 - \frac{\tau_{\text{ave},i}}{\tau_{\text{des}}}\right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

質量最小化 制約条件：目標トルクの実現



## 3 教員からのメッセージ

本研究室は共同研究講座に設置されています。そのため、企業(安川電機)との共同での研究活動だけでなく、多数の連携教員がいることにより研究者の多様性が実現されるため、他では経験できない形で研究を進められます。現在、全体の研究プロジェクトは折り返し地点にあり、先輩の研究を深掘りするテーマや、実験を伴うテーマなど多種多様なテーマに取り組んでいます。これらを通して将来に役立つ多彩な経験ができると思います。所属する学生の皆さんが「発揮」できることが研究室のねらいで、その結果、一歩でも研究目標に向かって進めれば良いと考えています。



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パ回路, 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パ回路
- ・ 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パ回路



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パの外観図

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、再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、双方向チョップパ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パ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パ回路を提案し、実験による検討を行っています。これは、従来型双方向チョップパ回路と比較して、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が注目を集めています。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・プロアやポンプなどは、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・佐野研究室

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・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・EEI-404, EEI-407

教授 藤田 英明    テニュアトラック助教 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,  
直流送電システム

ホームページ: <http://www.pel.ee.e.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・低コスト電力変換装置の開発
- 太陽光・風力・小規模水力発電設備の系統連系用電力変換システム
- 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

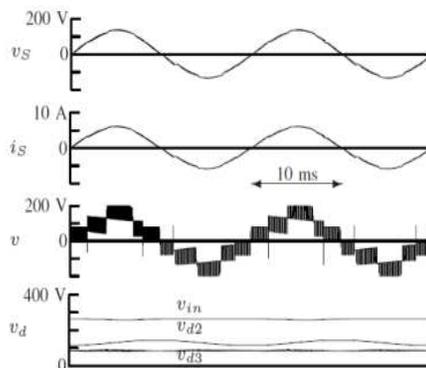
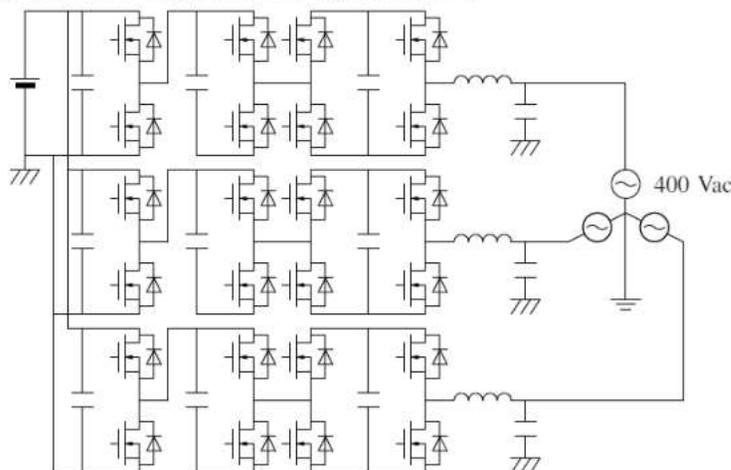
■太陽光発電用高効率 Zig-Zag Connected Chopper 変換器

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  
使用できるように、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

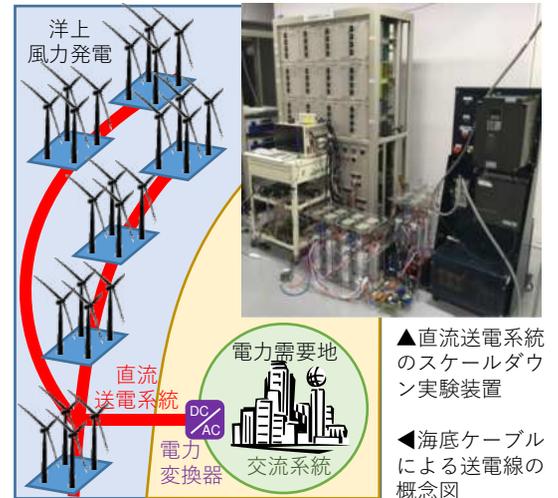


## 大岡山・電力・エネルギーグループ

## ■洋上風力発電用の直流送電系統

パワーエレクトロニクスの応用分野の1つに、直流送電があります。海底ケーブルによる大容量の送電線では、技術的制約や経済性から、従来より直流送電が用いられています。近年、海洋上に大規模な風力発電所が建設されるようになり、これらを海底ケーブルで結んだ海底の送電系統が構築されつつあります。しかし、現状の直流送電では、交流系統のように大規模な電力系統を構築し、安定して運用する方法が確立されていません。

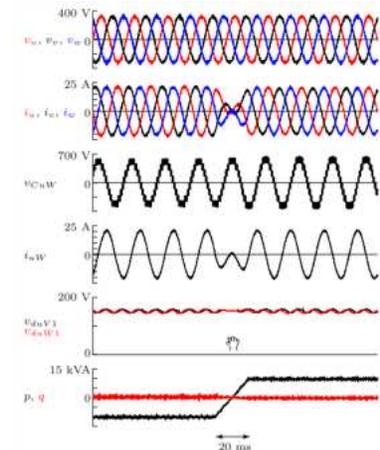
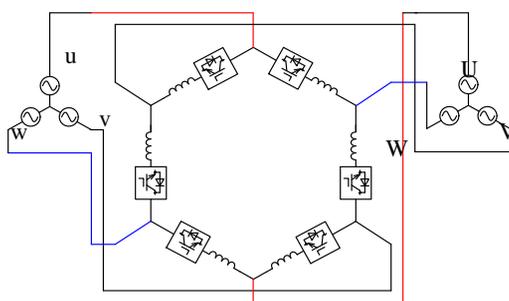
当研究室では、パワーエレクトロニクスと電力システムの両面から、直流送電により大規模な電力系統を構築する方法を研究しています。大容量電力変換器、直流遮断器、長期にわたり拡張可能な系統構成、設備故障の波及を防ぐ方法などを検討しています。将来、洋上風力発電をはじめとする再生可能エネルギー電源が大規模に導入された際にも、安定して電力を利用できるシステムの実現を目指しています。



## ■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・配電系統には、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、現在の複雑な電力系統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。

## 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

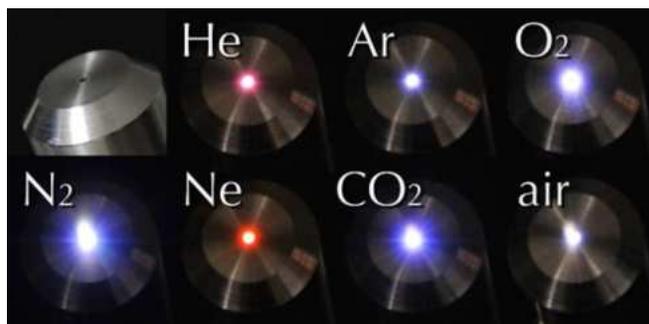
准教授 沖野 晃俊      特任助教 八井田 朱音

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: <https://ap.first.iir.titech.ac.jp/>

### 1 新しい大気圧プラズマ装置を開発

大気圧下で生成されるプラズマは、連続的で高速な表面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装置を開発しており、それぞれの特徴や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。

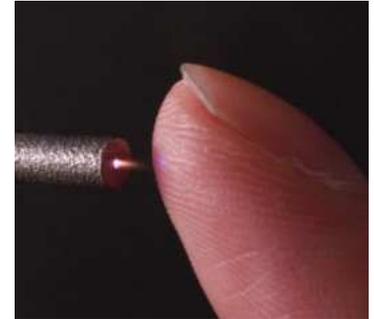
#### ■ 医療関連分野への応用

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。これらの粒子により、プラズマは殺菌/ウイルス不活化、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、東北大学、東京医科歯科大学、東京医療保健大学等と共同で、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。

また、コロナ禍への対応として、機器、空間、生体、液体などを対象とするウイルスの高速・非接触不活化装置を開発しています。

## 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プリンタを使って作成し、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。

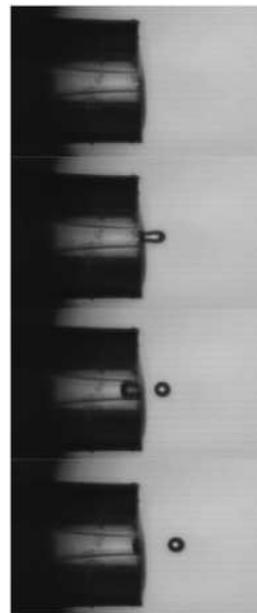


### ■ 医療用分析, 環境分野への応用

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考えています。

プラズマを物体に照射すると、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できます。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の分析、さらには大気粉塵等の分析が可能になります。

また、医療や工業で発生する大流量の各種ガスをプラズマで高速に無害化する処理装置の開発も行っています。



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, 生命分野への応用

プラズマを物質の表面に照射すると、表面がクリーニングされます。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、航空機、医科・歯科材料に使用する、高強度接着手法の開発などを行っています。

さらに、低温に制御したプラズマを照射して植物を処理し、CRISPR-Cas9などを用いてゲノム編集を行う研究を農研機構などと共同で実施しています。



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。

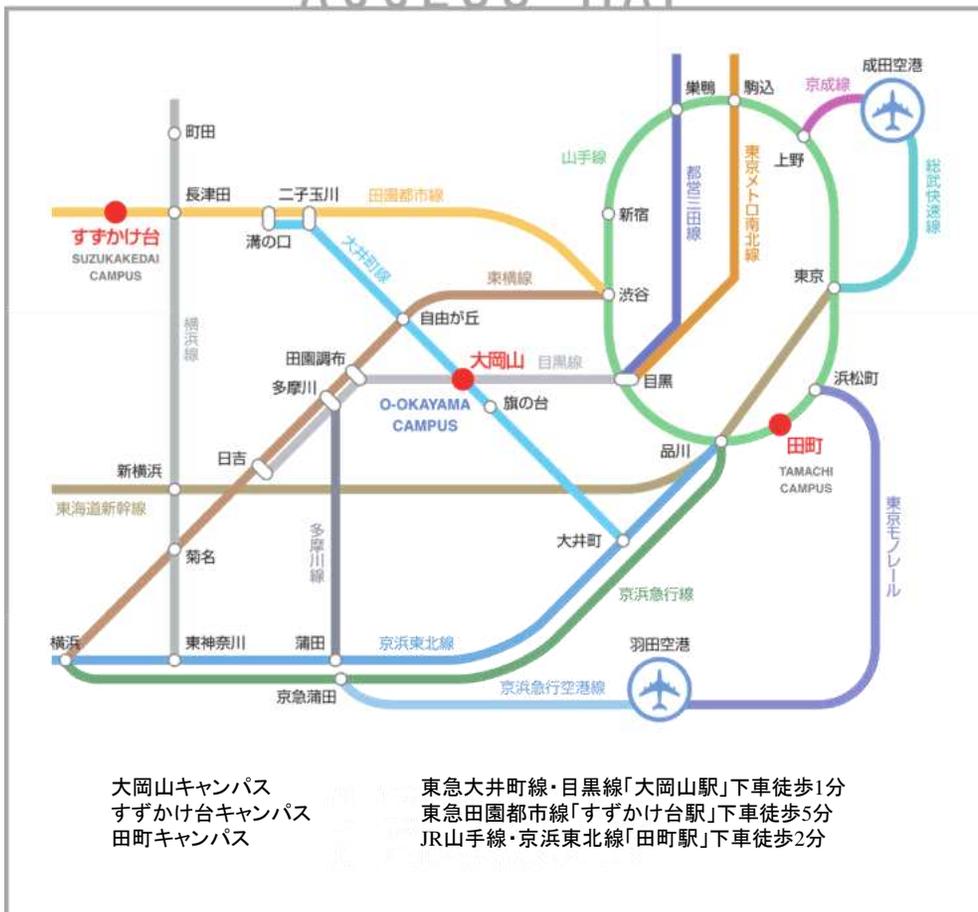
## すずかけ台キャンパス



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-S3-47 TEL. 03-5734-2853

電気電子系入試についてさらに詳しく:

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

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