

CUE

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.39

MARCH 2018

[第39号]

..... 卷頭言

久和 進

..... 大学の研究・動向

超高感度な光学的磁気センサをコア技術として
新たなニューロイメージングへ挑む
電気工学専攻 生体医工学講座 生体機能工学分野

..... 産業界の技術動向

NHK 放送技術研究所
三谷 公二

新設研究室紹介

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

編集後記

cue：きっかけ、合図、手掛かり、という意味
の他、研究の「究」（きわめる）を意味す
る。さらに KUEE（Kyoto University
Electrical Engineering）に通じる。

cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環として京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員やその他の企業の協力により発行されています。

cue 39号 目次

巻頭言

東京一極集中と地方創生

..... 昭和 47 年卒 北陸電力株式会社代表取締役会長 久和 進..... 1

大学の研究・動向

超高感度な光学的磁気センサをコア技術として新たなニューロイメージングへ挑む

.....電気工学専攻 生体医工学講座 生体機能工学分野..... 3

産業界の技術動向

NHK 放送技術研究所における放送の高品質化と高機能化への取り組み

..... NHK 放送技術研究所 三谷 公二..... 9

新設研究室紹介

..... 16

研究室紹介

..... 17

博士論文概要

..... 35

高校生のページ

熱から生じる光を自在に操る

工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 光量子電子工学分野

.....浅野 卓、井上 卓也、メーナカ デゾイサ、野田 進..... 55

学生の声

博士課程進学を振り返って

.....工学研究科 電気工学専攻 引原研究室 博士後期課程 1 年 持山 志宇..... 59

一人黙々と研究する印象でしたが...

.....工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程 1 年 吉田 昌宏..... 59

教室通信

学生の就職活動について

.....通信情報システム専攻 佐藤 高史..... 60

賛助会員の声

センサ社会の広がり、企業による貢献

..... ローム株式会社 センシングソリューション LSI 商品開発部 大地 宏明..... 61

編集後記

..... 65

巻頭言

東京一極集中と地方創生

昭和 47 年卒 北陸電力株式会社代表取締役会長 久 和 進



本題に入る前に、学生時代の思い出からお話しします。京大に入学したのは昭和 43 年（1968 年）です。その頃は学生運動が激しく、私は所謂ノンポリでしたが、入学した年の夏休み頃から教養部がバリケード封鎖され、約 1 年間教養課程の授業ができない状態になりました。その後学生運動は収束に向かいましたが、そのような時代でしたので、学生時代の思い出と言えば、勉強よりも徹夜麻雀と深夜映画です。麻雀はあまり強くありませんでしたが、下宿が同じ学年の京大生ばかりだったこともあり、下宿のみんなでよくやりました。映画は深夜映画 4 本立てをよく見に行きました。土曜の夜 10 時頃に映画館に出かけ、翌朝 5 時頃に下宿に戻ります。当時、学生の間では、高倉健や藤純子主演のヤクザ映画や日活ロマンポルノが人気でした。ヤクザ映画やポルノ映画だけでなく、時には黒澤明監督や溝口健二監督などの名作も上映したりしていて、それ以来、映画鑑賞が私の趣味になりました。

このような学生生活でしたが、就職先を決めなければいけない時期になり、当時は大学院への進学がまだ一般的ではなく、当初から就職することにしていました。都会の通勤地獄や大気汚染などが問題になっており、都会で就職してもあまり良いこともなさそうに思えたことと、父親が帰って来いと言っていたことから、郷里で就職することにしました。電力会社に就職することになり、それまでは物性に関心があり、強電の分野の単位をあまり取っていませんでしたので、急遽強電の単位を取り、結果的に卒業に必要な単位よりもかなり多く単位を取得したことになりました。この頃が大学で一番勉強したように思います。

而来、45 年程が経ちました。今は会社の会長や北陸経済連合会の会長を勤めていますが、これもめぐり合わせかなと感じています。

ここからは、今取り組んでいる地方創生についてお話しします。北陸経済連合会では、北陸地域が地方創生のモデル地域となることを目指して取り組んでいます。ご存知のように少子化で日本の人口は既に減少しつつあり、地方では人口減少と高齢化が進んでいます。その一方で、東京圏だけが若者の流入により今でも人口が増加し東京一極集中が続いています。

歴史を振り返れば、江戸時代には江戸は既に世界最大の大都市でしたが、基本的には各藩による地方分権体制が布かれ、加賀百万石の城下町金沢も国内有数の大都市でした。明治になり中央集権体制が確立し、以来東京一極集中の流れはずっと続いています。

大都市に人口が集中することにより、規模の経済や集積による効率性の向上などの経済的メリットがあり、都市集中には合理性があると言われています。しかし、全国の人口が減少する中で、東京圏の人口が約 3 割を占め、現在も人口が増加し続けていることは大きな問題です。特に、東京は結婚年齢が高く子育てもしにくく、その結果、合計特殊出生率は全国最低です。その東京に若い女性が集まることは人口減少に拍車をかけることとなります。地方の若者が減れば、東京へ流入する若者もやがてほとんど

いなくなるでしょう。このまま東京一極集中が継続すると、地域間の格差が拡大し出生率が低迷し持続可能な社会を維持することも困難になると大いに危惧しています。明治以来続いたこの大きな流れを止め、更なる流れを逆転させることは生易しいことではありませんが、今こそ東京一極集中を打破し、地方創生を実現しなければならないと思っています。大都市への一極集中は発展途上国ではよく見られますが、必ずしも世界的な趨勢ではなく、ドイツのように大都市への極端な人口集中がない国もあります。

以前は、豊かで華やかな東京に憧れる意識が国民に広くあったように思いますが、今や新幹線・飛行機などの交通手段の進歩やパソコン・インターネットなど情報通信技術の普及拡大などにより、まだ十分ではありませんが地方のハンディキャップは薄らいできています。一方逆に、東京圏での子育ての難しさや今後進む急速な高齢化、首都直下地震などの問題がクローズアップされてきており、人々の意識も徐々にではありますが変化してきているように感じています。

北陸を含め地方にも世界と競争してクリエイティブな仕事をしている優れた企業がたくさんあります。最近では、東京の大企業よりも地方発の企業に高い成長を達成している企業が多いとも言われています。そのような地方の企業に目を向け、優秀な人材が地方にも集まることを心から希望するものです。地方には東京のような華やかさはないかもしれませんが、子育て・育児に適し人間らしい生活環境が魅力です。幸い北陸は豊かさの点でも大都市に引けを取りません。是非、京大の学生のような優秀な学生が地方の良さに目を向けてくれることを期待しています。

大学の研究・動向

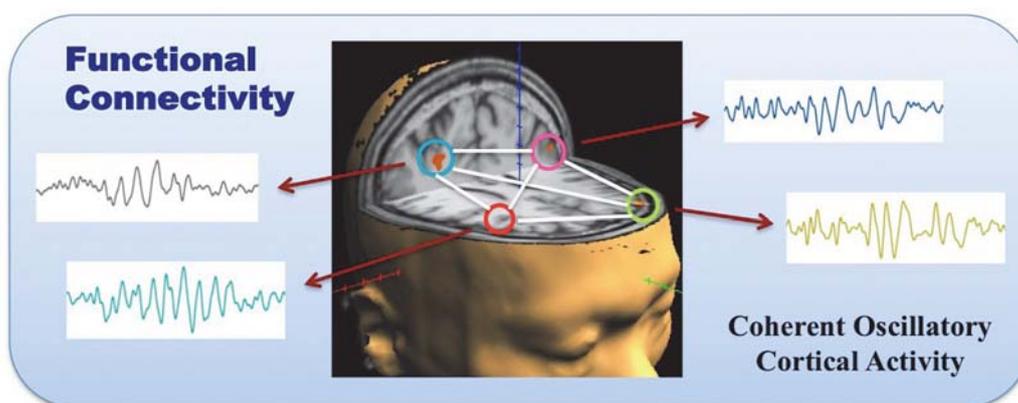
超高感度な光学的磁気センサをコア技術として 新たなニューロイメージングへ挑む

電気工学専攻・生体医工学講座・生体機能工学分野
教授 小林 哲生

1. はじめに

ヒトの高次脳機能の解明と神経・精神疾患の克服や新たな産業の創出に結びつけることを目指すビッグ研究プロジェクトが、2013年にアメリカ合衆国とEUで相次いで開始された。我が国でも、2014年にこの高次脳機能のメカニズム解明のため、その基盤を構築することを目的として「**革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト**（以降、**革新脳プロジェクト**）」が開始された。当研究室は、この革新脳プロジェクトに臨床研究総括チームの一員として参加し、東大、阪大、広島大などの精神神経科の研究者と連携して、統合失調症を含む複数の精神疾患患者の拡散MRIの臨床データを対象とした白質神経線維の解析などにより、疾患横断的・疾患特異的な病態神経回路を同定することを目指して研究を進めている。

近年、脳のビッグ研究プロジェクトが主要先進国で相次いで始められるに至った背景には、各国において高齢化社会の到来に伴い、アルツハイマー病などの認知症に代表される神経・精神疾患患者が今後益々増加することが予想され、疾患の早期発見や新薬の開発などにより医療費を抑えたいという財政上の事情がある。一方、科学技術という側面からは、非侵襲的にヒトの脳神経活動を計測・解析・可視化するニューロイメージング手法、中でもMRIを用いた脳機能と白質神経線維の計測・解析技術が、近年急速な進展を遂げたことがプロジェクトの大きな原動力となっている。



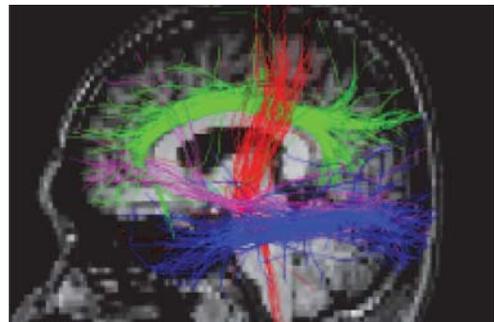
当研究室では、2004年に生体機能工学分野として研究室が発足して以来、脳機能研究を最も重要な研究テーマと位置づけ、このニューロイメージングの先進的な技術開発を進めてきた (**Human Brain Mapping, 2015**)。脳機能ネットワークの解明には、脳内の複数部位のニューロンの活動を非侵襲的に計測し上図の概念図に示す様な、複数の脳内部位間の機能的な結合を調べ、合わせてニューロン間の

物理的結合情報を計測するといった手法を用いて行く必要がある。本稿では、まずニューロイメージングの現状と課題を述べた後、当研究室がこれまで、世界を先導してきた超高感度な光ポンピング原子磁気センサ（Optically pumped atomic magnetometer: OPAM）研究と小型モジュール化したこの磁気センサをコア技術とする新たなニューロイメージングへの取り組みについて紹介する。

2. ニューロイメージング

現在一般に用いられているニューロイメージング手法は、脳神経活動に伴う電磁気量を計測する方法と脳神経活動に伴って変化する血行動態を計測する方法に大別される。前者には脳波（Electroencephalography : EEG）と脳磁図（Magnetoencephalography : MEG）、機能的磁気共鳴画像（functional MRI: fMRI）、近赤外分光法（NIRS）がある。近年、高次脳機能の解明という観点から、時間分解能の高い EEG または MEG と空間分解能の高い fMRI を相補的に用いることで動的なイメージングや機能的結合を明らかにし、さらに拡散 MRI による神経線維束追跡法を組み合わせることで下図のような大脳皮質における物理的結合やネットワークを明らかにするという方向に研究・開発が進んでいる。本稿では紙数の制限から、以下では新たなニューロイメージングに向けて MEG と fMRI に絞って述べる。

大脳皮質に存在する錐体細胞と呼ばれるニューロンの樹状突起は大脳皮質表面にほぼ垂直に整列しており、シナプス後電位によって樹状突起内に電流が流れ、その電流の向きに対して右ネジの法則により磁場が発生する。この磁場とニューロン外の分布電流によって発生する逆向きの磁場の差分として脳神経磁場を計測するのが MEG である。この脳神経磁場の大きさは 10^{-13} T（テスラ）のオーダーと地磁気 ($10^{-4} \sim 10^{-5}$ T) に比べ約 1 億分の 1 と極めて微弱である。



MEG の計測データには同時に複数部位で発生する脳神経磁場と共に磁気ノイズも重畳するため複雑な磁場分布となる。そこで、MEG 計測ではセンサ面での磁場分布から、信号源の位置、方向、大きさを推定する逆問題解析を行うのが一般的である。MEG は時空間分解能の高さが長所であり、頭部の各組織の比透磁率がほぼ 1 であることから EEG と異なり計測される磁場分布が頭部組織の影響を受けにくいいため高精度で信号源推定が可能である。

一方、fMRI は MRI を用いて脳神経活動を計測する方法である。現在用いられている fMRI では、脳神経活動に伴い、その活動部位近傍において血液中の酸素化ヘモグロビン濃度が増加し、脱酸素化ヘモグロビン濃度は減少するという血行動態を捉えるという計測原理が用いられている。酸素化ヘモグロビンは反磁性体、脱酸素化ヘモグロビンは常磁性体であるため MRI システム内での均一な静磁場強度が変化し、それが MR 信号強度に反映される。これにより局所的な脳神経活動を MRI により間接的に計測する事ができる。fMRI では脳全体を一辺 2～3mm のサイズのボクセル単位でその活動を捉えることができるため、脳の複数の部位が関与する高次機能を調べる際に、活動部位を特定することに大きな威力を発揮する。しかし、fMRI は、脳神経活動によって間接的に生じる秒単位で変化する血行動態を計測するため時間分解能が低く時間特性に基づくダイナミクスを捉えることには適していない。

3. 光ポンピング原子磁気センサ（OPAM）

OPAM とは、光ポンピング法により生成したアルカリ金属原子のスピン偏極を用いて極微弱な磁場の計測を可能とする光学的磁気センサである。ここで、光ポンピング法とは、近接した 2 つのエネルギー準位における電子の占拠数に光を用いて（近年では円偏光のレーザーを使用）大きな差を作る方法で、

1950年にフランスのKastlerが提案し、1966年にはノーベル物理学賞を授与されている。

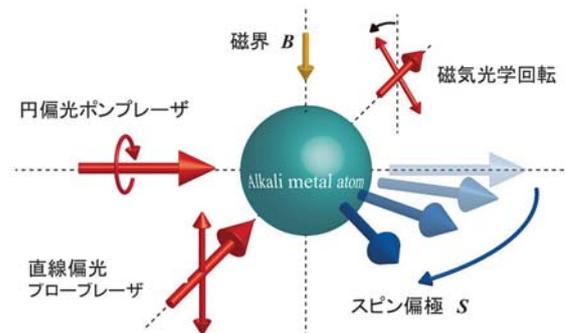
この光ポンピングをアルカリ金属原子に対して行い磁気センサとして用いる原理も1957年に既に報告されていたが感度が低く、その用途は限られ極微弱な磁場を検出する必要のある生体磁気計測、中でもMEGには使用できないものと考えられていた。しかし、新たな世紀に入り1 fT/Hz^{1/2} オーダの感度を有する超伝導量子干渉素子 (SQUID) と同レベルあるいはSQUIDを凌ぐ超高感度がOPAMにより達成できることが報告され、現在盛んに研究・開発が行われている。

OPAMは、既に生体磁気計測をはじめ、核磁気共鳴画像 (NMR) 信号の検出や磁気共鳴画像 (MRI) といった生体医工学分野への応用が開始されており、さらに重力波の検出などの基礎物理学研究や極微弱な磁場を計測することが要求される様々な応用分野の進展に大きく貢献することが期待されている。

現在、OPAMには様々なタイプのもものが提案されている。当研究室では、その中で最も感度の高い計測が可能なポンプ用レーザー、プローブ用レーザーの2つを直交させた配置である右図に示すポンプ-プローブ型OPAM (以下、単にOPAMと呼ぶ) を開発しており、このOPAMについて、その計測原理を説明する。

OPAMの感度にはスピンの緩和時間の長さが関わっており、緩和時間が長いほど感度が高くなる。このスピン緩和時間を決める一因としてスピン交換衝突があるが、スピン交換衝突に伴う緩和が実効的になくなるような条件 (Spin-exchange-relaxation-free: SERF 条件) を満たせばセンサの感度が10⁻¹⁶ T / Hz^{1/2} オーダまで到達可能であることが2002年に実験的に示された。従って、SERF条件を満たすポンプ-プローブ型が最も高感度のOPAMである。OPAMは、測定体積が小さくても高い感度を保つことが期待でき、多チャンネル化により高い空間分解能を持った磁場計測が可能になる。理論的に10⁻¹⁷ T / Hz^{1/2} オーダの感度が期待できる。

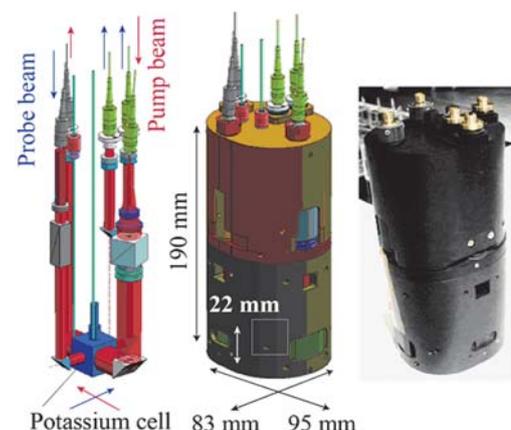
OPAMでは、まずガラスのセルに封入された気体の状態にあるアルカリ金属原子に円偏光のレーザー光をあて、光ポンピングさせることによってスピン偏極Sを生じさせる。この状態で、印加される磁場Bによりスピン偏極がトルクを受けて回転し、円偏光レーザーと直交する方向でアルカリ金属原子にあてられたプローブレザの直線偏光面がスピン偏極のプローブ方向成分による磁気光学効果により回転する角度を計測するという原理で動作する。なお、印加磁場と回転角との関係はセル内部の温度やポンプレーザー強度、プローブレザ波長、アルカリ金属原子の種類などの計測条件によって変化する。Kの場合では、数十pT以下の磁場においては印加磁場と回転角は比例しているとみなせ、1fTの磁場に対する回転角は約0.4 μradである。



4. OPAMによるMEG計測

OPAMを用いたMEG計測については、これまでPrinceton大学、PTB & NIST、Wisconsin大学の各研究グループが報告している。我々もOPAMを用いたMEG計測の実現に向けて、モジュール型のOPAMの高感度化と小型化を図り、このモジュール型OPAMを用いて、MEG計測に成功している。

右図に、我々がMEG計測用に開発したモジュール型OPAMを示す。このモジュール型OPAMでは、ガラスセ



ル、光ファイバ、光学系、ヒーター、断熱材などが一体となっており、底面積 64cm²、高さ 19cm 程度の円筒型であり、内部にセンサ本体となるカリウムを封入した一辺 2cm の立方体ガラスセルを有している。

このモジュール型 OPAM を用いて、被験者にビーブ音 4 秒ごとに与え、その度に開眼と閉眼を繰り返してもらい、その間、後頭部の視覚野近傍に配置したモジュール型 OPAM で脳神経磁場を 800 秒間計測した。その後、8-13Hz のバンドパスフィルタをかけ、さらに 8s 毎に切り出したデータの分散から**事象関連脱同期 (ERD)**を得た。また、常時閉眼状態での脳神経磁場も比較のために計測し開眼に伴う ERD を捉える事ができた (**JJAP, 2015**)。

右上図は、モジュール型 OPAM で計測した ERD、右下図は、比較のため、全頭型の SQUID-MEG システム (Neuromag 社) を用いて計測した ERD であり、102ch のマグネトメータで計測した結果の中で、外後頭隆起点 (Inion) に最も近い位置での結果を示す。いずれの結果からも開眼後 1000 ms 付近で分散値が減衰する ERD が捉えられている。

我々は、さらに、このモジュール型 OPAM を用いた左右視野に呈示したチェッカーボード刺激に対する**視覚誘発脳磁界 (VEF)**の計測にも成功している。なお、OPAM を用いた生体磁気計測については、以上に紹介した MCG, MEG の他にも、我々の研究室ではさらに脊髄を伝搬する活動電位を起源とする脊磁図 (MSG) の計測に関しても現在研究を進めている。

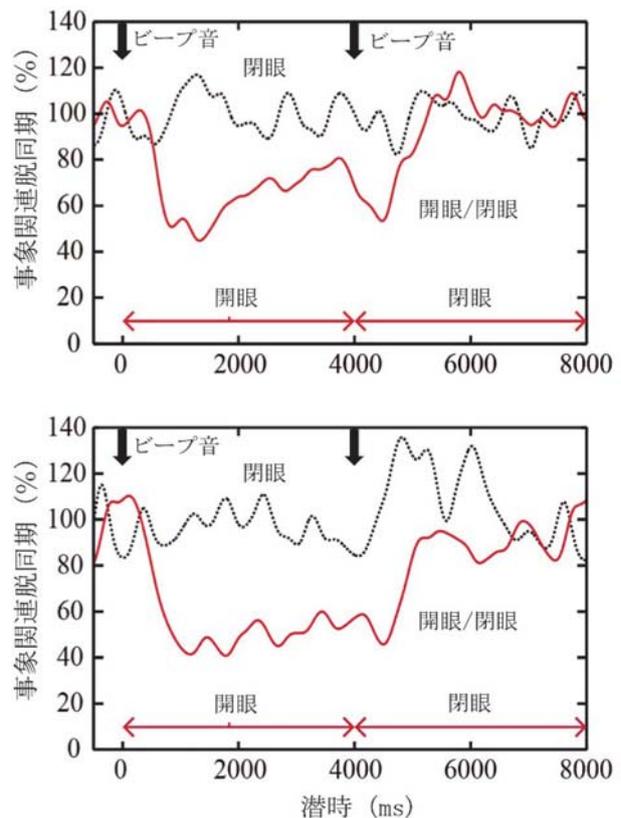
OPAM を用いた生体磁気計測システムの実用化や製品化に向けて、さらなる高感度化と多チャンネル化が求められる。そこで、当研究室では、環境磁場ノイズを抑制する新たな方法として OPAM に適した光学的に差動計測を行う**光学的**

グラジオメータを提案した。光学的グラジオメータではセル内の 2ヶ所の計測位置における磁場の差を 1本のプローブ光の磁気光学回転角に直接反映させる。そのため光ファイバを利用した受光部においても磁場ノイズ低減効果が期待でき、かつ小型化に適した構造である。光学的グラジオメータは、1本のプローブ光を 2ヶ所の計測位置に通過させた後、ポラリメータで受光する。この光学的グラジオメータにより 10 Hz において 9.3 fT/Hz^{1/2} の感度が達成され既に報告済みである (**Optics Express, 2015**)。

OPAM の多チャンネル化については、小さなセルを 1チャンネルとしてそれをアレイ化する方法と大きなセル内に複数のビーム交差点を作り、各交差点を 1チャンネルとして複数点同時計測を図る 2つの方法がある。当研究室ではこの両方法について現在検討を進めているが、特に後者の一つの大きなセルを用いる場合には、当研究室が提案した K と Bb といった 2種類のアリカリ金属原子を同時に封入したハイブリッド型 OPAM (**Optics Express, 2016**) がチャンネル間の特性の均一化に有利である。

5. 超低磁場 MRI と神経磁場イメージングに向けて

近年、MRI の最前線ではハードウェア面でも高磁場化やパラレルイメージングによる高分解能化など



が図られている。一方、新たな展開として、超低磁場 MRI にも関心が高まってきている。現在、当研究室では電気系専攻の実験室に学内共同利用装置として設置された右上の写真に示す 0.3T - 低磁場 MRI 装置（日立、AIRIS Vento）を用いて、神経磁場をスピンロックシーケンスにより MRI 信号変化として直接捉える新原理の fMRI の実現に向けて、理論と実験の両面から検討を進めている。

この研究と併行して、我々はモジュール型 OPAM をセンサとし、前節で紹介した MEG などの生体磁気信号の同時計測も可能なマルチモーダルな超低磁場 MRI システムの実現を目指して研究・開発を進めてきた。OPAM のように低周波数帯域で超高感度な磁気センサを用いれば静磁場強度が $1\mu\text{T} \sim 1\text{mT}$ で MRI を撮像可能な超低磁場 MRI の実現も可能であり、形態と機能の同時計測可能な高次生体磁気イメージングシステムの実現へと繋がる基盤技術としてその開発・実用化に大きな期待が集まっている。

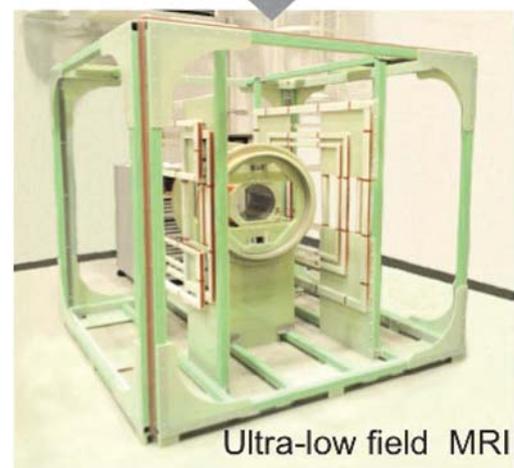
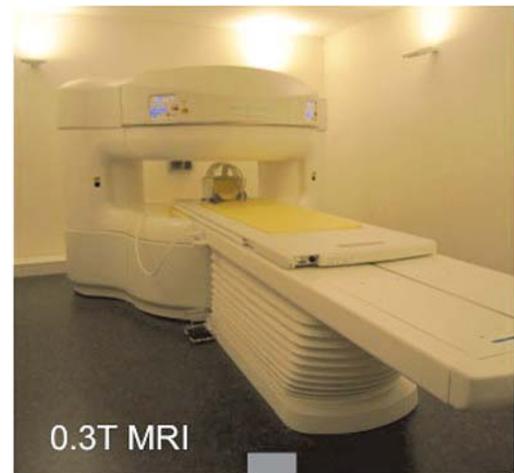
2016 年には、水冷型の pre-polarized コイル、2 次微分型の入力側コイルを備えたフラックストランスフォーマ、モジュール型 OPAM を組み合わせた新たな超低磁場 MRI システムのプロトタイプ機を設計・試作し、ラーモア周波数 5kHz （静磁場強度：約 $117.5\mu\text{T}$ ）において、NMR 信号の計測と MRI の撮像に成功した（*Journal of Magnetic Resonance*, 2017）。現在、さらに我々の研究室で独自に設計・製作したモジュール型 OPAM を受信センサとして用いる静磁場（数百 μT ）と 3 軸勾配磁場を印加可能な超低磁場 MRI（ULF-MRI）コイルシステム（右下写真）を用いて神経磁場を直接計測可能な新たな fMRI を実現すべく、磁気シールド内に配置したこのコイルシステムを用いて、磁気共鳴信号検出のために磁場制御のための高速撮像可能なパルスシーケンスの開発を進めている。

超低磁場 MRI は、磁化率アーティファクトが小さくできることや、T1 強調コントラストが高く腫瘍を高コントラストで表出できるといった高磁場 MRI にはない多くの長所を有している。また、OPAM をセンサとする超低磁場 MRI は、装置の小型・低価格が図れるメリットがあることから、近所のクリニックなどへの普及が容易で、さらに検診車に搭載することも可能であり、その実用化によって各種疾患のスクリーニングや早期発見に寄与することが期待される。

6. むすび

本稿で紹介した OPAM は、その感度の高さからニューロイメージング分野に留まらず磁気計測に関連する様々な分野にイノベーションやパラダイムシフトを起こす大きな可能性を有している。また、脳科学という面から見ると、OPAM を共通のセンサとして用いる MRI と MEG などを融合一体化したマルチモーダルな新たなニューロイメージングシステムの実現は、多くの謎に包まれているヒトの高次脳機能のメカニズム解明と臨床応用に繋がるものである。

今後、モジュール型 OPAM のさらなる高感度化・小型化・多チャンネル化を図り、新たなニューロイメージングシステムの早期実現に向けて、オープンイノベーションによる企業との共同研究と国際的な連携



強化を推進して行きたい。

謝辞：本稿で紹介した研究内容は、平成 18 - 27 年度・文部科学省・科学技術振興調整費・先端融合領域イノベーション創出拠点の形成「高次生体イメージング先端テクノハブ」プロジェクトの助成により実施されたキヤノン株式会社との 10 年間の協同研究による成果、さらに文科省科研費・基盤研究 A (15H081813)・挑戦的萌芽研究 (16K13114)、平成 29-30 年度・中谷医工計測技術振興財団・特別研究助成などの補助を受けて現在遂行中の研究の成果である。付記して謝意を表する。

参考文献 (本稿に関連する著者らの主な論文・解説)

1. I. Hilschensch, et al.: "Remote detected low-field MRI using an optically pumped atomic magnetometer combined with a liquid cooled pre-polarization coil", *J. of Magnetic Resonance*, Vol.274, pp.89-94 (2017)
2. Y. Ito, et al.: "Optimal densities of alkali metal atoms in an optically pumped K-Rb hybrid atomic magnetometer considering spatial distribution of spin polarization", *Optics Express*, Vol.24, Iss.14, pp.15391-15402 (2016)
3. M. Tada, et al.: "Differential alterations of auditory gamma oscillatory responses between pre-onset high-risk individuals and first-episode schizophrenia", *Cerebral Cortex*, Vol.26, No.3, pp.1027-1035 (2016)
4. 小林哲生: "光ポンピング原子磁気センサ (解説)", *電気学会誌*, Vol.136, No.1, pp.26-29 (2016)
5. H. Natsukawa and T. Kobayashi: "Cortical activations associated with determination of depth order in motion transparency depth rivalry: A normalized integrative fMRI-MEG study", *Human Brain Mapping*, Vol.36, pp.3922-3934 (2015)
6. K. Kamada, et al.: "Noise reduction and signal-to-noise ratio improvement of atomic magnetometers with optical gradiometer configurations", *Optics Express*, Vol.23, Iss.5, pp.6976-6987 (2015)
7. T. Oida, et al.: "Actively shielded bias field tuning coil for optically pumped atomic magnetometer toward ultra-low field MRI", *IEEE Sensors Journal*, Vol.15, No.3, pp.1732-1737 (2015)
8. K. Kamada, et al.: "Human MEG measurements with a newly developed compact module of high-sensitivity atomic magnetometer", *JJAP*, Vol.54, (2015) 026601-5
9. N. Mizutani, et al.: "A plateau in the sensitivity of a compact optically pumped atomic magnetometer module", *AIP advances*, Vol.4, 057132-1-7 (2014)
10. 小林哲生: "脳神経磁場イメージングの新たな試み (解説)", *シミュレーション*, Vol.33, No.2, pp.18-23 (2014)
11. K. Terao, et al.: "Highly responsive AC scalar atomic magnetometer with long relaxation time", *Physical Review A*, Vol.88, 063413 (6 pages), (2013)
12. K. Kamada, et al.: "Human MCG measurements with high-sensitivity potassium atomic magnetometer", *Physiological Measurement*, Vol.33, pp.1063-1071 (2012)
13. T. Oida, et al.: "Detecting rotating magnetic fields using optically pumped atomic magnetometers for measuring ultra-low-field magnetic resonance signals", *J. of Magnetic Resonance*, Vol.217, pp.6-9 (2012)
14. T. Yamashita, et al.: "A thermal noise calculation method for precise estimation of signal-to-noise ratio of ULF-MRI", *J. of Magnetic Resonance*, Vol.215, pp.100-108 (2012)

産業界の技術動向

NHK 放送技術研究所における 放送の高品質化と高機能化への取り組み

NHK 放送技術研究所
三 谷 公 二

1 はじめに

日本における放送の歴史を振り返ると、まず1925年にラジオ放送が始まり、その約30年後の1953年に白黒テレビ放送が開始された。1960年にはカラー化が実現し、1964年の東京オリンピックにおいては世界で初めての衛星生中継が行われた。以降、ハイビジョン放送、デジタル化と、大きく進化・発展を遂げ、さらに今年12月には放送衛星を使ったスーパーハイビジョン放送、「新4K8K衛星放送」が本格的に開始される。

しかし一方で、通信やインターネットの普及により、テレビ離れが進んでいると言われる。2015年に行われた国民生活時間調査の報告¹⁾でも、「テレビは依然として1日の中で国民のほとんどが接する“日常メディア”といえる。しかし、1日の中で15分以上テレビを見ている人の割合は、2010年から平日・土曜・日曜とも減少している。」という結果が示されている。

このようなテレビ離れが進む要因として、インターネットやスマートフォンの普及に伴うメディア利用の変化や、1日の中で仕事や家事、食事、睡眠などの時間を除いた自由時間確保の限界、及びその自由時間の過ごし方の多様化などが挙げられる。

NHK 放送技術研究所（以下、NHK 技研）では、上記のような放送や通信技術の高度化と、それに伴う生活スタイルの変化を放送サービスの新たな発展の大きなチャンスと捉え、今までに経験したことのない視聴体験や、より生活に密着した新たなユーザー体験が得られるサービスの実現に向け、高品質化と高機能化の両面から研究を推進している。本稿ではその中から4つの研究、「スーパーハイビジョン」、「立体テレビ」、「インターネット活用技術」、及び「AI技術を活用した番組制作支援技術」を紹介する。

2 スーパーハイビジョン

2.1 システム仕様とその特徴

「新4K8K衛星放送」の情報源符号化の仕様²⁾を表1に示す。映像フォーマットはハイビジョンの縦横それぞれ2倍の画素数となる4Kフォーマット、4倍の画素数となる8Kフォーマットでの放送が予定されている。4K放送は現在の衛星放送と同じ右旋円偏波を使って、8K放送は、左旋円偏波を使った新たなチャンネルで放送される³⁾。また、表色系は現行のハイビジョン放送やデジタルシネマなど主要な映像システムの色域を包含すると共に、実在する物

表1 「新4K8K衛星放送」の情報源符号化の仕様

	項目	仕様	
	映像	フォーマット	8K
空間解像度（画素数）		7680×4320	3840×2160
アスペクト比		16:9	
クロマフォーマット		4:2:0	
ビット深度		10	
走査方式		順次走査	
フレーム周波数		60/1.001 Hz	
表色系		広色域（ITU-R勧告BT. 2020）	
圧縮方式		HEVC/Main10	
HDR対応		HLG（Hybrid Log Gamma）方式	
音声		項目	仕様
	音声モード	22.2 ch, 7.1 ch, 5.1 ch, 2 ch	
	サンプリング周波数	48 kHz	
	量子化ビット	16ビット, 24ビット	

体色をほぼ包含できる仕様⁴⁾となっており、より実際に近い鮮やかな色再現が可能になっている。さらに明るさ方向の再現性を改善した高ダイナミックレンジ（HDR: High Dynamic Range）信号⁵⁾にも対応している。バックライト制御型の液晶ディスプレイや自発光型の有機ELディスプレイなどHDR信号に対応したディスプレイでは、反射光や発光物、ひなたと日陰の同時再現など明るさ方向の表現力も大幅に改善される。

2.2 スーパーハイビジョンの更なる高画質化と本格普及に向けた取り組み

NHK 技研では、スーパーハイビジョンの世界規格ITU-R 勧告BT.2020⁴⁾に規定されている最上位フォーマット（フレーム周波数120Hzの8K映像）のシステムをフルスペックスーパーハイビジョンと名付け、番組制作機材の研究開発と試験的な番組制作システムの構築を進めている（図1）。

また、家庭への超高精細大画面テレビの普及に向けて、シート型ディスプレイの研究開発を進めている。図2は2017年の技研公開で展示した4Kパネル4枚を並べた薄さ2mmの130型8Kシート型ディスプレイである。

さらに次世代地上放送システムとして固定受信向けのスーパーハイビジョンと、移動受信向けのハイビジョンを同時に提供する階層放送システムの研究を進めている⁶⁾。通信回線との連携が容易になるデータ多重化方式MMT（MPEG Media Transport）の採用やIP（Internet Protocol）信号への変換装置の開発など、放送と通信が連携した新しいサービスの実現を目指している。

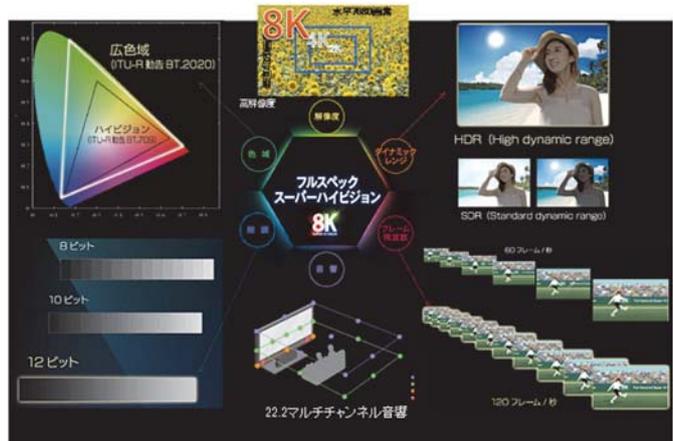


図1 フルスペックスーパーハイビジョン

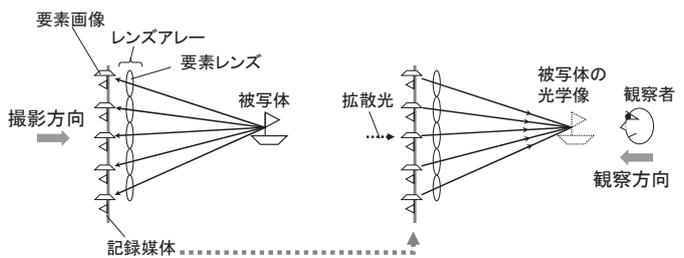


図2 130型8Kシート型ディスプレイ

3 立体テレビ

将来の映像再生方式として、特別なメガネを必要とせず、自然な立体映像の再生が可能な空間像再生型立体方式の1つである「インテグラル式」の研究を進めている。

「インテグラル式」は、インテグラル・フォトグラフィーと呼ばれる立体写真技術の原理に基づく。インテグラル・フォトグラフィーは多数の小さな凸レンズが平面状に並んだレンズアレーを用いて、被写体からの光（物体光）を進行方向で標本化し、その光線群を記録・再生する（図3）。このシステムでは、再現できる奥行き範囲を広くするために、要素画像を表示する電子ディ



(a) 記録 (b) 再生
図3 「インテグラル式」立体の原理

スプレアの画素間隔を小さくする必要がある。また、要素レンズ1つが再生される立体像の1画素に相当するため、立体像の解像度を上げるためには要素レンズの数を増やす必要がある。すなわち、広い奥行き範囲に高解像度の立体像を表示するには、狭画素間隔で多画素な電子ディスプレイが必要になる。

「インテグラル式」を用いた立体テレビシステムの実現を目指し、高品質な立体像の撮影・表示方法として複数のカメラや表示デバイスを組み合わせて多画素化を図る検討を進めている。撮影においては、7台のハイビジョンカメラを組み合わせた撮像装置を試作した⁷⁾。また、表示においては、図4に示すように4台の液晶パネルの映像をレンズアレイと凸レンズを用いて拡大し、光学的に継ぎ目なく結合することにより、4倍に多画素化を図った表示装置を試作した⁸⁾。

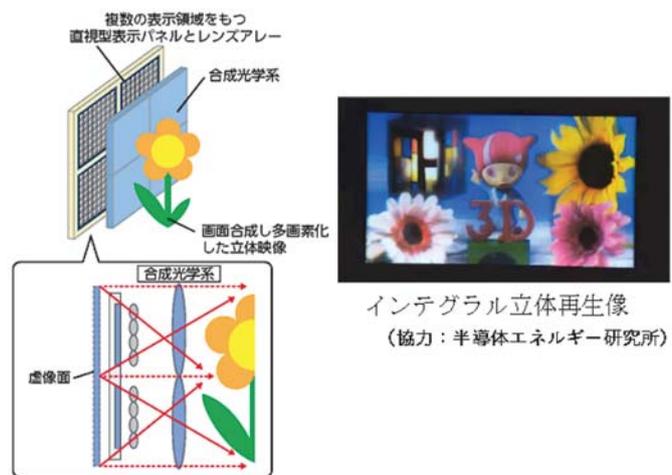


図4 「インテグラル立体」表示装置の多画素化

4 インターネット活用技術

4.1 「メディア統合プラットフォーム」

タブレットやスマートフォンなどのさまざまなデバイスの普及や、インターネットの高速化によって、動画コンテンツの視聴方法が多様化している。放送局もVOD (Video on Demand) サービスや見逃し配信サービスに取り組むなど、インターネットで放送番組を視聴することが身近になってきた。一方、視聴方法が多様化するとともに、その利用方法は複雑化している。視聴デバイス（端末）や配信サービスによって、利用するアプリケーションや操作方法が異なるため、視聴できるはずの番組を見逃したり、高画質の動画が見られるにもかかわらず低画質で見ることになる場合も出てくるものと思われる。

そこで、ユーザーが放送や通信の配信メディアや視聴機器ごとに、異なるアプリの選択や操作を行うことなく、容易にコンテンツを視聴できる「メディア統合プラットフォーム」⁹⁾の実現に向けた研究を進めている（図5）。

「メディア統合プラットフォーム」は、各メディアにおけるコンテンツの配信状況を管理するサーバーと、放送や通信で提供されるコンテンツを統合して取り扱うデバイス上の処理エンジンを組み合わせたシステムである。管理サーバーのコンテンツ配信状況と処理エンジンで取得されるユーザー状況から、放送とネットの適切な使い分けを自動的に行い、配信メディアによらず同じ使い勝手を提供する。ユーザーはどのデバイス上でも同じリンクをクリックするだけで、状況に合わせた手段で動画コンテンツを視聴できるようになる。

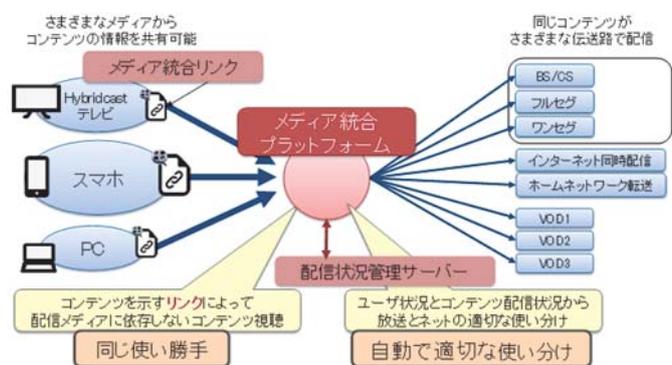


図5 メディア統合プラットフォーム

4.2 ハイブリッドキャストと行動連携サービス

いつでも手元にあるスマートフォン（スマホ）を活用し、テレビの前だけでなくテレビを見ていない時間や外出先においても、テレビ視聴と生活行動をつなぐ「行動連携サービス」の実現を目指して研究を進めている。その一手法として、テレビとの連携を可能にするスマホのアプリ“Hybridcast Connect”¹（以下、ハイコネ）を拡張し、放送と多様なサービスが簡単に連携できるしくみの検討を進めている¹⁰（図6）。

ホームページやSNSのコメントをきっかけに番組を知ることは日常的になっている。ハイコネに、スマホからテレビを操作する機能や、さまざまなスマホのアプリと相互に連携する機能を持たせることにより、スマホで見ているアプリから、簡単な操作で関連する番組（放送やVoD）をテレビで見られるようになる。

また、今後の普及が期待されるIoT（Internet of Things）サービスを想定し、家電やロボットなどのIoT機器とテレビが連携する機能の検討も進めている（図7）。例えば、スポーツ中継に連動してロボットがお気に入りのチームを応援したり、料理番組のレシピと冷蔵庫の食材を照らし合わせ、足りない食材をスマホで注文したりするなどのサービスが期待できる。さらに、番組の視聴履歴と現在の時間や場所から、個人の状況に合った情報提供も可能になる。例えば、視聴履歴をハイコネからカーナビに送ると、走行中に近くのドラマのロケ地を提示してくれるなど、テレビ視聴と生活行動が結びつく。現在、さまざまな事業者と協力しながら、応用事例の検討やハイコネの仕様の拡充を進めている。



図6 ハイブリッドキャストの機能拡張による行動連携サービス



図7 IoT機器との連携サービス例

5 AI技術を活用した番組制作支援技術「スマートプロダクション」

近年、放送局では、素材伝送回線の高速化や記録メディアの大容量化に伴い、番組制作のための映像や音声を大量に取得できるようになった。また、ソーシャルメディアの利用が一般化するにつれて、事件や事故などの第一報や、社会のトレンド情報などがTwitterをはじめとするソーシャルメディアから取得できるようになってきている。さらに自治体等が公開しているセンサー情報などのオープンデータを監視して番組につなげることもできるようになっている。

このような大量の映像素材から人手で番組に必要な素材を取り出したり、ソーシャルメディアから番組に役立つ情報を取得したりすることは、番組制作者にとって非常に負荷の高い作業である。また、制

¹ Hybridcast Connect：受信機メーカーに依存せず、どのハイブリッドキャスト対応テレビとも連携できることを目指して作られたスマホのアプリ

作された番組などのコンテンツを外国人や聴覚・視覚障害者の方々を含むすべての人に届けるためには、受け取る人の視聴環境に合わせた、人にやさしいコンテンツへの形式変換が必要になる。

NHK 技 研 で は、AI (Artificial Intelligence) 技術を利用したコンテンツ制作支援技術を「スマートプロダクション」と名付け、放送現場と連携して研究を進めている。現在、「正確な情報を迅速にあらゆる人に届ける」というコンセプトのもと、以下の技術の研究開発を進めている。(図8)。



図8 スマートプロダクション

5.1 正確な情報を迅速に取材・編集するためのインテリジェント番組制作

・「ビッグデータ解析」

放送局が持つ番組制作に関するノウハウとデータを AI により解析することで、ソーシャルメディアや自治体等が提供するデータから番組制作に役立つ情報を取得したり、原稿を自動で生成したりする制作支援システムの研究開発を進めている。図9は、ソーシャルメディアの情報を解析し、火事や交通事故、気象災害などのカテゴリごとのニュースに役立つ情報を抽出するシステムである¹¹⁾。



図9 ソーシャルメディアからの事件・事故などの情報をリアルタイムかつ正確に抽出するシステム (ユーザーが抽出結果をチェックし、システムを再学習させる機能も実現)

・「画像解析技術」

大量の映像素材から制作者が必要な映像を取得するために、顔認識および文字列認識技術による自動メタデータ生成の研究を進めている。

・「音声認識技術」

音声認識技術の活用として、生放送番組への字幕付与と取材素材の書き起こし (音声情報のテキスト化) 支援という2つの応用を目指して研究に取り組んでいる。

5.2 あらゆる人にコンテンツを届けるための「コンテンツ変換技術」

・「音声ガイド」¹²⁾

視覚に障害のある方にもテレビのスポーツ中継を十分に楽しんでいただくために、映像を見なくても伝わらない情報を合成音声で自動的に補完するサービスの実現を目指している。スポーツ競技で大会主催者などからリアルタイムに配信される、「誰が」、「いつ」、「何をした」などのデータ (リアルタイム競技データ) から、競技の進行を説明する発話文章を自動で生成し、これを適時合成音声で読み上げる (図10)。

・「やさしい日本語」

国内定住外国人へニュースを伝える新たな手段として、やさしい日本語を使った「読解支援情報付きニュース」の研究を進めている。難しい語彙に対して、やさしい日本語の説明を表示するとともに、漢

字へのふりがな、辞書の表示も可能である。

・「手話 CG」

聴覚に障害のある方への手話サービスの拡充を目指して、気象やスポーツ競技などの外部データから手話 CG を自動生成する技術の研究開発を進めている。気象庁から配信される気象電文をもとに天気予報の手話 CG 動画を自動的に生成するシステムを開発し、2017年2月から評価サイトにて関東7都県の天気予報の手話 CG を一般公開している¹³⁾ (図 11)。

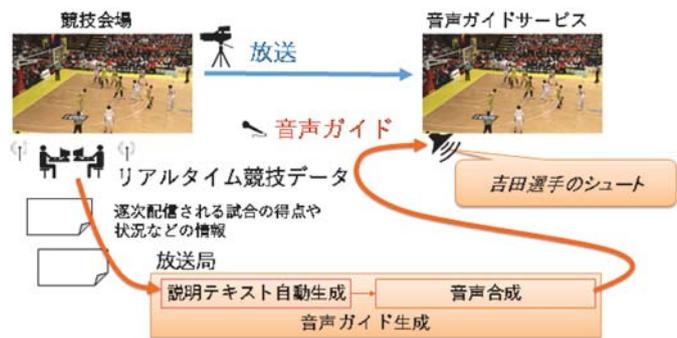


図 10 スポーツ番組への音声ガイドの自動付与

6 おわりに

放送技術はラジオに始まり、白黒テレビ、カラーテレビ、衛星放送、ハイビジョン放送と常に新しい技術を取り込みながら進化・発展してきた。大容量インターネットや第5世代移動通信システム (5G) などの高度な情報通信技術が発達した ICT 社会においても、信頼される情報の社会基盤として、通信との連携や新たな技術導入を図りながら、幅広いユーザーに効率よく新しいサービスを届ける仕組みを作っていく必要がある。

本稿では、NHK 技研で取組む次世代の放送サービスに向けた放送の高品質化、高機能化に係る研究開発の一部を紹介した。NHK 技研ではこのほかにも、伝送方式や符号化方式、カメラやディスプレイなどの番組制作機材、システム評価技術や材料・デバイスの研究まで放送技術に係る幅広い研究開発を進めている。例年5月の終わりには研究成果を一般の方にご覧いただく“技研公開”¹⁴⁾を開催しているので、機会があれば是非、ご来場いただきたい。



図 11 気象情報からの手話 CG の自動生成
(<http://www.nhk.or.jp/strl/sl-weather/>)

参考文献

- 1) NHK 文化調査研究所：“2015年国民生活時間調査報告書”
http://www.nhk.or.jp/bunken/research/yoron/20160217_1.html
- 2) ARIB TR-B39: “高度広帯域衛星デジタル放送運用規定”、第三分冊、第七編
- 3) 総務省ホームページ：“4K・8K 放送の推進”
http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/housou_suishin/4k8k_suishin.html
- 4) ITU-R 勧告 BT.2020: “Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange” (2012)
- 5) ARIB STD-B67: “ESSENTIAL PARAMETER VALUES FOR THE EXTENDED IMAGE DYNAMIC RANGE TELEVISION (EIDRTV) SYSTEM FOR PROGRAMME PRODUCTION” (2015)
- 6) 土田：“地上 SHV 放送を目指した研究開発 ～伝送容量拡大技術および周波数有効利用技術の検討～”、映情学技報、Vol.41, No.43 BCT2017-95、pp.47-54 (Nov. 2017)

- 7) M. Miura, N. Okaichi, J. Arai and T. Mishina: "Integral Three-dimensional Capture System with Enhanced Viewing Angle by Using Camera Array", Proc. SPIE, Vol.9391, 93914 (2015)
- 8) N. Okaichi, M. Miura, J. Arai and T. Mishina: "Integral 3D Display Using Multiple LCDs", Proc. SPIE, Vol.9391, 939134 (2015)
- 9) 遠藤: "メディア統合プラットフォーム ～メディア・デバイスによらない"テレビ"視聴と放送関連機能のIoT対応～", デバイス WebAPI コンソーシアム第5回技術ワーキンググループ会合, Oct. 2016
https://device-webapi.org/event/20161013/5th_tech_wg_meeting.html#s4
- 10) 大亦、池尾、小川、山村、宮崎、上原、藤沢: "Hybridcast Connect X: 生活行動と番組視聴のシームレスな連携を可能にするアプリケーションフレームワークの提案", マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO 2017) シンポジウム論文集, vol.2017, no.1, 2E-1, 2017 p.360-369, Jun. 2017
- 11) T. Miyazaki, S. Toriumi, Y. Takei, I. Yamada, and J. Goto: "Extracting Important Tweets for News Writers using Recurrent Neural Network with Attention Mechanism and Multitask Learning," Proceedings of the 31st Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation (PACLIC 31), 2017
- 12) 熊野: "スポーツ番組を解説する「音声ガイド」生成技術", 技研 R&D, 164 号, pp.49-55, 2017
<http://www.nhk.or.jp/str1/publica/rd/rd164/rd164-j.html>
- 13) 東、山内、住吉、内田、宮崎、梅田、加藤、比留間: "気象情報手話 CG サイトの公開", 2017 年映像情報メディア学会年次大会講演予稿集 33D-4, 2017
- 14) NHK 放送技術研究所のホームページ <http://www.nhk.or.jp/str1>

新設研究室紹介

通信システム工学講座 知的通信網分野 (大木研究室)

<http://icn.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えたネットワークの実現に向けて理論から実装まで」

昨今、IoT (Internet of Things)、ビッグデータ、そして、AI (人工知能) が3大キーワードとして挙げられています。大木研究室は、データを収集する役割を担うスマートフォンやIoT デバイス (ドローンや、自動車、ウェアラブルデバイスも含む)、データを蓄積するデータセンター、そしてデータを計算処理し人々に価値をもたらすクラウドや様々なアプリを、相互接続するだけでなくデータが人々にもたらす恩恵を最大化できるような高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えたネットワークの研究開発を行なっています。理論から実装まで幅広いアプローチで取り組みます。

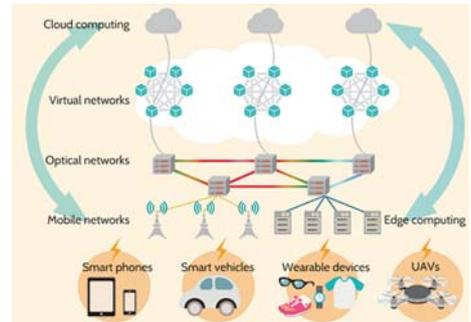


図1 大木研究室のビジョン

光ネットワーク制御技術: 光通信ネットワークにおいて、波長スペクトル資源を有効的に利用可能な弾力性のある光ネットワークの実現が求められています。動的な光パスの設定・解除により、使用可能な波長資源スペクトルが未整列・非連続となる波長スペクトルの分断が生じる問題があります。我々は、経路変更などにより通信中の光パスを瞬断することなく、波長スペクトルの分断の発生を抑制して、波長スペクトル資源を有効的に利用する光ネットワーク制御の基盤技術の確立を目指しています (図2)。

センサクラウド技術: 人々のライフログや環境に関するセンサデータを収集し、クラウドで集約することで、人々にとって価値のある情報 (ナレッジ) を自動的に生成し、人々の行動予測に基づいて最適なタイミングでナレッジを配信するためのシステムを研究開発しています (図3)。

ネットワーク仮想化技術: ネットワーク機器の制御機能を共通コントローラに集約し、仮想ネットワークの構築や制御を行う SDN (Software Defined Networking) 技術、及び、ルーティングやファイアウォール等の機能をソフトウェア化し汎用サーバ上で提供する NFV (Network Function Virtualization) 技術が発展しています。我々は、これらのネットワーク仮想化技術を活用し、ネットワーク利用効率向上、マルチサービス対応、低消費電力化、高信頼化等を実現する手法を研究しています。リソース割り当てアルゴリズムの開発、ネットワークアーキテクチャの検討、プロトタイプシステム実装による検証実験等を行っています。

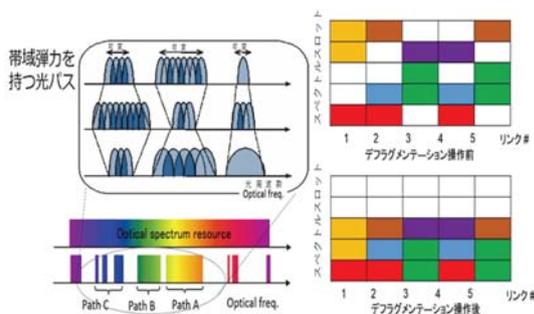


図2 光ネットワーク制御技術

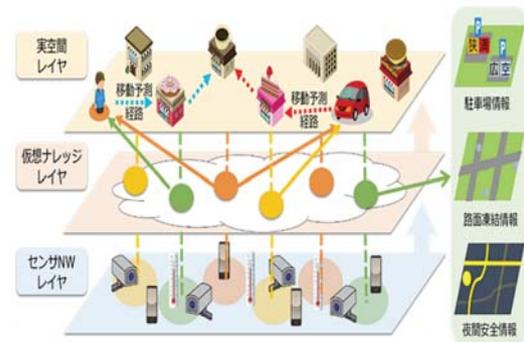


図3 センサクラウド技術

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、*は「新設研究室紹介」に掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科 (大学院)

電気工学専攻

先端電気システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研) ☆

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座
(中村武研)

電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性工学分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研) #

量子機能工学講座量子電磁工学分野 (北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創成部門先進電子材料分野 (藤田研)

情報学研究科 (大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研) *

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

エネルギー科学研究科 (大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアライゼーション研究分野

(小山田研究室)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野 (中村裕研)

システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「確率的動特性をもつ系の安定化制御」

計算機性能の向上等を背景に、人の手を介すことなく自動で制御することが望まれる対象は近年ますます多様化かつ高度化している。本研究では、そのような自動制御技術に関するニーズの高まりを受け、従来は取り扱うことが容易でなかった対象のクラスの1つとして確率的動特性をもつ系に着目し、その自動制御を実現するための理論整備を行っている。動特性とは、対象の現在の出力が現在だけでなく過去の入力にも依存して定まる性質のことであり、制御を要する対象の大半はこの性質を有している。この動特性が確定的であれば、(外乱がないとき) 同じ入力に対して常に同じ出力が得られることになる。一方、現実の世界では対象に同じ信号を入力したとしても出力結果が変わることが珍しくなく、とくにそのランダム性が外乱等の外部入力由来ではなく対象固有の性質からくるものである場合には、その動特性(および入出力関係)にランダム性を想定することが望ましい。そのような対象を数値的に取り扱うためのモデルとして、本研究では動特性が次の状態方程式で記述できる確率系を採用している。

$$x_{k+1} = A(\xi_k)x_k + B(\xi_k)u_k$$

上式において k は離散時間を表し、 x_k および u_k はそれぞれ時刻 k における状態および入力を表す。また、 ξ_k は k ごとにランダムに値をとるベクトルであり、 $A(\xi_k)$ および $B(\xi_k)$ はそのランダムベクトルによって値が定まるランダム行列である。明らかにこの系の状態 x_k (したがって対応する出力) は、たとえ u_0 から u_k までの入力が確定的であったとしても確率的にしか定まらない。

制御を行う上で最も重要かつ基礎的な指標の一つに安定性(荒く言えば状態が0に収束する性質)がある。本研究では、上記確率系の安定性を必要十分の意味で特徴づける、リアプノフ不等式と呼ばれる条件式の導出に成功した。そのリアプノフ不等式に基づくことで、確率系の厳密な安定解析が可能である。また、導出したリアプノフ不等式は安定化制御器設計のための条件式へ拡張することが可能である。以下ではそのような設計の一例を紹介する。制御をかけない場合(したがって入力は0で固定)の応答が初期値 $x_0 = [1, 0, 0]^T$ のもとで図1のような確率系を考える。ただし図1では、系の動特性が確率的であることに対応して、100通りの見本過程の重ね合わせ(x_k の第1成分のみ)を表示している。図から明らかな通り、この系は不安定である。そのような系に対し、リアプノフ不等式に基づき安定化状態フィードバックを設計し、適用した結果を図2に示す。ただし、この図においても100通りの見本過程を重ね合わせており、その見本過程の生成には図1で用いたものと同じ初期値および ξ_k の標本を用いた。図2では状態が0に収束しており、安定化が達成されていることが確認できる。

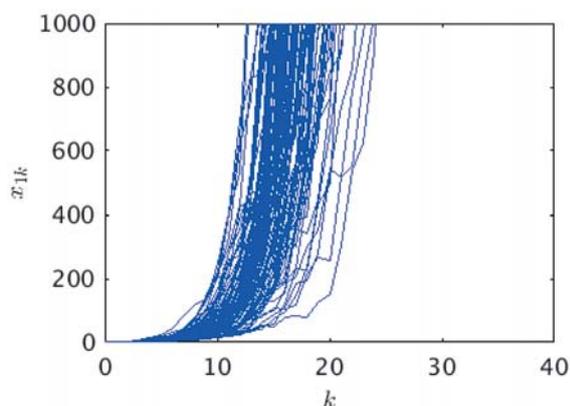


図1：制御をかけない場合の初期値応答

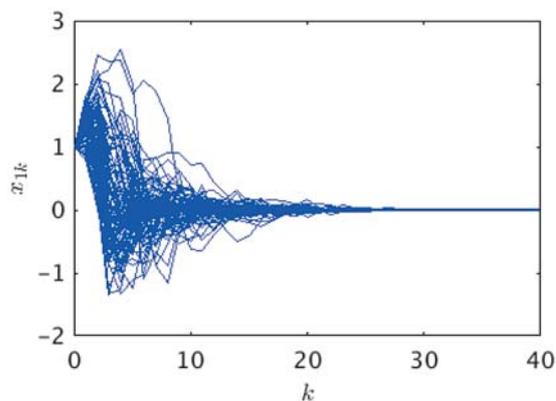


図2：制御をかけた場合の初期値応答

生体医工学講座 複合システム論分野 (土居研究室)

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「van der Pol 方程式のアヒル解が生成するフェイク・カオス」

非線形振動論 [1] は、当電気系教室における古くからの伝統であるが、未だに新しい現象の宝庫である。古典的な van der Pol 方程式 (もとの 2 階の微分方程式を Liénard 変換後、定数項を付加したもの)

$$\dot{x} = x - \frac{x^3}{3} - y, \quad \dot{y} = \varepsilon(x - b)$$

は、 ε が十分小さいとき、いわゆる特異摂動系となり、アヒル (同義のフランス語でカナール (canard) とも呼ばれる) 解という特徴的な解を持つ。アヒル解は、カオスと共に非線形力学系の双壁を成し、1980 年代には超準解析等を用いて精力的に研究された。図 1 は、上式で $\varepsilon = 0.1$ のとき、いくつかの b の値 ($b = B_{n,0.1}$

で、 $B_{n,0.1}$ は漸近展開の n 項までを利用して求めたパラメタ値。詳細は [2] を参照のこと) に対する、定常状態での複数の数値解 (それぞれは閉軌道) を重ねて表示したものである (通常とは、 x と y が逆であることに注意)。このカナール解の特徴は、パラメタ b をほんの少し: $O(\exp(-1/\varepsilon))$ 変化させただけで、解が大きく: $O(1)$ 変化することである。もう一つの特徴は、解が x ヌルクライン ($\dot{x}=0$ なる 3 次曲線: 破線) の不安定な枝 (真ん中の枝) に沿って動くことである (ほとんどの解軌道は、この枝から離れるように動くが、この枝の $O(\varepsilon)$ 近傍に、解がこの枝に沿って動く領域がある)。 ε が小さくなると、さらに不思議な振動が発生する。

図 2 は、 $\varepsilon = 0.01$ で $b = B_{9,0.01}$ のときの解である ($\varepsilon = 0.1$ のときに比べて、パラメタ b の値の選び方は、さらに微妙になる)。これは、一つのパラメタ値と一つの初期値に対する解である。方程式は 2 次元自律系であるので、このような解は幾何学的にあり得ないうえに、カオス的に不規則な様相も呈する。数値計算によって理論的にはあり得ないカオスが発生することは、古くから知られている。しかし、本研究の興味深いところは、疑似カオス発生メカニズムである。意外なことに、図 2 の疑似カオスは、 x ヌルクラインの安定な枝 (下の枝) に沿って動く「安定なダイナミクス」によって生成されている。文献 [2] では、特異摂動系の漸近展開 [3] と任意精度数値計算ライブラリ MPFR を用いた数値的解析により、安定な枝に沿って解が (左に) 動く間に、浮動小数点演算の精度の限界を超えて、この枝に収束してしまっただけが疑似カオス発生原因であることを明らかにした (実は、分かってしまうと、この現象は当たり前現象であった。つまり、微分方程式を数値的に解いたことのある人には周知の事実であるが、漸近安定な平衡点に向かった数値的解軌道は「有限時間で」安定平衡点に到達 (平衡点に一致) してしまうことと類似の現象が安定な枝に沿って発生していたのである)。

参考文献

- [1] Chihiro Hayashi: Nonlinear Oscillations in Physical Systems (1985). 筆者が若いときに、UCLA の書店でこの本 (最初の McGraw Hill 版ではなく、Princeton 版) を見つけて喜んで購入したことを憶えているが、日本人の書いた専門書で、これほど世界中で広く長く読まれている本は他にないのではないか。
- [2] S. Doi, T. Kodama, H. Oosaki, "Importance of sufficient precision in stable dynamics for the numerical computation of canards in singularly perturbed systems," Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 6, no. 4, pp. 454-465 (2015)
- [3] J. Moehlis, "Canards for a reduction of the Hodgkin-Huxley equations," J. Math. Biol., vol. 52, no. 2, pp. 141-153 (2006)

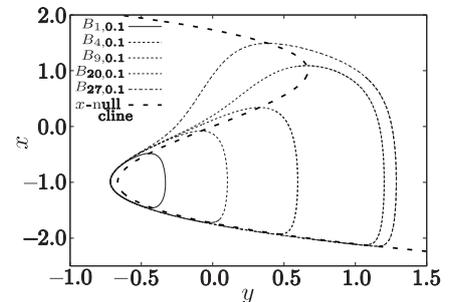


図 1: 様々なアヒル解

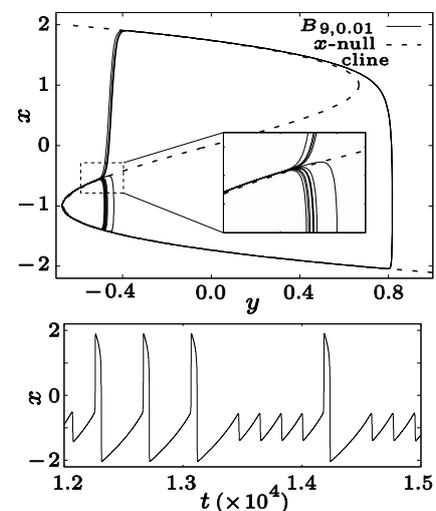


図 2: フェイク・カオス

電磁工学講座 電磁回路工学分野 (和田研究室)

<http://cct.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「単導体線路モデルを用いた細線導体構造の回路表現」

メタマテリアルやプラズモニクスなど、複雑な導体構造を利用して電磁現象を操る取り組みが注目されているが、複雑な導体構造における電磁界の振る舞いを把握することは難しく、多くの場合は電磁界シミュレーションを用いた試行錯誤が必要になる。このような電磁現象が回路を用いて表現できれば、現象の明確化が可能になり、複雑な導体構造の設計へとつなげることが期待できる。構造の大きさも考慮した回路モデルとしては、分布定数線路モデルが広く用いられているが、扱える構造には制約がある。例えば図1のような細線導体構造に対して電磁波が入射した場合の現象を解析する場合、通常の分布定数線路モデルでは明示的な帰路線が必要のため扱えない。

帰路線を持たない単導体線路に対する研究は古く、マクスウェルの方程式に対して、ヘルツが電磁波の存在を示した実験の議論の中で、ゾンマーフェルトが無限長円柱導体上の電流伝搬を円筒関数を用いて扱った研究に始まる。この手法は無限長では非常に有効であるが、アンテナのように有限長の場合は端点の扱いが難しい。

このような問題に対して、完全導体の細線単導体において光速 c で電流が伝搬する解をもつことを基に、導体上の線電荷密度 Q と電流 I を変数とした、次のような波動方程式を用いた等価回路モデルの提案を行った [1]。

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} Q \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -j\omega \\ -j\omega & \frac{c^2}{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln ka} E^{\text{ex}}(z) \\ 0 \end{bmatrix}$$

z は導体の長手方向の局所空間座標、 a は導体半径、 k は入射波の波数、第1行の強制項は外部電界による励振を示し、第2行は電荷保存則である。単導体線路1本で長いアンテナ導体の振る舞いを表現でき、それらを接続することにより、複雑な導体構造に拡張できる。

図2はY型に接続された3本の単導体線路（それぞれ長さ3mm）に対して電界が入射した場合の接続点における電流の周波数特性を回路モデルと電磁界シミュレーション（モーメント法）とで比較したものであるが、回路モデルによって共振や放射損などの特性が表現できていることがわかる。このように単導体線路を接続した回路モデルを用いることで複雑な導体構造の回路解析が可能になれば、複雑な電磁現象の設計にもつながると考えている。

参考文献

[1] T. Kimura, T. Hisakado, T. Matsushima, O. Wada, "Time domain model for reaction of radiation on thin cut wires," Metamaterials' 2016, Poster No. 49, Crete, Greece, (September 2016).

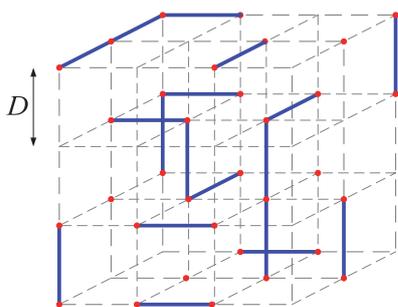


図1 細線導体構造

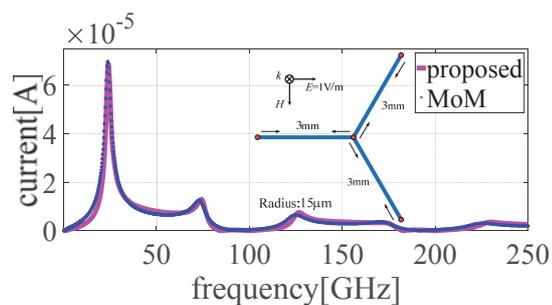


図2 Y型単導体に対する回路モデルと電磁界解析の比較

電子物理工学講座 応用量子物性工学分野（竹内研究室）

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「量子もつれ光を用いた、超高分解能光断層撮影技術を開発」

光干渉断層撮影技術は、眼科分野において、網膜などさまざまな組織の診断技術として急速に普及しています。さらに、肺や消化管の表層組織の断層撮影への応用も進められており、早期がんの診断などへの検討も進められています。より高い深さ分解能の実現は非常に重要です。

光干渉断層撮影技術の深さ分解能を向上させるには、より広帯域の光源を用いる必要があります。しかし光源の帯域を上げると、光の波長ごとに光の進行速度が異なる群速度分散により、分解能が逆に劣化するというジレンマがあり、分解能は $5\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ 程度に制限されていました。それを解決する方法として、量子もつれ光の2光子量子干渉を利用する量子光干渉断層技術が、2002年に提案されました。この方法では、原理的に群速度分散による分解能の劣化がなく、高い分解能を得られることが期待されます。

我々は、今回、非常に広い帯域を持つ量子もつれ光源を開発、世界記録となる、 $0.54\mu\text{m}$ の分解能に相当する量子干渉縞を実現しました。これは、従来の光断層撮影の原理検証で記録されていた世界記録 $0.75\mu\text{m}$ を超える値です。さらに、この超高分解能が、分散媒質（水）などによってほぼ影響を受けないことも実証しました。量子もつれ光源には、物質・材料研究機構の開発した高効率な擬似位相整合素子を用いました。

実験結果を図1に示します。図1(a)は、得られた低コヒーレンス干渉縞です。横軸は光路長差、縦軸は干渉光強度を表します。この干渉縞の幅($1.5\mu\text{m}$)が、光断層撮影の深さ分解能を与えます。図1(b)は、光路中に1mm厚の水を挿入した場合の結果です。水の群速度分散の影響で、干渉縞は著しく広がり、分解能も $1.5\mu\text{m}$ から $7.8\mu\text{m}$ に大きく劣化しています。図1(c)は、量子もつれ光子対の2光子量子干渉の結果です。横軸は、光路長差、縦軸は光子を同時に検出した回数（同時計数）を示しています。2光子量子干渉では、光路長が一致するところで同時計数が0になり、その窪みの幅が、分解能を与えます。この実験では、量子光断層撮影の深さ分解能 $0.54\mu\text{m}$ に相当する2光子干渉が得られています。図1(d)は、光路中に1mm厚の水を挿入した場合の結果です。低コヒーレンス干渉の場合(図1(b))と大きく異なり、分解能は $0.56\mu\text{m}$ と、水が存在しない場合と比べ殆ど変化していません。現在、この量子光断層撮影の高度化に向けた研究を、JST-CRESTの支援のもと推進しています。本研究は、物質・材料研究機構の栗村直主幹研究員と名古屋大学の西澤典彦教授らとの共同研究です。

参考文献：M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura & S. Takeuchi, “ $0.54\mu\text{m}$ resolution two-photon interference with dispersion cancellation for quantum optical coherence tomography” *Scientific Reports* 5, 18042, December (2015).

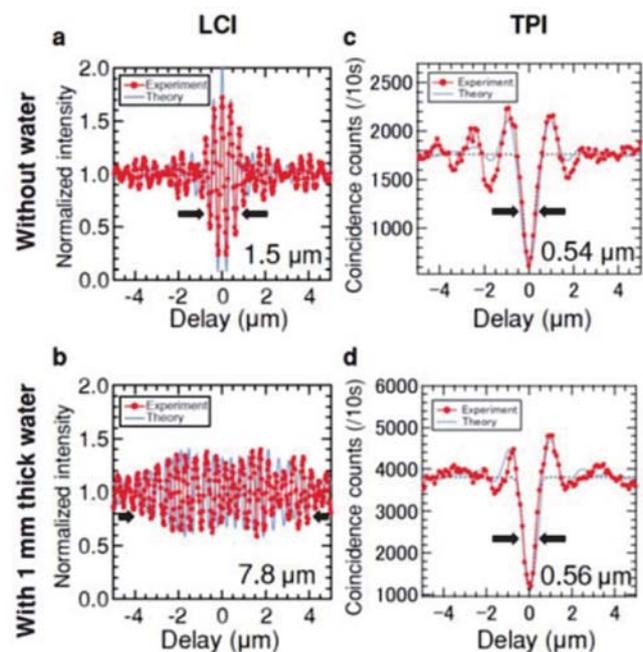


図1. 実験結果。

電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「SiC のキャリア寿命制御と超高耐压ダイオードに関する基礎研究」

耐压 1~3 kV 級の SiC (炭化珪素) パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードは実用化が始まり、各種の電源、太陽電池用パワコン、エアコン、電車、電気自動車などで顕著な省エネ効果が示されています。しかしながら、変電所等の電力インフラ用変換器や加速器用高圧電源には、10 kV 超級の超高耐压のパワーデバイスが要求されます。このような電力を変換 (交流→直流、直流→交流など) する際、現在は耐压 6~8 kV 級の Si サイリスタが用いられていますが、変換時の電力損失が大きく、発熱に弱いという問題を抱えています。超高耐压応用では、少数キャリアの注入を活用する SiC バイポーラデバイス (PiN ダイオード、サイリスタ、IGBT 等) が有望です。しかしながら、高耐压デバイスに有望な SiC と言えども、10 kV 超級のデバイスを実現するためには、結晶およびデバイス作製の両面において課題があります。少数キャリアの注入を活用するバイポーラデバイスでは、キャリア寿命の増大と制御が重要となります。また、電界集中緩和や素子表面での破壊を防ぐデバイス構造を作製する必要があります。今回は、キャリア寿命制御と超高耐压 PiN ダイオードの作製に関する研究を紹介いたします。

本研究室では、SiC におけるキャリア寿命制限欠陥が炭素空孔であることを同定すると共に、高温熱酸化を施すことによって、この炭素空孔を厚さ約 200 μm に亘ってほぼ完全に消滅できることを見出しました。成長直後の SiC のキャリア寿命は 1~2 μs ですが、炭素空孔を消滅させることにより、キャリア寿命を 50~100 μs に増大できます。今回は、炭素空孔を消滅させた高純度 SiC 結晶に高温の熱処理を施すことにより、所望の炭素空孔密度、ひいては所望のキャリア寿命を得ることを目指しました。高温熱処理による炭素空孔の生成は、温度で決まる結晶の熱平衡欠陥密度を利用しており、結晶の面内および深さ方向に対して均一に炭素空孔を生成させることが可能です。図 1 に、この方法により作製した SiC 試料のキャリア寿命のマッピング結果を示します。熱処理温度の上昇と共に炭素空孔密度が増大するため、キャリア寿命が短くなるのが分かります。本手法を用いることにより、デバイス動作に最適なキャリア寿命を均一かつ再現性良く得られることが分かりました [1]。

次に、炭素空孔を消滅させた高純度 SiC 結晶を用いて PiN ダイオードの作製に取り組みました。素子端部における電界集中を緩和させるため、独自の接合終端構造を考案し、多段イオン注入により形成しました。また、表面破壊を抑制するために、ポリイミド膜を活用しました。厚さ 98 μm の高純度 SiC 層を用いて作製した PiN ダイオードの順方向特性を図 2 に示します。キャリア寿命増大により顕著な特性改善が見られ、1.6 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ という極めて小さい (優れた) オン抵抗を得ることができました。少数キャリア注入がない場合のオン抵抗は約 150 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ と概算されますので、キャリア注入による伝導度変調効果が大きく働いていることが分かります。このダイオードは 13 kV という高い耐压を示し、温度上昇と共に耐压が増大することを確認しました。また、より厚い SiC 結晶を用いたダイオードでは約 27 kV という最高耐压も達成できています [2]。今後は素子構造の工夫により注入キャリアの深さ方向分布を制御し、さらなる高性能化を目指します。

[1] E. Saito et al., Appl. Phys. Exp. **9**, 061303 (2016). [2] N. Kaji et al., IEEE Trans. Electron Devices **62**, 374 (2015).

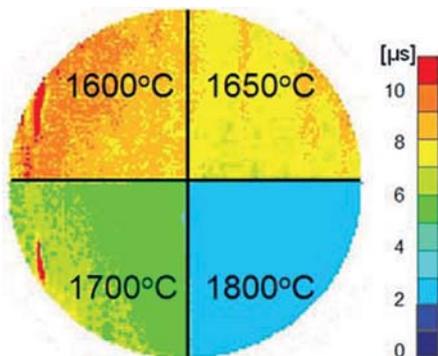


図 1 異なる温度で熱処理を施した SiC 試料のキャリア寿命分布

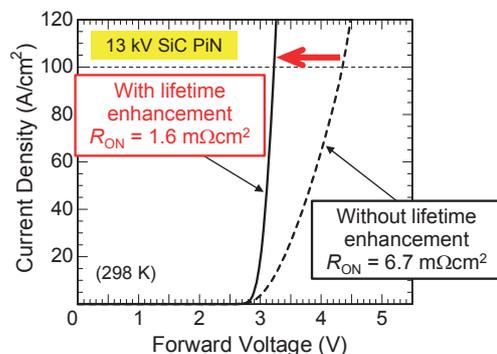


図 2 13 kV 級 SiC PiN ダイオードの順方向電流—電圧特性 (キャリア寿命増大の効果)

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野 (山田研究室)

http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「ナノ空間に局在する液体中でのエネルギー散逸に関する研究」

固体と液体の界面の極近傍においては、液体分子が構造化するため、密度の変動や粘性の急激な上昇など、巨視的な液体とは大きく異なる物性が出現する。こうした局所領域 (= ナノ空間) の液体物性を明らかにすることは、例えば水質浄化において重要となる多孔質物質内の液体の透過・吸着など、さまざまな実用分野への応用展開に密接につながる。われわれは、液中動作可能な周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) をベースとする 3次元フォースマップ法という新たな手法を用いることで、水溶液-固体結晶界面の水和構造の分子レベルでの可視化、さらにはその界面の散逸エネルギー (= 界面摩擦) の定量測定に成功した。固液界面近傍での散逸エネルギーの変化は原子間力顕微鏡 (AFM) の探針運動の減衰が表面からの距離に依存することに起因するが、これは主に液体の局所粘性によって引き起こされる。本研究では、この減衰の距離依存性について着目し、散逸エネルギーから減衰係数への変換式を新たに導出するとともに、これを実験的に検証した。

ここでは、実験を想定して、図 1 に示すように液体中で AFM 探針 (半径 R の球と仮定) が振動 (振幅 A) する際のその振動運動の粘性抵抗による振動エネルギーの散逸を考える。式 (1) が新たに得られた、散逸エネルギー $D(z)$ から運動の減衰を記述する係数 $\gamma(z)$ への変換式である。この変換式は、AFM 分野ではよく用いられる周波数 - 相互作用力変換の式、いわゆる Padé 近似を用いる Sader の変換式の導出を基にして得られた。

$$\gamma(z) = \frac{2}{A^2} \frac{D}{\omega^2} - \frac{1}{4\sqrt{\pi}A^{3/2}} \int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{z'-z}} \frac{d}{dz'} \left(\frac{D}{\omega^2} \right) dz' + \sqrt{\frac{2}{A}} \int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{z'-z}} \frac{d^2}{dz'^2} \left(\frac{D}{\omega^2} \right) dz' \quad (1)$$

ここで、式中の D および探針振動の角周波数 ω は、探針-試料間距離 z に依存する関数となる ($D=D(z)$, $\omega=\omega(z)$)。この変換式は 3つの項から成るが、単純な振動運動の記述でよく見られるように、 $D(z)$ が定数の場合は、右辺は第 1 項だけとなり $\gamma(z)$ も定数となる ($\gamma(z)$ が z に依存しない一様な空気抵抗のような系における減衰振動)。

実験で得られた散逸エネルギーの距離依存曲線 (図 2 (a)) を、式 (1) で変換したところ、遠距離では第 1 項が支配的であり、近距離では第 1 項からの寄与に加えて、第 3 項からの寄与が大幅に増大する。変換した減衰係数の曲線は (図 2(b): 水全体からの寄与)、水の巨視的粘性から理論的に導かれる表面減衰によって近似される、言わば巨視的な表面層の水からの寄与と (図 2(b): 巨視的な水表面層からの寄与)、それ以外の表面極近傍の水分子層からの寄与 (図 2(b): ナノスケール層の水分子からの寄与) に分けることが分かった。このように、本手法によって、新たなナノスケール空間に水分子層の定量的な粘性係数評価法が有効であることが分かり、今後、表面水分子層がもたらす分子レベルでの摩擦・吸着の基礎的理解とその応用が進展するものと期待される。

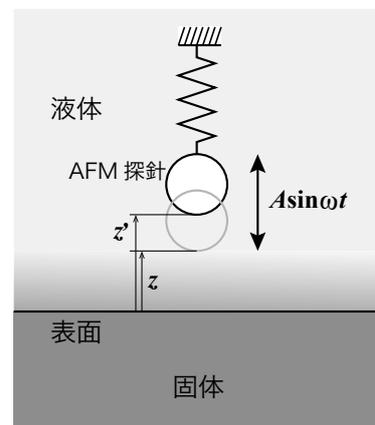


図 1: 固液界面近傍で振動運動する AFM 探針の模式図. 近似的にばね-質量 (球: AFM 探針) 系の単振動として考えられる. 実験で使用された AFM では、周波数 129 kHz, 振幅 $A = 0.16$ nm.

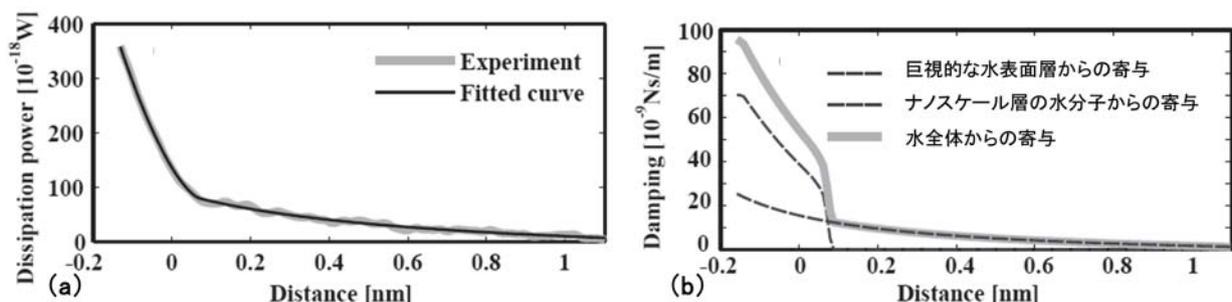


図 2: (a) FM-AFM によって得られた散逸エネルギーの探針 - 試料間距離への依存曲線およびそのフィッティング曲線. (b) (a) のフィッティング曲線から変換された減衰曲線とその巨視的寄与と微視的寄与

量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研究室）

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「同位体 $^{171}\text{Yb}^+$ イッテルビウムイオン 時計遷移の単一イオン分光」

原子の共鳴周波数は、その準位構造に基づいて正確にきまる。この特長から、セシウム原子のマイクロ波領域の共鳴が、現在の秒の定義となっている。原子時計とよばれる原子の共鳴に制御された発振器を、この共鳴を基準として構成すると、周波数の不確かさは 10^{16} 台に達する。原子時計の出力周波数のランダムなゆらぎは、何周期も平均すると小さくなる。周期が速い、すなわち周波数の高い共鳴を基準とすると、短時間で平均回数が増えてゆらぎは減少する。この原理から、基準共鳴が光領域の原子時計、すなわち光時計が注目されている。

周波数ゆらぎが減少すれば、小さい桁まで周波数を決定できる。しかし、磁場など環境による周波数変化を正確に補正できなければ、共鳴周波数は正確には決められない。共鳴周波数の不確かさを低減させるには、環境に対する周波数変化が小さい共鳴を選択し、かつ、共鳴周波数を変化させる要因が少ない環境に原子をおく。そのような光時計の方式として、単一イオン光時計がある。単一イオン光時計では、原子をイオン化して超高真空中の狭い空間に1個だけ、電磁場で閉じ込めて利用する。孤立した環境に原子をおくため、共鳴周波数の不確かさはきわめて小さいと予測される。

我々は、イッテルビウムイオン (Yb^+) に注目した。 Yb^+ には磁場に鈍感な基準共鳴（以下、時計遷移）をもつ安定同位体 $^{171}\text{Yb}^+$ がある。 Yb^+ の奇数同位体は核スピンをもつため、各準位は超微細構造に分裂し複雑になる。 $^{171}\text{Yb}^+$ では、核スピンのため超微細構造はもっとも単純となり、必要とするレーザー光の本数が少なくてすむ。同様の特長をもつイオン種は、蛍光検出に真空紫外光が必要な Hg^+ しかなく、紫外光で十分な Yb^+ は有望なイオン種の1つである。

単一 Yb^+ は、超高真空中にイオントラップとよばれる電極を設置し、その電極に囲まれた空間に捕捉して用いる。イオンは、オープンから原子をビーム状にとばし、共鳴するレーザー光をトラップ内で照射してイオン化ポテンシャル以上に励起し生成する。トラップした Yb^+ には、強い蛍光を発する紫外の共鳴から少し低周波にずらしたレーザー光を照射する。これにより蛍光を観測するとともに、レーザーが原子に与える力を利用してトラップ中心にはほぼ静止させる、レーザー冷却を行う。 $^{171}\text{Yb}^+$ ではイオン1個あたり毎秒の5,000個の蛍光光子が検出され、イオン1個を識別してトラップ可能である。そして、時計遷移を励起するレーザーを照射し、スペクトルを取得する。時計遷移はスペクトル幅が狭いので、発振スペクトルを狭窄化したレーザー光を照射する。観測した単一 $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2}(F=0) - ^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ 時計遷移のスペクトルを図に示す。イオンは1個なので、1回の観測ではレーザーの光子を吸収した、しなかった、という情報しか分からない。レーザーの周波数を固定して何回も繰り返し観測して励起確率を求め、レーザー周波数を掃引してスペクトルを得る。図1は磁場によるスペクトルの分裂で、中央が磁場に鈍感な時計遷移である。図2はその中央を精密に周波数掃引して得た、基準スペクトルである。今後は、基準スペクトルにレーザーを制御し、光時計を構築する。そして、2台の比較により不確かさ評価を行う。

本研究には時計遷移分光を行った博士課程の今井康貴氏をはじめ、多くの学生諸君が貢献している。

参考文献：Y. Imai, T. Nishi, M. Nishizaki, S. Kawajiri, Y. Muroki, R. Ikuta, K. Matsumoto, M. Kitano, and K. Sugiyama, *Radio Science*, 51, pp.1385-1395 (2016).

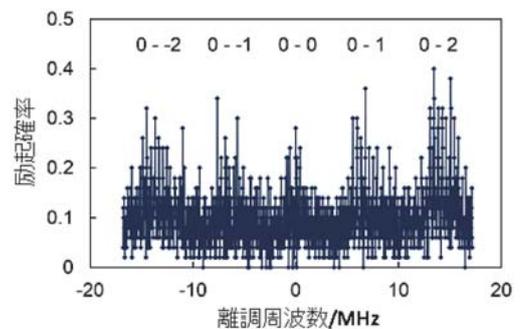


図1 磁場で分裂したスペクトル

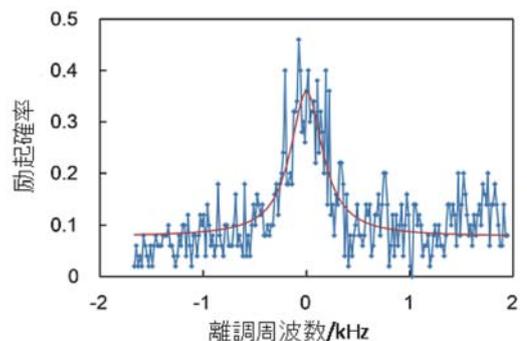


図2 高分解能掃引。スペクトル幅 380 Hz。

知能メディア講座 画像メディア分野

http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「視線運動の解析によるコンテンツ閲覧時の興味推定」

本研究室で取り組む、水中3次元形状復元・追跡に関する「アクアビジョン」と、人のしぐさや行動から心的状態を推定しながら人とやり取りする「マルチモーダル・インタラクション」のうち、後者に焦点を絞って紹介します。

スマートフォンやパソコンなどの情報端末を用いてアクセスできるコンテンツは現在爆発的に増加・複雑化しており、自分が欲しいと思っている情報にたどり着くまでに多くの時間を費やすことがあります。一方、人は同僚や家族、友人に聞き、教えてもらうことで、適切な情報をしばしば容易に見つけ出すことができます。そこで、情報端末などの機械が、利用者の様子を傍らで見ながら意図や興味を推定し、能動的（プロアクティブ）に情報を提示するようなインタラクティブ（対話）システムの開発を進めています。

このとき、(1) 利用者の言語情報だけでなく、視線や顔向き、表情といった非言語的情報を活用しながら利用者の心的状態（意図や潜在的興味・関心など）を推定し、(2) 適切な情報を自然な間合いで（ディスプレイや音声発話を通じて）提示・応答する、といった機能を実現する必要があります。(1) はパターン認識、(2) は制御の問題となり、多くの事例から適切な認識や制御の方法を見つけるには、機械学習の技術を使うことができます。以下は、特に(1)の問題に対し、カタログ閲覧時の視線運動情報から利用者の興味を推定する手法（図1）の例です。

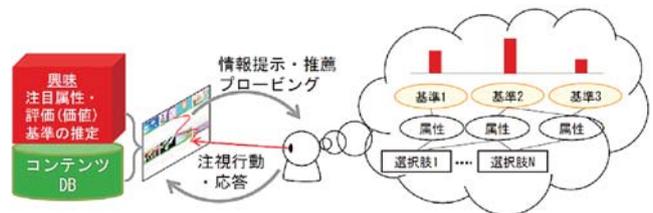


図1 視線計測を用いた対話的選択・意思決定支援

1. マルチスケール正確検定による注目属性検出

閲覧者の興味を推定するには、その人が注目する属性を知ることが重要です。しかし、選択肢が複数の属性を持つ場合には、実際に注目された属性を分離できないことがしばしばあります。そこで、各選択肢への注視を個別に解析するのではなく、閲覧者が「見比べ」た選択肢をまとめて解析し、有意に偏りを持った共通項として**注目属性**を検出する手法を考案しました（図2）。統計における正確検定を様々な長さの時間窓に適用し、いつ、どの属性に、どの長さ注目していたかを、リアルタイムに検出することが可能です。

2. 選択時の評価基準候補の自動獲得

ある選択対象ドメイン（図3の例ではノートPC）に対して、選択者（例：購入者）がどのような**評価基準**（例：使用目的）を持ちうるかという情報は、マーケティング等の実応用上重要です。しかし、ラダリングなどのインタビュー手法では、長時間かつコストをかけた調査が必要となります。そこで、1の手法と統計的機械学習を組み合わせ、カタログ閲覧を行う大勢の視線データから、閲覧時に「どの属性の組み合わせが注目されやすいか」を抽出することで、選択者の背後にある**評価基準候補**を自動獲得する手法を提案しました。

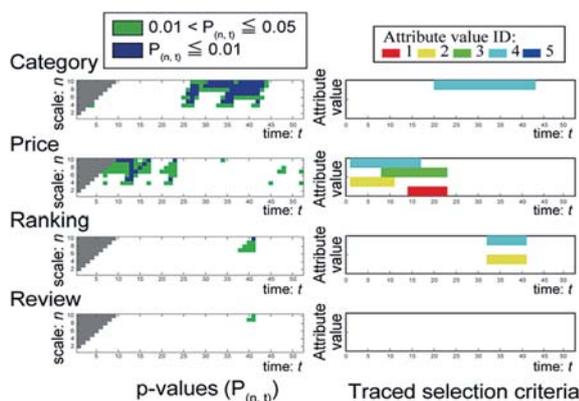


図2 マルチスケール検定による注目属性検出

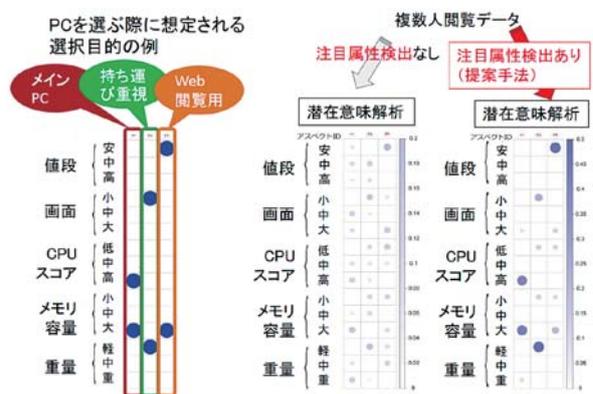


図3 選択時の評価基準の自動獲得

集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤高史研究室)

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「イジングモデルの FPGA 実装による最大カット問題の高速求解」

本研究室では大規模集積回路 (LSI) を用いた応用システムの一つとして、組合せ最適化問題の解を高速に求めることのできる新たな計算機について研究を行っている。組合せ最適化問題には様々な実用的応用があることから、これを高速に解くことは非常に重要な課題となっている。このため、これまでに様々な近似解法が提案されてきた。その中で近年、イジングモデルと呼ばれる物理現象を模擬した計算モデルを用いた解法が注目されている。本研究では、イジングモデルに基づき組合せ最適化問題の解を求める計算機 (イジングソルバ) の実現に向け、その構成法について検討を行っている。

イジングモデルは磁性体の振舞いを解析するために考案されたモデルであり、図1のように「スピン」と呼ばれる節点が格子状に接続された構造からなる。各スピンは上向きまたは下向きのいずれかの状態を取る。図2に示すように各スピン σ_i は隣接する他のスピンからの相互作用 J_i を受け、局所エネルギーが最小となるように自身のスピンの向きを決定する。全てのスピンの独立に局所最適化を繰り返し行うことにより、イジングモデル全体のエネルギーが減少し、最終的に安定状態へと収束する。

上記のイジングモデルを用いることで、様々な組合せ最適化問題が解けることが知られている。つまり、イジングモデルの全体エネルギーを目的関数とみなし、解きたい問題に応じてスピン間の相互作用を設定すれば、スピン操作を繰り返し行うことにより目的関数の最小化が可能となる。スピン操作は並列に行うことができるため、ハードウェアによりイジングソルバを実現すれば大幅な高速化が見込まれる。

本研究では図3に示すイジングソルバのハードウェア・アーキテクチャを提案し、FPGA 実装を行った。提案アーキテクチャは、各スピンの振舞いを模擬する演算器を格子状に並べた超並列構造を特徴とする。また提案ソルバでは、求解過程において必要となる乱数生成機構を簡略化することにより、回路規模を小さく抑えている。提案ソルバ (HW Ising) により最大カット問題を解いた際の求解速度を図4に示す。既存のソフトウェアソルバ (CPLEX) と比較し、同程度の精度の解を 7,200 倍高速に求めることができた。

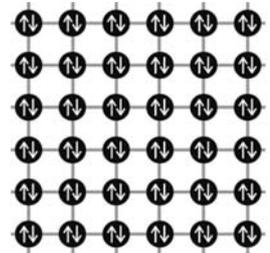


図1 イジングモデル

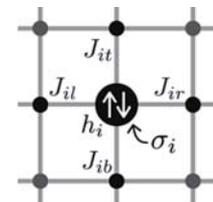


図2 イジングモデルの各スピン

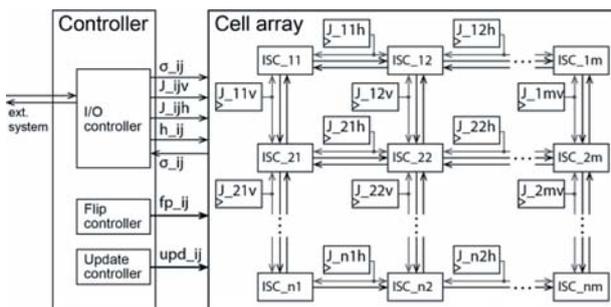


図3 提案イジングソルバの全体構成

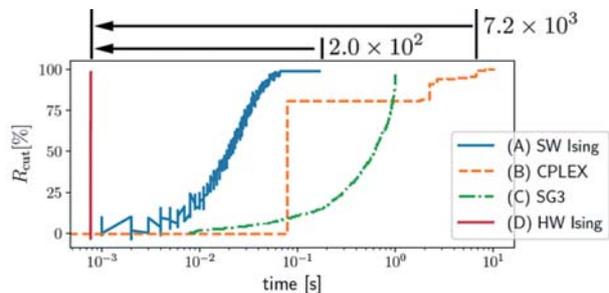


図4 各種イジングソルバによる求解性能の比較

参考文献

[1] Hidenori Gyoten, Masayuki Hiromoto, and Takashi Sato: "Area Efficient Annealing Processor for Ising Model without Random Number Generator," IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E101-D, No.2, Feb. 2018.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研究室）

<http://pub-asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「医用超音波画像の超高分解能化に関する研究」

超音波エコーによる画像化技術は、生体内の可視化手法として広く医療や健診の現場で用いられています。MRIなどに比べて装置が小型で安価であり、X線のような被爆も伴わないことが特長ですが、分解能の点で劣ることが大きな制約となってきました。

当研究室では、電波工学の分野で開発されている高解像度化技術を医用超音波に応用することでこの問題の解決に貢献することを目指しています。特に、携帯電話の基地局において利用者の分離識別などにも用いられるアダプティブアンテナによる高分解能化技術に着目し、その原理をさまざまな形で利用してきました。

この技術は、複数のアンテナ素子の出力を合成する際に、それぞれの素子からの出力にかける重みを適応的に調整することで不要信号を除去するものです。医用超音波にこれを応用する際には、所望信号と不要信号が相関を持つことが問題になります。これを相関行列の時間と距離の2次元平均により除去することで高い角度分解能を維持しながら安定な画像を得ることが可能となりました [1]。

また、受信信号を多数の周波数成分に分割し、そのそれぞれをアンテナ素子とみなして処理する周波数領域干渉計法 (FDI; Frequency Domain Interferometry) に同様の安定化技術を導入することにより、距離方向の分解能を向上することができます。図1に、豚大動脈の縦断面超音波画像を示します。従来の手法 (左図) では図の上下に見える血管壁のそれぞれについて、内壁と外壁からのエコーが見られますが、その厚みまでは正確に捉えることができませんでした。これに安定化を施した FDI を適用することで、右図に示すほぼ1桁高い距離分解能を有する鮮明な画像を得ることに成功しました [2]。この手法により、血管内壁にコレステロールが付着することによる狭窄などの現象をより鮮明に画像化することが可能になり、医用超音波画像化技術の高度化に寄与すると期待されます。

参考文献

[1] S. Okumura, A. Kita, H. Taki, Y. Nagatani, M. Matsukawa, and T. Sato, Application of spatial domain interferometry with the Capon method to transcranial Doppler ultrasonography: a simulation study, *Advanced Biomed. Eng.*, Vol.4, pp.73-79, 2015.

[2] H. Taki, K. Taki, M. Yamakawa, T. Shiina, M. Kudo, and T. Sato, High-range-resolution imaging using frequency domain interferometry with stabilization techniques for real-time vascular ultrasound, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, No.07HF05, pp.1-10, 2015.

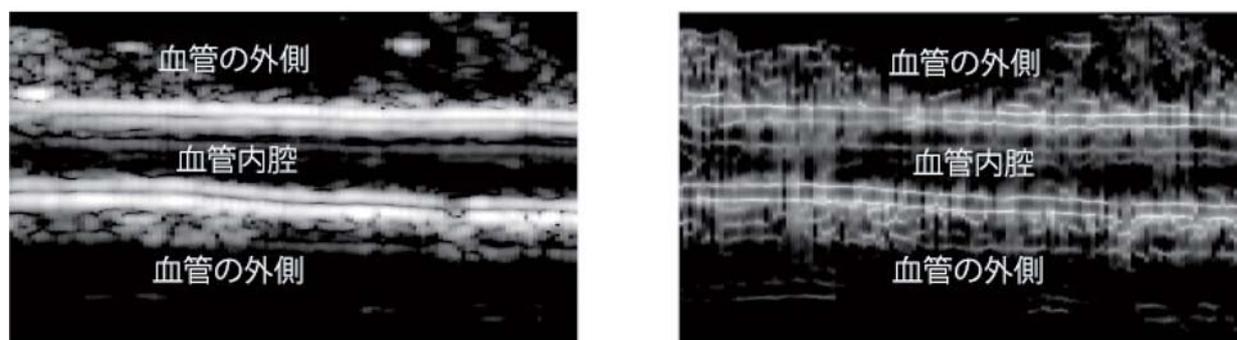


図1. 豚大動脈の縦断面超音波画像 (血管壁の厚み約 0.35mm)。左図は従来法 (分解能約 0.1mm)、右図は提案法 (分解能約 0.01mm) による処理結果。

システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

<http://ishiilab.jp>

「ヒトの糖代謝系を制御するシステム科学」

論理生命学分野では、「学習するシステム」としての「生命」や「知性」の本質を明らかにすることを目的として多岐にわたる研究を進めています。我々の行っている研究の1つに、細胞レベル [1] からヒト個体レベルまで、様々な階層の生物システムの制御があります。本稿では、我々が東京大学黒田真也研究室と共同で行っているヒトの糖代謝系制御に関する研究についてご紹介します。

糖代謝系は、様々な下位プロセスの影響を受けた複雑な力学系であることが知られています。消化管から吸収されたブドウ糖が血中をまわり、全身の細胞で消費される一方で、インスリンなどのホルモンは糖代謝に関わる酵素活性を調節します。血糖値（血中ブドウ糖濃度）は系の状態を知るための重要な指標の1つです。実際に、ブドウ糖経口摂取時の血糖値の反応は糖尿病の診断に使われます [2]。糖代謝系に問題があり、高血糖状態が慢性的に続く病気が糖尿病です。糖代謝系の制御は、糖尿病の治療や予防に貢献すると考えられます。しかし、系に影響するあらゆる要因を計測できるわけではないため、系の全容は明らかではありません。さらに個体差も大きく、これを制御することは容易ではありません。

我々のプロジェクトでは、系のダイナミクスの時間構造に着目しました。同じ分量の食事を同じ時間範囲内に摂るとしても、一定ペースでゆっくり食べるのと、急いで一度に食べるのとでは、血糖値上昇に与える影響が異なると考えられます。他に、血糖値上昇を抑える食事方法があるかもしれません。

我々はシステム同定・システム制御の方法論に基づいてこれを調べました。まずブドウ糖経口摂取時の血糖値や血中インスリン濃度などの臨床試験データに基づいて、非線形常微分方程式モデルを同定し、ダイナミクスのシミュレーションを可能にしました。次に、一定量 50g のブドウ糖を一定時間 60 分以内に経口摂取するという拘束条件のもとで多数のシミュレーションを行い、摂取後の血糖値ピークをなるべく低くするようなブドウ糖経口摂取ペース（時間パターン）を設計しました。その結果、ブドウ糖を一定ペースでゆっくり摂取するよりも、おおよそ 0 分、30 分、60 分後の 3 回に分けて摂取するほうが、摂取後の血糖値ピークが低くなる結果が予想されました（図左）。こうして設計したブドウ糖摂取ペースで実際に被験者にブドウ糖溶液を飲んでもらったところ、確かに一定のペースでゆっくり摂取する場合よりも血糖値ピークが低くなりました（図右）。同様の設計を他の被験者について行くと、個人差によるばらつきを含むものの、一定のペースでゆっくり摂取する単純な時間パターンよりも、摂取後の血糖値ピークを下げる時間パターンが存在する可能性があることが分かりました。直感では設計できないような摂取時間パターンや、その個人差の理由を知るためには、より精緻化した数理モデルを用いた解析を行っていく必要があります。これからも、システム同定やシステム制御の方法論を用いることで、生物という非線形で個体差のある複雑なシステムの理解と制御を目指します。

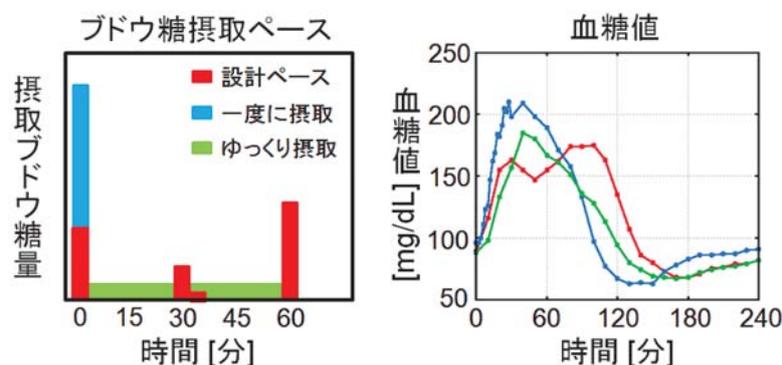


図 ブドウ糖摂取ペースと血糖値変動．設計した摂取ペースで血糖値ピークを抑制できた

[1] Murakami, Y. et al. (2017) Biophysics and Physicobiology. Vol.14, pp.29-40

[2] 日本糖尿病学会. (2016) 糖尿病治療ガイド 2016-2017

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野（中村祐司研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>

「トカマクのディスラプション時における MHD 平衡ダイナミクスに関する研究」

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラスプラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。

プラズマのトーラス型磁場閉じ込め装置において、磁場の抵抗性拡散時間やプラズマ・コイル等を含めた回路系の過渡応答時定数と比べて急激にプラズマが変化する現象が見られます。とくに、装置サイズが大きく時定数が長い核融合炉を考えると、プラズマ電流立ち上げおよび加熱フェーズ、ディスラプション時などにおける磁気流体力学（MHD）的平衡の時間発展が制御の観点から問題となります。

たとえば、トカマクにおけるディスラプションと呼ばれる現象では、不安定性などを原因とする急激な電子温度の低下とプラズマ電流分布の再配分に伴い全プラズマ電流の減衰が起こり、垂直位置移動現象（VDE）を伴って最終的にプラズマが消失してしまふことがあります（図1）。このときの電子温度（プラズマ電気抵抗）やプラズマ電流分布の変化の時間スケールは装置の応答時定数より十分に短く、真空容器などの構造物に誘導起電力を与え、大きな渦電流を流します。逆にこの渦電流とその過渡応答がトロイダル電流減衰時の MHD 平衡の時間発展に大きな影響を与えます。真空容器中を流れる渦電流がトロイダル電流減衰に及ぼす影響を簡単なモデルで調べた結果を図2に示します。渦電流は縦長断面を持つトカマクプラズマの垂直位置不安定性の抑制・制御には有益であることが知られていますが、ディスラプション時の電流の減衰率は、渦電流を考慮すると短くなるのが分かります。ディスラプションが起きると構造物に流れる電流により大きな電磁力が生じたり、プラズマ中に発生する電場によって逃走電子が発生したりします。したがって、ディスラプション時の MHD 平衡ダイナミクスの物理メカニズムを明らかにし、予測モデルを構築することは、逃走電子の挙動や構造物への電磁力などを解析する基礎となり、その制御シナリオを開発することは、磁場核融合炉実現のための重要な課題です。

このため、国内外で軸対称性を仮定した2次元コードを用いた実験解析が行われていますが、電流減衰のメカニズムを明らかにするには、電流減衰時の電子温度、有効電荷数、電流密度などの分布の時間発展を考慮する必要があるなどの問題点も指摘されており、さらなる実験との系統的比較検証が必要です。また、渦電流や外部コイルの非軸対称性を考慮する必要もあり、本研究室ではディスラプション時の MHD 平衡ダイナミクスの物理メカニズムを明らかにすることを目的とし、世界的にもまだほとんど開発が進んでいない、3次元的に MHD 平衡ダイナミクスを解析する新しいシミュレーション・コードの開発を進めています。

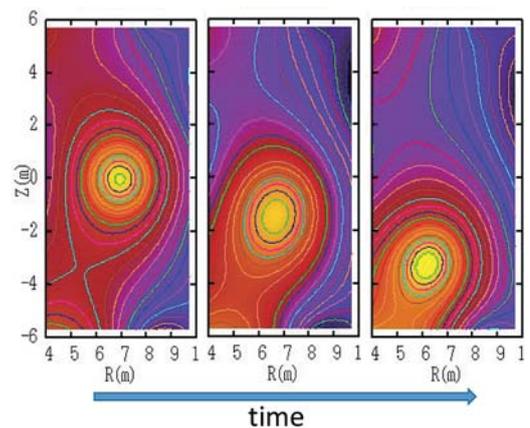


図1 垂直位置移動現象（VDE）。プラズマ（図で示された磁束の等高線の内、閉じた等高線の領域）が時間とともに下方へ移動し消失。

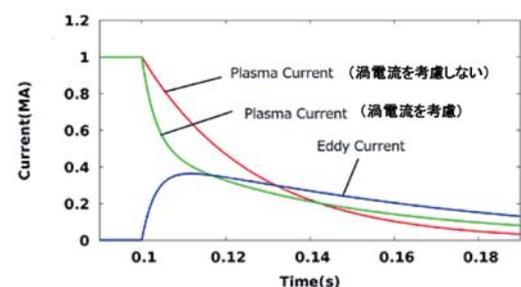


図2 全プラズマ電流減衰における渦電流の影響。プラズマを閉じ込める真空容器に渦電流が流れることにより、電流減衰率が変化。

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

「核融合を利用した核テロ対策技術」

本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用を高度・高精緻に制御することにより 21 世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、高パワーミリ波を用いた加熱・電流駆動システムの開発、プラズマ乱流・揺動や高速イオン励起不安定性に関連したプラズマ計測と解析、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生や、ここで紹介する慣性静電閉じ込め (Inertial Electrostatic Confinement: IEC) と呼ばれる方式の小型のプラズマ核融合装置の開発とその中性子源としての応用の研究を行っています。

核融合反応 (D-T または D-D) による中性子源には、他の様々な核反応による中性子源には無い魅力的な特長があります：

『ポータブル』比較的低い数十から百 keV 程度の加速エネルギーで高い反応断面積が得られるため、小型のポータブル中性子源を構成することができる。

『単色中性子』反応生成物が 2 個であることと、必要な加速エネルギーが反応によるエネルギー利得と比べて十分小さいことから、発生する中性子は単一エネルギーとなる。

我々の研究室では、約 20 年前に IEC 核融合の実験研究に着手し、動作メカニズムの解明や高性能化の研究、 D^3He など先進燃料核融合の実験や計測技術の開発などを進めてきました。現在では、毎秒 1 億回を超える D-D 核融合反応を定常的に起こすことが可能になり、上記のような「核融合ならではの」特長を活かした核融合中性子源応用の研究も進めています。そのうちの 하나가、表題にある「核テロ対策技術」です。

右の図のように、検査対象である不審物に中性子を照射して、隠匿されている核燃料物質に誘起された核分裂反応で発生する二次中性子を検出します。課題は、バックグラウンドとなる照射中性子と比べて遙かに少ない二次中性子を、如何にして弁別して検出するかにあります。



不審物中に隠匿された核燃料物質の検知

早くから核テロを現実の脅威ととらえていた米国を中心に、多くの先行研究がこの課題に取り組んできましたが、残念ながら解決には至っていませんでした。

我々の提案した方法では、図中の写真にあるような IEC 方式のポータブル D-D 核融合中性子源を利用します。照射される中性子は 2.45 MeV の単一エネルギーです。不審物中の内容物などで散乱されると 2.45 MeV より低いエネルギーに分布します。一方、核分裂反応で発生する二次中性子のエネルギーは 2.45 MeV を越えて広く分布し、およそ 3 割が 2.45 MeV 以上にあります。したがって、2.45 MeV 以上のエネルギーだけに着目すれば、高い S/N 比で二次中性子を検出することができます。

原理実証と feasibility study を経て、現在はこの原理に基づくポータブル検査装置の試作機開発を産学連携で進めています。核燃料物質の中でも特に検知が困難なウラン 235 を検知できる装置は、技術的難易度の高いポータブル装置はおろか、据置型装置も未だ存在しません。核テロに対する防備を劇的に高めるために、テロ対策の現場で実用可能な検査装置を早期に実現したいと考えています。

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

「プラズマにビームを当てて密度の揺らぎを計る」

私たちの研究室では磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究をしています。具体的にはプラズマを高温・高密度で閉じ込める事のできる磁気容器（磁場配位）の最適化を行っています。プラズマはイオンと電子の集合体であり流体としての性質を持っています。電気伝導性も併せ持つため電磁流体と呼ばれています。流体ですのでプラズマ中には渦や乱流といった揺らぎが生じ、これらはプラズマの閉じ込めと密接に関連しています。従って揺らぎ（揺動）の構造を計測し、その発生のメカニズムと輸送への影響を理解することが重要となります。一方で一般的にプラズマの乱流による温度や密度などの揺らぎの大きさは、それら物理量の平均値の0.1%のオーダーととても小さく、計測が容易ではありません。たとえば液体の温度揺動を測定することを想定してみましょう。300Kの液体の中の0.3Kの温度の揺らぎを、速い時間応答で且つその空間構造（多点）を計ることにになります。これだけでも計測・解析方法を工夫する必要があることが想像できると思います。さらに高温なプラズマで内部揺動を観測する場合には非接触法が必要となります。非接触法で高温プラズマの密度の揺らぎを計る方法の一つにビーム放射分光法があります。この方法ではプラズマ中に数十 keV に加速した中性の水素ビームを注入して、ビームとプラズマとの反応によるビーム原子からの励起光（ビーム輝線： H_{α} 光）を分光計測します。ビーム輝線の強度はプラズマ密度に比例するため、その揺らぎの振幅から密度揺動強度が得られます。この計測法は (1) ビーム輝線はビーム速度でドップラーシフトするため背景 H_{α} 光との分離が容易である、(2) ビームと観測視線が交差する体積内の局所的な密度揺動の情報が得られる、という利点があります。

私たちの研究室ではプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」に最適なビーム放射分光装置を開発し、プラズマ密度揺動の空間分布を計測しています。開発にあたり最初にビーム輝線のシミュレーションを行い、最適な観測視線を決めました（図1参照）。また発光の微弱な揺らぎを計測できるように、高いスループットの分光光学系や高感度のアバランシェフォトダイオードを用いています。図2は測定結果の一例です。周期が0.5-1 ミリ秒程度の密度揺動がプラズマ閉じ込め領域の外側に進んでおり、プラズマ粒子の吐き出し現象を示しています。これは特殊な燃料供給法で高密度の放電を行った際に発生しており、この吐き出しが止まると自発的に閉じ込めが改善される現象が観測されています。高周波の乱流揺動に包絡線解析を適用すると、粒子の吐き出し現象と高周波揺動の包絡線の時間発展とが同期することがわかりました。高周波乱流と閉じ込め改善との関係を明らかにするためには乱流揺動と輸送との因果関係を調べる必要があります。このためにはビーム輝線信号のS/N比を改善する必要があり、装置の対物光学系や受光素子の改良を進めています。

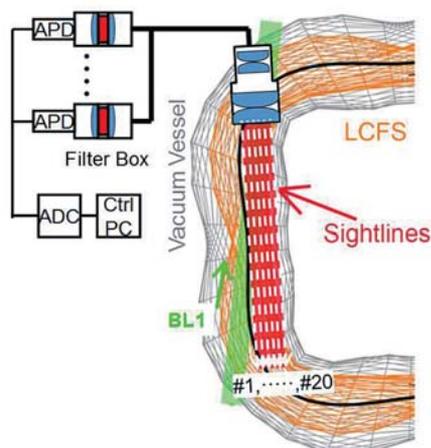


図1 ヘリオトロンJに設置したビーム放射分光装置の模式図。

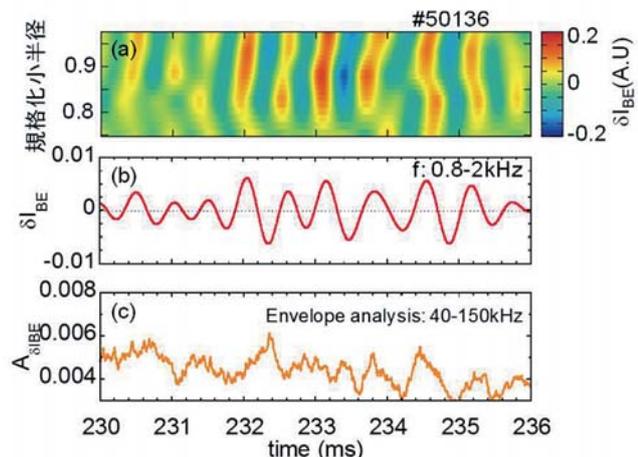


図2 (a) ビーム輝線揺動の時間空間発展、および (b) 吐き出し現象に相当する周波数のビーム輝線揺動、(c) 高周波 (40-150kHz) 揺動の包絡線信号。

生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

「パラメトリックスピーカーを用いた低騒音型 RASS システムの開発」

近年、集中豪雨など極端な気象現象の頻度が増しているが、地球温暖化がその一因であると言われている。極端気象のメカニズムを理解し、天気予報の精度を向上させ、減災を目指すことが重要である。数値モデルの高度化により天気予報精度が格段に改善されているが、同時に観測結果をもとに数値モデルの予報値を修正するデータ同化の発展も大変重要である。アメダスに代表される地上定点観測では各種センサーによって降水量、気温、湿度、気圧、風向・風速等が常時測定されている。また、高層大気では、ラジオゾンデ（小型気球）による高度プロファイルの直接測定に加えて、電波や光による地上や衛星からのリモートセンシングが行われている。本研究室では、主に風速の高度プロファイル観測を目的とした大気レーダー（ウィンドプロファイラー；WPR とも呼ばれる）の開発を行っている。ここでは、WPR と音波を併用して気温の高度プロファイルを測定する RASS（Radio Acoustic Sounding System）技術のための低騒音型スピーカーシステムの開発について紹介する。

WPR はパルス状の電波を送信し、大気乱流による屈折率変動からの電波散乱（エコー）を検出する。RASS では、WPR 近傍から音波を上空大気に向かって発射し大気密度に疎密を生じさせ、人工的に屈折率変動を作り、そこからのエコーを WPR で検出する。音波面からの後方散乱（RASS エコー）のドップラーシフトから音速（ C_s ）を求めることができ、 C_s と気温 $T(K)$ の関係 $C_s = k\sqrt{T}$ から、各高度における気温が得られる。ここで、比例係数 k は比熱比と平均分子量で決まる定数で、乾燥大気中で約 20.047 である（水蒸気を含む湿潤大気中ではわずかに変化する）。RASS エコーを検出するには、レーダー波長と音波波長の比が 2:1 となる必要がある（ブラッグ条件）ため、レーダーの周波数によって、必要となる音波周波数が決まる。対流圏では気温が高度とともに下がるため、音波波長は高度とともに短くなる。広い高度範囲でブラッグ条件を満たすため、実際には FM チャープ信号を用いる。RASS 観測では、ラジオゾンデ観測と比べて、非常に高い時間分解能で気温プロファイルが得られることが特長である。本研究では気象庁の WPR ネットワークでも使われている 1.3GHz 帯の WPR を対象とする。この場合、音波の周波数は 3kHz 程度となり、可聴音域の大出力の音を使用する必要があり、騒音問題のため観測場所が制限されているのが現状である。そこで、鋭い指向性を持つパラメトリックスピーカーを用いた全天候で使用可能な低騒音型 RASS システムを産学連携により開発している。

パラメトリックスピーカーの原理は、空気非線形性に伴う自己復調作用に基づいている。すなわち、可聴音周波数で変調した超音波を大出力で空気中に発射すると、空気非線形性により発生する 2 次波が復調された可聴音に相当するという特性を利用している。発生する可聴音の大きさは、変調（可聴音）周波数の 2 乗、および超音波出力の 2 乗に比例する。

超音波素子単体の音圧はそれ程大きくできないため、それを数百～数千個使ったアレー構成として、大出力を得る。直進性の強い超音波のアレーにより、鋭い超音波ビームを形成することができる。この時、超音波に変調を施すと、上記の自己復調作用により、超音波の音軸上に可聴音を発する仮想的なアレーが構成される。これは位相のずれたバーチャル音源の直線状アレーとみなすことができる。パラメトリックアレーの干渉の結果、可聴音の鋭いビームが生成される。これは可聴音域でエンドファイアアレーが構成されたと解釈することができる。

現在、40kHz の超音波素子（図 1）を 5000 個程度用いたパラメトリックスピーカーを試作中である。超音波素子に防水性がないため、素子を下に向けた反射型のスピーカーシステムを検討している。来春に WPR と組み合わせた RASS 観測実験を行う計画である。



図 1. パラメトリックスピーカーの例（40kHz, 49 素子, 素子単体の超音波出力約 120 dB）[<https://www.switch-science.com/>]

生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野 (山川研究室)

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「地球放射線帯を観測する Arase 衛星」



図 1: Arase 衛星の打ち上げ(右下)と、地球放射線帯を探索する Arase 衛星 (イメージ図) (いずれも JAXA 提供).

平均自由行程が、1AU にもなろうかという無衝突状態の宇宙プラズマ中でプラズマ粒子とプラズマ波動のエネルギー交換過程(波動粒子相互作用)は非常に大切です。イオンや電子の運動エネルギーは、それらどうしの衝突ではなく、プラズマ波動を一旦、仲介して伝わっていくからです。宇宙空間の環境というのは、電離気体であるプラズマ中の環境ですから、地球上の環境が中性大気によるダイナミクスで決まっているのと同様、宇宙空間の環境には波動粒子相互作用が大きな影響を与えていることとなります。宇宙プラズマの様相は、その場所々々で大きく変化しています。地球周辺でも様々な領域がありますが、中でも放射線帯 (radiation belts) は人間が宇宙を利用していく上で避けては通れない領域です。高エネルギー電子・イオンから形成される地球の放射線帯は、米・旧ソ連冷戦下の宇宙開発競争の中で発見されました。旧ソ連に人工衛星第一号で先を越されてもなお、失敗を繰り返した米国が、人工衛星エクスプローラでやっと成功し、その際にこの地球放射線帯を偶然発見しました。地球放射線帯の外縁は静止衛星軌道にまで達しておりその存在は無視することができません。放射線帯を構成する高エネルギー粒子は、衛星の太陽電池を劣化させ、MOS トランジスタの特性を変化させ、メモリ内のデータを化けさせてしまいます。また、衛星内部のケーブルなどを帯電させたりもします。このような放射線帯を観測して、その高いエネルギー粒子を生成したり消滅させたりする波動粒子相互作用を捉えようとする我が国の科学衛星 Arase が、2016 年 12 月 20 日に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました(図 1)。

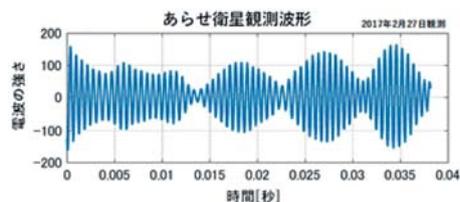


図 2: Arase 衛星で観測されたプラズマ波動 (電界) の波形。

山川研究室は、この Arase 衛星に搭載されている「プラズマ波動観測器 (PWE)」と「波動粒子相互作用解析装置 (WPIA)」を担当しています。PWE (責任者 金沢大 笠原 禎也教授 (平成 3 年京大・電子工学専攻修了)) はプラズマ波動を観測する高感受受信器で、山川研究室が所属する生存圏研究所の実験室で各種試験が行われました。WPIA (責任者 山川研) は、15 年間かけて開発した新しい観測装置 (手法) で、粒子の一粒々々と、プラズマ波動の一瞬々々とデータを逐次比較計算して、プラズマ波動と粒子の間のエネルギー流量を直接計測するという、まだ、だれも行っていない観測です。Arase 衛星が打ち上げられて、まもなく 1 年になりますが、すべての搭載機器が正常に動作しており、上記の PWE、WPIA も順調にデータを取得しています。図 2 は PWE で観測された放射線帯内のプラズマ波動の波形です。きれいな振幅変調がかかっていますが、宇宙空間でプラズマ波動を観測すると、頻繁にこのようなきれいな波形が観測されます。まるで宇宙人が AM 放送を流しているかのようです。周波数も可聴域にあるので音に変換すると、きれいな単調音になったり、エイリアンが何かを食べているような音になったりバラエティに富んでいます。地球の放射線帯で発生しているこのようなプラズマ波動がプラズマ粒子と相互作用して放射線帯を構成する高いエネルギーの粒子を生成していると考えられはじめています。Arase 衛星のデータは、慎重なキャリブレーションが行われ物理量を評価できる段階に至っています。今後の詳細なデータ解析が進められていきます。

生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「災害インフラ無線電力伝送システムの研究」

生存圏研究所篠原研究室では、2013年度より開始したJST Center of Innovation (COI) 拠点プログラム「活力ある生涯のためのLast 5X イノベーション拠点」に参加し、災害インフラのための無線電力伝送システムの研究を行っている。図1にあるように、複数の企業と共同研究を行い、災害救助・予防、電動モビリティ、災害予防、介護といった利用シーンを想定し、マイクロ波（920MHz帯、2.45GHz帯）を用いた無線電力伝送とセンサーやモビリティの組み合わせによる利便性の向上をはかり、COI拠点の掲げる目標である「しなやかほっこり社会の実現」を目指して研究開発を進めている。

介護用電池レスセンサーは、現在は920MHz帯を用いたRF-ID規格内（出力1W以下）での実用化を目指し、ウェアラブルアンテナやセンサーの開発を行っている。センサー開発は山形大と、ウェアラブルアンテナは金沢工大と連携している。RF-ID規格内では電池レスセンサーの汎用性と、センサーまでの距離が実用上不足している。そこで現行法を越え、さらに実用上有効な電池レスセンサーを開発するために、京都府、京都大学と連携して内閣府国家戦略特区「特定実験試局制度に関する特例」を申請し、京都府相楽郡精華町にて2017年4月に特区認定を受けることができた。同年5月22日には927MHz帯で5Wの特定実験試局免許が申請即日交付された。現在精華町町役場内の居室にて、職員の方々にウェアラブルセンサを着用していただき、実際の運用を模した電池レスウェアラブルセンサーの実証実験を行っている。

電動モビリティの研究では、電動自転車への応用を想定している。電動自転車の電池を充電する際には、普通であれば電池をはずして室内でコンセントから充電しなければならず、不便である。そこで、電動自転車を駐輪場に注射するだけで勝手にマイクロ波（2.45GHz）で無線充電するシステムを開発し、同じく内閣府国家戦略特区「特定実験試局制度に関する特例」を精華町で受け、2017年3月より実証実験を行っている。マイクロ波出力は100W以下であり、10cm程度の距離で無線充電を行い、30W程度の直流電力を得て、夜間に自動無線充電を行っている。実験では無線送電システムの各種データ取得と共に、利用の利便性の検証、電波干渉や安全性の検証を行っている。現在は2台の無線充電電動自転車が運用されている。

これらCOIで開発を実施している無線送電システムの送電距離と送電電力（EIRP）をまとめたものが図2である。図よりわかるように、現在の国内の法律で実用が可能なのは一部の介護用センサーのみであり、他のシステムは実験局免許を得たり、特区を利用したりしての実証実験しかできない。そこで現在、国内においてコンソーシアムBWF（Broadband Wireless Forum）やWiPoT（Wireless Power Transfer Consortium for Practical Applications）と連携し、マイクロ波無線電力伝送の実用化に必要な電波法に関し議論を重ねている。また国内の議論をITU（International Telecommunication Union）に文書として提案し、国際的な議論も喚起している。ITUは国や企業から構成される電波の利用に関して議論を行う国連のような場所で、これまでの議論の結果、2016年8月にITU Report ITU-R SM.2392-0 “Applications of wireless power transmission via radio frequency beam” が正式発行され、マイクロ波無線電力伝送のアプリケーションに関してまとめられた[1]。米国ではスマートフォンをマイクロ波で充電するシステムがすでに商品化されており、今後日本及び世界中でマイクロ波無線電力伝送を実用化するためにはよりよい研究成果を得ると共に、ITU等での議論が必須である。

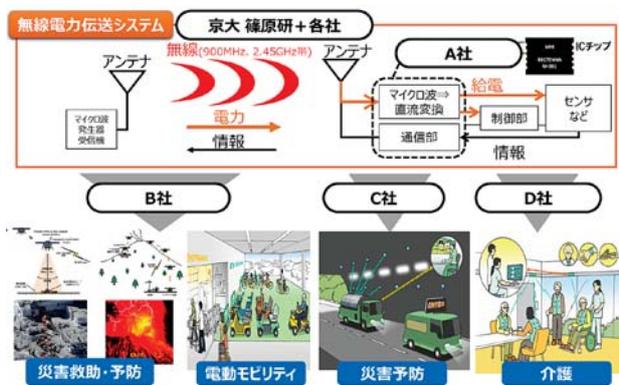


図1 COI 拠点研究の概要・目的

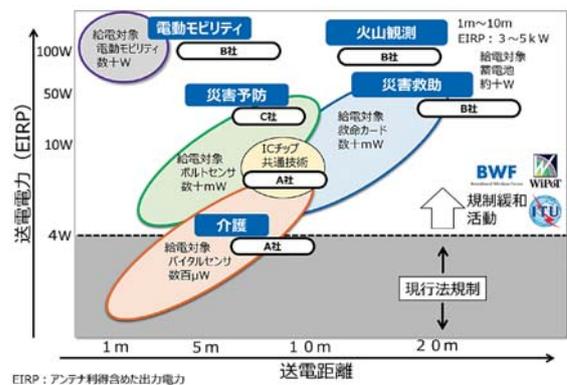


図2 各システムの送電電力と距離

参考文献

[1] ITU Report ITU-R SM.2392-0 <http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2392>

博士論文概要

[課程博士一覧]

縄 田 信 哉	「Design of Electrical Energy Network Based on Power Packetization」 (電力のパケット化による電気エネルギーネットワークの設計)	平成 29 年 3 月 23 日
星 野 光	「Analysis and Control of Multiscale Dynamics in Regional Electricity and Heat Supply Systems」 (地域電熱供給システムにおける複合スケールダイナミクスの解析と制御)	平成 29 年 3 月 23 日
伊 藤 俊 平	「電磁鋼板の磁化機構に関するマルチフィジックスモデルの開発」	平成 29 年 3 月 23 日
田 中 一	「Theoretical Study on Carrier Transport in Semiconductor Nanowires Based on Atomistic Modeling」 (原子論的モデルに基づく半導体ナノワイヤにおけるキャリア輸送の理論的研究)	平成 29 年 3 月 23 日
市 川 修 平	「Fundamental Study on Carrier Recombination Processes in AlGaIn-related Materials and their Structural Designs toward Highly Efficient Deep-UV Emitters」 (深紫外発光素子の高効率化にむけた AlGaIn 系半導体の結晶成長とキャリア再結合過程に関する研究)	平成 29 年 3 月 23 日
尾 崎 拓 也	「Growth of InGaIn-Based Emitters on ScAlMgO ₄ Substrates for Full Visible Spectral Range」 (可視全域をカバーする発光素子開発のための ScAlMgO ₄ 基板上への InGaIn 系発光層の成長に関する研究)	平成 29 年 3 月 23 日
山 口 皓 平	「On Asteroid Deflection Techniques Exploiting Space Plasma Environment」 (宇宙プラズマ環境を利用した小惑星の軌道変更手法に関する研究)	平成 29 年 3 月 23 日
浦 出 芳 郎	「Electromagnetic Properties of Checkerboard-like Metallic Structures at Terahertz Frequencies」 (チェッカーボード状金属構造のテラヘルツ帯における電磁的性質)	平成 29 年 3 月 23 日
大 谷 芳 明	「ヘリカル型閉じ込め装置におけるイオン種の違いが粒子輸送に与える影響に関する研究」	平成 29 年 3 月 23 日
松 室 堯 之	「Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission」 (先進的マイクロ波電力伝送に向けた球面波合成による高度ビーム形成)	平成 29 年 3 月 23 日
倪 俊 雄	「Advanced Modeling Techniques for High Performance and Human Centered LED Lighting System」 (高効率で人に優しい LED 照明システムのための先進的モデリング技術の開発)	平成 29 年 3 月 23 日

片岡 研	「深紫外多波長発光素子の実現に向けた AlGaIn 量子井戸三次元微細構造制御に関する研究」	平成 29 年 5 月 23 日
野村 義樹	「Bi 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合における接合間相相互作用下の巨視的量子トンネル現象に関する研究」	平成 29 年 7 月 24 日
Johan Fredrik Raak	「Data-driven Analysis of Wind Power and Power System Dynamics via Koopman Mode Decomposition」 (クープマンモード分解による風力ならびに電力系統ダイナミクスのデータ駆動型解析)	平成 29 年 9 月 25 日
下西 慶	「Modeling and Estimation of Selection Interests through Gaze Behavior」 (注視行動を用いた選択興味モデル化及び推定)	平成 29 年 9 月 25 日
Ilmiawan Shubhi	「Performance Enhancement of MIMO Transmission Techniques with Limited Number of Receive Antennas」 (受信アンテナ数制約下での MIMO 伝送技術の特性改善)	平成 29 年 9 月 25 日
藤原 純	「ガスマートメーター用低消費電力通信プロトコルに関する研究」	平成 29 年 9 月 25 日
芝原 光樹	「Advanced Signal Processing for Fiber-Optic Communication Systems Scaling Capacity Beyond 100 Tb/s」 (光ファイバ通信システムの 100Tb/s 容量限界の克服へ向けた信号処理技術)	平成 29 年 9 月 25 日

縄田 信哉 (引原隆士教授)

「Design of Electrical Energy Network Based on Power Packetization」

(電力のパケット化による電気エネルギーネットワークの設計)

平成 29 年 3 月 23 日授与

本研究は、物理層からボトムアップに研究開発が進められてきた電力のパケット化技術に基づき、電気エネルギーネットワークの設計を目指したものである (図 1)。特に、電力パケットを電力パルスと情報タグにより構成される電力の単位として定義し、量子化・デジタル化された電力の伝送の枠組みを与え、従来のアナログ回路に基づく電力伝送に対して、異なる技術の可能性を数理的に保証している。得られた主な結果は以下の通り要約される。

1. 物理層におけるルータの動作を検討した。まず、同期が確立していない場合の情報タグの読み込みを解析し、読み込み誤りの電力パケットの密度への影響を明確にした。次に、電力パケットの密度変動による電力の割り当ての可能性を、平均化により解析し、数値的に検証した。
2. 情報理論を参考に、記号を電力の最小単位として与え、電力のパケット化を、メッセージとエネルギーの記号系列による同時表現の問題として与えた。エネルギーの記号系列による表現は、有限時間においてエネルギーの総量を保証する問題で、記号系列のコストの最小化が重要となる情報理論にはない問題である (図 2)。特に、エネルギーを表現する記号系列の集合を考え、表現するエネルギーが十分大きいとき、ほとんど全ての記号系列で、記号の割合が記号のエネルギーの指数関数として定まる確率で近似できることを証明し、エネルギー表現の漸近的性質を与えた。
3. ネットワークにおける時間的・空間的な記号の伝送を記述する枠組みとして Symbol Propagation Matrix (SPM) を導入した。SPM は、量子化・デジタル化された電力の伝送をネットワークフローとして与える。電源と負荷での供給エネルギー、ルータにおける蓄積エネルギーの変化、及びリンク上のフローに重み付けを行い、最も伝送可能性の高いネットワークフローを与える問題を、離散凸解析における M 凸劣モジュラ流問題として定式化した。加えて、電力を電源に割り当てる Up-stream 問題と負荷に配分する Down-stream 問題を、隣接ノードとの情報の交換により記号レベルで処理するネットワークを設計し、その離散的なダイナミクスを数値的に検証した。
4. エネルギー保存則に基づき、電力パケットによるエネルギー伝送の連続ダイナミクスの検討を行い、回路のインピーダンスとエネルギーの分配の関係を検討した。

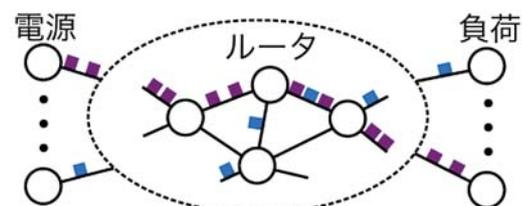


図 1 電力のパケット化技術に基づく電気エネルギーネットワークの概念図。

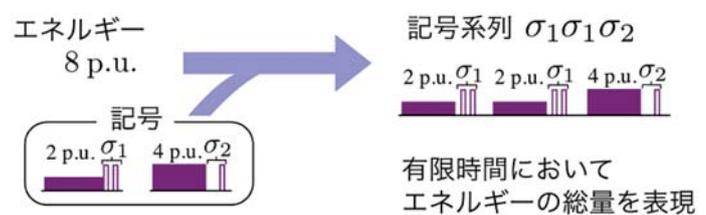


図 2 エネルギーの記号系列による表現。記号を電力の最小単位として与えている。

星 野 光 (引原隆士教授)

「Analysis and Control of Multiscale Dynamics in Regional Electricity and Heat Supply Systems」

(地域電熱供給システムにおける複合スケールダイナミクスの解析と制御)

平成 29 年 3 月 23 日授与

本研究は、地域規模において電気と熱を同時に供給するエネルギーシステムの解析および制御の際に問題となる複合スケールダイナミクスの扱いについての検討結果をまとめたものである。本研究の背景には、エネルギーシステムの統合化 (Energy Systems Integration; ESI) の課題がある。ESI は電気や熱、ガスなど多様な形態のエネルギーを一括して扱うことにより、安定的かつ高効率なエネルギー供給の達成を目指すものである。従来、電気を供給する電力システムは、そこで生じる物理現象を時間スケールにより分類することで扱われてきた (図 1)。例えば、大規模発電所における蒸気ボイラの圧力ダイナミクスなどの熱力学的な現象は、十分遅いものとして扱われ、電力システムの安定性解析や周波数制御の際には検討しないことが前提とされた。しかしながら、分散型電源、特に、コージェネレーション (熱電併給, Combined Heat and Power; CHP) ユニットの普及に伴い、電力システムにおける電気磁氣的・電気機械的な現象と熱力学的な現象の相互作用は無視できなくなってくる。特に、近年、地域熱供給事業用に導入された CHP を用いてアンシラリーサービスを提供することが提案されており、この場合には秒から数十秒オーダーで電気供給と熱供給の相互作用が顕在化する。

本研究では、上記背景に基づき、地域電熱供給における複合スケールダイナミクスを検討するモデルとして、図 2 に示すシステムを導入し、解析と制御に関する基礎的検討を行った。同システムは、2 つの CHP を有し、電気および熱の融通が可能な構成となっている。電力システムにおける二機無限大母線系統の自然な拡張であるとともに、CHP の協調運用が可能な最小構成である同システムの検討を中心として、以下に示す主結果を得た。

- (1) 従来の電力システムにおける安定性解析手法の有効性と限界を再考するため、電気と熱の間のスケール分離を仮定し、熱供給の影響をパラメータとして含む解析モデルを導出した。上記仮定の下で熱供給が電気供給に与える影響を評価可能であることを示した。一方、仮定が成立しない場合には過渡的な不安定性が発生することを示し、詳細な解析には熱サブシステムの動特性モデルが必要であることを指摘した。
- (2) 電気供給との相互作用を簡易に記述することを目的として、複数のボイラと蒸気配管を含む熱供給ネットワークの動特性を解析した。低マッハ数における物理的な近似および幾何学的特異摂動論の双方の観点から検討を行い、ボイラ圧力の遅い動特性を表す集中定数モデルと蒸気流速の速い動特性を表す分布定数モデルが組み合わさった従来モデルの複合スケール性を保持した上で、簡易な集中定数モデルを導出した。
- (3) 上述の解析およびモデルに基づき、電気および熱の需給バランスを確保する制御系を設計した。電気および熱サブシステムの両方に影響する CHP への燃料供給量を操作量とし、電気に関しては連系点電力、熱に関してはボイラの平均圧力を制御量とすることで、システムの入出力関係に基づく制御手法を適用し、安定化制御を達成した。また、同様の方法で電気および熱のフローの出力追従制御を達成し、安定化と出力追従が選択可能となる制御構成を検討した。

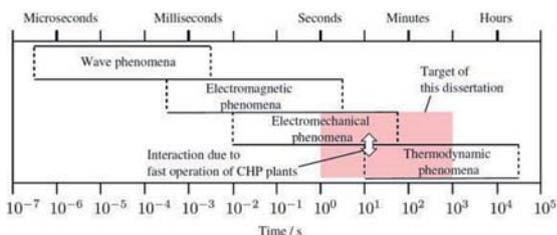


図 1：電力システムのスケール分離と本研究の検討対象

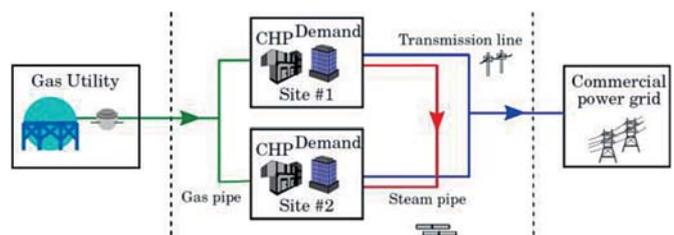


図 2：地域電熱供給の最小構成 (2 サイトシステム)

伊藤 俊平 (松尾哲司教授)

「電磁鋼板の磁化機構に関するマルチフィジックスモデルの開発」

平成 29 年 3 月 23 日授与

電磁鋼板などの鉄心材料は多数の結晶から構成され、結晶内部に磁区構造と呼ばれる構造を持つ。その磁気特性は磁壁移動や磁化回転といった磁化過程に伴う磁区構造の変化に由来している。これらの磁化過程は、機械的な応力や、不純物、結晶欠陥、結晶粒界などのピンニングサイトの影響を受けており、材料加工時に加わる応力による磁気特性の劣化が電気機器開発の上で問題となっている。これまで、電磁鋼板の特性をエネルギー極小に基づいて再現するモデルとして、2つの磁区を持つ単純化磁区構造モデルおよび、単純化磁区構造モデル単位セルとしてそれを複数集合させた集合磁区モデルが提案されていた。しかし、従来の集合磁区モデルでは応力やピンニングサイトの影響を十分に評価できず、また磁壁移動に関連した一部の現象を表現することができなかった。

そこで、本論文は、応力やピンニングサイトの影響を考慮し、磁壁移動などの磁化過程に基づいて電磁鋼板の特性を再現するマルチフィジックスモデルの開発を行ったものである。本論文において得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 応力の影響を考慮するために、集合磁区モデルに新たに磁気弾性エネルギーを導入した。さらに、従来の集合磁区モデルにおける 90° 磁壁移動を十分に表現できないといった問題を解決するために、図1のような6つの磁区を持つ単純化磁区構造モデル・集合磁区モデルを提案した。これにより、 $90^\circ \cdot 180^\circ$ 磁壁移動を適切に表現することが可能となり、方向性電磁鋼板の圧延・直角方向の特性や、無方向性電磁鋼板の応力による透磁率の変化(図2)などの現象を再現することが可能となった。
2. 結晶磁化容易軸の分布の影響などによる電磁鋼板内部の応力の分布を考慮して磁気弾性エネルギーを計算する集合磁区モデルを提案した。これにより、方向性・無方向性電磁鋼板の磁化曲線をより測定結果に近い形で再現することが可能となった。
3. 集合磁区モデルにおいて電磁鋼板内部のピンニングサイトの分布を考慮する方法として、ピンニングの影響を密度関数に基づいたベクトルピンニング磁界によって表現する分布ピンニングモデル(M)とピンニングの影響を磁壁移動に対応した形で与えた分布ピンニングモデル(W)を提案した。これらの方法により、初磁化曲線や、振幅ごとのヒステリシス曲線のループの幅の違いを再現することが可能となった他、分布ピンニングモデル(W)は無方向性電磁鋼板の応力下の鉄損を精度よく表現することができた。

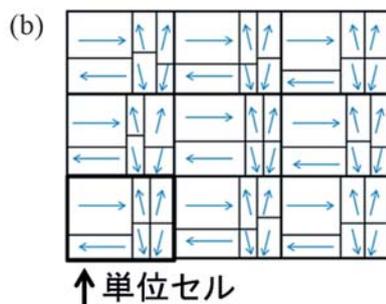
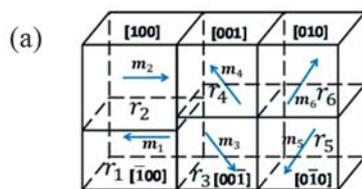


図1 (a) 単純化磁区構造モデル
(b) 集合磁区モデル

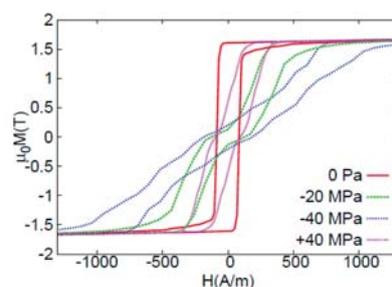


図2 集合磁区モデルによって得られた無方向性電磁鋼板の応力下の磁化曲線

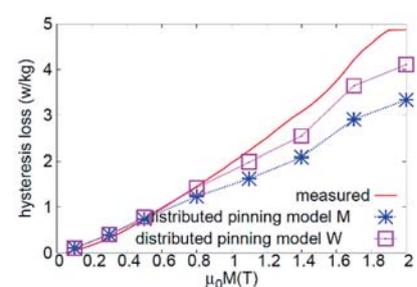


図3 集合磁区モデルによって得られた40MPaの圧縮応力下の鉄損

田 中 一 (木本恒暢教授)

「Theoretical Study on Carrier Transport in Semiconductor Nanowires Based on Atomistic Modeling」

(原子論的モデルに基づく半導体ナノワイヤにおけるキャリア輸送の理論的研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

Si 集積回路の性能向上はこれまで素子の微細化により達成されてきた。しかし極限的な微細化はゲート電極によるチャンネル電位の制御性を低下させ、短チャンネル効果による性能劣化につながる。これを回避するには、チャンネルを立体構造としてゲートで囲い込み、電位制御性を高めることが有効であり、幅が数 nm の半導体ナノワイヤ (NW) をチャンネルとし、その周囲をゲート電極で囲んだ構造を持つ NW MOSFET (図 1) が、次世代のデバイス構造として期待されている。他方で、既存の Si より高いキャリア移動度を持つチャンネル材料の採用も検討されており、中でも Ge は電子・正孔の両方について高い移動度を持つことから有望視されている。以上のことから、Si のみならず Ge 等の新規材料も含んだ半導体 NW におけるキャリア輸送現象の理解が、NW MOSFET の特性を予測し、また設計指針を与えるために重要となる。しかし、NW におけるキャリア輸送、特に Ge NW の正孔輸送特性については、量子力学的閉じ込め効果による電子状態の複雑さゆえに十分理解されていない。

本論文では、半導体ナノワイヤにおけるキャリア輸送の理解、および高性能デバイスの設計指針の提示に向けて、正孔に対する量子閉じ込めの記述に適した原子論的手法に基づき、NW におけるキャリア輸送のモデルを提示し、Ge NW および Si NW における正孔輸送を解析した。本論文で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) Ge NW におけるフォノン制限正孔移動度を原子論的な波動関数とフォノンモードに基づいて計算し、高い移動度を示す NW 形状を提示した。移動度の形状依存性がバンド構造から求めた平均的な有効質量と状態密度で記述できることを示した。
- (2) 原子論的な電子状態の扱いに適した形でラフネス散乱の定式化を行い、(1) と同様の計算にラフネス散乱の効果を加えて移動度の計算を行った。量子閉じ込め効果の異方性に由来して、フォノン制限移動度が高い形状はラフネス散乱の影響も受けにくいということを示した。
- (3) 上述の散乱過程を考慮して、非線形なボルツマン輸送方程式を解くことで、様々な方位を持つ Ge NW および Si NW における高電界下での正孔輸送を解析した。Ge NW においては電界の増加に伴いドリフト速度が減少する負性微分移動度特性が顕著にみられ (図 2)、その結果として、低電界移動度は Ge の方が高いにも関わらず、高電界では Si の方が高いドリフト速度を示しうることを見出した。この結果に対しバンド構造とエネルギー緩和過程に由来する分布関数の違い (図 3) に基づき物理的説明を与えた。
- (4) トンネル効果等の量子効果を記述する量子補正ポテンシャルの新たなモデルを提案し、これを用いて Ge NW p-MOSFET および Si NW p-MOSFET における準バリスティック正孔輸送特性を計算し、その性能を予測した。NW MOSFET におけるバンド構造・キャリア散乱・ポテンシャル形状がどのように電流輸送能力を決定するかを明らかにし、キャリア輸送物理の理解に基づいてデバイス設計指針を提示した。

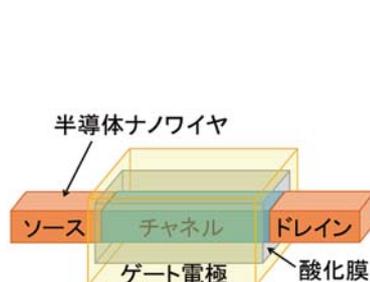


図 1: ナノワイヤ MOSFET の模式図

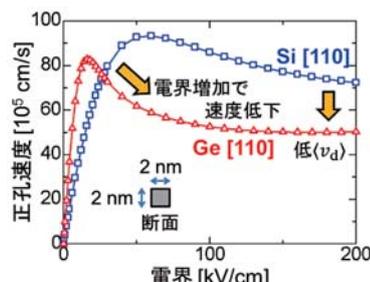


図 2: 正孔ドリフト速度の電界強度依存性

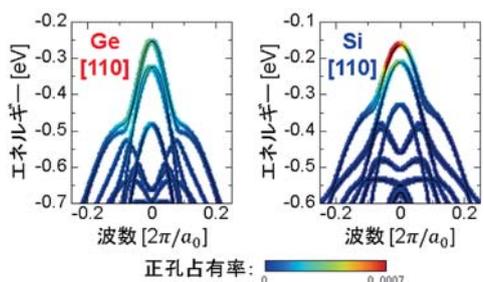


図 3: 高電界印加時のナノワイヤにおける正孔分布

市川 修平 (川上養一教授)

「Fundamental Study on Carrier Recombination Processes in AlGa_N-related Materials and their Structural Designs toward Highly Efficient Deep-UV Emitters」

(深紫外発光素子の高効率化にむけた AlGa_N 系半導体の結晶成長とキャリア再結合過程に関する研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

波長 200~300 nm の深紫外光は、皮膚病治療や液晶ディスプレイの液晶分子の光配向など、様々な分野への応用が期待されている。とくに波長 260 nm 付近の深紫外光は、DNA との相互作用が強い事が知られており、殺菌・浄水用光源として注目を集めている。現在、深紫外光源として水銀ランプ（波長 253.7 nm）や ArF エキシマレーザ（波長 193 nm）等が用いられているが、ガスの人体・環境への負荷が大きい点やガス光源特有の効率の低さ・素子寿命の短さなどが大きな課題となり、深紫外光源の応用・普及を妨げている現状にある。これらに代わる新たな深紫外光源を、AlGa_N 系半導体を利用したデバイスにより実現することで、環境への負荷を抑え、かつ高効率・長素子寿命の発光素子が可能となる。しかしながら AlGa_N 系半導体の発光素子は開発途上の段階にあり、LED の外部量子効率はまだ 10% 程度以下、波長 300 nm 以下の LD も実現されていない等の現状にある。本研究では、AlGa_N 系半導体の結晶成長や構造評価、物性評価などを通して高効率深紫外発光素子の実現に向けた基礎研究を行った。

本研究では、結晶成長条件の最適化により高品質半極性 AlGa_N/AlN 量子井戸を実現した。作製した量子井戸内における内部電界の大きさを見積もり、光学的特性に与える影響について議論することで、半極性面量子井戸の光学的な優位性を実証した。また、光学評価やキャリアダイナミクスに関する計算モデルの拡張を通して、AlGa_N 系半導体における支配的な非輻射再結合中心の同定や、それらがキャリアに与える影響について考察し、非輻射再結合中心の低減にむけた量子井戸構造の設計指針を示した。主要な内容を以下に示す。

1. 有機金属気相成長法を用いて、半極性面 AlN 基板上に AlGa_N/AlN 構造の成長を行った。従来の極性面基板上と同様の条件で半極性面基板上にホモエピタキシャル成長を行った際には、著しい結晶性の悪化が観察されたが（図 1 左図）、炉内圧力を上げて成長を行うことで生成される表面ピット内部に成長核生成を促進し、ピットを消滅させ、原子レベルで平坦な表面（図 1 右図）を実現できることを見出した。
2. 半極性面 AlGa_N/AlN 量子井戸では、活性層にかかる内部電界が極性面量子井戸の 1/3 以下に低減され、輻射再結合寿命が短寿命化することで、従来比 75 倍以上の強発光を実現できることを明らかにした。
3. カソードルミネセンス測定を利用することで、AlGa_N 系半導体の主要な非輻射再結合経路が点欠陥を介したものであることを示した。成長条件により Al 空孔を低減することで、さらなる効率改善の可能性を示した。
4. 量子井戸作製時にかかる格子歪みを考慮して、六方晶系用に臨界膜厚モデルを拡張し、量子井戸構造作製時における設計指針を示した。
5. 半極性面 AlGa_N/AlN 量子井戸の面内偏光特性を制御することで、劈開面からの強い光取り出しを可能にし、初めて半極性面 AlGa_N/AlN 量子井戸からの誘導放出を実現した（図 2）。

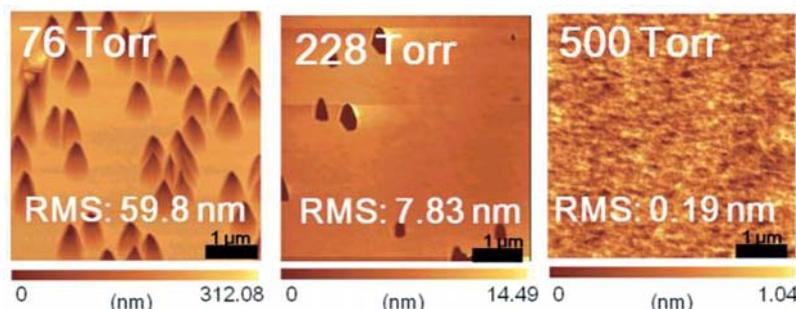


図 1: 半極性面 (*r* 面) AlN 薄膜の表面モフォロジーの成長圧力依存性

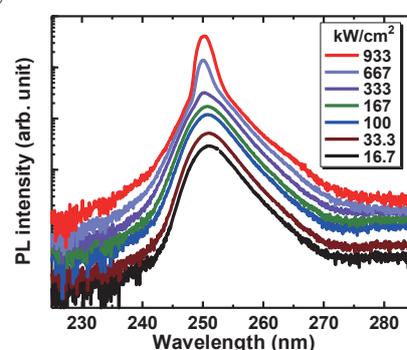


図 2: 半極性面 (*r* 面) AlGa_N/AlN 量子井戸からの自然放出・誘導放出スペクトル

尾崎 拓也 (川上養一教授)

「Growth of InGaN-Based Emitters on ScAlMgO₄ Substrates for Full Visible Spectral Range」

(可視全域をカバーする発光素子開発のための ScAlMgO₄ 基板上への InGaN 系発光層の成長に関する研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

窒化ガリウムインジウム (InGaN) は、青色や緑色の発光ダイオード (LED) やレーザダイオードの発光層として用いられている。特に、青色 LED と蛍光体を組み合わせた白色 LED は、照明機器やディスプレイのバックライトなど幅広く応用されている。しかし、原理的には、InGaN 混晶を構成する GaN の禁制帯幅 (3.4eV) から InN のそれ (0.64 eV) に相当する波長域 (365 nm - 2 μm) をカバーできるはずであることを考えると、材料のポテンシャルの一部しか利用できていない状況にあるといつてよい。特に、緑色から赤色の可視長波長領域の発光効率は、青色領域のそれに比べると半分以下と低い。青・緑・赤を含むの可視領域全域で InGaN を用いた高効率な発光デバイスが実現できれば、ディスプレイ応用上のインパクトは大きい。本論文では、可視長波長領域の発光効率を向上させるため、発光層の歪やミスフィット転位の発生を抑制できる新奇基板材料として、(0001) 面で In_{0.17}Ga_{0.83}N との格子整合が期待できる ScAlMgO₄ 基板を提案し、この基板上への結晶成長技術およびデバイス作製技術の確立を行った。

特筆すべき成果として、従来 LED に用いられている sapphire 基板上の LED と比べて、高輝度の青色 LED を GaN/ScAlMgO₄ 基板上に試作することに成功した(図 1)。この結果は、投稿した論文誌 (*Appl. Phys. Exp.* **8**, 062101) において Spotlight 論文に選ばれ、また応用物理学会での口頭発表は全講演の 0.6% に当たる注目発表に選出された。さらに、格子整合した In_{0.17}Ga_{0.83}N/ ScAlMgO₄ 上に赤色発光する In_xGa_{1-x}N/ In_yGa_{1-y}N 多重量子井戸 (QW) 構造を作製したところ、従来の sapphire 基板上の構造と比較して高い内部量子効率を持つことがわかった (図 2)。可視長波長領域における窒化物半導体発光素子の結晶成長用基板として、ScAlMgO₄ が高い優位性を持っていることを示した結果であると考えている。

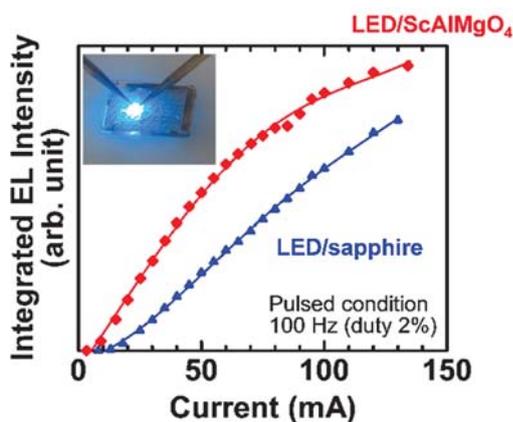


図 1: GaN/ScAlMgO₄ および GaN/sapphire テンプレート上の青色 LED の EL 発光強度の注入電流依存性 (パルス駆動条件)。挿入図: GaN/ScAlMgO₄ 上青色 LED の DC20 mA 時の EL の様子。

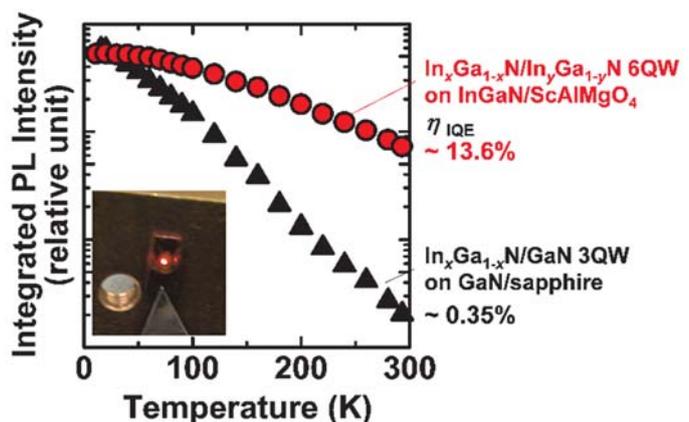


図 2: ScAlMgO₄ 基板および sapphire 基板上の赤色発光 InGaN QW 構造の光励起発光の温度依存性。挿入図: ScAlMgO₄ 基板上赤色 InGaN QW の PL の様子。

山口 皓 平 (山川宏教授)

「On Asteroid Deflection Techniques Exploiting Space Plasma Environment」

(宇宙プラズマ環境を利用した小惑星の軌道変更手法に関する研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

小惑星の地球衝突は、頻度こそ低いものの、ひとたび発生すれば我々の生活に大きな被害をもたらし得る災害の一つである。人類の宇宙探査技術は目覚ましい発展を遂げているが、小惑星の地球衝突問題に対処するためには、未だに多くの課題が残る。本研究は、地球に衝突する恐れのある小惑星の軌道変更、ひいては地球衝突を回避するため、宇宙プラズマ環境を積極的に利用した効果的な手法を提案・検討するものである。

まず、加速した宇宙機を高速で小惑星に衝突させる軌道変更手法である Kinetic Impactor (KI) を評価するための概念を提案した。KI に用いる宇宙機軌道は、衝突によって達成される小惑星の軌道変更距離を評価関数とした最適化問題を解くことで求められる。本研究では、宇宙機衝突の効率をより詳細に解析するため、衝突によって達成される小惑星の軌道エネルギー変化の最大値を宇宙機軌道の半長径と離心率の関数として可視化する Impact Geometry Map (IGM) を提案した (図 1)。IGM を用いることで、設計した KI ミッションによって得られる小惑星の軌道エネルギーの変化が、理想的な場合と比較してどの程度の効率であるかを、用いる推進システムの種類に依らず評価することが可能となる。KI については、帯電セイルと呼ばれる推進システムで宇宙機を加速する手法についても検討した。帯電セイルは、高電位に帯電した導電性テザーを宇宙機の本体から展開し、太陽から吹き付ける高速のプラズマ流である太陽風中の陽子と干渉させることで推進力を発生させる燃料レス・推進システムである。本研究では、これまで明らかにされてこなかった、帯電セイルの太陽風に対する姿勢と発生する推力の関係を定式化した。また、大規模システムであることから姿勢変更技術が未確立であった帯電セイルを、テザー電位の電気的な変更のみで軌道制御する手法を提案した。小惑星への衝突軌道を最適化した結果、提案した軌道制御手法で衝突軌道が設計可能であり、従来の燃料噴射型の推進システムを利用した場合と比較して大きな軌道変更距離が達成可能であることを示した。

一つ目の手法として検討したのは、小惑星と宇宙機の双方を人工的に帯電させ、両者の間に働くクーロン力と万有引力によって小惑星を牽引し軌道変更する、クーロン力・アトラクタである。これは、万有引力のみで小惑星を牽引する重力トラクタを発展させたものであり、用いる宇宙機の質量低減、クーロン力の導入による牽引力の増大といったメリットがある。本研究ではまず、帯電した小惑星と宇宙プラズマとの相互作用を解析する数値計算コードを開発し、小惑星の人工的な帯電の可能性を検証した。本コードは、実際の小惑星形状を反映した三次元メッシュデータをもとに、表面を構成する各要素の電流収支を計算するものである。電流源として、宇宙プラズマ中の電子と陽子、それらの衝突によって発生する二次電子、更に、太陽光照射によって生じる光電子が考慮され、表面電圧の非線形関数として表現される各電流の和が零となる電位を計算することで、小惑星の帯電状態を求める (図 2)。開発したコードにより、プラズマコンタクトを小惑星に設置し、荷電粒子を排出することで、炭素で構成される C 型小惑星を人工的に帯電させることが可能であることを示した。また、クーロン力を考慮した宇宙機の運動方程式の導出と制御則について検討し、帯電宇宙機の軌道制御について定式化した。更に、クーロン力・アトラクタによる小惑星の軌道変更距離を計算し、低質量かつ離心率の小さな軌道にある小惑星の軌道変更特に効果的であることを明らかにした。このような小惑星は、重力トラクタによる軌道変更が困難であり、クーロン力・アトラクタの優位性を示した。

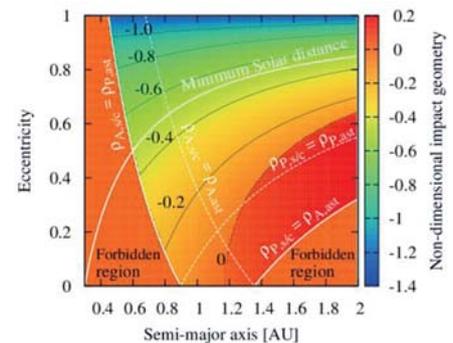


図 1 Impact Geometry Map.

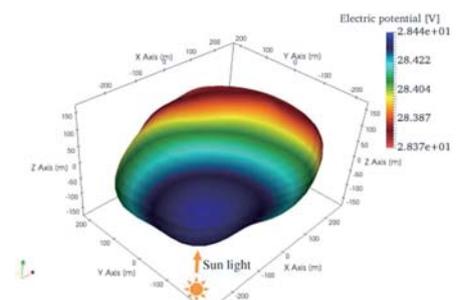


図 2 小惑星の自然帯電解析例.

浦出 芳郎 (北野正雄教授)

「Electromagnetic Properties of Checkerboard-like Metallic Structures at Terahertz Frequencies」

(チェッカーボード状金属構造のテラヘルツ帯における電磁的性質)

平成 29 年 3 月 23 日授与

近年、電磁波をより高い自由度で制御する手段として、電磁メタマテリアルやメタ表面（二次元的なメタマテリアル）と呼ばれる人工構造体が大きな注目を集めている。電磁メタマテリアルとは注目する波長に比べて小さい単位構造からなる人工的な「物質」であり、その構造を適切に設計することで通常の物質だけでは実現困難な電磁応答を実現することができる。こういった構造や配置に関する自由度は無数にあるため、種々の構造でどのような電磁応答が発現するのかを見極めるために、その対称性に着目することが重要である。本論文は、自己補対性と呼ばれる対称性をもつチェッカーボード状金属構造が示す特異な電磁的性質について、特にテラヘルツ帯という周波数帯に着目し、実験・数値シミュレーション・理論の三つの手法により論じたものである。本論文の成果は大きく以下の2つの観点から整理される：

1. 自己補対性に起因する周波数無依存応答

理想的なチェッカーボード状金属構造は金属部と空隙部の入れ替えに関する対称性である自己補対性を有しており、それに起因した周波数無依存な応答が予想される。本論文では、自己補対性に必要であると考えられていた実現不可能な点接触の部分に抵抗膜で置換するという独自の発想に基づき、実際に試料を作製し [図 1(a)]、テラヘルツ帯でその特性を評価した。理論的に予想される特定の抵抗値において自己補対性に起因する周波数無依存な透過特性が生じることを観測した [図 1(b)]。また、こうした抵抗膜を装荷した自己補対チェッカーボード状金属構造の両側から同位相・等強度のテラヘルツ波を入射すると、回折周波数以下で、広帯域かつ入射エネルギーをサブ波長領域に集める作用をもったコヒーレント完全吸収体として振る舞うことを明らかにした。

2. 金属部の接続性に依存した特異な電磁応答の動的メタ表面への応用

チェッカーボード状金属構造は金属部の接点に電氣的に接続しているか、していないかによってその電磁応答が大きく変化する。本論文では、その特異な性質に着目して、抵抗値を動的にスイッチングできる物質を接点部に配置した動的に特性可変なメタ表面を提案した。実際に、二酸化バナジウムとチェッカーボード状構造を組み合わせ、テラヘルツ波応答の動的切り替えの原理実証に成功した。また、単純なチェッカーボード状構造の透過特性の切り替えに加えて、チェッカーボード状構造に平面カイラリティをもった構造を適切に埋め込むことで、構造がもつ平面カイラリティの切り替えが可能になることを理論的・数値的に示した。

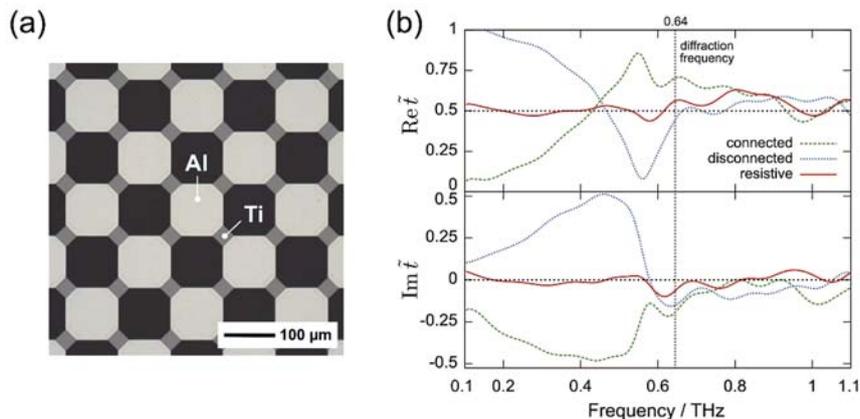


図 1：(a) 作製した抵抗膜置換型チェッカーボード金属構造の光学顕微鏡像。(b) その複素透過係数の実部・虚部それぞれのスペクトル(赤の実線)。Y. Urade *et al.*, Phys. Rev. Lett. 114, 237401 (2015) より転載。

大谷 芳明 (水内亨教授)

「ヘリカル型閉じ込め装置におけるイオン種の違いが粒子輸送に与える影響に関する研究」
平成 29 年 3 月 23 日授与

本論文は、ヘリカル型装置であるヘリオトロン J 及び大型ヘリカル装置 (LHD) においてプラズマ粒子輸送に対するイオン種の違いが与える影響 (イオン種効果) を評価し、まとめたものである。これは、粒子輸送に対するイオン種効果の物理機構解明に向けた基礎実験であるばかりではなく、将来のヘリカル型核融合炉設計において必要な DT 混合プラズマの閉じ込め性能の予測性向上に向けた重要な知見である。

プラズマ粒子輸送を評価するための有力な手法として、密度変調法がある。これは、プラズマ周辺部の粒子供給量に変調をかけ、プラズマ周辺部から中心方向へ伝搬する密度の変調を評価することにより、プラズマの拡散係数及び対流速度を評価する手法である。当初、ヘリオトロン J ではプラズマ中心を通過する一視線のマイクロ波干渉計しかなかったため、周辺部の密度を計測するために、遠赤外線レーザーを光源とするヘテロダイン検波のマイケルソン干渉計を新たに構築した。本干渉計では、レーザービームがプラズマ密度による屈折効果の大きい領域を通過するため、屈折の影響の小さい短波長の HCN レーザー ($\lambda = 337 \mu\text{m}$) を用いている。これにより、実験的に $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上の線平均電子密度を持つプラズマの計測に成功した。

ヘリオトロン J において電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) の D 及び H プラズマに対して 50、100、125 Hz の変調周波数で密度変調実験を行った。新 HCN レーザー干渉計と既存干渉計を用いて電子密度の時間発展を計測し、粒子拡散係数 (D_{mod}) と対流速度 (V_{mod}) を評価したところ、図 1 に示すように D プラズマの D_{mod} 及びプラズマ中心方向への V_{mod} は共に H プラズマよりも小さく、イオン種効果 (水素同位体効果) があることが示された。

LHD においては、ECH の H 及びヘリウム (He) プラズマに対して密度変調実験を行い、 D_{mod} と V_{mod} を評価した。電子内部輸送障壁が形成されていない周辺 L-mode 領域において、図 2 に示すように D_{mod} に対する H-He イオン種効果に明確な衝突周波数依存性が見られた。高衝突周波数領域では、He プラズマの D_{mod} が H プラズマよりも大きくなる傾向が示された。一方、 V_{mod} には明確なイオン種効果は現れなかった。

D_{mod} 及び V_{mod} に対するイオン種効果の衝突周波数依存性を議論するために、本研究で明らかにしたヘリオトロン J、LHD の D_{mod} 及び V_{mod} に加え、先行研究で評価された中型ヘリカル型装置 CHS の D_{mod} 及び V_{mod} を比較した。LHD 及び CHS における D_{mod} は衝突周波数の減少に伴い増大する傾向は一致した。LHD では、 D_{mod} に対する H-He イオン種効果による差異は、衝突周波数の減少により少なくなる。一方、CHS では、 D_{mod} に対する水素同位体効果による差異は、衝突周波数の減少に伴い増大し、ヘリオトロン J における低衝突周波数領域で水素同位体効果が現れる特徴と一致している。すなわち、LHD での結果と、CHS ならびにヘリオトロン J での結果は、逆の特徴がある。一方、 V_{mod} に対しては、LHD では H-He イオン種効果、CHS では水素同位体効果が見られなかったが、ヘリオトロン J ではわずかに水素同位体効果が見られた。これらのことから、装置の運転領域や磁場配位により、粒子種の違いが粒子輸送に与える影響が異なることを示した。

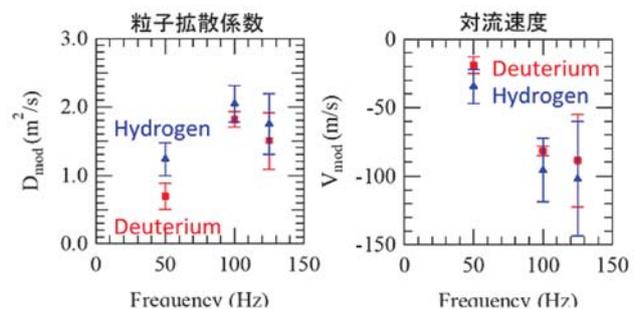


図 1. ヘリオトロン J における粒子拡散係数と対流速度 (径方向を正)

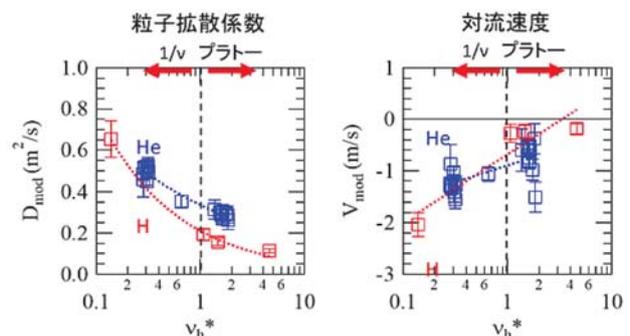


図 2. LHD の L-mode 領域における粒子拡散係数と対流速度 (径方向を正) の衝突周波数依存性

松 室 堯 之 (篠原真毅教授)

「Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission」

(先進的マイクロ波電力伝送に向けた球面波合成による高度ビーム形成)

平成 29 年 3 月 23 日授与

本論文は、人体への影響や他の無線システムとの干渉を考慮した先進的マイクロ波電力伝送システムの実現を目的として、異なる次数の球面波を重ね合わせることで所望のビームを合成する手法に関する研究成果についてまとめたものである。宇宙太陽発電システムのような大規模なマイクロ波電力伝送の実現には、地上におけるマイクロ波電力伝送の早期社会実装が重要であるが、地上においては人体への影響や他の無線システムへの干渉が特に問題となる。そこで本研究では、このような問題に対しマクスウェル方程式の基底関数である球面波の集合によって設計された理想的な電磁界を用いて、(1) ユビキタス型マイクロ波電力伝送における受電アンテナの小型化と (2) ビーム型マイクロ波電力伝送におけるエネルギー低漏洩化について検討した。

開口面アンテナの理論によれば、一定の電力密度における受電電力はアンテナの開口面積に比例する。これに対して本研究では、原点の多重極から放射する球面波を適切に合成することにより高い指向性が得られることを示した。この合成球面波が持つ指向性を角運動量と角度の不確定性関係から導出するとともに、原点近傍に存在する次数に応じた大きさの遮断領域が本質的波源となり有効開口面積を形成することを示した。また、有限の大きさを持つ球形誘電体共振器が正確な高次モード球面波の波源として動作することを明らかにし、多層構造を持つ球形誘電体共振器により次数の異なる共振モードが縮退可能であることを示した。これらの結果から、最大の球面波が持つ遮断領域よりも小さな誘電体共振器を用いることにより、物理的断面積より大きな有効開口面積を持つ放射系が実現可能であることが示された。多層球形誘電体共振器が、人体の影響を考慮したユビキタス型マイクロ波電力伝送における小型受電アンテナの基本構造を与えることを述べた。

従来のビーム型マイクロ波電力伝送においては、アレーアンテナの入力分布が第一に決定される。これに対して本研究では、アレーアンテナの設計に先立って真空中を伝搬するビーム形状を最適化する立場をとった。同じ最大次数を持つ外向き合成球面波と内向き合成球面波を同振幅で合成することにより特異点を持たないビーム電磁界を得た。このビーム電磁界の断面分布に比例した振幅分布および位相分布を送電アンテナ素子に入力 (転写) することにより低漏洩ビームを形成した。さらに本研究では、このように設計した低漏洩ビームをパイロット信号に適用した単一周波数レトロディレクティブシステムを提案した。屈折率の周波数依存性の影響を避けるためパイロット信号とマイクロ波電力の伝搬には同一周波数で直交する偏波を適用した。直交する2つの偏波を独立に放射吸収するためのアレーアンテナ素子として直交2重モード誘電体共振器アンテナを新たに提案し、良好なアイソレーション特性が実験により得られた。これらの結果から、地上における水平ビーム型マイクロ波電力伝送システムにおける信頼性向上の見通しが得られた。

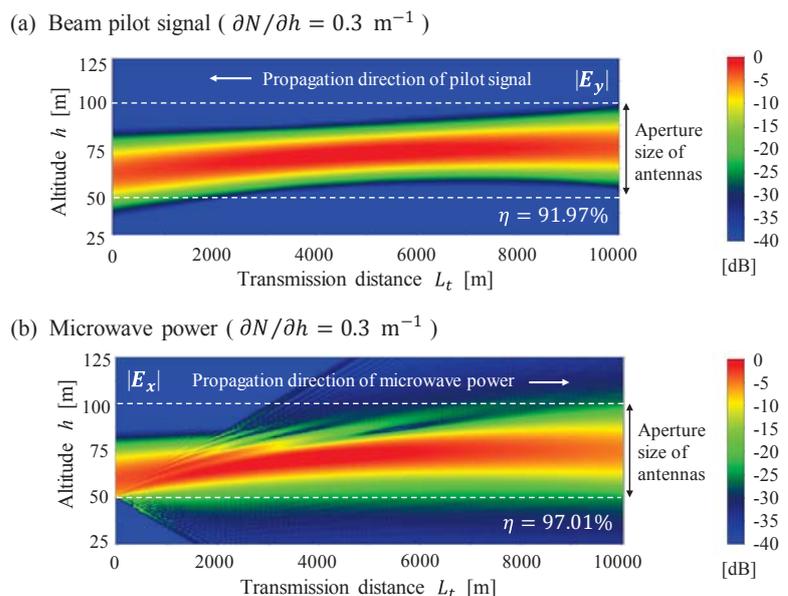


図 1：ビーム状パイロット信号とマイクロ波電力信号の計算結果

倪 俊 雄 (小山田耕二教授)

「Advanced Modeling Techniques for High Performance and Human Centered LED Lighting System」

(高効率で人に優しいLED照明システムのための先進的モデリング技術の開発)

平成 29 年 3 月 23 日授与

近年、発光ダイオード (LED) を用いた 高性能ディスプレイの研究やユーザー指向の照明シミュレーションは、コンピュータ支援設計として多くの研究分野で注目されている。LED は、高度な照明や大規模ディスプレイだけでなく他の分野でも使われている。その中でも発光効率の高い LED のシミュレーションは、照明システムにおけるパラメータ変更による影響を理解するために重要な役割を果たす。従来の光学のモデリングとシミュレーション技術は、ある特定のソフトウェアに依存しており、これらのソフトウェアは、単一の分野による使用を前提としている。そのため、光学に関わる学際的な研究を行う多くの研究者が、他分野のモデリングやシミュレーションを行うのは難しかった。

本研究は、発光ダイオード (LED) を用いた照明システム設計における問題を解決するための新しいモデリング手法に関する研究の成果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 高出力・省電力の観点では、LED 基板を多層にすることが望ましいとされていたが、LED 基板は不透明であるため、現実には多層にすることができなかった。この課題を解決するために、LED 基板に穴をあけ、視点から見て後方の LED 基板からの光を前方へ放射するようにした。本提案手法の有用性を検証するために光学シミュレーション技術を利用し、LED 基板の層数に応じた出力が得られていることを確認した。
2. LED 表示システムにおいて、人間の眼に悪影響を及ぼすブルーライトを低減すると、色性能が劣化する傾向にある。この問題を解決するために、白色 LED の青色帯エネルギーを 50% 削減し、シアン LED を追加する表示システムを提案した。本提案手法の有用性を検証するために光学シミュレーション技術を利用し、提案したシステムがブルーライトの影響の低減と色性能の維持を同時に実現することを示した。
3. これまで、車載 LED ハイビームシステムでは、天候の状況に関わらず、固定の色温度による照明を行っており、エネルギー効率上問題があることが指摘されていた。この課題を解決するために、ハイビームランプ付近に反射シートを設置するデザインを提案した。本提案手法の有用性を検証するために光学シミュレーション技術 (図 1 参照) を利用し、好天候時に高い色温度を用い、悪天候時に低い色温度を使用することにより、エネルギー効率が改善することを示した。

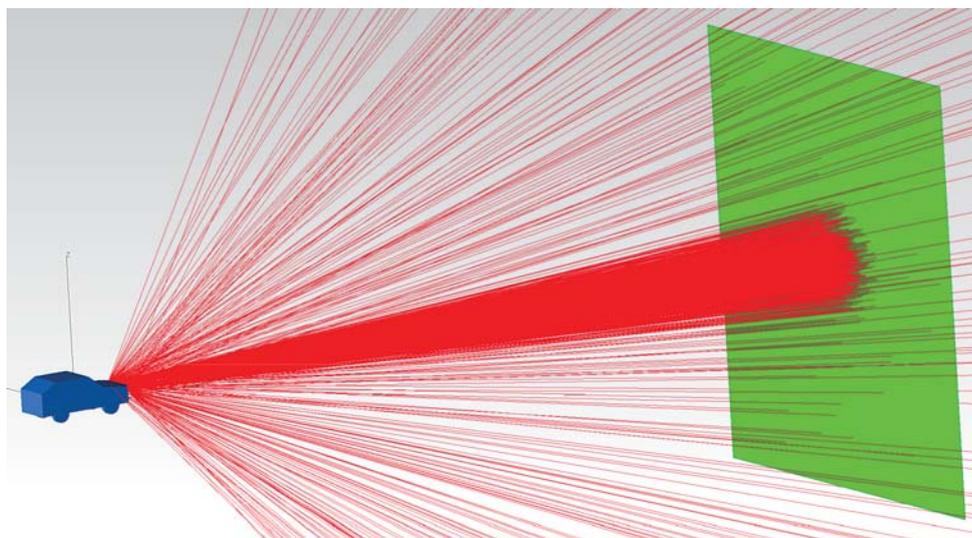


図 1 ハイビームランプ付近に反射シートを設置したモデルによる光学シミュレーション結果

片岡 研 (川上養一教授)

「深紫外多波長発光素子の実現に向けた AlGaN 量子井戸三次元微細構造制御に関する研究」

平成 29 年 5 月 23 日授与

深紫外光 (DUV) は殺菌、医療、樹脂硬化など様々な分野に利用されている。光源として水銀ランプが広く用いられているが、水銀使用の抑制等の観点から発光ダイオード (LED) 等の固体光源化が望まれている。ただし、多波長性の水銀ランプと単色性の LED では、単純な置き換えが難しい用途もある。例えば樹脂硬化では、水銀の複数の輝線は表面と内部の同時硬化に有効で、多波長深紫外発光素子の実現が望まれる。

可視光領域の多波長 LED として、誘電体マスク材料を用いた再成長技術による GaN 系三次元 (3D) 構造 LED が報告されている。一方紫外光領域において、この手法を AlN 系紫外材料に適用して UV 多波長発光を実現することは、Al 原料の高い反応性のため困難であった。本論文では、深紫外多波長発光素子の実現に向けて、AlGaN 系 3D 構造の成長手法と設計について検討を行った。本研究で得られた主な成果を以下に示す。

1. AlN $[1\bar{1}20]$ 方向のストライプ溝を形成した AlN/サファイア基板テンプレート上への再成長により、誘電体マスクを用いることなく、 $\{1\bar{1}01\}$ と (0001) 面で構成された AlN 系 3D 構造を得ることに成功した。成長条件に対する形状の制御性は GaN に比べて低く、これは Al の反応性の高さ由来した表面マイグレーション長の短さが原因であると結論づけた。
2. AlN 系 3D 構造上に AlGaN 量子井戸構造を作製した。カソードルミネッセンス (CL) 測定により空間分解分光を行ったところ、溝端部での長波長発光とその他の領域からの短波長発光の重ね合わせにより多波長発光を示すことがわかった。溝端部には、複数の原子ステップが集まった 10 nm 程度の高さの段差 (バンチトステップ) が形成されており、そこに Al よりもマイグレーション長の長い Ga が優先的に取り込まれることにより、局所的なポテンシャルの低下とそれに伴う発光の長波長化がおこることを明らかにした。またバンチトステップでは、周辺のテラス部との発光面積比に対して発光強度比が大きく、高い発光効率をもつことが示唆された。
3. 図 1 のような 3D LED の作製評価を行い、深紫外多波長発光 LED を実現した (図 2)。AlN 系 3D 構造上に形成されたバンチトステップが、AlGaN の膜厚・V/III 比等の成長条件により消失することも明らかにした。
4. AlN $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ の等価な 2 方向により囲まれた、凸型または凹型の菱形を 2 次元状に配置した新たな 3D 構造を提案・作製した。本構造では、発光効率の高いバンチトステップの面積比を高めることで、平坦構造と比較して CL 積分発光強度が約 2 倍となった。また凸型の菱形構造では、凸部周囲の溝に形成されたバンチトステップからの 2 つの長波長ピークと、その他領域からの短波長ピークからなる多波長 CL スペクトルが得られ、ストライプ構造と比較してさらなる多波長化を実現した (図 3)。バンチトステップでの複数ピーク発光は、微細構造中の原料濃度分布による、ステップ部での Al 組成分布が原因と考えている。

以上の結果から、AlGaN 3D 構造による深紫外多波長発光素子の作製手法および設計指針を示した。得られた知見は、AlGaN 発光素子における多波長化のみでなく、微細構造による発光の高効率化など半導体発光素子の高性能化への展開が期待される。

発表論文) *Appl. Phys. Exp.* **10**, 031001 (2017), *Appl. Phys. Exp.* **10**, 121001 (2017).

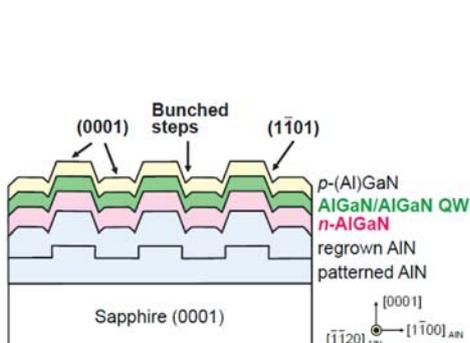


図 1 : 3D LED の断面構造の概略

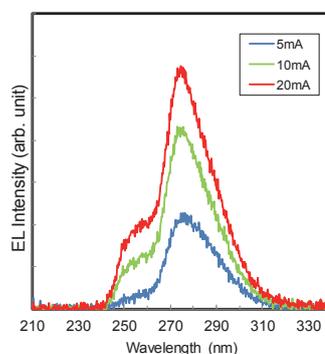


図 2 : 3D LED の電流注入発光スペクトル

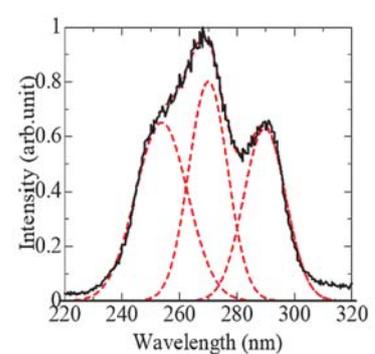


図 3: 凸型の菱形構造からの室温 CL スペクトル

野村 義樹 (掛谷一弘准教授)

「Bi系高温超伝導体固有ジョセフソン接合における接合間相互作用下の巨視的量子トンネル現象に関する研究」

平成 29 年 7 月 24 日授与

銅酸化物高温超伝導体は結晶構造中にジョセフソン接合を内包しており固有ジョセフソン接合と呼ばれる。固有ジョセフソン接合は構造上単一の固有ジョセフソン接合を取り出すことが困難であり、超伝導層も絶縁層も原子数層で構成されるため隣接する固有ジョセフソン接合間で相互作用が働く。このため金属超伝導体を用いたジョセフソン接合では考慮する必要がない相互作用を理解することが、固有ジョセフソン接合の電子デバイスの作製には必要不可欠である。

本研究では3種類のBi系高温超伝導体 (Bi2201, Bi2212, Bi2223) を用いて固有ジョセフソン接合間の相互作用が量子現象に与える影響について調べた。本研究では特に巨視的量子トンネル効果に注目して実験を行った。ジョセフソン接合が零電圧状態から有限電圧状態に遷移するとき、極低温では巨視的量子トンネル効果と呼ばれる量子揺らぎによって遷移が引き起こされ、高温では熱揺らぎによって遷移が引き起こされる。巨視的量子トンネル効果による遷移確率と熱揺らぎによる遷移確率が等しくなる温度をクロスオーバー温度と呼び、実験から求められるクロスオーバー温度が3種類のBi系高温超伝導体間でどのように変化するかを調べた。

本研究では実験的に以下の事実を示した。

(1) 3種類のBi系高温超伝導体を用いて、巨視的量子トンネル効果の測定を行った。第一スイッチと呼ばれるスイッチではすべての素子で巨視的量子トンネル効果が観測された。第二スイッチと呼ばれるスイッチではBi2201, Bi2212ではクロスオーバー温度が増大することを観測した。一方でBi2223ではクロスオーバー温度は第一スイッチと第二スイッチでほぼ等しくなった(図1)。Bi2223の結果は第一スイッチと第二スイッチがそれぞれ独立にふるまっていることを示している。Bi2223とBi2212の差は超伝導層厚さのみであるため、超伝導層厚さが増加すると、相互作用の影響は弱くなることを示した。

(2) Bi2212において同じ結晶から作製した素子を用いて第二スイッチのクロスオーバー温度と臨界電流密度の関係について調べた。その結果臨界電流密度が増加すると、クロスオーバー温度が低下するという負の相関が得られた。臨界電流密度はキャリア濃度によって決まることから、キャリア濃度が増加すると相互作用が弱くなることを示した。

これらの実験結果から量子現象において重要な相互作用は比較的近距離の相互作用であることを示し、電荷結合と呼ばれる結合を仮定すれば今回得られた実験結果を説明できることを述べた。

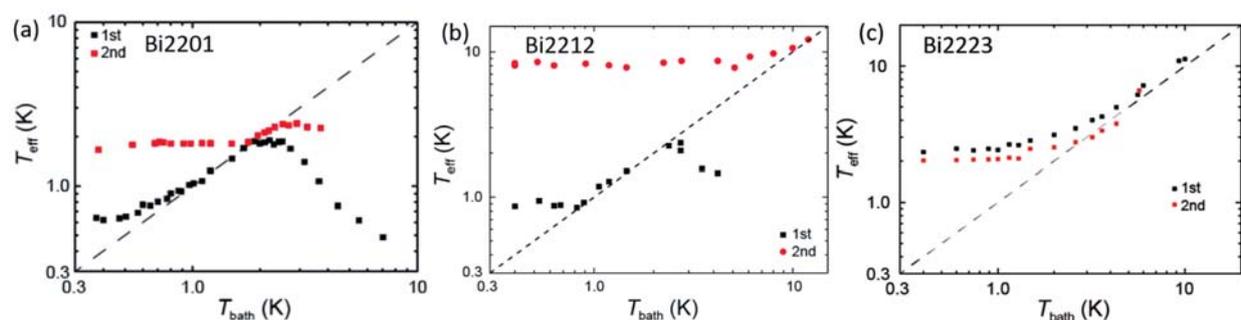


図 1: (a) - (c) それぞれ Bi2201, Bi2212, Bi2223 の実効温度 (T_{eff}) の測定温度 (T_{bath}) 依存性を示す。 T_{eff} は揺らぎの大きさを示すパラメータ。クロスオーバー温度は T_{eff} が温度依存性を示さなくなる温度を指す。

Johan Fredrik Raak (引原隆士教授)

「Data-driven analysis of wind power and power system dynamics via Koopman mode decomposition」

(クープマンモード分解による風力ならびに電力システムダイナミクスデータのデータ駆動型解析)

平成 29 年 9 月 25 日授与

This dissertation focuses on data-driven analysis of power systems and wind power systems by utilizing a recently developed mathematical framework called Koopman Mode Analysis (KMA). KMA is based on spectral analysis of the so-called Koopman operator which governs the evolution of observables of nonlinear dynamical systems. KMA is related to the so-called Dynamic Mode Decomposition (DMD)—a promising technique for the analysis of complex multivariate data which was proposed a few years ago to analyze complex fluid flows. Since then, a great deal of interest has been directed towards this technique, and many new extensions and variants of DMD have been proposed. The purpose of these techniques is essentially to extract dynamic characteristics such as oscillatory structures or modes from complex, nonlinear systems, by utilizing only measurements, without a-priori knowledge of the system. This can be viewed as a model-reduction technique, which aims at capturing the essential dynamic characteristics of a possibly unknown system, which enables analysis, prediction and control of the target system. Connections between DMD and the Koopman operator have been highlighted, and thus DMD has been called Koopman Mode Decomposition (KMD).

This dissertation demonstrates and proposes several new applications of KMD related to the analysis of wind power and power systems. A thorough review of the Koopman operator and KMD is provided, including descriptions of the most common numerical techniques, and theorems connecting different algorithms. Three KMD algorithms are evaluated with several data sets and under the influence of various levels of noise. These results clarify the applicability and suitability of the algorithms to different types of data.

The bulk of this dissertation then discusses wind power fluctuations in Japan. Wind power fluctuations are analyzed on spatial scales ranging from hundreds of kilometers to hundreds of meters, and on timescales ranging from seconds to weeks. First, a statistical evaluation of short-term wind power fluctuations is conducted which shows that significant power output fluctuations from wind turbines are to a large extent not suppressed in the wind farm output, giving rise to large output fluctuations. The results imply that care should be taken about short-term correlations in wind farms. Following that, large-scale smoothing effects of wind power are investigated by incorporating data from weather simulations. The smoothing effects are determined by the correlation between wind farm outputs at various timescales. A better understanding of the smoothing characteristics, e.g. understanding the size of the wind farm distribution area required to achieve a certain degree of smoothing in the aggregated wind power, would contribute to smarter planning and better utilization of equipment and natural energy resources, and greater reliability. To quantify the smoothing effects of wind power in Japan, a new index via KMD is proposed. The results from applying the proposed index highlight the importance of deliberately selecting sites for large-scale wind power production to more effectively smooth the aggregated power. Finally, prediction of short-term wind speed fluctuations is investigated by utilizing KMD.

Lastly, applications of KMD related to power system analysis and security are demonstrated. In particular, by applying KMD to power system dynamics, connections between so-called Koopman modes and spectral graph theory are discovered. This indicates that graph properties can be inferred from dynamics on networks via the spectrum of the Koopman operator. Also, a practical data-driven method utilizing KMD is outlined to partition a power system into disjoint parts, which is a vital component of a controlled islanding strategy aimed to save power systems from large-scale blackouts. This investigation indicates that data-driven methods such as KMD can be regarded as promising tools for effective monitoring and control of future, more variable, and power systems.

下 西 慶 (川嶋宏彰准教授)

「Modeling and Estimation of Selection Interests through Gaze Behavior」

(注視行動を用いた選択興味モデル化及び推定)

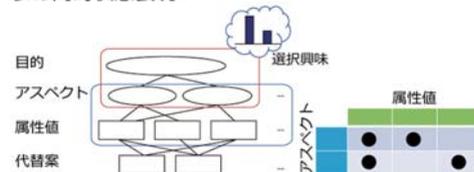
平成 29 年 9 月 25 日授与

我々は日常的に複数候補の中から対象の一つを選択するという選択行為を行っている。たとえば、今晚夕食を食べるレストランを選択したり、新たに購入する PC を選択したり、という行為があげられる。しかしながら我々は、選択時点において、自らの興味や目的をはっきり認識できているとは限らず、しばしば、選択した対象を消費・利用しようとした際に、「こんなはずではなかった」という、目的と選択対象とのミスマッチが起こってしまい、選択に対する満足度が低下してしまうことがある。このような問題に対して、たとえば就活相談においては、アドバイザーがまず相談者に自らの将来イメージを具体化させるような支援を行っているように、人が選択を行う時点で、その興味を明確にさせるような支援が有効になると考えられる。これまでも、推薦システムのような選択行動の支援システムは複数提案されてきているが、これらの多くは、対象の持つ特徴を利用して選択候補の削減を支援するものとなっており、ユーザに対してその興味を意識させるようなアプローチはあまりとられてきていない。

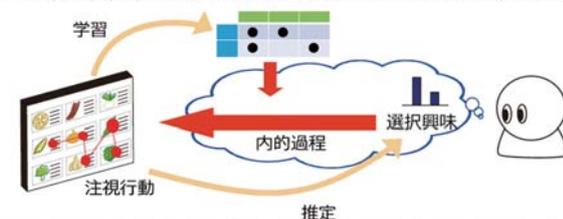
そこで本論文では、ユーザがカタログコンテンツ上の複数候補の中から対象を選択する状況を想定し、「何故選ぼうとしているのか」をユーザ自身が明確に意識するための対話的支援の基盤技術として、注視行動を用いた選択興味モデル化及び推定法を提案した。具体的にはまず、ユーザが対象群を閲覧する際の「物の見方」に着目し、アスペクトと呼ぶ概念を導入することで、これらアスペクトに対する重視度としてユーザの選択興味を定義した (図 1 (a))。さらに、トピックモデルの考え方を応用し、対象の持つ複数の属性値との関連度としてアスペクトを表現することで、ユーザがある選択興味を有する際に実際の注視行動が現れる過程を確率的生成モデルとしてモデル化し、複数ユーザの注視行動から、その背後に共通するアスペクト自身をデータドリブンに学習し、学習されたアスペクトに基づいて各ユーザの選択興味を推定するという枠組みについて提案した (図 1 (b))。

本論文では、ユーザの注視行動をモデル化するに当たって、(1) ユーザは対象の持つ全ての属性に同時に着目していない、(2) ユーザの注視行動は、コンテンツ内に配置されている対象の配置による影響も受けて振舞う、という 2 つの課題に特に取り組んだ。まず (1) については、ユーザが「いつ」「どの属性に」着目して比較行動を行っているかを注視行動から検出する手法を提案した (図 1 (c))。この手法を適用することで、ユーザの比較行動の背後にあるアスペクトを獲得し、選択興味を適切に推定できることを示した。次に (2) については、ユーザの注視行動モデルを内的要因と外的要因の混合モデルとして拡張することによって (図 1 (d))、外的要因を切り分けてユーザの選択興味 (内的要因) が推定できることを示した。最後に、提案したアスペクトおよび選択興味推定法を実際に対話的支援に適用した際の有効性を報告した。

(a) ユーザの内的状態表現



(b) ユーザの注視行動モデルに基づくアスペクトの学習・選択興味推定



(c) 着目属性値検出



(d) 外的要因を考慮した注視行動モデル

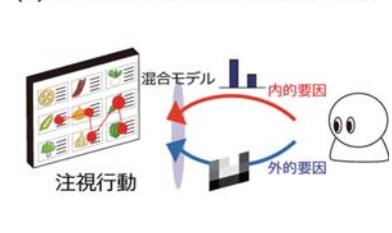


図 1 提案する注視行動および選択興味モデル化算結果

Ilmiawan Shubhi (原田博司教授)

[Performance Enhancement of MIMO Transmission Techniques with Limited Number of Receive Antennas]

(受信アンテナ数制約下での MIMO 伝送技術の特性改善)

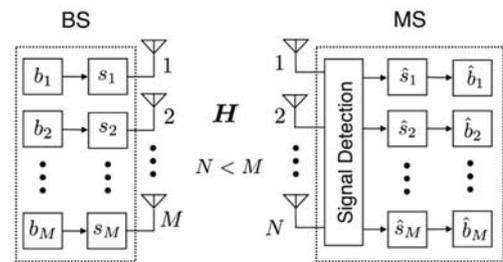
平成 29 年 9 月 25 日授与

In recent years, multiple-input multiple-output (MIMO) transmission has been considered as one of the key solutions in fulfilling the drastic data rates increase in wireless communications. Using MIMO, the capacity of radio link can be significantly increased by exploiting multipath propagation using multiple transmit and receive antennas. The benefits of MIMO transmission, however, might be restricted due to the physical constraint which limits the number of antennas that can be embedded on a user terminal. Considering this limitation, three approaches can be taken, and are investigated throughout this thesis.

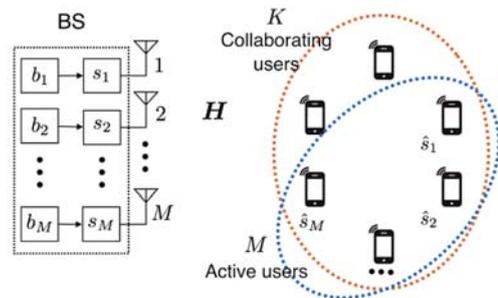
First, the user can be forced to handle multiple transmit antennas transmission although the number of receive antennas is smaller than that of transmit antennas. In this scenario, however, the performance of the detection and decoding processes degrade significantly. To tackle this issue, a novel decoding technique is proposed in Chapter 2 of this thesis. In the proposed technique, rather than conducted separately, the decoding process is conducted jointly between streams. Using the proposed technique, the bit error rate (BER) performance and the throughput of the system can be significantly increased.

Second, multi-user (MU) MIMO with collaborative interference cancellation (CIC) can be used. In this approach, neighboring user terminals share their received signals to improve their detection capabilities. The signal exchanges between users, however, are resource consuming. Therefore, a user selection technique is considered in this thesis to reduce the number of signal exchanges. Specifically, a user selection technique suitable for the QR decomposition-based maximum-likelihood detection with M-algorithm (QRM-MLD) is proposed. In addition, field experiments are also conducted to verify the effectiveness of MU-MIMO with CIC. Both of the user selection techniques for QRM-MLD and the field experiment results of the MU-MIMO with CIC are discussed in Chapter 3.

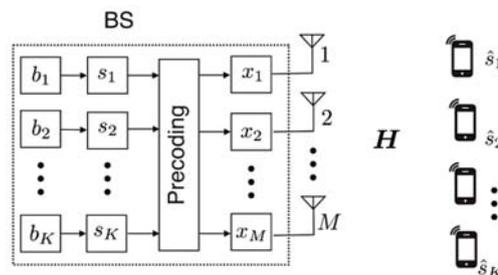
Third, a scenario when the MU-MIMO employs precoding for interference cancellation is considered. In this scenario, the inaccuracy of channel state information (CSI) caused by the channel aging, causes the signal to be phase-shifted and interuser interference occurs. To tackle this issue, a novel power allocation technique which could minimize the total interference of all users is proposed in Chapter 4. Specifically, the larger power will be allocated to the users experiencing larger Doppler spread, while the smaller power will be allocated to the users experiencing smaller Doppler spread. Using the proposed technique, the BER performance of users experiencing large Doppler spread can be improved while maintaining the BER performance of user experiencing small Doppler spread. In summary, each approach which is taken to tackle the issue of limited number of receive antennas in MIMO systems has its own challenge. However, as presented in this thesis, those challenges can be overcome, e.g. by using the proposed techniques. MIMO transmission, therefore, still become one of the most prominent techniques for the future wireless communication systems.



(a) Overloaded MIMO



(b) MU-MIMO with CIC



(c) MU-MIMO with precoding.

Fig. 1. Three approaches of MIMO techniques under limited number of receive antennas.

藤原 純（原田博司教授）

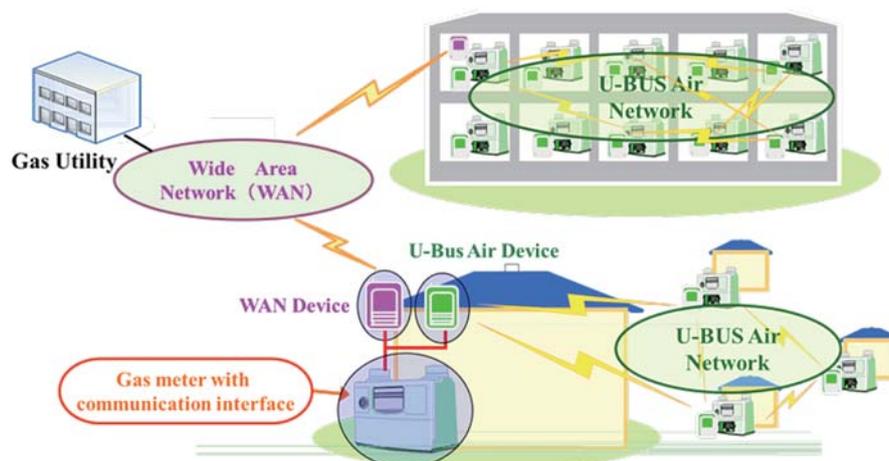
「ガススマートメーター用低消費電力通信プロトコルに関する研究」

平成 29 年 9 月 25 日授与

本論文では、ガススマートメーターの Wi-SUN (Wireless Smart Utility Networks) 化による本格普及を目的とし、10 年以上電池駆動が可能な低消費電力性とアドホック性を両立できるマルチホップ無線ネットワークプロトコルを実現するために、IEEE802.15.4e で標準化を行ってきた RIT (Receiver Initiated Transmission) 方式と呼ばれる MAC (Media Access and Control) プロトコルをベースにした新しい MAC プロトコルである F-RIT (Feathery- Receiver Initiated Transmission) プロトコルを提案している。F-RIT プロトコルは RIT プロトコルの低消費電力性能、耐干渉性能を改善し、各種機器への実装を考慮した MAC プロトコルである。本論文において、理論解析、計算機シミュレーション、実装評価を行う事により、F-RIT プロトコルが、ガススマートメーター用に標準化されたネットワークプロトコル (U-Bus Air) に必要とされる MAC プロトコルの要求性能を具備することを明らかにした。得られた成果を以下に示す。

1. IEEE 802.15.4e では Coordinated Sampled Listening (CSL) プロトコルおよび RIT プロトコルの 2 つの低消費電力 MAC プロトコルが規格化されているが、それぞれの特徴を定性的に類型化し、ネットワークを構築した場合におけるアドホック性および電波利用効率の両立性を比較することにより RIT プロトコルのガススマートメーターの Wi-SUN 化における好適性を示した。
2. RIT および CSL プロトコルについて理論解析と計算機シミュレーションによる伝送特性評価を行い、ガススマートメーターを Wi-SUN 化する場合に、RIT プロトコルが優位になる使用条件を定量的に導出した。
3. RIT プロトコルに改良を図り、より低消費電力性能、耐干渉性能を向上した F-RIT プロトコルを創案し、理論解析および計算機シミュレーションによる伝送特性および消費電力特性の評価を行い、ガススマートメーターに具備すべき実使用環境での要求仕様を満たすことが可能であることを定量的に示した。
4. これらの結果を基に、汎用の Wi-SUN ハードウェアモジュールに実装可能な F-RIT プロトコルを詳細設計し、市場流通している Wi-SUN モジュールに F-RIT プロトコルを実装、評価することにより、スマートメーターで必要とされる伝送性能および低消費電力性能が達成できることを実証した。

上記の成果により、U-Bus Air を商用化するにあたり、IEEE で国際標準化された低廉で調達が容易な汎用無線モジュールの利用が可能となり、ガススマートメーターの Wi-SUN 化が促進されることが期待される。本論文で示された成果は、今後のガススマートメーターの本格普及への寄与という本研究目的を達成した。



図：ガススマートメーターのネットワーク構成

芝原光樹 (守倉正博教授)

「Advanced Signal Processing for Fiber-Optic Communication Systems Scaling Capacity Beyond 100 Tb/s」

(光ファイバ通信システムの 100Tb/s 容量限界の克服に向けた信号処理技術)

平成 29 年 9 月 25 日授与

ICT は現在の情報社会を根幹から支える基盤となっており、光ファイバ通信システムはそれに伴う莫大なトラヒック需要に応えるものとして目覚ましい発展を遂げてきた。今後も継続して見込まれるトラヒック需要の増加に応える為に通信容量の更なる拡大は喫緊の課題であり、革新的な次世代大容量光ファイバ通信システムの研究開発の重要性が益々高まっている。本論文では、ファイバあたりの通信容量を 100 Tb/s 以上へスケールする次世代大容量光ファイバ通信システムの実現を目指し、光信号伝送およびシステムにおける複数の革新的技術の提案、数値計算、実証実験を通じた検討を行った。本研究で得られた成果は以下の通りである。

1. 光通信システムで確率的に振る舞いシステム設計を複雑化させる偏波依存損失に対し、偏波依存損失が示す波長間の周波数独立性を利用する波長インターリーブ伝送を提案した。提案方式によりシステム不稼働確率の低減効果が得られることを、伝送実験の結果および極値統計の手法を用いることで実証した。
2. ポスト 100G の信号構成として検討されている複数サブキャリアから構成されるスーパーチャネル伝送方式に対し、構成サブキャリアの品質を平準化する信号処理方式を提案した。数値計算により、提案方式が多重的な帯域狭窄化による信号の品質影響の低減効果をもたらすことを実証した。
3. 線形光学効果起因の信号歪の補償を目的とし、光デバイスと信号処理の両輪のアプローチから検討した。まず、分散補償系光通信システムを想定し、相互位相変調抑圧器とデジタル後方伝搬法 (DBP) との連携効果を評価した。次に、相互位相変調の効果から生じる偏波間クロストークについて、独立成分分析に基づくクロストーク除去アルゴリズムを提案した。数値計算により、提案アルゴリズムが従来法を上回るパフォーマンスを示すこと、および提案アルゴリズムと DBP の併用時の連携効果を示した。
4. 周波数利用効率 (SE) の向上を目的とした光信号キャリアを高密度多重するスーパーナイキスト伝送方式において、光信号キャリアの周波数重畳によって生じるキャリア間クロストークを、レプリカ信号の生成と線形フィルタ処理により繰り返し除去する方式を提案した。さらに、誤り訂正符号との組み合わせにより、キャリア間間隔を圧縮し SE 向上が達成できることを、実験結果を用いて実証した。
5. 伝送媒体を既存のシングルモードファイバから空間多重 (SDM) ファイバへ代えた SDM 光ファイバ通信システムについて 3 つの新規信号処理方式の検討を行った。まず、並列 Multiple-input multiple-output (MIMO) 周波数領域等化方式が、モード分散に対する信号処理量を大幅に低減することを示した。さらに、本方式を用いた世界初の 527km に渡る 36 高密度 SDM 伝送の実験実証を行った。次に、モード依存損失の影響低減を目的とした、モード間での信号品質平準化を可能にする MIMO 信号処理方式を提案し、実験実証を行った。最後に、モード依存損失に起因するモード間クロストークに対し、非レプリカ生成型逐次干渉キャンセラを提案した。本方式が干渉キャンセルの為にチャンネル推定や逆行列演算が不要という特長を持つことを示し、モード多重伝送実験の結果を用いて本方式の有効性を実証した。

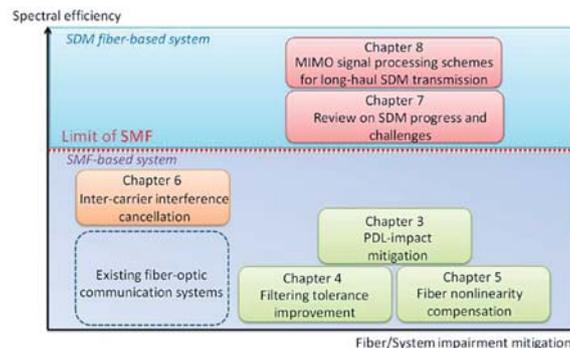


図 1. 本論文における章構成と検討の方向性

高校生のページ

熱から生じる光を自在に操る

工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 光量子電子工学分野
浅野 卓、井上 卓也、メーナカ デゾイサ、野田 進

はじめに

みなさんも物体を高温に加熱すると、そこから光が発生することを知っていると思います。太陽光、白熱電球の光、加熱された炭が赤く光る現象など、日常的に目にしたり、利用したりしていますね。これを熱輻射といいます。そもそも温度が高い状態というのは、ご存じのように、分子や原子、電子などの物質を構成する粒子が激しく無秩序に運動している状態のことを指します。そのため、触ると粒子の無秩序運動のエネルギーが伝わってやけどをしたりするわけですが、運動しているものが電子などのように電荷をもっている場合はさらに興味深いことが起こります。それは電荷をもった粒子（荷電粒子）が加減速運動をすると、そこから電磁波（光）が生じることです。これはコイルに交流電流を流すと電磁波が発生する現象から考えてもらうとわかりやすいです。コイルなどで、交流電流を流すと磁場が変化しますが、磁場が変化すると電場の変化が生じ、それらの一部が互いに影響し合いながら空間を伝わっていく、すなわち電磁波が発生します。そして荷電粒子の流れが電流ですので、これが加減速運動すると同じように交流電流が流れ、電磁波が発生することになります。ここで、高温物質中の電子は無秩序に動いていますので、速度が素早く変化するときもあればゆっくり変化するときもあり、その結果、様々な周波数の電磁波を放出します（図1）。ただ、基本的には温度が高い方が、素早く動く電子の割合が大きく、その結果、高い周波数、すなわち波長の短い電磁波が放出されます。このため6000℃程度と高い温度の太陽からは可視光線が多く放出され、もっと温度の低い物体、たとえばサウナのヒーターなどからは可視光線ではなくて目に見えない遠赤外線が多く放出されます。そして、どんな物質でも電子などの荷電粒子を含んでいますので、基本的にはどんな物質でも加熱すれば電磁波を発生するようになります。これが熱輻射現象です。

熱輻射現象では様々な波長の光や電磁波が発生しますが、たとえば地球上の生命は太陽からやって来るそのような光の一部を使って、ものを見分けたり、光合成したりしています。また太陽電池では太陽光を電気エネルギーに変換していますが、効率よく変換が出来るのは実はその一部の波長成分だけです。白熱球は照明に使われていますが、目に見えない赤外線も放出しています。赤外線領域でも、熱輻射光源は二酸化炭素や窒素酸化物等々の化学物質を検出するための光源として用いられていますが、検出し

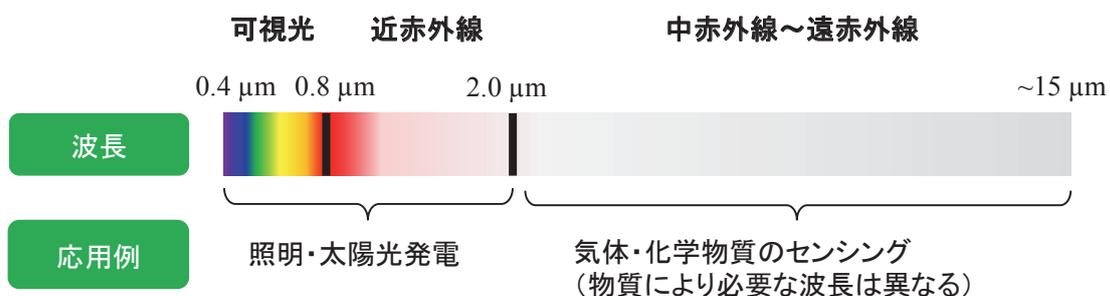


図1 熱輻射に含まれる各波長の光の応用例

たい物質に吸収されない波長の光も沢山発生させてしまいます。つまり、一般的な物質から生じる熱輻射は、強弱はあるものの、あらゆる波長の光を同時に放射してしまうため、特定の波長の光のみが必要とされる状況では、エネルギーの無駄が大きいということです。そこで私たちの研究室では、望む波長の熱輻射を、望むタイミングで、高効率に生成する手法や、すでに発生した熱輻射を望む波長に変換する手法などを確立して、応用へと展開することを目指して研究を進めています。このようなことができれば、例えば効率の良い太陽光発電や、超低消費電力な二酸化炭素センサーや排気ガスセンサー、効率が良い照明など、様々な画期的な機器やシステムが実現できるようになります。

熱輻射の起源となる電子と光の相互作用を制御する

先ほど説明したように、熱輻射の起源は高温の物体の中で動く電子などの荷電粒子です。基本的にはその動きが無秩序であるために、様々な周波数の電磁波が放射されるわけですので、熱輻射が特定の周波数付近でのみ生じるようにするには、荷電粒子の熱運動を制御する必要があります。そのような制御を行うために、私たちが注目したのは共鳴現象です。ここで、リコーダーのような笛を想像してみてください。その管の中では、特定の周波数において音の定在波が生じる、すなわち共鳴現象が生じます。これを利用すると、空気の流れから発生した様々な周波数を含む音の中から、特定の周波数の音を増強し、かつその他の周波数の音を抑制して、目的の音色を出すことが出来ます。実は電子もミクロなレベルでは波の性質を持っていますので、ナノメートルスケールの管や板や箱のようなものをうまく作ると、電子の動きが特定の周波数に共鳴するようにすることができます。これによって、元々はまったく無秩序な熱運動だったものを、特定の周波数の成分が多く、他の周波数の成分が小さいものに制御することが出来ました。さらに、私たちは光の共鳴も利用することにしました。光は波ですので、その波長の寸法、すなわちマイクロメートルスケールの管や板や箱のようなものを作れば、特定の周波数の光が共鳴する構造体を実現できます。ここでナノメートルスケールの電子共鳴構造と、マイクロメートルスケールの光共鳴構造の両者の共鳴周波数を一致させておくと、電子が特定の周波数を中心に熱運動し、そこから出た光が光共鳴構造に共鳴し、その光が今度は電子に吸収され、また電子が光を放出し、といった相互作用が繰り返され、最終的にはこの共鳴周波数を中心に光が放出されます。その結果、電子は熱エネルギーを失って若干温度が下がりますが、周りには熱運動している原子（上記の構造体を形成している物質の原子）が沢山いますので、その原子と衝突し合ってまた熱エネルギーをもらいます。また原子には熱伝導等で外から熱エネルギーを与えることが出来ます。その結果、この構造体では、外から（無秩序な）熱エネルギーを供給すれば、特定の周波数（構造体の共鳴周波数）付近の光に変換されて出てくるといふ作用が生じると期待できます。

上記のような作用を実証した例を図2に示します。ここでポイントとなるのが、ヒ化ガリウム、窒化ガリウムなどの半導体でできた電子の波のスケール(ナノメートルスケール)の層状の電子共鳴構造(これを「量子井戸」と呼びます)と、それを光の波のスケール(マイクロメートルスケール)に加工して作製される光の共鳴構造(これを「フォトニッ

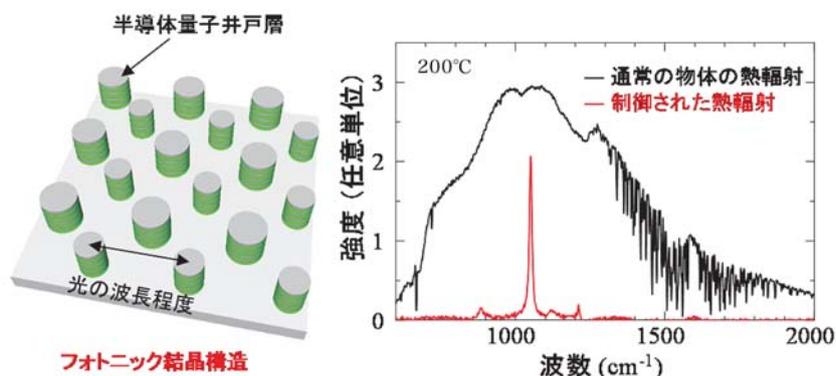


図2 半導体フォトニック結晶を用いた熱輻射光源の模式図(左)と実現した狭帯域な熱輻射スペクトルの例(右)

ク結晶」と呼びます)が複合した電子・光同時共鳴構造体(図2左)です。図2の右を見て頂くと分かるように、赤線で表されたこの構造体からの熱輻射が、通常の物体からの熱輻射と比較して非常に狭い帯域だけで生じています。測定はどちらの物体も200℃に加熱した状態で行っています。しかし主要な熱輻射が生じている帯域の幅を比べると、赤線のは黒線のもの1/100以下です。ピーク強度は赤線の方が若干低いですが、それほど変わりません。ここで温度を一定に保つには、光を放射した分だけエネルギーを外部から投入しないといけないことに注意すると、この結果から、赤線の熱輻射を示す物体は、黒線のそれと比較して1/100程度のエネルギー消費でこの波形の熱輻射を発生できるということが言えます。実際には、熱伝導等のエネルギー損失もあり、これらは両者で同程度ですので、今回の実験では、前者のエネルギー消費は後者の1/13程度でした。いずれにせよ、赤線の波形が最大となっている波長の光しか使わない応用では、この電子と光の共鳴構造を用いれば通常の物体と比較して大幅に少ないエネルギーで、同程度の強度の光を発生できるということが実証されました。このような発光体は、特定の波長の赤外線を吸収するガスの濃度をその光吸収損失から計測するセンサーの低消費電力化などへの応用が期待されます。例えば排気ガスに含まれる有害物質や大気中の二酸化炭素濃度の計測などです。

「熱輻射の応答は遅い」という常識を覆す

さらに研究を進めていくうちに、最近、新たな熱輻射制御の可能性も見えてきました。それは、「熱輻射を高速に制御する」というものです。一般に、高温物体の熱輻射強度は、その物体の温度で決まるため、熱輻射のオン・オフを行うためには物体を加熱・冷却するの必要があり、その応答速度は極めて遅いというのが常識的な理解でした。しかし、私たちは上で述べた研究を進めてゆくうちに、この共鳴構造に電子を出し入れすることができれば、それだけで熱輻射をオン・オフできるのではないかという発想を得ました。物質中の電子は電圧を加えて動かすことができますので、ナノメートルスケールの構造から電子を引っ張り出したり、また戻したりすることは可能です。これができれば、構造体の温度(=構成原子の熱運動)は変わらなくても、光発生の大本である電子の共鳴状態がオン・オフされるわけですから、熱輻射の強度もそれに従うと予想されます。実際に、上で述べた「量子井戸」の中の電子の密度を、外部から加える電圧によって変化させることのできる光源を作製したところ、光源の温度は一定であるにも関わらず、電圧に応じてその熱輻射強度が通常の熱輻射光源よりも4桁程度速く変化する様子が確認されました(図3)。また異なる波長の熱輻射を発生する構造を複数個用意して、これらを電氣的に制御することで、波長を高速に切り替えることのできる光源の実証にも成功しています。こうした熱輻射の高速な

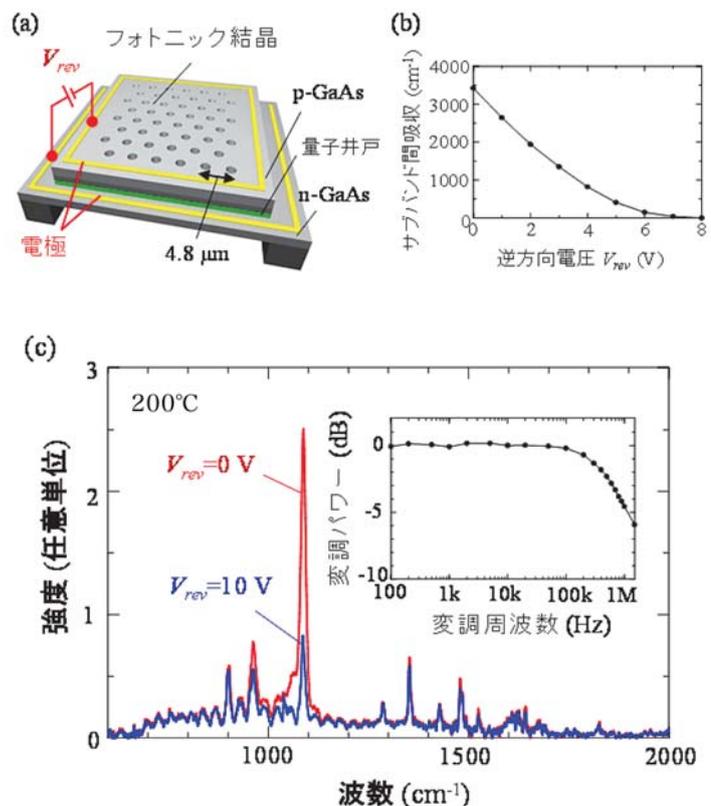


図3：熱輻射強度の電気制御

制御は、上で述べたようなガスセンシング装置の小型軽量化において非常に重要です。また、従来観測できなかった新しい高温物理現象の発見につながる可能性もあり、大変興味深いと考えています。

熱輻射制御の発電応用

太陽電池が効率よく電気に変換できるのは赤色のすぐ外側にある目には見えない近赤外線の光です。太陽からは大量の可視光線や熱（赤外線）がやってきますが、そのままでは発電効率が低くなってしまいます。ただしこれらの光も、物体に吸収させれば熱エネルギーに戻すことができますので、その熱エネルギーから新たに太陽電池に適した波長に制御された熱輻射を発生させれば、これは太陽電池で効率よく電気に変換できる光になります。

このような用途ではガスセンサーなどと比較して波長の短い光が必要になり、それに応じてより高温で動作する熱輻射光源が必要になります。様々な計算を行うと 1000℃ 以上の高温動作が可能なが望ましいと分かり、私たちはそのような条件を満たすべく図 4 に示すような、半導体材料であるシリコンを半径 100 ナノメートルの円柱を並べたような構造を設計・作製し、熱エネルギーを太陽電池が発電しやすい可視光線と近赤外線の境界付近の光に変換して放射させることに成功しました。

この技術によって、太陽の光だけでなく色々な熱エネルギーも太陽電池で効率よく使えるようになります。実用化すれば、太陽電池のエネルギー変換効率を現在の 2 倍の 40% 以上にまで高めることが期待できます。また、太陽の熱だけでなく、工場の排熱などあらゆる熱を光に変換すれば、エネルギーの有効利用が進みます。

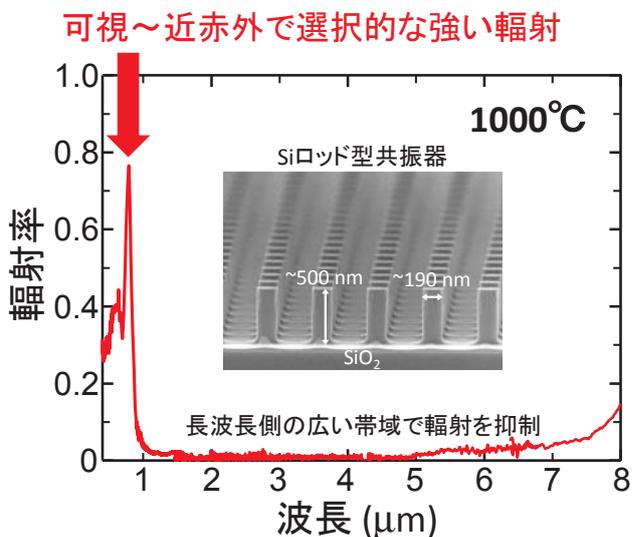


図 4：熱光発電用熱輻射光源

最後に

これまでの私たちの研究を通して、「エネルギーの無駄が大きく、応答速度も極めて遅い」と一般に考えられてきた高温物体の熱輻射が、特定の波長に集約可能で、高速な制御も行うことができる奥の深い発光現象であることが明らかになってきました。今後は、こうした熱輻射が有する面白い可能性をさらに探求するために、新しい半導体材料や微細光学構造の設計・作製を行い、可視光から赤外線までの任意の波長において、自在な熱輻射の制御を実現していきたいと考えています。最終的には、特定の波長に集中した熱輻射を利用して、太陽電池のエネルギー変換効率の大幅な向上や、環境や医療用センサーシステムの小型化・低消費電力化を実現し、持続可能な社会の構築に貢献できればと考えています。

学生の声**博士課程進学を振り返って**

工学研究科 電気工学専攻 引原研究室 博士後期課程1年 持山志宇

4年生の春、博士前後期連携プログラムによる進学を選択してから、3年半が経ちました。実はほとんど思いつきの決断で、今考えれば無謀だったとも思えます。しかし、少なくとも私にとっては、自分の苦手なことに早くから挑戦するきっかけになったという意味で良い決定であったと思います。

早くに進学意思を固めたこともあり、修士1年生のころ、国際会議での研究発表と、電気系専攻の支援による欧州の複数大学への短期滞在という機会をいただきました。もともと、人前で何かを発表する、さらには英語という慣れない言語でコミュニケーションをとるということは決して得意な方ではなく、正直なところためらう気持ちもありました。しかし、「もう進学を決めてしまったし、将来のことを考えると苦手だからと避けていても仕方ない」と（半ば諦めて?）、頂ける機会はなんでも利用することにしました。ある意味消極的な理由ですが、そのおかげで、せっかくの機会を逃さずに済んだと今は思います。結果として、一度無理矢理にでもやってしまえば心のバリアがとれるのか、今では以前ほどの苦手意識は無くなり、海外出張もそれなりに楽しめるようになりました。

自分のやりたいことを自由にやれるというのも、学生の間のできる貴重な体験です。しかし一方で、あえて自分に負荷をかけて伸ばしていくという視点も、ときには必要です。私の場合、それを研究生生活の早い段階から経験できたことはとても良かったと思います。そのきっかけを与えて下さった電気関係教室の皆様感謝し、今後も研究に励んでいきたいと思っています。

一人黙々と研究する印象でしたが...

工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程1年 吉田昌宏

博士課程というと、研究室に閉じこもり、一人で黙々と研究するものという印象があった。企業からは視野が狭い・専門分野に固執する・コミュニケーション能力が低いなどと敬遠されるといった話を聞くことから、世間からも似たような印象を持たれているのかもしれない。しかしながら、進学して一年ほど経った今、当初抱いていたイメージとは少し異なった過ごし方をしている気がする。研究の進め方についていえば、どちらかというと教員や研究員、後輩の皆でチームとして行っている。課題に対して皆が一丸となり知恵を絞って考え、時間をかけて真剣に議論・対話をする。情熱を傾けることができ、そしてそれに真摯に向き合ってくれる人が周りにいる環境は非常に貴重であるし、そういった場に身を置けることをうれしく思う。また、企業も交えたプロジェクトが進行している影響でもあるが、大学の基礎研究としてはテンポが速いように思う。これについては博士課程の教育として賛否両論あるかもしれないが、ある意味エキサイティングであり、こういったフェーズの研究もおもしろいと感じている。一方で、立ち止まってじっくりと思案する、あるいは目先の目的以外のことをゆっくり考える時間も大切であり、自分の中の時間の流れとも折り合いをつけつつ過ごしていきたい。

今のところ博士課程に対する一般的なネガティブな見方からすれば、個人的には随分と充実した日々を過ごしているつもりである。残りの時間で一転して後悔する事の無いよう、また今後のキャリア形成においてこの時間が足枷とならないよう、博士課程という特別な時間を楽しみつつもより一層の自己研鑽に努めたい。

教室通信

学生の就職活動について

通信情報システム専攻 佐藤 高史

今年度、電気電子工学科と情報学研究科通信情報システム専攻の就職担当教員を仰せつかりました。電気系教室の諸先輩方には、リクルータ、人事担当者、または現場での受け入れに関わる担当者等として、就職を希望する学生への暖かいご指導、ご支援をいただきました。この場をお借りして深く御礼を申し上げます。

学生の就職活動については、ここ7~8年の比較的短期間に、活動時期や進め方が何度も変更されてきています。その影響や電気系教室全体としての対応についてはCUE第33号、35号の本欄でも和田教授、竹内教授よりご報告があったとおりです。その後も、平成28年度卒業・修了予定者から、「大学、短期大学、及び高等専門学校卒業・修了予定者に係る就職について（申し合せ）」にて通知された通りの変更がありました。すなわち、企業個別の広報活動は3月1日に開始、採用選考開始時期がその前年度から2ヶ月早まって6月1日の開始となりました。平成29年度も同様の申し合せが出され、今年度はこれに沿った就職活動となりました。平成28年度からの変更により、広報活動開始から採用選考までの期間の大部分が授業開講期間と重なっています。また、学生が企業訪問等を行う期間が短縮されています。このため各企業には、広報ならびに選考において教育研究に支障がないよう十分に配慮していただくこと、選考期間以前の採用選考を行わないことを申し入れており、結果として多くの企業にこれらを遵守いただいたものと認識しております。さらに、平成30年度卒業・修了予定者向けの上記申し合せでは、今年度の日程を維持する方針が示されています。同申し合せにおいてはまた、学生の学修環境の確保からは現行の日程が必ずしも最良とは言い切れないが、日程を維持定着させることで学生と大学が計画的に就職活動に対応できるようになることから以降は頻繁な日程変更を避ける旨の記載があります。当面は今年度と同様のスケジュールとなることが予想されますので、就職活動がより良く行える体制を作って行けそうです。

就職活動は、学生、大学、企業いずれにとっても大きなイベントであり、時にはそのマイナス点が強調されがちですが、学生にとっては貴重な成長の機会ともなっているものと思います。就職ガイダンスでは、本人の適性を踏まえつつ産官学の幅広い進路の選択肢を考慮するよう指導していますが、その直後に学生に就職を希望する企業を調査すると、回答は往々にして特定の狭い分野・企業に偏ります。その後学生は、洛友会が主催する「先輩と学生の交流会」や、情報学研究科が主催する「ICTイノベーション（産学官連携の促進を目的として開催されている交流イベントです）」等を通じた先輩方との交流に参加し、また企業研究や企業訪問を行うことで電気電子工学が関連する分野の広さに気づき、自らの進路を深く考え悩みながら、より様々な進路へ目を向けていくようです。さらに、学生と就職担当教員との面談や企業見学会等の個別の企業研究を通じて、就職を希望する企業を絞ります。少なくとも学生に話を聞く限りでは、就職活動においてこれら様々な機会に交流する先輩が果たす役割は相当に大きいようです。皆様には、機会あるごとに、良き先輩としてのアドバイスをお願いいたします。

グローバル化等により人材の流動化が進んでおり、今後も就職活動の形は緩やかに、時に急速に変化するものと考えられますが、卒業・修了後に大学を訪問いただくOB/OGの幅広い活躍の様子を聞くごとに、十分な基礎学力を習得しこれを高度な専門性や独創性に結び付けられる学生を育てることが電気系教室の変わらぬ役割と改めて感じます。今後も、電気系教室に対する一層のご支援をよろしくお願いいたします。

賛助会員の声

センサ社会の広がり、企業による貢献

ローム株式会社 センシングソリューション LSI 商品開発部 大地 宏明

1. はじめに

京都大学工学研究科電子物性工学専攻修士課程の卒業生の大地です。1996年に学部入学、2002年のローム株式会社就職を経て、人生の半分以上を京都で過ごしていることになります。今回この紙面をお借りし、会社の紹介、私が担当をしているセンサ市場の状況、そしてその市場に貢献するロームのMEMSセンサ製品について紹介させていただきます。少しでも興味を持っていただけると幸いです。

2. ローム株式会社について

ロームは創業60年、京都に本社を置く電子部品メーカーです。いわゆるB to B (Business to Business、個人消費者向けではなく企業向けの商売形態)のため関西圏外では無名に近いかもしれません。私が就職した際は親戚筋にも「外資？」と勘違いされましたが、れっきとした京都発祥の国内企業です。京都はご存知のように、同業の部品メーカーだけでもオムロン・村田製作所・京セラ・日本電産、消費者向け企業であれば任天堂・ワコー・佐川急便・MKタクシーなど独自性の強い企業が数多くあります。ロームの顧客は世界中の電気機器・自動車・産業機器のメーカーです。海外の顧客から見ると、いわゆる極東(ヨーロッパとアメリカを向かい合わせた世界地図をイメージしてください)の島国最古の都市にユニークな企業群が同居しているという事実は、非常にミステリアスなのではないかと感じています。私は関西圏外から京都大学に入学しましたが、就職活動ではじめてこれら京都の企業群が持つ魅力を知りました。この中で研究開発の幅広さと自由な社風を強く感じたロームを選び、現在に至ります。

3. 社会変化と企業の役割

一口に社会変化といったとき我々人間は何を思い浮かべるでしょう。歴史教科書や新聞のバックナンバーをめくれば出来事そのものを把握することができます。しかし世の中の変化とは出来事自体に加えて、その時々に出会った人間の心理変化がワンセットになってこそそのものです。

すでにその変化が既知のものとして、

- その利便性から「持ちたい」ではなく「持たなければならない」存在になったモバイル機器
- ハードそのものではなく「ハード+ソフト」という形がスタンダードになった端末機器

●持ち運ぶ「キャッシュ」からネットワーク管理する「電子マネー」へ急速に移行している金銭概念
最近では「車や家は所有でなく共有するもの」「音楽・映像は所有するものではなくストリーミングするもの」というアイデアも着実に広まりつつあります。これらの流れを感じ取りタイムリーに関連製品を世に送り出すことができた各企業がその時々で大きく成長してきました。ロームのセンサ製品で例を挙げれば、あらゆるソフトに適應できるゲームリモコンのモーションセンサ、携帯電話に組み込まれたカラーセンサ・気圧センサ、カード搭載できる極薄センサなどがそれに当たります。昨今はCSV(Create Shared Value=共有価値創造)と言ったりもしますが、ただ単にその企業が作れるものを世に出すのではなく、社会要請に沿った製品をタイムリーにリリースし生活の向上・発展に貢献していくことに企業

価値がある、という考え方が一般的になってきました。そして近年中に人口構造、環境変化といった今まで以上に大きな社会変化が確実に起こります。これらをただ重荷と考えず、それらの問題・課題を解決できる商品・サービスを提供し続けることにこそ企業の価値と成長の可能性にあります。

4. MEMS センサ

昨今、情報化社会から発展した IoT、IoE という言葉が世の中に広まってきました。これは単にスマホやウェアラブル機器が便利になるという動きではなく、人間の五感を世の中のあらゆる場所に配置し、全て情報を繋いでしまおうという試みです。よく実例に挙げられるのは自動車です。近年自動車には自動走行、安全制御、エンジン・タイヤコンディション監視などのセンサデバイスが組み込まれるのが当たり前になってきました。そこからさらに発展し、視野を広げて世の中の自動車の分布、行き先のマーケット予測、環境影響のモニタリングも可能となってきています。それらをビジネスに繋げた Uber 社の配車サービスや交通網最適化システムなどは世界中で既に生活に溶け込んでいます。このセンサデバイスを大量に普及することができた大きなきっかけのひとつが MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) 技術の確立です。MEMS 技術は数 mm サイズの LSI や受動素子生産で用いるウェハ加工プロセスを用い、ひとつの基盤上に微小な機械的デバイスを作りこむものです。近年は技術成熟も進み、小サイズ・低コスト・大量生産が可能になりました。その数量はトリリオン = 1 兆個の世界普及というキーワードが現実的になってきているほどです。ロームの MEMS 技術を用いた代表製品として加速度センサ、気圧センサ、磁気センサがあります。以下、その紹介をロームのウェブサイト掲載資料とともにさせていただきます。

加速度センサは重力やモーションによる微小な Si 櫛歯構造のゆがみを電気信号に変換するデバイスです。ローム子会社である Kionix 社の独自特許である、数ミクロン櫛歯構造の作成技術 (*) を用いて高感度・低ノイズを実現しており、かつ X/Y/Z の 3 軸計測が可能です。モバイル機器のモーション・姿勢検出、自動車の姿勢検出、PC や産業機器の振動検出など幅広い用途で使用されています。(* 映像資料：<http://www.kionix.com/kionix-making-mems-sensor-plasma-etch-process-0>)

MEMS センサの製造 - プラズマ エッチングのプロセス



気圧センサは気圧変化による Si 抵抗 (ピエゾ抵抗) のゆがみの変化を読み取るデバイスです。ローム製の気圧センサは 20cm の高度による気圧差 = 0.024hPa の精度での検出が可能なほどの低ノイズを実現しています。単に外気圧を測定するのみならず、室内の環境調整、装置・チャンバ内の状態監視、自然環境のモニタリングにも応用が可能です。

れらをくっつけ、使いこなし、世に広めることでのビジネスチャンスが乗数的に増えている時代ともいえます。それを今後の卒業生のみなさんと一緒に実現できることを楽しみにしています。

編集後記

cue39号をお届けします。私は最近編集委員に就任しましたが、同窓会誌である cue はこうやって編集されていくのか、と興味津津で参加しています。私は工学部の別の学科の出身ですが、cue ほど組織的に同窓会誌を発行する文化がなく、ちょっと羨ましく感じています。さて、昨今の日本の電機業界、さらに大学業界の視界は良好、不良、正に様々ですが、京都大学の責務としては、数年先程度の短期的視野に囚われた判断しかできない人材ではなく長期的視野にたった本質を見抜ける目を持った人材を産学双方に送り出せる教育を推進するしかないと感じます。卒業生の皆様におかれましてはより一層のご支援をお願いいたします。

最後になりますが、ご多忙のところ、ご執筆・ご寄稿いただきました皆様に篤く御礼申し上げます。

[M. S. 記]

協力支援企業

新日鐵住金株式会社
鉄道情報システム株式会社
株式会社 村田製作所
ローム株式会社
(アイウエオ順)

発行日：平成30年3月

編集：電気系教室 cue 編集委員会
大村 善治、白井 康之、白石 誠司、
石原 亨、古谷 栄光、村田 英一、
龍頭 啓充、荒木 光彦（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発行：京都大学電気関係教室
援助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会
電気教室百周年記念事業基金

製版：株式会社 田中プリント

