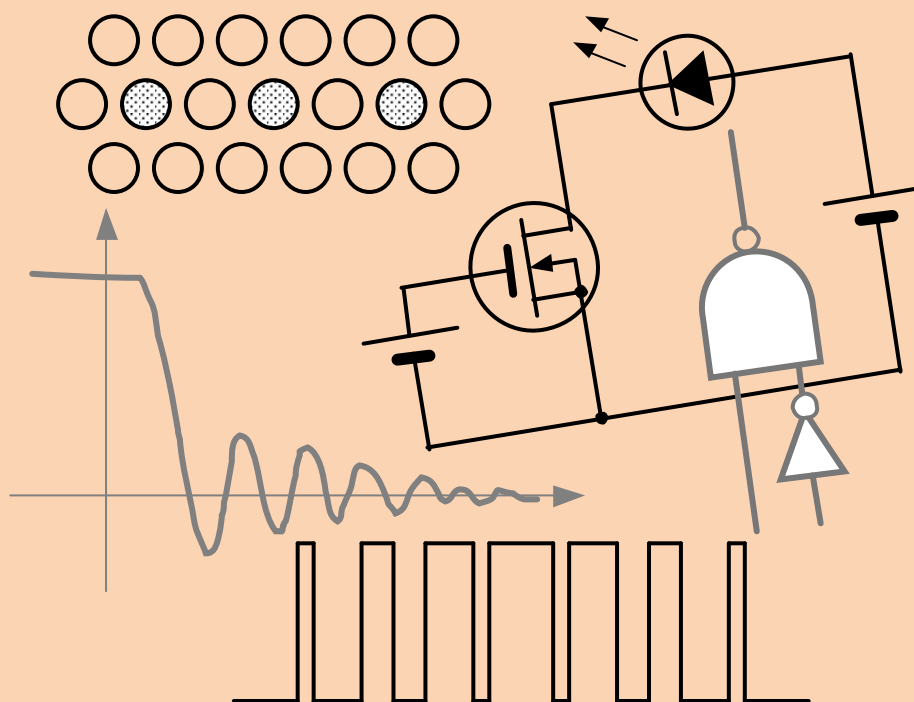


京都大学オープンキャンパス2026

工学部 電気電子工学科

研究室紹介

技術情報誌 cue 抜粋



ようこそ電気電子工学科へ

はじめに

電気電子工学は、現代のあらゆる産業や社会生活の基盤として、欠くことのできない科学技術となっています。ますます大規模になる集積回路技術、携帯電話やインターネットなどの高度な通信技術、ロボットや自動車などの人工知能や制御技術など、日常的に手に触れたり目にしたりするもので電気電子工学の恩恵にあずかっているものはありません。そのくせ、最近では電気電子工学科の人気の、一昔前とは違って、少し下降傾向にあります。我々教員は不思議に思っているのですが、多分、携帯電話やパソコン、簿型 TV などの多くの電子機器があまりにも完成していて、中身はわからなくても使えるし、日常的なものになってしまっているせいで、構造や仕組みに深い興味が湧いてこないのかも知れません。あるいは、電気や電子は直接目に見えないせいかも知れません。しかし電気電子工学が生み出す技術はますます進歩しているのです。

ますます進化するエレクトロニクス

電気電子工学科では、電子や光を利用した機能素子や装置(デバイス)に用いられる半導体や誘電体、磁性体、超伝導体などの電子材料に関する基礎科学や、イオンビームやプラズマを利用したナノテク技術による新しいデバイスの創成、それらを応用した計測・制御や医療・福祉関連技術とそれらに関するハードウェアとソフトウェアなどの最先端技術と、その基盤となっている基礎学理の教育研究を行っています。

人と地球に優しいエネルギー・環境関連技術

21 世紀では、化石資源に代わる新しいエネルギー源の開発が必要になってきます。プラズマ核融合もその一つとして期待されていますが、従来の火力や原子力に加えて、風力や太陽光を利用した小型の分散型発電設備の割合を増やしていく必要があります。そのために必要な電力制御デバイスや回路技術、送電や配電システムのシステム技術などが、環境問題とも関連して再び重要になってきています。これらの教育研究を第二の柱としています。

快適で安全な通信・情報システム

情報と通信の技術は現代の人間生活にとって空気や水と同等に必要な不可欠なものになってきています。コンピュータをベースとした通信網が整備され、高速化とともにセキュリティの確保が大きな課題になってきています。また、携帯電話での通信も、音声や文字だけでなく動画像や位置情報などの双方向通信へと高度化しています。今後、ますます多様化する情報・通信の新しい技術や安全性を確保する技術についても、その教育研究を本学科の第三の柱としています。

志望にあたって

本学科を志望するにあたって、皆さんはそれぞれに動機を考えておられることと思います。高性能な電気自動車を開発したい。ロボットをもっと人間に近づけるような技術に携わりたい。家電製品にもっとコンピュータ技術や通信機能を取り込みたい。薄型で大画面の3次元ディスプレイを作りたい。それらを可能にするための集積回路の設計がしたい。効率的な太陽光発電や蓄電の技術によって省エネを実現したい。医療や福祉に役立つようなエレクトロニクス技術を開発したい。宇宙通信や宇宙開発に関わる仕事がしたい。

はい、これらは全て電気電子工学科で研究教育されているテーマです。他にもまだまだ面白そうなテーマがありますが、全ては網羅できません。この小冊子を手がかりにして、関連のホームページを検索するなどして、各自のモチベーションと一致するかどうか探し当てて下さい。

我々の学科では、アドミッションポリシーとして、「自然現象や科学技術、その人間生活との関わりなどに対して広い関心と旺盛な探究心を持つとともに、電気電子工学関連の学術分野へ強い興味を有し、専門教育を受けるのに十分な基礎学力と論理的思考力を備えた創造性豊かな入学者」を求めています。上述のように、電気や電子は直接見えないので、多少敷居が高く見えるかも知れませんが、それを乗り越えて学問の内容がわかるようになってきたとき、また電気電子工学の知識でできることの広さや大きさがわかってきたときの喜びや楽しみは計り知れないものです。

どんな科目を勉強するのですか

入試に合格して入学できたとしたら、どんな科目を勉強するのか質問したい人も多いでしょう。具体的には、1, 2回生の時に、数学、物理学などの全学共通の基礎科目のほかに、電気電子回路、電磁気学、情報通信や計算機工学の基礎、プログラミング技術、物性物理・電子材料・デバイスの基礎などを学習し、また初歩的な電気電子工学実験を行って基礎学力を養います。3回生ではより進んだ電気電子工学実験を行うとともに各自の志望に応じた科目を自由に選択学習します。4回生では選択科目に加えて特別研究を行い、専門的・総合的能力を高めます。さらに、全学年を通して外国語や人文・社会科学等の教養科目を履修し、知識と思考の幅を広げます。

このように説明したら、ロボットやディスプレイなど実際の技術はいつ習うのかと不満に思う人がいるでしょう。それは卒業研究や大学院での研究活動を通して学ぶこともあるでしょうし、大学では基礎学力や研究開発能力を十分身につけて、社会に出てからより大きく実用的な研究開発として着手することが多いのです。

そこで、電気電子工学科では、まず基礎的な共通科目を学習した後、学生個々人がその志望に応じた多様な選択が行えるようにカリキュラムが作られています。これによって、電気電子工学に関連する科学技術分野を総合的に理解しうる基礎学力を養うとともに、興味のあるテーマについて深く学習することを可能とし、広い視野と創造的な専門能力を兼ね備えた人材を生み出すことを意図しているわけです。

最後になりましたが、できるだけ多くの受験生の皆さんのチャレンジを待っています。

工学研究科

電気電子デジタル理工学専攻※

デジタル・グリーン領域

先端電気システム論講座
時空間センシング分野
知的回路設計分野
物理情報融合工学分野
光機能デバイス工学分野
応用デジタル分野

電気・システム・生体工学領域

自動制御工学分野
システム創成論分野
超伝導工学分野
電磁エネルギー工学分野
優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座

光・電子・量子領域

極限電子機能工学分野
固体量子物性工学分野
光量子情報工学分野
半導体物性工学分野
電子材料物性工学分野
量子電磁工学分野

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

情報学研究科

知能情報学コース

知能メディア講座言語メディア分野
知能メディア講座コンピュータビジョン分野

通信情報システムコース

通信システム工学講座デジタル通信分野
通信システム工学講座知的通信網分野
集積システム工学講座情報回路アーキテクチャ分野
集積システム工学講座低電力集積回路デザイン分野
集積システム工学講座集積コンピューティング分野

システム科学コース

システム情報論講座論理生命学分野
システム情報論講座バイオサイバネティクス分野

エネルギー科学研究科

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

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

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
エネルギー材料学講座デバイスプロセス学分野

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野
エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野
エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野

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
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
生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野
生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野

※本年度から電気工学専攻と電子工学専攻が電気電子デジタル理工学専攻になりました。

も く じ

工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻

デジタル・グリーン領域

先端電気システム論講座【薄研】	5
生体機能工学分野【吉井研】	6
知的回路設計分野【久門研】	7
光量子電子工学分野【浅野研】	8
光材料物性工学分野【船戸研】	9
応用デジタル分野【蛭原研】	10

電気・システム・生体工学領域

自動制御工学分野【萩原研】	11
システム創成論分野【阪本研】	12
超伝導工学分野【雨宮研】	13
電磁エネルギー工学分野【松尾研】	14
宇宙電波工学分野【小嶋研】	15
マイクロ波エネルギー伝送分野【篠原研】	16
電波科学シミュレーション分野【海老原研】	17

光・電子・量子領域

集積機能工学講座【米澤研】	18
極微電子工学分野【白石研】	19
応用量子物性分野【竹内研】	20
半導体物性工学分野【木本研】	21
電子材料物性工学分野	22
量子電磁工学分野	23
ナノプロセス工学分野	24

情報学研究科

知能情報学コース

言語メディア分野	25
画像メディア分野【西野研】	26

通信情報システムコース

デジタル通信分野【原田研】	27
伝送メディア分野【林研】	28
知的通信網分野【大木研】	29
情報回路アーキテクチャ分野【佐藤研】	30
低電力集積回路デザイン分野【新津研】	31
集積コンピューティング分野【橋本研】	32
リモートセンシング工学分野【横山研】	33
地球大気計測分野【橋口研】	34

システム科学コース

論理生命学分野【石井研】	35
バイオサイバネティクス分野【野村研】	36

エネルギー科学研究科

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー情報学分野【下田研】	37
-----------------	----

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学分野	38
------------	----

エネルギー応用科学専攻

エネルギー応用基礎学分野【土井研】	39
プロセスエネルギー学分野【川山研】	40

工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻 電気情報システム論分野

薄 良彦, Tam Willy Nguyen, 持山 志宇

電気電子に関わるシステムの特性は、物理量の関係---例えば、電気電子回路では電圧と電流、微小デバイスでは電界と電荷、大きな力を得たいモータなどの機器では磁界と電流---で決まります。システムの設計において、その特性が線形であること---1つの物理量を変化させると他の物理量が比例して変化する---が理想的とされてきました。しかしながら、現実の電気的特性、磁気的特性、機械的・構造的な特性では、その比例関係が物理量の大きな変化に対して保たれない場合が多く見られます。そのような特性を**非線形**と呼びます。非線形な特性---非線形性---は、電気電子工学に限らず、工学、理学、社会科学の広い対象に見られるものであり、非線形性に由来する多様な物理現象は科学者・技術者を魅了してきました。

私たちの研究室では、非線形性に由来する多様な物理現象、非線形性を含む複雑システムを理解するための理論とその工学応用について取り組んでいます。これまでの理論は、現象やシステムを数式(微分方程式や差分方程式など)でモデル化した上で、そのモデルを数学的技法で分析するものでした。近年の計測技術や通信技術、シミュレーション技術の発展により、微小デバイスから広域電力ネットワークにわたる工学システム、人の行動に関わる社会システムなどの物理現象を多様なデータとして観測・収集できるようになってきました。このような多様なデータには、これまでの数式モデルでは十分に予測できない現象、あるいは理解できていない未知の現象が含まれています。このような多様なデータから、非線形性に由来する物理現象や複雑システムをどのように数学的に分析するのか？その分析に基づいて工学システムをどのように設計するのか？これらは、電気電子工学のみならず、工学、自然科学、社会科学における共通の課題です。私たちの研究室では、それを解決するための**非線形科学・データ科学の先端理論**と、その**エネルギー・モビリティ・ロボットへの応用**について研究を進めています。

1. **非線形科学・データ科学・情報科学**: 非線形科学とデータ科学をつなぐクーブマン作用素(非線形システムに対する線形作用素)の理論, 設計や動作の正しさを論理的に保証するソフトウェア工学と融合したシステム制御, 地球科学などの複雑現象を示す大規模時系列データを分析するための機械学習・データ同化アルゴリズム
2. **エネルギーシステム・モビリティ**: 電力ネットワークのデジタル技術, ディペンダブルなエネルギー制御システムの形式設計技術と航空機電動化への応用, 電気・水素・熱の traceable routing によるエネルギー管理技術, 電力パケットの伝送・ネットワーク化技術, シェアリングを核とした社会構築のためのモビリティ(交通)とエネルギーの連携管理技術, 次世代の二次電池である全固体電池のデバイス設計
3. **ロボット・制御応用**: 動的対象に対するドローンの自律的・接近制御, 空中ロボットを対象とした非線形システムに対するデータ駆動適応型モデル予測制御, 電力パケットによる環境適応型歩行制御, ベストエフォート型モータ駆動制御とその電気自動車への応用



研究室の HP 桂の庭の HP

工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻 時空間センシング分野

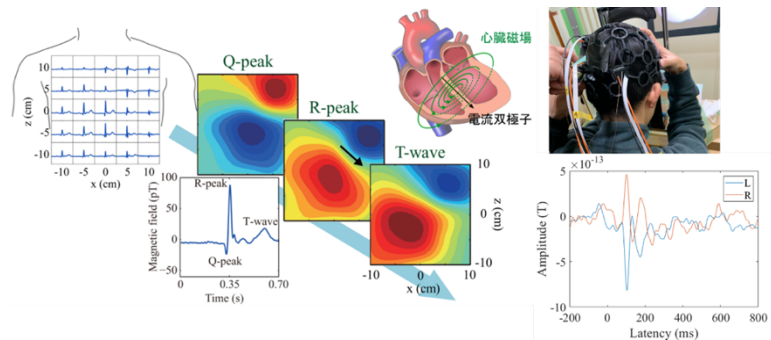
吉井 和佳 伊藤 陽介 上田 博之

<https://sts.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>

我々は、生体の理解を目的として、磁気センサによる信号計測（ハード）から計算機による信号解析（ソフト）まで包括的に研究しています。音響信号処理（例：音源分離・定位・識別）、映像信号処理（例：三次元形状推定・物体検出）、脳信号処理（例：脳活動計測・推定）、それらを統合した統計的マルチモーダル信号処理に取り組んでいます。これらを応用した人間拡張技術・インタフェースも開発しています。

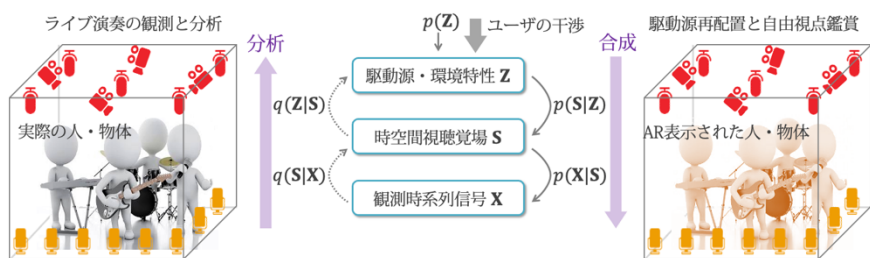
非侵襲生体磁気計測 —スーパーセンサーをつくる—

ユビキタス医療の実現に向けて、生体が発する微弱な磁気を計測するための光ポンピング磁気センサ (OPM) や機能的 MRI (fMRI) について研究しています。OPM は冷媒が不要な超高感度な磁気センサで、心磁界・脳磁界計測装置の小型化・低コスト化につながります。fMRI は脳活動を MR 画像の濃淡変化として描出する手法で、スピンロックシーケンスを用いて神経磁場を直接計測し、神経磁場の発生時期と位置を精度良く推定する技術を開発しています。また、物理方程式に基づく観測信号の生成過程を考慮した確率モデルを定式化し、直接観測できない信号源に対する統計的推論を行うことで、物理的な計測限界突破と高スループットを達成することに取り組んでいます。



時空間視聴覚場の分析合成系 —タイムマシンをつくる—

従来のビデオに代わる究極の視聴覚メディアとして、自らの耳や目を用いて過去を追体験・再体験可能なタイムマシンの研究を行っています。このシステムでは、拡張現実 (AR) スマートグラスを用いて、過去にその場に存在した人・物体の自由視点での鑑賞や、リアルタイムインタラクションを実現します。技術的には、人・物体などの複数の駆動源と、マイク・カメラアレイから得られる多チャネル観測信号を上下階層にもつ「視聴覚場」(時空間上の連続関数) の分析合成系を実現する必要があります。分析・合成を表裏一体のものとして扱う方法論について研究しています。



視聴覚環境理解支援 —パワースーツをつくる—

音声コミュニケーションにおける知覚・言語障壁を克服するため、AR グラスをプラットフォームとして、未知の雑音・残響環境下であっても低遅延かつ高精度に音声強調・認識を行う研究を行っています。このシステムは、大規模データで学習済みの汎用モデルを使い回すのではなく、ユーザの環境に自律的に適応させることで、「使うほど賢くなる」機能に特徴があります。視聴覚環境理解の点では、タイムマシンプロジェクトとは性質が異なり、装着型センサを用いてリアルタイム分析を行います。

知的回路設計分野

久門 尚史

1. 回路の役割

電磁気学や量子力学などで扱う物理現象は、集積回路や太陽電池など様々なデバイスを実現し、それらが回路としてシステム化され、社会を支える多様な機能が実現されています。例えば、世界中の情報をネットワークとして結ぶインターネットも、情報をのせた物理現象が宇宙空間も含めた地球をカバーする大規模な回路と考えられます。また、エネルギーについても、光・力学・化学エネルギーなどから電気エネルギーに変換され、ネットワークにより全国に運ばれ、家庭・工場や物流、情報処理などで機能を生み出します。このように、電気現象を様々な社会機能に結びつけるサイバーフィジカルシステムとして回路が用いられる中で、AI も含めた新たな回路設計技術を開拓しています。

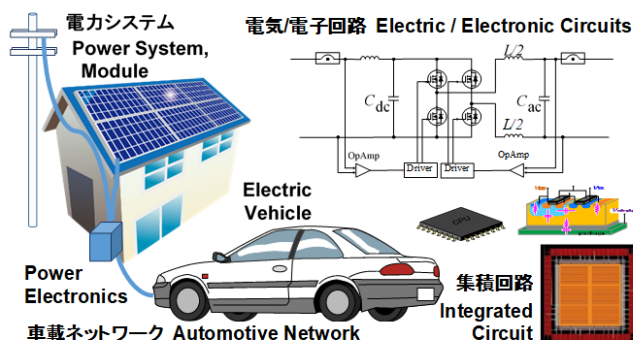


図1 デバイスからシステムまでの統合回路

2. 波としての回路設計

集積回路の動作周波数の高速化、5G/6G の通信の高速化、SiC や GaN などのデバイスの高速化など、情報化社会の進展や再生可能エネルギーの浸透にともなって、電気回路は日々高速化しています。回路は高速化すると、電磁波のような電気の波としての性質が表面化します。低い周波数では導線を用いて閉じた回路を構成すれば電流が流れ、電気回路が実現できますが、高い周波数では導体を波のガイド役として考える回路設計が必要になります。つまり、波を曲げたり止めたり、自由自在に操ることをイメージしながら回路設計を行うことがシステムの安定動作には不可欠になります。一方で、微細化により微小な導体構造を構成すると、自然界にはないような電磁現象もつくりだすことができ、メタマテリアルと呼ばれています。このような構造も新しい回路やアンテナの設計などに活用し、AI による新しいものの見方も取り入れながら、新たな波としての回路設計手法を開発しています。

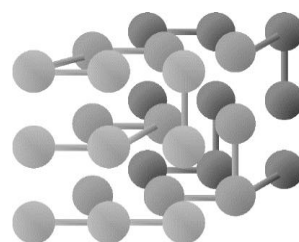


図2 メタマテリアル

3. 次世代高速大容量エネルギー伝送ネットワーク (P2P エネルギー伝送)

持続可能な社会を目指して再生可能エネルギーが浸透すると同時に、電気自動車やモバイル機器などのバッテリーも増えてきています。エネルギーの輸送は、従来は商用周波数(60/50Hz)によるものが支配的でしたが、高性能なスイッチングデバイスの進化とともに直流によるエネルギー伝送も広まり、電圧レベルも多様化しています。このような中、エネルギーの送り手と受け手がミリ秒オーダーで協調することにより、より高速で大容量のエネルギー伝送を実現する手法として P2P (Peer to Peer) エネルギー伝送を提案しています。これは、情報とエネルギーのネットワークを組み合わせ、膨大なセンシングデータに基づくデータ科学も活用しながら、エネルギーという物理量の流れを緻密かつ自由自在に操り、時間とともに進化するネットワークを実現する研究です。

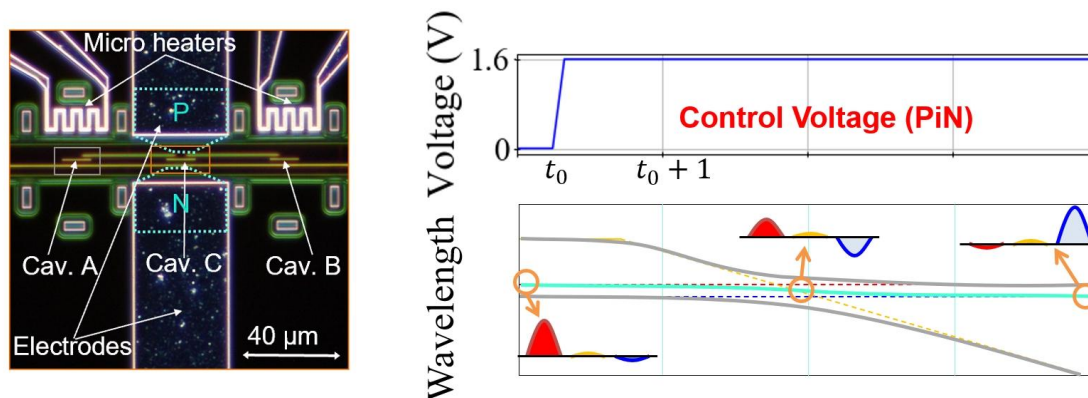
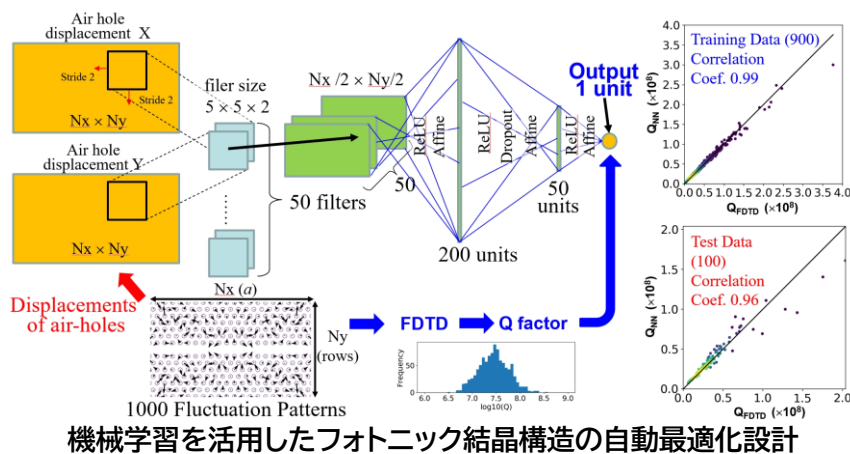


図3 P2P エネルギー伝送

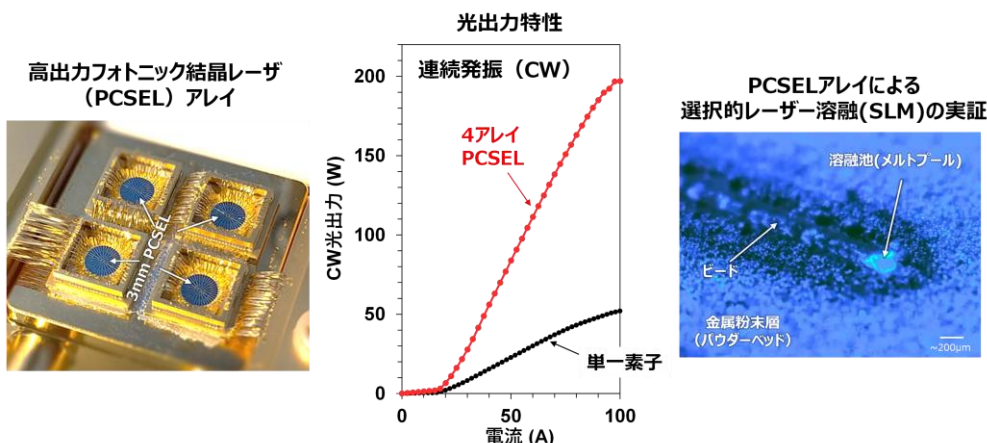
詳しくは研究室のホームページ (<https://cct.kuee.kyoto-u.ac.jp/>) をご覧下さい。

工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻
デジタル・グリーン理工学講座 物理情報融合工学分野
浅野卓、吉田昌宏

我々の研究室では、フォトニックナノ構造による古典および量子的な光の究極的制御・操作を追求しつつ、情報工学的アプローチと物理法則からのアプローチの融合による新たな領域の開拓を行っています。特に、極微細構造での新しい光・電子・量子現象の探索と、これらの現象をベースとした新しい量子機能デバイス、光電子機能デバイス実現を進めつつ、これらの目的達成のため、GPU を用いた計算機シミュレーションを始めとする理論研究から、実際の量子ナノ構造の成長、極微加工プロセスによる光ナノ構造の作製、物性評価、デバイス作製に至る総合的な過程を、機械学習等の情報工学的アプローチと融合させて発展させるべく研究を進めています。もっと詳しく知りたい方は、ホームページ (<https://physinf.kuee.kyoto-u.ac.jp/top>) を参考にしてください。



超低損失光共振器を用いた、光子をそのまま保持・転送できるバッファメモリー



1. 「光る半導体」でつくる未来

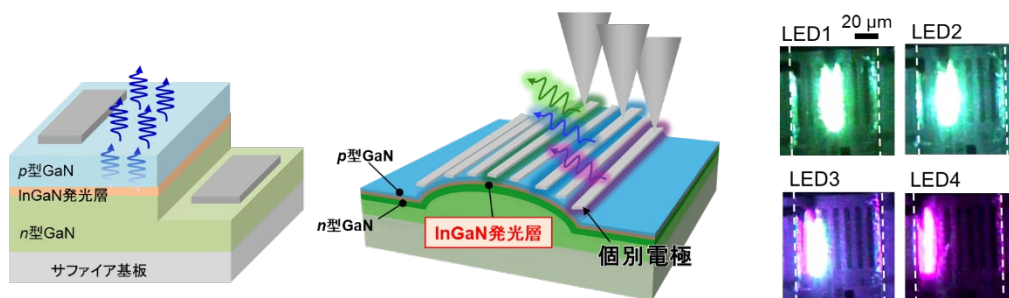
半導体と聞くと、スマートフォンやコンピュータに使われる材料を思い浮かべる人が多いかもしれませんが、半導体にはさまざまな種類があり、光を出す特性に優れたもの（直接遷移型と呼ばれるバンド構造をもつもの）もあります。この「光半導体」は、発光ダイオード(LED)やレーザーダイオード(LD)としてすでに実用化されており、照明や情報通信など、私たちの身の回りの様々な場面で活躍しています。しかしその一方で、光半導体の応用範囲はまだまだ広がる可能性があり、これからも私たちの生活や産業を大きく変えることができます。例えば、ウィルス対策や水の殺菌、工業用途において、紫外光を出力する高効率なLEDやLDの実現が期待されています。また、可視光においても、色を自在に変化させられるLEDによるスマート照明や、極小サイズのフルカラーLEDを高精度に並べることによる高精細LEDディスプレイなど、これまでにない光機能デバイスが求められています。こうした次世代の光デバイスの実現に向けて、私たちの研究室では以下の三つの柱を中心に研究を進めています。

- A) 光半導体の新規設計と、それを原子レベルから構築する技術（結晶成長）の開発
- B) 新しい光物性や光現象の発見とその解明
- C) ナノスケールの構造制御による新たな光機能の創出

これらのテーマを有機的に連携させながら、革新的な光デバイスの創出に挑んでいます。

2. 最近の成果

C)に関連して、最近の研究成果の一例を紹介します。みなさんが使っているLEDは、平らな基板の上に作られ、たいてい青や赤など1色だけの光を出します（下図左）。これは、発光の色が光半導体の性質（禁制帯幅）で決まるからです。これに対して私たちは、微細な三次元構造をもとにLEDをつくる（＝結晶成長する）と、禁制帯幅が場所によって変化し、非常に小さな領域にさまざまな色のLEDを同時に集積することに成功しました。下図中央はその一例で、レンズ状の断面を持つストライプ型マイクロ構造であり、従来の単色LEDを作るのと同じ一回の結晶成長だけで、紫から緑までの光が同時にだしています（下図右）。また、一つ一つのLEDは幅5 μm ・長さ50 μm の非常に小さなサイズで、面積換算でわずか16 μm^2 四方です。これは、スマートウォッチのような高精細ディスプレイの1ドット（画素）のサイズに相当します。極小サイズの多色LEDを高密度かつ一括で作製できる私たちの技術は、次世代の高精細ディスプレイ作製のための基盤技術になると信じています。



（左）従来の単色発光LED。（中央）微細な三次元構造を持つLEDと（右）実際に作ったLEDを光らせたときの顕微鏡写真。一つのストライプの中で場所によって光る色が変化する。

工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻 応用デジタル工学分野

蛸原 義雄

【テーマ 1】凸最適化手法を用いた制御系の解析・設計

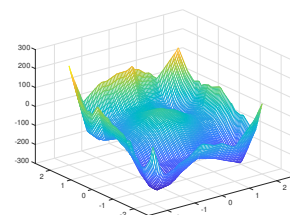
自動制御とは、対象とする機器の状態を所望のまま一定に保ったり、あるいは出力を所望の軌道に沿って時間的に変化させることを自動的に達成する技術です。通常は、フィードバック制御装置をうまく設計することで自動制御を実現します。何らかの手法で設計された制御装置がどの程度の制御性能を発揮するかを解析する問題、あるいは所望の制御性能を達成するような制御装置のパラメータを設計する問題は、数理計画問題（最適化問題）として記述されます。しかしながら制御系解析・設計問題の多くは数値計算による求解が困難な非凸最適化問題として定式化されることが知られています。本研究室では、制御系解析・設計においてあらわれるこれらの非凸最適化問題を、線形計画問題（Linear Programming Problem: LP）や半正定値計画問題（Semidefinite Programming Problem: SDP）などの数値計算による求解が容易な凸最適化問題に帰着させるための数学的な手法について研究を進めています。

【テーマ 2】再帰型ニューラルネットワークの安定性解析と最適設計

数理工学的手法を用いた再帰型ニューラルネットワーク（Recurrent Neural Network, RNN）の安定性解析に取り組んでいます。標準的な順伝搬型ネットワークと同様に、RNN は入力層、中間層、出力層で構成されます。順伝搬型ネットワークとの決定的な違いは、図に示すように RNN はフィードバック構造を有することです。この構造のおかげで RNN は過去の情報を記憶し、ダイナミカルシステムの振る舞いを模擬することが可能になります。しかしながらこのフィードバック構造は不安定化をもたらすため、RNN の安定性解析は AI や機械学習の分野で重要な研究課題になっています。本研究室では最新のシステム制御理論と最適化理論を基盤とし、RNN の安定性解析手法と最適設計手法の確立を目指しています。

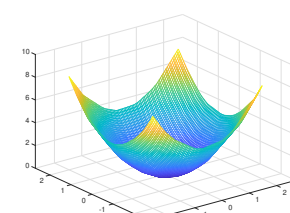
【テーマ 3】オフグリッドにおける発電・蓄電計画最適化

本研究では、山間部や離島などに存在する町や集落といった、電力供給を行う変電所から遠隔地に存在する小規模な需要家を対象に、配電線系統と切り離れたオフグリッドでの電力運用について検討を進めています。これらの地域、例えば山間部への電力供給に関しては、配電設備の施設、改修、維持メンテナンスなどに多くの人員と費用を要しているのが現状です。また、台風や大規模地震などの際には当該地域までの配電設備の被害により長期間の停電が懸念されており、オフグリッド化の実現には維持管理コストの低減や非常災害時の早期電力復旧の面で大きなメリットがあります。本研究では小規模需要地域のオフグリッド化を想定しており、PV などの再生可能エネルギーだけではまかないきれない電力需要を蓄電池やエンジン発電機の導入により補い、安定した電力運用を目指しています。主たる研究課題として、電力運用を可能にする PV、蓄電池、発電機の容量の選定と発電に要するコストを抑えるためのこれらの機器の運用計画最適化が挙げられます。本研究は、実際にオフグリッドでの電力運用に携わる企業との密接な連携をもとに実施しています。

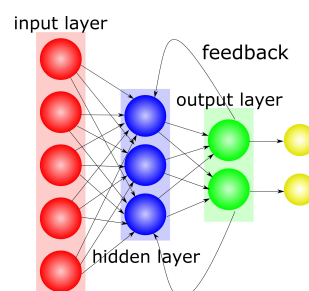


非凸最適化問題の評価関数
(最適パラメータの算出が困難)

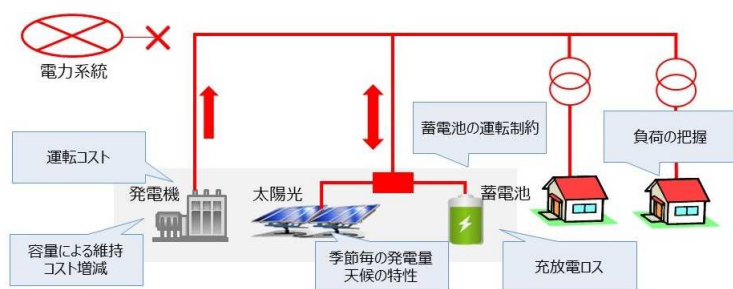
数学的手法 (変数変換)



凸最適化問題の評価関数
(最適パラメータの算出が容易)



RNN の模式図



オフグリッドの概念図

【キーワード】

自動制御，システム理論，最適化理論，凸最適化，機械学習，ニューラルネットワーク，電力システム，オフグリッド

工学研究科 電気工学専攻 自動制御工学分野

萩原 朋道, 細江 陽平

1. 自動制御とは ハードディスクやCD-ROMのドライブでは、極めて狭いトラック間隔でデータ領域が並ぶ中を、誤って隣のトラックのデータを読み出してしまったりすることなく、ヘッドは正確に目標トラック上に留まり、あるいは新たな目標トラック上にすばやく移動をします。そのような正確で高速な動作には、自動制御、あるいはフィードバック制御と呼ばれる技術が大きな役割を果たしています。一言でいえば、自動制御とは、何かを所望の状態のまま一定に保ったり、所望の軌道に沿って何かを時間的に変化させることを可能にする技術であるということができ、さまざまな身近な製品はもちろんのこと、半導体ステッパーやロボットアームなど工場における種々の製造工程、航空機・ロケット、インテリジェント・ビルなど、産業や日常生活の至るところで大変重要な役割を果たしています。

我々は、自動制御の技術をより高度に利用し、その質を高めるための方法について、応用上のさまざまな問題点を念頭におき、基礎理論から応用に至るまでの研究を行っています。これにより、これまでうまく自動制御することが難しかった対象を無理なく扱うことが可能となり、大きな経費をかけることなく生活や製品に対して安全性、快適性、利便性などの付加価値を与えることができるばかりでなく、省エネルギー、省資源などの意味で環境に優しい社会の実現にも寄与することができるわけです。

2. 自動制御を行う上での難点と自動制御の役割—動的システム/安定性/定常偏差 自動制御を行う上で何が難しいのか（動的システムの概念）と自動制御が常に直面して解決を要求されるものの中でもっとも基本的な2つの課題（安定性と定常偏差）についてのみ、その説明をできるだけ簡単に行おうと試みたのですが、どうしてもこの限られた紙面では説明しきれませんでした。そこでここでは概念的な説明にとどめて、ポイントのみ短く説明しましょう。

動的システムとは、(i) 静止しているモータに一定電圧を加えても、しばらく加速を続けてからようやく一定回転速度に達するというように、ある意味での時間遅れを持ち、(ii) モータに加える電圧をたとえば1ボルトとするように操作した場合でも、モータがほとんど静止に近い低速回転している場合には加速指令として作用する一方で、極めて高速回転している場合には減速指令として作用するという意味において、将来の動きが、現時刻で加える操作だけでなく、現在の状態（これは、過去に加えた操作の履歴と言い直すこともできます）にも依存するような性質を持つ対象のことと考えてください。

安定性 上記のような動的システムとしての性質は、多くの機械や装置に普遍的に見られるもので、これが自動制御を難しくする要因といえます。この時間遅れや過去の操作の影響を適切に考慮しておかないと、モータの回転速度を一定値に保つように自動制御をしてつもりが、実際にはモータはどんどんと加速をしていったり、あるいは、回転方向を交互に逆転させながら加速と減速を繰り返しつつ、回転速度のピーク値がどんどんと大きくなっていくという、不安定現象を引き起こす可能性があります。こういったことを避け（つまり、安定性を確保し）つつも、できるだけ早くモータの回転速度を所望の速度に持っていくことが要求されるわけです。

定常偏差 モータの回転速度を目標速度に保つつもりで自動制御を行ってみたところ、モータの回転速度が一定値に落ち着いたとしましょう。しかし、この回転速度が、目標速度に一致している保証は一般にありません。これは不思議に思えるかもしれませんが、そういったことは、理論的にいっても、ごく一般的に起こることなのです。このような目標とのずれは、定常偏差と呼ばれていますが、自動制御の方式に工夫を施すことでこれを0とし、正確に目標を達成することもまた自動制御の役割です。

自動制御に関する研究の目指すもの では、具体的にどういう制御方式を用いればこれらの問題がすべて解決可能であるのか、あるいは、単なるモータの例に限らず、もっと複雑で自動制御の難しい対象においても所望の制御性能を達成するにはどうすればよいのか、あるいはまた、どんな制御方式を用いようとも越えることのできない制御性能の限界とはどこまでなのか、といったことがらについて、世の中に普遍的に存在するさまざまな動的システムと自動制御が絡む世界において、できるだけ一般的かつ系統的に取り扱い、学問として追求しているのが、我々の研究なのです。それは、冒頭でも紹介したように、社会や生活のさまざまな基盤を支える大変重要な役割を果たしています（自動制御工学分野ホームページ <http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/> 参照）。



ハードディスクのヘッド制御



ロケットの姿勢制御



ロボットアームの軌道追従制御



電力系統の安定運用

自動制御はなくてはならない
technology!!

工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻 システム創成論分野

阪本 卓也

[https://www.ist.kyoto-u.ac.jp](https://www.ist.kuee.kyoto-u.ac.jp)

ワイヤレス人体センシング：電波で人を理解する

当研究室では、ミリ波レーダを用いて人の呼吸、心拍、動作などを非接触で計測する研究を行っています。スマートウォッチなどのウェアラブル機器とは異なり、電波による人体センシングはセンサの装着が不要であり、カメラのように画像を取得しないためプライバシーを保ちながら計測できます。さらに、衣類や寝具を透過して人体の微小な動きを計測できることから、医療・介護・健康管理など幅広い分野への応用が期待されています。

ワイヤレス生体計測技術

人の体は静止しているように見えても、呼吸や心拍によって常にわずかに動いています。当研究室では、ミリ波レーダを用いてこうした微小な動きを遠くから非接触で計測し、呼吸や心拍を推定する技術を研究しています。特に、心臓の動きに着目した高精度な心拍計測技術を開発しており、医療や健康管理への応用を目指しています（図1）。

電波による人体イメージング

ミリ波は衣類を透過するため、人体の形状を非接触で計測できます。この技術は空港のボディスキャナなどにも利用されています。当研究室では、人体の三次元形状を高速に画像化するための新しい信号処理技術を開発しています。人体模型を用いた実験では、従来法と比べて約100倍の高速化を実現しました（図2）。

ワイヤレス人体センシングのシミュレータ

人体に電波を照射すると、体のさまざまな部位で反射が生じますが、その強さは部位によって異なります。ワイヤレス人体センシングでは、どの部位からの反射なのかを理解することが重要です。当研究室では、人体の三次元形状をもとに、電波がどのように反射・伝搬するかを解析するシミュレータを開発しています（図3）。

電波による多人数同時計測

病院や介護施設、オフィスなどでワイヤレス人体センシングを活用するためには、多人数を同時に計測する技術が不可欠です。当研究室では、世界で初めて16人の呼吸と心拍を高精度に同時計測することに成功しました（図4）。当研究室では、未来の医療・ヘルスケアを支える基盤技術の創出を目指しています。

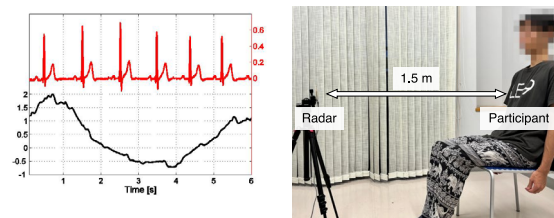


図1 電波による測定信号(左)と非接触心拍計測(右)

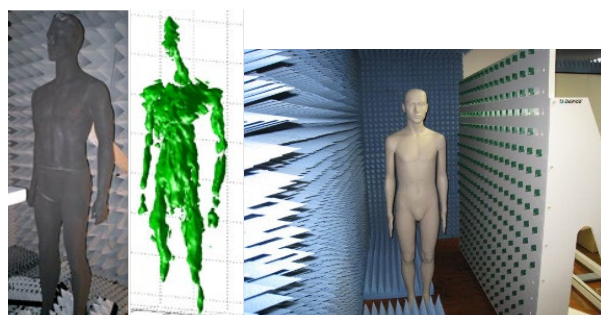


図2 人体模型(左)、電波イメージ(中央)、実験設備(右)

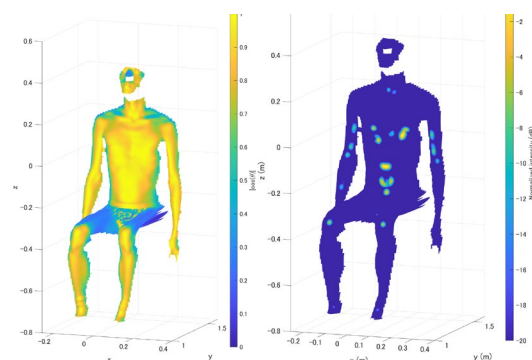


図3 人体の立体形状と電波散乱シミュレーション



図4 電波による多人数の呼吸・心拍の同時計測

1. 超伝導とは？

超伝導体という物質は、液体窒素（沸点-196℃）や液体ヘリウム（沸点-269℃）などを用いて極低温まで冷やすと、**電気抵抗がゼロ**になります。銅線やニクロム線のような普通の金属でできた電線に大きな電流を流すと温かく（熱く）なりますが、これは、電気抵抗によって発熱するからであり、発生した熱は損失となって失われてしまいます。超伝導体で作った電線（超伝導線）の場合は、臨界電流という値以下の電流では電気抵抗が発生せず、損失なく電流を流すことができます。また、発熱によって焼き切れることを防ぐために銅線にはあまり大きな電流を流すことはできませんが、超伝導線の臨界電流は大変大きく、同じ太さであれば、超伝導線には銅線よりもずっと大きな電流を流すことができます。このため、超伝導線を作って電磁石を作れば非常に大きな磁界を発生させることができます。**損失なく電流を流せること、非常に大きな磁界を発生できること**、これらの超伝導のメリットを活用すれば、様々な分野でイノベーションを起こすことができます。

2. 雨宮研究室の取り組み

大変魅力的な超伝導体ですが、その性質は複雑です。例えば、「損失なく電流を流せる」と言いましたが、これは直流の場合の話で、交流で用いると、超伝導体内部のミクロな物理現象に起因して交流損失という損失が発生してしまいます。「無損失」という超伝導のセールスポイントを損なう交流損失を小さくすることは超伝導の応用に向けて大変重要で、実験とコンピュータシミュレーションを駆使して、交流損失を小さくする研究を行っています。

また、無損失、高磁界発生というメリットを活用して、エネルギー分野、医療分野などへの超伝導応用を目指した研究を進めています。



図 1 超伝導電磁石を用いた重粒子線がん治療装置：高速に加速した炭素イオンを照射してがんを治療

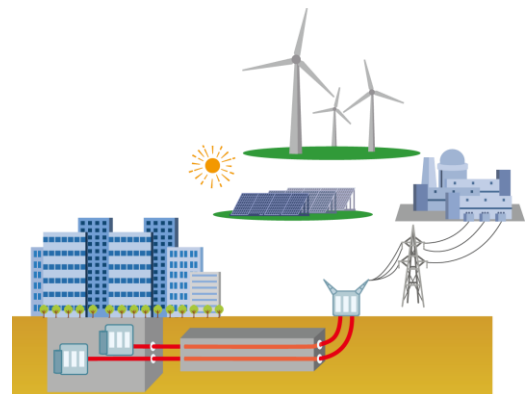


図 2 超伝導電気機器：様々な電気機器を超伝導化して省エネかつコンパクト化

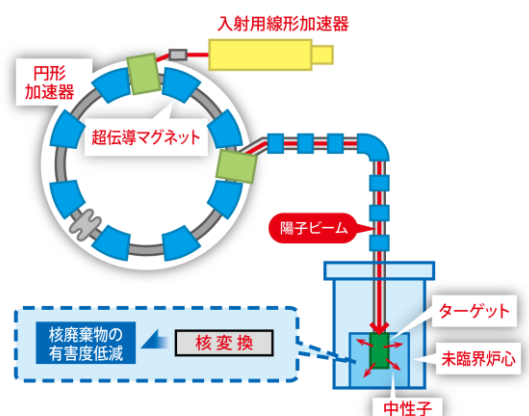


図 3 超伝導電磁石を用いた加速器駆動核変換システム(ADS)：核廃棄物の有害度を低減するシステム

教授：松尾 哲司，准教授：美船 健 助教：孔 暁涵

先進的な電気電子機器の設計開発や電気電子材料の開発のために，計算機シミュレーションが大きな役割を果たしています。本研究室では，電磁界や磁性材料などの計算機シミュレーションにおけるキーとなる理論や手法の研究を行っています。その中では，連続的な電磁界変数の関係式をデジタル的な関係式に置きかえて膨大な計算を行うために，高速で精度の高い計算手法が必要になります。そのため，計算電磁気学（電磁界の離散化を扱う計算科学）と呼ばれる研究分野が発展しており，本研究室では，その先端的な研究を行っています。

1. 計算電磁気学

実用的な電磁界シミュレーションにおける解析対象はしばしば，一千万個以上の変数を持つような巨大な連立微分方程式としてモデル化されます。そのようなモデルの計算を効率的に行うため，数多くの高度な計算技術

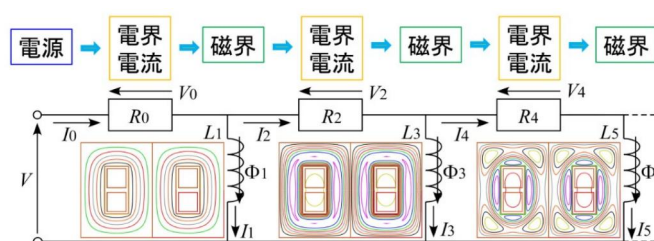


図1 電磁界の等価回路表現

に関する研究開発が盛んに行われています。本研究室では，大規模連立微分方程式の計算において一つの要となる，大規模連立方程式の高速求解法を研究テーマの一つとして，電磁界を表現する微分方程式固有の性質に着目した新しい求解法の提案などを行っています。

最近では，電磁界を直交関数展開して，電磁界の応答を精度を損なうことなく，少ない変数の電気回路で再現する方法を開発し，モータ応答のシミュレーションに応用しています。図1では，まず，電圧源により生じる電流を $I_0 = V_0/R_0$ で表し，その電流が作る磁束を $\Phi_1 = L_1 I_1$ で表し， Φ_1 の時間変化による起電力によって流れる電流を $I_2 = V_2/R_2$ で表し…と続けていくことにより，電源から見たインピーダンスが正確に表現できます。図1の磁束線は各等価インダクタ L が作る磁界を表しており，この磁界を重ね合わせることで磁界分布を再現できます。すなわち，図1の電気回路は電磁界の縮約表現となっています。

2. 電磁構造の最適設計

高速な電磁界解析技術の発展に伴い，電磁構造を自動的に設計する研究が注目されています。

モータや変圧器，さらには医療機器などの電磁機器では，磁性材料や導体の構造配置が機器性能を大きく左右するため，複雑な設計目標と膨大な設計空間の中から最適構造/トポロジーを探索することが重要な課題です。本研究室では，有限要素法などの数値解析技術に加え，モデル縮約手法，AI 代理モデル，高

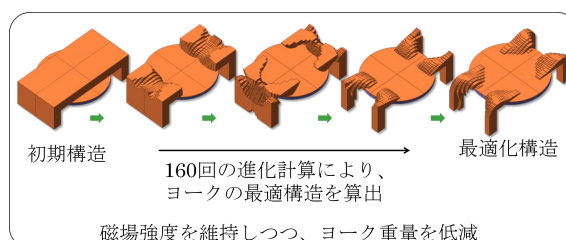


図2 永久磁石 MRI の構造最適化例

速最適化アルゴリズムを組み合わせることで，電磁構造の自動設計手法を開発しています。図2に，永久磁石を用いた磁気共鳴画像法（MRI）装置の構造最適化例を示します。

興味のある方は研究室 HP (<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/>) をご覧ください

工学研究科 電気工学専攻 宇宙電波工学分野(生存圏研究所)

小嶋 浩嗣、栗田 怜、上田 義勝

当研究室は、宇治の生存圏研究所に所属します。「人類生存圏の宇宙への拡大」という人類宇宙開拓の時代に向けて、太陽系空間電磁環境の科学衛星・ロケットによる探査やその探査手法の研究を理学・工学の両面から行なっています。

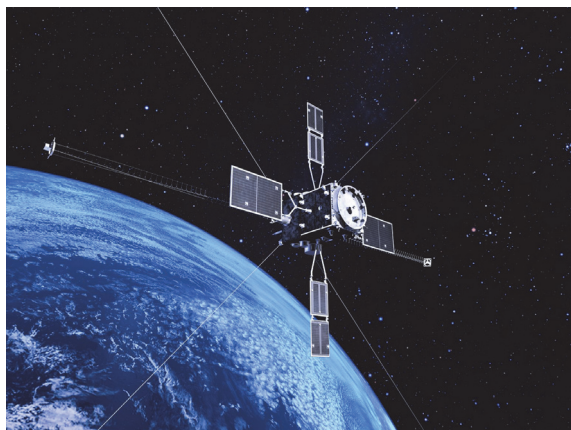


図: 地球放射線帯を探査する Arase 衛星. 当研究室では宇宙空間で発生する電波現象を観測する装置を開発 [イラスト: Arase プロジェクト提供].

1. 科学衛星による宇宙空間探査とデータ解析

宇宙空間は、プラズマという電離した薄い気体で満たされています。地球上が中性の気体、すなわち、中性大気でその環境が支配されている空間だとすると、宇宙は電離した大気で環境が支配されている空間です。この宇宙空間を満たしているプラズマのことを「宇宙プラズマ」と呼びます。宇宙空間を利用していくためには、この宇宙プラズマという大気に支配された環境を理解する必要があります。そして、この環境を理解する大きな手がかりを与えてくれるものが、この宇宙プラズマから発生する電波「プラズマ波動」

になります。本研究室では、このプラズマ波動を科学衛星やロケットに搭載したプラズマ波動観測器により観測し、実際に得られたデータを解析して宇宙空間環境の理解を進めています。当研究室は国内外の宇宙探査プロジェクトにその立案から、実行にいたるまで参画しています。

2. 科学衛星・ロケットに搭載する超小型観測器の開発

科学衛星やロケットに搭載する観測器は、その重量、サイズ、電力に大きな制約があります。しかし、搭載観測器はその高性能化ゆえに大きく、重くならざるを得ない状況にありました。本研究室ではこの状況を打破することを目的として、観測器そのものを一つの数 mm 角チップ内に実現する技術開発に取り組んでいます。宇宙ミッション専用の IC チップを自ら設計・開発することにより、現在までのところ A4 サイズの観測器が 5mm 角のチップに収まるところまで実現できています。このチップにより超小型の観測器が実現できるようになり、ロケット実験による宇宙実証が行われる計画にあります。

3. 新規材料開発としての微細気泡の利用とその基礎特性の研究

サブミクロンスケールの水中の気泡（微細気泡）は、過去に次世代水再生実証システムとして利用された事もあり、宇宙圏での水の効率的な利用の可能性を広げています。本研究テーマでは、微細気泡を含む水に関する電気的特性を調査することで、その安定性や気泡サイズ・濃度の制御に向けた理論を確立したいと考えています。応用利用用途としては、稲やダイズなどの植物栽培の現地試験、食器洗浄機の節水や機能向上のための企業との共同研究なども行い、基礎と応用の両面から宇宙圏での微細気泡利用の可能性を探ります。

工学研究科 電気工学専攻 マイクロ波エネルギー伝送分野（生存圏研究所）

篠原 真毅、三谷 友彦

当研究室では、マイクロ波という電波(電磁波)の新しい応用方法に関する工学的な研究を行っています。マイクロ波は今私たちの身の回りに携帯電話や WiFi の電波として飛び交っており、私たちの生活を非常に便利にしてくれています。当研究室ではこのマイクロ波を、エネルギー応用という観点で捉え、ワイヤレス給電(マイクロ波送電)に関する研究、マイクロ波送電を用いた宇宙太陽発電所 SPS 実現を目指した研究、マイクロ波加熱応用研究等を行っています。(研究室 HP <http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/shinohara-lab/index.php>)

1. ワイヤレス給電(マイクロ波送電)に関する研究

ワイヤレス給電は電磁界/電磁波の基礎理論に基づき動作するもので、携帯電話の置くだけ充電器や衣料品の自動読み取り商品タグ等で近年身の回りに普及し始めました。当研究室ではさらにその先の応用として、マイクロ波送電技術を用いて、身の回りのセンサーの電池レス化の研究や飛行するドローンへのワイヤレス給電の研究等を行っています。当研究室では理論検討/計算機シミュレーション/開発・実験を通して研究を行っており、学生は宇治キャンパスにある特別な研究設備(電波暗室)AMETLAB(図 1)を用いて自由な発想で研究開発が行えます。図 2 は学生が開発したマイクロ波受電整流回路の測定に関する写真です。

2. 宇宙太陽発電所 SPS 実現を目指した研究

マイクロ波送電技術を用いると、理論上何万 km もの距離をワイヤレス給電できます。夜昼がなく、雨の降らない宇宙に km 級の巨大な太陽電池を浮かべ、マイクロ波送電で地上に電気を送る将来(2050 年頃?)の発電所構想が宇宙太陽発電所 SPS です(図 3)。SPS は地球の持続的発展を約束する将来構想で、日本が研究開発をリードしています。当研究室では高効率なマイクロ波送電ビームの研究を中心に、世界中の研究者と連携して SPS 研究を進めています。SPS が実現すれば、さらにその先に宇宙コロニーや火星移住等の夢も実現できると期待しています。

3. マイクロ波加熱応用研究

マイクロ波送電はマイクロ波を電気エネルギーとして利用しますが、身の回りには熱エネルギーとして利用する電子レンジがあります。当研究室はさらに高度なマイクロ波加熱装置の開発を中心に、さらに進んだマイクロ波加熱の研究も行っています。基本技術はマイクロ波送電と共通するところが多いのです。マイクロ波加熱を行うと単なる加熱では得られない化学反応が起こることが知られ、マイクロ波科学と呼ばれるこの新しい学問領域の発展に協力しています。



図 1 巨大なワイヤレス給電用実験装置 AMETLAB

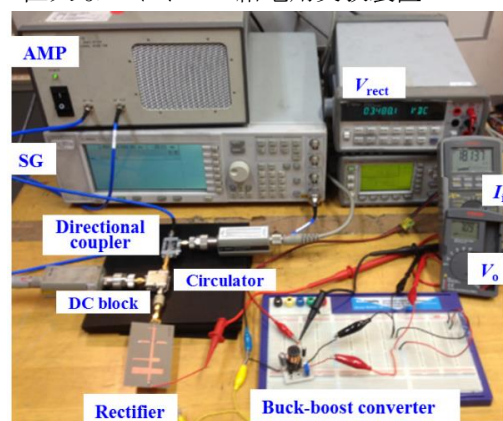


図 2 測定中のマイクロ波受電整流回路

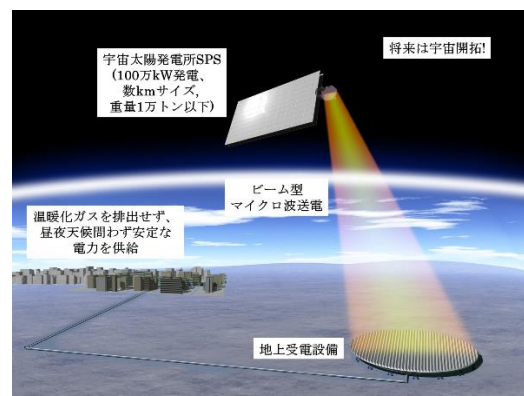


図 3 宇宙太陽発電所 SPS のイメージ(2050 年頃?)

工学研究科 電気工学専攻 電波科学シミュレーション分野（生存圏研究所）

海老原祐輔・Yikai Hsieh

人類の活動領域は宇宙へと広がり、宇宙の実利用は急速に進んでいます。一方で、宇宙空間には光速に近い速度で飛び交う高エネルギー粒子が存在しており、その環境は極めて過酷です。また、宇宙環境の変動は、地上の電力網に深刻な影響を与えることもあります。当研究室では、スーパーコンピュータ（図 1）を用いた大規模計算機シミュレーションにより宇宙環境を再現し、その変動を正確に予測する宇宙天気数値モデルの実現を目指しています。

地球放射線帯の形成メカニズム

地球磁場に捕捉された多くの高エネルギー粒子は「放射線帯」を形成します（図 2）。これらの粒子は人工衛星に搭載された電子機器の故障を引き起こす原因となるため、宇宙開発・利用における大きな脅威となっています。当研究室では、宇宙空間の電磁波動が粒子を加速し、放射線帯を形成していく過程をスーパーコンピュータで精密に再現し、その背後にある物理メカニズムを解明することで、安全な宇宙開発・利用に貢献することを目指しています。



図 1: 超並列計算が可能な高性能スーパーコンピュータ。

地磁気誘導電流の発生メカニズム

太陽フレアの影響が地球に到達すると、地球磁場が大きく乱れる「磁気嵐」が起こります。これにより送電線に地磁気誘導電流が流れ、最悪の場合、送電設備に深刻な影響を及ぼします。当研究室では、太陽風から送電網に至る複雑な過程をスーパーコンピュータで再現し、超巨大フレアに対する送電網の耐性を評価することで、宇宙災害に強い社会づくりに向けた基礎研究を進めています。

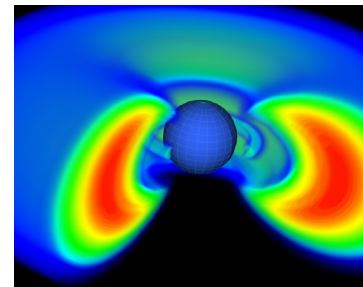


図 2: 地球放射線帯の模式図。

宇宙空間の未来予測

過去 150 年間で約 9%減少した地球の固有磁場。その減少は現在も続いています。スーパーコンピュータによる予測実験の結果（図 3）、固有磁場が減少するとオーロラの出現緯度が下がり、中緯度地域でも地磁気誘導電流の影響を受けやすくなることがわかりました。宇宙への依存を強め、高度化していく現代社会。変わりゆく宇宙環境が人類の活動に及ぼす影響について、一緒に考えてみませんか。

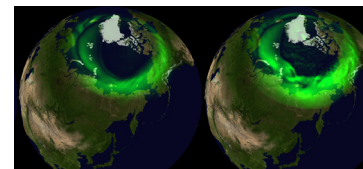


図 3: オーロラに伴って流れる電流の強さ。左は現在の地球、右は約 600 年後の地球。

工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学研究室

米澤 進吾、掛谷 一弘、後藤 康仁

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

集積機能工学研究室の紹介

私達の集積機能工学研究室では、図 1 のように、電子や原子・イオンといった物質を構成する**基礎的な粒子を多数「集積」**することで起こる**創発現象**を基軸とし、基礎物理現象・機能性の発見と解明、およびそれらを応用した革新的テクノロジーの創出を目標とした研究を行います。物質中では電子や原子が「集積」し、個々の性質だけでは想像できないような**超伝導・磁性・テラヘルツ発光**といった多彩な現象が引き起こされます。それらを基礎・応用両面から研究します。また、電子やイオンを真空中に引き出し「集積」して発現する機能に関する**真空電子工学**も研究しています。

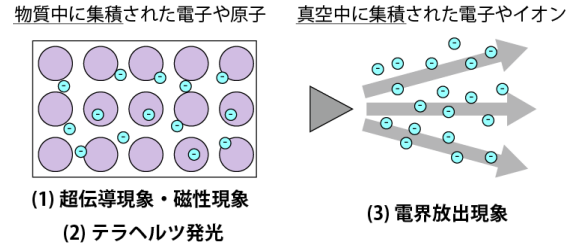


図 1: 集積機能工学研究室の研究内容。

超伝導体や磁性体における物理現象の理解を通じた革新的デバイスの開発

私たちの研究室では、電気抵抗がゼロとなる**超伝導体**（図 2）、磁石の性質が顕著となる**磁性体**を舞台として繰り上げられる電子の量子力学的な性質を実験により注意深く観察し、その背後に潜む**自然の普遍性**を探り当てて将来のデバイス創成につながる研究を行っています。

現代生活において不可欠な集積回路素子の開発には固体中での電子の振る舞いを理解しなければいけません。現在の固体デバイスは電子と原子の量子力学的な相互作用から記述される原理に従っています。一方、超伝導や磁性などの現象では**電子同士の量子力学的な相互作用（電子相関）**が重要な役割を果たしています。このような電子同士が強く相互作用する物質（強相関電子系）においては、未解決で興味深い問題は至るところにあり、あたかも自然が私たちに挑戦を挑んできているようです。このような、一見複雑な現象を「物理学」という言葉を使って自然と対話しながら簡潔に理解し、その機能性を引き出し、持続可能な社会の形成へ貢献することが私たちの研究目標です。

具体的には、**新奇超伝導・磁性現象**の探索、**光技術を使った機能物性の開拓**、**高温超伝導体を使った量子ビットやテラヘルツ波光源**について研究を進めています。電子相関が表に出る**強相関電子デバイス**の開発は次の技術革命を起こすと信じています。皆さんと一緒に、歴史が動く瞬間を経験しましょう。

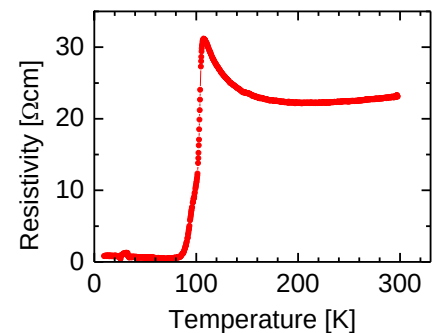


図 2: ビスマス系高温超伝導体の電気抵抗の温度依存性。100 ケルビン前後で超伝導転移が起きている。c 軸方向に 1 層だけ取り出して測定している。

電界放出現象の解析とその応用に関する研究

電界放出とは、強電界により電子が固体内部から真空中に放出されたり、表面付近の原子がイオン化する現象のことで、微細な電子源や局所分析などへの応用が期待されています。図 3 のような微小電極を作製して電界放出現象の基礎的な理解を深化させるとともに、高温や放射線環境下で動作する電子デバイスへ応用する研究を進めています。

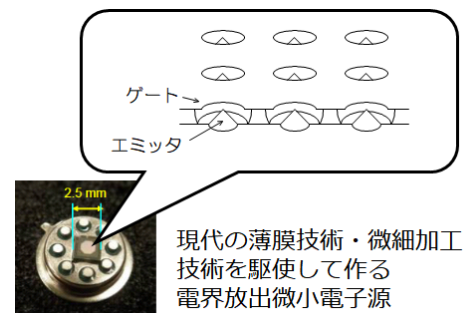


図 3: 真空電子工学で用いる電界放出微小電子源の例。

工学研究科 電子工学専攻 極微電子工学分野

白石誠司、大島諒

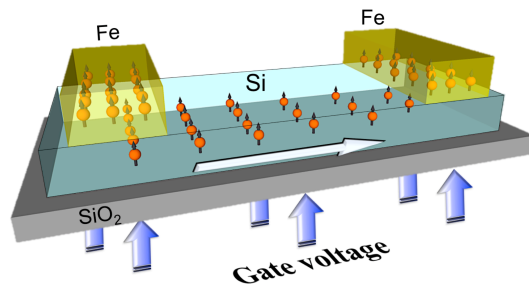
1. 研究室の方向性

私たちの研究室では、電子の持っている重要な性質である「スピン」と「電荷」の自由度を同時に制御して、その量子性を発現させながらナノテクノロジーを駆使することで物性物理学の新しい分野を開拓していく「量子スピントロニクス」の研究をしています。20 世紀までは電子の持つ「スピン」と「電荷」はそれぞれ別々に制御され、固体物理学の主要な分野である磁気物理と半導体物理の大きな発展とセンサーやトランジスタなどへの応用に貢献してきました。私たちの研究している「量子スピントロニクス」はこれまで別々に制御されてきたこの 2 つの自由度を同時に自在に制御することで、20 世紀までの固体物理学を様々な角度から書き換え進歩させながら、21 世紀の新しい物理分野を創出し、最先端の学術分野ということができます。

2. 主要な研究テーマ

(1) 純スピン流エレクトロニクスの研究

量子スピントロニクスだけでなく広く固体物理学において非常に注目されている新しい物理量の「流れ」（電流はまさに電荷の「流れ」です）であるスピンのみの流れ＝「純スピン流」を自在に生成・制御・計測することでこの純スピン流の持つ基礎的な物性を理解しながら純スピン流に情報伝搬を担わせることで、例えばトランジスタの発展形態であるスピントランジスタ（右図）などの新機能素子の創出につなげていく研究を 10 年以上続け、顕著な成果を数多く発信し世界を牽引しています。



(2) トポロジカル絶縁体の量子物性の研究

トポロジカル絶縁体とは金属でも半導体でもない、21 世紀に発見された新しい固体物質で、2017 年のノーベル物理学賞がこの分野に与えられたことでも有名です。私たちはこのトポロジカル絶縁体の表面に存在する量子スピン機能を計測・発現させる最先端研究を進め、トポロジカルスピン変換、という新しい研究領域を牽引しています。

(3) 新しい量子スピン物性の開拓

更に未来の新研究領域を創出・牽引していくために、例えば力学的運動と純スピン流の物理を繋げていく研究や、スピンとフォトン（光子）の結合を固体中で自在に制御することで量子エンタングルメント状態を創出し量子計算実現のための基盤技術を開拓する研究などを進めています。

工学研究科 電子工学専攻 応用量子物性分野

竹内繁樹、岡本亮、衛藤雄二郎、向井佑

1. 概略

光は光子という素粒子の集まりです。光子は、古典力学的な“粒”とは異なる、奇妙なふるまいをします。例えば、一つの光子が別々の場所に同時に存在することができます。また、二つの光子が「もつれ合って」といって、どんなに遠く離れていても、一方の状態が決まると、もう一方の状態も瞬時に決まります。私たちの研究室では、光子一粒一粒を発生させ、その状態間の量子もつれを自在に制御することで、これまでの「光」を超える「新しい光」の実現と応用について実験的な研究を行っています。光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェースが容易です。私たちは、光子を自在に制御、検出するために、ナノスケールの微小光デバイスを使った光量子デバイスや単一光子源の実現について研究しています。また、光子を操る光量子回路のほか、通常の光の限界を超えた「光計測」の研究にも取り組んでいます。

2. 研究テーマ

光量子回路

光子は、量子コンピュータや量子通信における伝達媒体として非常に有力です。ただし、二つの光子を相互作用させる方法の実現が困難でした。私たちは、光子源の改良や、独自に開発した特殊な反透鏡、さらに光の干渉装置を工夫することで、コンパクトで非常に安定した実装を実現しました。その結果、光量子コンピュータの基礎となる光量子回路を実現することに成功しています。

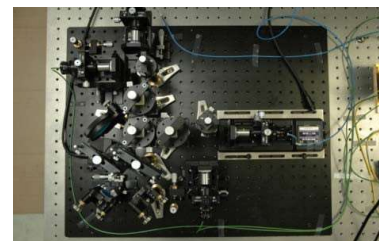


図 1. 量子もつれ光生成装置

光量子計測

量子もつれ光子は、光断層撮影・顕微鏡など様々な計測機器への応用があります。もつれ光子を用いると、レーザー光などのいわゆる「古典光」を用いた場合よりも高度な観測が期待されます。従来よりも分散の影響を小さく撮影が可能な「量子光断層撮影」などがその一つです。私たちは、世界で初めて、古典物理学の限度を超えた感度を持つ「量子もつれ顕微鏡」を実現しました。

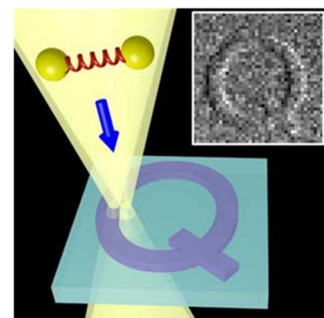


図 2. 量子もつれ顕微鏡

ナノフォトニクスデバイスの開発

高効率単一光子源や異なる光子間の量子状態を制御する素子の開発をめざし、光共振器を組み込んだナノ光ファイバといったナノフォトニクスデバイスと半導体量子ドットなどを結合させたシステムの研究を行っています。

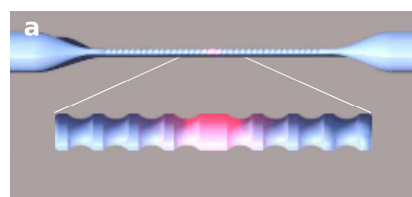


図 3. 光子を操る、微小光素子

工学研究科 電子工学専攻 半導体物性工学分野(木本研究室)

木本 恒暢、西 佑介、金子 光顕

1. 半導体とは

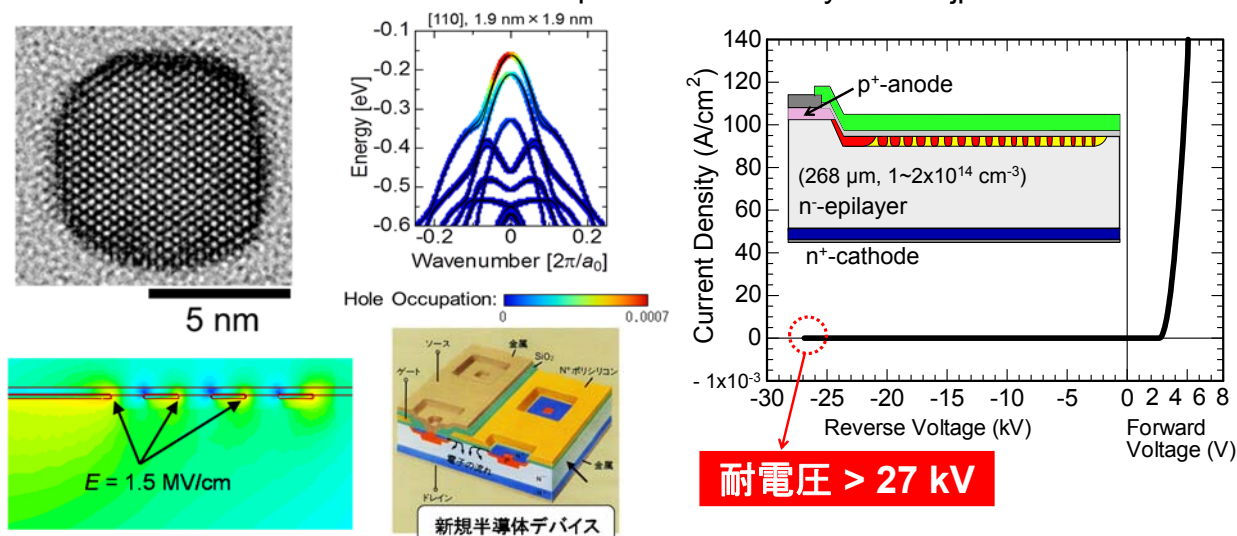
皆さんは「半導体」という言葉を聞いたことがあるでしょうか？ 導体と絶縁体の中間？ 半導体は、パソコン、スマホ、太陽電池はもちろんのこと、エアコン、炊飯器、ゲーム機、電車、銀行 ATM など、あらゆる電気電子機器に必ず使われ、その中核的役割を果たしています。2014 年にノーベル物理学賞の対象となった青色／白色発光ダイオードも半導体です。我が国が強みを発揮している自動車も高度に電子化され、その性能は半導体で決まると言っても過言ではありません。このように半導体は、現在の高度エレクトロニクス社会を支えるハードウェアと言えます。

2. 研究背景と研究室の取り組み

時代の発展と共に、研究開発の方向性はダイナミックに変化しています。半導体の分野でも、以前は「微細化、高集積化、高速化」が大きな目標でしたが、現在は、「低消費電力化と高機能化」が求められています（例えば、計算速度が 2 倍速いパソコンより、連続駆動時間が 2 倍、あるいは重量が 1/2 のパソコンの方が魅力的ではないですか？）。スマホの充電が面倒だと感じている人は多いはずです。また、電気で走る自動車（ハイブリッド車や電気自動車）は、今後、爆発的に普及することは必然です（2050 年にはガソリン車は販売されていないと予測されています）。このような分野では、大きな電力を低い損失（高効率）で扱うことのできる半導体が強く望まれています。

当研究室では、新しい概念、あるいは新しい材料を活用することによって、従来の半導体では達成できない画期的な半導体デバイス（トランジスタなど）を実現すること、およびその基礎となる半導体物理の研究に取り組んでいます。例えば、原子レベルの細線状半導体を形成すれば電子の運動が根本的に変換し、高性能トランジスタを実現できます。また、ある酸化物薄膜を用いれば、超高性能メモリ（記憶素子）や人工知能のハードウェアとなるシナプス素子を実現できます。さらに、炭化珪素という半導体を用いれば、桁違いに損失の少ない電力用トランジスタや 500℃ の高温でも動作する集積回路を実現できます。このように、半導体材料からデバイスに亘る広い分野で独自の研究を展開し、人々の生活水準の向上だけでなく、エネルギー問題や環境問題にも貢献できるよう努力しています。

★ 興味のある方は、研究室ホームページ (<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>) をご覧ください。



工学研究科 電子工学専攻 電子材料物性工学分野

小林 圭

1. ナノテク最前線: ナノの世界で「ものを見る、作る」とは？

「ナノテクノロジー」という言葉を、皆さんはどこかで耳にしたことがあるかと思います。人の髪の毛の太さの1万分の1から10万分の1程度という極めて小さい「ナノ」の世界、言いかえれば、原子1個や分子1個という大きさの世界を対象とする技術のことを言います。

皆さんは、子どもの頃と比べればスマートフォンやゲーム機などの情報端末が着実に高性能化を遂げてきたと感じていると思いますし、最近では人工知能（AI）が身近なものになりましたし、自動車の自動運転も遠い未来では無くなってきたように感じますね。このような最新の情報端末や情報技術は、高度な半導体製造技術によって支えられています。それはナノテクノロジーの微細加工技術の進歩によりもたらされています。

一方、今のところ治療が困難な病気に対して有効となる新しい薬や治療法を開発してゆくためには、生体中にあるいろいろな分子がどのような役割を果たしているのかを、分子レベルで解明していく必要があります。また、さまざまな物理・化学現象をナノスケールで解き明かすことで、省エネルギーかつ二酸化炭素（CO₂）の排出がないと言った、環境に優しい材料の開発に貢献できる可能性も大いにあります。このように、ナノの世界で「ものを見る、作る」技術の開発は、安心・安全で、豊かな未来を切り拓く原動力になることが期待されています。

2. われわれがナノテクノロジーの世界で挑戦していること

われわれの研究室では、電子工学（エレクトロニクス）の技術と、ナノの世界で「ものを見る、作る」技術を融合する研究を進めています。まず、「ものを見る」ことについては、個々の原子や分子の形を見ることを可能にする走査型プローブ顕微鏡（SPM）という装置の開発を行っており、実際にいろいろな原子や分子の観察をしています。

図1には、その装置を使って生体内環境と同じ条件下でDNAの二重らせん構造を観察した例を示しています。DNAは、生物個体の全遺伝情報を蓄積・伝達する役割を担っており、最も基本的な生体分子の一つですが、その構造・性質を用いて生体機能に関わる謎の解明や治療に使うDNAナノテクノロジーという技術も注目を集めています。

一方、「ものを作る」ことについては、有機半導体分子を使ったデバイスを作り、その電気的性質を調べています。図2はカーボンナノチューブというワイヤ状の分子を使用した例で、金属電極の間に棒状の分子が橋渡しされています。

ここで紹介した研究例以外にも、ナノスケールで「ものを見る、作る」という観点から、さまざまな研究を推進しています。

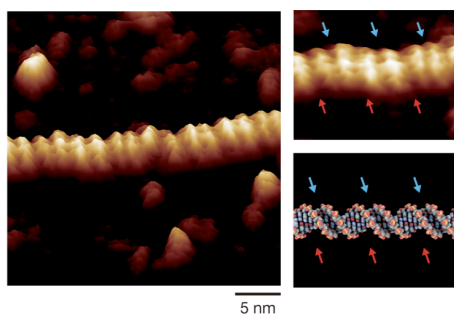


図1: 原子間力顕微鏡により捉えられたDNAの二重らせん構造。右上図: 二重らせんの2種類の溝（主溝と副溝）の拡大像。右下図: 構造モデル図。

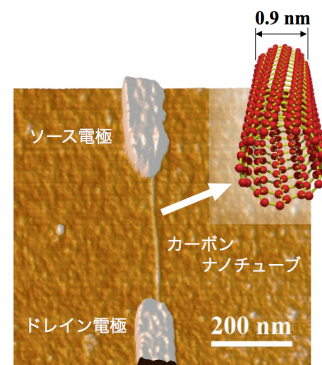


図2: 2つの金属電極（300 nm 間隔）をつなぐカーボンナノチューブ分子。右上: そのモデル図。

1 概略

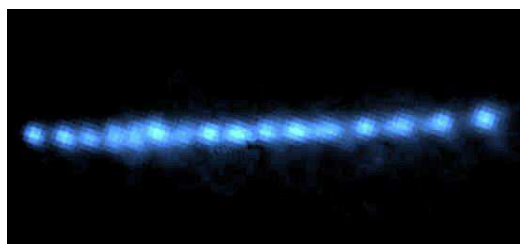
私たちの研究室では、「量子力学」と「電磁気学」に関係した研究を行っています。電磁気学は電気や磁気、そしてそれらが一体になった電磁波を扱う学問で、携帯電話で使われている電波や、光、X線などはすべて電磁波です。一方、量子力学が対象とする「量子」は、波でもあり粒子でもあるという変わった性質を持ちます。電子はもちろん、光も量子（光子といいます）の1つです。この量子力学と電磁気学を融合した「量子エレクトロニクス」と呼ばれる分野はここ 50年ほどの間に急速に発展しました。一番有名な応用例は、レーザです。計測の分野（量子計測）での進歩も目覚しく、核磁気共鳴は医療用MRIを、原子時計などの超高精度時間測定の技術はGPSという応用を生み出しました。また、基礎学問としての役割も大きく、数多くの研究者がこの分野でノーベル賞を受賞しています。

2 主な研究テーマ

イオントラップ

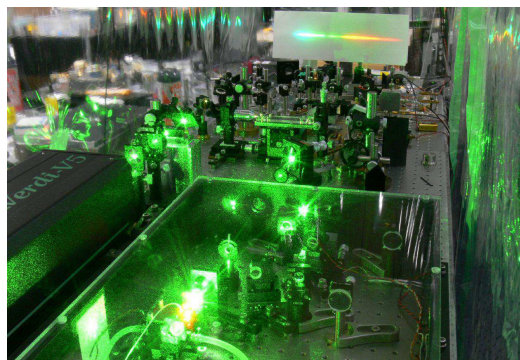
電氣的な力を利用して、イオンを真空中の狭い領域に閉じ込めます。さらにレーザ光が物質に及ぼす力を利用する、レーザ冷却という手法で、イオンを極低温まで冷却し、たった1個のイオンを真空中に浮かせて静止させます。このようなイオンは周りの影響を受けにくいので、イオンと共鳴する電磁波の周波数が正確に決まり、精度のよい周波数の標準、その逆数として時計ができます。

図は静止させた16個のイオンの蛍光像です。複数個を並べたものは、現在の計算機では膨大な計算時間がかかる問題を短時間で解く、量子計算への応用が注目されています。



モード同期レーザによる周波数計測

モード同期レーザは、非常に正確な時間間隔で光のパルス列を放射するレーザです。その光を分解すると、等しい周波数間隔だけ離れた多数のレーザ光になっています。これを光の周波数の“モノサシ”として利用して、レーザの周波数を測定・比較する、逆に高周波から光領域まで任意の周波数を発生させるなど、光周波数を自在に扱う研究を行っています(右図)。



その他の研究については <http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/> をご覧ください

1. はじめに

物質をナノメートル（ $=10^{-9}$ メートル）精度で加工する技術（ナノプロセス技術）は、現代社会において、ものづくり、医療、エネルギー等、あらゆる産業の基盤となる技術です。私たちの研究室では、半導体や金属材料のナノプロセス技術を駆使した光ナノデバイスの開発を行い、ナノ構造に特有の光物理現象の探求や、従来のデバイスでは実現不可能であった新しい機能の創出を目指しています。

2. 研究内容

従来のデバイスとは異なる、全く新しい機能をもつ光ナノデバイスを実現するためには、目的の機能を有するナノ構造の設計手法と、設計した光ナノ構造を精確に再現する作製技術が必要となります。私たちの研究室では、光ナノ構造の設計のために、複数の電磁界シミュレーション法を駆使し、時にそれらを拡張した新たな理論解析手法を確立することで、新機能をもつ光ナノ構造の提案を世界に先駆けて行っています(図 1)。また、設計構造の作製においては、電子ビーム描画装置やプラズマエッチング装置といった最先端のナノプロセス装置を利用することにより、ナノメートル精度の微細加工を実現しています(図 2)。さらに、上で述べた光ナノ構造の設計・作製技術を応用することで、高出力・高ビーム品質な発振を実現するレーザ光源や、加熱するだけで目的の波長の赤外線を高効率に発する熱輻射光源など、従来の光デバイスとは動作原理や機能が異なる次世代光源の開発を行っています(図 3)。なお、本研究室は、電子工学専攻光量子電子工学分野と連携をとりながら教育研究を行っています。

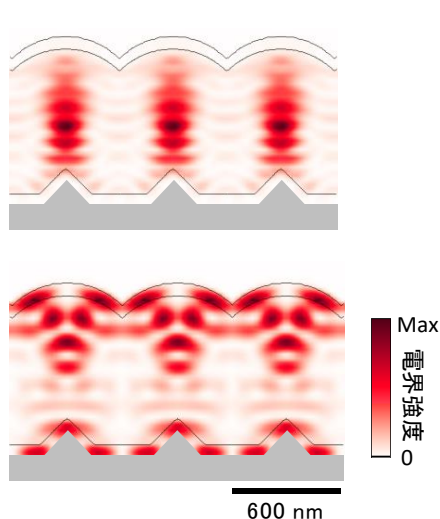


図1: 光ナノ構造の電磁界解析例
(光ナノ構造を導入した太陽電池)

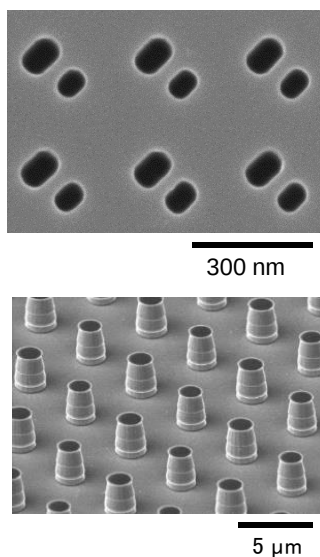


図2: 種々の光ナノ構造の
電子顕微鏡写真

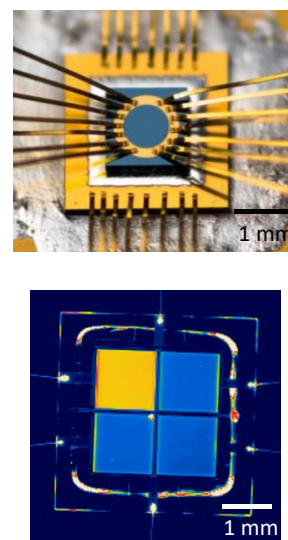


図3: 光ナノ構造を利用した
次世代光源の開発例
(上) 高出力レーザ
(下) 多波長熱輻射光源

情報学研究科 知能情報学コース 言語メディア分野

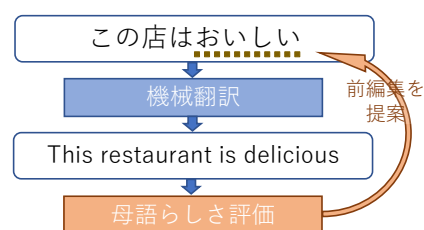
村脇 有吾 Chenhui Chu Fei Cheng Yin Jou Huang Jivnesh Sandhan

<https://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

本研究室では、言語の仕組み、それを用いたコミュニケーションの仕組みを計算機が扱える正確さで解明するという理論的研究と、それによって情報検索、機械翻訳、マンマシンインタフェース等をより高度化して人間の活動を支援するという工学的研究を行っています。以下では最近の研究事例を3つ紹介します。

文化差を乗り越えるための機械翻訳周辺技術の開発

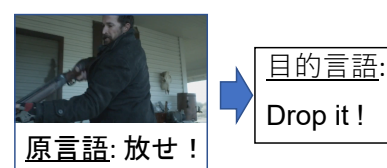
機械翻訳はここ5年ほどで劇的に精度が向上しました。Google Translate や DeepL のような機械翻訳サービスは身近になっていると思います。ただ、機械翻訳を使って本当に異文化コミュニケーションを実現しようとすると、言語間でうまく対応がつかないコミュニケーション様式の様々な違いが問題になります。本研究室はこうした違いをまとめて文化差とよび、それを乗り越えるための工学的研究に取り組んでいます。例えば、機械翻訳結果中のわかりにくい箇所を特定し、その原因を元テキストまで遡ることで、利用者が自分でテキストを修正したり、計算機に修正案を提案させる手法を開発しています。



本研究室はこうした違いをまとめて文化差とよび、それを乗り越えるための工学的研究に取り組んでいます。例えば、機械翻訳結果中のわかりにくい箇所を特定し、その原因を元テキストまで遡ることで、利用者が自分でテキストを修正したり、計算機に修正案を提案させる手法を開発しています。

視覚・音声・言語のマルチモーダル翻訳 機械翻訳

の精度向上の背景にはニューラルネットとよばれるモデルの導入があります。ニューラルネットには、言語に加えて、視覚や音声の情報を柔軟に統合できるといった利点があります。例えば、ドラマのセリフ



「放せ!」を英訳したいとき、放す対象が何かによって、Drop it! (持っているものを放せ) とすべきか、Let me go! (私を放せ) とすべきかわ変わってきますが、こうした言語の曖昧性の解消には視覚情報が役に立ちます。そこで、複数のコミュニケーション媒体を手がかりとするマルチモーダル翻訳にも取り組んでいます。

インタビュー支援システム 言語処理の高度化

によって、様々な対話システムが開発されています。我々が日常行っている対話には、雑談のような楽しむことを目的としたものだけでなく、インタビューのような他者から情報を引き出すことを目的とした対話も含まれています。本研究室では、技能者から知識やコツを引き出すことを目的としたインタビュー対話において、言語化された知識を構造化し、次にどのような質問をすべきかを提案するインタビュー支援システムの開発に取り組んでいます。



情報学研究科 知能情報学コース コンピュータビジョン分野

西野 恒 櫻田 健 川原 僚

<http://vision.ist.i.kyoto-u.ac.jp>

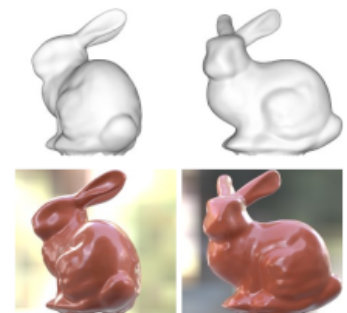
本研究室では、コンピュータビジョン、すなわちコンピュータに視覚を与えるための理論的基盤とその実装に関する研究をおこなっています。主に機械学習や光学を道具とし、単純に画像や映像を効率的に消費するための手段にとどまらない、ただ見るだけではなく、知覚として「見る」視覚知能としてのコンピュータビジョンの実現を目指しています。

I 人を視る：人はその見た目や行動に、性別や身長などの外見的属性にとどまらない、その人の内面や考えを映す豊かな情報を含んでいます。例えば、我々は人の気分や意図を瞬時にその人の動きや表情から読み取ることができます。本研究室では、人を見ることによりその人の見ているものを判断したり、人混みでの動きを予測する研究をおこなってきました。人が何を見て、何を意図し、どのように動き互いに影響を及ぼし合うか、高齢者の見守りなどを目的にこれらの視覚理解のための研究を進めています。



遠くからの視線行動理解

II 物を視る：身の回りの状況や物を見ることにより、我々は多くの情報を得ています。単純に、目の前に道路があり車が停まっている、といった物体認識にとどまらず、道路が雨上がりでぬかるんでいる、車のボディは硬いけどバンパーはより柔らかいなど、歩いたり触ったり、それらの物と実際にインタラクトするために不可欠な情報を視覚からも判断しています。本研究室では、物体の見えからの光源状況、反射特性、物体形状、ならびに素材の推定に関する研究を中心に、メタバースや自動運転のための物体の見えや風景からのより豊かな物理的及び意味的情報抽出のための研究をおこなっています。



素材と物体形状復元

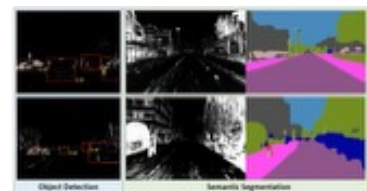
III より良く視る：人間は二つの目を用いて、可視光範囲内でこの世界を見ていますが、コンピュータはこのような撮像系に限られる必要はありません。本研究室では、より豊かな視覚情報を得るための、情報処理が一体化された新たな撮像システム（コンピューショナルフォト



運転環境における死角推定

グラフィ)の開発をおこなっています。最近の研究では、水面反射からの三次元寺院の復元、泳いでいる魚の高精細な形状復元、自動運転のための死角の推定などを実現しました。人間でも見ることができないものを見えるようにする、アッと驚く研究を多面的に展開しています。

IV 空間を視る：人やロボットが実世界を行動するためには、カメラやレーザーのような外界センサの情報から、空間の地図と自己位置の推定、さらに、シーンの意味的な理解が必要となります。本研究室では、この Spatial AI の要素技術として、Simultaneous Localization and Mapping(SLAM)やシーン認識、プライバシー保護などの研究に取り組んでいます。



イベントカメラを用いた物体検出・意味的領域分割

情報学研究科 通信情報システムコース デジタル通信分野（原田研究室）

原田博司教授 水谷圭一准教授 香田優介助教

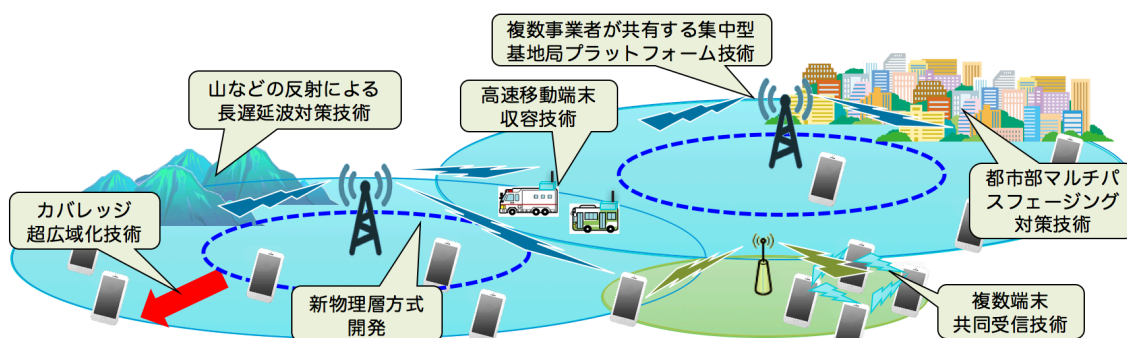
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

第 6 世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

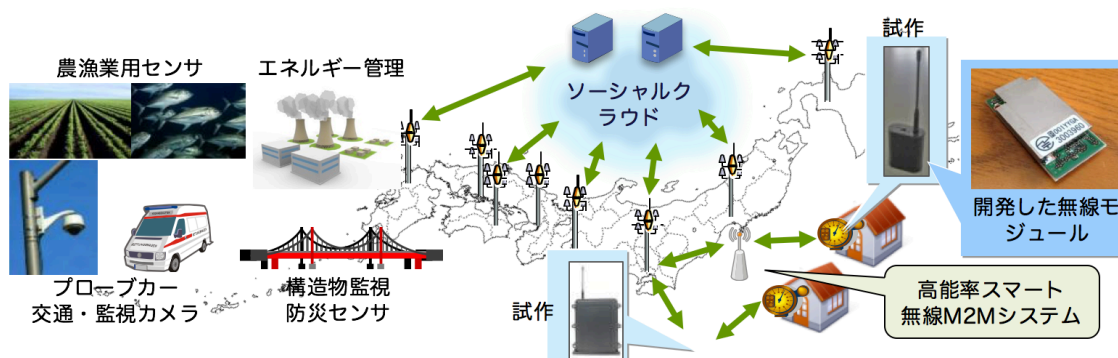
現在は誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、高速な伝送速度だけでなく、より高い信頼性や、リアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に「人と人の通信」だけでなく、ありとあらゆる物に無線機が内蔵され、様々な情報を収集するような「物と物との通信」など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信に使用出来る周波数資源には限りがあるため、このままでは爆発的に増加する無線通信への要求に応えることができません。現在、第 4 世代移動通信システム(4G)として LTE や WiMAX2 などの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでいますが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。そこで現在、2020 年代の実用化を目指した次世代の移動通信システム、いわゆる第 5 世代移動通信システム以降のシステム(Beyond 5G, 6G)の研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線 LAN、無線 PAN、および無線 M2M センサネットワークなども包括的に議論が行われています。

この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室では Beyond 5G, 6G に関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、新信号波形・新物理層方式の開発、複数事業者が共有する集中型基地局プラットフォーム技術、高周波帯を活用した端末共同超多重 MIMO 伝送技術、高能率スマート無線 M2M 通信システム、などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。

本気で世の中を変えられることができる無線通信技術の研究にチャレンジしてくれる皆さんが京都大学の電気電子工学科に入学してくれることを期待しています。



本研究室における Beyond 5G / 6G ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



本研究室におけるスマート無線 M2M システムに関する研究開発概要

情報学研究科 通信情報システムコース 伝送メディア分野

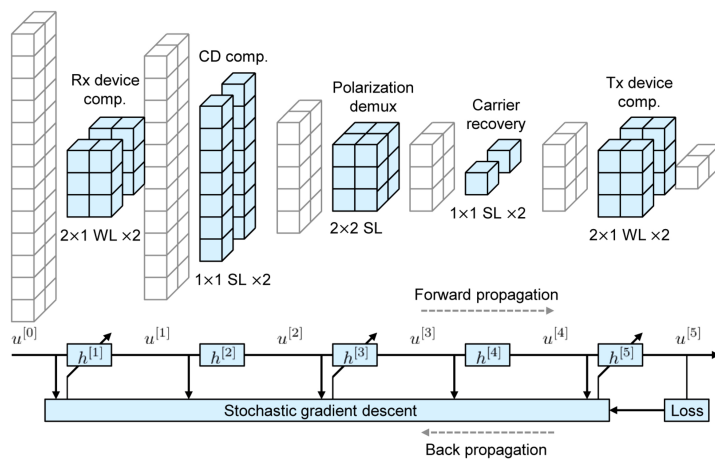
教授：林 和則

<https://u.kyoto-u.jp/imc>

本研究室では「通信のための信号処理」を中心テーマとして研究を行っています。信号処理とは、観測された生のデータから役に立つ情報を抽出したり、雑音などの不要な成分を除去したりするための技術です。このような信号処理の理論やアルゴリズムを用いて、携帯電話や Wi-Fi などの無線通信をはじめ、さまざまな情報通信システムに現れる問題の解決に取り組んでいます。最近の具体的な研究テーマの例は以下の通りです。

モデルベース機械学習に関する研究：

通信で用いられる多くの信号処理アルゴリズムは、同じ計算を何度も繰り返しながら少しずつ推定結果を改善していく仕組みで動作します。このような処理を時間軸方向に展開すると、現在の AI のコア技術となっているニューラルネットワークによく似た構造になります。このアプローチに基づいて、本研究室では、通信分野で長年培われてきた理論やアルゴリズムと、最新の AI・機械学習技術を融合した深層展開 (Deep Unfolding) という手法を研究しています。これにより、従来よりも高速かつ高性能な信号処理アルゴリズムを実現することを目指しています。



深層学習技術を用いた受信機的设计例

圧縮センシング（スパースモデリング）に関する研究：

観測されたデータから未知の情報を推定する問題は、多くの場合、連立一次方程式として表すことができます。しかし、観測データが十分に得られない場合には、未知数の数が式の数よりも多くなり、連立一次方程式を素朴に解くアプローチでは正しい答えを得ることができません。一方で、「ほとんどの未知数が0である」という性質（スパース性）が事前に分かっているならば、それを手がかりに少ない観測データからでも未知数を正確に推定できることが知られています。この手法は、圧縮センシング（スパースモデリング）と呼ばれ、医療画像や天文学など幅広い分野で利用されています。例えば、史上初めて撮影されたブラックホール画像の復元でも、このアイデアが活用されています。本研究室では、未知数がスパースである場合だけでなく、「1」や「-1」のような限られた値しか取らない場合にも、高精度な推定が可能であることを明らかにし、無線通信のさまざまな問題へ応用しています。また、通信分野にとどまらず、蛍光X線イメージングによる非破壊計測の超解像化や、超音波を利用した高精度トモグラフィ解析など、計測・イメージング分野への応用研究も行っています。

情報学研究科 通信情報システムコース 知的通信網分野（大木研究室）

教授：大木 英司

准教授：佐藤 丈博

助教：白木 隆太

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

大木研究室は情報通信ネットワークの研究開発を行っています。ネットワークとは、複数の人やデバイス、データ等が相互に接続されたものです。ネットワークに接続されたもの同士が互いに情報を交換し共有することで、新たな価値が生み出されます。例として、データ駆動型のネットワークシステムの概念図を図1に示します。スマートフォンや家電製品など、身の回りの様々なデバイスが取得したセンサデータは、ネットワークを介して、クラウドやエッジサーバに送られます。蓄積されたデータは、数理最適化や機械学習などの技術を活用して解析されます。その解析結果がデバイスにフィードバックされ、制御が行われます。これにより、多様なサービスがデバイスのユーザに対して提供されます。

このような便利なシステムを実現するためには、大量のトラフィックを送受信するネットワークや、データを収集し分析する計算機資源を高度に設計し、制御する技術が求められます。ネットワークが備えるべき要素として、高速性（大量のデータをリアルタイムに送受信できること）、信頼性（故障や災害が起きた場合でもサービスを継続できること）、柔軟性（サービスの特性や需要に応じてシステムを設計できること）が挙げられます。大木研究室は、これらの要素を兼ね備えたネットワークの実現に向け、理論から実装まで幅広いアプローチで取り組んでいます。図2に大木研究室における研究テーマの関連性を示します。代表的な研究テーマは以下の通りです。

1. 光ネットワーク

光ネットワークは、光送受信器・光ファイバ・光スイッチ等を使用して、拠点間に大容量の通信路を提供するネットワークです。大木研究室では、波長分割多重や空間分割多重を利用した光ネットワークにおいて、波長スペクトルや光ファイバコア等を有効的に利用する光ネットワーク制御技術・光通信技術を研究しています。

2. ネットワークのソフトウェア化/仮想化

ネットワーク仮想化とは、様々なサービスの提供に適した論理ネットワークを物理ネットワーク上に柔軟に構成し運用する技術です。仮想化技術を導入したネットワークにおいて、トラフィック観測やユーザの要求に基づく制御を行い、数理最適化や機械学習等の手法を用いて、ネットワーク資源の利用効率化を図る技術を研究しています。

3. 高信頼なネットワーク制御

ネットワーク上に流れるトラフィックの量やデータの処理時間には不確実性が存在します。また、ネットワークを構成するデバイスやリンクには故障が発生する可能性があります。これらの状況下でも継続的にサービスを提供できるように、ネットワークや計算機の割り当てを決めておく必要があります。数理最適化の手法を用いたモデル化、アルゴリズム設計、および実証実験等を行っています。

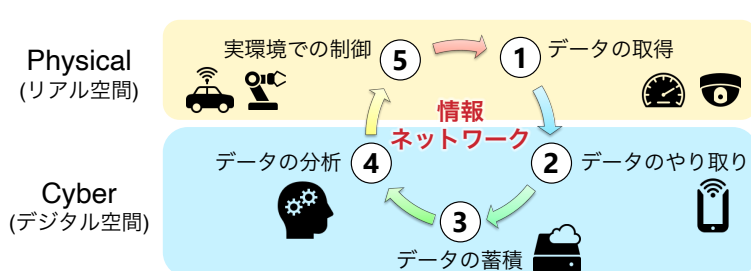


図1: データ駆動型のネットワークシステム

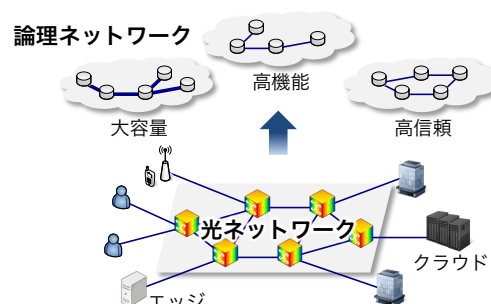


図2: 大木研究室の研究テーマ

情報学研究科 通信情報システムコース 情報回路アーキテクチャ分野

佐藤 高史 栗野 皓光

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

1. システム LSI とは?

私たちの身の回りには、スマートフォン、パソコン、デジタルカメラ、テレビ、ゲーム機など、さまざまな情報機器があふれ、今や日常生活に欠かせない存在となっています。これらの機器の中では、画像や音声の処理、高速な通信、AI による判断など、多様で高度な情報処理がリアルタイムに行われており、その中核には**大規模集積回路 (LSI)** が組み込まれています。皆さんはこうした情報機器の中身を見たことがあるでしょうか? 図 1 に示すように、内部には「基板(ボード)」と呼ばれる部品の上に、多数の電子部品が搭載されています。その中心的存在が LSI です。わずか数センチ角のチップの中に、数十億個ものトランジスタが配置され、論理的に接続されて機能を実現しています。このような LSI を製造するには高度なプロセス技術が必要ですが、それと同じくらい重要なのが、「どんな構成にすれば高性能・低消費電力になるか」「どうすれば短時間で正しく設計できるか」といった設計技術です。私たちの研究室では、こうした LSI の設計方法論やアーキテクチャ構成の研究に加えて、それらをどのように使うのかという「**応用技術**」にも力を入れています。たとえば、AI やロボティクス、医療・福祉分野で LSI をどのように組み込めばより賢く・安全に動作できるかといった、「**LSI を活かすための使い方の研究**」にも取り組んでいます。

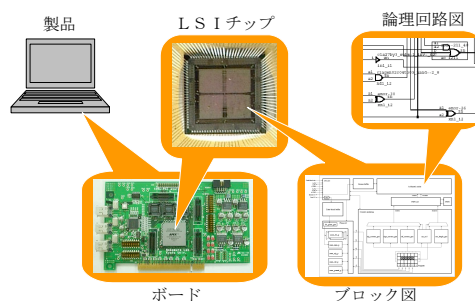


図 1: 情報機器の中身

2. 研究室の取り組み

新概念コンピューティング: シリコン集積回路のさらなる高性能化に加え、近年では、新たなデバイスや方式で計算を行うことで飛躍的かつ持続的に性能を向上させる様々な計算手法(新概念コンピューティング)が研究されています。本研究室では、透明でフレキシブルな回路を実現できる有機トランジスタの活用、遺伝子解析技術を用いる高度な情報処理などの新しい新概念コンピューティング手法の研究に注力しています。

また、一層の発展が見込まれる AI 向けの回路アーキテクチャ創出や、AI を用いる回路アーキテクチャ設計技術の確立にも取り組んでいます。さらに本研究室では、CMOS 集積回路を液体ヘリウム温度(マイナス 269℃)等の極低温まで冷凍機(右図)を用いて冷却し、量子計算機の動作に不可欠となる誤り訂正回路の研究や極低温化でトランジスタの極限性能を引き出す研究にも取り組んでいます。

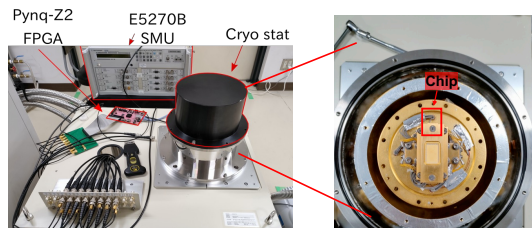


図 2: 極低温測定環境

機械学習アルゴリズムのハードウェアアクセラレータと「ロボティクス」応用: 深層学習 (DNN) は、人間に迫るしなやかな情報処理を実現する一方で膨大な演算を必要とするため、DNN の実行を加速する専用ハードウェアの研究に取り組んでいます。特にアナログ回路の特性を活かした DNN アクセラレータ、リザバーコンピューティング等を強みとしています。また、アクセラレータ開発に留まらず、応用研究にも取り組んでいます。具体的には、ヒューマノイドロボット(右図)を用いた家事タスク(衣類折り畳み)自動化を目標に掲げ、ハード・ソフト両面から困難な課題にアプローチしています。

耐量子暗号・バイタルセンシング: 量子計算が実現されても安全性を保証できる、耐量子暗号に対するハードウェアアルゴリズムや、準同型暗号によりプログラムやデータを保護したまま計算を実行できるセキュリティ回路の開発に取り組んでいます。また、動画画像や無線信号等を用いることで脈拍数やその微妙な揺らぎを非接触に観測するバイタルセンシング技術など、回路設計技術と信号処理手法を融合させた、先進的なセンシングシステムについても研究を行っています。

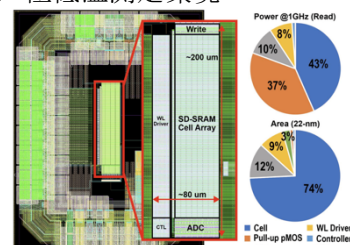


図 3: メモリ内で計算まで行う AI アクセラレータ

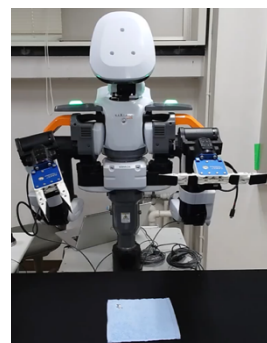


図 3: ロボット実験環境

大規模集積回路の高エネルギー効率化設計技術の研究開発を通して、社会をよりよくすることを目指します。大規模集積回路設計技術の基礎を身に着けるとともに、その特性を活かした社会実装までを見据えて、社会価値創造までつなげることを目指します。

1. 高エネルギー効率・大規模集積回路設計基盤技術の開発

大規模集積回路の高性能化は近年、歴史的な変換点を迎えています。ピーク性能の向上が難しくなり、高エネルギー効率化への注力化が鮮明となっています。スマートフォン向けのアプリケーションプロセッサにおいて、同じバッテリー容量下での演算性能が年々向上しているように、単位演算性能あたりのエネルギー効率は、改善の一途をたどっています。これは、半導体製造プロセスの微細化(28nm, 16nm, 7nm, 5nm...といった最小加工寸法の微細化)によるもので今後も継続が予想されており、0.2nm までのロードマップが描かれています。

本研究室では、この大規模集積回路の製造プロセスの進化に親和性が高く、半導体産業の発展に伴って拡張的に性能向上が可能(スケーラブル)な、高エネルギー効率・大規模集積回路設計基盤技術に取り組みます。回路技術をイラスト上で定性的に構想するところから、計算機での定量的なシミュレーション、そして実集積回路デバイス上での評価までを一貫して実施します。深い集積回路への知識と共に、応用を見据えて回路性能に落とし込む幅広い視野を育むことを目指します。下記にテーマ例を示します。

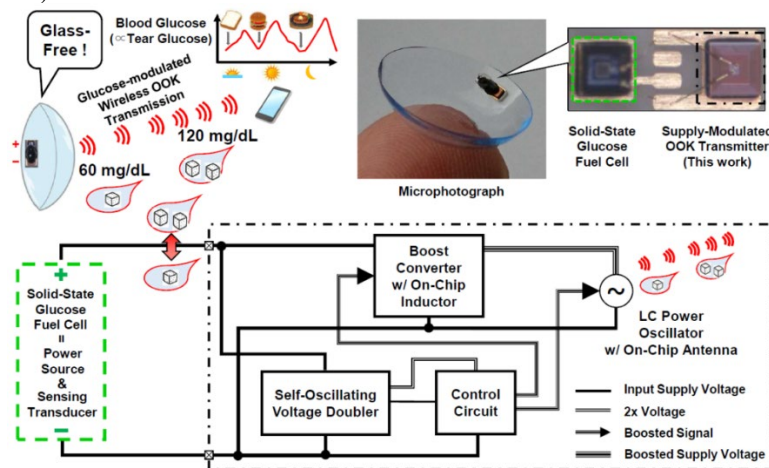
- ・環境適応自立動作 IoT 向け高エネルギー効率集積回路設計基盤技術(JST・さががけ)
- ・Beyond5G/6G に向けた 300GHz CMOS 無線トランシーバ集積回路(総務省・NICT Beyond 5G プログラム)
- ・3次元高空間分解能バイオイメージングに向けた分散型センサ集積技術(科研費・基盤 B)

2. 高エネルギー効率・大規模集積回路を活かした応用技術の開発

大規模集積回路の高性能化により、これまでは想定しえなかった新たな応用が花開いています。エネルギー効率の向上により、Beyond5G/6G を担う超低消費電力・超高速無線通信やバイオ・医療応用 IoT デバイスなど我々の生活を豊かにする技術が大規模集積回路の特長を活かして実現・開発されています。歴史的に、職人芸とされるアナログ・高周波向け大規模集積回路開発や開発リスクの高いバイオ・医療応用大規模集積回路開発は、大企業のみでなく小規模なスタートアップ・大学研究室からも革新的な成果が生まれています。

本研究室では、最終製品ならびにその製品を活用したサービス、そしてそのサービスを通じて実現される社会を自身で想定し、それを実現するための高エネルギー効率・大規模集積回路を設計・開発することを目指します。社会受容シナリオを描くことから、必要な大規模集積回路仕様の策定・そしてプロトタイプ作成までを一貫して取り組みます。将来最終製品として社会実装することを目指して研究開発を行います。アナログ・高周波向け大規模集積回路設計技術を身に付け、それを特定用途へと応用させて、社会実装までをイメージ可能なプロトタイプまでを作成できる力を育むことを目指します。下記にテーマ例を示します。

- ・センシング&無線通信集積回路を搭載したデジタル錠剤(内閣府ムーンショットプログラム目標 1・生体内 CA)
- ・涙液糖での単独自立動作型 AI 機能付持続血糖モニタコンタクト(NEDO 未踏チャレンジ 2050・メニコン社と共同)



情報学研究科 通信情報システムコース 集積コンピューティング分野

橋本昌宜 上野嶺 白井僚

社会はAIやIoTなどますます情報システム基盤に依存するようになってきています。人命や財産を取り扱う情報システムには高いセキュリティと信頼性が求められます。トランジスタの微細化によってもたらされた半導体デバイスの極低電力化・極小体積化は、環境に溶け込んだアンビエントコンピューティングを実現しつつあります。本分野では「コンピューティング基盤を創る」を掲げて研究を行っています。

高信頼コンピューティング

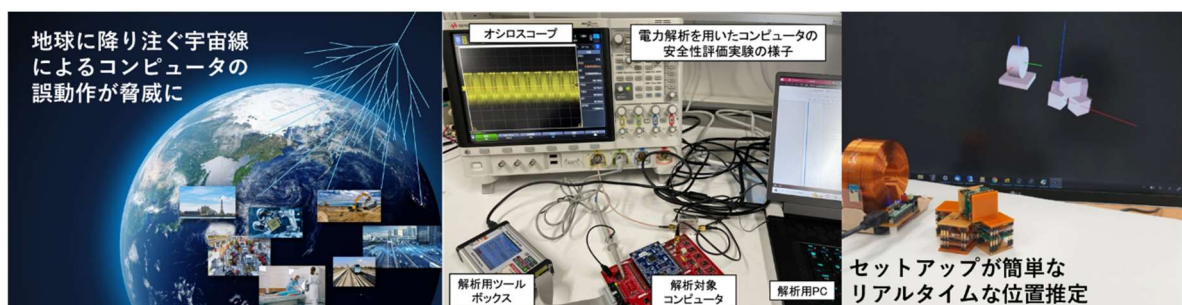
地上には宇宙線に起因する粒子が降り注ぎ、毎秒いくつもの粒子が我々の体も通り抜けています。この粒子が運悪くコンピュータのメモリ付近でシリコン原子と核反応を起こすと、ソフトエラーと呼ばれるビット反転が発生します。ソフトエラーは、システムの誤動作やクラッシュを招き、自動運転や介護ロボットでは人命の危機を招きます。本研究室では、実機評価とシミュレーションによるソフトエラーメカニズムの解明、システムのエラー耐性評価技術の開発を行っています。

安全なコンピューティング

コンピュータが価値のある情報を取り扱う機会が増えるにしたがって、不正に秘密情報を詐取する攻撃の脅威が増大しています。現代の情報セキュリティは、コンピュータチップ上で動作する暗号によって実現されていますが、コンピュータチップの消費電力からも秘密情報が漏えいするリスクがあることが知られています。本研究室では、暗号を安全に実装するための暗号実装理論や、暗号技術に基づくセキュアコンピュータアーキテクチャに関する研究を行っています。さらに、プライバシーとビッグデータの利活用の両立を目的として、データのプライバシーと機械学習モデルの両方を暗号化したまま推論結果が計算可能な秘匿推論フレームワークの開発も進めています。

アンビエントセンシング

我々の身の回りにはこれまでセンシングされていなかったけれども、生活の質向上や人間関係の円滑化に有益な情報が多くあります。プライバシーに配慮した方法で、センシングを意識することなく情報収集可能なセンシングデバイスの開発や、それを用いた人間とコンピュータのかかわりについて研究を進めています。



情報学研究科 通信情報システムコース リモートセンシング工学分野

横山 竜宏

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

当研究室では、天気は左右されずにいつでも上空の風速をリモートセンシング(遠隔計測)できるレーダーの開発研究を行っています。昭和 59 年に滋賀県甲賀市信楽町に完成した MU(ミュー)レーダーは、直径 103m の巨大アンテナと 1MW(通常の FM 放送局の約 100 倍)という大出力を誇るレーダーで、40 年以上経つ今でもこの種のレーダーとしては世界最高性能です。電気・電子技術の歴史的な偉業として「IEEE マイルストーン」にも認定されています。気象庁では平成 13 年から当研究室で MU レーダーの経験を基に開発した小型高性能レーダー 33 台を使ったレーダーネットワーク(「ウインドス」と呼ばれています)を導入し、毎日の天気予報に利用しています。ウインドスの導入によって、特に短期天気予報(2~3 日後までの予報)の精度が向上しました。

一方、数ヶ月以上先の長期予報はまだまだ外れることが多いです。それは、短期予報では日本付近のことだけを考えていれば良いのですが、長期予報では地球全体の影響を考えないといけないので、予報が難しいのです。特に、赤道付近の気象現象が世界の気象に与える影響は大きく、赤道域のエルニーニョ(スペイン語で「神の子(キリスト)」の意味です)・ラニーニャ(同じく「女の子」)現象が世界の異常気象の原因になっていると言われています。当研究室では、赤道域の中でも特に大気活動が活発なインドネシアのスマトラ島に、MU レーダーよりも一周り大きい直径 110m の巨大な赤道大気レーダー(面積は気象庁のレーダーの約 600 倍!)を建設しました。現在それを 10 倍高性能化する赤道 MU レーダー計画もあり、日夜、赤道上空の大気を観測し、研究を進めています。



インドネシアの赤道大気レーダーの写真。八木アンテナ 560 本で直径 110m の巨大アンテナが作られています。

さて、これらのレーダーは、気象観測だけではなく、実は高度 100km 以上の宇宙空間の観測に応用することもできます。高度 100km 以上では、太陽からの強烈な紫外線の影響で大気の一部が電離し、電離圏とよばれる領域を形成しています。地上一衛星間を行き来する電波は電離圏から(好ましくない)影響を受け、衛星通信や GPS による測位に深刻な障害を及ぼす場合があります。近年、数 cm 以内の誤差で測位を行える体制が整いつつありますが、電離圏による誤差は非常に大きく、GPS を利用した自動車の自動運転や農作業の無人化の実現のためには、電離圏の状況を正確に把握し、誤差を補正する必要があります。しかし、電離圏には未解明の現象がまだ数多く存在し、電離圏の予報、いわゆる「宇宙天気予報」はまだまだ難しいのが現状です。電離圏で発生する様々な現象の理解のために、上記のレーダー技術を応用し、新たな観測機器開発や、数値シミュレーション開発を融合させて研究を進めています。

☆ 当研究室は宇治キャンパスの生存圏研究所レーダー大気圏科学分野に属しており、工学部電気電子工学科、及び大学院情報学研究科通信情報システムコースの研究指導を行っています。

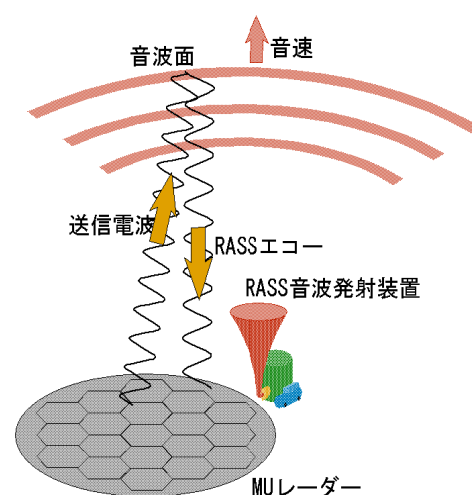
情報学研究科 通信情報システム専攻 地球大気計測分野

教授: 橋口浩之、准教授: 西村耕司

近年、いわゆるゲリラ豪雨など極端な気象現象の頻度が増していますが、地球温暖化がその一因であると言われています。極端気象のメカニズムを正確に理解し、天気予報の精度を向上させ、減災を目指すことが重要です。数値モデルの高度化により天気予報精度は格段に改善されていますが、同時に数値モデル計算の元になる観測データの発展も大変重要です。気象庁のアメダスのような地上定点観測では各種のセンサーを組み合わせることで気圧、風速・風向、気温、湿度等が常時測定されています。また、高層大気では、ラジオゾンデ気球による直接測定に加えて、電波と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ます。当研究室では、大気情報を得るための新リモートセンシング技術の開発を行っています。電波による測定では、降雨時には雨滴散乱を利用した気象レーダーが用いられ、晴天時はウィンドプロファイラーにより鉛直風を含む風速三成分が観測できます。以下では、ウィンドプロファイラーと音波を併用して気温の高度プロファイルを測定する技術である RASS (ラス、Radio Acoustic Sounding System) について紹介します。

ウィンドプロファイラー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)を検出しますが、RASS では音波で人工的に屈折率変動を作り出します。ウィンドプロファイラーの近くから発射された音波が大気中を伝わる際に、大気密度の粗密(大気屈折率変動)が生じます。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が求まり、気温と音速の関係(低温で遅く、高温で速くなる)から、音波が通過する各高度における気温を測定することができます。RASS エコーを検出するには、ウィンドプロファイラーのアンテナビーム方向が音波面と直交し、レーダー波長と音波波長の比が2対1となる必要があります。電波は風の影響を受けませんが、音波面は風により変形されるため、ウィンドプロファイラーで測定された風を用いてレイトレーシングの計算を行って、音波面とアンテナビームが直交する条件を求める手法を開発しました。一方、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りますので、単一周波数の音波では特定の高度しか測定できません。そこで、適切な音域で周波数をスイープして、広い高度範囲で RASS エコーを得る工夫をしています。

滋賀県甲賀市信楽町の MU レーダー(46.5MHz)では、約100Hzの音波を用いた RASS で、高度約22kmまでの気温観測に成功しています。この成果をもとに、我々がインドネシアの西スマトラで運用している赤道大気レーダーへの RASS 技術の転用を進めています。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すが、場所によっては騒音が問題になることがあります。そこで、鋭い指向性を持つ超音波パラメトリックスピーカーを用いた低騒音型 RASS システムの開発も行っています。



☆当研究室のホームページ http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/

☆当研究室は宇治キャンパスの生存圏研究所 大気圏精測診断分野に属しており、工学部 電気電子工学科の卒業論文、及び情報学研究科 通信情報システムコースの修士・博士論文の研究指導を行っています。

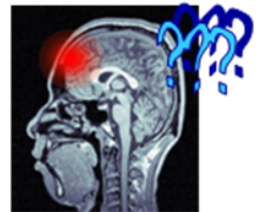
論理生命学分野

教授 石井信, 特定准教授 吉田和子, 講師 大羽成征, 助教 東広志

わたしたちの目的は, **生命や知性のシステムの数理モデル的理解**です. この目的のため, 生命科学と情報科学の融合による学際的アプローチに基づく研究領域を設定し, 多様な専門領域を背景に持つ学生・スタッフを結集し育ててゆきます. 以下, 具体的な研究領域の例を挙げます. モデル構築の研究を中心としながら, 理学的検証のための研究と, 工学的応用のための研究を共に重視しています.

複雑な環境における意思決定のモデル化と脳内過程の解明

ヒトの高次情報処理である「意思決定」過程の解明に, 情報学と認知科学との融合的アプローチによって取り組んでいる. 個体による意思決定・環境適合のモデルである「強化学習」に注目し, 変動するあるいは複数のエージェントが存在するような複雑な環境に対して, 効率よく適合する機械学習の方式を開発し, ロボットの制御などへ応用すること, また, 機械学習法として開発された「機械の知」が「自然な知」である脳において実現可能であるかどうかを認知科学実験と非侵襲脳活動計測装置を用いて検証すること, などを具体的な研究課題としている. さらに, ヒトの脳活動から意思決定に関する信号を再構成する, ブレインマシンインターフェースの研究も行っている.

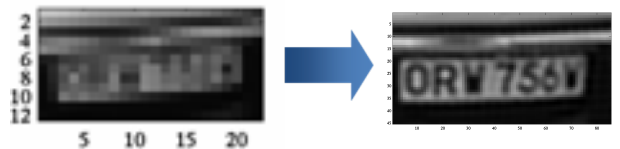


計算神経科学とニューロインフォマティクス

脳を構成する神経細胞の動作原理の謎に対して, 情報学の手法を駆使して迫っている. 神経細胞ネットワークにおける情報符号化方式を情報理論的観点から検討すること, 神経回路内に埋め込まれた部分ネットワークが学習によりどのように変化するか, などの課題に取り組んでいる.

ベイズ超解像と画像情報表現

情報学手法によって物理過程である光学系が規定する性能を超えた解像(逆光学)性能を獲得する技術を「超」解像と呼ぶ. 数理統計科学が開発してきたベイズ統計と仮説検定の理論がその基礎となっている. 超解像技術の発展により, 生命現象のモデリングに必須な生体高分子の高精度時空間計測や, 人間の認知あるいは感性に関わる情報の可視化技術の研究を行っている.



統計的バイオインフォマティクス

高次元の包括的生命情報を同時計測するさまざまな技術が開発され, 生命や知性のはたらきを研究するために用いられているが, 結果として得られる高次元データを操作するための数理統計的技術の開発は未成熟である. 多次元空間でのスパース性, 仮説検定の多重性などの困難の解決を目指した研究を行い, 非侵襲脳活動計測データ, 遺伝子発現データ, タンパク質活性時系列データなどの生命情報データへ適用してゆく.

研究の最新情報や詳細は研究室のウェブサイト <http://ishiilab.jp/> を参照してください.

生体の恒常性(ホメオスタシス)・動的適応性(アロスタシス)とその破綻機序の解明と医学応用

我々の主要な課題は、医工情報学領域の学際研究を通じて、生体機能発現の動的メカニズムの理解を深化させること、ならびに、病によって生体機能を変容する疾患メカニズムの解明を目指す医学研究に貢献する情報学・システム科学基盤を構築することです。特に、生体の状態を“最適な状態”に保つ性質であるホメオスタシス(生体恒常性)の概念を現代的視点から捉え直したホメオダイナミクスやアロスタシス(動的適応性)とその背後にある生体制御メカニズムを、具体的な生体機能を研究対象として明らかにすること、ならびに、ホメオダイナミクスの不安定化に起因する疾患(動的疾患)のメカニズムを明らかにし、生体制御のメカニズムに基づく疾患の定量的診断支援を可能にする医用システム開発を目的とした研究を行っています。

モデルベース研究とデータ駆動型研究の統合による生体機能・脳機能へのアプローチ

上述の目的を達成するために、生体機能が表出したメゾスコピックあるいはマクロスコピックスケールの生体時系列信号、具体的には、身体運動データや脳活動データ等を観測・取得し、それらの生体時系列データが示す複雑な変動、すなわち生体ゆらぎや生体リズムを数値指標化します。これは、我々の研究におけるデータ駆動型アプローチであり、生体ゆらぎの特性に基づく健康者と患者の分類や、患者の疾患重症度の数値化を可能にする機械学習装置や動的バイオマーカーの開発を推進しています。

一方、観測された生体ゆらぎを生成する動的制御システムを同定し、その非線形動態を数理的に解析するモデルベースアプローチは、我々の研究の中核課題です。観測データに同化された動的モデルには、生体ゆらぎを伴う健康機能の発現機序を説明する能力と、生体ゆらぎの変容に表出する疾患の発症、進行や医療的介入の効果を予測する能力があります。このとき、動的モデルの多くは、ホメオダイナミクスやアロスタシスによって実現される“最適な状態”を実現する強化学習系やモデル予測制御系として同定されますが、興味深いことに、外因性および内因性ノイズや、生体フィードバック制御で不可避な遅れ時間等、生体システム動態の不安定化を誘引する要素に溢れた環境の中で獲得される機能発現方策や制御様式は、巧みな仕組みによって、しばしば、柔軟性と頑健性を合わせ持つことがあります。人工的な工学機器に用いられるものとは本質的に異なる新しい制御様式を生体に学ぶことも、我々の研究の目的の一つです。

モデルベース研究とデータ駆動型研究を統合したアプローチの開発は、21 世紀の情報学・システム科学の最重要課題の1つであり、我々も、そうした統合的アプローチを見据えながら、医工情報学領域における種々の課題解決に貢献することを目指しています。

パーキンソン病による運動失調の脳内機序解明

我々の代表的な研究対象は、パーキンソン病に起因する運動失調です。パーキンソン病に起因した立位姿勢を含む四肢体幹や眼球姿勢の不安定化、あるいは歩行運動の不安定化は、ホメオダイナミクスの不安定化によって発症する動的疾患として捉えられることが分かってきています。パーキンソン病は強化学習の座である大脳基底核の疾患ですが、身体姿勢維持や歩行機能の実現と失調に大脳基底核における情報処理が重要な役割を果たしています。我々は、パーキンソン病患者における運動失調の脳内メカニズムの解明を目指し、運動計測、脳波・筋電図計測と、これらの時系列データに基づく生体運動の脳内制御系の同定に挑戦しています。

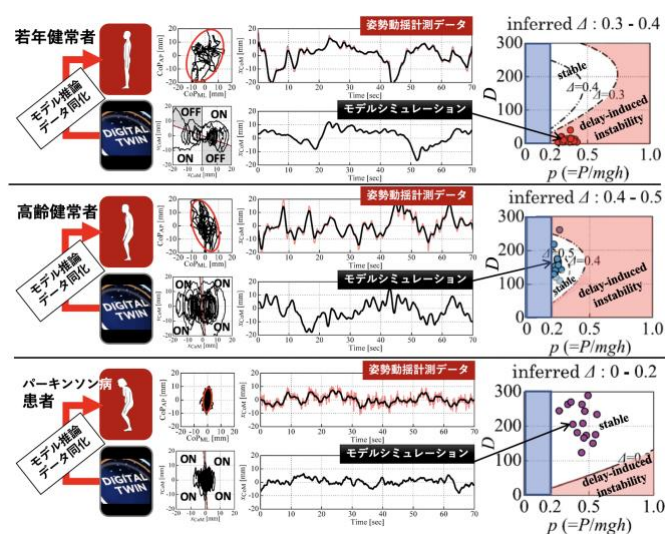


図 1. ヒト立位姿勢デジタルツインに基づく姿勢ゆらぎ解析

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻 エネルギー情報学分野

下田 宏、石井 裕剛、上田 樹美

<https://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/>

エネルギー資源の確保、安定供給、地球温暖化問題の対策等のエネルギー・環境問題の解決には、理工系の知識や技術だけではなく、エネルギーを利用する人間や社会をも含めた「エネルギー社会システム」という観点から総合的に問題を捉える必要があります。エネルギー情報学分野では、原子力発電をはじめとする大規模エネルギーシステムの安全で効率的な運用の問題から、私達の日常生活でのエネルギー消費行動まで、幅広く人間や社会にかかわるエネルギー・環境問題を解決するための新しい情報通信技術やヒューマンインタフェース技術の開発とその活用について、例えば下記のような研究を推進しています。

1. 拡張現実感技術を用いた発電プラント現場作業支援

福島第一原子力発電所の事故以来、我が国の多くの原子力プラントが停止する一方で太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーが十分に普及していない現状では、大規模集中型の発電プラントの安全で効率の良い運用が求められています。この研究では、計算機で生成した情報を現実世界に重畳して提示することにより情動的に人の知覚を拡張する拡張現実感技術を用いて、発電プラントの現場作業を支援する新しい手法の研究開発を進めています。

2. オフィス環境と執務者の知的生産性向上

家庭部門でのエネルギー消費の増加とともに、民生部門でのエネルギー消費も増え続けています。これは、知識やアイデアが価値を持つ情報社会の到来とともに、オフィスビルが増加しているためです。オフィスでの人々の労働はデスクワークのような知的作業ですが、近年、省エネのためにオフィス環境が不快になると執務者の知的生産性が低下することがわかってきました。ここでは、定量化が難しい知的生産性の計測方法から、オフィス環境と知的生産性の関連の実験的評価、さらには知的生産性変動メカニズムの数理モデル化等の研究を進め、知的生産性とエネルギー効率向上の両立を図る新しいオフィス環境の研究開発に取り組んでいます。

3. 環境配慮行動の促進

我が国のエネルギー消費は産業部門を中心に改善されていますが、家庭部門では人々の省エネ行動の促進のような改善の余地がまだまだ残されています。ここでは、情報通信技術を用いて、人々が省エネ行動のような自然に環境にやさしい行動をしたくなるような仕組みを考案し、その効果を実験にて定量的に検証する研究を進めています。



ヒューマンインタフェース技術で支える
新しいエネルギー社会システムの創成



フュージョン（核融合）エネルギー ～ 宇宙のエネルギー源

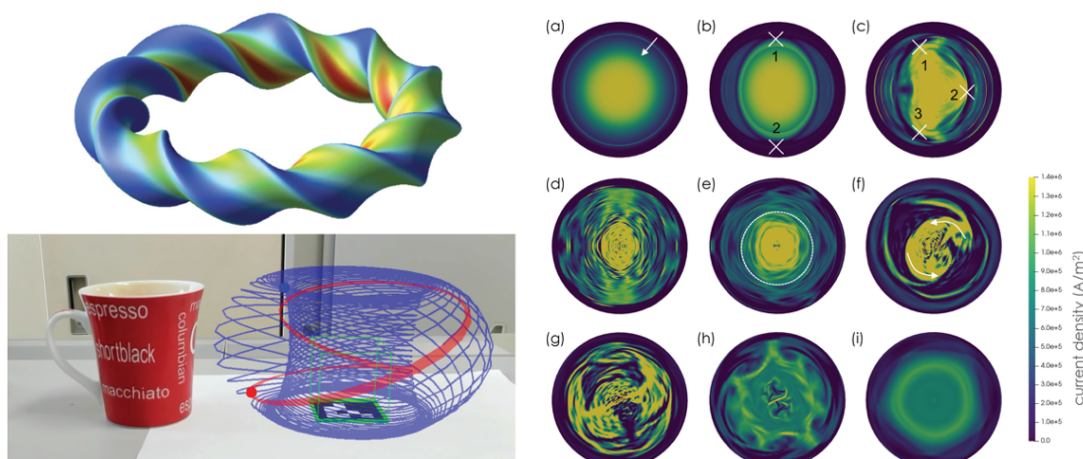
水素やヘリウムなどの軽い原子の核同士がぶつかって起こる「核融合反応」は、わたしたちの宇宙が誕生してから 3 分後、宇宙の温度が約 10 億度のときに活発だったとされています。核融合は、太陽が輝き続けるエネルギー源でもあり、人類が手にできる究極のエネルギー源の一つです。私たちの研究室では、この核融合エネルギーを利用するための手段として、1 億度を超える超高温のプラズマを磁場の力でコントロールする手法を研究しています。

1 億度の温度差の世界とはどんなものなのでしょうか？

原子番号 1 番の水素は、私たちの身の回りでは気体の形で存在しています。（温度をどんどん下げていくと、約マイナス 260 度で固体になります。）では、逆に水素の温度はどれだけ上げることができるのでしょうか？ 実験では、燃料となる水素を核融合反応が活発になる数億度にまで加熱します。そのときの水素は、原子を構成する陽子と電子がバラバラになった「プラズマ」という状態になります。研究室では、このような超高温のプラズマを安定的かつ長時間維持する物理学、「プラズマ物理学」の研究を行なっています。

AI が未来のエネルギー実現のカギ？

核融合エネルギーの利用は、実は 70 年以上前から研究が行われてきました。しかし、まだ実用化には至っていません。その理由のひとつは、核融合に使う高温プラズマがとても複雑なふるまいをすることです。専門的な言い方をすると、プラズマの性質には「非線形性」や「非局所性」といった特徴があり、それが安定な制御の難しさにつながっています。また、高温プラズマをコントロールするには、千分の 1 秒から 1 万分の 1 秒といった短い時間スケールで磁場や加熱の調整を行う必要があります。つまり、人間が目で見ても対応するのは難しく、「自動制御」が欠かせません。そこで注目が集まっているのが AI（人工知能）やスーパーコンピュータなどの情報技術です。研究室では、プラズマの挙動を予測するシミュレーションの開発や AI による高性能の炉（リアクター）の設計といった、物理学と情報技術を融合した未来のエネルギーの研究を世界中の研究機関や企業と協力してすすめています。



エネルギー科学研究科・エネルギー応用科学専攻 エネルギー応用基礎学分野

教授: 土井俊哉, 准教授: 池之上卓己

<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/index.html>

持続可能な社会の実現のための課題の一つがエネルギー問題です。太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーは、その解決策と考えられており、地球上の砂漠のわずか 4% の面積に効率 10% の太陽電池を敷き詰めて発電するだけで、全世界の消費エネルギーを電気エネルギーとして供給できるとの試算もあります。これを実現するには、世界中に電気エネルギーの損失なく送電可能な「超伝導送電線」や、エネルギーを貯蔵できる「電池」が不可欠です。また、様々な「電力変換素子」の損失は熱となるため、低損失の素子を作ることも重要です。

当研究室では、次世代のエネルギー問題および環境・資源問題の解決のために、(1) 高性能な超伝導電線の実用化、(2) 全固体二次電池の実用化、(3) ワイドバンドギャップ材料を用いた低損失パワーデバイスの実現を目指しています。

(1) 結晶方位を揃えた高温超伝導線材の開発

高温超伝導体物質はどこでも手に入る液体窒素で冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態となる画期的な材料です。ところが、超伝導体は、通電方向を考慮して結晶の向きを三次元的に揃える必要があります。当研究室では、写真 1 のように、独自に開発した結晶方位を揃えた金属テープ上に、半導体製造技術とプラズマ、イオンビーム、レーザー(写真 2)などを組み合わせた新しい成膜技術を駆使して結晶の向きを揃えた高温超伝導体物質を作製することに成功しました。また、新規な結晶整列手法、エピタキシャル成長技術、分析・解析技術の開発にも取り組んでいます。

(2) 全固体二次電池の開発

リチウムイオン電池などの二次電池は、電力の貯蔵だけでなくスマートフォンや PC などのデバイスにも利用されています。しかしながら、リチウムイオン電池は液漏れ、発火などの安全性の課題を抱えており、安全性の高い電池として全固体電池が注目されています。当研究室では、酸化物系の Li_2MnO_3 、 LiFeO_2 などの正極材料と全固体薄膜電池の研究を行っています。

(3) ワイドバンドギャップ材料を用いた低損失パワーデバイスの実現

自動車、家電、電力インフラなどの様々な分野で用いられるのが電力変換デバイスです。その効率向上が求められており、そのキーとなるのがパワーデバイスです。バンドギャップの大きな材料は、絶縁破壊電界強度が大きいので、電力損失を大幅に低減できるパワーデバイス材料として注目されています。当研究室では、ワイドバンドギャップな酸化物半導体材料に注目し、酸化物半導体を、溶液を用いて大気圧下で成膜できるミスト CVD 法(写真 3)という技術を用いて、高品質な結晶成長技術の開発とそのパワーデバイスへの応用に関する研究を行っています。



写真 1. 全ての結晶の向きを同じ方向に揃えた金属テープ



写真 2. レーザー蒸着装置とイオンビーム蒸着装置

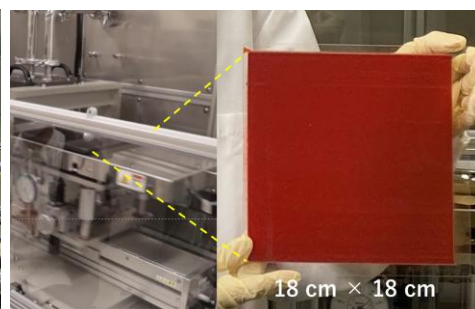


写真 3. 大面積ミスト CVD 装置と大面積成膜の例

1. 研究の概略

我々が直面しているエネルギー問題の解決に向けて「創エネルギー」、「省エネルギー」および「蓄エネルギー」のそれぞれにおいて、材料・デバイスのブレークスルーを起こす必要があります。そのために、当研究室では原子レベルで物質の構造や組成を制御可能な薄膜作製技術を用いて、新たな機能をもつ材料・デバイスを作製し、様々な分析手法を用いてその特性を明らかにします。特に、超短パルスレーザーを利用したテラヘルツ分光法などの先進的な光計測手法により、電子やイオンのダイナミックな振る舞いを計測しています。このように、当研究室では材料の合成からデバイスの作製、そして特性の計測・解析まで一貫して行い、次世代のエネルギー材料・デバイスの開発を目指しています。

2. 主な研究課題

薄膜型全固体電池の開発

高度な薄膜作製技術を用いて、これまで組み合わせることができなかった材料（例えば大きな格子不整合のある組み合わせの材料や、バルクでは実現できない構造を持つ材料など）を積層することにより、従来のバルク型二次電池より遥かにエネルギー密度の高い電池の作製を目指しています。また、太陽電池、半導体素子、センサーや無線回路などと同じ基板の上に超小型二次電池を集積させる技術開発を行っています(図1)。従来は薄膜電池用の基板として使用することが困難であった、Al や Cu の上に酸化物正極を作製することなどに成功しています。

テラヘルツ波による評価技術開発

光と電波の中間の性質を持つ、周波数が約 1 THz のテラヘルツ波を用いて、様々な材料・デバイスの評価技術開発を行っています。太陽電池、パワー半導体、二次電池などの様々なエネルギー材料・デバイスやナノカーボンなど新規材料の内部および表面・界面における電子や原子およびイオンなどが、10 兆分の 1 秒程度の時間間隔で、どのように動くかが測定しています。これまでに、太陽電池、ワイドギャップ半導体(GaN, SiC など)、カーボンナノチューブなどのキャリアや分極の測定に成功しています(図2)。

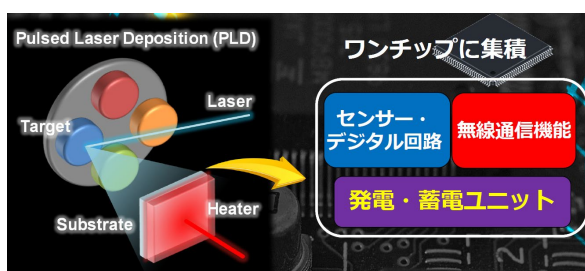


図1. 薄膜技術を用いた機能集積の概念図

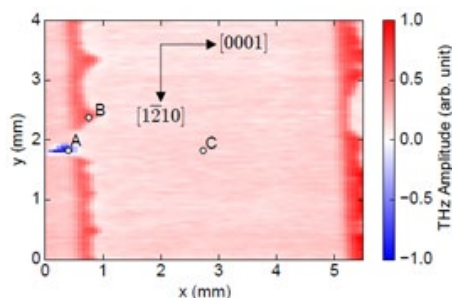


図2. テラヘルツ波による GaN 表面の分極構造の可視化



京都大学電気関係教室技術情報誌
「高校生のページ」特集

京都大学電気関係教室が発行している技術情報誌「cue」に連載中の「高校生のページ」を抜粋して編集しました。

「cue」という誌名が選ばれた背景には、この英単語のもつ“きっかけ”、“合図”、“手掛かり”という意味合いの他に、この英単語の響きが研究の「究」(極める)と合致しており、さらには私たち電気系教室の愛称 KUEE (Kyoto University Electrical Engineering)に通じるものがあるといった理由があります。情報誌「cue」は電気系教室の研究活動に関する報告のみならず、産業界の技術動向に関する報告を含める形で定期的に発行されており、下記のweb ページにも公開されています。

<https://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue/index.html>

web ページでの公開の目的は、私たちの研究活動を広く社会の方々に知って頂くことですが、その対象として進学を控えた皆さんを強く意識しています。『高校生のページ』が設けられているのもこのためです。本日のオープンキャンパスにおいて得られる知見とは少し異なる、より踏み込んだ形で私たちの研究活動の概要を「cue」から読み取っていただけたと思います。

ぜひ一度、web ページを訪問してみてください。



電気電子工学科 オープンキャンパス2026 実行委員会

目 次

(本文中の所属は執筆当時のものです)

1. 低電力・小型・高速半導体集積回路の設計・開発とそのバイオ・医療IoT 応用
～バイオ発電と低電力センサ集積回路を用いた単独自立動作持続血糖モニタコンタクト、
非侵襲・早期がん診断を行う半導体集積回路の開発～ (第51号)
新津葵一 1
2. 2014 年ノーベル物理学賞から10 年— 21 世紀の照明革命の意義と将来展望 (第52号)
川上養一 6
3. 入出力システムと制御理論 (第53号)
萩原朋道 13
4. 超伝導応用のこれまでとこれから (第54号)
雨宮尚之 21
5. 軽量機械学習の原理と応用 (第55号)
佐藤高史 28

低電力・小型・高速半導体集積回路の設計・開発と そのバイオ・医療 IoT 応用 ～バイオ発電と低電力センサ集積回路を用いた単独自立動作 持続血糖モニタコンタクト、非侵襲・早期がん診断を行う 半導体集積回路の開発～

大学院情報学研究科 情報学専攻 通信情報システムコース
集積システム工学講座 大規模集積回路分野
(兼担) 工学部 電気電子工学科
新 津 葵 一

1. はじめに

私たちの日々の情報社会を下支えしている技術の一つが、半導体集積回路です。半導体集積回路は、あらゆる分野において活用され、無くてはならない戦略物資となっています。半導体集積回路が発明された当初は、半導体を設計・開発できるのは、大規模な半導体製造工場を有するごく一部の企業のみでしたが、現在は水平分業がすすみ、工場を持たなくても設計・開発が可能となっています。

例えば、米アップル社が販売する iPhone や iPad、Macbook に使われている半導体集積回路の中で、演算（コンピューティング）や画像処理、AI 機能を担うアプリケーションプロセッサ（iPhone では A シリーズプロセッサ、Macbook では M シリーズプロセッサなど）は、米アップル社自身が設計を行い、製造は台湾 TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) 社が行っています。このような、設計と製造を水平分業するビジネスモデルは、ファウンドリ・ファブレスモデルと呼ばれ、昨今の半導体集積回路産業において主流となっています。

ファウンドリ・ファブレスモデルにおいては、代表的なファウンドリ企業・ファブレス企業があります。ファウンドリについては台湾 TSMC 社、米 Globalfoundries 社、中国 SMIC 社、台湾 UMC 社などがあり、日本国内においても、Rapidus 社などにおいて研究開発が行われています。一方、ファブレス企業については、先述の米アップル社、GPU で有名な米 NVIDIA 社、Android 搭載スマートフォンで有名な米 Qualcomm 社などが挙げられます。1 社のみでファウンドリ機能（製造）もファブレス機能（設計）も両方有する企業、いわゆる垂直統合型の半導体企業は、PC 向けプロセッサで有名な米 Intel 社、韓国 Samsung 社、NAND フラッシュメモリを開発する日本・キオクシア社などが挙げられます。

このようなファウンドリ・ファブレスモデルが普及した中で、半導体集積回路設計研究において大学に大きなチャンスが巡ってきました。大学の 1 研究室ですと人数も研究開発費でも限られておりますが、小規模な試作であれば実施が可能となっています。

私どもの研究室では、目指す社会像を想定し自らアプリケーションを開拓し、それを可能にする低電力・小型・高速動作半導体集積回路設計技術を確立して、実集積回路システムまでを開発することを目指して研究開発を行っています。

2. 低電力・小型半導体集積回路の設計・開発とそのバイオ・医療 IoT 応用

半導体集積回路の低電力・小型という特長を活かして、高エネルギー効率大規模半導体集積回路設計技術の研究開発とその応用開発を行っています。

半導体集積回路システムの低消費電力化に貢献し、さらにその性能を活かして新たなアプリケーションを開拓する発電センシング一体型集積センサシステムの開発を行いました。誘導結合通信と時間分解能回路の導入により世界最低電圧のバイオセンサ集積回路を実現し、世界初のバイオ発電素子を用いた電力自立バイオセンサを実現しました。バイオ発電素子の出力を電源とセンシング信号に活用する発電センシング一体型集積センサ技術を提案し、糖尿病医療への貢献につながる低負担の持続血糖モニタリングの基盤技術を確立しました。

発電センシング一体型集積センサは、“バイオ発電素子を電力供給源並びにセンシングトランスデューサとして一体的に活用する”技術です。センサを駆動するために必須であったバイアス電圧供給回路が不要となり、飛躍的な低コスト化・低消費電力化が可能となりました。さらに、糖尿病医療・予防に貢献するコンタクトレンズ型持続血糖モニタリング装置の開発に世界で初めて成功しました。グーグル関連会社の従来装置は、無線電力伝送を用いていたために電力供給用メガネ端末が必須でしたが、開発した発電センシング一体型集積センサシステム技術により、単独動作可能・電力自立化が可能となりました。半導体集積回路製造プロセスで製造可能な糖発電素子 製造技術を提案し、0.6mm 角と世界最小サイズの糖発電素子の開発に成功しました。サイズ 0.385mm 角・電源電圧 0.165V・消費電力 0.27nW の 1mm 角以下のサイズとしては世界最小電力の無線送信機集積回路の開発に成功しました。これらを融合し、世界で初めてメガネ型端末不要のコンタクトレンズ型持続血糖モニタリングの実証に成功しました。

半導体集積回路システム全体の高エネルギー効率化に向けたエネルギー・データ地産地消 IoT システムの開発を行いました。IoT システムにおいて、エネルギー効率を左右するのが、エネルギーとデータ

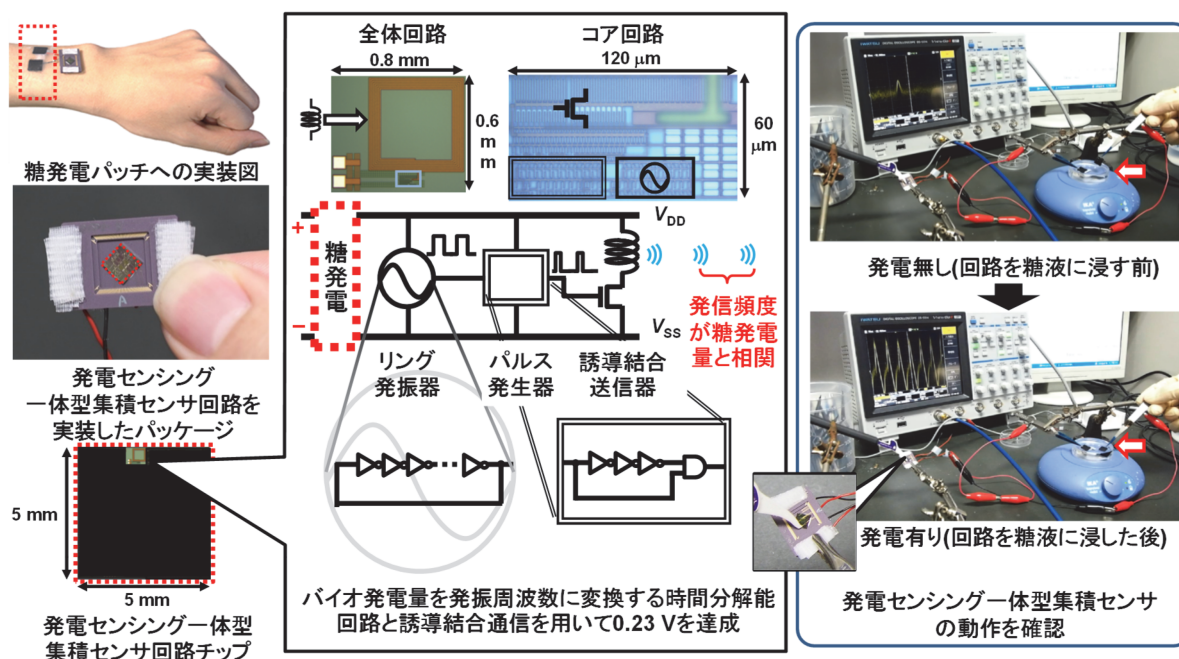
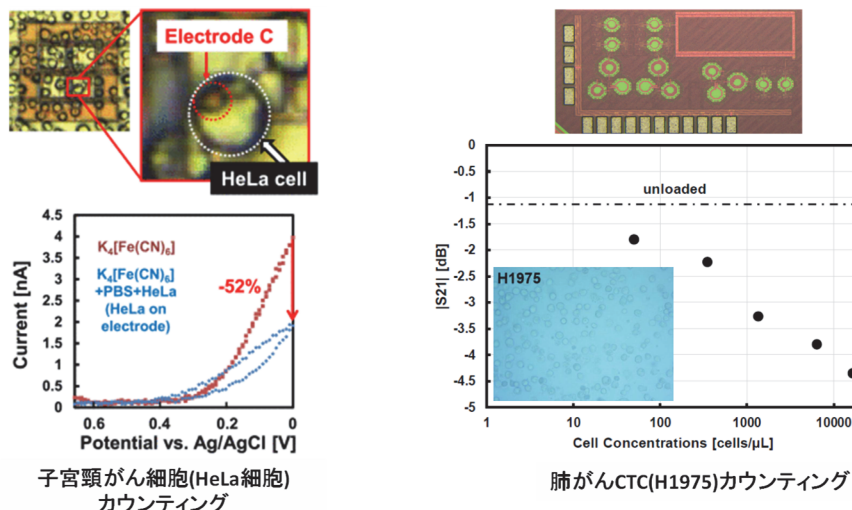


図 1：開発した世界初のバイオ発電素子（糖発電素子）と融合した電力自立バイオセンサ：発電量をそのままセンシング信号としても活用する「発電センシング一体型集積センサ技術」の有効性を実証、時間分解能回路と誘導結合通信の導入により 0.23V を達成

- 低侵襲がん治療に向けた半導体集積回路システムを提案
- 世界最高密度のバイオセンサ回路を実現し、がん細胞(子宮頸がん細胞)のカウンティングに成功



図：開発した世界初の半導体集積回路を用いた子宮頸がん細胞・肺がん CTC(Circulating Tumor Cell：末梢血浮遊がん細胞) カウンティング技術

システムの開発に取り組みました。世界最小クラスの糖発電素子とサブ平方ミリサイズで超低消費電力のセンシング・LED 駆動集積回路技術、室内光で発電可能な集積回路上太陽光発電素子を開発し、それら3つを融合した集積回路システムを搭載したコンタクトレンズを試作しました。

さらに、糖尿病患者の方々の無自覚性低血糖を未然に防ぐための、機械学習を用いた低血糖警告技術を開発しました。これらにより、外部機器や電波を必要とせずコンタクトレンズ単独での持続血糖モニタリングと低血糖警告を可能としました。

3. 高速動作を活かした非侵襲・早期がん診断を行う半導体集積回路の開発

低侵襲がん治療向け半導体集積回路システムを提案しました。1024 × 1024 画素・3.6 μ m × 4.45 μ m ピッチと世界最高密度のバイオセンサ回路を実現し、がん細胞（子宮頸がん細胞）のカウンティングに成功しました。従来用いられていなかった無電解金メッキ技術を集積回路上の電極形成に活用し、1.2 μ m × 2.05 μ m と世界最小サイズの集積回路上金電極形成に成功しました。電極形成技術と電流検出回路技術と融合することで集積回路上でのがん細胞検出技術を実現している。さらに本技術を発展させ、集積回路上ミリ波帯ネットワークアナライザと伝送線路を用いて低消費電力に CTC（抹消血浮遊がん細胞）ならびにエクソソームを検出する集積回路技術の開発に世界で初めて成功しました。グルコースのミリ波帯における伝搬特性の濃度依存性を用いた非侵襲血糖モニタリングについても開発を行い、世界で初めて耳装着型非侵襲血糖モニタリング集積回路の実証に成功しました。

参考文献

集積システム工学講座 WEB ページ：<https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

新津研究室 WEB ページ：<http://id-lab.jp/>

個人 WEB ページ：<https://www.niitsulab.info/>

- G. Chen, Y. Wang, T. M. Quan, N. Matsuyama, T. Tsujimura and K. Niitsu, "A 0.5 mm² Solar Cell-Powered Biofuel Cell-Input Biosensing System with LED Driving for Stand-Alone RF-Less Continuous Glucose Monitoring Contact Lens", *IEEE Solid-State Circuits Letters (SSC-L)*, vol. 5, pp. 41–44, Feb. 2022.
- A. Tanaka, G. Chen, and K. Niitsu, "A 4.5-mW 22-nm CMOS Label-Free Frequency-Shift $3 \times 3 \times 2$ 3D Biosensor Array Using Vertically-Stacked 60-GHz LC Oscillators", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs (TCAS-II)*, vol. 69, no. 10, pp. 4078-4082, Oct. 2022.
- K. Niitsu, T. Nakanishi, S. Murakami, M. Matsunaga, A. Kobayashi, N. M. Karim, J. Ito, N. Ozawa, T. Hase, H. Tanaka, M. Sato, H. Kondo, K. Ishikawa, H. Odaka, Y. Hasegawa, M. Hori, and K. Nakazato, "A 65-nm CMOS Fully Integrated Analysis Platform Using an On-Chip Vector Network Analyzer and a Transmission-Line-Based Detection Window for Analyzing Circulating Tumor Cell and Exosome", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS)*, vol. 13, no. 2 pp.470-479, Apr. 2019.
- K. Hayashi, S. Arata, S. Murakami, Y. Nishio, A. Kobayashi, and K. Niitsu, "A 6.1nA Fully-Integrated CMOS Supply-Modulated OOK Transmitter in 55nm DDC CMOS for Glass-Free, Self-Powered, and Fuel-Cell-Embedded Continuous Glucose Monitoring Contact Lens", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II (TCAS-II)*, vol.65, no.10, pp.1360-1364, Oct. 2018.
- K. Niitsu, A. Kobayashi, K. Hayashi, Y. Nishio, K. Ikeda, T. Ando, Y. Ogawa, H. Kai, M. Nishizawa, and K. Nakazato, "A Self-Powered Supply-Sensing Biosensor Platform Using Bio Fuel Cell and Low-Voltage, Low-Cost CMOS Supply-Controlled Ring Oscillator with Inductive-Coupling Transmitter for Healthcare IoT", *IEEE Transactions on Circuits and Systems I (TCAS-I)*, vol.65, no.9, pp.2784-2796, Sep. 2018.
- A. Kobayashi, K. Ikeda, Y. Ogawa, H. Kai, M. Nishizawa, K. Nakazato, and K. Niitsu, "Design and Experimental Verification of 0.19 V 53 μ W 65 nm CMOS Integrated Supply-Sensing Sensor with a Supply-Insensitive Temperature Sensor and Inductive-Coupling Transmitter for a Self-Powered Bio-Sensing Using a Biofuel Cell", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS)*, vol.11, no.6, pp.1313-1323, Dec. 2017.
- K. Niitsu, S. Ota, K. Gamo, H. Kondo, M. Hori, and K. Nakazato, "Development of Microelectrode Arrays Using Electroless Plating for CMOS-Based Direct Counting of Bacterial and HeLa Cells", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS)*, vol.9, no.5, pp.607-619, Nov. 2015.
- K. Niitsu, M. Sakurai, N. Harigai, T. J. Yamaguchi, and H. Kobayashi, "CMOS Circuits to Measure Timing Jitter Using a Self-Referenced Clock and a Cascaded Time Difference Amplifier with Duty-Cycle Compensation", *IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC)*, vol.47, no.11, pp.2701-2710, Nov. 2012.
- K. Niitsu, N. Harigai, D. Hirabayashi, D. Oki, M. Sakurai, O. Kobayashi, T. J. Yamaguchi, and H. Kobayashi, "A Clock Jitter Reduction Circuit Using Gated Phase Blending Between Self-Delayed Clock Edges", in *Proc. IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSIC 2012)*, Jun. 2012, pp.142-143.
- K. Niitsu, Y. Shimazaki, Y. Sugimori, Y. Kohama, K. Kasuga, I. Nonomura, M. Saen, S. Komatsu, K. Osada, N. Irie, T. Hattori, A. Hasegawa, and T. Kuroda, "An Inductive-Coupling Link for 3D Integration of a 90nm CMOS Processor and a 65nm CMOS SRAM", in *Proc. IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2009)*, Feb. 2009, pp.480-481.

量子機能工学講座 光材料物性工学分野（川上研究室）

<https://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「2014 年ノーベル物理学賞から 10 年 — 21 世紀の照明革命の意義と将来展望」

はじめに ～ いろいろな半導体材料

数年前から「半導体不足」が指摘されるようになり、「半導体工場」の建設が大きな話題になっています。ここでいう「半導体」とは、シリコン (Si) による電子部品のことです（ちなみに Si 自体は地球の主たる構成元素であり不足のしようがありません）。半導体の王様とも称される Si が代表的な半導体材料であることは論を待ちませんが、特性上の制限から、他の半導体材料が用いられる分野も多数あります。例えば、省エネルギー性に優れたパワー電子デバイスには SiC や窒化物半導体、酸化半導体が、光デバイスには III-V 族半導体 [1] や窒化物半導体 [2] が用いられます。われわれの研究室は光材料物性工学分野ですので話を光デバイスに絞ると、代表的な光デバイスとしてはレーザダイオード (LD) や発光ダイオード (LED) があります。より具体的に、普段の生活で活躍する III-V 族半導体光デバイスとしては、光通信用 LD、リモコン用赤外 LED、スマートフォンなどで用いられる顔認証用の赤外線面発光 LD (VCSEL)、バーコードリーダー用赤色 LED（一部 LD もあり）などがあります。窒化物半導体光デバイスは紫外～可視光が得意で、白色 LED がいまや照明器具にほとんど必要不可欠ですし、スマートフォンや PC の液晶のバックライトにも用いられています。また、青色や緑色 LED が交通信号や屋外ディスプレイなどに利用されています。

半導体からの発光現象を理解するには、電子の波動性を考慮したエネルギーバンド構造が重要な役割を果たします。そもそも半導体には、伝導帯と呼ばれるエネルギーバンドと価電子帯と呼ばれるエネルギーバンドがあり、電子がその間のエネルギー状態をとれないという特徴があります。それらエネルギーバンド間の差を（電子が存在できないという意味で）禁制帯幅と呼びます。伝導帯にいる電子が価電子帯に遷移する際に禁制帯幅に相当するエネルギーを光として放出するのが LD や LED の基本原理ですが、その遷移の起きやすさ・起きにくさが半導体材料によって異なります。波動性を記述する波数が遷移の前後で変化しない直接遷移と比べて、変化する間接遷移は遷移が起きにくい傾向があり、Si は後者の特性を示す半導体であるため光材料には適さないとされています [3]。一方で、多くの III-V 族半導体や窒化物半導体では直接遷移するので、光デバイス用材料として重用されています。

もう一つ重要な視点は禁制帯幅そのものです。Si の禁制帯幅は、波長換算すると 1.1 μm （赤外線）なので、原理的に、よりエネルギーの高い可視光や紫外光は出せません。一方、代表的な窒化物半導体である AlN, GaN, InN の室温での禁制帯幅は波長換算でそれぞれ 207 nm, 361 nm, 2 μm であり、それらを混ぜた $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶や $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶の禁制帯幅は、それぞれ 207~361 nm と 361 nm~2 μm になることから、前者は紫外域を後者は可視全域をカバーすることになります。ちなみに、金属、半導体と絶縁体を区別するのは禁制帯幅の大きさです。金属には禁制帯はありません。また基本的には、禁制帯幅が大きいほうが絶縁体的な特性を示すのですが、その基準は実は時代とともに変わってきています。例えば、従来 AlN は絶縁体に分類されていましたが、技術の進展に伴い、いまや紫外光デバイスやパワー電子デバイス用の重要な半導体とみなされています。

このように、用途によって適切な特性を持った半導体を選択することが光デバイス応用に向けては必要です。われわれの研究室では、窒化物半導体の光材料としてのポテンシャルを明らかにし、それを新奇デバイスへと応用する研究を行っています。

窒化物半導体の開発

一般に光デバイスは、ある単結晶基板の上にエピタキシーと呼ばれる結晶成長法によって単結晶薄膜の n 型層、量子井戸 (QW) あるいは ダブルヘテロ発光層、 p 型層を順次積層することによって作製されます。図 1 に窒化物半導体、とくに $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 系材料による可視 LED の概略図を示します。この構造を作製するにあたり、図中および下記 (1)~(3) に示した結晶成長上の問題がありました。

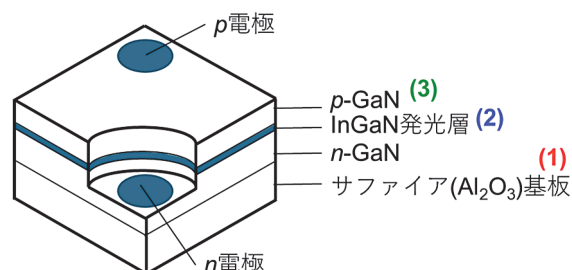


図 1：窒化物半導体による発光素子の基本的な構造

(1) 窒化物半導体基板がなく、良質な窒化物半導体単結晶による薄膜多層構造の作製が困難

(2) InGaN 発光層に In を導入することが困難

(3) p 型伝導型制御が困難

これらの問題を解決して青色 LED を実現したことにより、2014 年ノーベル物理学賞が赤崎先生、天野先生、中村先生に授与されたことは、これらの問題の大きさや、それを解決したときの社会的インパクトの大きさを裏付けています。

そのインパクトは信号機、大型ディスプレイ、液晶ディスプレイのバックライトなど様々な領域に及びますが、最大のものは白色 LED の開発でしょう。原理的に LED は、上記の通り半導体の禁制帯幅で決まる青とか赤などの単色で発光するものです。一方、「白色」という多波長発光は、青色 LED に黄色蛍光体をかぶせ、青色と黄色の発光を加色混和することにより得られています。このアイディアは画期的で、非常に簡便な方法で白色が得られる（つまり工業的に優れる）ばかりなく、高効率な青色 LEDのおかげで白色 LED も従来の白色光源である蛍光灯や白熱ランプをはるかに上回る発光効率を持つというメリットをもたらします。そのため、省エネ照明デバイスとして非常に有用で、蛍光灯や白熱ランプを置き換える「照明革命」を引き起こしました。今や多くの家庭で LED 照明が利用されているのではないのでしょうか。ノーベル物理学賞の授与の理由として、ノーベル財団は “for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources” とコメントしていますが、状況を端的に示していると思います。

結晶成長の方法

問題 (1)~(3) の解決についてもう少し詳しく解説します。図 1 のような薄膜多層構造は、通常、有機金属気相成長 (MOVPE) 法で作製されます。MOVPE は、装置コストが高いなど欠点もあるものの、膜厚の制御性が高く量産性に優れていることから、窒化物半導体の結晶成長法としては、産業界も含め最もポピュラーな方法です。研究室でも、自作装置から市販装置まで、数台の MOVPE 装置を所有して研究を進めています (図 2)。上記の問題 (1)~(3) をいかにクリアして、MOVPE 法が広く用いられるようになったのかを概説します。

まず基板の選択ですが、窒化物半導体の基板結晶は現在でも研究対象であり、多くの場合、窒化物半導体のかわりにサファイア (Al_2O_3) が用いられます。サファイアが選択された理由は、結晶成長するような高温 (1000 °C 前後) でも熱的に安定であり、代表的な結晶面である (0001) 面での原子の幾何

学的配置が窒化物半導体のそれと類似するためです。ただし、酸化物と窒化物ですので化学的特性は大きく異なっており、加えて、結晶の大きさ（格子定数）も大きく異なることから、結晶成長は容易ではありません。通常、低温（といっても 500 °C 程度）で低温緩衝層と呼ばれる小さな結晶粒からなる AlN あるいは GaN 層を数十 nm 堆積したのちに、高温で結晶成長すると高品質な GaN が得られます。これが上記の問題（1）の解決策です。

薄膜の結晶成長法である MOVPE 法は、その名の通り有機金属を原料とします。例えば GaN の場合、トリメチルガリウムやトリエチルガリウムが III 族原料、アンモニアが V 族原料で、それらを、高温に熱した基板上に水素や窒素で運ぶと、大雑把には 2 段階の化学反応 $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + 3/2 \text{H}_2 \rightarrow \text{Ga} + 3\text{CH}_4$ および $\text{Ga} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{GaN} + 3/2\text{H}_2$ によって GaN 薄膜が形成されます。もちろん実際の化学反応の素過程はもっと複雑で、その過程自体が研究対象になります。InGaN QW 発光層のとくに InN に関する反応過程だけを抜き出すと、書式としては同様に $\text{In} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{InN} + 3/2\text{H}_2$ と書けるのですが、右に向かう反応の平衡定数が GaN の場合よりも極端に小さいため、水素 (H_2) を原料搬送用に使っていると、反応がむしろ左向きに進んでしまい InGaN 中に InN が取り込まれないことが起こります。これが上記の問題（2）の背景です。この解決策は原料搬送に水素ではなく窒素を用いることで、これも国内の研究機関から提案された技術です。



図 2：研究室で所有の MOVPE 装置

半導体に微量の不純物を添加させることにより電気を流すキャリアとして電子を生成したものを *n* 型半導体、正孔を生成したものを *p* 型半導体と呼んでいます。これに関する基本原理は、高校物理の教科書や Web 上での解説記事を参照してみてください。不純物添加による *pn* 伝導型制御は、半導体デバイスを電気的に駆動する限り必要不可欠です。窒化物半導体の場合、*n* 型伝導制御は Si 添加による Ga サイトの置き換えにより容易に達成できます。一方、II 族元素の Mg で Ga を置換すれば原理的には *p* 型となるはずですが、それを阻害する未知の要因があり *p* 型伝導制御は困難でした。赤崎先生、天野先生は結晶成長後の電子線の照射により、中村先生は熱処理により *p* 型伝導が達成できることを見出され、そのメカニズムとして、結晶成長直後の試料中では原料搬送用の H_2 あるいは V 族原料 NH_3 中の水素が Mg に結合して *p* 型化を妨げていますが、電子線照射や熱処理により H が Mg から脱離することを提案されました。わかってしまえば簡単なこのメカニズムですが、当時は、「自己補償効果」と呼ばれる、伝導型制御のための不純物を導入しても、それを補償するような欠陥が形成されるため、GaN（など禁制帯幅の広い半導体）では伝導型制御は不可能であると結論するような理屈もありました。それを安易に信じることなく、地道に実験を継続した研究者だけが正解にたどり着くことができたという事実は、研究者の持つべき心構えとしてとても示唆に富んでいるように思います。

以上により、産業応用上優れた MOVPE 法により、窒化物半導体発光デバイスを量産することが可能になりました。光デバイスだけではなく、電子デバイスの作製にも MOVPE が用いられますが、とくに電子デバイスでは、意図せず混入する不純物を極力避ける必要があります、そのために別の結晶成長法（たとえば HVPE 法）も現在研究が進められています。

光物性の評価技術

サファイアを基板として品質の優れた GaN が結晶成長できるような技術が開発され LED の実用に

至ったと言っても、GaN 中の貫通転位密度は $10^9 \sim 10^{10}/\text{cm}^2$ ありました。この値は GaAs など III-V 族半導体中と比べて 5 桁以上高く、そのような状況下（つまり、非発光中心として働く貫通転位が多数ある中）でなぜよく発光するのか、青色 LED が市販された当初、そのメカニズムは謎とされていました。中村先生が当時在籍されていた企業からサンプル提供を受けた日本のいくつかの大学で謎解きが進められ、われわれのグループからは「 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ QW 発光層での In と Ga は空間的に不均一に分布するため、ポテンシャルに揺らぎが生じ、ポテンシャル極小に局在したキャリアは貫通転位に捕まることなく効率的に発光する」というモデルを提案しました [4]。根底にあるアイデア — キャリア局在による高効率発光 — は、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ QW での高効率発光を説明する機構として広く受け入れられ、文献 [5] の 2 件の論文は当時の全物理分野での引用件数第 3 位にランクインしていました。

空間的に不均一な系での光学遷移ダイナミクスを観察するには時間・空間分解分光が重要です。分光はその名の通り光を分けて分析することで、どの波長で発光しているのかを調べることに相当します。それを時間・空間分解するということは、どのような時間スケールで発光または非発光遷移が起こるのか、空間的にどの場所でそれらの遷移が起こるのかを分解することを意味しています。とくにポテンシャルの空間分布を解明するには高い空間分解能が必要です。通常の光学顕微鏡の空間分解能は、回折限界により最も高い場合でも観察に用いる光の波長程度になりますので、可視光で観察した場合は数百 nm 程度となります。これに対して、近接場光学顕微鏡（SNOM）は、波長より小さな微小開口付近に局在する近接場光を利用して波長以下の分解能を実現する顕微鏡で、われわれは 2000 年代初頭から、SNOM を用いて InGaN 系半導体の発光機構解明に取り組んできました。その結果、10 nm の空間分解能を実現し、貫通転位の多い InGaN QW での高効率発光のメカニズム解明に主導的な役割を果たしました。CUE40 号に関連した一般向けの記事があります。

最近では、InGaN 系の可視発光素子から AlGaIn 系紫外発光素子に研究対象を広げています（図 3）。波長を変えると光学部品を一から作り換える必要もあり、しかも紫外域の光学部品は開発が可視（や赤外）ほど進んでいないことから部品メーカーとの共同開発の結果、紫外用 SNOM の開発とそれを用いた、AlGaIn QW からの発光の観察に成功しました。励起光源の波長 210 nm のとき、世界最高の空間分解能（< 150 nm）を達成しました [5]。

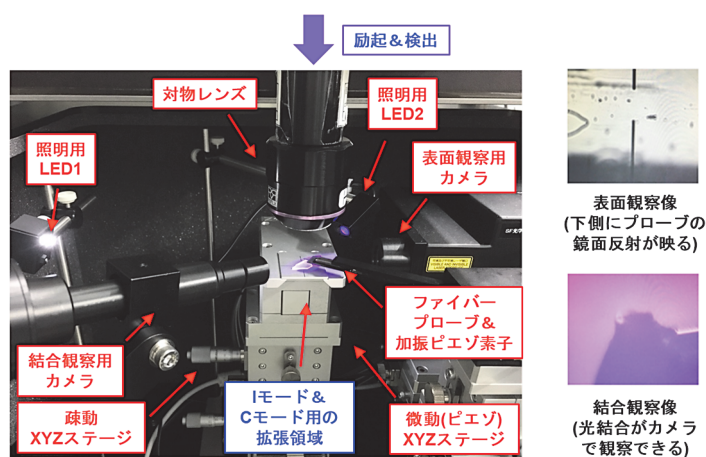


図 3：紫外 SNOM 装置の開発

研究室での最新の研究動向 — 21 世紀の照明革命を目指して

青色 LED と黄色蛍光体を組み合わせた白色 LED が、照明革命を引き起こしたことはすでに述べました。しかし、現行の白色 LED では、LED の青色から蛍光体の黄色への波長変換で生じる ~20% のエネルギー損（Stokes 損）が高効率化の限界を決めています。また、可視発光性を活かした光通信（Li-Fi）応用では、蛍光体の応答速度の遅さから青色 LED 単色しか利用できず通信容量増大の障害となっています。したがって、次世代の光源としては、蛍光体フリーでスペクトル全体が高効率 LED で実現される光源が理想で、それによって、光源単体としての機能を越えた、より高度な機能性も実現すると考えています。そのための構造として、わたしたちの研究室では窒化物半導体による三次元（3D）構造の利用を世界に先駆けて提唱しています。

結晶成長では、通常、安定面と呼ばれる表面のエネルギーの低い面上で高品質な薄膜が得られやすい傾向があり、デバイスの作製にはもっぱら安定面が利用されます。上記の(0001)面はその代表的な面で、このような面上にLEDやLDを結晶成長すると、二次元的な構造となり、禁制帯幅で決まる波長において単色発光します。3D構造の研究開始当初は、結晶安定面の表面に成長を阻害するマスクをパターニングし、マスク開口から結晶成長をさせることにより、安定面で囲まれた3D構造を作っていました。詳しくはCUE 24号に高校生向けの関連記事があります。この3D構造では、表面を構成する面によってInGaN QWの組成や膜厚が異なるため、各面のQWが異なる波長で発光することが特長で、その加色混和により窒化物半導体だけで（つまり、蛍光体フリーで）白色が得られます。

このような3D構造で、最近では、(a) 非安定結晶面の利用、(b) 微細LEDの集積化などを検討しています。これらについて以下で紹介します。

(a) 非安定結晶面の利用 [6]

安定面では高品質な薄膜が得られやすいと指摘しましたが、一方で利用できる結晶面の数に制限がかかります。これに対して、もし任意の結晶面が利用可能となれば、それを利用した無数の発光色の集積化が可能となるかもしれません。図4は、そのようなコンセプトの概念図で、レンズ状の微細構造を空間的に敷き詰めた構造を想定しています。レンズ表面は曲面で構成されていることから、一つ一つのレンズ構造が、無数の非安定面で構成されていることと等価で、そこに形成したQWからは表面の傾斜に依存した発光色が得られると期待されます。実際に、このような構造をMOVPEで作製して評価したところ、図5(a)に示すように、QWの作製後もレンズ構造が維持されており、しかも、位置に依存した発光波長の変化を示す[図5(b)]ことがわかりました。さらにこの構造をLED化しました。最初のトライアルとして、65個のレンズ構造を含む比較的大きな電極により駆動したところ、図5(c)のように注入電流によって発光スペクトルが変化するものの、特に低電流注入時には波長380 nm（紫）から500 nm（青緑）まで広がる広帯域なスペクトルを示し、白色光源としての高いポテンシャルを持つことがわかりました。

もし広い電極ではなく、複数の微小電極を形成することができれば、所望の波長だけを発光させることができるようになります。そうすれば、場面や用途に合わせて任意にスペクトルを調光するテーラーメイド照明、LEDの高速変調に基づく可視光通信(Li-Fi)、さらにマイクロLEDディスプレイなど、高いスペクトル制御性と集積性が重要な応用への展開が拓けると期待されます。

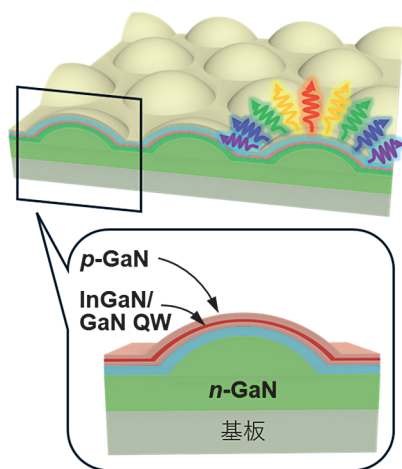


図4：非安定結晶面による3D構造

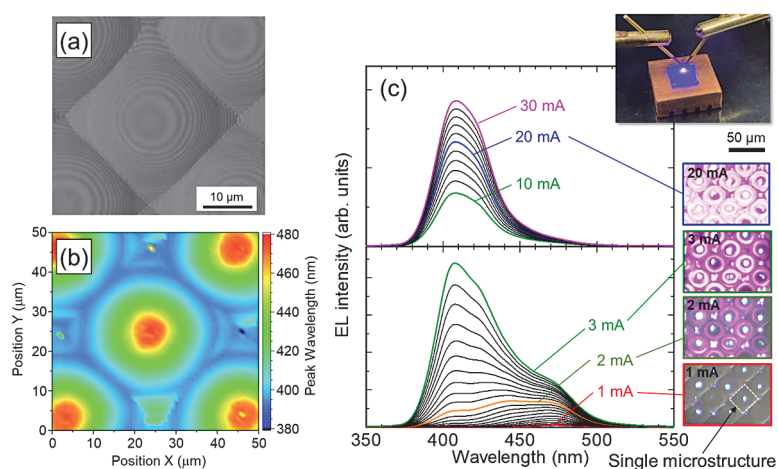


図5：(a) 顕微鏡による表面観察。(b) 発光波長マッピング。(c) LED動作の確認

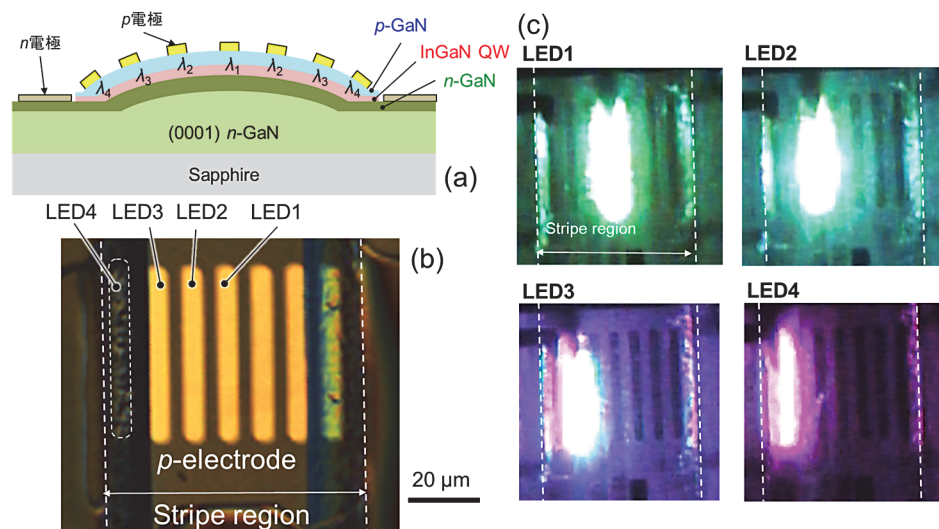


図 6：(a) 断面の概略図。(b) 顕微鏡により観察した、集積マイクロ LED 構造の表面。(c) 各 LED の発光の様子

(b) 微細 LED の集積化 [7]

実際、個別電極でスペクトル制御にもトライしています。同時に、LED を微細化し、マイクロ LED ディスプレイへと応用することを想定した構造に関する実験結果を図 6 に示します。図 6 (a) は構造断面の概略図で、図 4 同様にレンズ状ですが、今回は個別電極の形成しやすさからストライプ構造としました。実際に個別電極を付けて作製したマイクロ LED の表面写真を図 6 (b) に示します。LED のサイズは具体的には $5\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ で、正方形電極に換算すると $16\ \mu\text{m}$ 角に相当し、AR や VR グラスに利用できるレベルに近づきつつあります。図 6 (c) に示したように、電極位置、つまり、表面傾斜によって発光色が紫から緑にまで変化しています。

図 6 (c) の特長は特筆すべきものです。というのも、通常マイクロ LED で異なる発光色を集積するには、異なる単色発光 LED を個別の基板上に結晶成長した後、それを切り出して並べるという別工程 (pick-and-place) が必要とされ、LED が小さくなればなるほど難易度が上がるのですが、われわれ提案は結晶成長で自動的に多色の LED が集積するため、工程の簡略化と高集積密度化が期待されるからです。ただし図 4~6 の構造では、まだ長波長発光成分 (赤、など) が不十分で、現在赤色も含んだ発光を示す構造の開発を進めています。

おわりに

窒化物半導体の開発の歴史を振り返りつつ、最近の動向として次の世代の光源開発の例を紹介しました。マイクロ / ナノ構造の開発が新しい機能性に結びつきやすく、新奇 3D 構造における結晶成長や局所的な光物性の評価といった基礎的な検討を通じて、世の中にはない新しいデバイスの開発に寄与できる分野です。その意味で、研究者各人のアイデアが試されるところでもあり、やりがいを感じやすいところでもあると言ってよいと思います。光材料物性工学としての根源的な命題として、「如何にして任意の場所での発光波長をコントロールできるか」という問いかけがあります。3D 構造には、ミリ、マイクロ、ナノといった空間階層があり、これまで見出してしてきた知見は断片的なものにすぎません。今後はこれらを巧みに組み合わせ、トップダウンとボトムアップの協奏による発光集積構造の設計指針を体系的な学理として構築する必要があります [8]。

用語説明、参考文献

- [1] 周期表 III 族、V 族（最近の言い方だと、それぞれ XIII 族、XV 族）の元素による化合物半導体。GaAs, InGaAs, InP, InGaP など
- [2] 周期表 III 族元素（B, Al, Ga, In）と窒素による化合物半導体。広義には III-V 族半導体ですが、As や P を含む従来の III-V 族半導体と結晶構造などの基本的な特性が大きく異なっており、区別されることが多い。
- [3] ただし、Si をナノ粒子化して光らせてやろうとする研究はあります。例えば、L. T. Canham, “Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers,” *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046 (1990).
- [4] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, “Role of self-formed InGaN quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm”, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 981 (1997), Y. Narukawa, Y. Kawakami, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, “Recombination dynamics of localized excitons in $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$ - $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ multiple quantum wells”, *Phys. Rev. B* **55**, R1938 (R) (1997).
- [5] R. Ishii, M. Funato, and Y. Kawakami, “Pushing the limits of deep-ultraviolet scanning near-field optical microscopy,” by *APL Photonics* **4**, 070801 (2019).
- [6] Y. Matsuda, S. Funato, M. Funato, and Y. Kawakami, “Multiwavelength-emitting InGaN quantum wells on convex-lens-shaped GaN microstructures”, *Appl. Phys. Express* **15**, 105503 (2022). Y. Matsuda, M. Funato, and Y. Kawakami, “InGaN-based LEDs on convex lens-shaped GaN arrays toward multiwavelength light emitters”, *ibid*, **16**, 015511 (2023).
- [7] Y. Matsuda, H. Miyawaki, M. Funato, and Y. Kawakami, “Spontaneously integrated multicolor InGaN micro-LEDs for spectrum-controllable broadband light sources”, *Phys. Stat. Sol. RRL* **2400094** (2024). DOI: <https://doi.org/10.1002/pssr.202400094>
- [8] 研究室ホームページ : <http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

入出力システムと制御理論

大学院工学研究科 電気工学専攻
システム基礎論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）
萩 原 朋 道、細 江 陽 平

1. 入出力システム、フィードバック制御、および制御理論

1.1. さまざまなシステム、制御対象としての入出力システム、および制御器

世の中には、さまざまな「システム」と呼ばれるものが溢れています。たとえば、「予約システム」、「生産管理システム」、「防災システム」等、枚挙にいとまがありません。さらには、直接的には「システム」と呼ばれていなくても、「システム」と呼ばれている他のものと似たような観点でとらえることができるものもたくさんあります。たとえば、「宝くじ」、「スポーツ選手のドラフト会議」、「国会審議」などもそうでしょう。そういわれてもピンと来ないかもしれませんが、いずれも、「その帰結がどのように定まるかの挙動に関して、それが（ルールなどで）定まっている」という観点でとらえれば、これらの間に共通するひとつの側面が見えてくるでしょう。そういったものも含めると、我々の身の回りは本当にたくさんの「システム」で溢れていることがわかります。

本研究室の研究活動も「システム」を対象としています。その際、上記のような様々な「システム」について、それらひとつひとつをその都度取り上げて個別に対象とするのではなく、それらに共通する側面に着目してできるだけ一般的に幅広く対象として取り扱い、それらの「システム」の運用をよりよいものにするための方策の定め方を可能な限り一般論として構築しよう、という基本的な姿勢が中心的なものとなります。ただし、上記のように非常に一般化したものとしてとらえた「システム」というものにはあまりにも幅がありすぎるため、実際には、もう少し狭い意味でとらえた「システム」の範囲に限定してそのような研究を進めることになります。具体的には、まず第一段階として少し絞ると、「入力と出力をもつものとしてとらえることのできるシステム」というものを対象とします。それをもう少し噛み砕いていうと、「外部から働きかけをする（原因となる「入力」を加える）ことができる機構（機械、装置、現象等）であって、その働きかけに応じた変化がその機構から外部に現れる（結果となる「出力」が生じる）ような機構」とでもいうことができます。

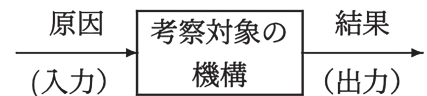


図1：入出力システム。

こういったシステムを「入出力システム」と呼びます（図1）。

この記事において、以降、具体的な話をするところでは、そのようなものの例（は山のようにあるものの、それらのひとつに着目するごとに個別の研究を展開するのではなくて、そういった例をいわばすべて一括して同時に扱うのが当研究室の研究スタンスであるということは改めて強調しますが、そうはいってもまずはイメージしやすいものがあつた方が理解しやすいでしょうから）として直流モータを取り上げることがあります。その場合、「入力」はモータに加える電圧であり、「出力」は、モータの利用のしかたに応じて、モータの回転速度または回転角度になります。たとえば、CD プレーヤーなどのように所定の速度で回転させ続けることを目的にモータを使う場合には、「出力」は回転速度ととらえるのが自然でしょう。しかし、たとえばクレーンの巻き上げ動作を考えると、モータを適切な角度だけ回転させて（荷物を適切な高さまで持ち上げて）そこで止めることが大切なので、「出力」は回転角度と

とらえる方が自然になります。

話を一般的なものに戻しますが、上述のような入出力システムをうまく運用する（このことを「制御する」といいます）ということは、そのシステムに対して外部から与える「入力」を時々刻々と「適切」に定め続けることを意味することになります。このような「入力」を生成し続ける機構のことを「制御器」と呼びますが、それもまた「入出力システム」であって、それを使った運用（制御）の状況は、たとえば図2のように表現できます。これに対して、うまく運用されることが求められているおおもとの「入出力システム」の方は、「制御対象」と呼ばれます。



図2：フィードフォワード制御系。

ここで、制御器が時々刻々と生成する「入力」が制御対象に対して「適切」かどうかは、その「入力」を制御対象に対して加え続けた結果として生じる「出力」の時間的な振る舞いが、求めている（すなわち、目標としている）制御対象の所望の「出力」に一致するか（あるいは、完全に一致はしないとしても、できるだけ近いものになるか）どうか、という観点で評価されることになります。CD プレーヤーの例でいえば、所定の回転速度にできるだけ速やかに一致するようにモータに加える電圧を時々刻々と決めていくことができるような制御器が、適切な制御器であるということになります。

1.2. フィードバック制御と数学に立脚した制御理論

入出力システムを適切に運用する（制御する）上での基本的な考え方は、「フィードバック制御」と呼ばれます。「フィードバック」という言葉は、日常的な会話のなかでも使われる一般的な用語なので、「フィードバックによる制御」とはどのようなものであるかということを取りあえず表面的に理解すること自体は、難しくないでしょう。実際、(i) 入出力システムの出力を時々刻々と観測し、(ii) その値がその時点で目標としていた所望の値と比べてどちら向きにどの程度ずれているのかを時々刻々と判断し、(iii) そのずれを小さくする効果があると期待される修正を施した新たな入力を入出力システムに時々刻々と加える、という動作を繰り返していくという考え方です。この考え方は、上述の図に修正を施した図3として表現することができます。

このようなフィードバックの考え方は非常に自然なものに見えるでしょうし、上記のような動作を時々刻々と繰り返せばいずれ目標の振る舞いに到達する（フィードバック制御の目的が達成される）のはほとんど当たり前のように思えるかもしれません。ですが、実際にはまったくそうではないからこそ、本研究室における研究意義があるということに当然ながらなります。実際、本研究室における研究の方向性の様子を非常に単純化した形でひとことで表すならば、「フィードバック制御の数学的理論（制御理論と呼ばれるものです）の高度化に寄与するもの」とでもいうことができます。少し言い換えるなら、「フィードバックという考え方を可能な限り幅広い（つまり一般的な）入出力システムに対して適切に適用するための方法論を、さまざまな数学的技法を活用して可能な限り一般的な方法論（制御理論）として構築していこう」というのが、基本的な研究姿勢であるということになります。ちなみに、京都大学工学部電気電子工学科で関連する講義があって、数学辞典第4版（岩波書店、2007）における様々な数学分野や数学用語として取り上げられている項目の中で「〇〇理論」と呼ばれているものとして、より小さくくりの「最適化理論」中のひとつとして「制御理論」の項目があります。他にも「情報理論」、「符号理論」、「グラフ理論」などを挙げることもできますが、数少ない方の一例ということができ、フィードバック制御において数学的取り扱いがいかに重要であるかを、そういった側面からも感じ取ってもら

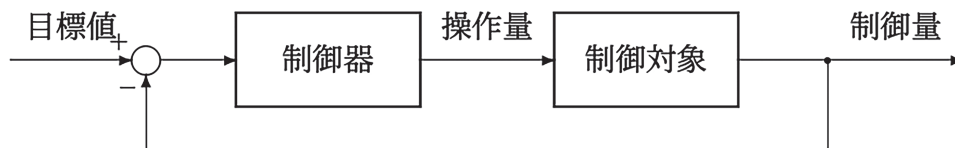


図3：フィードバック制御系。

えればと思います。

もっとも、そういう紹介をしてみても、上述のフィードバック制御の基本的な考え方はあまりにも当たり前に思えて、それが本当にそれほどまでに深い（あるいは難しい）話になるとはにわかに信じがたいかもしれません。ですので本記事では、あえて非常に初歩的な導入レベルの話をすることを目指しています。つまり、上記のような疑問を解消してもらうことを通して、フィードバック制御あるいは制御理論の研究の重要性についての雰囲気を少しでも感じ取ってもらえればと考えています。そういう解説の中では、本研究室での研究が対象とする「システム」に関してすでに触れた（入出力システムへの）第一段階の絞り込みに続いて、第二段階的な絞り込みとして「動的」な入出力システムへの絞り込みが非常に重要になると考えています。

ですので、(A) 入出力システムが「動的」であるか、あるいはそうでないか（つまり「静的」であるか）という違いとはいかなるものなのか、という点や、(B) とくに「動的な入出力システム」におけるフィードバック制御を適切に達成する上では、「決して当たり前だと考えてはいけないどのような注意点があるのか」、(C) それを踏まえて制御理論とは何をめざす考え方なのか、といった本記事の肝をなす部分の話については、雰囲気を伝える程度の初歩的な解説にはなりますが、項を改めて次節で解説したいと思います。

その上で最後に、「動的な入出力システム」やそのフィードバック制御について多少なりとも具体的なイメージをもていただくことを目指して、直流モータにおける「入力」と「出力」の間の「動的」な特性や、そのフィードバック制御に関連した話題を交えてさらに節を改めて紹介していきたいと思います。ただし、直流モータの例をあげるのは、本研究室が直流モータという個別の対象に関する研究に力を入れているといった事情あってそこからくるというような理由ではなく、単に理解しやすい例であると考えするという理由に加えて、この（「動的な入出力システム」の単なるひとつの具体）例でかいま見ることが、（対象を「直流モータ」に限定することなく）一般論として取り組んでいく制御理論の研究がつねに関わりをもつ数学的枠組み（とくに微分方程式）の雰囲気を具体的に伝える上でも複雑すぎず、同時に単純すぎないと思えるからである、という点を、念のため断っておきたいと思います。

1.3. 制御理論の重要性

上述のこととも関係しますが、この記事ではできるだけ話を簡単化することで、「制御理論を高度化させるための本研究室における研究の重要性は、世の中に溢れる数多くの入出力システムが動的であることのみに起因する」かのような説明をします。ただし実際には他の様々な側面からも重要であるということも断っておきたいと思います。たとえば、フィードバック制御により適切に運用したい対象物（機構）、すなわち制御対象の特性について、それをいくら詳細に調べようとしても、完全に正確なものは現実問題として決して得られないという事実は、受け入れざるを得ません。すなわち、制御対象の特性について、完璧な知識をもった上でフィードバック制御を施すということは現実には不可能であって、程度の差こそあれ、曖昧な知識しかもてない中でも可能な限りよい運用（制御）を目指すことが求められます。その際、よい運用を目指しすぎると、知識の曖昧性のもとでは実際には、「よい運用」になるもののものが実際には「まったくよいと言えないもの」、あるいはもっとひどくて「決して許容され

ないひどい運用」にさえ結果的になる可能性がもちろん出てきます。逆にそれを恐れてほとんど何も積極的な働きかけをしないのだとすれば、「よい運用」は達成できません。そういった知識の曖昧性の中でも、数学的に質の保証ができる「踏み込んだよい運用」を達成することは「ロバスト制御」と呼ばれ、これを可能とするための方法論を数学的に構築するといったことも、制御理論を発展させるべき非常に重要な理由になっています。たとえば直流モータの例でいえば、そのスペックに当たる様々な物理定数を完全に正確に知ることはできません。また、3節では直流モータの入力と出力の間の動的な特性を微分方程式で表現する（モデル化する）ということを通して、動的な入出力システムに関する数学的な取り扱い（微分方程式）のごく一端を非常におおざっぱに紹介していますが、様々な事情で、そのような微分方程式で（そこに現れる係数を仮に何らかの意味で完全に正確に定めることができたとしても）現実の直流モータの動作が完璧に表現されるとは保証できないという現実があります。つまり、後述の微分方程式による表現をもって「直流モータの特性についての知識をもっている」と考える立場をとる時点で、すでにそこには「知識の曖昧性」を生じていることに実際にはなっています。こういった曖昧性の影響をフィードバック制御の中で極力押さえ込むための数学的枠組みを極力高度な形で構築するという考え方が、すでに述べた通り「ロバスト制御」と呼ばれるものです。そのようなことを目指すことの重要性を一例として、制御理論が解決すべき課題は、本記事での中心的な話題としてあえて据える点、すなわち「数多くの入出力システムが動的な性質をもつ」というもっとも単純化したその一点には実際にはまったく留まりません。制御理論の高度化は、電気電子工学分野に限らず、あらゆる技術分野における多くの機構（各種の製品からそれらの製造装置や社会基盤等々に至るまで）の運用の高度化を達成する上で、極めて重要な役割を果たすものになっています。

2. 動的な入出力システムのフィードバック制御とそのための制御理論

前節では、入出力システムが「動的」なものであるときにとくに、（当たり前な考え方だと感じるかもしれない）フィードバックの考え方の適用が決して「当たり前」といえなくなり、したがってそれを適切に適用した「フィードバック制御」を達成するための数学的な枠組みとしての制御理論と呼ばれるものが重要になる、という事実を紹介してきました。

本節では、(A) まず入出力システムが「動的」であるとはどういうことなのかを紹介した上で、(B) その場合には単純に「当たり前」と決していえないような状況が生じる側面などを非常に簡単に紹介していき、(C) それを通して制御理論の研究についての最低限の雰囲気伝えるということを目指しています。

したがって、ここではまず入出力システムが「動的」である（あるいはそうではない、つまり「静的」である）とはどういうことかという話をしたいと思います。ただし、その目的と同時に、「世の中に溢れているシステム」という言い方をここまでに何度もしてきた点についても、（直流モータ以外を通して）現実的な例をイメージできるような話を付記することもあわせて目的としています。さらには、そういったいろいろな例を個別に眺めるのではなくて、数学的視点を通してそれらをできるだけ一括して統一的にとらえ、そういう見方を通して制御理論を発展させるという研究の方向性についても、雰囲気を伝えたいと考えています（研究そのものについて詳述することは、残念ながら本記事のレベルを越えるといわざるを得ないので）。

2.1. 入出力システムの例

まず、「入力と出力をもつものとしてとらえることのできるシステム（入出力システム）」に限定しても、皆さんの身の回りや社会の中に、人工的なものに限らず自然現象などを含めてたくさん存在することに気づくでしょう。たとえば、

(a) 水道の蛇口のひねり具合という入力に応じて、水量という出力が決まる。
という状況もそのひとつです。以下、何が入力で何が出力かという説明はあえて省略するので、それぞれが何であるかを意識してもらうとよいと思いますが、たとえば

(b) バネの引き延ばし具合に応じた強さで引っ張り返される。

(c) 雨量に応じて地面をたたく音の大きさが変わる。

などの例がすぐに思いつきます。他にも、以下のような例もすぐに思いつくでしょう。

(d) モータにかける電圧の違いに応じて回転速度が変わる。

(e) アクセルの踏み具合に応じて自動車の速度が変わる。

(f) 気温の変化に応じて池の水温が変わっていく。

これらいずれのシステムにおいても、入力と出力の関係は、(本記事の冒頭であげた「システム」の場合のように、ルールによるものではありませんが、やはり物理法則や、より一般的には何らかの科学法則などによって) そのシステムごとに定まっているでしょう。そのような「入力と出力の関係」(入出力関係もしくは入出力特性といいます)は、そのシステムのもつ性質(特性)がどのようなものであるかをまさしく表しているものであり、この入出力特性を考慮した形で入力を適切に定めることができるならば、その結果得られる出力は望ましいものになると期待できます。

本研究室の研究の立場をあえて非常に単純化してひとことで表すならば、

(i) (入力と出力を持つどのようなシステムであっても、その) 入出力特性を抽象化して扱って数学的に表現する(モデル化する)ことで、さまざまな個別の具体的システムを特段区別することなく統一的枠組みの中で数学的に取り扱い、その上で、

(ii) 「システムに加えるべき適切な入力を、数学的に表現された入出力特性を踏まえて適切に定める」ことができるための可能な限り一般的な方法論を、数学的議論を通して明らかにしていく
というものだといえます。その際、(ii) に関して、たとえば「入出力特性がどのような数学的表現になっても適用可能な万能の方法」を目指すことは残念ながらきわめて難しいので、たとえば、「入出力特性を(あまりにも個別議論に陥りすぎない範囲で)いくつかの種類に分割はするが、できるだけ大きくとらえた各種類の中では可能な限り一般的議論を目指す」という方向で研究を進めることになります。ここではそのような分類に関するキーワードの紹介に留めますが、たとえば「サンプル値系(ディジタル制御系)」、「周期時変系」、「むだ時間系」、「確率系」などの分類に沿って研究を進めています。それらのいずれも「動的な入出力システム」の中でもさらにもつ特徴の違いに着目する視点に沿った研究ですが、これらのいずれにも共通する重要な視点として、本項の最大の目的である、「入出力システム」が「動的」なものと「静的」なものにさらに細分できる、という(すでに触れてきた)話を紹介したいと思います。

ここで皆さんに少し想像を働かせていただきたいのですが、入出力システムに関する上述の6つの例(a)–(f)の中には、何らかの側面においてかなり様相の違うものが混在していることに気がつくでしょうか。その「何らかの側面」というものを適切にとらえることで生まれる2つのグループが、「動的」な、あるいは「静的」な入出力システムへの分類となってくるわけなのですが、そのような「何らかの側面」とはいったいどのようなものになるのでしょうか。

ヒントを少し書くと、(a)、(b)、(c) がひとつのグループ(「静的な」入出力システム)で、(d)、(e)、(f) がもうひとつのグループ(「動的な」入出力システム)になるのですが、この2つのグループの間の大きな差を特徴づける「何らかの側面」というものは、いったい何であるか、気がつくでしょうか。両者の差というのは、フィードバック制御が時々刻々と行われる動作であることと密接に関係して、「時間の流れ」が関わるものになっています。そしてその差が、「動的」な入出力システムのフィードバック制御を考える上で、非常に重要な観点になってくるものなのですが。

2.2. 動的な入出力システムとそのフィードバック制御における基本的視点

では、その種明かしをしましょう。まず (a) の例（水道の蛇口）について考えましょう。各時刻で蛇口から流れ出る水量は、その時刻（その瞬間）の蛇口のひねり具合で決まると考えるのが普通でしょう。「同じ角度だけ蛇口をひねっていても、それ以前にひねり具合をどのように変化させてきたかが違えば、水量は同じにならない」と考える必要はないでしょう。あるいは、「いまこれだけ蛇口をひねっているので、たとえば5秒後にひねり具合を変えたときの水量は、いまのひねり方が違うものだったとしたときの水量とは違うものになってしまう」などとも考える必要はないでしょう。(b) の例についても、入出力関係はフックの法則によって決まるので、各瞬間の出力は、各瞬間の入力だけで決まります。同じことは (c) についても当てはまります。

一方、(d) – (f) の例についてはどうでしょうか。もしかすると、上記の3つの例との間で「様相の違い」にすぐには気がつかないかもしれませんが、実際には明確な違いがあります。たとえば (d) に関して CD プレーヤーを考え、スイッチが切られている（なのでモータに電圧はかかっていない）状況を考えます。このとき CD プレーヤーはどんな回転速度になっていますかという問いに対して、「絶対に間違いのない即答」をすることができるでしょうか。それは (e) に関しても同様で、アクセルが踏まれていない（簡単のため、ブレーキやハンドルがないものととらえて単純化した）自動車について、その自動車はどんな速度で走っていますかという問いに対して、「絶対に間違いのない即答」をすることができるでしょうか。いずれもそれは不可能だということに気がつくでしょう。

CD プレーヤーの例でいえば、少し前まで使っていた状態からスイッチを切った状況なのでまだ回っているかもしれませんが、それがどんな回転速度かは、単にその瞬間にスイッチが切られているということだけからは何ともいえません。自動車の例でも基本的に同じで、その瞬間にアクセルが踏まれていなくても、それ以前にアクセルが踏まれていて自動車が走っていたのか、そのときにはどんな時速だったなかでいつアクセルを離したのか、といったことがわからない限り、答えようがないわけです。(f) の例でも基本的に同じ状況になります。

以上により、(a)、(b)、(c) のグループと (d)、(e)、(f) のグループの間では、「現時点での出力」が、「その瞬間における入力だけで決まる」のか、それとも、「その瞬間以前にどんな入力が各時刻で加えられてきたのかという、過去の入力の履歴によって決まる」のか、という、非常に大きな様相の違いがあるということがわかります。前者のようなタイプは「静的な入出力システム」と呼ばれるのに対して、後者のようなタイプは「動的な入出力システム」と呼ばれます。

そして後者においてはおおざっぱに言って、入力がたとえば急峻に変化することの影響が出力に現れるに際して、「時間的な遅れのような現象」を伴って観測されたり、出力の変化が入力の急峻な変化と比べれば「なまったような形」で観測されるといった状況を生みます。したがって、時々刻々と状況を把握しながら入力を適切に修正し続けようとするためのフィードバック制御においても、このような「遅れ」や「なまり具合」を適切に考慮しておくことが極めて重要になります。たとえば、何らかの瞬間において目標とする値と出力とのずれが大きいたとしても、それは「遅れ」や「なまり具合」に関する過渡的な変化の中でたまたまそのように見えるだけであって、それらの影響がもう少し完全に現れ切るまで我慢するとすれば、入力をとくに大きく修正しなくても、ずれは自然に改善する方向に自然に向かう可能性もあるのかもしれません。そういったことを考慮せずに各瞬間ごとのずれの大きさのみに基づいて入力をあわせて（あるいは単純に）変化させることを時々刻々と繰り返すと、かえって問題のあるフィードバック動作をさせてしまうことにもなりかねないのです。すなわち、フィードバックを適切に施すための制御理論を高度化しながら構築していくという研究においては、とくに「動的な入出力システム」を対象とすることが非常に重要になります。そして、そのための基本的な方針、すなわち各時刻での入力を適切に定める方策としては、その時刻の出力（と目標との間のずれ）だけを利用したものでは不適

切であって、その時刻以前の出力（のずれ）の履歴全体を利用してはじめて適切なものになるということが出来ます。言い換えれば、「動的な入出力システムである制御対象」を適切に運用するためのフィードバックにおける「制御器」は、何らかの意味で適切な形で、それ自身、「動的な入出力システム」として定めてやるのが極めて重要であるということになります。ところが、「動的な入出力システム」というだけではあまりにも自由度が高すぎます。なので、「何かしら試行錯誤的に動的な制御器を定めるなかで、いずれ結果的には何かよいものがひとつ見つかるだろう」というような考え方では、合理的な議論ができず、工学として役に立つような技術を提供することができません。これに対して、制御理論というものの役割をあえてひとことで単純に表現するならば、制御対象のもつ動的な入出力特性を数学的に適切に利用することで、制御器にもたせるべき適切な動的な入出力特性を定めるための合理的な手段を、極力一般的な形で明らかにしていくこと、ということが出来ます。

本研究室における制御理論の研究については、あえてこれくらいのざっくりとした説明に留めさせてもらいますが、残りの紙面では、直流モータの例を通して、動的な入出力システムというものの理解をもう少し深めてもらうことで、制御理論の研究の重要性を垣間見てもらうことができることを期待した話をしようと思います。

3. 直流モータの例

耳慣れない用語が出てくるかもしれませんが、ここでは各用語が何を意味するかについては深く立ち入らずに、直流モータの振る舞いがどのような微分方程式で表現できるかについて紹介し、入出力システムや制御理論とのつながりについて述べたいと思います。

時間を t で表します。直流モータの電機子に印加される電圧を $v(t)$ 、電機子に流れる電流を $i(t)$ 、電機子の回転に伴って電機子に誘起される逆起電力を $e(t)$ とすると、これらの変数の間の関係は次の微分方程式で記述することができます。

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{d}{dt} i(t) + e(t)$$

ただし、 R は電機子の抵抗、 L はインダクタンスを表しています。上式は電気的な関係のみから求まる式ですが、直流モータには電機子の回転という物理的な機能もあります。電機子の回転速度を $\omega(t)$ とすると、逆起電力 $e(t)$ は $\omega(t)$ に比例し、その比例係数を k_E で表記すると、

$$e(t) = k_E \omega(t)$$

が成り立ちます。また、電機子に作用する回転トルクを $\tau(t)$ と表すことにすれば、これは電機子電流 $i(t)$ に比例し、その比例係数を k_T で表記すると、

$$\tau(t) = k_T i(t)$$

が成り立ちます。電機子の慣性モーメントを J とすると、回転に関する運動方程式より $\omega(t)$ と $\tau(t)$ の間には次の関係が成り立ちます。

$$\tau(t) = J \frac{d}{dt} \omega(t)$$

以上で、 $v(t)$ 、 $i(t)$ 、 $e(t)$ 、 $\tau(t)$ 、 $\omega(t)$ という5つの変数に対して、4つの式を得ることができました（簡単のため摩擦等の影響は無視しています）。これらの式から、例えば $i(t)$ 、 $e(t)$ 、 $\tau(t)$ を消去するように変形すると、印加電圧 $v(t)$ と回転速度 $\omega(t)$ の関係を表す微分方程式を得ることが出来ます。そうして得られる関係式はまさしく、印加電圧 $v(t)$ がどのように加わると回転速度 $\omega(t)$ がどのように変化するかを表す入出力システムとして、直流モータという制御対象を表現したものになります。また、上述の通り入力 $v(t)$ と出力 $\omega(t)$ の間の関係は微分方程式で記述されることになるため、時刻 t における $v(t)$ だけでは $\omega(t)$ の値を決めることができないこと、つまりその入出力システムは動的であることもわかります。そういった特性をもつ入出力システムや、それを複数つなげて構成されるより複雑な

入出力システムを適切に制御するためには、高校までで習う数学よりも高度な数学を用いて、適切に制御器を構成する必要がある（つまり制御理論というものが重要な役割を果たす）ことをおわかりいただけるのではないかと思います。

なお、直流モータという例に対して、出力を回転速度 $\omega(t)$ にとった場合の入出力システムに関する話をしましたが、電機子の回転角 $\theta(t)$ と回転速度 $\omega(t)$ の間には

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \theta(t)$$

という関係が成り立ちますので、この関係も用いますと、出力が $\theta(t)$ であるような入出力システムを構成することも可能です。このように、入出力システムというものを考えるにあたっては、何を入力や出力とみなすかを定めることが重要であり、それは制御対象の何をどうしたいか、という制御の目的にも密接に関係しています。

4. おわりに

本記事では、本研究室で研究している制御理論というもののイメージが少しでも多くの方々に伝わるよう、普段あまり意識せずに使われている言葉であろう「システム」から話を広げ、入出力システム、動的な特性、フィードバック制御などについてお話しし、直流モータの微分方程式の例を紹介しました。自動制御は今後もさまざまなところで導入され、活躍の場が広がっていくことが期待されます。そのような自動制御を実現するための制御理論について、本記事を読んでもらった方に少しでも興味を持っていただけたなら、大変幸いです。

超伝導応用のこれまでとこれから

大学院工学研究科 電気工学専攻
電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）
雨宮 尚之、曾我部 友輔

1. はじめに

皆さんは、電気回路において電流 I と電圧 V が比例するという、Ohm（オーム）の法則 $V = RI$ を知っていると思います。電流 I と電圧 V の比例定数 R は電流が流れている物体（導体）の電気抵抗と呼ばれ、電気抵抗は導体の材質・形状・温度などによって決まります。電気抵抗は、導体を構成している原子と電流として流れている電子が衝突し、電子の動きが妨げられることによって発生します。一般的な導体では温度が低くなると電気抵抗は小さくなっていきますが、これは温度が低くなることで導体を構成している原子の運動量が小さくなり、電流として流れている電子と原子の衝突の頻度が下がるためであると理解できます。それでは、絶対零度（全ての原子が動かなくなる温度、約 -273 度、0 K（ケルビン））での電気抵抗はどうなるのでしょうか。電子も絶対零度では動けなくなる、つまり電流が流れなくなるから電気抵抗は無限大となるのでしょうか？それとも、電子と原子・分子が衝突しなくなるため、電気抵抗はゼロとなるのでしょうか？

1911 年、オランダの Heike Kamerlingh Onnes（ヘイケ・カマリン・オンネス）は、絶対零度近くの電気抵抗の温度依存性を調べるため、液体ヘリウム中という極低温（4.2 K、約 -269 度）での水銀の電気抵抗を測定していました。そのときに、4.2 K で水銀の電気抵抗が「突然」消失し、ゼロ抵抗となることを発見しました。徐々に電気抵抗が下がっていったゼロとなるのではなく、ある温度（臨界温度）で突然、電気抵抗がゼロになったのです。これが「超伝導（Superconductivity）」現象の発見です。図 1 に、一般的な導体（常伝導体）である銅やアルミニウムを電線とした場合、超伝導状態となる物質（超伝導体）を電線とした超伝導線の場合について、それぞれの電気抵抗と温度の関係を示します。一般に超伝導線の電気抵抗は、臨界温度までは常伝導体と同じように温度に対して連続的に低下していきませんが、臨界温度になったときに突然電気抵抗がゼロに変化します。この現象を超伝導転移と呼びます。Kamerlingh Onnes は、超伝導現象発見の 2 年後、1913 年にノーベル物理学賞を受賞しました。このように、超伝導現象は発見当初から非常にインパクトの強い物理現象として受け止められました。

本稿では、超伝導現象の特徴について概説し、これまでおよび現在研究が進められている超伝導応用分野について紹介します。

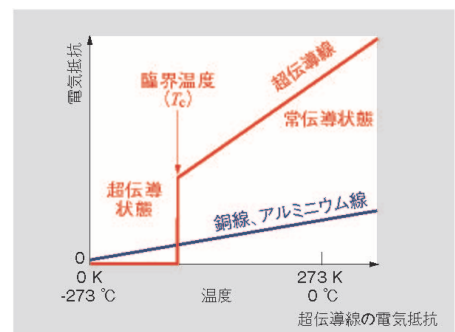


図 1 超伝導体の電気抵抗の概念図 [1]

2. 超伝導体の特徴的な物理現象

超伝導状態である超伝導体に固有の特徴的な物理現象が大きく分けて四種類あり、まずそれらについて簡単に説明します。

2.1 完全導電性

超伝導状態の超伝導体は電気抵抗がゼロであり、臨界電流と呼ばれる、超伝導状態を保つことのできる最大の電流値以下の直流電流が流れている場合には電圧が発生せず、電流を流すことによる発熱が発生しません。そのため、超伝導体に電流を流す場合には、通常の導体（常伝導体）に電流を流した時に必ず発生してしまうエネルギーの損失（電気エネルギーが熱エネルギーなどに変換されて消費されてしまうこと）が発生しない、という利点を得ることができます。この特徴を完全導電性と呼びます。完全導電性は超伝導を応用する上で最も重要な特徴であり、種々の機器を超伝導化し、消費電力を低減することを目的とした研究開発が数多く進められています。

ただし、時間的に変化する電流（直流ではない電流）が流れている場合には、後述する交流損失と呼ばれる超伝導体特有の損失が発生してしまうため、完全に無損失というわけにはいきません。また、臨界電流を超えた電流を流す場合には超伝導状態が維持されず、電圧が発生してしまいます。

2.2 完全反磁性

超伝導体は、超伝導状態になるとき（超伝導転移するとき）に内部の磁束がすべて排除され、まったく磁束が存在しない、磁束密度がゼロである状態になります。この特徴を完全反磁性と呼びます。完全反磁性は、この性質の発見者の名前から Meissner（マイスナー）効果とも呼ばれ、完全反磁性を示す状態を Meissner 状態と呼びます。ただし、電流の場合と同じように、磁場にも臨界磁場と呼ばれる超伝導状態を維持できる最大の磁場の大きさが存在し、臨界磁場よりも強い磁場をくわえた場合には超伝導状態が壊れ、磁場が侵入するようになります。

一方で、完全反磁性は全ての超伝導体で常に発現する特徴ではありません。超伝導体にかかる磁場を大きくしていった時の磁束の侵入の様子によって、超伝導体は第一種超伝導体と第二種超伝導体に分類されます。図2に第一種超伝導体と第二種超伝導体における、外部からかける磁場の大きさと、超伝導体内部の磁束密度との関係を示します。第一種超伝導体では、臨界磁場 H_c を超えたとき、突然磁場が完全に超伝導体に侵入し、完全に常伝導状態となってしまいます。言い換えると、臨界磁場 H_c 以下の磁場では、Meissner 状態になっていますが、それ以上の磁場では常伝導状態です。一方、第二種超伝導体では、ある磁場（下部臨界磁場 H_{c1} と呼びます）

を超えると徐々に磁束が侵入していきます。このとき、いくらかの磁束は超伝導体から排除されますが、全ての磁束が超伝導体内から排除されるわけではありません。さらに磁場を高くしていくと、ある磁場（上部臨界磁場 H_{c2} と呼びます）で完全に常伝導状態となり、磁束が完全に侵入します。つまり、Meissner 状態と常伝導状態の間に、中間的な状態（混合状態と呼びます）が存在します。このように、第二種超伝導体では Meissner 状態は常に成立しているわけではありません。また、混合状態は通常、超伝導状態であるとみなされます。つまり、第二種超伝導体では、超伝導状態であっても Meissner 状態ではない状態が存在していることになります。

もう一点重要なポイントとして、Meissner 状態の超伝導体は、工学的にはあまり魅力的ではありません。超伝導体の最大の利点は完全導電性であり、無損失で電流を流せることです。しかし、Meissner 状態の超伝導体に大きな電流を流すことは、実はできません。物質に電流を流すためには、物質内部に磁束密度の分布が絶対に必要なのですが、Meissner 状態では超伝導体内に磁場が侵入できず、磁場の分布も存在しないためです。一方、混合状態の第二種超伝導体の内部には磁束が侵入することができる

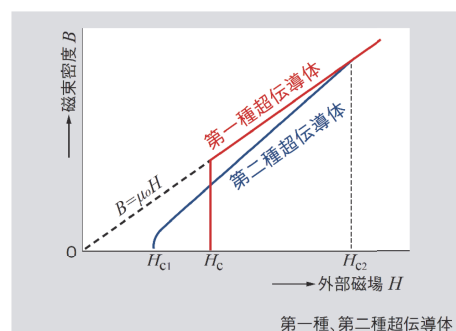


図2 第一種・第二種超伝導体の外部磁場と超伝導体内の磁束密度の関係 [1]

ため、大きな電流を流すことができます。すなわち、工学的に重要な超伝導体とは、混合状態にある第二種超伝導体である、とすることができます。なお、幸いなことに、これまでに発見されている超伝導状態を示す物質のうち、ほとんどは第二種超伝導体です。第一種超伝導体は一部の純金属などのごくわずかな物質に限られており、最初に超伝導状態になることがKamerlingh Onnesによって発見された水銀は第一種超伝導体です。

2.3 磁束の量子化

第二種超伝導体が混合状態となっているときには磁束が侵入していると説明しましたが、このときには磁束が「量子化」されて侵入します。磁束の量子化のイメージは、太い糸の束をほどこ、一本ずつの繊維に分離するようなものです。非常に細い繊維を最小単位とし、その繊維を何本も集めていくと一本の糸になるように、磁束についても非常に小さい磁束（磁束量子と呼びます）を最小単位として、磁束の大きさは磁束量子の整数倍として表すことができます。

混合状態の超伝導体内のイメージを図3に示します。超伝導体に侵入した磁束量子は超伝導体内のある点にピンで止められるように固定されており、ピン止め力と呼ばれる力によってその点に固定されています。時間的に変化しない直流の電流や磁場を印加している条件では、ピン止め力とLorentz（ローレンツ）力が釣り合い、磁束量子は超伝導体内で動かない状態になっています。

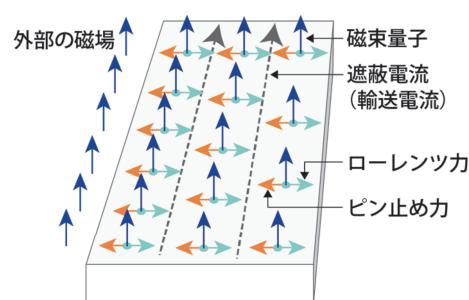


図3 混合状態における超伝導体内の模式図 [2]

2.4 Josephson（ジョセフソン）効果

絶縁体を挟んで二つの超伝導体を配置したとき、二つの超伝導体の間に超伝導電流が流れることが知られています。この現象をJosephson効果と呼び、この構造をJosephson接合と呼びます。Josephson接合を流れる電流は、絶縁体の部分にくわわる磁場の強さに対して非常に敏感であるため、極めて小さい磁場を検知するための素子として応用されています。

3. 超伝導応用

3.1 低温超伝導体と高温超伝導体

超伝導転移が発生する温度、すなわち臨界温度によって、超伝導体は低温超伝導体と高温超伝導体の二種類に分類されます。日本産業規格（JIS規格）では、約25 K以下の臨界温度をもつ超伝導体が低温超伝導体、約25 K以上の臨界温度をもつ超伝導体が高温超伝導体である、と定義されています。

低温超伝導体の代表例は、NbTi（ニオブチタン）やNb₃Sn（ニオブ三スズ）などです。これらの低温超伝導体は電線として加工されたものが製造されており、銅線などを巻いてコイルを作るのと同じように、低温超伝導線を巻いてコイルを作ることが可能です。低温超伝導体は臨界温度が低く、低温超伝導線を使用している機器の運転には、一般には液体ヘリウム（約4.2 K）による冷却が必要です。ヘリウムは現在希少資源となっていて、値段が高いことはもちろん、入手性が年々悪くなっていくので、液体ヘリウムを大量に使いながら冷却する機器はあまり好ましくありません。そのため、液体ヘリウムを使用せずとも運転できる、すなわち臨界温度の高い高温超伝導体が注目されています。

高温超伝導体の代表例は、YBa₂Cu₃O₇（イットリウム系高温超伝導体）やBi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀（ビスマス系高温超伝導体）といった材料で、CuO₂という共通部分をもつことから、銅酸化物系高温超伝導体と呼ばれることもあります。イットリウム系高温超伝導体については、イットリウムの部分を他の希土

類系元素とした多様な種類の高温超伝導体が存在しており、これらをまとめて希土類系銅酸化物高温超伝導体（Rare-Earth BCO: REBCO）と呼ぶこともあります。低温超伝導体と比べた時の特徴として、先述したように臨界温度が高く、液体ヘリウムを使用せずとも超伝導状態にでき、近年よく使用される希土類系銅酸化物高温超伝導体は、超伝導転移温度が液体窒素温度（77 K）よりも高くなっています。また、臨界温度だけでなく、臨界磁場及び臨界電流も高い傾向があります。液体ヘリウム温度まで冷却した場合、臨界磁場及び臨界電流は低温超伝導体よりも非常に高くなるため、低温超伝導体を使った装置（電磁石など）よりも高い電流密度で電流を流すことができ、より強い磁場を発生することが可能になります。

3.2 低温超伝導線とその応用ーこれまでの超伝導応用ー

これまでに実用化されている超伝導応用は、そのほぼすべてが低温超伝導体を使用したものであり、高温超伝導体の実用化例はほとんど存在しません。低温超伝導体は低温超伝導線として製造され、実用化されています。低温超伝導線は極細多芯構造と呼ばれる構造をもっており、数 μm から0.数 μm 程度の極めて細い素線（フィラメント）を複数本捻りながら束ね、さらにその束を複数本捻りながら束ね、というように、フィラメントを多数束ねた構造になっています。この構造には複数の理由があるのですが、大きい理由の一つとして、超伝導線を太くしてしまうと超伝導線で発生する交流損失と呼ばれる特有の損失が大きくなってしまうということが挙げられます。交流損失は、超伝導体内に侵入した磁束量子が交流電流や交流磁場の影響によって、超伝導線内でピン止め力に抗して動いてしまうことが原因となって発生します。磁束量子が動く距離が長くなる、つまり超伝導線が太くなるほど交流損失は大きくなってしまいますので、交流損失を低減するためにフィラメント化が行われます。低温超伝導線は液体ヘリウム温度で使うことが一般的ですが、液体ヘリウム温度程度の極低温環境では、交流損失や超伝導線のわずかなずれに伴う摩擦熱などによるわずかな発熱でも温度が上昇してしまいます。これは極低温下では比熱が非常に小さくなることが原因なのですが、低温超伝導線は臨界温度が10 K 前後と非常に低く、わずかな交流損失でも常伝導状態が壊れてしまう危険があるので、極細多芯構造となるような低温超伝導線が開発されてきました。

低温超伝導線の応用としては、低温超伝導線をコイルに巻き、電流を流して磁場を発生させる用途が多数を占めます。例えば、医療用の核磁気共鳴撮像装置（Magnetic Resonance Imaging: MRI）や、磁気浮上列車（リニアモーターカー）、高エネルギー物理学で使われる粒子加速器用の電磁石などを代表とするような数多くの応用例が存在し、社会で活用されています。低温超伝導線は臨界電流まではエネルギー損失なしで電流を流すことができることから、常伝導体でコイルを巻く場合よりも高い密度で電流を流すことができます。コイルに高い密度で電流を流すとコイルが出せる磁場が強くなりますので、超伝導線で巻かれたコイルは強い磁場を、より広い空間に発生することが可能となります。これにより、例えば



図4 Large Hadron Collider (LHC)の低温超伝導電磁石 [3]。地下のトンネル内に超伝導電磁石が並べられてリングを構成している。

MRI装置では、人間の全身が入るようなとても広い空間に、従来の常伝導線で巻いたコイルでは作れないような強い磁場を発生させ、MRI画像を撮影することができるようになるなどの利点があります。リニアモーターカーでは、車体に搭載された低温超伝導コイルに電流を流すことで電磁石とし、レールに設置されたコイル（一般には常伝導コイル）との間の電磁力によって浮上・走行します。高エネルギー物理学とは、電子やイオンなどの荷電粒子を加速させ、それらを衝突させることで観測できる原子核に

含まれている粒子（素粒子）について研究する学問分野です。この分野では、荷電粒子を加速させるための粒子加速器が必須であり、多くの粒子加速器は円形加速器と呼ばれるような、荷電粒子を円状の軌道を周回させるような構造をとっています。このとき、荷電粒子を曲げるために非常に強い磁場が必要となるため、低温超伝導線で巻かれたコイルから成る超伝導電磁石が使われます。高エネルギー物理学用の粒子加速器の代表例が、欧州原子核研究機構（CERN）が建設した、Large Hadron Collider（LHC）です。LHCに使われている低温超伝導電磁石を図4に示します。LHCは周長約27 kmという非常に巨大なリングをもち、荷電粒子（ハドロン）を衝突させるという装置であり、その電磁石も長大なものになっています。

これらの応用のほとんどは、直流磁場下で直流電流を通電するような応用です。時間的に変化しない直流の電流・磁場下では交流損失は発生せず、損失無く電流を流すことができ、温度上昇などの懸念もないためです。一部の応用では、磁場を出している高温超伝導コイルの巻線の両端を超伝導線で接続し、超伝導体でループを作って電源を切り離すことで発生磁場が時間的にほとんど変動しなくする運転（永久電流運転）をする場合もあります。

3.3 高温超伝導線

現在研究開発が進められている超伝導応用分野の多くは、高温超伝導の実用化を目指したものです。高温超伝導体を超伝導にした高温超伝導線はすでに製品として販売されていますが、その構造は低温超伝導線とは大きく異なり、極細多芯構造ではなく、幅数mm、厚さ0.1 mm程度のテープ状となっています。高温超伝導線の模式図を図5に示します。厚さ0.1 mmのうち、実際の高温超伝導体の厚さは数 μm となっており、薄膜高温超伝導線とも呼ばれます。高温超伝導体以外の部分は、高温超伝導体の結晶構造をきれいに作るための基板や高温超伝導体が常伝導転移した際の電流の逃げ道となる銅層などになっています。

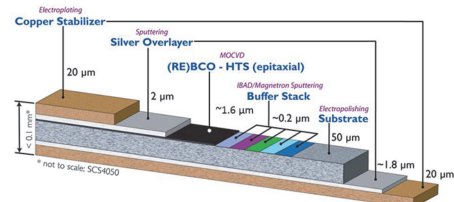


図5 高温超伝導線の模式図 [4]

このように、厚さに対して幅が非常に広く、断面アスペクト比が極めて大きいというのが現在の高温超伝導線の大きな特徴です。

この構造と、高温でも超伝導状態になるという特徴に伴い、高温超伝導線は低温超伝導線にはなかった多くの難しさを抱えています。まず、幅が広いという点から、交流損失が大きいという問題、また、外部から時間的に変化する磁場が加わったときに超伝導層に渦電流（遮蔽電流と呼びます）が流れてしまうという問題があります。交流損失については、高温超伝導線は比熱が高い高温でも超伝導状態でも使用可能であることから、交流損失が発生する環境でも超伝導状態が壊れることなく運転できる可能性があるため交流環境への応用が研究されていますが、あまりにも交流損失が過大になると運転効率などの観点で問題となるため、高温超伝導線の交流損失低減が大きな研究開発課題となっています。また、遮蔽電流については、遮蔽電流が流れることによって発生する付加的な磁場（遮蔽電流磁場）や超伝導線内で局所的に電磁力が集中することによる臨界電流の低下や超伝導線の破損などといった問題を引き起こすことが知られています。また、金属のテープのような形状であることから、曲げられる方向に制限があり、複雑な形状のコイルを作ることが困難であるという問題もあります。さらに、高温超伝導線は臨界温度が高いため簡単には超伝導状態が壊れませんが、代わりに比熱が高い領域で使用することになるため、超伝導線の一部に欠陥があったり局所的に力が加わって臨界電流が低下してしまったとき、その箇所だけが常伝導転移してしまい、結果的にコイルを巻いている超伝導線が焼き切れてしまったり臨界電流が大きく低下したりすることが知られています。高温超伝導の応用を実現するためには、これらの問題を解決することが必要であると考えられています。

3.4 現在研究開発が行われている超伝導応用－高温超伝導の実用化に向けて－

高温超伝導線の応用分野としては、大きく分けて電気機器応用と電磁石応用が検討されています [5]。電気機器応用の分野では、回転機（モータ）、発電機や変圧器、（厳密には電気機器ではありませんが）送電ケーブルなどの、従来であれば銅線で作られていたものを高温超伝導線で置き換えるような分野と、超伝導磁気エネルギー貯蔵装置（Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES）や限流器といった高温超伝導体でなければ実現できない分野が存在しています。前者の分野では、超伝導コイルを採用することによって電流密度を高くすること、並びに発生磁場を強くすることによる効率の向上や小型・軽量化が目的となっています。一方、後者の分野については、SMES では超伝導特有の完全導電性を利用して永久電流状態で電流を保持することで電気エネルギーを磁気エネルギーに変換して貯蔵する、限流器では超伝導体に臨界電流を超える電流を流した時に常伝導転移が発生して抵抗をもつようになることを利用し、過大な電流が流れたときにそれを低減させる機能をもつ、といったように、超伝導特有の特性を活用した応用分野となっています。

電磁石応用の代表的な例として、高磁場マグネット（電磁石）と核融合炉用マグネットが挙げられます。高磁場マグネットとは、低温超伝導線で作られていた従来の超伝導マグネットでは発生できないような、より強い磁場を発生可能なマグネットのことを指します。低温超伝導線の中で最もよく使用される NbTi で作られたマグネットの最大磁場は 9 T（テスラ）程度が限界とされていますし、Nb₃Sn でも 20 T 程度が限界と言われています。つまり、これを超えるような極めて高い磁場を発生させるためには、臨界磁場がさらに高い高温超伝導線で作られるマグネットが必要になります。このような強い磁場は、科学研究のための試験施設などにおいて物質の特性や構造を調べる時に必要とされるほか、先述した加速器用電磁石のさらなる高エネルギー化において重要とされています。

核融合炉用マグネットにおいては、超伝導マグネットは「容器」として働きます。核融合とは、非常に高エネルギーの状態にされた重水素や三重水素（水素の同位体で、原子核が陽子 1 つと中性子 1 つで構成されるものを重水素、原子核が陽子 1 つと中性子 2 つで構成されるものを三重水素といいます）が衝突し、ヘリウムの原子核と中性子 1 つに変換される現象のことを指しています。この変換の際に莫大なエネルギーが放出されるため、このエネルギーを利用して発電しよう、というのが核融合発電で、京都大学を含め、世界中で研究が進められています。発電の過程として生成されるのがヘリウムの原子核と中性子であるため、核分裂反応とは違って放射性物質が発生しないこと、また原料が重水素などであり、それらは海水などの中に大量に含まれていることから、原料の確保も比較的容易であることなどが利点として挙げられます。しかし、重水素・三重水素の原子核は正の電荷を帯びていますので、通常の状態では核融合反応は発生しません。そこで、原料となる重水素などを、1 億度を超える温度まで加熱してプラズマ化することによって核融合反応を引き起こすことが必要になります。加熱の方法にはいろいろな方法が提案されていますが、大規模な核融合発電を実現するためにはプラズマをたくさん作り、それを閉じ込めておき、核融合反応を起こす必要があります。プラズマは荷電粒子の集まりですので、プラズマを閉じ込めるために強い磁場が必要になります。そこで、高温超伝導マグネットで強い磁場を発生し、高温超伝導マグネットを「容器」として使用する、ということです。核融合発電に関する研究開発は近年急速に進みつつあり、多くの新興企業が立ち上がり、核融合発電実用化の一番乗りを競い合っています。その一つがアメリカのマサチューセッツ工科大学（MIT）から立ち上がった Commonwealth Fusion Systems という会社で、図 6 に示す ARC と呼ばれる核融合炉を作り、そこで核融合発電を実現して系統に電力を供給し



図6 Commonwealth Fusion Systems で検討が行われている ARC[6]

ようとしています。核融合関連技術の研究開発の流れの中で、高温超伝導マグネットに関する研究開発も一足飛びに進んでいる状況であり、高温超伝導技術の実用化はこれまでにないスピード感で進展しつつあります。

4. おわりに

超伝導の工学的な魅力は、抵抗ゼロで電流が流せること、すなわち高い電流密度で電流が流せること、並びに超伝導線で作ったときに強い磁場を発生できることです。これらの利点を生かし、これまでも現在も様々な種類の応用が研究されてきています。現在すでに存在している常伝導体を使用した装置を超伝導に置き換えることによって性能を向上させる、あるいは現在の常伝導体では実現できないものを超伝導によって実現する、というように、超伝導技術の応用には非常に幅があります。特に近年は、高温超伝導線の応用に注目が集まっており、電気機器や電磁石への応用に向けた研究が世界中で急速に進展しています。

このような背景から、京都大学雨宮研究室では、高温超伝導技術の実用化のために必要となる基礎的な研究に取り組んでおり、高温超伝導線の課題を解決していくことを目指し、実験やシミュレーションによる評価を行っています。この先、超伝導技術の応用はどんどん広がっていくと予想されます。将来は今では想像できないような、超伝導を使った機器が身の回りに溢れているような社会が実現するかもしれません。読者の皆さんが、本稿で超伝導に興味をもち、将来の超伝導応用社会を実現するための研究者となってくれば、大変喜ばしいと思っています。超伝導に限らず、今よりもっと良くする、もしくは今はできないことをできるようにする、ということは工学においてとても重要な視点であり、これを意識し続けることが工学者には求められるので、工学部を志望される皆さんにはぜひ心に留めていただきたいと思います。

参考文献：

- [1] 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻雨宮研究室 HP「超伝導とは？」(http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/about_sc.html)
- [2] 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻雨宮研究室 HP「興味の対象とアプローチ」(<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/aproach.html>)
- [3] CERN, “Large Hadron Collider restarts” (<https://home.cern/news/news/accelerators/large-hadron-collider-restarts>)
- [4] SuperPower Inc., “2G HTS Wire Specification” (<https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>)
- [5] M. Noe, R. Heller, W.H. Fietz, and W. Goldacker, “HTS Applications,” CERN Yellow Reports: Conference Proceedings (WAMSDO Workshop 2008: Workshop on Accelerator Magnet Superconductors, Design and Optimization 2008), p. 94 – 97.
- [6] Commonwealth Fusion Systems, “ARC: Putting fusion energy on the grid” (<https://cfs.energy/technology/arc>)

軽量機械学習の原理と応用

大学院情報学研究科 情報学専攻 情報回路アーキテクチャ分野
佐藤 高史、栗野 皓光

1. 軽量機械学習という選択肢

近年、機械学習技術は多様な分野において知的情報処理の中核を担うようになり、社会的基盤技術として急速に定着しつつある。しかし、その多くは大規模データと高性能計算資源を前提としており、演算量・消費電力・モデル規模のいずれにおいても極めて重厚である。このことは、エッジデバイスやIoTノードのように計算・電力資源の制約が厳しい環境における応用を阻む要因となっている。また、クラウド依存型の学習・推論は通信遅延やセキュリティ上の制約を伴い、リアルタイム性や自律性が求められる応用領域では必ずしも有効ではない。そのため、限られた計算資源下でも安定して知的処理を実現する軽量機械学習 (lightweight machine learning) の必要性が高まっている。

軽量化の方策は大きく二つに分けられる。一つは、既存のニューラルネットワークに対してパラメータ削減や量子化、スパース化などの構造的最適化を施すアプローチである。もう一つは、情報処理の原理そのものを再構築し、より単純かつ頑健な計算機構を新たに設計するアプローチである。後者は脳神経系や物理系の動作原理から着想を得た非従来型計算の一潮流を形成している。

この流れの中で注目されているのが、リザーバ計算 (Reservoir Computing, RC) および超次元コンピューティング (Hyperdimensional Computing, HDC) である。両者はいずれも、学習すべきパラメータを最小限に抑えつつ、非線形かつ高次元の状態表現を利用することで、少ない計算で高い表現能力と汎化性能を実現するという点で共通している。

RCは、非線形動的システムの内部状態を「リザーバ」として利用し、そのダイナミクスを通じて入力情報を高次元空間に写像する手法である。内部結合を学習せず出力層のみを訓練する構造により、学習コストを大幅に削減できる。また、リザーバを物理現象 (光、音、流体、電子回路など) として実装することも可能であり、情報処理を物理現象そのものに委ねる物理情報処理の枠組みとしても注目されている。

一方、HDCは、人間の脳が扱う情報が高次元で冗長な表象として符号化されているという仮説に基づき、数千次元規模のベクトル (ハイパーベクトル) を基本単位とする計算モデルである。単純な代数演算で高次元表現を結合・比較できるため、計算が極めて軽量でありながら、ノイズやビット誤りに対して本質的に頑健な性質を有する。さらに、その構造はデジタル回路実装や低精度演算にも適しており、エッジデバイス上での自律的推論に有望とされている。

RCとHDCはいずれも、従来の統計的学習パラダイムとは異なり、「構造の中に知能を埋め込む」アプローチを志向している。すなわち、重厚な学習を行う代わりに、動的系や高次元空間の性質を利用して表現と汎化を実現する点に本質的な革新性がある。これらの手法は、エネルギー効率と信頼性の両立が求められる次世代知能デバイスの基盤技術として、近年急速に研究が進展している。

3. リザーバー計算

3.1 RC の構成と動作原理

リザーバー計算 (RC) は、再帰型ニューラルネットワークの一種であるエコー・ステート・ネットワーク (Echo State Network, ESN) をもとにした計算方法である。RC は、図 1 に示すような 3 つの層から構成される。

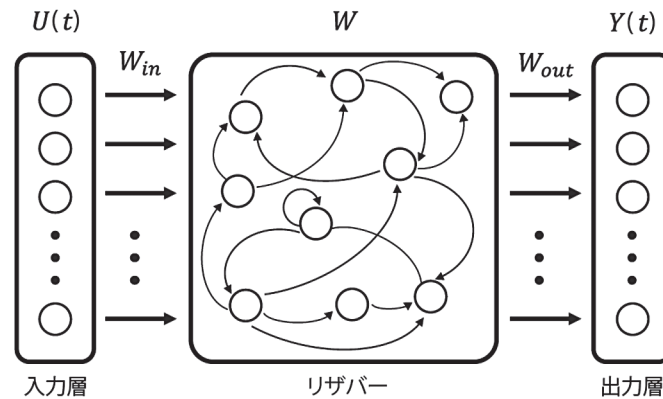


図 1：RC の概念的構成

1. 入力層 (Input Layer): 時系列入力のリザーバーにおける役割を持つ。入力層の結合重みは通常固定されており、学習の対象とはならない。
2. リザーバー (Reservoir): 大規模で疎に結合した非線形ノード群からなる動的システムであり、入力層からの信号を受け取り、その応答として内部状態を生成する。ここでも結合重みは通常固定され、学習は行わない。リザーバーの役割は、入力された時系列データを、リザーバー内ネットワークの動的な時間発展を利用して高次元かつ非線形な状態表現へ写像することにある。この状態は「リザーバー状態」や、過去の入力履歴の残響 (エコー) を保持することから「エコー状態」とも呼ばれる。
3. 出力層 (Readout Layer): リザーバー状態から、目的とする出力を取り出す。ここで使う出力重み W_{out} だけが学習対象となる。

RC の特徴は、入力データをリザーバーの非線形な動作により高次元に変換することと、出力層だけを学習すれば良いという点にある。学習にはリッジ回帰などの軽量の計算手法が使えるため、学習コストや計算時間が小さい利点がある。

ここで、非線形な高次元射影の例として、2次元平面で「円の内側にある点」と「外側にある点」を分類したいとする。円の境界は曲線なので、直線で分けること (線形分離) はできない。しかし、各点の座標 (x, y) から半径の二乗 $z^2 = x^2 + y^2$ を計算し、これを新しい軸として追加した 3次元空間では、円の内外の点を容易に平面で分離できる。リザーバーも同様に、時系列の入力データに対し高次元のリザーバー状態を作ることによって、単純な線形回帰にもとづく出力層のみの学習により、分類や予測ができるようにしている。

3.2 物理現象による高次元射影

RC が注目される理由の一つは、リザーバーの役割を物理システムに置き換えられることが挙げられる。

この「物理リザーバー」では、様々な物理システムに固有の非線形性と時空間ダイナミクスを、入力情報の高次元射影を行う「計算資源」として活用する。

では、リザーバーとして機能する動的システムが入力情報を効果的に高次元に写像し、出力層のみの学習によって高度な分類や予測ができるためには、どのような条件が必要であろうか？ このための条件として「リザーバー条件」が知られている。これは大まかには、リザーバー状態 $x(t)$ が、過去の入力時系列 $u(1), \dots, u(t-1), u(t)$ によって一意に決定され、初期状態に依存しないということである。また入力信号の影響が時間と共に減衰し、やがて消滅するようにする。すなわち、リザーバーは過去の情報を無限に保持するのではなく、適切な「記憶の窓」を持つようになっている必要がある。数学的には、再帰的に使用されるリザーバーの結合行列 W のスペクトル半径（最大固有値の絶対値） $\rho(W)$ を 1 未満に設定する。これにより、内部の励起が発散せず、また入力信号がなくなると状態はゼロに収束する。

この際、入力時系列のわずかな相違や、同じ入力系列の異なる部分が、リザーバー内の状態空間において互いに明確に分離された異なる高次元ベクトルに発展し、表現される必要がある。つまり、リザーバーが適度な非線形性をもち、多くのノードにより、線形分離が困難な入力データを線形分離が容易な高次元空間へと広く射影する必要がある（分離性）。また、システムが時系列予測や音声認識等のタスクにおいて過去の入力履歴を適切に記憶し、その情報を出力層での線形読み出しに利用できる必要がある（記憶性）。 $\rho(W)$ の値を 1 に近づけることで記憶容量は増大するが、 $\rho(W)$ を 1 を超えて大きくするとシステムが不安定になり、発散するリスクがある。

これらの条件はなかなか厳しいようにも見えるが、こうした条件を満たす物理現象は意外に多くあり、物理リザーバーは様々な分野で研究が進められている。例えば、光リザーバー計算では、遅延フィードバックループを持つ光集積回路や半導体レーザー等がリザーバーとして用いられる。入力信号は光の強度変調として注入され、遅延時間やレーザーの非線形応答がリザーバーの動特性を提供する。また、電子リザーバー計算では、メモristaと呼ばれる抵抗変化型素子や CMOS 回路の非線形特性が利用される [1][2]。集積回路により RC を実現した例としては、[3][4] 等がある。さらに、流体力学的な渦のダイナミクスや、微生物の集団行動のパターンなど、多様な動的システムがリザーバーとして検討されている。

4. 超次元コンピューティング

4.1 高次元ベクトルで「考える」仕組み

リザーバーコンピューティングでは情報を高次元空間へと写像することで軽量の機械学習を実現していた。似通ったアプローチに超次元コンピューティング（Hyperdimensional Computing, 以下 HDC）と呼ばれるものも存在する。HDC は、人間の脳が膨大な数のニューロンの協調的活動によって情報を表現・処理しているという観察に着想を得た新しい計算パラダイムである。この枠組みでは、情報は数千～数万次元のベクトル（ハイパーベクトル）として符号化される。各ハイパーベクトルは多くの要素を含み、その要素はランダムに独立して分布する。このような高次元空間では、異なるベクトル同士は高確率で直交し、また多様な情報を単純な演算で結合・比較できるという性質をもつ。

たとえば、文字“A”を表すハイパーベクトルと、音“A”を表すハイパーベクトルを結合すれば、それらの関連性を新しいベクトルとして表すことができる。また、ある入力があるどのカテゴリに属するかを判断する際には、テストデータのベクトルと各クラスの代表ベクトルとの類似度（コサイン類似度やハミング距離）を計算すればよい。このように、HDC は統計的最適化や勾配降下法に頼ることなく、単純な代数演算で知的判断を実現する。

高次元ベクトルを扱うことの利点は、情報がきわめて冗長かつ分散的に表現される点にある。人間の脳でも、ひとつの概念は多数のニューロンに分散して符号化されていると考えられており、一部のニュー

ロンが失われても全体の意味は保持される。HDC も同様に、ベクトル要素の一部が欠損しても全体の情報が保持されるため、ノイズやビット誤りに対して本質的に頑健である。この性質は、後述する低電圧環境や信頼性の低いメモリを用いたハードウェア実装において特に重要な意味をもつ。

4.2 高次元空間における情報表現

HDC では情報（たとえばセンサ信号、テキスト、画像特徴）はまず符号化によって高次元ベクトル空間に写像される。このとき、各特徴次元にはランダムに生成された基底ベクトルが割り当てられる。入力ベクトルの要素値とこれらの基底ベクトルの線形結合によって、入力全体を表すひとつのハイパーベクトルが生成される。この符号化は整数、浮動小数点数、あるいはバイナリのいずれの精度でも実装可能であり、精度とエネルギー効率のバランスを柔軟に調整できる。

HDC における情報結合には主に三つの基本操作が存在する。

1. 結合：2つのベクトルを要素ごとの乗算や XOR 演算で結合し、関係性を表す。
2. 重ね合わせ：複数のベクトルを加算し、複数の情報をひとつのベクトルに重畳する。
3. 類似度評価：新しいベクトルと既知のベクトルの類似度を計算し、もっとも近い概念を推定する。

この3操作のみで、概念表現・記憶・推論といった認知的機能を模倣できることが HDC の最大の特徴である。また、各次元要素が同等の寄与度をもつホログラフィ的表現である点も重要である。これは、従来の数値表現のように特定のビットが重要となる構造ではなく、どの要素も全体に均等な重みをもつ。そのため、ビット反転や欠損が生じて意味の喪失は局所的に留まり、全体の推論結果は大きく変化しない。

以降では手書き数字認識データセット MNIST を例に HDC における具体的な符号化・学習・推論プロセスを見ていく。なお、HDC の実現方法は様々なアプローチが提案されており、以下で説明するのはあくまでも一実現例であることに注意されたい。

4.2.1 情報を高次元空間へ写像する：ハイパーベクトル表現

HDC では、入力データの各要素は、まず基底ハイパーベクトル (base hypervector) と呼ばれるランダムな高次元ベクトルに割り当てられる。ここで重要なのは、次元数が十分に大きい場合（典型的には $D = 10,000$ 程度）、ランダム生成されたベクトル同士は高確率で直交することである。したがって、互いに干渉を受けにくい分散表現が実現される。

MNIST 画像は 28×28 画素のグレースケール画像 (0 ~ 255 階調) である。これを HDC で扱う場合、次のように符号化が行われる。

1. 画像を 1 次元配列に変換

画像は各要素が輝度値に対応する 2 次元の行列として表現されるが、後々の扱いを容易にするために、2 次元行列を 1 次元行列へとフラット化する。得られた 1 次元ベクトルを x とする。

2. 画像の符号化

MNIST では 28×28 の画像を扱うため、フラット化により $28 \times 28 = 768$ 次元の 1 次元ベクトルが得られる。この時、以下のように画像のハイパーベクトルを得る (図 2)。

$$H = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^{768} P_i \odot L_{x_i} \right)$$

ここで、 $\odot$ は要素積である。また、 P_i および L_i はそれぞれ位置ハイパーベクトル、レベルハイパーベクトルであり、画素の位置関係及び輝度値をハイパーベクトルでエンコードしたものである。ここで P_i は完全なランダム値で良いというわけではなく、画素の位置関係や輝度値の大小関係を表現できるよう

に近傍にある画素に対応する位置ハイパーベクトルが近い値を持つように選ぶ必要がある。具体的には以下のように P_i を選ぶ。まず、基準となる P_1 をランダムに選ぶ。次に、 P_1 の要素の一部をランダムに正負反転させたものを P_2 とする。同様に P_2 の一部を反転させて P_3 を得る。この操作を繰り返していくことで、隣接する位置に対応するハイパーベクトルが類似するベクトルとなり、元の値の関係性を保持できる。レベルハイパーベクトル L_i についても同様に選択する。

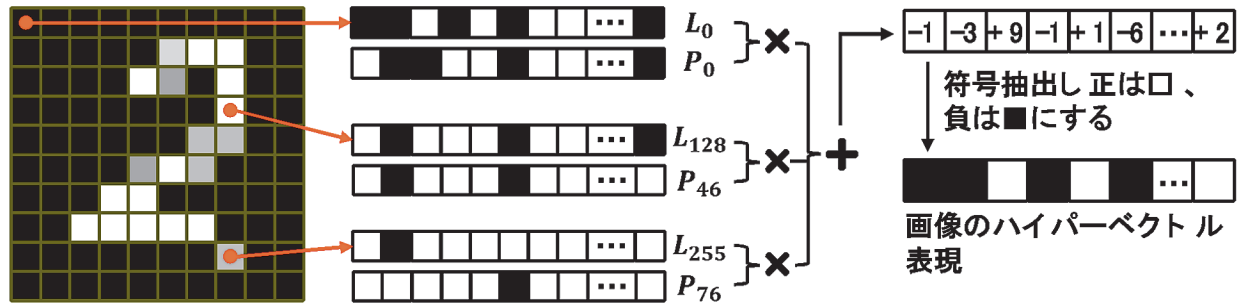


図2：画像のエンコーディング例

4.2.2 学習：統計的集約によるクラス中心ベクトルの形成

HDC ではニューラルネットワークのように誤差逆伝搬等を必要とする勾配降下は行わない。代わりに符号化された入力ベクトルを同じクラスごとに加算し、統計的に特徴を抽出する。MNIST 分類の場合、クラスは文字 “0” から文字 “9” に対応する 10 クラスが存在するため、予め各クラスに対応するハイパーベクトル（クラス中心ハイパーベクトル）を用意する。なお、クラス中心ハイパーベクトルはランダムに初期化しておく。ある画像に対応するハイパーベクトル H が入力されたとき、その画像が属するクラスに対応するクラス中心ハイパーベクトルは

$$C_i = C_i + \alpha H$$

の様に更新する。 α は学習率である。一方、その画像が属さないクラスに対応するクラス中心ハイパーベクトルは

$$C_i = C_i - \alpha H$$

とする。つまり画像が属するクラスのクラス中心ハイパーベクトルと H との類似度を高め、逆に、画像が属さないクラスのクラス中心ハイパーベクトルと H との類似度が低くなるように学習する。この操作を画像を入れ替えながら何回か反復することでクラス中心ハイパーベクトルを学習する。最後に重要な特徴のみを抽出すべく、クラス中心ハイパーベクトルの各要素の符号のみを取り出しておく。

4.2.3 推論

推論では、入力される未知の画像を 4.2.2 と同じ手順でハイパーベクトル表現 (H_{new}) に変換し、すべてのクラス中心ベクトルとの類似度を計算する。類似度の計算にはコサイン類似度等を用いれば良い。この過程は完全に並列化可能であり、要素単位の独立演算によって極めて高速に動作する。そのため、FPGA や低電圧 ASIC 実装でのリアルタイム推論が可能である。最後に、最も類似度の高いクラスを分類結果として出力する。

ここまで見てきたように HDC は勾配降下も必要としない非常に軽量なアルゴリズムである。にもかかわらず、MNIST 画像分類では 90% 程度の分類精度を達成できる。もちろん、昨今の高性能なニューラルネットワークと比較すると分類精度は見劣りしてしまうが、計算資源が限られているようなデバイスに知的な処理を導入したい場合には HDC が有力な候補となりうる。

5. 応用例

超次元コンピューティング（HDC）をはじめとする軽量機械学習手法は、その計算構造の単純さから「せいぜい簡単なクラス分類しかできないのではないか」と思われがちである。しかし、たとえ基本的な分類処理であっても、問題設定を工夫することで、実用的な応用を実現できる。本章ではその一例として、連続値制御問題を離散的なクラス分類として単純化した自動運転タスクに着目し、小型自律走行ロボット DonkeyCar への応用事例を紹介する。

DonkeyCar は、ラジコンカーにカメラと小型コンピュータを搭載し、視覚情報に基づいて自律走行を行うためのオープンソースプラットフォームである。前方カメラから得られる画像を入力として、ステアリング操舵角度とスロットルを出力するという構成を持つが、搭載される計算資源や電力には厳しい制約がある。そのため、大規模なニューラルネットワークを用いた深層学習をそのまま適用することは必ずしも現実的ではない。このような条件下で、計算が軽量で頑健性の高い HDC は有力な選択肢となる。

本例では、問題を単純化するためにスロットルを一定値に固定し、ステアリング操舵角度のみを推定対象とした。DonkeyCar の入力画像は 120×160 画素の RGB 画像であるが、計算量削減のため、まずグレースケール化を行い、さらに 30×40 画素へと縮小する。この処理により画素数は大幅に減少するが、コースの形状や進行方向を判断するための情報は十分に保持される。

学習データとしては、人間が DonkeyCar を操作して走行した際のログを用いる。各フレーム画像には、その時点でのステアリング操舵角度がラベルとして付与されており、これを教師データとして利用する。画像と角度の組が十分に集まれば、HDC による学習が可能となる。

ステアリング操舵角度は連続値であり、その予測は回帰タスクに分類される。一方、HDC は分類タスク向けの手法であるため、そのままではステアリング操舵角度の予測には適用できない。そこで、本手法ではステアリング操舵角度をいくつかの区間に分割し、各区間をクラスとして扱うことで回帰タスクを分類タスクとして扱う。例えば「大きく左」「やや左」「直進」「やや右」「大きく右」といったようにステアリング操舵角度をクラスとして表現する。各クラスには MNIST 画像分類と同様に、クラスハイパーベクトルを割り当て、学習を通じて分類精度が高くなるように調整される。

学習時には、入力画像から生成したハイパーベクトルと、現在のクラスハイパーベクトルとの類似度を計算し、最も近いクラスを求める。予測結果が正解であれば更新は行わず、誤っていた場合には、正しいクラスハイパーベクトルに入力画像に対応するハイパーベクトルを加算すると同時に、それ以外のクラスハイパーベクトルからは減算する。このような単純な更新則を繰り返すことで、各クラスの特徴が集約されていく。さらに、最も近いクラスだけでなく、2 番目や 3 番目に近いクラスにも小さな補正を加えることで、角度区間の境界付近における推定を滑らかにする工夫も導入した。

推論時には、走行中に取得したカメラ画像を学習時と同じ手順でハイパーベクトルに変換し、すべてのクラスハイパーベクトルとの類似度を計算する。その結果から最も近いクラス、あるいは類似度上位の複数クラスを重み付きで平均することで、最終的なステアリング操舵角度を決定する。この処理は要素ごとの独立した演算のみで構成されており、大規模な行列演算や勾配計算を必要としないため、非常に高速かつ低消費電力で実行できる。

図 3 に DonkeyCar シミュレータと、HDC によるステアリング操舵角度の予測を示す。HDC による予測値は正解値（学習データ）と十分近いことが確認できる。また、実際にシミュレータ内で DonkeyCar を走行させてみたところ、多少のふらつきはあるものの、コースを 1 周出来ることを確認した。

このように、HDC のような軽量機械学習は「高度なことはできない単純な手法」と見なされがちであるが、タスクの定式化を工夫することで、自律走行のような複雑に見える問題にも応用可能である。

DonkeyCar への適用事例は、限られた計算資源のもとでも知的な振る舞いを実現できることを示す好例であり、今後のエッジ AI や小型ロボットにおける知能化の可能性を具体的に示している。

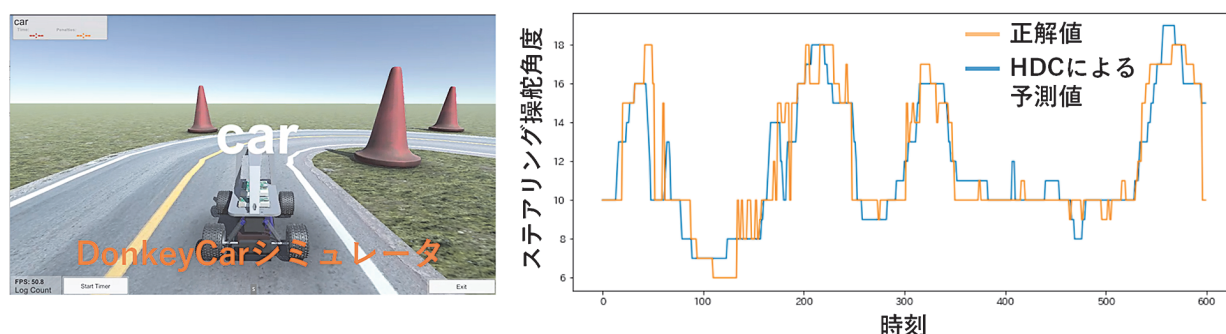


図 3 : DonkeyCar シミュレータ

7. まとめ

現在の AI 技術、特にディープラーニングや大規模言語モデルは驚異的な能力を発揮しているが、膨大な計算資源の要求と電力消費が大きな課題となっている。小型ロボットの自律制御や無数に設置される IoT デバイス等、計算リソースに制約のある「エッジ」の環境では、これらの重く大きいモデルをそのまま動かすことは困難である。エネルギー効率と信頼性の両立は、これからの知能デバイスにとって避けては通れないテーマとなっている。物理現象を効果的に利用し計算を実現する RC と、既存のデジタル情報処理ハードウェアと高い親和性を持つ HDC は、小さくても賢いデバイスを実現する有力な候補となっている。私たちの身の回りにあるあらゆるモノが知能を持つ「真の AI 社会」を支える重要な基盤として、今後さらなる研究と社会実装が進んでいくことが期待される。

参考文献：

- [1] Y. Kume, S. Bian, and T. Sato, "A tuning-free hardware reservoir based on MOSFET crossbar array for practical echo state network implementation," in Proc. ACM/IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conference, Jan. 2020.
- [2] H. Li, M. Utsunomiya, R. Seki, F. Liang, and T. Sato, "EMESN: An extended MOSFET reservoir computing architecture for echo state networks with hardware-software co-optimization," in Proc. ACM/IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conference, Jan. 2026.
- [3] S. Ikeda, H. Awano, and T. Sato, "Modular DFR: Digital delayed feedback reservoir model for enhancing design flexibility," ACM Transactions on Embedded Computing Systems, Vol.22, No.5s, Sept. 2023.
- [4] S. Ikeda, H. Awano, and T. Sato, "Online training and inference system on edge FPGA using delayed feedback reservoir," IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol.44, No.9, Sept. 2025.