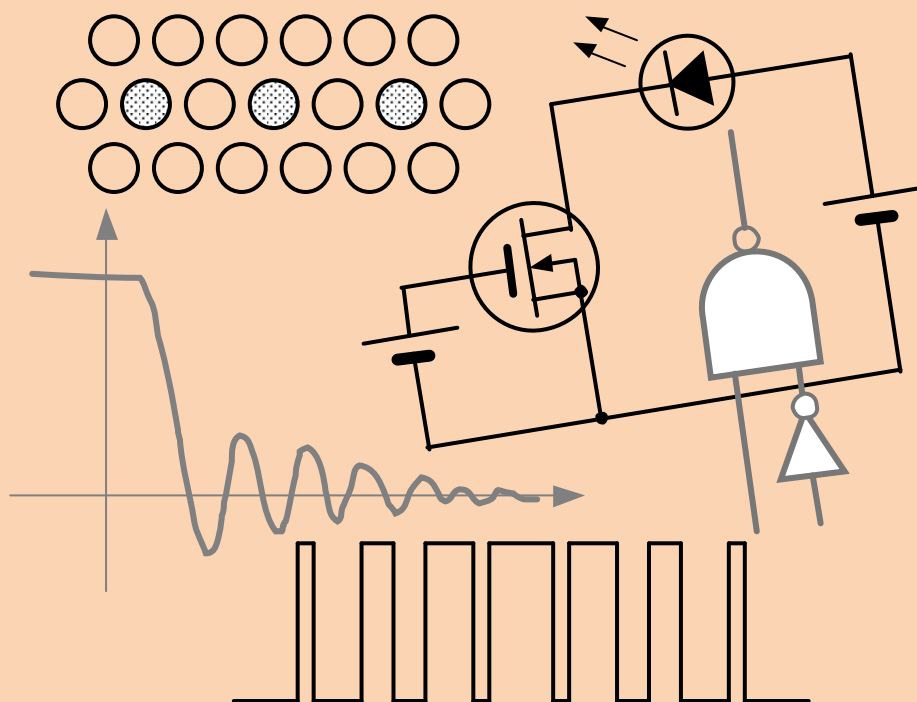

京都大学オープンキャンパス2022

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ないものはありません。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、薄型 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。

電気系教室（電気電子工学科および関連部門）の組織

工学研究科

電気工学専攻

先端電気システム論講座
システム基礎論講座自動制御工学分野
システム基礎論講座システム創成論分野
生体医工学講座複合システム論分野
生体医工学講座生体機能工学分野
電磁工学講座超伝導工学分野
電磁工学講座電磁回路工学分野
電磁工学講座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

電子工学専攻

集積機能工学講座
電子物理工学講座極微電子工学分野
電子物理工学講座応用量子物性分野
電子物性工学講座半導体物性工学分野
電子物性工学講座電子材料物性工学分野
量子機能工学講座光材料物性工学分野
量子機能工学講座光量子電子工学分野
量子機能工学講座量子電磁工学分野

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
デバイス創生部門先端電子材料分野

情報学研究科

知能情報学専攻

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

通信情報システム専攻

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伝送メディア分野
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方式分野
集積システム工学講座大規模集積回路分野
集積システム工学講座超高速信号処理分野

システム科学専攻

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医用工学分野

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プロセスエネルギー学分野

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電磁環境探査分野
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

も く じ

工学研究科

電気工学専攻

先端電気システム論講座【引原研】	5
自動制御工学分野【萩原研】	6
システム創成論分野【阪本研】	7
複合システム論分野【土居研】	8
生体機能工学分野	9
超伝導工学分野【雨宮研】	10
電磁回路工学分野【和田研】	11
電磁エネルギー工学分野【松尾研】	12
宇宙電波工学分野【小嶋研】	13
マイクロ波エネルギー伝送分野【篠原研】	14
電波科学シミュレーション分野【大村研】	15

電子工学専攻

集積機能工学講座	16
極微電子工学分野【白石研】	17
応用量子物性分野【竹内研】	18
半導体物性工学分野【木本研】	19
電子材料物性工学分野	20
光材料物性工学分野【川上研】	21
光量子電子工学分野【野田研】	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

知能情報学専攻

言語メディア分野【黒橋研】	25
画像メディア分野【西野研】	26

通信情報システム専攻

デジタル通信分野【原田研】	27
伝送メディア分野	28
知的通信網分野【大木研】	29
情報回路方式分野【佐藤研】	30
超高速信号処理分野【橋本研】	31
リモートセンシング工学分野【山本研】	32
地球大気計測分野【橋口研】	33

システム科学専攻

論理生命学分野【石井研】	34
医用工学分野	35

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】	36
-----------------	----

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】	37
プロセスエネルギー学分野【白井研】	38

工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座

引原隆士, 薄良彦, 持山志宇

電気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は線形—ある 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—であること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) 特性では, その比例関係が大きな変化に対して保たれない場合が多く見られます. そのような特性は**非線形特性**と呼ばれます. 私たちの研究室の使命は, 非線形特性をもつ素子, 装置, システムを対象として, 特性の記述 (モデル化), 解析, そして制御を行うことにより, 新しい機能を有する先端的な電気電子回路やシステムを提案することにあります.

研究の一例としてパワーエレクトロニクスについて説明します. 電気には「直流」と「交流」という 2 つの形態 (かたち) があります. 家庭のコンセントで得られる「交流」から多くの家電・情報機器が使用する「直流」への変換は私たちの身の回りで日常的に行われています. 太陽電池パネルの出力する電気も「直流」であり, その出力を電気エネルギーネットワークに供給するには「交流」への変換が必要になります. このように電力の供給を目的として電気を希望の形態へ変換する技術であるパワーエレクトロニクスは, 身近に有るインバータと呼ばれる「直流」を「交流」に変換する電気回路, 情報機器の電源アダプタ等で交流を適切な直流に変換するコンバータなど, 我々の身の回りに当たりまえにある技術です. これらの回路では, 半導体素子をスイッチ素子として用いることで電流の量を時間で断続して制御しています. これはスイッチ素子のもつ非線形特性を利用した技術なのです. この技術をさらに論理も含めた電力の伝送も含めた伝送—**パワープロセッシング**—にまで展開していくことが, 電気電子情報に関わる私たちの研究室の技術の夢と考えています. このように技術の極限を工学として目指す一方, 人の生活を維持するという社会的視点に立ってパワーエレクトロニクスを研究することも重要です. この観点では, 電力消費を下げつつシステムとしての機能を高める技術が求められています.

私たちの研究室では, 先進的半導体パワーデバイスであるワイドバンドギャップ半導体素子の応用研究をボトムアップに進めており, 新しい電気システムの提案として電力と情報を同時に伝送する「電カルーティング」や「電カパケット」の研究開発を行っています (右図). これに関連した太陽電池や二次電池などの出力制御, 連続と離散が混在したハイブリッドな系の制御, デバイス特性の物理モデルの構築, 非線形 MEMS デバイスのセンサ応用, さらにはカオスを始めとする非線形力学の工学的応用研究も行なっています.

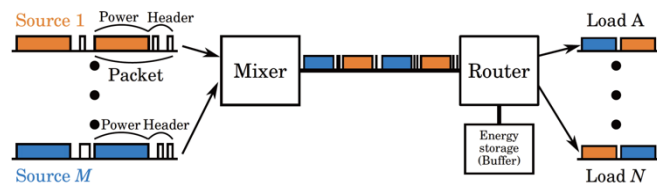


図 1 電力パケット:電力と情報を同時に伝送することで高機能な電気エネルギーシステムを実現!

興味のある方はホームページ (<https://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>) をご覧下さい.

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るつもりが、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 電気工学専攻 システム創成論分野

阪本 卓也

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

ワイヤレス人体センシング：新時代の幕開け

当研究室では、システム理論的アプローチによる人体の電波センシングを研究しています。これまで、人体のセンシングといえば、スマートウォッチなどのウェアラブルデバイスやカメラなどの光学センサーによる計測が一般的でしたが、こうした従来の方法とは異なり、電波によるワイヤレス人体センシングは、①センサー装着が必要なく、②プライバシーの懸念もないことに加え、③衣類を透過して皮膚表面を直接測定できるため、次世代社会を拓くキーテクノロジーとして期待されています。

ワイヤレス生体計測技術

人体の皮膚表面には呼吸・心拍による数十ミクロン～数ミリ程度の動きが見られます。こうした運動を行う対象から反射された電波はドップラー効果による周波数変化が見られるため、電波により遠くから非接触で生体情報がわかるわけです。当研究室では、心臓の収縮拡張の性質に着目し、心拍数を約1%という高精度で非接触計測できる技術を世界に先駆けて開発しました(図1)。

電波による人体イメージング

現在、空港等では、ミリ波スキャナ装置により、乗客が隠し持った武器などを自動検出する技術が使われています。こうしたスキャナ装置に必要な信号処理を高速化するため、信号の波形自体ではなく、信号の特徴点を用いた電波イメージング手法を開発し、データ量の削減と処理の高速化を実現しました。人体の模型を用いた測定(図2)では、イメージング処理を約100倍高速化できることを実証しました。

ワイヤレス睡眠モニタリング

睡眠不足や質の低下は、不安・抑うつといった症状と関係するため、健康管理では睡眠を正確かつ

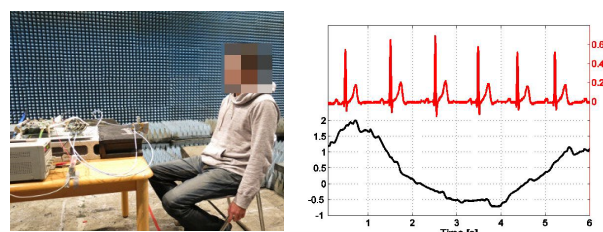


図1 電波による非接触心拍計測(左)と測定信号(右)

長期にわたって記録することが重要です。電波計測は、接触センサーのような不快感もなく、カメラとは異なりプライバシーの問題も回避でき、快適かつ長期的に睡眠の計測が可能になります。当研究室では、睡眠中の人体の情報を総合的に電波計測するシステムを開発しています(図3)。

電波によるジェスチャー認識

現在のスマートフォンは画面に触れて操作していますが、ジェスチャー認識が可能になれば非接触で操作可能になり、次世代のインターフェースとして期待できます。当研究室では、電波と機械学習(人工知能)を使ったジェスチャー認識技術の開発を進めています(図4)。

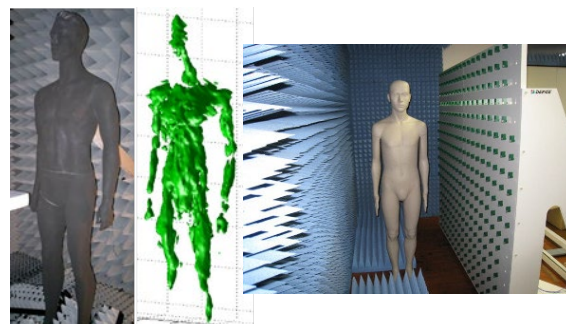


図2 人体模型(左), 電波イメージング立体画像(中央), アレーレーダシステム(右)

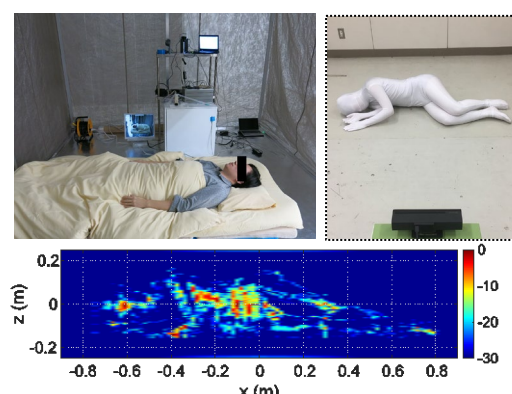


図3 電波による睡眠モニタリングと電波散乱解析



図4 電波によるジェスチャー識別実験と信号軌跡

工学研究科 電気工学専攻 複合システム論分野

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

土居 伸二, 田中 俊二

1. 複合システム論とは

複合システム論とは、「システムを部品として構成されるより大きなシステムを解析・構築するための理論体系」という意味です。たとえばクーラーの場合、温度を測定するセンサ、測定温度と設定温度に基づきどれだけ冷却するかを決める計算機、冷却装置などが組み合わされて、はじめてクーラーというシステムができます。このようなシステムを構築する際に複合システム論が利用されます。私たちの研究室では、生命の仕組みや、望ましい動作をするシステムを作るための最適化に関する研究、またその成果を工学や医学の現実問題に応用する研究を行っています。

2. 複合システムとしての生命

複合システムという観点から、生命の仕組みを明らかにし、工学や医学への応用を目指す研究を行っています。我々の身体は、臓器という部品が集まり、臓器どうしが互いに情報・信号をやり取りすることで生命活動を維持しています。さらに、臓器は細胞という部品が集まって... という感じです。つまり、生体・生命は、非常に複雑で階層的な複合システムの代表例と言えます。たとえば、心臓や脳は、電気信号を用いて心拍や血糖値の制御を行っています。もちろん、私たちの脳も電気信号を用いて、いろんなことを「考えて」います。これらの仕組みを理解するために、数学やシステム工学は大変役に立ちます。仕組みが分かれば、生命を真似た高性能の機械を作ったり、画期的な治療法を開発できると考えています。

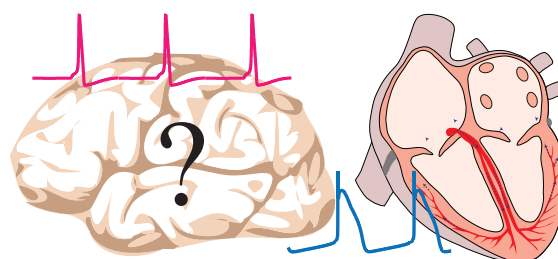


図 1: 脳や心臓と電気信号

3. システム最適化

最適化問題とは、ある条件のもとでもっともよい解を見つける問題のことです。たとえば、目的地にもっとも早く着くような道順を求めるといった身近な問題から、もっとも頑丈な鉄橋の構造を求める問題まで、最適化問題は様々な場面で現われます。当研究室では、生産システムや配送・輸送システムにおける最適化問題として、最適な生産計画を求める問題、エレベータの運行を最適化する問題、コンテナを積み替える問題などを扱っています。なかでも、組合せ最適化問題と呼ばれる、順列や組合せで解を表せる問題を対象としています。たとえば、コンテナを積み替えて整列する(上から下へ、コンテナ番号が昇順に並んだ状態にする)問題は、どのコンテナをどこに、どのような順序で積み替えるかを、必要となる積み替えの回数が最小となるよう決定する問題です。したがって、コンテナとその積み替え先の組合せを並べた列で解を表現することができます。このような組合せ最適化問題のもっともよい解(最適解)を高速に見つけるためのアルゴリズムの研究・開発を行っています。

						6			6						
						1			1						
2	1	4				2		4	2					2	
3	6	7				3	6	7	3	4	7			3	4
9	5	8				9	5	8	9	5	8			9	5

図 2: コンテナを積み替えて整列する問題(下から上へと番号が減少する順に並べ直す)

工学研究科 電気工学専攻 生体機能工学分野

伊藤 陽介 上田 博之

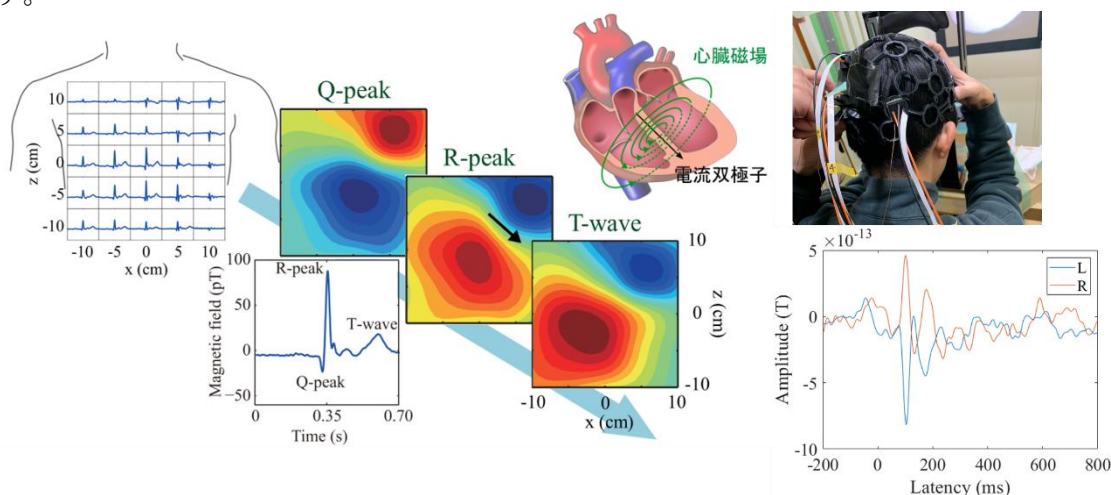
■概略

本研究室では、生体の有する優れた機能を探り、その知見を応用する生体機能工学に関して研究しています。また、低コストかつ簡便な診断装置を開発することにより、現状では大病院でしか受けられないような高度な医療を、小規模クリニックや家庭でも受診できるユビキタスな診断の実現を目指しています。

■主要な研究テーマ

光ポンピング磁気センサを用いた生体磁気計測

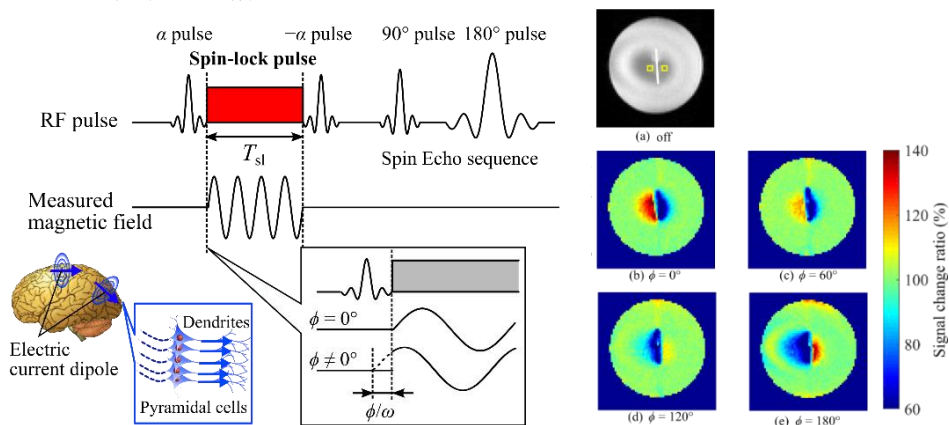
光ポンピング磁気センサは冷媒を必要としない超高感度な磁気センサです。このセンサを用いることで、心磁界計測装置や脳磁界計測装置の小型化や低コスト化、超低磁場 MRI 計測装置の実用化につながります。



開発した光ポンピング磁気センサにより計測した心磁図（左）および脳磁界（右）

神経磁場を検出する機能的 MRI の開発

機能的 MRI は脳の活動部位を、身体を傷つけずに計測することのできる手法です。現在の機能的 MRI は神経活動によって数秒遅れて変化する血行動態を計測するため、いつ神経磁場が生じたのかぼんやりしています。またこの手法では、主に大型病院にしかない高磁場 MRI 装置でしか神経活動を計測できません。本研究室では、スピンロックシーケンスという手法により、神経磁場を直接計測し、低磁場 MRI 装置での機能的 MRI の実現を目指しています。



スピンロックシーケンス（左）とそれにより得られたダイポールファントムの画像（右）

1. 超伝導とは？

超伝導体という物質は、液体窒素（沸点 -196°C ）や液体ヘリウム（沸点 -269°C ）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

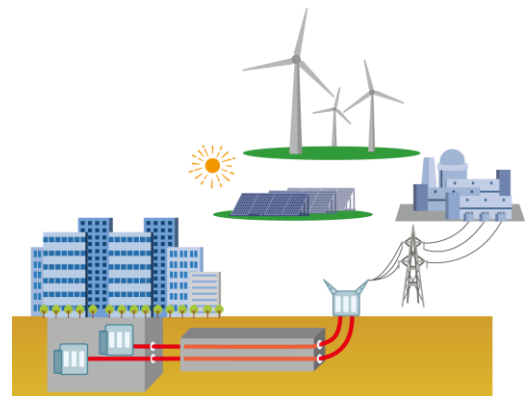


図 2 超伝導電気機器：様々な電気機器を超伝導化して省エネかつコンパクト化

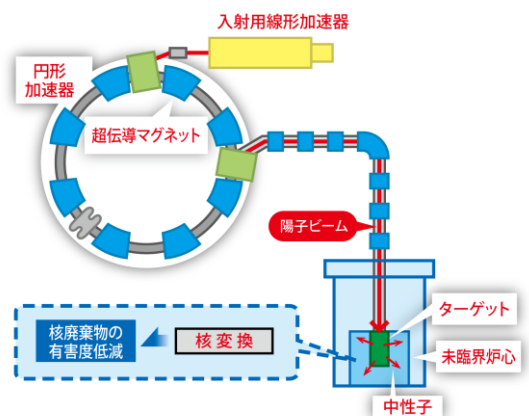


図 3 超伝導電磁石を用いた加速器駆動核変換システム(ADS)：核廃棄物の有害度を低減するシステム

工学研究科 電気工学専攻 電磁回路工学分野

和田 修己, 久門 尚史, Mahfuzul Islam

1. 回路とシステムの解析と設計

電磁回路工学は、電気・電子・情報通信システムを支える電気回路・電子回路・電磁回路の統合設計を扱う分野です。アナログ・デジタル機器だけでなく、自動車や電力ネットワークも今や高機能化した電気・電子モジュールを統合した相互結合系になっています。電磁回路と聞くと、なんだか難しそうな、正体不明のもののような気がされるかもしれませんが、しかし我々が目指す電磁回路工学は、従来の電磁波理論 (Electromagnetic Theory) と、電気回路・電子回路 (Electric and Electronic Circuit) の分野を融合させ、さらに発展させる新しい研究分野です。

新たな電気・電子システムを設計し、これらの機能を発揮させるためには、従来の「回路素子」によって記述する電気回路だけではなく、素子だけでは単純に記述できない電磁的結合も含み、集積回路・電子デバイスや新材料 (メタマテリアル) の特性も記述する新しいモデルや理論が必要とされています。

2. 回路による電磁現象の設計

電気回路は、皆さんが物理で習う電磁気の物理現象を制御するシステムと考えることもできます。つまり、コンデンサやコイルなどは、電磁現象を制御しやすいように小さい空間に閉じ込めて操る部品ということです。一方で、最近ではアンテナのように空間に広がった電磁波も多数の微小回路素子によって操ろうとする取り組みが進んでいます。数学や物理の理論を用いて設計法を研究しています。また、超高速で動作する半導体スイッチを高速制御すると、これまでにない特性の素子ができます。これらを用いた新しい形のエネルギーや情報の処理・伝送が期待されています。当研究室ではこのような、次世代の基盤となる新しいタイプの回路を用いて様々な電磁現象を設計する取り組みを行っています。

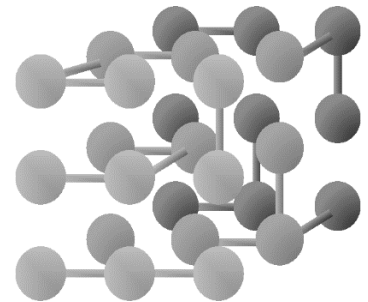


図2 メタマテリアルの特性解析

3. 未来の集積デバイスの設計

集積デバイスの未来について研究を行っています。エネルギー独立なデバイスを実現するために、エネルギー収穫とともに電源管理及び消費エネルギーを限界まで削減する必要があります。これらの実現には常識を破る革新的な回路方式が必要です。本研究では物理 (物性と電磁気) とアナログ回路とデジタル回路の協調を活かした回路方式の研究に取り込んでいます。具体的には、超低消費電力のセンサ回路や、アナログ量をデジタルに変換する回路や、低消費電力の電源回路などの設計を行っています。いずれも独自のアイディアを中心に実際にチップを試作しアイディアの検証を行います。

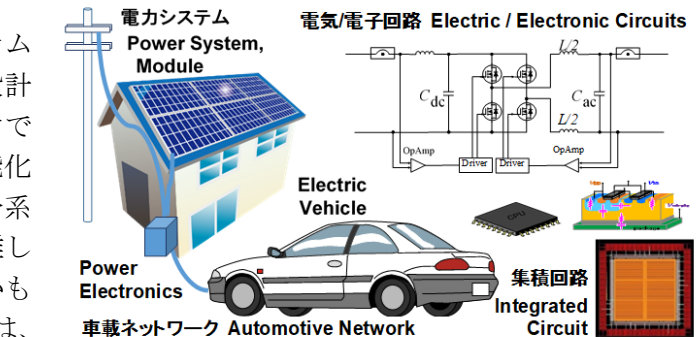


図1 電源回路の試作チップとその測定様子

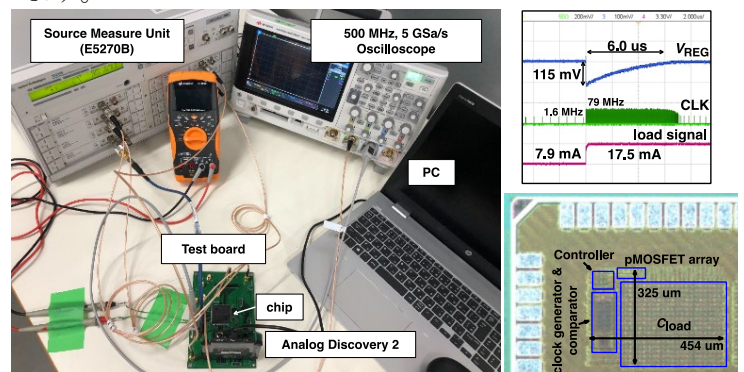


図3 電源回路の試作チップとその測定様子

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 電気工学専攻 電磁エネルギー工学研究室

教授：松尾 哲司，講師：美船 健，助教：比留間 真悟

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

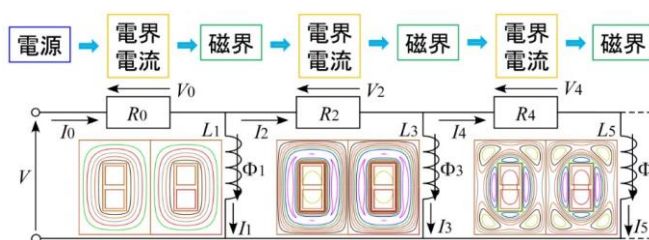


図1 電磁界の等価回路表現

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，電磁界を直交関数分解して，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. 磁性材料シミュレータの開発

電気自動車やロボットに用いられるモータには，高出力・高効率・小型軽量化・高速応答性など様々な性能が要求されます。その性能を決める要因として鉄芯材料の磁気特性があります。モータの製造過程で，鉄芯には圧縮応力（締め付けの力）が加わることが多く，その力により鉄芯の磁気特性が劣化することが知られています。本研究室では圧縮応力が磁気特性におよぼす影響を予測する磁性材料シミュレータの開発（図2）を行っており，応力による損失増加の予測に成功しています。

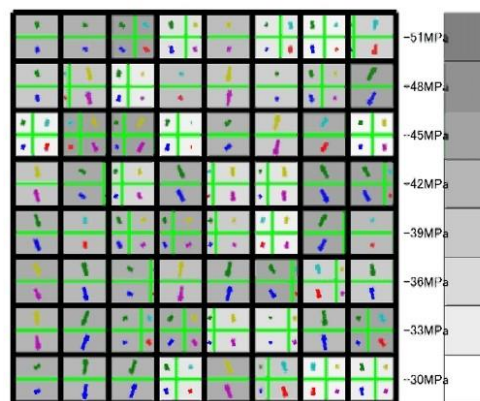


図2 磁性材料シミュレータによる
磁化過程解析

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。

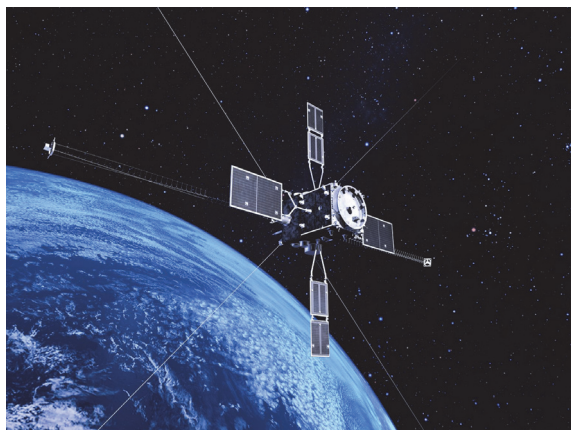


図: 地球放射線帯を探査する Arase 衛星. 当研究室では宇宙空間で発生する電波現象を観測する装置を開発 [イラスト: Arase プロジェクト提供].

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

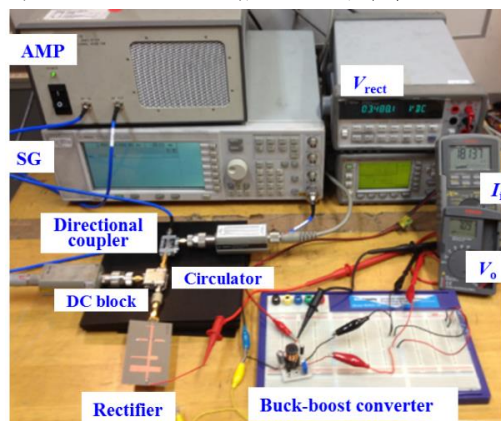


図 2 測定中のマイクロ波受電整流回路

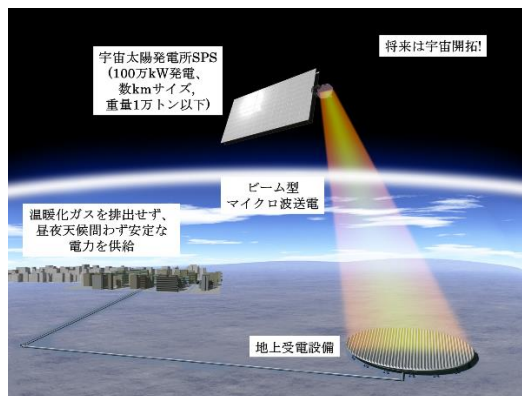


図 3 宇宙太陽発電所 SPS のイメージ(2050 年頃?)

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）

大村善治、海老原祐輔

人類の活動領域は宇宙に広がり、宇宙の実利用は急速に進んでいます。しかし、光の速さに近いスピードを持つ粒子が飛び交い、高温のプラズマで満たされているなど、宇宙の環境は大変過酷です。宇宙環境変動は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って宇宙環境を模擬し、その変動を正確に予測でき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

多くの高エネルギー粒子が地球磁場に捕まり、放射線帯を形成しています（図 2）。これらの粒子は人工衛星に搭載されている電子機器の障害や宇宙飛行士の被ばくの原因となります。宇宙空間で成長した電磁波動が粒子を加速し、放射線帯を形成するまでの過程をスーパーコンピュータで精密に再現し、放射線帯形成に関わる物理素過程の解明を目指しています。



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来すると地球の磁場が乱れます。磁気嵐と呼ばれ、このとき地面に誘導された電流が送電網に流れこむと送電設備に深刻な影響を与えます。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ための基礎研究を進めています。

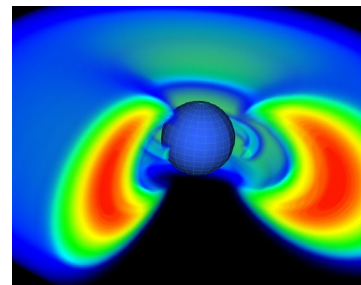


図 2: 地球放射線帯の模式図。

宇宙空間の未来予測

地球の固有磁場は過去 150 年間で約 9%減少し、現在も減少を続けています。固有磁場の変動が宇宙環境に及ぼす影響を調べるため、スーパーコンピュータを用いた予測実験を行っています（図 3）。固有磁場が減少するとオーロラが現れる緯度が下がり、オーロラに伴って流れる電流が増加するため、中緯度地域では地磁気誘導電流の影響が強くなることがわかりました。私たちは益々宇宙に依存するようになり、社会の高度化は進むでしょう。変わりゆく宇宙環境とその人類活動への影響を考えてみませんか。

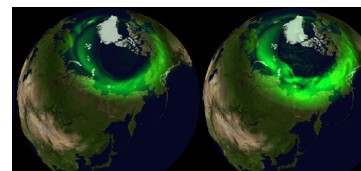


図 3: オーロラに伴って流れる電流の強さ。左は現在の地球、右は約 600 年後の地球。

工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学研究室

掛谷 一弘、後藤 康仁

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

超伝導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**、磁石の性質が顕著となる**磁性体**を舞台として繰り広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。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、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。

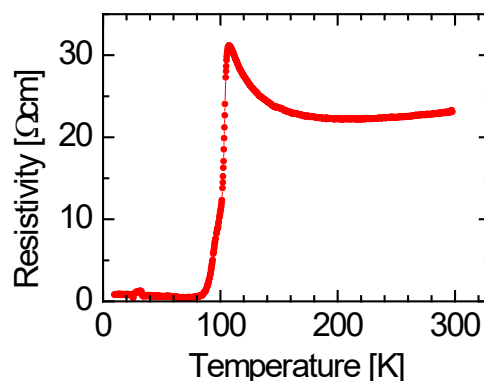
超伝導は目に見える永久運動

皆さんは「**永久機関**」をご存じでしょうか？一旦動き始めると永久に動力を生み続ける夢のような装置のことを指します。永久機関は近世の科学者たちにとって錬金術と共に重要な研究対象でしたが、永久機関は熱力学第一法則により否定されています。では、「**永久運動**」はどうでしょうか？理論的には可能ですが、すくなくとも我々が目にすることは不可能です。でも実を言うと、電流の担い手である電子が活躍するミクロの世界ではこのような永久運動は常に起こっていますが、ただ小さすぎて肉眼で見えないだけなのです。ところが、超伝導体の内部では**電子が永久運動を行っている様子**を見ることができます。

超伝導体で電気抵抗がゼロになるのは、人間が観測している時間中に電流が減衰しなかったことが根拠となっています。最近の正確な測定により **100 億年以上も電流が減衰しない**ことが確かめられています。まさに電子の永久運動に他なりません。なぜこのような不思議なことが起きのでしょうか？超伝導は電子が歩みを揃えて行進する同期現象というイメージで理解されます。しかしながら、超伝導を本当に理解することは大変挑戦的なことです。1911年にオランダのカマリン・オンネスが4.2ケルビンで水銀が超伝導になるのを発見して以降、超伝導の研究は10余名のノーベル賞受賞者を輩出している事実は超伝導研究の魅力、すなわち超伝導現象に見られる美しさと普遍性を象徴しているといえます。

研究活動：高温超伝導量子ビット素子およびテラヘルツ光源

私たちは日々、**高温超伝導体**などを使って**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。量子ビットは量子計算機の実現、テラヘルツ光源は低消費電力超高速通信への応用が期待されています。1つの電子と原子の相関で物理が記述される半導体デバイスは、現在の繁栄をもたらしました。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。何か新しいものを作るにはまず自然を理解する必要があります。そのための言葉や作法として私たちは数学や物理学・化学を学ぶのです。皆さんも私たちと一緒に、20世紀の人類が夢みたデバイスの開発に立ち向かい歴史が動く瞬間を経験しましょう。



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単位胞だけ取り出して測定している。

工学研究科 電子工学専攻 極微電子工学分野

白石誠司、安藤裕一郎、大島諒

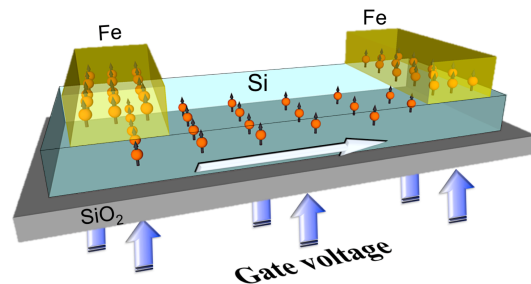
1. 研究室の方向性

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、高島秀聡

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。

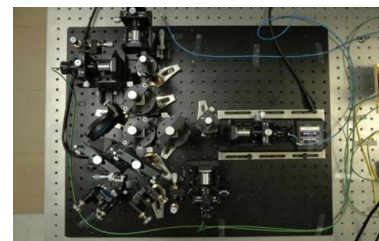


図 1. 量子もつれ光生成装置

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。

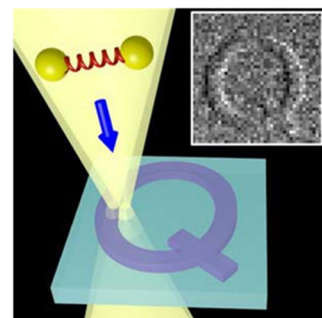


図 2. 量子もつれ顕微鏡

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。

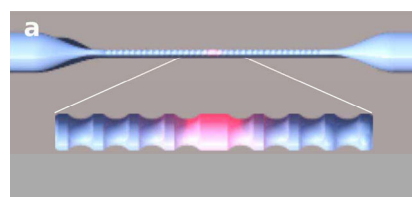


図 3. 光子を操る、微小光素子

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

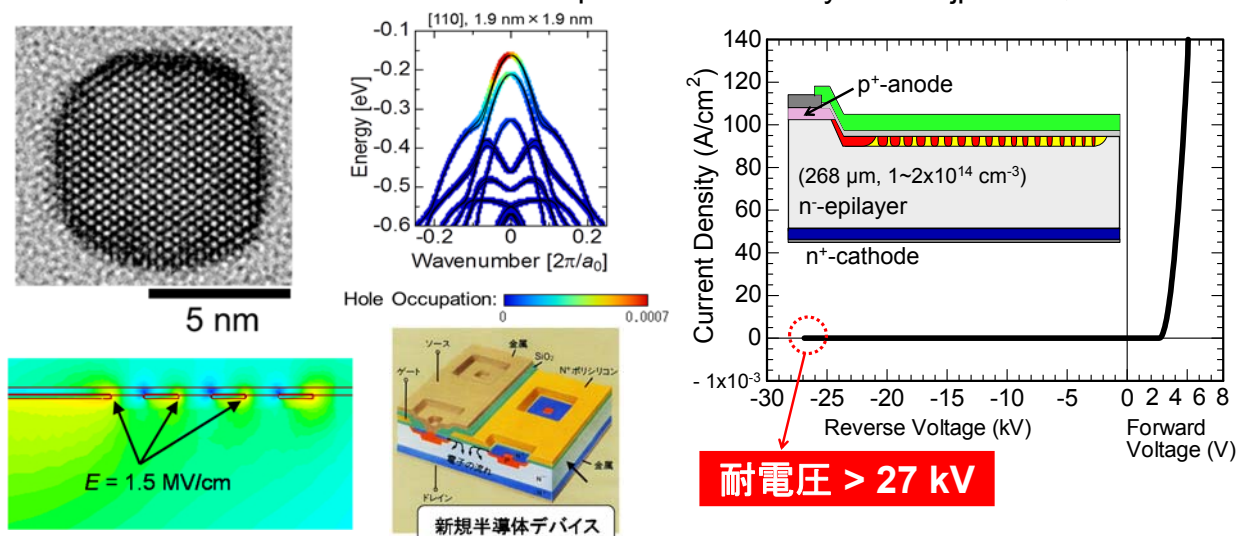
皆さんは「半導体」という言葉を聞いたことがあるでしょうか？ 導体と絶縁体の中間？ 半導体は、パソコン、スマホ、太陽電池はもちろんのこと、エアコン、炊飯器、ゲーム機、電車、銀行 ATM など、あらゆる電気電子機器に必ず使われ、その中核的役割を果たしています。2014 年にノーベル物理学賞の対象となった青色／白色発光ダイオードも半導体です。我が国が強みを発揮している自動車も高度に電子化され、その性能は半導体で決まると言っても過言ではありません。このように半導体は、現在の高度エレクトロニクス社会を支えるハードウェアと言えます。

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化し、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。

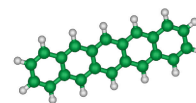
★ 興味のある方は、研究室ホームページ (<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>) をご覧ください。



工学研究科 電子工学専攻 電子材料物性工学分野

山田 啓文、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、言い換えれば、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。皆さんも、子どもの頃と比べれば携帯電話からスマートフォンへと情報端末が着実に小型・軽量・高性能化を遂げてきたと感じていると思いますが、最近では、腕時計やめがねなどのアクセサリに情報端末としての機能をもたせた画期的な商品が登場し始めていますね。このような情報端末の発展は、実はナノテクノロジーの進歩によるところが大きいのです。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、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、生体内環境と同じ条件下でのDNA直接観察に成功しています。近い将来、生体機能に関わる多くの謎の解明に大きく役立つ技術として注目を集めています。一方、「ものを作る」ことについては、一つの有機分子を金属電極の間（間隔が300 nm = 0.3 μm）に挟み、電極に加えた電圧とこの有機分子を流れる電流の関係を調べています。図2はカーボンナノチューブというワイヤー状の分子を使用した例を示しており、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。

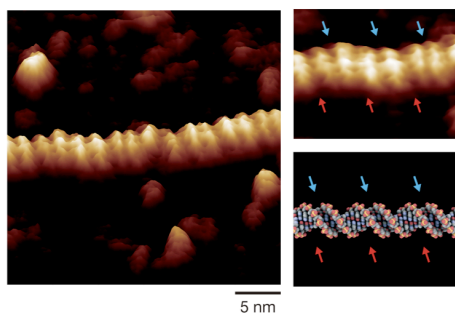


図1 原子間力顕微鏡により捉えられたDNAの二重らせん構造。右上図：二重らせんの2種の溝（主溝と副溝）の拡大像。右下図：構造モデル図。

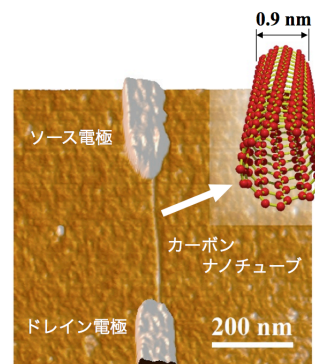


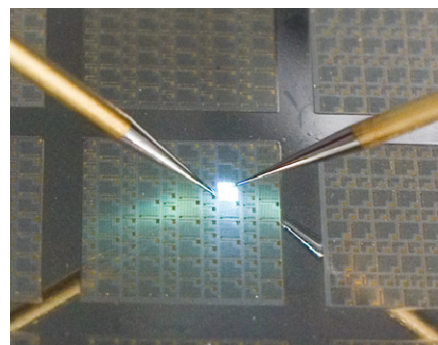
図2 2つの金属電極（300 nm 間隔）をつなぐカーボンナノチューブ分子。右上：そのモデル図。

工学研究科 電子工学専攻 光材料物性工学分野

川上 養一, 船戸 充, 石井 良太

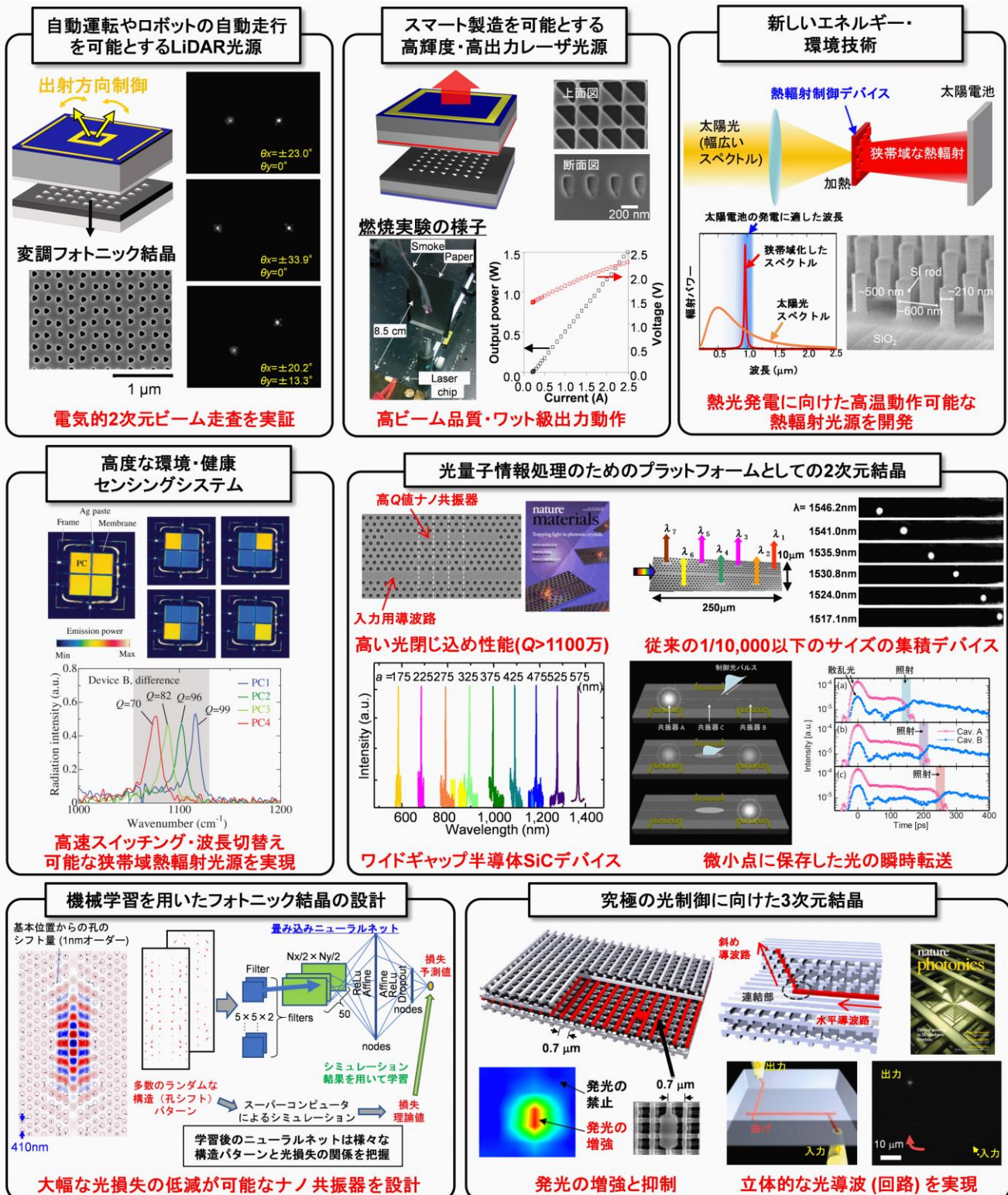
19 世紀末期のエジソンによる電灯の事業化以来、わたしたちは、さまざまな波長域において、いわゆる「ランプ」光源を使用しています。最も身近な光源は蛍光灯に代表される可視波長域の照明機器でしょう。紫外波長域のランプ光源も、殺菌・消毒、LSI や液晶パネルの製造工程など、バイオ応用からエレクトロニクスまで幅広い分野で私たちの生活を支えています。その結果として、ランプによる消費電力は、人類が製造する全電力のうち約 20% にも達しています。しかし、ランプの発光効率は高くても約 30% ですので、全電力のうち 14% は熱として捨てられていることになります。省エネが全世界的な課題である現在、この無駄を極力減らすことが重要であり、ランプ光源に代わる新しい光源として窒化物半導体 InGaN や AlGaIn を用いた固体光源 — LED が最近注目を集めています。LED は小型、堅牢、長寿命、高効率といった特長を持っています。さらに、構成する元素は無害なものばかりですので、水銀を使う蛍光灯と異なり環境負荷も小さくなります。このような背景から、日本発の青色 LED の発明に対して 2014 年ノーベル物理学賞が授与されました。既に、青色 LED をベースとした白色 LED が一般照明光源として爆発的に普及していますし、液晶(携帯電話、パソコン、テレビ)のバックライトや信号機などさまざまな分野で利用が進んでいます。しかし、LED ですら電力の利用効率や物体の色の見え方に問題があるとされています。私たちは、電気を 100% 光に変換し、任意の空間・大きさおよび色で発光する、究極のテイラーメイド光源を実現するため、(1) 光材料設計や結晶成長、(2) 光物性・現象の発見と解明、(3) 分光評価技術の確立 (2014 年ノーベル化学賞はこれに関連します) を主たる研究テーマと考え、これらを有機的に連携させながら研究を推進しています。宝石は外光からの光吸収・蛍光・散乱を受けて美しく輝きますが、苦勞の末に育成した光材料が自ら光を放つさまは、まさに地上に星を創るがごとく綺麗です。努力が報われた瞬間でもあり、感動的なものです。

図はその一例として、私たちが提案した微細三次元構造 LED からの白色発光を示したものです。通常の LED チップは二次元構造をしており、赤や青など単色光は出せますが、直接白色を得ることはできません。(市販の白色 LED には、ある工夫がなされています。調べてみましょう。) それに対して、微細三次元構造では、構造表面を構成する複数の面が異なった色で発光するため、その加色混和によって白色をはじめ、パステル色などさまざまな発光色が得られることを特長としています。ただし、その作製には、ナノメートル (nm) オーダーで制御された光材料結晶の育成技術の確立が必須です。また、微細構造の光学的特性は nm スケールで空間分解して評価しなければなりません。そこで、材料からの発光を、数十 nm の分解能で観察することが可能な顕微鏡を開発し、企業と共同で製品化しました。一方、新たな応用分野としては、白色 LED を医療照明に用いることを提案して、LED を組み込んだゴーグルを試作し、手術に使用してもらっています。以上のような研究は、研究室の中だけでできるものではありません。私たちは、国内外の大学、企業などと共同的に研究を行い、多くの人の技術・知恵を結集して新しい成果を生み出そうとしています。半導体による固体照明は新しい技術ですから、まだ見えていない応用分野がたくさんあると考えています。



工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 光量子電子工学分野
野田進、浅野卓、石崎賢司、吉田昌宏

21世紀は光の時代と言われています。自動運転・ロボットの自動走行，スマートフォンの高度顔認証等を可能とする光センシング(LiDAR)技術，スマート製造を可能とするレーザ技術，太陽光(熱)エネルギーの高度利用，さらには量子情報処理にいたるまで，光が担う役割はますます重要となっています。本研究室では，21世紀を支える“光”を自由自在に操ることを目的として，「[フォトニック結晶](#)」「[フォトニックナノ構造](#)」をキーワードに，自在な光制御技術の開発を行っています。物理的基礎から応用まで研究を行い，様々な革新的な光技術を実現し，エネルギー，環境，光製造(ものづくり)，高度情報・通信技術に寄与し，Society 5.0(超スマート社会)の実現に貢献することを目指しています。(なお，光・電子理工学教育研究センター・ナノプロセス分野と連携をとりながら教育研究を行っています。) もっと詳しく知りたい方は，私たちのホームページ(<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>)を参考にして下さい。



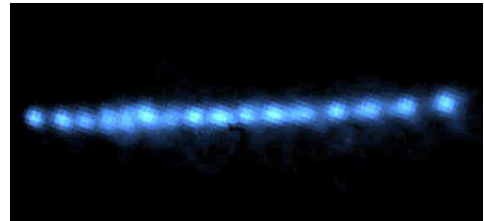
1 概略

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、レーザーです。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

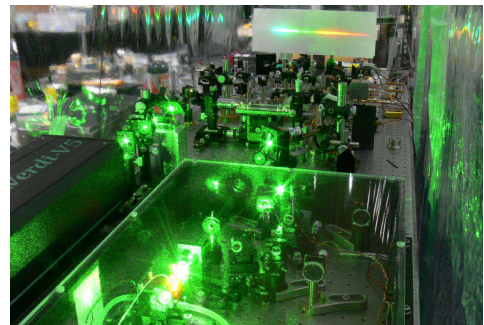
電氣的な力を利用して、イオンを真空中の狭い領域に閉じ込めます。さらにレーザー光が物質に及ぼす力を利用する、レーザー冷却という手法で、イオンを極低温まで冷却し、たった1個のイオンを真空中に浮かせて静止させます。このようなイオンは周りの影響を受けにくいので、イオンと共鳴する電磁波の周波数が正確に決まり、精度のよい周波数の標準、その逆数として時計ができます。



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。

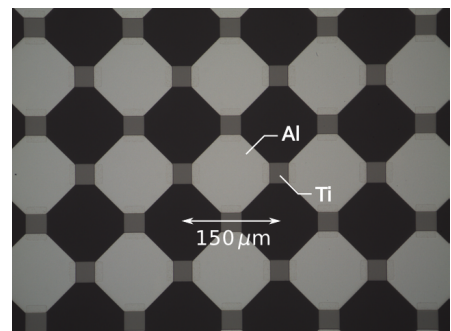
モード同期レーザーによる周波数計測

モード同期レーザーは、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ーです。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ー光になっています。これを光の周波数の“モノサシ”として利用して、レーザーの周波数を測定・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）。



メタ物質

光を含む電磁波よりも小さい構造体を上手く設計することで、従来の物質の概念を越える人工的な「物質」を作ることが出来ます。これは、メタ物質と呼ばれ、媒質の境界で電磁波が「く」の字に屈折する負屈折や、「透明マント」の実現に向けても研究が進んでいます。本研究室では、メタ物質中に電磁波を捕まえる方法や、平面構造のもつ対称性と電磁波応答の関係に注目した研究をしています。（例えば、右の構造では白黒を反転したときに元に戻るという性質をもっています。）また、メタマテリアルの特性を動的に変えることで、より機能性の高いメタマテリアルを実現することを目標とした研究も行っています。



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

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野

Menaka De Zoysa、井上 卓也

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。

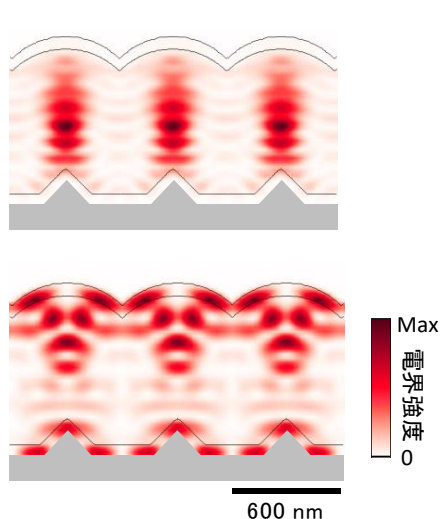


図1: 光ナノ構造の電磁界解析例
(光ナノ構造を導入した太陽電池)

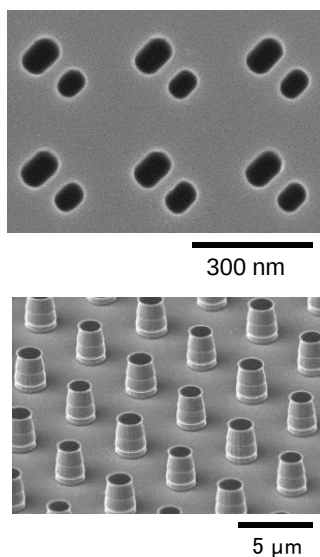


図2: 種々の光ナノ構造の
電子顕微鏡写真

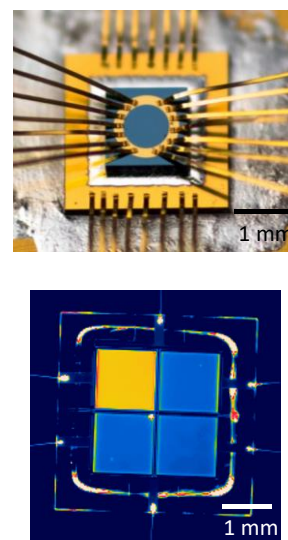


図3: 光ナノ構造を利用した
次世代光源の開発例
(上) 高出力レーザ
(下) 多波長熱輻射光源

情報学研究科 知能情報学専攻 言語メディア分野

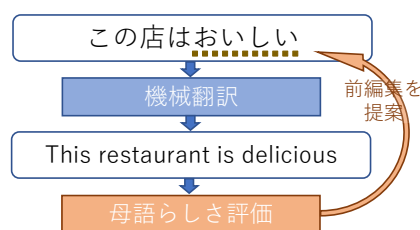
黒橋 禎夫 Chenhui Chu 村脇 有吾 Fei Cheng

<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。



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う利点があります。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 知能情報学専攻 コンピュータビジョン分野

西野恒 延原章平

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

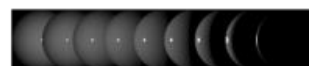
本研究室では、コンピュータビジョン、すなわちコンピュータに視覚知能を与えるための理論的基盤とその実装、ならびに、そこから得られる知見の人間の視覚知能の解明への応用に関する研究をおこなっています。主に機械学習や光学を道具とし、単純に画像や映像を効率的に消費するための手段にとどまらない、ただ見るだけではなく、知覚として「見る」ためのコンピュータビジョンの実現を目指しています。

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、どのように体を使って動き、集団としてどのように影響を及ぼし合うか、視覚から理解するための研究を進めています。



群衆追跡

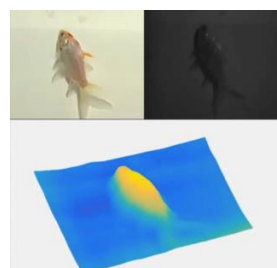
II 物を視る：身の回りの状況や物を見ることにより、我々は多くの情報を得ています。単純に、目の前に道路があり車が停まっている、といった物体認識にとどまらず、道路が雨上がりでぬかるんでいる、車のボディは硬いけどバンパーはより柔らかいなど、歩いたり触ったり、それらの物と実際にインタラクトするため



反射率・光源環境推定

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、物体の見えや風景からのより豊かな物理的及びセマンティックな情報抽出のための研究をおこなっています。

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（コンピュータショナルフォトグラフィ）の開発をおこなっています。最近の研究では、近赤外光と光の散乱に着目し、泳いでいる魚などの水中の物体の実時間3次元撮像や、半透明物体の内部における光の逐次伝搬の撮像などを実現しました。



水中3次元形状計測

情報学研究科 通信情報システム専攻 デジタル通信分野（原田研究室）

原田博司教授 村田英一准教授 水谷圭一助教

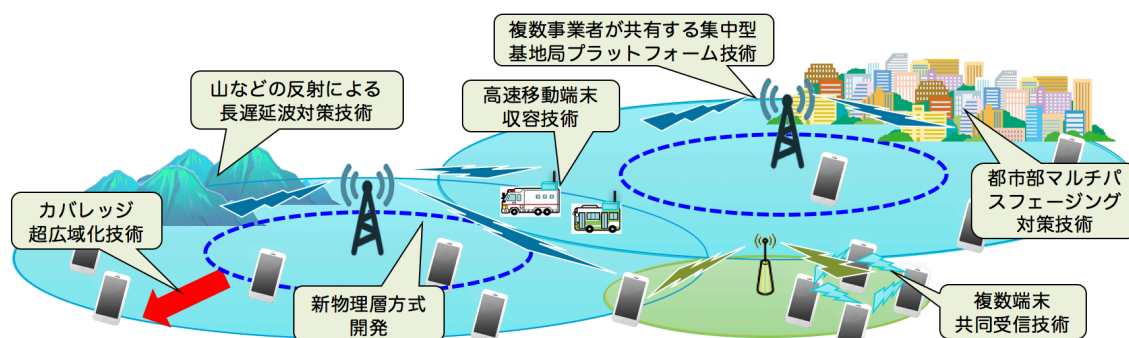
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

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

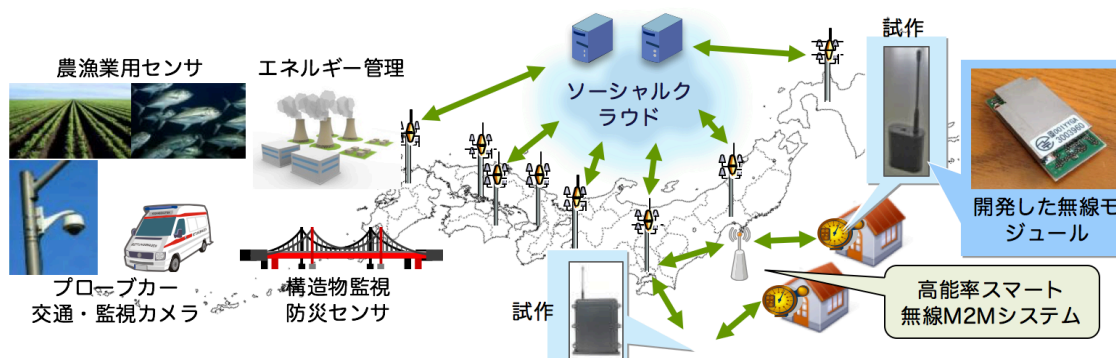
現在は誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、高速な伝送速度だけでなく、より高い信頼性や、リアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に「人と人の通信」だけでなく、ありとあらゆる物に無線機が内蔵され、様々な情報を収集するような「物と物との通信」など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信に使用出来る周波数資源には限りがあるため、このままでは爆発的に増加する無線通信への要求に応えることができません。現在、第 4 世代移動通信システム(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。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。

このよう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

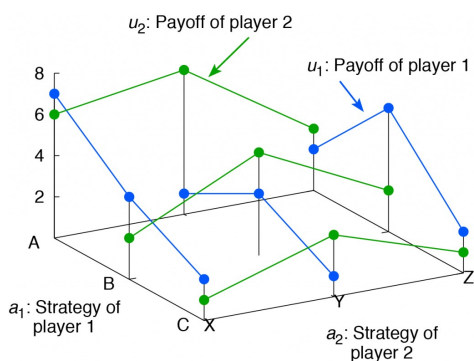
情報学研究科 通信情報システム専攻 伝送メディア分野

山本 高至

無線通信において将来的にコアとなる革新的技術の創出を目指し、学際的アプローチ・他機関とのコラボレーションを重視しながら、研究に取り組んでいます。

特筆すべき成果として、産業界との共同研究による高密度無線LAN最適制御技術があります。本技術は無線LANアクセスポイント(AP)を高密度に設置するだけで、APが電波出力およびチャンネルを自動制御し最適な無線LANサービスを実現します。この技術の背景にあるのは、ゲーム理論と呼ばれる、複数の主体の行動の相互作用を解析する数学的理論です。無線LANの設置環境は様々ですが、数学的理論に基づくことでいかなる状況においても自動制御が収束し、安定した無線LANを使用することができます。

また、コンピュータビジョンや機械学習といった異分野で発展した技術を応用した新たな無線通信制御についても世界に先駆け研究しています。



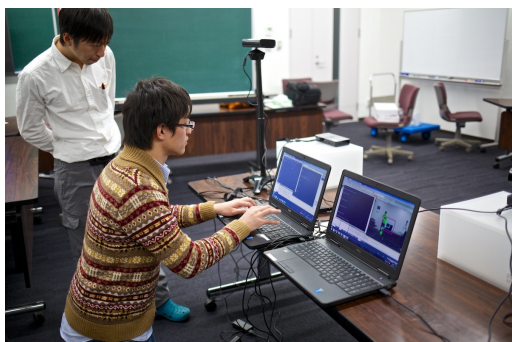
高密度無線LAN最適制御技術

- ・ 沢山の無線LANが町中にあふれ、すべてを最適な状態に管理するのは困難
- ・ ゲーム理論や機械学習の応用により、機器が自律的に最適な電波出力や通信チャンネルなどを選択
- ・ 高速・安定・広範囲なインターネットアクセスを提供



画像情報処理に基づくミリ波通信制御

- ・ 高速通信のためミリ波通信が注目を集めているが、人体遮蔽により急峻に通信品質が低下する問題がある
- ・ カメラと画像処理の応用により、遮蔽による通信品質低下を事前予測
- ・ 予測に基づく制御で切断しない通信を実現できることを世界に先駆け実証



情報学研究科 通信情報システム専攻 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

<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、大量のトラヒ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を、数理的アプローチを用いて研究しています。

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、トラヒ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ヒックの量やデータの処理時間には不確定性が存在します。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。

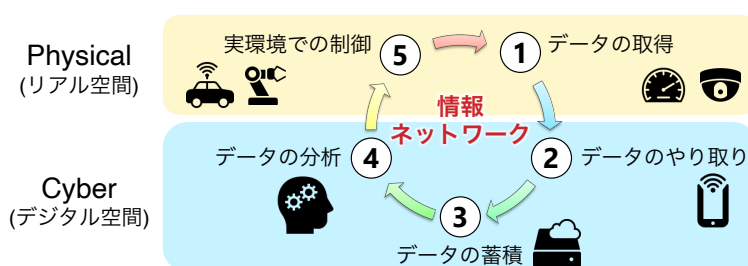


図1: データ駆動型のネットワークシステム

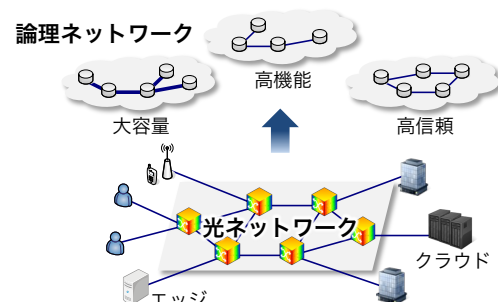


図2: 大木研究室の研究テーマ

情報学研究科 通信情報システム専攻 情報回路方式分野

佐藤 高史 辺 松

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

1. システム LSI とは?

私たちの身の回りにはパソコン、携帯電話、デジタルカメラ、デジタルテレビ、ビデオ録画・再生機器、電子辞書、ゲーム機など、様々な情報機器があふれており、生活に欠かせないものとなっています。これら情報機器には、高速な通信や、高度なメディア処理(画像、音声など)を行うための複雑な**大規模集積回路 (LSI)**が使われています。皆さんはこれらの機器を分解してみたことはあるでしょうか? 図 1 に示すように、情報機器の中にはボード(基板)と呼ばれるものの上に様々な電子部品が載っています。LSI はその中核をなす部品です。数センチ角の小さな部品ですが、中には**数十億個のトランジスタ**が作り込まれ、意味のある動作をするように互いに結線されています。大規模で複雑な LSI を製造するために高度な技術が必要となるのはもちろんですが、**高性能で低消費電力となる合理的な構成を考え、誤りなく動作するものを短期間に設計する技術も非常に重要です。**

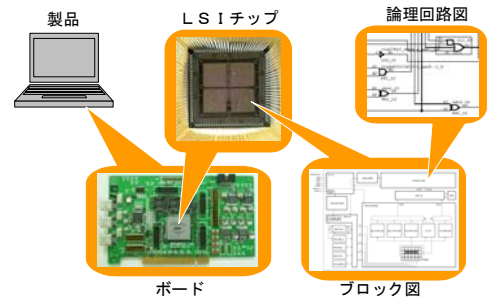


図 1: 情報機器の中身

我々の研究室では、情報機器の中核をなす LSI の構成(どんな要素回路をどう組み合わせたらよいか)と設計技術(どうしたら効率よく設計できるのか)、ならびにそれらの応用について研究しています。われわれの生活を豊かで安全なものにしてくれる情報機器を、より高速・省エネルギーとすることで、社会に貢献しています。

2. 研究室の取り組み

我々の研究室では、「実践的・実証的に」をモットーに集積回路の高性能化とその応用について研究しています。

「高信頼」回路設計技術: 自動車やロボット、医療分野など、LSI の応用範囲が広がるにつれて、回路の性能を高めることと同時に、信頼性を確保することが強く求められています。物理が支配する素子レベルのミクロな視点から、システム全体を俯瞰するマクロな視点までを的確に**抽象化・モデル化**して、回路を最適に設計する技術が必要となります。我々の研究室では、大規模な回路の性能と信頼性を設計するための**数理的手法、回路構成手法、および設計手法**について**ハードウェアとソフトウェアの両面から**研究しています。特に、微細化されたトランジスタの振る舞いを模擬する統計的素子モデリング技術、回路特性をモニタして安定動作に役立てるセンサ回路技術、回路の振る舞いを製造前に予測する統計的シミュレーション技術、回路が設計どおりに動作するかを判定するテスト技術について研究をすすめています。

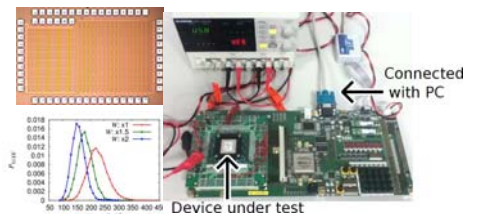


図 2: 試作チップとその測定の様子

「書き換え可能」な回路: デジタル回路で演算処理を担う要素は、**CPU と専用回路**に大別されます。CPU にはソフトウェアを与えることで様々な処理をさせることができる**柔軟性**があります。一方、専用回路には**低い消費電力で高い性能を発揮できる**という利点があります。これら両者の長所を併せ持つものとして、**「書き換え」可能な回路**(リコンフィギャラブルデバイス)が近年注目されています(図 2)。動作中にどんどん「書き換え」を繰り返すことにより、柔軟性と性能を高度に両立できる可能性があります。我々はリコンフィギャラブルデバイスに注目し、「自ら進化するシステム」の開発を目指しています。

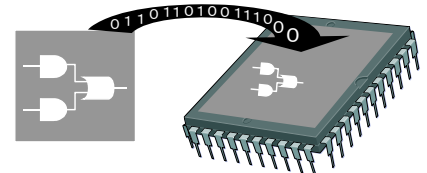


図 3: 「書き換え」可能な回路

「高性能」画像処理システム: 画像処理は今や様々な分野で欠かすことのできない重要な技術です。画像処理では一般に取り扱う情報量が膨大であるため、**ハードウェア/ソフトウェアを組み合わせたシステム全体としての最適化**が必要不可欠となります。我々の研究室では画像処理アルゴリズムおよびその実装に関する検討を相補的に行うことにより、効率の良い画像処理システムの構成手法について研究しています。



図 4: 画像認識システムの例

情報学研究科 通信情報システム専攻 超高速信号処理分野

橋本昌宜 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。一方で、トランジスタの微細化が不透明さを増す中、新しい原理に基づいたコンピューティングの模索が続いています。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。

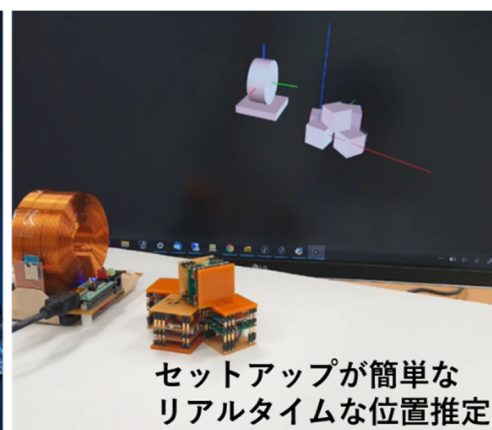
また、データのプライバシーと機械学習モデルの両方を暗号化したまま推論結果が計算可能な秘匿推論フレームワークの開発も進めています。

新原理コンピューティング

脳を模倣したニューラルネットワークに代表される新たなコンピューティングの高効率な実装に関する研究を進めています。蛍光現象を機械学習に取り組む試みや、センサーとコンピューティングを一体化による高効率化などの検討を進めています。

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 通信情報システム専攻 リモートセンシング工学分野

教授: 山本 衛、准教授: 横山 竜宏

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-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 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、30 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専攻の研究指導を行っています。

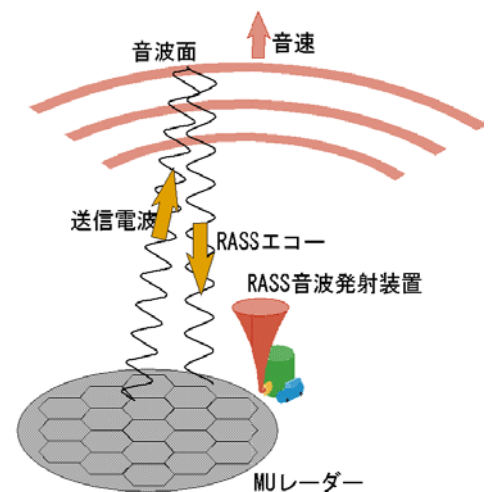
情報学研究科 通信情報システム専攻 地球大気計測分野

教授：橋口浩之、准教授：西村耕司、特任准教授：矢吹正教

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。そこで最近では、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 通信情報システム専攻の修士・博士論文の研究指導を行っています。

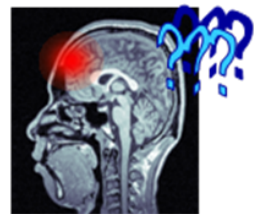
論理生命学分野

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.

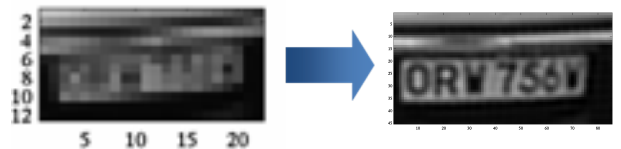


計算神経科学とニューロインフォマティクス

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のか, 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.

情報学研究科 システム科学専攻 医用工学分野

教授:松田 哲也 准教授:中尾 恵 助教:今井 宏彦

URL: <http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp>

■ 研究概要

情報技術は現代の医学・医療を支える重要な基盤となっています。医用工学の研究には情報学と医学・バイオのキーワードを結びつける学際的な展開が求められます。医学部・附属病院をはじめとした幅広い分野との共同研究体制のもとで、生体イメージング、医用システム、生体シミュレーションに着目し、生体の新しい計測・モデリング手法、医学・医療を対象とした情報システムに関する教育・研究を行っています。

■ 研究分野

- 生体イメージング(MRI)
- 医用画像処理・人工現実感(VR)
- 細胞・生体機能シミュレーション

■ 研究内容

(1) MRI による生体の硬さ・動きの計測

MRI は X 線 CT や超音波画像と並んで、人体を傷つけることなく体内を画像化する手法です。これまで主に行われて来た内臓の形や大きさの画像化に対し、私たちの研究室では、臓器の硬さなどの新しい計測法や心臓の運動を精密に検出するための新しい画像解析法 (Fig.1)を開発しています。

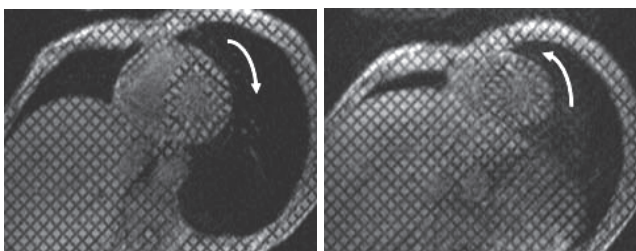


Fig.1 MRI による心臓の運動解析

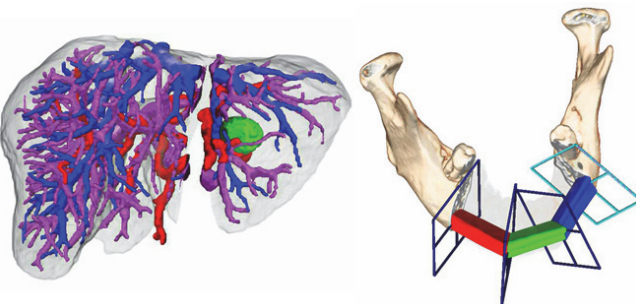


Fig.2 三次元画像を用いた手術シミュレーション

(2) 医用画像解析と治療支援

CT・MRI などの患者個人の三次元画像から構築される人体・臓器モデル上で手術プロセスを計画し、さらに手術中に計画内容を提示する治療支援システム (Fig. 2) を研究しています。また、その基盤となる新しい機械学習、知識モデリング等の情報学的手法の探究に取り組んでいます。医師・患者双方のニーズに答える研究開発を目指します。

(3) 触力覚情報の保存・共有

実世界において他者と同時に同じ触感を得ることは難しく、触力覚情報を他者へ正確に伝達することも容易ではありません。これに対し、指先の力のセンシング装置や三次元位置・姿勢計測装置、フォースフィードバック装置等を活用したシステム開発 (Fig.3) や心理物理実験を通して、触力覚情報の保存・共有法の確立や触感の理解・解明を目指しています。

(4) 心臓の細胞・機能シミュレーション

心臓は人体の中でも特に複雑な臓器です。本研究室では微小な細胞の機能から心臓全体の拍動に至るまで、広範囲にわたる心臓の振る舞いをコンピュータ上で再現 (Fig.4) しようとしています。実現すれば、心臓病の仕組みや薬品の心臓に与える影響など、多くのことが明らかになるでしょう。



Fig. 3 リアルタイム触覚共有システム

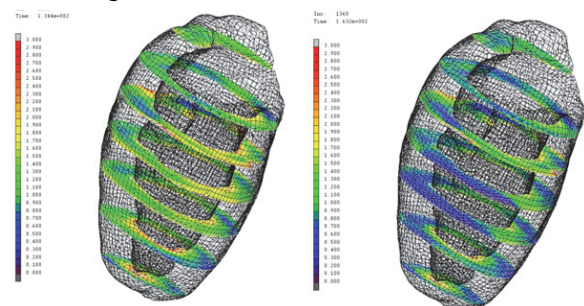


Fig. 4 心筋に生じる応力分布の解析

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な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

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

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

「21 世紀はエネルギーの時代」と言われ、エネルギー問題は世界的な課題です。安価で大量のエネルギーが存在すれば廃棄物のリサイクルを通じた資源問題の解決に、資源の消費なしに発電可能となれば環境問題の解決につながります。つまり、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーだけで世界のエネルギー需要をまかなえれば、資源・環境問題に直面することなく人類は豊かな 21 世紀を謳歌できるはずです。試算によれば、地球上の砂漠のわずか 4% の面積に太陽電池（効率 10% と仮定）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ます。これは技術的には可能です。残る問題はどのようにして世界中に送電線を敷設するのか？ だけなのです。通常送電線に使われている銅線の場合、電気抵抗の存在によって電気エネルギーの一部が熱に変換されて損失となるため、送電距離が長くなるほど送電ロスが大きくなります。しかし、電気抵抗がゼロである「超伝導」送電線が開発されれば、原理的にはロスなく世界中に送電できるようになります。

当研究室では、21 世紀のエネルギー問題および環境・資源問題の解決のために、高性能な超伝導線の実用化を目指しています。超伝導体は高性能ですが実用化は簡単ではなく、通電方向を考慮して分子の向きを x, y, z 方向とも揃える必要があります。この結晶整列技術に着目し、薄膜技術を駆使した安価で高性能な超伝導線を実現するための金属テープ材や超伝導材料の開発や磁石の磁力を利用した高度な結晶整列技術の開発を進めています。この技術は様々な電気製品の高性能化にも有効であると考えられ、太陽電池、リチウム電池、スマホなどの研究にも応用できます。以下に研究内容の詳細を記します。

(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。当研究室ではこの高温超伝導物質が世界規模の送電線網の候補材料と考えています。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、新規は結晶整列手法、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) 次世代 MRI 診断装置向け超伝導線材開発に関する研究

X 線による被爆なしに身体内部の立体画像が撮影できる MRI 診断装置は、広く普及しています。しかし、その運転には高価で資源の枯渇が心配されている(液化)ヘリウムを要します。当研究室では、液化ヘリウムを使わない MRI 診断装置の実用化を目指して、金属系で最も高い超伝導転移温度を有し安価で加工性が良い MgB_2 超伝導体に着目し、薄膜型超伝導線の開発を行っています。



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. 電子顕微鏡と原子の配列状態を観察する装置

1. はじめに エネルギー問題は地球規模での喫緊のものであり、その解決に向けて我々の研究科では、エネルギー政策・経済から自然エネルギー・核融合・材料など幅広い研究領域が融合し新たな展開を進めています。その中で、当研究室では電力システム・エネルギー機器という電気工学の観点を中心に、別の分野の研究にも触れながら、より高い視点からエネルギー問題を見ることを目指しています。

2. 研究テーマ 主な研究テーマは、超伝導現象のエネルギー応用に関する研究、環境調和型電力インフラに関する研究です。

2.1 超伝導故障電流限流器：雷撃などのために電力システムで発生する事故電流を抑制する機器として、超伝導線材の相転移を用いた故障電流限流器に

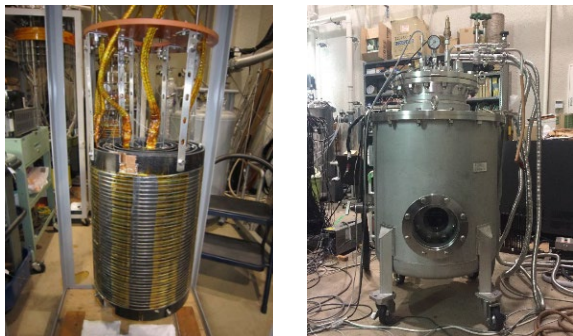


図1 変圧器磁気遮蔽型 REBCO 三相高温超伝導限流器と観察窓付液体窒素クライオスタット(～5 気圧)

関する研究を進めています(図1)。

2.2 液体水素冷却超伝導発電機：エネルギーの低炭素化をめざした水素エネルギーのエネルギーインフラへの導入において、エネルギーキャリアとして

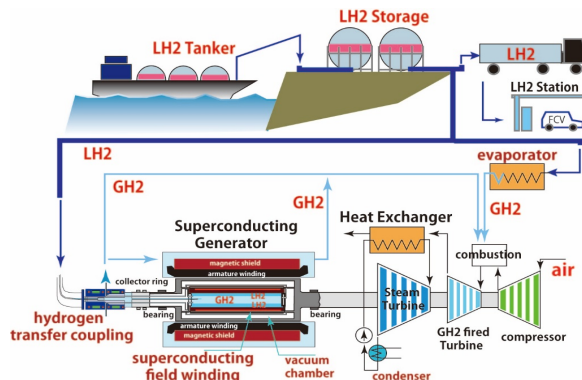


図2 水素ガスタービン液体水素冷却超伝導発電機



図3 液体水素冷却回転子模擬試験装置(40L,1800rpm)

の液体水素の冷熱エネルギーの有効利用と液体水素冷却超伝導エネルギー機器による電力系統高機能化を図る水素・電力協調エネルギーインフラを提案しています。その中のキーコンポーネントである液体水素冷却超伝導発電機の実現(図2)を目的として、液体水素の超伝導回転子への給排システムの開発と実証試験を実施しました(図3)。

2.3 高温超伝導を用いた MRI 装置に関する研究：新しい医療用MRIの開発(図3)に取り組み、鮮明な断層イメージング画像の取得に成功しています。

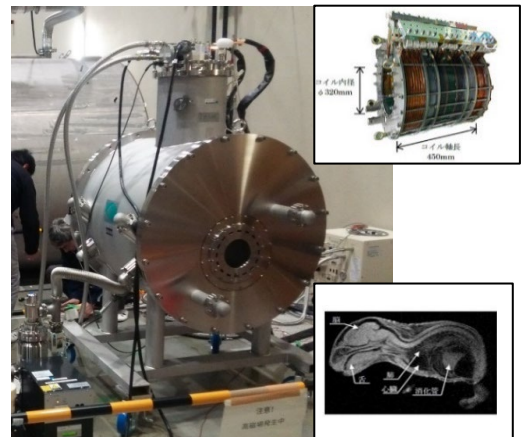


図4 伝導冷却高温超伝導 MRI(5.5T)とイメージング画像

2.4 環境調和型電力インフラに関する研究：太陽光・風力・潮力など再生可能エネルギー源や燃料電池などが需要地側の系統に導入され、能動的な負荷やエネルギー貯蔵・制御機器が連系される将来のシステムに対して、総合的な動特性を系統的に同定・評価しています。

3. おわりに 持続可能なエネルギーシステムの実現に向けた研究に、皆さんも参加してみませんか。



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。本誌はモノクロ印刷ですが、web ページにはカラー版も用意してあります。



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2022 実行委員会

目 次

(本文中の所属は執筆当時のものです)

1. 科学衛星による宇宙の電磁環境探査 (第43号)	
小嶋浩嗣, 上田義勝	1
2. 電波・光・音波を利用した大気のリモートセンシング (第44号)	
橋口浩之, 矢吹正教	6
3. コンピュータで見る (第45号)	
西野 恒, 延原章平, 川原 僚	12
4. 電力のパケット化 ―電力と情報の統合を目指して― (第46号)	
持山志宇, 引原隆士	17
5. 電気電子工学とは? その面白さと守備範囲 (第47号)	
和田修己	22

科学衛星による宇宙の電磁環境探査

生存圏研究所 宇宙圏電磁環境探査分野
小 嶋 浩 嗣、上 田 義 勝

1. 宇宙プラズマ大気

太陽系宇宙空間は気体で満たされています。この気体は電気を帯びているもので、これを宇宙プラズマと呼びます。プラズマというのは、その気体を構成している成分の原子において、プラスとマイナスがばらばらになった状態のことをいいます。遠目にみると一見、中性気体なのですが、なかみは、プラスの電気をもつ粒子（イオン）とマイナスの電気をもつ粒子（電子）が、ばらばらに動いている状態です。このような状態は宇宙だけではなく、みなさんのスマートフォンの中に使われている半導体というデバイスの中身も実はプラズマ状態になっています。

ところで、宇宙プラズマには、大きく分けて二種類のものがあります。

太陽風プラズマ

惑星大気プラズマ

です。

「太陽風プラズマ」、というのは、文字通り、太陽から吹いてくるプラズマの流れです。太陽の大気が宇宙空間に流れ出しているものです。その流れのスピードたるや、地球付近まできても、まだ、秒速500km くらいもあります。もっとも、その密度は薄くて、個数で、 1cm^3 あたり、数個ある程度です。太陽から噴出した大気はそれなりの濃さがありますが、太陽系全方位に向かってひろがっていくので、どんどん薄くなっていくわけです。太陽風プラズマの中身のほとんどはプロトン（水素イオン H^+ ）と電子です。このような太陽風プラズマが惑星と惑星の間の宇宙空間を満たしているということになり、そういう意味では、「太陽系は太陽大気の中にあり」、と、いってもいいのかもしれないですね。

一方、「惑星大気プラズマ」というのは、もともと中性大気である惑星の大気上層部が、太陽からの紫外線などのエネルギーによって、イオンと電子に引き裂かれてしまい（これを電離といいます）、ばらばらになってプラズマ状態になったものをいいます。地球にもこれはあって、古くから電離層と呼ばれているものです。高度1000km くらいまであります。国際宇宙ステーションの高度400km 程度なので、この電離層の中を飛んでいることになり、そこはまだ広い意味で地球の大気の内側ということになります。「な～んだ、まだ、地球の大気中なのか」と、思わないで下さい。人類がここまで進出できたその

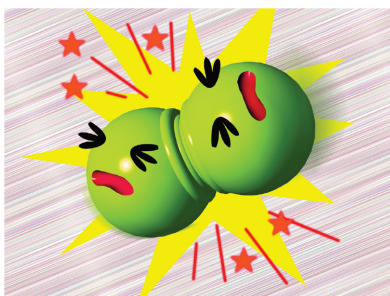


図1：衝突する場合.

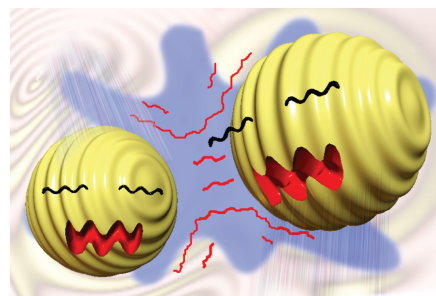


図2：無衝突の場合.

過程には、非常に多くの人々の膨大なエネルギーが投入されているのです。それに電離層も立派な宇宙プラズマです。密度はさすがに濃くて、高度にもよりますが、 1cm^3 あたり、100万個以上あるところもあります。それでも地上の空気の密度よりはずっと薄いですが。

電離層プラズマは古くから、「通信」に利用されてきました。高度100kmくらいから存在するこの宇宙プラズマの層は、短波帯の電波を反射するため、これと地表との反射を組み合わせ、地球の裏側とも通信することが可能となります。現在もこの手法で通信している放送局もありますが、通信衛星の発達により国際通信は宇宙を経由する衛星通信が主役となりました。京都大学工学部の電気電子工学科と深い関わりがある私達ですが、電気関係の学科で宇宙の研究を行ってきた理由の一つは、宇宙プラズマを通信に利用していたことに端を発しています。

さて、国際宇宙ステーションは、地球の大気中でも、その電離している部分である宇宙プラズマ中を飛翔しています。その中で生活している人は惑星大気プラズマに囲まれて生活しています。一方、感動の帰還を果たした、日本の探査機はやぶさは、太陽風プラズマ中をずっと航行して地球にもどってきたことになります。宇宙はこのように、電離した気体、つまりプラズマによって満たされています。地上で中性大気である空気が引き起こす現象は、宇宙では、希薄なプラズマによる現象に置き換えられます。難しくいうと、これらの現象を記述する方程式系が、中性気体のものから電離気体となるプラズマのものに変わることになるわけです。

2. 無衝突プラズマとプラズマ波動

宇宙空間プラズマは、無衝突状態にあります。これは、どういうことかということ、プラズマを構成しているイオンや電子は、めったに衝突しない、ということです。パチンコ球を想像してもらえるとわかりやすいですが、ひとつのパチンコ球を転がして、停止している別のパチンコ球に衝突させると、エネルギーや運動量を交換して、止まっていた方も動き始めます。宇宙プラズマ中では、プラズマを構成する粒子どうしが、パチンコ球のように衝突してエネルギーや運動量を交換しないのです（図1と2）。どれくらい衝突しないか、というと、太陽風プラズマだと、太陽を出発してから地球に到達するまでに1回衝突するかどうか、という程度です。

では、宇宙プラズマの粒子たちは、エネルギーを得たり、失ったりせずに一定な速度で運動しつづけているのでしょうか。答えはノーです。宇宙プラズマの粒子（イオン、電子）は、衝突でエネルギーを交換するのではなく、「電波」によってエネルギーを交換しています。この電波が、プラズマ波動です。つまり、ある粒子のエネルギーがプラズマ波動に変換され、そのプラズマ波動のエネルギーが別の粒子に伝えられる、という感じです。

この過程は、ちょうどアイドルさんの握手会に似ています。図3にあるように、アイドルさんを電

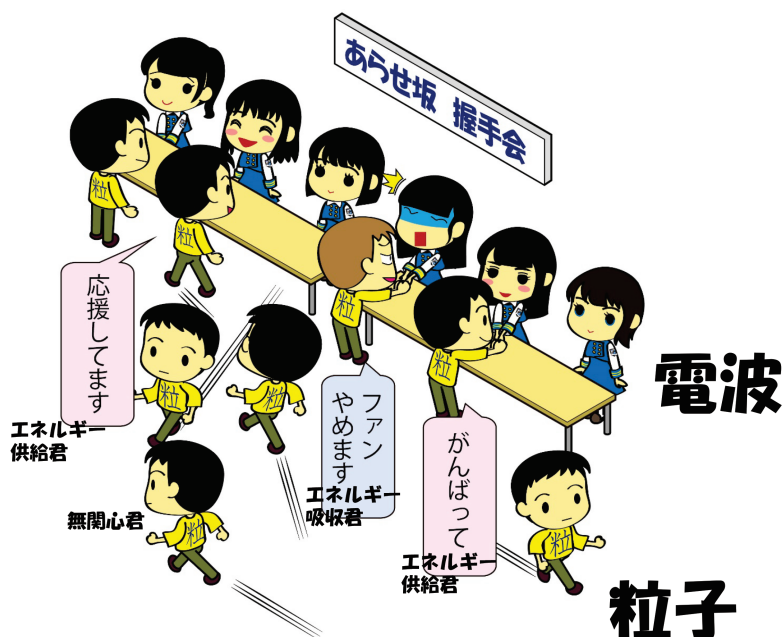


図3：アイドルさんの握手会は電子と電波のエネルギーのやりとりに似ています（イラスト：熨斗千華子さん）。

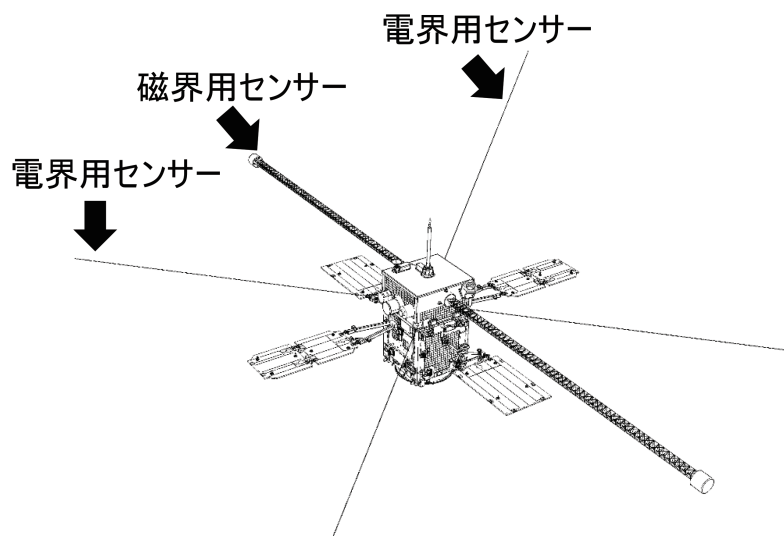


図4：日本の科学衛星「Arase」（2016年12月打ち上げ）。地球の放射線帯を観測しており、その中でプラズマ波動観測は高いエネルギーの電子をつくりだす波動の解析など重要な役割を担っている（©JAXA）。

波（プラズマ波動）、粒子をファンとすると、ある粒子はアイドルさんを励ましてエネルギーをあたえ、ある粒子は、アイドルさんに悪口を言ってエネルギーを奪っています。また、アイドルさんにはまったく関心をもたないで、走り去るファンもいれば、次々と違うアイドルさんにエネルギーをわたしていくファンもいます。このような過程を、専門用語で、「波動粒子相互作用」といいます。宇宙空間を満たしている電気を帯びたプラズマ大気、そしてそのなかで発生している波動粒子相互作用が、エネルギーを移動させ、また、その環境に大きな影響を与えているのです。

この環境のことを私達は、宇宙電磁環境と呼んでいます。

3. プラズマ波動の衛星による観測

粒子からエネルギーをもらい、それを他の粒子にあたえる、つまり、プラズマ波動は宇宙プラズマ中におけるエネルギーの伝搬媒体としての役割をもっています。ですので、このプラズマ波動を観測すると、そこで生起している物理現象について解析を行うことができます。科学衛星に搭載してこのプラズマ波動を観測する装置が、「プラズマ波動観測器」です。実は、京都大学工学部の電気電子工学科は、このプラズマ波動観測の日本における草分けになります。日本の科学衛星打ち上げ開始当時よりプラズマ波動観測器の開発とそのデータ解析を行ってきています。これから述べる Arase 衛星や MIO 衛星のプラズマ波動観測器も、生存圏研究所の実験室で試験をして完成させてきました。

図4は2016年に打ち上げられた我が国の衛星「Arase」です。この衛星は地球放射線帯の成因とそのダイナミックな変動の理解のために、打ち上げられました。この衛星にもプラズマ波動観測器（責任者：笠原禎也 金沢大・教授（京大・電気工学・1991年修士修了））が搭載されています。図4がその外観です。プラズマ波動観測器そのものは、高精度なラジオ受信器のようなものです。一方、プラズマ波動を捉えるセンサーには、大きく二種類あります。一つは、直交した線のように伸びている2組のアンテナです。これは、端から端まで、30mあります。この長いセンサーで、プラズマ波動の電界成分を捉えます。一方、磁界については、5mのマストと呼ばれる腕の先端に取り付けられたサーチコイルで捉えます。これは、衛星から離れた位置にセンサーがあるのは、衛星から放射される電磁ノイズの影響を受けないようにするためです。

ではこの衛星で観測されたプラズマ波動はどんなのでしょうか。図5がその一例です。これはコーラスと呼ばれるプラズマ波動現象です。横軸が時間で、単位は「秒」です。縦軸は、周波数で、単位はヘルツです。表示されているのは、周波数スペクトルの時間変化で、短い時間で周波数が上昇する現象が続いているのがわかると思います。周波数は、1kHz から 1.5kHz くらいなのでこれは人間の可聴周波数帯です。もちろん電波であるプラズマ波動を直接耳で聞くことはできませんが、この電波の波形を音の振動にそのままおしてやると、「ぴゅん、ぴゅん」という音として聞くことができます。なので、コー

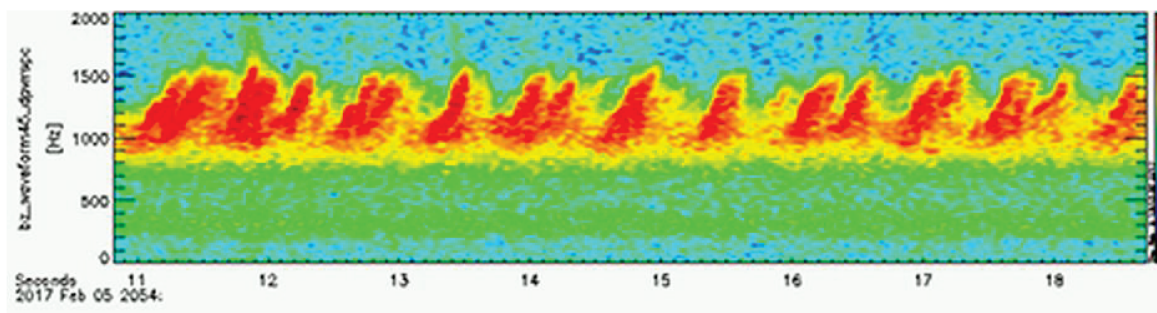


図 5：Arase 衛星で観測されたコーラス現象のスペクトル。縦軸は周波数（単位はヘルツ）、横軸は時間（単位は秒）（Arase 衛星プラズマ波動チーム提供）。

ラスという名前がつけられました。この現象そのものは以前から知られていましたが、実は、このコーラス現象が、地球の放射線帯の高エネルギー電子をつくったり、消滅させたりしていると考えられてきており、Arase 衛星に搭載されたプラズマ波動観測器が担っている大きな役割は、この考えを観測によって明らかにすることです。すでに観測は 3 年を迎えており、プラズマ波動が放射線帯の高エネルギー電子をコントロールしている多くの観測的証拠がみつきつつあります。このコーラス現象ですが、波形でみると、どうみえるかという、別の日のデータですが図 6 のようになっています。きれいな振幅変調のかかった波動です。まるで人間が変調器をつかってつくった波形のようですが、正真正銘自然現象そのままを図にしたものです。電気電子工学的にみると、振幅変調ですが私たちの研究分野ではこれを空間的な変化と捉えている人たちもいます。

4. 水星へ

宇宙電磁環境の探査は地球周辺だけに限りません。2018 年 10 月 20 日に、日欧共同水星探査衛星 BepiColombo が南米仏領ギアナから打ち上げられました。このミッションは JAXA と ESA が初めて共同で取り組んだミッションで、衛星 2 機から構成されます。水星に到着してから分離してそれぞれの観測を行うのですが、2 機のうち 1 機を日本が開発し、MIO と名付けられました（図 7）。この MIO にも日欧共同で開発したプラズマ波動観測器が搭載されています（責任者：笠羽康正 東北大・教授（京大・電気工学・1997 年博士修了））。Arase 衛星同様、30m の長い電界センサーとサーチコイルでプラズマ波動を捉えます。水星は太陽に一番近い惑星ですから、温度環境が厳しく、衛星の側面には太陽や水星からのエネルギーを取り込まないように鏡が貼られています。私達のプラズマ波動観測器もこのような水星周辺の厳しい環境で動作するように設計されています。太陽系惑星周辺でのプラズマ波動観測はほとんどがアメリカに一番乗りされているのですが、水星だけはプラズマ波動の観測がこれまで行われた

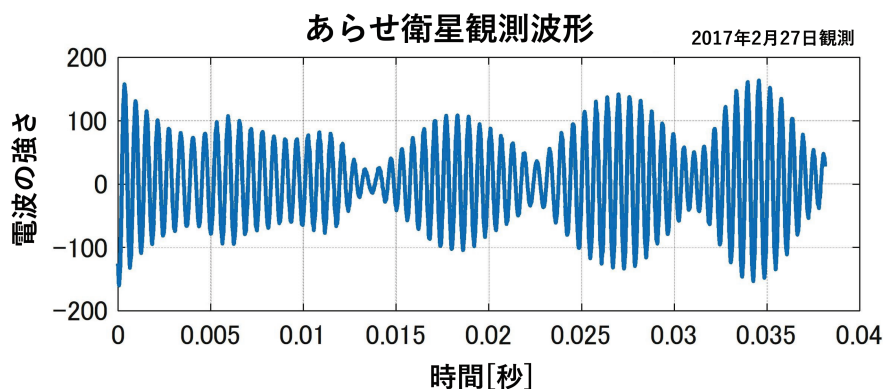


図 6：Arase 衛星に搭載されたプラズマ波動観測器で観測された放射線帯で発生している電波の波形。

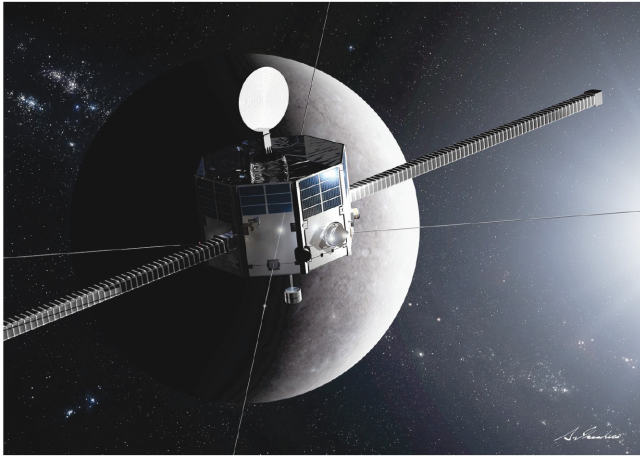


図 7：日欧共同水星磁気圏探査衛星 BepiColombo MIO（2018 年 10 月打ち上げ（イラスト：池下章裕氏、提供：JAXA））。

ことはなく、無事に到着して観測できれば史上初の観測データが得られます。しかし、MIO が水星に到着するまで、あと 6 年かかります（2025 年 12 月到着予定）。つまり、今、高校生の皆さんが、まさに大学生になって、卒業論文や修士論文に取り組む頃になります。その時、世界初のプラズマ波動データを送ってくる MIO は、どんな水星周辺の電磁環境の様子を示してくれるでしょうか。そしてこれから参加してくれる若い人達がどのような成果をあげてくれるか楽しみです。MIO は今も、水星を目指した軌道を飛翔しています。

電波・光・音波を利用した大気のリモートセンシング

生存圏研究所 大気圏精測診断分野
橋 口 浩 之、矢 吹 正 教

1. はじめに

電波（電磁波）は、テレビ、ラジオ、スマホ（携帯電話）、WiFi、カーナビ（GPS）、あるいは電子レンジなど広範囲に利用されており、私たちの生活になくてはならないものになっています。電波の種類は周波数で識別され、例えば、携帯電話では約 800MHz、1.5GHz などの周波数の電波が使われています。光も電磁波の一種ですが、慣習的に波長で識別されます。波長と周波数は逆数の関係になっていて、光速（秒速約 30 万 km）を周波数で割れば波長が求まります。可視光の波長はおおよそ $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、それより短い光は紫外線、長い光は赤外線と呼ばれます。電波と光の明確な境界はありませんが、電波法では周波数 3THz（波長 $100 \mu\text{m}$ ）までを電波としています。¹

電磁波は情報通信の分野で広く使われていますが、その際、伝搬路となるのが大気です。電磁波と大気との間で起こる様々な物理現象を用いて、多くの大気のリモートセンシング手法が開発されています。大気自体が放射している電磁波を検出すれば、気温や組成など様々な大気情報を得ることができます。例えば、地上に設置したマイクロ波放射計を上空に向けて大気からの特定の周波数の電磁波を受けると水蒸気を測定できます。また、衛星搭載の赤外・マイクロ波放射計では気温や水蒸気の全球分布を測定できます。このように自然界の電磁波を用いた手法は受動型リモートセンシングと呼ばれます。一方、人工的に電磁波を発射して大気を計測する手法は、能動型リモートセンシングと呼ばれ、電波が大気中で散乱・反射される現象を利用したレーダーがその典型です。また、GNSS（全球測位衛星システム）衛星から発射される電波が大気中で伝搬遅延あるいは屈折することを利用した大気計測法も開発されています。

電波を利用したリモートセンシングの代表がレーダー（RADAR: Radio Detection And Ranging）です。レーダーと聞くと、飛行機の探索や自動車の衝突防止などのための装置という印象が強いと思いますが、大気中の様々な現象を観測するためのレーダーも実用されています。ここでは、電波のほか、光や音波を利用して大気（気象）を観測するリモートセンシング装置の概要と観測例について紹介します。気象庁のアメダスのように、地上気象観測はそのほとんどが直接観測により行われています。一方、上空の高層気象を直接観測するには、センサーを飛行機やヘリウムを詰めた気球に付けて飛ばすなど手間やコストがかかるので、地上からのリモートセンシングが有力な観測手段になります。

2. 電波による大気リモートセンシング

気象観測で一般に用いられるレーダーは、短いパルス状の電波を送信し、ターゲットから散乱されるエコーを受信し、ターゲットの位置や特性（大きさ、移動速度など）を測定します。雨滴が電波の散乱体となるのはよく知られていますが、降雨がない時にも大気の乱れ（乱流）による屈折率の微細変動により電波はわずかに散乱されます。雨滴をターゲットとするレーダーは気象レーダー、乱流をターゲットとするレーダーは大気レーダー（あるいはウィンドプロファイラー）と呼ばれます。ここでは、主に大気レーダーについて紹介します。

大気の温度と風速構造が一定の条件を満たせば大気的不安定状態が起こり、乱流が生成されることが知られており、乱流は大気密度の変動としても現れます。電波の屈折率は大気密度と水蒸気密度で決まり、乱流により大気密度変動が起こると、屈折率も変動します。これが電波散乱に寄与しますが、テレビ放送や携帯電話通信には影響を与えないほど、散乱はごく僅かです。散乱の度合いは雨滴などに比べても大変微弱なので、この種のレーダーでは増幅作用が必要です。

ブラッグの回折格子は良く知られていますが、これは光の波長の半分の間隔で格子を刻んだものです。光の半波長に対応する格子構造が散乱した波を同じ位相に揃えて足し合わせることで強い散乱が起こります。電波が大気乱流によって散乱する時にも同様のことが起こります。一見乱雑に見える乱流も、波長成分に分解すれば規則的な構造の重ね合わせと捉えることができます。乱流のうち、ブラッグの共鳴条件を満たすようなレーダー電波を使うと、効率的な電波散乱を起こします。対流圏および成層圏では数 cm から数 10m の大きさ（スケール）の乱流渦が連続的に存在するとされています。すなわち、大気レーダーに使用できる電波波長にも広い選択肢があり、数 MHz から数 GHz までのどんな周波数を使っても、対応する乱流渦が存在するので、レーダーエコーが期待できます。しかし、国際的な電波利用の取り決めにより、大気レーダーの周波数には 50MHz、400MHz、900MHz、あるいは 1.3GHz 帯が用いられています。成層圏より上の中間圏では小スケールの乱流渦が存在しなくなりますので、中間圏まで観測するレーダーでは 50MHz 帯のみが使われます。

大気乱流は背景の大気の流れと一緒に動くので、乱流エコーのドップラー周波数を計測すれば、レーダービーム方向の視線風速成分を知ることができます。音波のドップラー効果は、近づいて来る救急車のサイレンは高く聞こえ、遠ざかる場合は低く聞こえるなど、日常生活でも体感できます。電波でも同様に、移動している物体に電波を当てると反射された電波の周波数は、その速度に応じて発射した周波数からずれます。この周波数のずれ（ドップラーシフト）は物体の速度に比例するため、ずれを測定することで速度を知ることができるのです。図 1 に示すように、大気レーダーでは、一般にアンテナビームを鉛直方向と東西および南北面内で天頂角が 10 度程度の斜め 4 方向に走査して、各視線風速を測定します。アンテナビームを走査する空間内（例えば、高度 5km ではおよそ直径 2km の円内）で風速が一様であると仮定すれば、5 つのビームから得られた視線風速成分から風速の 3 成分（東西風、南北風、鉛直流）が求まります。一般に鉛直流は水平風速に比べて 1 桁以上小さく測定が困難な量です。例えば、気球観測では気球自体が浮力により上昇するので、鉛直流を測定することは原理的に困難ですが、大気レーダーでは鉛直上方にアンテナを向けることで、鉛直流を 0.1m/s 程度の高精度で測定できる特長があります。

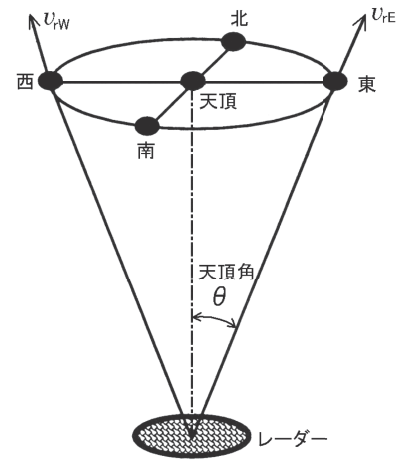


図 1: ウィンドプロファイラーのビーム走査例（深尾と濱津, 2005）

MU レーダー

レーダーには多種多様なシステム構成がありますが、もっとも一般的なレーダーは、短いパルス状の電波を送信し、ターゲットで散乱され戻ってくるエコーを受信して、散乱体までの距離や散乱体の特性（大きさ、移動速度等）を測定する方式を取っています。この場合、アンテナを送信と受信に共用するので、モノスタティック・パルス・レーダーと呼ばれます。「モノ (mono)」は単一を意味します。

気象レーダーや大気レーダーに使われるアンテナは、一枚の大きなパラボラアンテナを用いたものか、線状のアンテナ素子を多数並べたフェーズドアレイアンテナが主です。パラボラアンテナはその名前の通り反射面が放物面になっており、その焦点に置かれた一次放射器からの電波を反射して、指向性のあ

る電波を放射します。パラボラアンテナではモーターを使い機械的にアンテナ全体を駆動することでビーム方向を変えます。一方、アレイアンテナは多くの八木アンテナなどを用いて大型のアンテナを構成しますが、アンテナ自体は固定されています。それぞれの素子から放射される電波を少しずつ遅らせて、各アンテナから発射された電波を空間で合成して、特定の方向に電波を集中させます。大気レーダーとしては、多数の八木アンテナを2次元に配置したアクティブ・フェーズドアレイアンテナが、我々のグループが1984年に滋賀県甲賀市信楽町に建設したMUレーダー（Middle and Upper atmosphere radar）で初めて採用されました。フェーズドアレイアンテナは電子的にビーム方向を走査できますので、パラボラアンテナに比べて、非常に高速に観測方向を変更できる特長があります。特に大型のアンテナではその差が顕著になります。

MUレーダー（図2）では、直径約100mの円形凹地に八木アンテナ475本を設置しており、送受信周波数は46.5MHz、すなわち波長約6.5mです。MUレーダーの最大の特長は、475本の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式を採用していることです。1台の小型送受信機の送信電力は2.4kWで、475台の小型送受信機を同時に働かせることにより合計1MWの大電力を送信することができます。またレーダーシステム全体がマイクロコンピュータを用いてソフトウェアにより制御される柔軟な構成となっており、その結果各アンテナについて送受信信号の自由な位相制御が可能となり、アンテナビーム方向をパルス送信毎すなわち最高1秒間に2500回という高速で走査できます。また、MUレーダーのアンテナは25個の小アンテナ群に分割して、それぞれ独立な小型レーダーとして動作させることができるなど、様々な新しい観測手法の実験に使うことができます。

図3に台風通過時にMUレーダーで観測された水平風の時間高度変化の例を示します。通常ラジオゾンデ観測では6～12時間毎にデータが得られるのに比べて、大気レーダーの時間分解能が格段に優れていることが分かります。大気レーダーは地上に固定設置されるため、上空を移動していく大気現象を時間的に連続に観測することになります。つまり大気レーダーで得られるのは、上空の高さ・時間の2次元データになります。近似的に大気現象の空間構造が観測時間内で大きく変わらないとすれば、現象が西から東に移動することを利用して、時間変化を水平変化に置き換え、その高度・水平距離断面の構造を推定できます。すなわち、図3の例であれば、図の左側を東、右側を西と考えて、擬似的に台風の高度・東西断面を表していると考えられます。

気象庁は、北海道から沖縄県までの全国33ヶ所に1.3GHz帯大気レーダーを配置した「局地的気象監視システム Wind Profiler Network and Data Acquisition System (WINDAS)」を運用しています。手前味噌ですが、これには我々のMUレーダーで培ってきた技術が大いに活かされています。

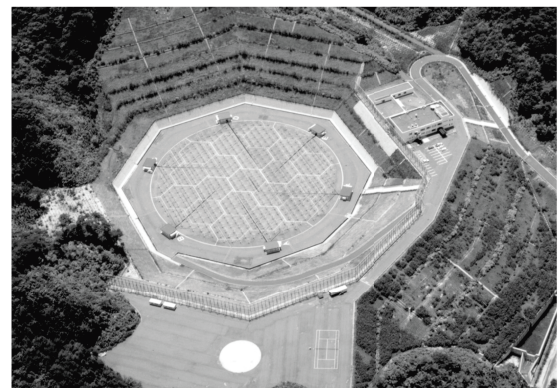


図2: MUレーダー。中央の円形の部分が475本の八木アンテナから構成されるフェーズドアレイアンテナ（直径103m）

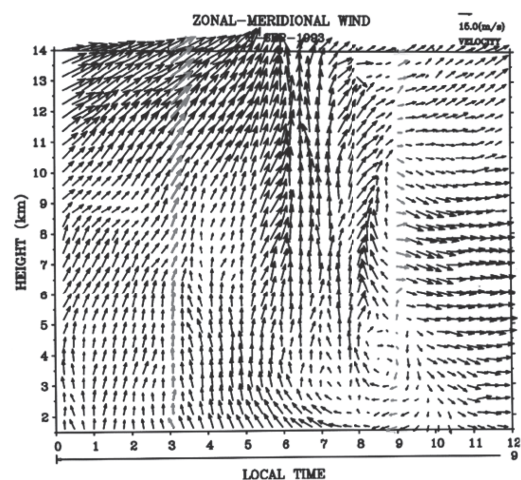


図3: MUレーダーで観測された水平風の時間高度変化の例

3. 光による大気リモートセンシング

レーザーを光源とするレーダーは、レーザーレーダーあるいはライダー（LIDAR: Light Detection And Ranging）と呼ばれ、近年それを大気計測に応用する研究開発が急速に進んでいます。レーダーは一般に同一のアンテナで送・受信を行いますが、ライダーは光源としてのレーザーと散乱された光を集める望遠鏡でそれぞれ送・受信を行い、これらに集光された光の強度または光子数を計測する受光・分光装置で構成されます。パルスレーザー光を射出して、その後方散乱光が戻ってくるまでの時間から距離を、散乱光強度や周波数変化から測定対象の分布や移動速度を計測します。測定対象は、エアロゾルや雲、オゾンや二酸化窒素などの微量気体成分、気温・水蒸気・風などの気象要素など多岐に渡ります。時空間的な変動が大きい大気環境をモニタリングする上で、ライダーは有効な計測手法の一つです。

エアロゾル（aerosol）は、「aero（空気）」と「sol（媒質中に固体または液体が分散しているコロイド系）」を組み合わせた言葉です。すなわち、エアロゾルの定義は気体中に浮遊する固体もしくは液体の粒子で、私たちの身の回りにたくさん存在しています。例えば、タバコの煙、海の波飛沫、土埃、火山の噴煙、車から排出される煤塵、花粉など、すべてエアロゾルです。大気中に浮遊するエアロゾル濃度は、場所によって大きく異なり、都市域では1 cm³あたり数万個以上にもなりますが、南極のように非常に清浄な地域では100個以下です。エアロゾルは、工場や自動車などの人間活動がもとになって排出された「人為起源」のものと、森林や土壌、海水など自然界から放出された「自然起源」のものとに大別されます。一般的に、人為起源のエアロゾルはサイズが小さく、自然起源のそれは大きい傾向があります。微小粒子ほど体の奥まで取り込まれやすいため、健康影響の面からも重要視されており、2009年にはサイズが2.5 μm以下の粒子の重量濃度で定義されるPM2.5について、環境基準が新たに設けられました。

数nmから約10 μmにわたる広い粒径範囲を取るエアロゾルの光学特性は、ミー散乱理論が適用できます。粒径10～100 nmを最大とする一般的なエアロゾル粒子数濃度の分布（粒径分布）を考慮すると、光の波長領域におけるミー散乱の強度は波長におおよそ反比例します。一方、窒素、酸素など空気分子1個の大きさは、光の波長に比べても非常に小さく1 nm以下であり、このような粒子の光散乱はレイリー散乱と呼ばれ、その強さが波長の4乗に反比例します。それに対して、エアロゾル粒子の波長に対する強度差は、かなり小さいと言えます。そのため、太陽光に対するエアロゾルの散乱では、色ごとの明瞭な違いが表れず、白っぽく見えることになります。この特徴は、2000mを超えるような標高の高い山で見る青空と、都会で見る青空の色の違いにも反映されています。高山では、透き通った深い青色、空気分子のレイリー散乱による「理想的な青空」となります。一方、大気汚染物質が多く浮遊する都市域で見る空は、空気分子によるレイリー散乱に、エアロゾルによるミー散乱の効果が加わった色となり、白みがかった青色の空となります。

信楽MU観測所には、レイリー・ミー散乱を計測する多波長偏光ライダーが設置されています。このライダーシステムにより、エアロゾル後方散乱信号を数mおきに、高度約1 km以下では数秒、10 km以下では1分程度の時間分解能で取得できます。何故、多波長なのかというと、粒子特性によって散乱される光の波長（色）ごとの強度が変わる特徴を計測に利用するためです。人工的に光の波長を制御したレーザー光を何種類か使用して、その波長ごとの散乱特性の違いを検出すると、粒子サイズなどの情報を抽出できるようになります。また、レーザーから出た光は電場（および磁場）の振動方向が一定の直線偏光をしています。球形粒子からの後方散乱光の偏光成分は変わらないですが、非球形粒子では入射光と後方散乱光の偏光特性に違いが表れます。そのため、多波長と偏光を組み合わせたライダーは、エアロゾル成分や雲相（水雲・氷晶雲・混合相雲）の計測に広く利用されています。また、レーザーの入射波長と散乱波長が異なる水蒸気分子や窒素分子のラマン散乱を検出すると、水蒸気濃度や気温の空間分布の計測が可能となります。これら物質の空間的な広がりを把握するために、ライダーの観測視野

方向を自動制御できる走査型ライダーも開発しています(図4)。

一方、オゾンのような微量気体は、窒素や酸素に比べて非常に少ないため、その散乱の計測のみから濃度を求めることはできません。そこで、特定の光の波長のみを吸収する微量気体の特性を利用します。例えば、オゾンは波長 250 nm を中心とする紫外域で強い吸収を示します。効率良く光を吸収する波長

と、吸収しない波長の2波長の光源を用いて同時に信号を取得し、その差分を取ると、オゾンによる光吸収の情報が抽出できます。分子1個あたりの光吸収(吸収断面積)は理論的に求まるため、それらの情報からオゾン濃度の分布を推定できます。

ライダーの応用範囲は非常に広いですが、原理上の弱点もあります。まず、光を用いているため、大きく散乱するものがあるとその先が見えません。つまり、厚い雲があると、その先が計測できなくなります。さらに太陽光がノイズ源となるため、日中の観測精度が落ちるという課題もあります。そのため、最近では、太陽光の影響が少ない紫外領域や近赤外域を光源とするライダーも多く開発されています。また、得られた信号からエアロゾルの情報のみを抽出しようとする、空気分子の散乱に埋もれない程度の粒子による散乱強度が必要となります。一般的に、ライダーで検出できる粒子サイズは、サブミクロン以上(0.1 μm 以上)と言われており、それ以下のナノ粒子サイズの定量的な計測は難しいです。そこで、ライダーだけでなく、雲中まで計測できるレーダーやタワー・気球を利用した直接計測など、様々な計測手法を組み合わせた複合観測から、大気微量物質の動態や気象要素の空間変動を総合的に把握する取り組みが進められています。

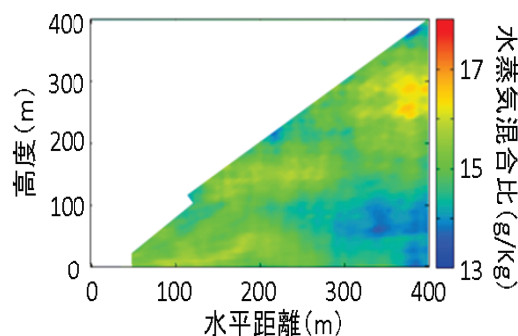


図4: (左) 走査型水蒸気ラマンライダーシステムの外観、(右) ライダーで取得された水蒸気混合比の鉛直断面図(信楽MU観測所 2012年8月28日22時17分)

4. 音波による大気リモートセンシング

気温の高度プロファイルを測るには一般にラジオゾンデ気球が用いられます。しかし、放球から観測終了まで1~2時間かかるので、いわゆるゲリラ豪雨など変動の激しい気象現象を捉えるには時間分解能が不十分です。大気レーダーと音波発射システムを併用したラス(RASS: Radio Acoustic Sounding System)では、高時間分解能で気温を連続観測できます。ラスでは、音波を上空に発射して屈折率変動を人工的に作り、そこからの散乱電波を大気レーダーで検出します(図5)。そのエコーのドップラー周波数から音速を求めます。さらに、音速が気温の二乗に比例する関係を用いて気温を測定します。

乱流エコーと同様、ラスでもブラッグ条件が重要で、レーダーの送信電波の波長と、音波による屈折率変動の周期構造の間でブラッグ条件が満たされる必要があります。自然界の乱流は様々な大きさの乱流渦の重ね合わせなので必ずレーダー半波長に合うものが存在し、さらに乱流は3次元等方的なのでどの方向にビームを向けても電波散乱が期待できま

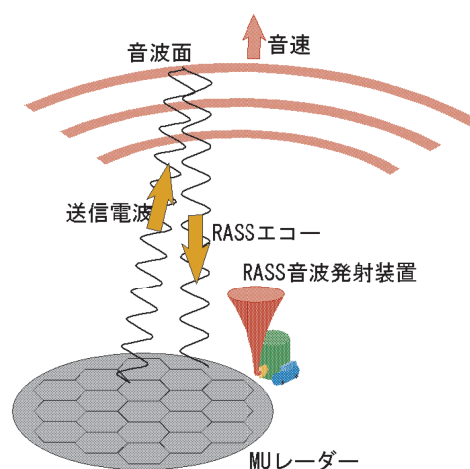


図5: ラスの原理

す。一方、ラスでは音波の周波数の選択と音波面の形状が鍵となります。ラスに関するブラック条件は、レーダービームが音波面に垂直に入射すること（直交条件）と、屈折率変動を作る音波波長がレーダー波長の半分になること（共鳴条件）の両方を満たす必要があります。音波は風の影響を受けるので、直交条件を満たすためには音源を風上側に設置し、アンテナビームを風上方向に適切に向ける必要があります。MU レーダーはアンテナビーム方向を自在に走査できますので、風による音波面の変化に追従して、直交条件を満たすようにアンテナビームを向け、広い高度範囲で RASS エコーを検出できます。共鳴条件について、対流圏では高度とともに気温が低下し、音速も遅くなるため、単一周波数の音波では、波長が高度とともに短くなり、共鳴条件は特定の高度でしか満たしません。そこで、適切な音域で周波数を変化させてこれを解決します。ここで、レーダーで測定される音速は対地速度であることに注意が必要で、測定された音速から背景風の成分を補正しなければいけません。背景風を補正して求めた気温精度は 0.5 度程度で、ラジオゾンデと同等かそれ以上とされています。このような高精度な気温プロファイルが 150m 程度の高度分解能で時間間隔 1 ～ 2 分で連続的に得られます。

一方、音波のみで大気を観測する装置として、ソーダー（SODAR: Sonic Detection And Ranging）が実用されています。使用する媒体に音波と電波の違いはありますが、測定原理は大気レーダーと基本的に同じで、上空の風の鉛直分布を測定します。1kHz 程度の音波パルスが大気中に発信し、大気の屈折率の乱れによって散乱されて戻ってくる音波を受信します。受信した音波は風によるドップラー効果により周波数が偏移するので、それを元に風を算出します。大気による音波の減衰が比較的大きいことから高高度の観測には向きませんが、逆に大型のレーダーが不得意な地表面近くからの観測が可能であるという特長があります。

5. おわりに

電波、光、音波を利用して大気を観測するリモートセンシング技術について紹介しました。MU レーダーの成果を背景に、我々はインドネシア共和国西スマトラの赤道直下に赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar: EAR）を建設しました。EAR も MU レーダーと同様、直径 110m の円形敷地内に 560 本の八木アンテナを配置し、各アンテナに半導体送受信モジュールを備えたアクティブ・フェーズドアレイ方式を採用しています。送信出力は 100kW で、MU レーダーに比べて感度は 1/10 ですが、高度約 20km までの赤道大気の連続観測が可能です。EAR を MU レーダー並に高感度化する赤道 MU レーダー計画もあります。これまでに培ってきた知見や新しい計測技術を活用して、地球大気環境の変化を精密かつ多角的・長期的に把握し診断していくことは、持続発展可能な社会の実現において重要であると考えます。

注

- 1 n (ナノ): 10 の -9 乗、 μ (マイクロ): 10 の -6 乗、m (ミリ): 10 の -3 乗、k (キロ): 10 の 3 乗、M (メガ): 10 の 6 乗、G (ギガ): 10 の 9 乗、T (テラ): 10 の 12 乗

参考文献

深尾昌一郎・濱津享助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 491 頁, 2005.

石原正仁・津田敏隆, 最先端の気象観測 (新しい気象技術と気象学), 東京堂出版, 176 頁, 2012.

MU レーダーのホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/>

赤道大気レーダーのホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>

気象庁 WINDAS のホームページ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/windpro/kaisetsu.html>

コンピュータで見る

コンピュータビジョン分野

西 野 恒、延 原 章 平、川 原 僚

我々の研究室ではコンピュータビジョンの研究をしています。コンピュータビジョンという研究分野を初めて聞く人も多いと思いますが、その名から想像できる通り計算機の視覚、すなわちコンピュータが物を見えるようにすることが目的になっています。もともとはいわゆる人工知能の一分野として生まれたのですが、今では独立した分野として大きく栄え、その成果を気づかぬうちにみなさんも日々の生活の中で活用しています。リアルタイムで自撮り映像の顔に仮想的にメガネや鼻をつけたり、パソコンを顔でロック解除したり、ゲームのキャラクターがスマートフォンを通して現実世界に重なって見えたり、様々な形で身近にコンピュータビジョンの技術が溢れています。自動運転や介護ロボットなど、コンピュータビジョン技術が社会基盤として実装されるようになってきています。これらの技術の根底には、顔認識と追跡や3次元センシングなどのコンピュータビジョンの基礎的な問題が存在しており、それらが製品レベルで実装され始めているわけです。

コンピュータビジョンは、我々の存在する3次元なり4次元の世界を2次元の画像列から理解するという、そもそも不良設定な問題を追究しているため、それらの課題の安定した解法を得るにはいろいろと根本的な仮定をおいています。例えば、ライダーと呼ばれる、パルスレーザを打って帰ってきた時間によって3次元計測を用いる自動運転車は、世界がまばらな3次元点群でできていると思っていますし、物体認識システムにおいても元の画像ではなく、画像の勾配分布しか見ていなかったりします。すなわち、まだまだ簡素化された視覚世界にコンピュータビジョンは住んでいるわけです。

それに比べ、我々の見ている視覚世界はとても豊かです。同じコップでも様々な形、色、質感、材質の物がありますし、実物体表面は紙のような決まった拡散反射をするだけではなく、透き通ったりつやがあったり複雑な光との作用をします。さらには、我々人間自身の動きや見えが非常に複雑で豊かな視覚世界を織りなします。我々の視覚世界を、ただの3次元点群にとどまらず、よりその豊かさを見えるようにすることにより、視覚情報から物や、人や、環境を深く理解できるようにする、それがコンピュータビジョン研究の大きな目標になっているわけです。我々の研究室では、コンピュータビジョンを単純に「見る」技術から人間と同じように、あるいはそれ以上に実世界を視覚情報から知覚できるように、すなわち「見る」ことができるようにすべく、特に「物を見る」「人を見る」、そして「よりよく見る」の3本の研究の柱を掲げ研究を進めています。

1. 物を見る

私（西野）は、アメリカに15年ほどいたのですが、フィラデルフィアというアメリカ建国の地に13年ほど住んでいました。フィラデルフィアは映画のロッキーが撮影された地として良く知られています。フィラデルフィア美術館の階段のふもとにはロッキーの銅像があって、スタローンが続編を撮影しに来るたびに訪れます。そのロッキーの銅像とスタローンを一緒に撮った写真を想像してみてください。そのような写真を見れば、我々はいともたやすく生身のロッキーとその銅像の区別が付きません。しかし、実際コンピュータビジョンで開発された物体認識のプログラムを使うと、スタローンは人間だと判断さ



図1：左の写真の中の素材を各画素単位で認識した結果が右に示されています。素材を認識することにより、例えば布でできた椅子が木でできた床にある、などにより豊かな情景理解が可能になります。

れるものの、銅像が何かは判別できません。

コンピュータは例えば人の検出をするときなどには、主に形を表す情報、例えば画素値の勾配分布などを見て認識しています。しかし、この銅像を識別するためには、人間の形をしていることがわかるだけでは不十分です。その形を作り上げているその物体の素材、例えば、髪の毛であったり、皮膚であったり服の素材がわかるからこそ、片方が本物の人間でもう一方は銅製のレプリカと判断できるわけです。コンピュータでも素材や素材にまつわる情報を画像から推定可能にできれば、物体認識だけではわからない、特に実世界の中で行動するために絶対不可欠な情報が得られます。例えば、道路が土ではなくてアスファルトで出来ていて、濡れているからすべりやすいとか、床に落ちている、形からは認識できないものが柔らかいタオルであるとか、買ったいちごがくさっているから食べられないとか、形だけでは判断できない、でも触ったり、その上を走ったり、それこそ食べたりと、現実の世界において行動を起こすために必要不可欠な情報が得られます。

素材認識は、非常に難しい問題です。なぜなら、形状を認識すれば済む物体認識とは異なり、それぞれの素材について、その見え方に非常に大きな幅があるからです。同じプラスチックでも、赤いコップにもなれば白いまな板にもなります。そこで、我々は素材をその特性、特に材質に関わる属性の集合として表現し認識することを考えました。例えば、布はふわふわしていて織られているけれど、固くて金属的ではない、というように素材の属性の集合として捉えるわけです。素材自体は大きな見えのクラス内分散があるものの、材質の方が特徴的な見えに現れるため認識しやすく、結果として素材が認識できるというのが狙いです。我々はそのような深層学習モデルを導出し、局所視覚情報から素材を認識しつつ、物体や場所も特定して、それらの大局的情報を組み合わせることによって画素ごとに精確に素材が認識できるようにしました。例えば、図1の左下の画像ですと、ソファは布で、床は木で、壁は石膏で、窓はガラスで出てきていると、正しく認識できます。そうすると、例えばコップはコップでも紙コップだからロボットが持ち上げるときには力加減をするとか、そういったことが見ただけで計画できるようになるわけです。

このように、物の見た目からその物体に関わる有益な情報を視覚からより深く探り出す、「見る」ためのコンピュータビジョンの研究を進めています。

2. 人を見る

我々の視覚世界を構成する様々な物体の中でも、人は特に大きな関心の対象です。その人が誰かを特定したり、どこに行くのかその行動を予測したり、果ては気分が落ち込んでいるのか内面状態を類推したり、我々人間は人の見た目から様々な情報をたやすく読み解きます。コンピュータにもそのような能力を備えることができれば、危険な行動を予知したり、助けの要る人にタイミング良く手を差し伸べたりと、より住みよい社会が実現できます。

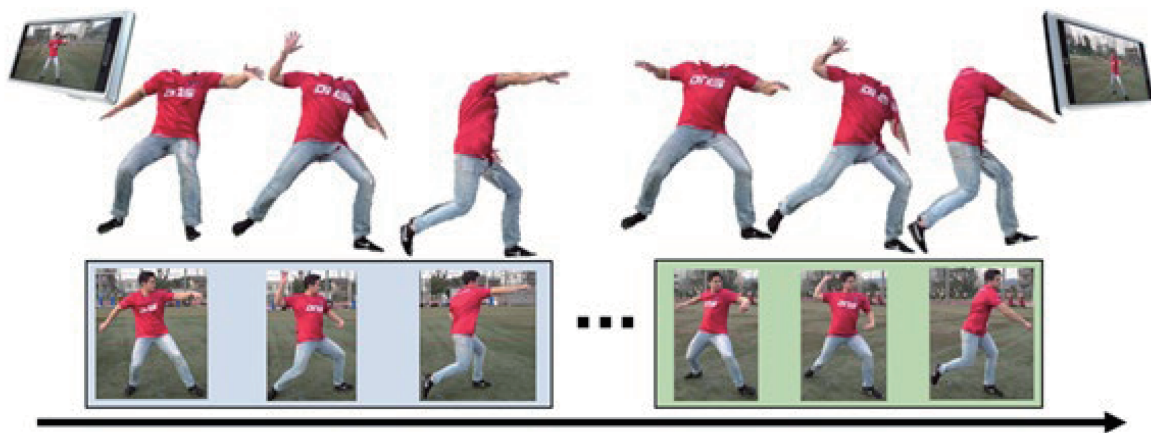


図2：友人がピッチングなど繰り返し動作を行っている様子を気軽に少数の複数視点から撮像した映像から、自由な視点で見返せるような3次元モデルを構築できることを示しました。

コンピュータビジョンにおける人に関する研究は、主に監視への応用を中心に黎明期から行われてきました。近年では、特に映像から対象人物の人体形状を3次元復元する研究が盛んに行われています。このような技術はマーカーレスモーションキャプチャとも呼ばれ、復元された3次元人体形状はゲーム、映像制作、スポーツ科学、医療など様々な分野で活用できます。しかし、これまでの研究は多数のカメラを人物の周囲に配置して同時に観測して三角測量を行うことを必要としていました。そのため、非常に高価で大規模な装置を導入する必要がありました。

一方でわれわれ人間は、ある一つの方向から人を見るだけで、ボールを投げる、といった動作を3次元的に、その腕の振りの軌跡などの動作だけではなく、行動主体の人体表面形状や骨格まで把握できます。このように非常に少数の視点から人を見るだけでその人体形状を3次元復元する方法をコンピュータで実行可能なアルゴリズムとして実現できないか考えました。人間がこのようなことができるのは、「同じような運動を見たことがある」ことが主な理由だと考えられますが、まずこれを「同じような運動を別の方向からも見たことがある」と読み替えます。すると同じような動作をしている被写体を異なる視点から時間を越えて観測、つまり「同じ運動であること」を手がかりとして、過去の観測と現在の観測の間で時間的同期を取り、さらに観測視点の相対的な位置関係を推定できれば、従来手法で必要としていた「多数の相異なる視点から被写体を同時に観測して三角測量する」という条件を擬似的に満たすことができると考えました。

同じ運動、つまり繰り返し動作を別の視点から別の時刻で観測したとして、どのようにすれば時間的な同期と空間的な相対位置関係を知ることができるのでしょうか。その鍵は被写体が人間であると知っていることにあります。人物を撮影しているのであれば、たとえ撮影時刻や撮影視点が異なっていたとしても、右肘同士、左膝同士など、同じ人体部位同士を任意の画像間で対応付けることができます。視点から撮影したのであれば、部位間の対応関係から三角測量によって各部位の3次元位置を得ることができます。すなわち繰り返し動作をしている人物を撮影しているということさえ仮定できれば、カメラの撮影時刻、撮影位置、そして被写体の3次元形状および運動の全てにおいて辻褄が合う解釈を同時に推定することができます。すると、図2に示すように、たったの4つの異なる視点から友人が投球動作を繰り返している様子をスマートフォンで撮像するだけで、その友人の3次元形状を復元し、自由な視点から見るできるようになります。

このように人を視る研究例として、人を見ているという事実を利用して、簡便に撮像された映像からより人間に近い3次元的理解が実現できることを示しました。

3. より良く視る

コンピュータにとっての目は、人間の目と同じでしょうか？コンピュータの目がカメラであると考え、その目は人間のように2つとは限りませんし、可視光だけでなく赤外線や紫外線も撮像できます。コンピュータの目は人間の体の構造などの制約は受けないので、人間とは異なる見方や人間に見えないものまでも見ることができます。さらに、単一の画像情報に限られることなく、計算処理によって多くの画像を組み合わせることでより豊かな視覚情報を得ることができます。例えばデジタルカメラはある時間だけ光を露光して写真を撮影しますが、表現できる明るさ(ダイナミックレンジ)が有限であるため、写真の暗い部分が黒くつぶれたり、またライトのような明るい部分が白く飛んでしまったりします。そこで露光時間を変化させながら複数枚撮って後から組み合わせることにより、明暗の差が大きいシーンでも広い範囲の明るさの情報を取得できる HDR 撮影も実現できます。このように、人間の視覚の枠を超えた情報の取得と処理により、人間と同じように、さらには人間でさえ見えなかったものも視えるようにする研究も盛んに行われています。

人間とは異なる見方によって今まで見えなかったものが視えるようになる例は、身近なところにも存在しています。京都の金閣寺で水面に映る金閣寺の写真を撮ったこと、あるいは見たことはありませんか？水面に建物が反射されて見えるとき、人間にとっては逆さまの像が同時に見えているだけです。なぜこのように見えるかという、水面が鏡となっているからです。ということは、みなさんも学校で学習した通り、この鏡となっている水面の下から仮想的にもう1つの視点を持ってその建物を見ていることになります。つまり、ちょうど我々が両目を使って一つの物を見たときに、各物体表面点の視差から三角測量によって3次元で見ることができるよう、水面反射では上下で2視点の視差が生じる両眼視になっているわけです。さらに、水面反射はフレネル反射と呼ばれる、光の入射角によって反射強度が変化するものであり、水面反射像は実像とは異なった明るさで撮像されます。したがって、同じ明るさを異なる露光時間で撮像したのと同じことになり、HDR でその画像を復元できることになります。つまり、水面反射を含めて撮像されたたった一枚の画像から HDR で3次元復元が可能となります。図3のように、平等院のたった一枚の写真から、見栄えの良い3Dモデルができるわけです。

この例のように、我々はコンピュータにとっての視覚として、人間が直感的に視えていなかったものに着目し、見えないものを視えるようにするための研究に取り組んでいます。

4. まとめ

我々の研究室では見るだけではなく「視る」、本当に知覚として見るということにコンピュータビジョンを昇華していきたいと思っています。人を認識したり追跡したりするだけではなく、その一挙手一投足を見ることにより、その人の気分や状態、さらに考えていることややりそうなことを知る。すなわち、その人の行動をその人の内面を映す鏡として人を視る。物体を単に認識したり形状復元したりするのではなく、その素材や材質にとどまらず、重さややわらかさ、壊れやすさや使い勝手など含む様々な属性



図3：京都のお寺など、水面に反射した姿とともに撮像された建築物の一枚の画像（左）から、彩り豊かな3次元モデルを復元できる（右の2枚）ことを示しました。

を視覚として理解する、物を視る。さらには今まで見えなかったもの、人間でも見えないものを視えるようにする。それらを実現することを目指して日夜研究していますので、ご興味がある方はぜひ我々の研究室のホームページ等を見てみてください。

電力のパケット化 ―電力と情報の統合を目指して―

工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座
持 山 志 宇、引 原 隆 士

はじめに

本研究室では、非線形力学の基礎から工学的応用に関する研究、および電力変換をベースにしたシステム設計・制御の研究に取り組んでいます。これらの研究テーマの中から、本稿では「電力のパケット化」に関する研究の概要と成果の一部について説明します。

電気は最も身近なエネルギーの一つであり、身の回りの様々な機器の動作に用いられています。皆さんがこの記事を読んでいるコンピュータまたはスマートフォンをはじめとする家電製品、電気自動車などの乗り物、最近見かけることも多くなってきたロボットなどがその例です。そんな電気エネルギーの伝送と管理に関する新しい手法として、私達の研究グループでは電力のパケット化とそれにもとづく電力ルーティングを提案し、その研究開発に取り組んでいます。

電力のパケット化

まず、電力パケットの「パケット」とは何でしょうか。この考え方は、インターネットにおける情報のやりとりにも用いられる概念のアナロジーとして導入されています。コンピュータやスマートフォンなどの通信では、送りたい情報はパケットと呼ばれる単位に分割され、宛先などの情報とともに送信されます。そして宛先情報などに基づき、パケットを転送するルータとよばれる機器からなるネットワークを介して受信者に届けられます。電力パケット伝送システムでは、同様に、送りたい電力を小分けにして宛先情報のタグとともに送信します。この一単位を電力パケットと呼びます（図1）。電力パケットは電力ルータと呼ばれる機器のネットワークを介して、負荷へと届けられます。電力のパケット化やそのルーティングの具体的な実現方法については、後で詳しく述べます。

さて、電力をパケット化することには、どんな意義があるのでしょうか。皆さんの家のコンセントにも電力を供給している電力システムでは、大規模な発電機群と需要家が送配電網で接続され、すべての発電機が同期して動いています。一方、本研究が対象とするのは、大規模な発電所からは切り離された、小容量の分散型電源や蓄電池と負荷（電力を消費する機器）からなるシステムです。このようなシステムの例としては、マイクログリッドなどに加え、航空機や電気自動車などの乗り物や移動型のロボットなど



図1：電力のパケット化

が挙げられます。ここで、分散型電源には、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを含みます。これらの活用は持続可能な社会の実現に向けて重要な課題ですが、その出力は自然環境という制御不可能な要因によって時々刻々と変化するため、電力系統のように同期を前提とするシステムにとっては障害となります。このような状況では、複数の分散型電源から特定の負荷への電力の集中、あるいは複数の負荷への電力の分散を動的に制御するという視点が重要になります。ここに、電力のトレース（流れの追跡）を行いたいという要請が生まれます。電力のパケット化は、これをパルス単位の伝送とタグ付けにより実現します。

ここで、電力のトレースのイメージについて、水の供給に例えて考えてみましょう。従来の電力システムを上水道に例え、水源を電源に対応づけます。この場合、水源が複数あったとしても、浄水場ですべての水が混ざり合います。その上流に例えば A 川と B 川があったとして、それらからやってきた水は蛇口まで来てしまえば区別できません。1 リットルの水に含まれる A 川の水と B 川の水の割合は消費者には分かりません。一方、電力パケットによる電力伝送は、ペットボトルの水に対応づけられます。この場合、ラベル（情報タグに対応）を見ながら水源を区別して銘柄を選ぶことができますし、C 水源と D 水源の水を 500 ミリリットルずつ、などと指定することもできます。

ここで重要となるのが、電力とその伝送に関わる情報を仮想的に並列して処理するのではなく、物理層で統合するという点です。これにより、電力パケットを用いた電力マネジメントでは、電力の需給に関する情報と実際の物理量の流れとの乖離を原理的に防ぐことができます。

電力のパケット化を実現するハードウェア

さて、電力のパケット化とそのルーティングの具体的な実現方法に話を移しましょう。電力のパケット化は、半導体デバイスを使った回路スイッチングにより実現されます。半導体スイッチとは、簡単に言うと、回路の導通の有無を電子的に制御できる素子のことです。スイッチを一定時間だけオンにすることで、パルス状の電力波形を生成します。情報タグも同様に、スイッチの「オン」と「オフ」をそれぞれ信号「1」と「0」に対応させることで、電圧波形によるタグ付けを行います。電力のパケット化の実現においては、これらのスイッチングを高速かつ低損失に行うことが欠かせません。近年、炭化ケイ素（SiC）や窒化ガリウム（GaN）などのワイドバンドギャップ半導体という新たな材料の研究が進んだことで、電力のパケット化が物理層において実現可能になりました。

電力のパケット化とそのルーティングを実現する機器が、電力ルータです（図 2）。これは複数の半導体スイッチからなる電気回路を基本とします。入出力ポートに電力パケットが入力されると、まずはその情報タグを読み取り、それに従って電力パケットを受け取るかどうかを決定します。受け取る場合は、そのポートの入り口にあるスイッチをオンにすることで、電力を一時貯蔵用のストレージに格納します。そして、格納した電力を用いて、次の宛先につながるポートから再び電力パケットを伝送します。この

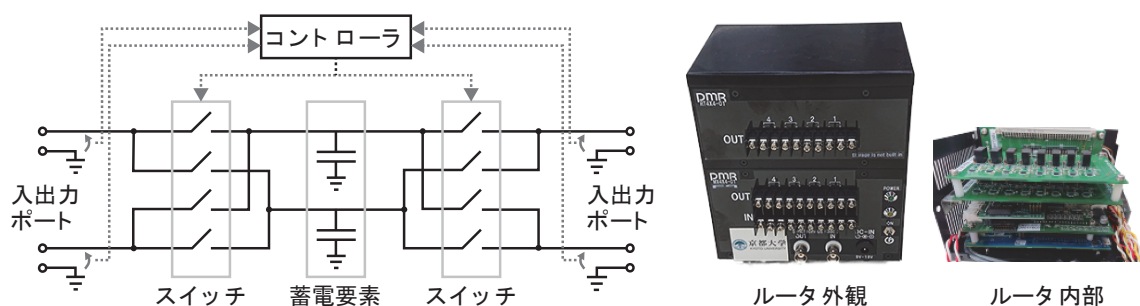


図 2：電力パケットルータの回路例（左）と実機写真（右）

ときのスイッチの動作はすでに述べた通りです。このような貯蓄と転送をルータのネットワーク上で繰り返すことで、電源から負荷への電力供給が行われます。

先ほど、パケット化により電力のトレースが可能になると説明しました。これを実現するために、ルータのネットワーク上で異なる電力パケットは時間的に分離されて伝送されます。このような伝送方式を時分割多重伝送と呼びます。1つのパケットの時間長さを負荷の時定数より十分短く設定することで、時間平均の意味で複数の負荷へ配線を共有した同時供給を行います。パケット化された電力によって、負荷の要求電力を満たすことができることは、すでに理論的に示されています。また、電力パケットの列による断続的な電力供給を用いた具体的な負荷の制御については、後で詳しく述べます。

電力パケット伝送システムをロボットや乗り物など移動型のシステムに適用する場合、ルータネットワークが占める体積や重量の削減は重要な課題となります。私達のグループでは、手作りのプロトタイプから始まり、何世代もの改良を重ねて小型軽量化と扱える電力の大容量化の両立に挑戦してきました(図2右)。将来的には、制御回路も含め全体を集積回路化することで、さらなる小型軽量化が期待されます。

電力のルーティング

電力パケットを送り元から宛先まで伝送する際には、インターネットにおける通信と同様に、複数のルータを経由します。このとき、ルータネットワークの形状によっては、同じ宛先に向かうための複数の経路が存在することがあります(図3)。これらの中から最適なものを選択することは重要な課題となります。同様の問題は情報通信の分野においても存在しますが、電力という物理量を扱う電力パケット伝送システムならではの問題があります。例えば、情報の伝送ではAさんからBさんに情報Cを送るとなると、当然ながらCを細切れにしたパケットはすべてAさんからBさんに送られます。一方、電力パケットでは、電力の受け手がある電力量を要求するとき、必ずしもそのすべてを特定の電源から受け取る必要がない場合があります。すなわち、負荷要求(の総量)を複数の分散型電源に時空間分布として割り当てることになります。また、その際にどの電源を選択するかを指標として、情報通信に類似的な伝送経路の混雑具合の他に、伝送途中のエネルギー損失が考えられます。私達のグループでは、これら電力パケットに固有の特徴を踏まえた電力ルーティングのアルゴリズムを提案し、状況に応じて適切なルーティングを行えるシステムの実現に成功しています。

電力パケットの密度変調

電力パケットによる電力供給は、断続的なパルス列により与えられると説明しました。これに対して、一般的な負荷は連続的な電力を要求します。この間のギャップを埋める技術が、電力パケットを用いたパルス密度変調です(図4)。従来、供給電力の調整にはパルス幅変調と呼ばれる方法が一般に用いられてきました。これはアナログの信号変調を電力パルスの時間幅に対応付けるもので、アナログ制御に適しています。一方、パルス密度変調では、パルスの幅は一定としてその時間密度を変化させることで供

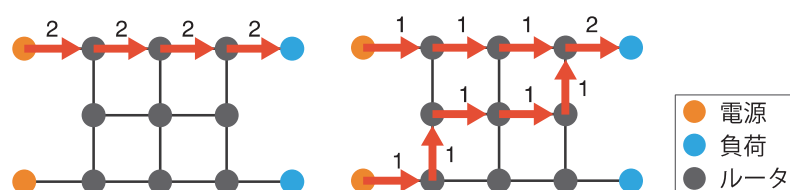


図3：電力パケットルーティングの一例

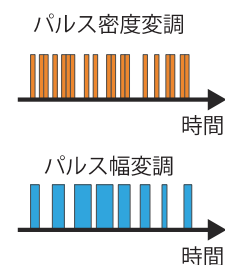


図4：変調方式

給電力の調整を行います。制御信号の大きさおよび時間が量子化されていることから、デジタル制御に適しています。後者はこれまで信号処理の分野では利用されていたものの、電力の分野ではほとんど注目されていませんでした。私達のグループでは、この方式におけるパルス列を電力パケットの列に対応付けることで、負荷の制御が可能であることを示しました。これにより、LEDなどの静的な負荷にとどまらず、ロボットマニピュレータを駆動するモータなど動的な負荷の駆動にも成功しています。

ロボット歩行制御への応用

上記のパルス密度変調は、ある意味で、従来のアナログ的な負荷要求にも電力パケット伝送システムが対応できることを示すものでした。一方で、生物の情報処理システムなどでは、パルスによる情報伝達が行われており、またエネルギーもグルコースを単位として量子化された伝送と貯蓄により取り扱われています。これに倣って、アナログの近似をはさむことなく、情報とエネルギーを一貫してデジタル処理することで、今までにない機能を実現できる可能性があります。

上記の目標に向けた一歩として、現在私達のグループでは歩行ロボットを対象としたパルス給電にもとづく歩行制御について研究を行っています。脚の物理的な構造そのものがもつ特徴から、下り坂においては一定の条件のもと重力によるエネルギーのみで安定した歩行が行えることがわかっています。このことを生かして、傾斜のない水平な地面の上においても、地面をキックする瞬間のみに足首関節や股関節に配したモータにパケットを集中的に印加することで、安定した歩行が実現できることを明らかにしました（図5）。この結果をもとに、運動を司る情報系とその実現に必要なエネルギー伝送系の統合を図るべく、現在研究を進めています。

電力の論理演算

電力がデジタル量として取り扱えるようになると、情報分野におけるデジタル信号処理とのアナロジーを考えることができるようになります。私達のグループでは、電力における論理演算（AND、NANDやORなど）を定義し、物理層において各演算が実現可能であることを示しました（図6左）。ここで、情報と電力の論理演算においては、どちらもデジタル量として取り扱えるという意味で共通点がある一方、重要な違いもあります。そのひとつが、電力は物理量であるということです。例えば、情報を破棄することは比較的容易ですが、電力ではそうはいきません。また、情報では1または0（HIGHまたはLOW）の区別のみが重要となりますが、電力の場合、その存在（HIGH）のみならず、具体的な値の大小が大きな意味を持ちます。電力パケットの伝送過程で生じる散逸やノイズの影響をうけたとき、受け取った論理は同じでも、物理量の総量が異なるという場合が起こりえます。この問題を解決するために、私達は電力の意味での「誤り訂正」の手法を提案しました（図6右）。論理と電力の両方に基づ

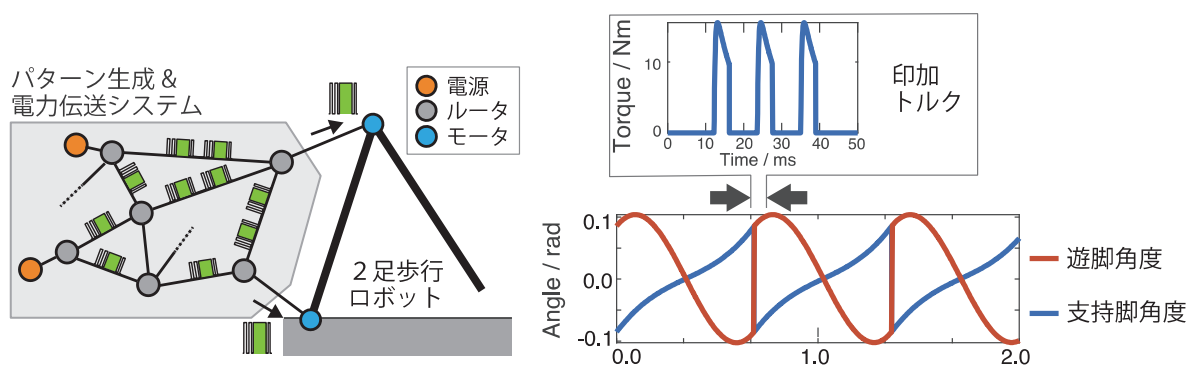


図5：電力パケットを用いたパルス給電による歩行ロボットの制御

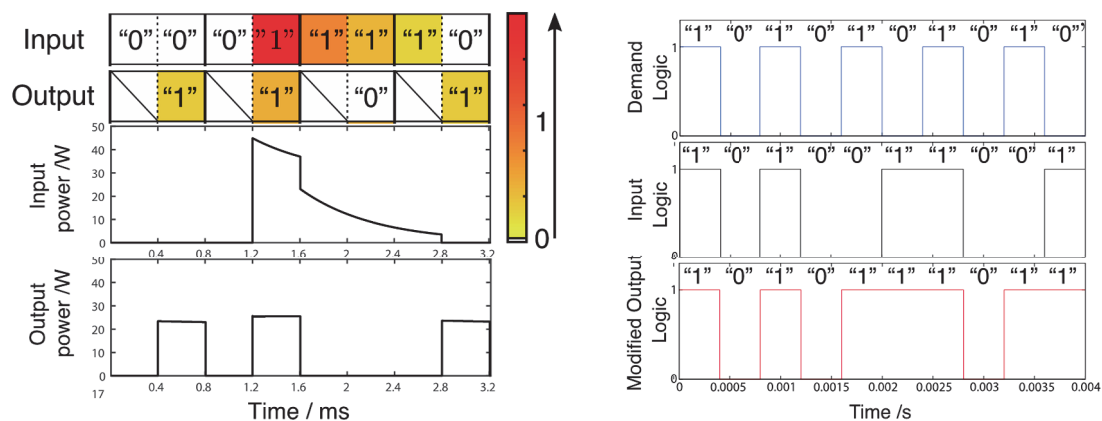


図 6：電力の論理演算（左）と誤り訂正（右）

いた制御を行い、受信側でビットを動的に変更することで電力の整合を満たすことに成功しました。

おわりに

本稿では、電力のパケット化という概念とその応用例について説明しました。電力システムをインターネットのように柔軟に取り扱うというアイデアは、提案当初は突飛で非常識なものと受け取られることもありましたが、今では世界中のグループによって追従され、また類似のアプローチが多数報告されるようになっていきます。モノのインターネット（Internet of Things: IoT）やサイバーフィジカルシステムの重要性が叫ばれる世の中において、これは技術の必然の流れと言えます。

電力をパケット化するというアイデアを実際の物理として実現するためには、半導体エレクトロニクス、情報処理・通信、電気電子回路とシステム制御、など幅広い分野の基礎技術が欠かせません。本研究室では、電力のパケット化をはじめとして、このような境界領域にある対象に対して物理や数学の基礎理論に根ざしたアプローチをとることで、全く新しい工学システム機能の創出に挑んでいます。興味を持たれた方は、研究室のホームページなどからその他の研究についてもぜひ調べてみてください。

電気電子工学とは？ その面白さと守備範囲

電気工学専攻 電磁回路工学分野
和田 修 己

1. はじめに

時々、オープンキャンパスや公開講座やいろいろなアンケートなどで、「電気電子工学科って、どんな学科ですか？」と聞かれることがあります。あるいは、「情報学科や物理工学科とどう違うのですか？」、「卒業した人はどんな職業につけるのですか？」などと聞かれます。実は、あまり知られていないかもしれませんが、電気電子工学は工学の中でも情報系、物理系、システム・機械系だけではなく、化学系とも非常に関連が深いですし、理学部や医学部にも関連の深い分野がたくさんあります。電気電子工学の範囲は図1のように非常に広く、具体的なイメージが湧きにくいのかもしれません。

電気電子工学科には、ロボットや自動車やスマホやコンピュータなどのハードウェアに関する分野や、インターネットやプログラミング、画像処理などのソフトウェアを扱う分野、そして携帯電話や光通信などの情報通信のネットワーク（情報通信インフラ）などに関する分野など、様々な分野があります。私の研究室は、その中で回路と電磁波と電気電子システム全般を扱っています。そこで、このページでは、私の身の回りの分野を中心に、電気電子ってどんな分野なのか、何を勉強し、将来は何につながっているのか、少し解説してみたいと思います。

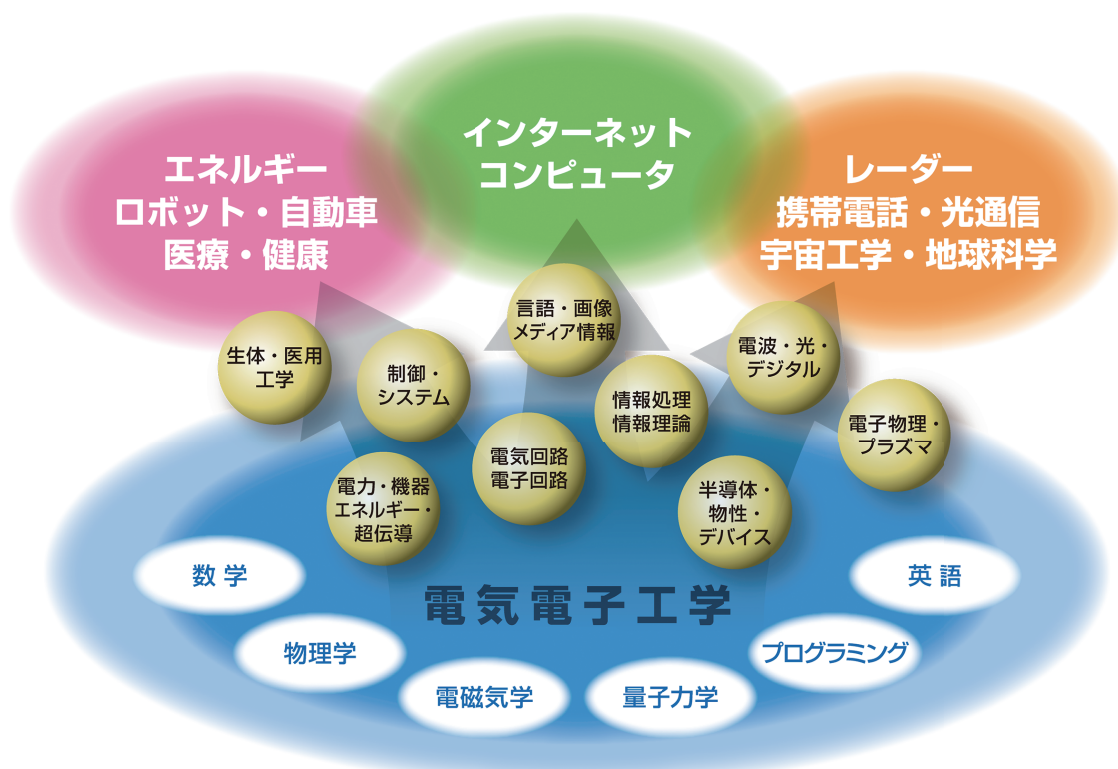


図1：電気電子工学の守備範囲

2. ものづくりと電気電子工学

筆者はもともと電子工学専攻の出身で、学生時代は高周波とアンテナと電磁波を主に扱っていましたが、大学院修士課程を修了する際には、大学に残るか、企業に就職してハードウェアの設計エンジニアになるか、迷っていました。そのころはちょうどオーディオ機器がレコードやアナログのカセットテープからCDなどのデジタルオーディオに移行するところで、企業に見学に行ったときに「私が設計したCDプレーヤーで、いい音が出ます。時々スピーカーが飛ぶんですけどね。」などと言われて、感動した覚えがあります。その後、結局、自分がやりたい研究を自由に続けたくて大学に残り、電磁波と光とレーザを使った計測システムと電気回路・電子回路、電気電子機器のシステムとしての性能確保と通信の信頼性などの研究を行ってきました。つまりずっと、ハードウェアに関連した仕事を続けてきたことになります。

私が学生のころには、まだ今のような携帯電話もスマホもありませんし、ロボットが自立して動き回るのも夢のような時代でした。映画『バック・トゥ・ザ・フューチャー (Back to the Future)』1985年よりもまだ前のことですが、1989年に公開された『バック・トゥ・ザ・フューチャー 2』では大画面の薄型テレビや音声で指示を認識するコンピュータ、タブレット型のコンピュータが登場しており（時代設定は2015年だそうです）、見事に未来を予想しているのには驚かされます。今は、図2のようなスマートフォンや自立ロボットは普通の技術ですね。

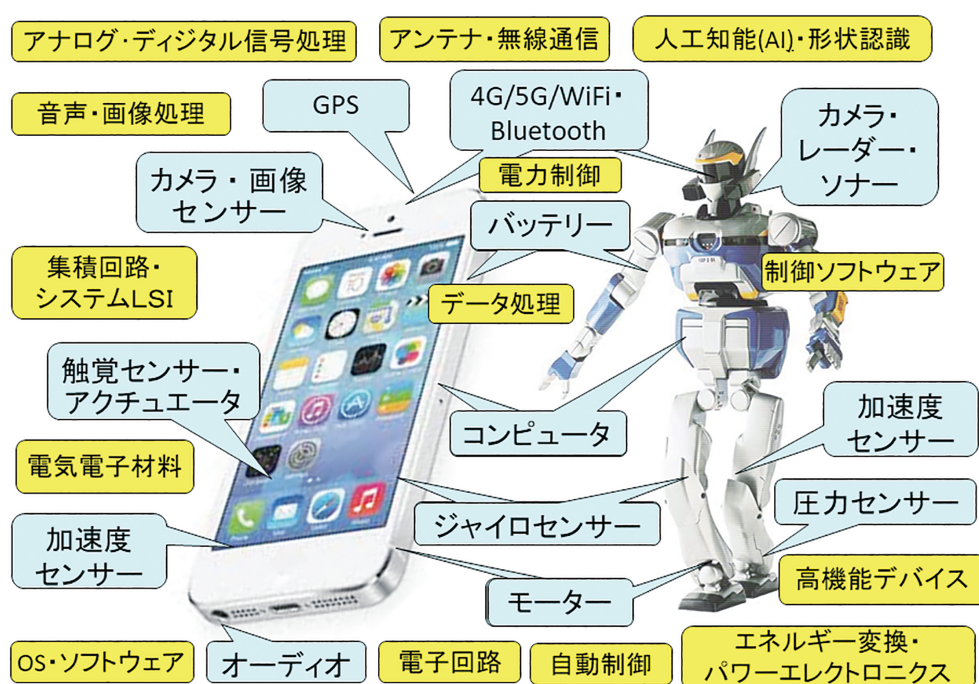


図2：ものづくり（ハードウェアの開発・設計）と電気電子工学

このスマートフォンやロボットに使われている技術を、誰が開発しているかというと、ほとんどすべて電気電子工学が関係するエンジニアや研究者の仕事です。スマホやロボットの本体の信号処理回路や制御回路は、もちろん電子回路ですが、その開発にはアナログ・デジタルの信号処理の理論や自動制御理論が使われています。オーディオや画像センサ・指紋センサ・圧力センサ・加速度センサなどは、それぞれの高機能の電子デバイスや電気電子材料技術が使用され、カメラに使われる超小型のモーター

や光学系やイメージセンサや高性能バッテリーも電気電子の技術です。外部との通信に使う 4G/5G/WiFi や Bluetooth は、いろいろな周波数の電波に各種の変調方式を使った無線通信技術が使用されています。これらのセンサやデバイスや通信技術は、1990 年ごろにはまだ存在しないか、有っても随分大型で性能も悪いものでした。これが過去 30 年ほどで、だれでも使用できる便利な普通の技術になった。これを支えてきたのが電気電子工学です。

今、高校生の皆さんが 40 代になる 30 年後に、どんなデバイス（ハードウェア、ソフトウェア）が使われるようになっていくのか、まったく予想がつきません。でも、それを作っていくのは、皆さんの世代の仕事です。私は今、ちょうど開発の進んでいる自動車の自動運転システムに使われる車載高速ネットワークの信頼性を確保するためのハードウェア設計（集積回路と通信モジュールと信号伝送系）とその信頼性確保技術の研究をしています。私はハードウェアと電波の専門家ですが、この仕事にはソフトウェア研究者や通信方式の研究者（通信システムの世界では「上位レイヤー」と呼ばれる分野の研究者）との連携が必要です。実は、図 1 に示すように、この分野も電気電子工学科に含まれています。さらには、バッテリー（電池）やセンサなどでは材料技術が非常に重要ですが、これも電気電子の分野です。設計やデータ処理に使用する AI や機械学習も、電気電子の分野の 1 つです。

このとおり、電気電子の分野は限りなく広く、全てを書ききることはできません。同時に、「全てを理解しているエンジニア・研究者」というのも、存在しません。小学校時代に習った「乾電池と豆電球」や「電磁石・モーター」から始まり、簡単なプログラミングのようなみんなが勉強する内容の上に、順番に知識を積み上げていった結果、それぞれの専門技術者・研究者がそれぞれの最先端技術を開発して、これを組み合わせる技術者もいて、結果として今皆さんが使用している便利なデバイスや情報通信システムが成り立っているのです。

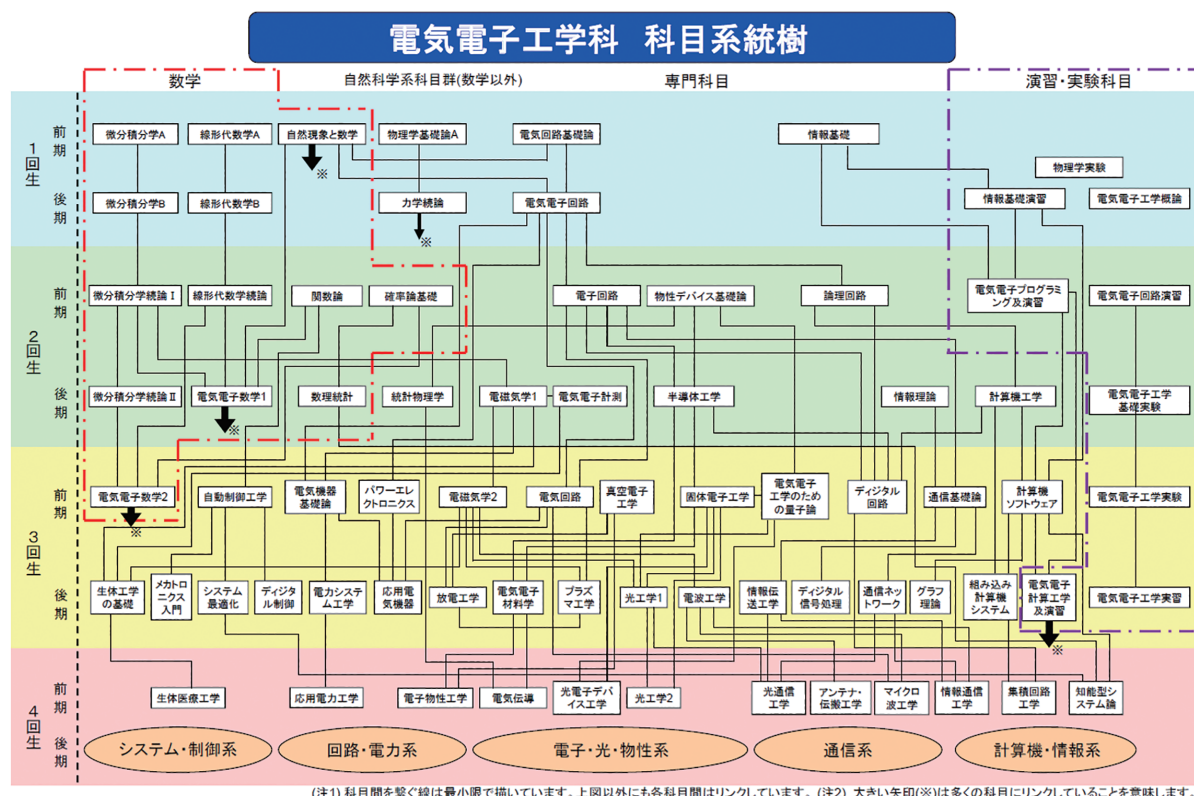


図 3：電気電子工学のカリキュラムと科目構成とその相互関係

このように、電気電子工学の分野は広いので、極端なことを言うと、それぞれの人が何でも好きなことを選んでできる、というのが特徴になっています。学科や分野によっては、大学に入学した時や2年生になるときに、それぞれの分野やコースを選ぶことになりますが、電気電子工学科には「コース分け」は存在しません。図3の科目系統樹に示すように、大学1回生から毎年積み上げてゆく専門科目の中で、自分が興味のあるやりたい分野を見つけて、実際に卒業研究を行う4回生の時に配属される研究室がどの研究室かによって、専門分野が決まることになります。大学に入学した時点で、どの分野の専門家になりたいか決まっている人はほとんどいません。通常は、3回生の前期あたりで、おおよそ自分が進みたい方向が決まる、ということが多いかと思います。

私の研究室は、電気工学専攻の中で回路と電磁波と電気電子システム全般を扱っていますが、私はもともと電子工学専攻の出身で、学生時代は高周波と電磁波を主に扱っていました。その後、光とレーザを使った計測システムと電気回路・電子回路および電気電子機器のシステムとしての性能確保と通信の信頼性などの研究を行ってきました。これまで30年以上仕事をしてきて、今私が思うのは、「1つの分野だけに絞るのは良くない」ということです。私は高周波の電気電子回路と電磁波・光とレーザを扱ってきて、このそれぞれの分野の知識や技術が様々に関連し組み合わさって新しいものを生み出し、生み出されるのを見てきました。さらに、自分の専門ではないソフトウェアや材料の研究者とアイデアを出し合うことで、さらに上の結果を出せることもたくさん経験しました。

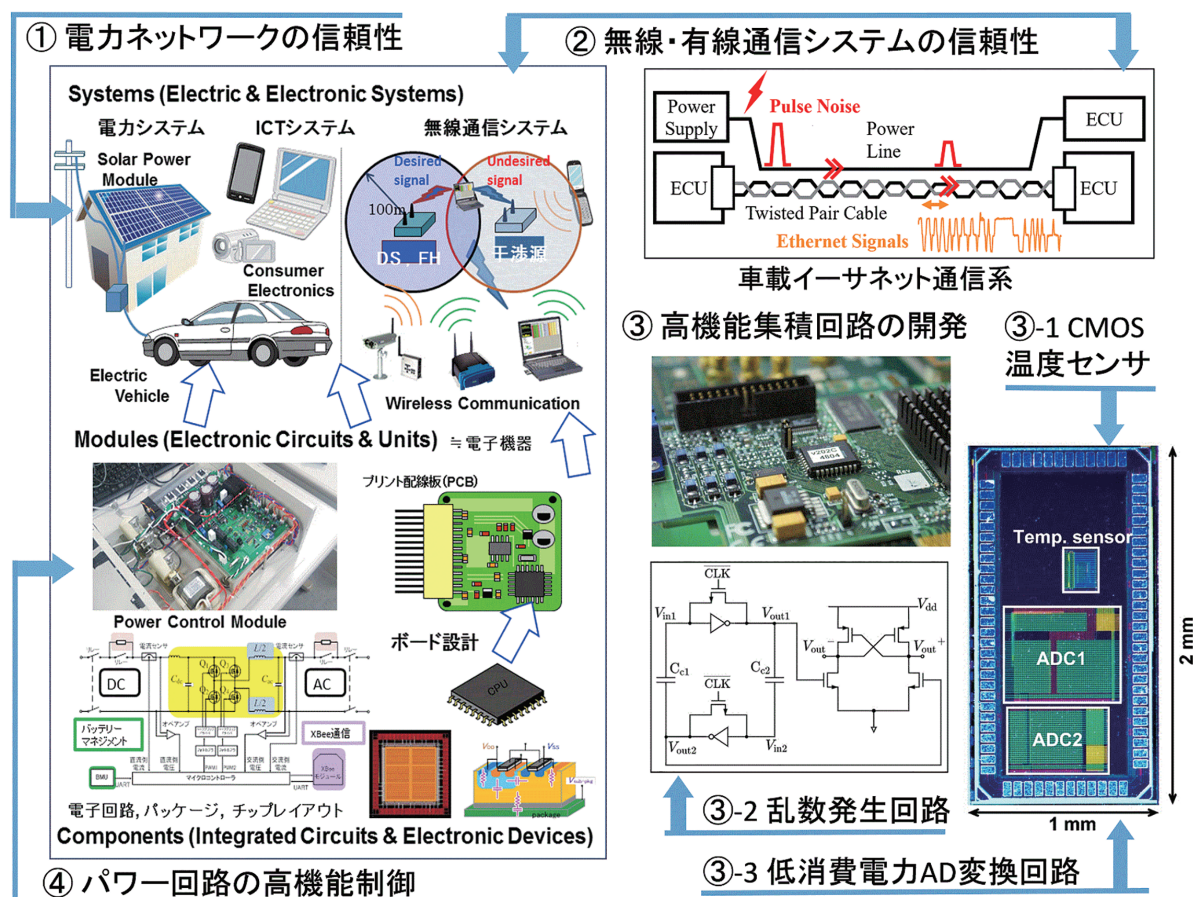


図4：電磁回路工学分野の全体像と守備範囲・研究テーマ

3. 電磁回路工学研究室での研究テーマ

今、私の研究室で扱っている分野は、図4に示すようなものです。その範囲は、①電力ネットワークの信頼性評価技術から、②無線・有線通信システムの信頼性の研究（車載ネットワークの通信信頼性など）、③高機能集積回路（Integrated Circuit）の開発、④エネルギー伝送とパワー回路の高機能制御、さらにはこれを支える回路理論と電磁理論、デバイスモデルと計測技術などの研究が含まれます。この内容を、「高周波回路と電磁波（私）」「パワー回路と電磁理論（准教授）」「集積回路とデバイス（講師）」を専門とする3人の教員が、協力して研究を進めています。一見すると、あまりにも範囲が広すぎて関係が無い分野に見えるかもしれませんが、しかしこれらはそれぞれに関連していて、全体を通じて実現しようとしていることは「電気電子システム（ハードウェア）の高機能・高性能・高信頼性を確保する技術」を開発する、ということです。これを我々の研究室では、「3つのEのハードウェアシステム完全性：E³SI（Electric, Electronic and Electromagnetic System Integrity）」と呼んでいます。3つのEは、「電気回路（理論）」「電子回路（理論）」「電磁気（理論）」であり、これを基盤とした回路やデバイスや大規模システム（電力システムや通信システム）の高性能の確保や信頼性の実現を行うための技術であり、「イー・キューブ・エス・アイ」と呼ぶことにしています。

現在使用され開発されている電気電子システムは、アナログ・デジタル機器だけでなく自動車や電力ネットワークも含み、今や高機能化した電気・電子モジュールを統合した相互結合系になっています。これらの機能を確保するためには、従来の「回路素子」によって記述する電気回路・電子回路だけではなく、素子だけでは単純に記述できない電磁的結合も含み、電子デバイスや新材料（メタマテリアル）の特性も記述することができる新しいモデルや理論が必要とされています。また、再生可能エネルギーによる分散電源やEV充電スタンドなど、従来とは異なる電源・負荷やエネルギーの流れが増加する中で、パワーフロー（電力の流れ）そのものを制御する手法の開発も必要です。そこで、研究のねらいを「従来の電気電子回路理論の限界を打破する」ことに据えて、電磁現象を扱う新たな理論の開拓や、デバイスの本質を扱う電子回路・集積回路の研究・開発を行っています。

具体的な研究のテーマはたくさんありますが、現在は、図にあるような、アナログ・デジタル協調による新しい回路方式の研究として、オンチップ電源回路、低消費電力・高速アナログ・デジタル（A/D）変換回路、温度センサ回路、真の乱数生成回路、パワーデバイスの診断システムの開発や、直流・交流（AC-DC）および直流・直流（DC-DC）変換モジュールによる高度なエネルギー変換・伝送、ネットワークの非干渉化・協調診断、車載イーサネット通信系の信頼性確保技術などに取り組んでいます。

4. おわりに

今回は、電気電子工学の分野の広さと面白さを説明したいとの思いから、筆者の研究室の専門分野である電気電子電磁回路とシステムのハードウェアから見た電気電子工学について、大まかなイメージについて説明してみました。個々のテーマの具体的内容や面白さを伝えることはできませんでしたが、何となくその広さや将来の可能性を感じてもらえればうれしいなと思います。電気電子工学科には、他にも、今回は触れることのできなかった生体機能と人体計測に関わる分野（脳機能の計測や心臓拍動制御、呼吸や心電図の遠隔多点計測や人体イメージングなど）や、宇宙電波科学とワイヤレス電力伝送の研究、量子コンピュータや光量子センシング、量子スピントロニクスと量子スピンデバイス、光・電子・半導体デバイス、等々、書ききれないテーマを研究する分野があります。入り口も広く、出口も広い、様々な方向に延びる可能性のある分野として、電気電子工学は面白いなと思っていただければ、うれしいです。是非、このような分野の一部でも、見に来ていただければと思います。