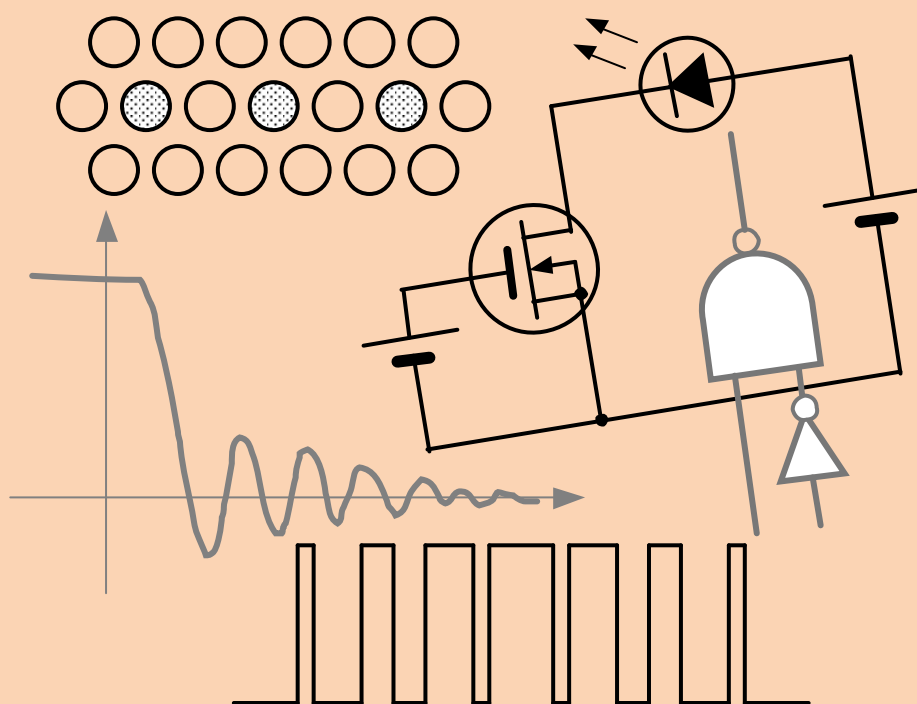

京都大学オープンキャンパス2025

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

高機能材料工学講座ナノプロセス工学分野
高機能材料工学講座先進電子材料分野
先端スマートセンシング講座

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【薄研】	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
生体機能工学分野【吉井研】	8
超伝導工学分野【雨宮研】	9
電磁回路工学分野	10
電磁エネルギー工学分野【松尾研】	11
宇宙電波工学分野【小嶋研】	12
マイクロ波エネルギー伝送分野【篠原研】	13
電波科学シミュレーション分野【海老原研】	14

電子工学専攻

集積機能工学講座【米澤研】	15
極微電子工学分野【白石研】	16
応用量子物性分野【竹内研】	17
半導体物性工学分野【木本研】	18
電子材料物性工学分野	19
光材料物性工学分野【船戸研】	20
光量子電子工学分野【浅野研】	21
量子電磁工学分野	22
ナノプロセス工学分野	23

情報学研究科

知能情報学コース

言語メディア分野	24
画像メディア分野【西野研】	25

通信情報システムコース

デジタル通信分野【原田研】	26
知的通信網分野【大木研】	27
情報回路アーキテクチャ分野【佐藤研】	28
低電力集積回路デザイン分野【新津研】	29
集積コンピューティング分野【橋本研】	30
リモートセンシング工学分野【山本研】	31
地球大気計測分野【橋口研】	32

システム科学コース

論理生命学分野【石井研】	33
バイオサイバネティクス分野【野村研】	34

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】	35
-----------------	----

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学分野	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	38

工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座

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、現実の電氣的特性、磁氣的特性、機械的・構造的特性では、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**数理工学**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. **応用数学・データ科学・情報科学**： 非線形数理学とデータ科学の融合であるクーブマン作用素（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形式手法と融合したシステム制御、複雑な振る舞いを示す時系列データを分析するためのアルゴリズム
2. **エネルギーシステム・モビリティ**： 再生可能エネルギー導入をさらに加速化するための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設計技術と航空機電動化への応用、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、電気と水素のルーティングによるエネルギー管理技術、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**： 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

<https://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

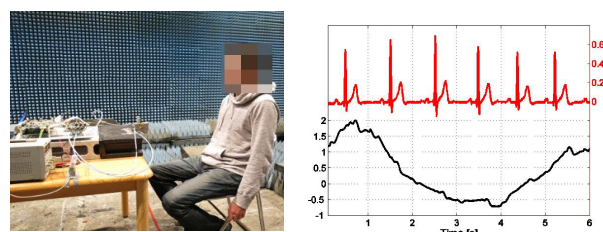


図1 電波による非接触心拍計測(左)と測定信号(右)

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)。

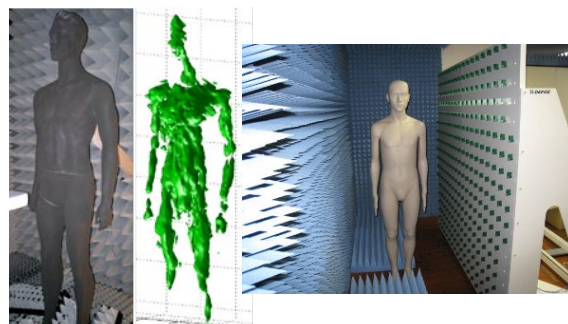


図2 人体模型(左), 電波イメージング立体画像(中央), アレーレーダシステム(右)

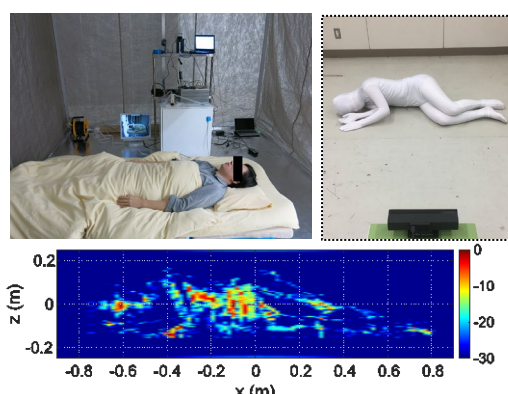


図3 電波による睡眠モニタリングと電波散乱解析



図4 電波によるジェスチャー識別実験と信号軌跡

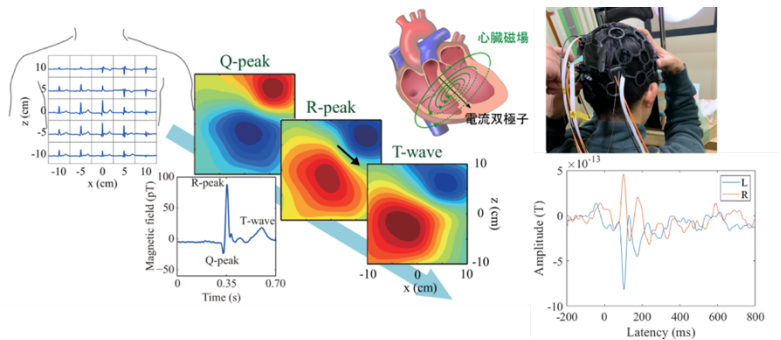
工学研究科 電気工学専攻 生体機能工学分野

吉井 和佳 伊藤 陽介 上田 博之

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。抹消系（感覚器官）から中枢系（脳）に至るヒトの情報処理を計算機上で実現するため、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。さらに、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。

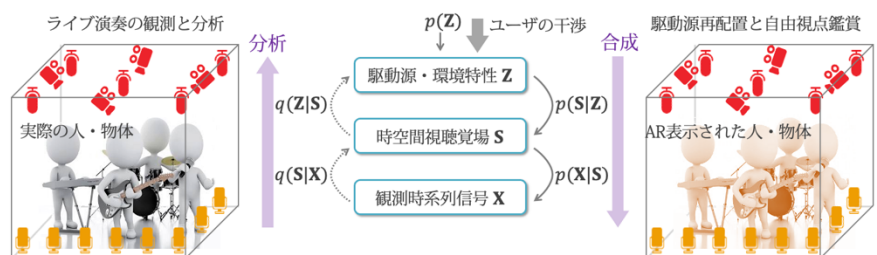
非侵襲生体磁気計測 ―スーパーセンサーをつくる―

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、スピノ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を可能にし、記録に過ぎないはずの過去の人・物体との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・カメラレイから得られる多チャン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。ここで、観測信号・視聴覚場・駆動源は無矛盾である要請から、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 ―パワードスーツをつくる―

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、ユーザー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。

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

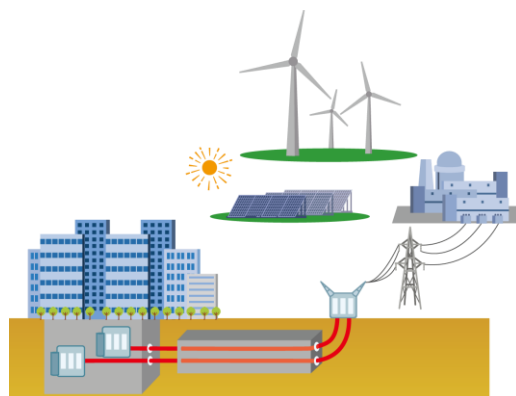


図 2 超伝導電気機器：様々な電気機器を超伝導化して省エネかつコンパクト化

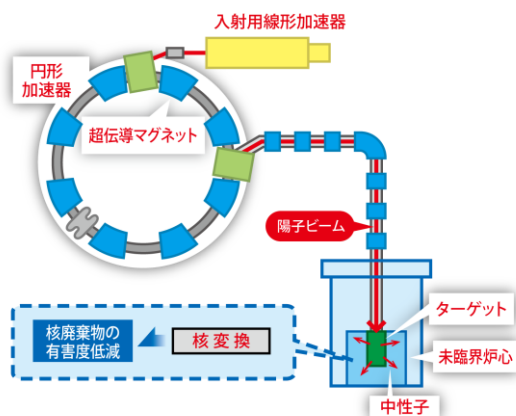


図 3 超伝導電磁石を用いた加速器駆動核変換システム(ADS)：核廃棄物の有害度を低減するシステム

1. 電気電子電磁回路とは？

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ために回路が用いられます。無線も含む素子のネットワークは一般に電気回路と呼ばれますが、特に半導体など電子の振舞が主役になると電子回路、電磁波としての性質が重要になる場合は電磁回路と呼ばれます。当研究室ではこれらを統合したシステムとして、電気電子電磁回路の解析や設計の研究を進めています。

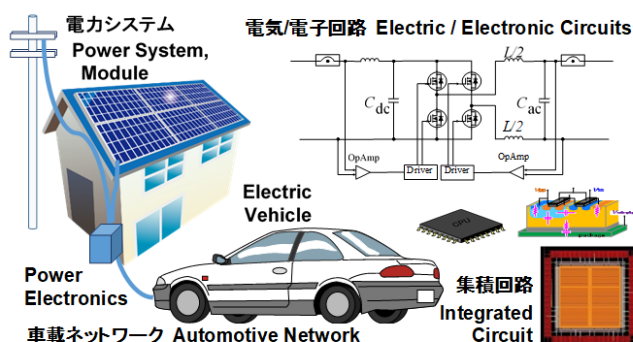


図1 デバイスからシステムまでの統合回路

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。

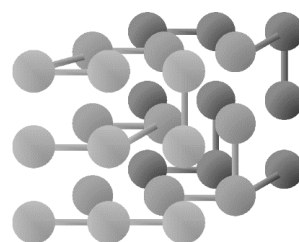


図2 メタマテリアル

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 電気工学専攻 電磁エネルギー工学研究室

教授：松尾 哲司，准教授：美船 健

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

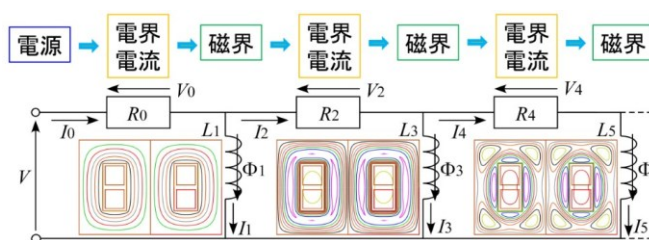


図1 電磁界の等価回路表現

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. モータの形状最適化

電気自動車やロボットに用いられる永久磁石モータには，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の一つに回転子部分の磁束障壁（フラックスバリア）の設計問題があります。回転子部分是非線形で複雑な磁気回路を作るため，複数の要求を満たす設計を行うには熟練の知識が必要です。本研究室では，遺伝的アルゴリズムや分散並列計算など計算科学の手法を駆使してモータの形状設計問題を自動的に解く手法を開発しています。図2（右）に最適化の例を示します。基本形状に比べ高いトルクを発生でき強度も高い形状の磁束障壁（赤色）が永久磁石（水色）の周囲に生成されていることが分かります。

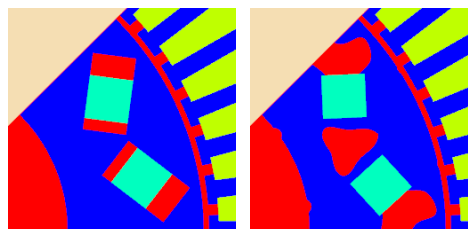


図2 基本形状（左）と最適化形状（右）

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。

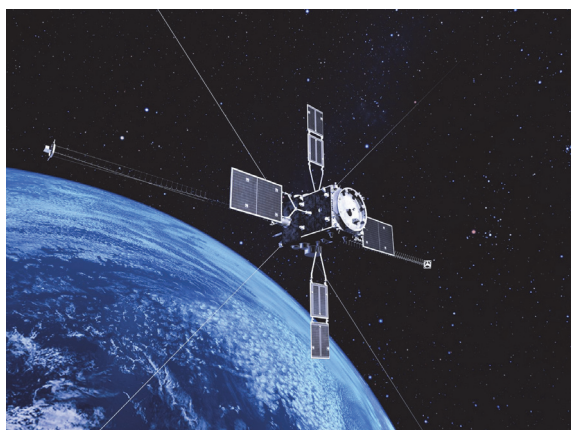


図: 地球放射線帯を探査する Arase 衛星. 当研究室では宇宙空間で発生する電波現象を観測する装置を開発 [イラスト: Arase プロジェクト提供].

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

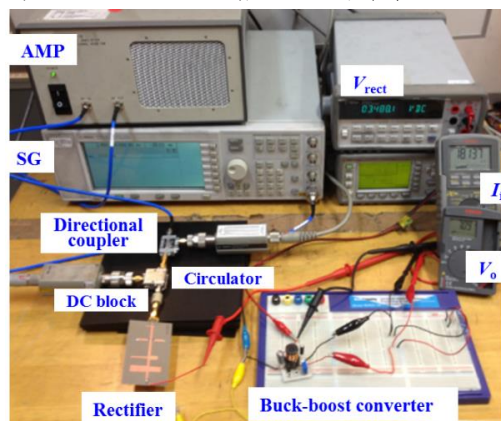


図 2 測定中のマイクロ波受電整流回路

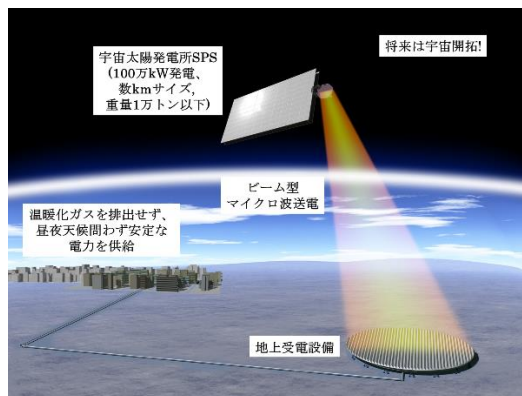


図 3 宇宙太陽発電所 SPS のイメージ(2050 年頃?)

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

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。

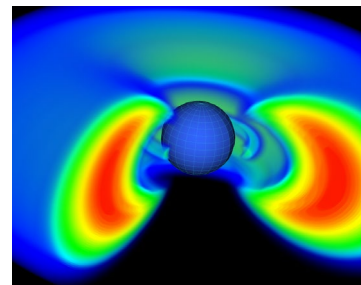


図 2: 地球放射線帯の模式図。

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。

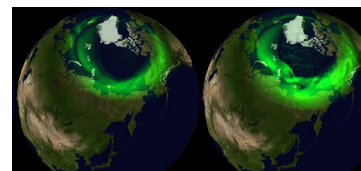


図 3: オーロラに伴って流れる電流の強さ。左は現在の地球、右は約 600 年後の地球。

工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学研究室

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。

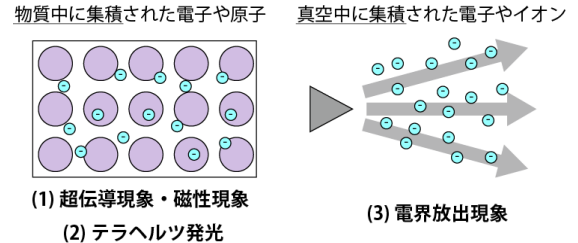


図 1: 集積機能工学研究室の研究内容。

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。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。皆さんも一緒に、歴史が動く瞬間を経験しましょう。

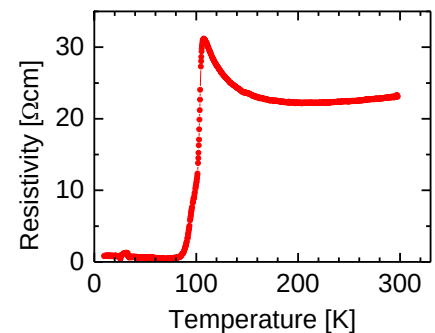
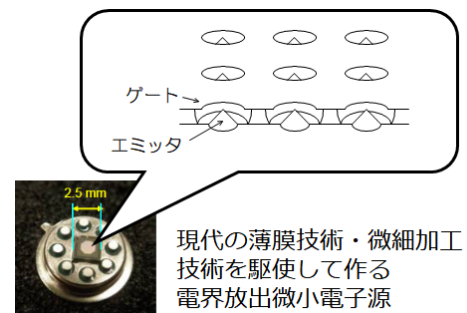


図 2: ビスマス系高温超伝導体の電気抵抗の温度依存性。100 ケルビン前後で超伝導転移が起きている。c 軸方向に 1 層だけ取り出して測定している。

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。



現代の薄膜技術・微細加工技術を駆使して作る電界放出微小電子源

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

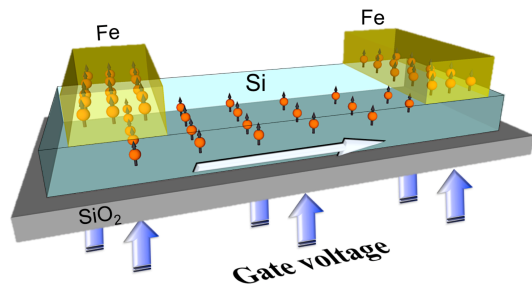
1. 研究室の方向性

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。

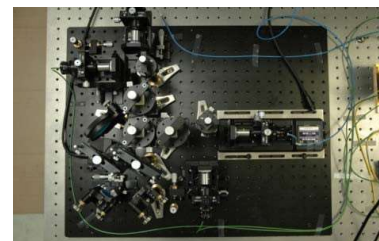


図 1. 量子もつれ光生成装置

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。

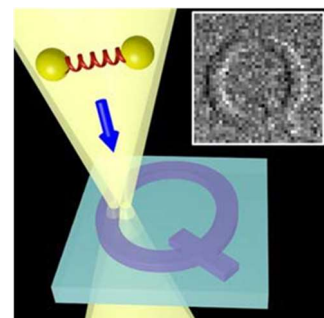


図 2. 量子もつれ顕微鏡

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。

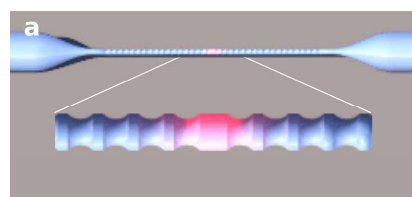


図 3. 光子を操る、微小光素子

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

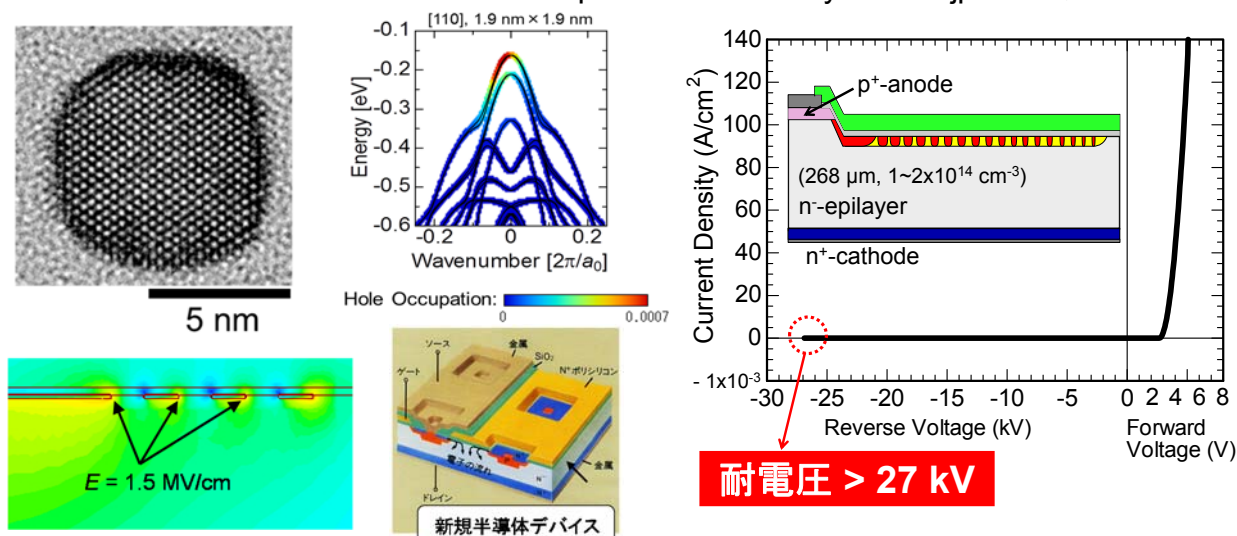
皆さんは「半導体」という言葉を聞いたことがあるでしょうか？ 導体と絶縁体の中間？ 半導体は、パソコン、スマホ、太陽電池はもちろんのこと、エアコン、炊飯器、ゲーム機、電車、銀行 ATM など、あらゆる電気電子機器に必ず使われ、その中核的役割を果たしています。2014 年にノーベル物理学賞の対象となった青色／白色発光ダイオードも半導体です。我が国が強みを発揮している自動車も高度に電子化され、その性能は半導体で決まると言っても過言ではありません。このように半導体は、現在の高度エレクトロニクス社会を支えるハードウェアと言えます。

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。

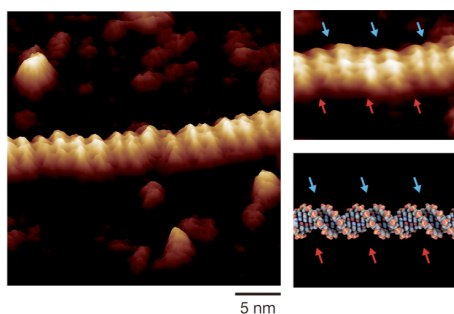


図1: 原子間力顕微鏡により捉えられたDNAの二重らせん構造。右上図: 二重らせんの2種類の溝（主溝と副溝）の拡大像。右下図: 構造モデル図。

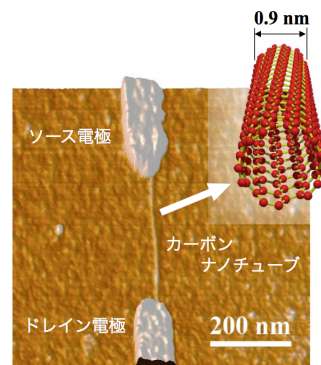


図2: 2つの金属電極（300 nm 間隔）をつなぐカーボンナノチューブ分子。右上: そのモデル図。

工学研究科 電子工学専攻 光材料物性工学分野

船戸 充, 正直 花奈子, 石井 良太, 松田 祥伸

1. 「光る半導体」でつくる未来

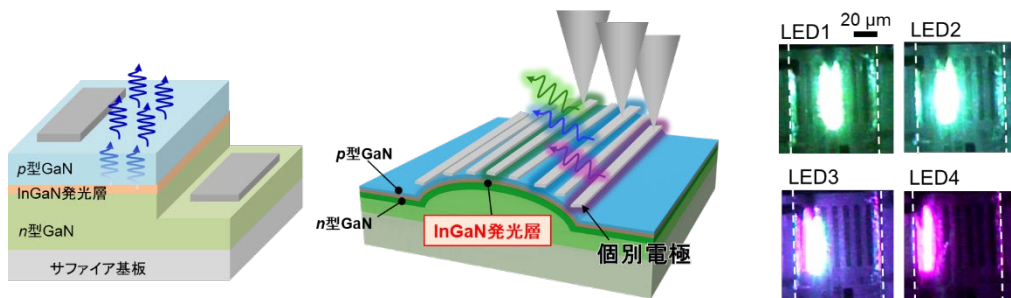
半導体と聞くと、スマートフォンやコンピュータに使われる材料を思い浮かべる人が多いかもしれませんが、半導体にはさまざまな種類があり、光を出す特性に優れたもの（直接遷移型と呼ばれるバンド構造をもつもの）もあります。この「光半導体」は、発光ダイオード(LED)やレーザーダイオード(LD)としてすでに実用化されており、照明や情報通信など、私たちの身の回りの様々な場面で活躍しています。しかしその一方で、光半導体の応用範囲はまだまだ広がる可能性があり、これからも私たちの生活や産業を大きく変えることができます。例えば、ウィルス対策や水の殺菌、工業用途において、紫外光を出力する高効率なLEDやLDの実現が期待されています。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 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。



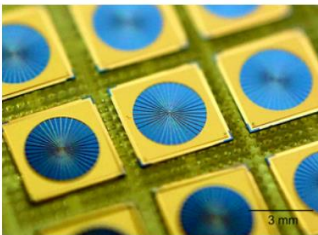
（左）従来の単色発光LED。（中央）微細な三次元構造を持つLEDと（右）実際に作ったLEDを光らせたときの顕微鏡写真。一つのストライプの中で場所によって光る色が変化する。

来るべき超スマート社会・カーボンニュートラルの実現には、“光・量子”の自由自在な活用が鍵となります。自動車やロボットの自動走行(スマートモビリティ)や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(レーザー光を使ったレーダー:LiDAR),光を用いた高効率な加工(スマート製造),光・量子を活用した高度情報通信・処理,さらには熱光エネルギーの高度利用にいたるまで,光・量子が担う役割は多岐に渡っています。本研究室では,超スマート社会・カーボンニュートラルの実現に向けて,「[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,光・量子を自由自在に操るための物理的基礎から応用まで研究を行い,学術基盤の構築と社会実装を進めています。例えば,加工装置などの劇的な小型化につながる,高出力で非常にきれいなビームを出せる超小型レーザーを実現しています。もっと詳しく知りたい方は,ホームページ(<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>)を参考にして下さい。

朝日新聞 DIGITAL

次世代のスマート製造に、京大が小型で高出力のレーザーを開発

桜井林太郎 2023年6月15日 6時30分



開発された直径3ミリのフォトニック結晶レーザー
=京大提供

京都大の野田進教授らの研究チームが、基板上に規則正しく穴を開けた「フォトニック結晶」による半導体レーザーで、従来の大型レーザーに匹敵する輝度(単位面積、単位広がりあたりの光の出力)にまで高め、連続して動かすことに成功した。

毎日新聞

「熱光発電」に熱視線 高出力で小型化可能 京大チーム理論限界突破

社会 | 環境・科学 | 速報 | 科学・テクノロジー

毎日新聞 2021/8/15 10:00 (最終更新 8/15 10:00) 1013文字



熱の力を光に変えて電力を生み出す「熱光発電」への期待が、熱を帯びている。太陽光や廃熱を有効利用でき、太陽光発電の課題である発電効率を大幅に向上できる可能性があるからだ。7月には京都大の研究チームが、加熱した光源から取り出せる光エネルギーの理論的限界を突破する装置を、世界で初めて開発したと米国化学会の学術誌に発表。まだ実用段階ではないが、「科学的に大きなブレイクスルー。脱炭素社会の実現に向けた一歩だ」としている。

日本経済新聞

2023年(令和5年)6月15日(木曜日)

金属加工レーザー 数十分の1に小型化

京大が技術、価格も安く

京都大学の野田進教授らは金属などを加工するレーザー装置を数十分の1に小型化する技術を開発した。光を緻密に制御するフォトニック結晶という素子を使い、光の明るさを高め、価格も従来の10分の1程度に安くて、自動車や機械の加工コストを引き下げられる可能性がある。研究結果は英科学誌「ナチュア」に14日掲載された。光を閉じ込めたり、増幅したりできるフォトニック結晶を使い、直径3ミリの円盤状の小型レーザー装置を試作した。

レーザーが狭い範囲に集中しやすく、光の明るさは従来の大型機並みに高まった。光を制御する多数のレンズやミラーが不要で、装置を小さくできる。今後、企業と協力して直径約1センチの装置をつくり、実用化を目指す。

従来の加工用レーザーは二酸化炭素(CO₂)を流した箱の中に電気を流してレーザーを作るタイプなどがあつた。一回辺が数十センチ以上と大きく、価格が200万円以上で、回りが熱く、高価で使用するエネルギーも多かった。

産経新聞 2020年(令和2年)8月7日(金曜日)



フォトニック結晶を搭載したセンサー(手前)について説明する野田進・京都大教授(京都市西京区の京大桂キャンパスで)

距離測定 高性能センサー

自動運転に應用
光の進路を精密に制御できる素子「フォトニック結晶」を使い、対象までの距離を測る高性能の光センサーを開発した。京都大の野田進教授らが米国光学会で発表した。自動運転車に搭載するなど、幅広い応用が期待できるといふ。

物体に当たったレーザー光が跳ね返ってくるまでの時間から、距離を計算する。こうしたセンサー技術は、車やロボットの自動走行に不可欠とされる。従来は、まず進む方向のレーザー光を出した後に、複数のレンズを組み合わせた複雑な構造が必要だった。レンズ

京大教授ら「フォトニック結晶」採用

を使わないと、例えば10センチでは光線が広がって弱まってしまふ。野田教授らは1999年、フォトニック結晶を使ったレーザーの素子にめどを付けた。今回は結晶内の微小な穴の構造を工夫し、光を狭くして高出力で照射することに成功した。レンズなどでも、30センチ直径5センチ厚さの巨大な素子が必要だったが、今回の素子は1センチ四方の微小なチップを開発した。英科学誌「ナチュア」に14日掲載された。今後、センサーのメーカー(北電機機一 大阪市)と一緒に装置を製造し、通電しての倉庫で商品運搬に使うという。

青色レーザー 高出力化

半導体に規則的にあけた極小の穴から光を出す「フォトニック結晶」で、高出力の青色レーザーを作ることが成功した。京都大のグループが発表した。電気自動車(EV)のモーターに使われる銅の加工技術などへの応用が期待される。英科学誌「ナチュア」に14日掲載された。窒化ガリウムを原料とする青

京大G「フォトニック結晶」で EVの加工 応用期待

色レーザーは、銅をはじめ金属に吸収されやすく水に吸収されにくい特徴があり、金属加工や水中での光センサーなどに適しているといわれる。フォトニック結晶では、これまで近赤外域によるレーザーの出力向上に成功していたが、青色レーザーは屈折率などの条件から、高出力化が難しかった。

工学研究科の野田進教授らはデバイス全体の構造を見直し、光を増幅させる層に光を拡散させ取り出す層の間隔などを工夫した。穴の形や大きさを均一にし、光の漏れや広がりを抑えられるようにした。その結果、従来の青色レーザーを実現できなかった。青色レーザーを金属加工に用いるにはさらに10倍を超える出力が必要で、野田教授は「まずは大きな一歩。改良を積み重ねて幅広い分野での産業応用を目指した」と話している。

(森大樹)

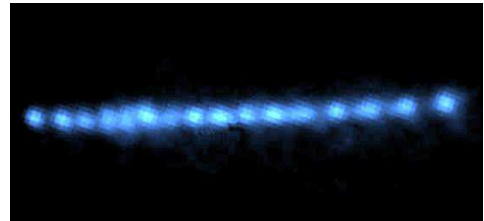
1 概略

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

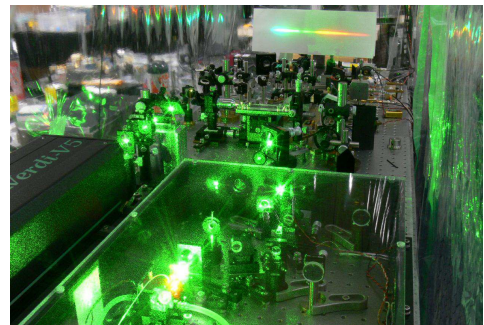
電氣的な力を利用して、イオンを真空中の狭い領域に閉じ込めます。さらにレーザー光が物質に及ぼす力を利用する、レーザー冷却という手法で、イオンを極低温まで冷却し、たった1個のイオンを真空中に浮かせて静止させます。このようなイオンは周りの影響を受けにくいので、イオンと共鳴する電磁波の周波数が正確に決まり、精度のよい周波数の標準、その逆数として時計ができます。



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。

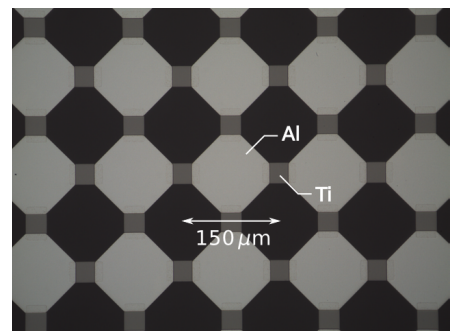
モード同期レーザーによる周波数計測

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

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。

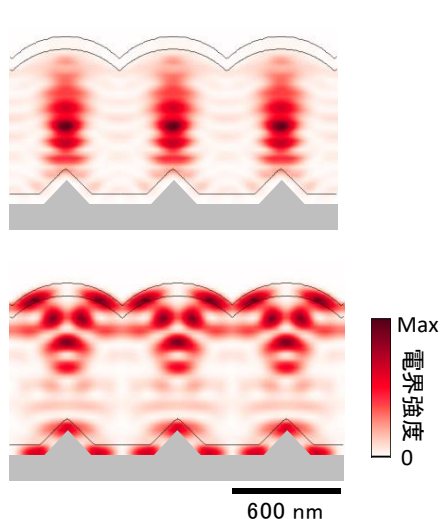


図1: 光ナノ構造の電磁界解析例
(光ナノ構造を導入した太陽電池)

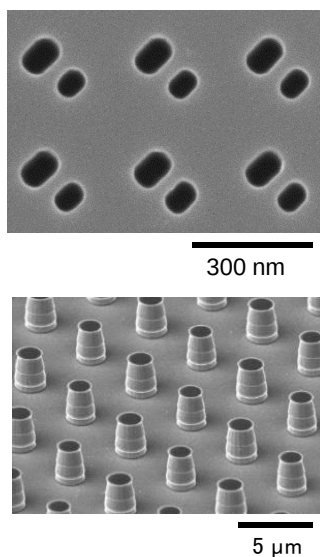


図2: 種々の光ナノ構造の
電子顕微鏡写真

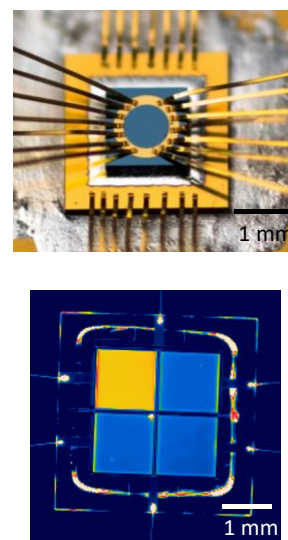


図3: 光ナノ構造を利用した
次世代光源の開発例
(上) 高出力レーザ
(下) 多波長熱輻射光源

情報学研究科 知能情報学コース 言語メディア分野

黒橋 禎夫 村脇 有吾 Chenhui Chu Fei Cheng Yin Jou Huang

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

本研究室では自然言語処理 (natural language processing; NLP) の研究を行っています。この分野は ChatGPT に代表される大規模言語モデル (LLM) の登場により応用範囲が急速に広がる一方で、未解明の謎も山積しています。本研究室は言語・コミュニケーションに関わる理論的研究と工学的応用をバランスよく進めています。以下では最近の研究事例を3つ紹介します。

大規模言語モデルの原理解明とその応用 大規模言語モデル (LLM) の高度な能力は人々を驚かせていますが、内部でどのような処理が行われているのか、人間の認知能力とどのような差異があるのか等、多くの謎が残っています。本研究室でも、国内の多くの研究グループと協力しながら LLM を手元で動かしつつ、多言語能力の解明や、被験者実験における人間被験者を LLM エージェントで置き換えられる可能性の調査など、様々な課題に取り組んでいます。

コミュニケーションの基礎研究と応用 コミュニケーションという人間の基本的能力は、LLM の登場により、研究可能な領域が急速に広がったテーマです。対話に現れる人間の認知特性を LLM がどの程度再現できるかの検証や、人間同士の対話を円滑化するモデレーションシステムの開発、多言語コミュニケーションへの応用など、幅広い視点から研究を進めています。

価値に関わる基礎研究と応用

「ある意思決定は公平か」といった、価値判断に関わる正解のない問題に LLM が直面する機会が急増しています。従来の NLP は、人間の認知能力を計算機で再現することを目標とし、人間の判断を一種の正解とみなして

きました。しかし、このアプローチは価値が絡む領域では限界があります。本研究室では、哲学の知見を取り入れつつ、恣意性を排除した方法論を確立すべく研究を進めています。

学校の新学期が始まる月は：__月、答え：

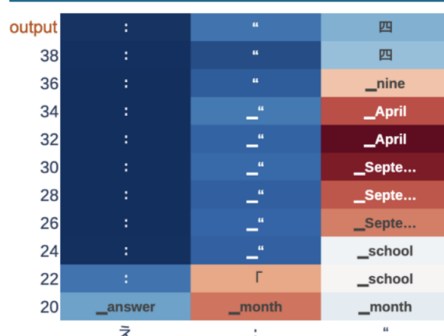


図 1: 多言語 LLM の内部計算の可視化

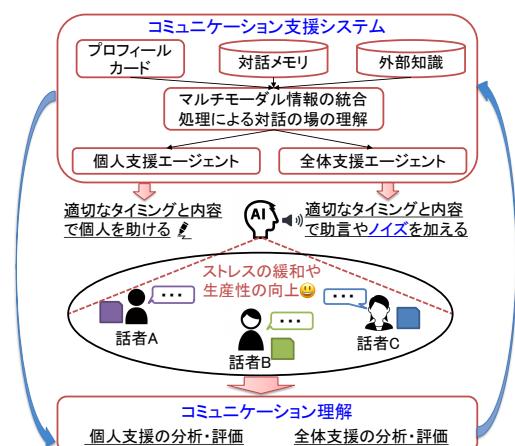


図 2: コミュニケーション支援システム

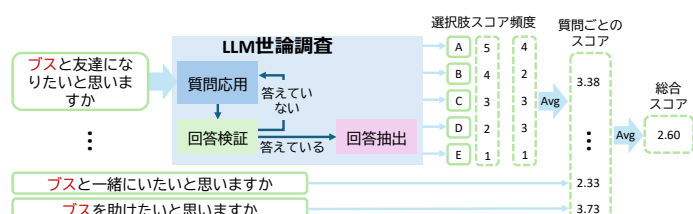


図 3: 人間の任意の属性に対する害の定量化 (差別の哲学における害説・客観的リスト説に基づく)

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>

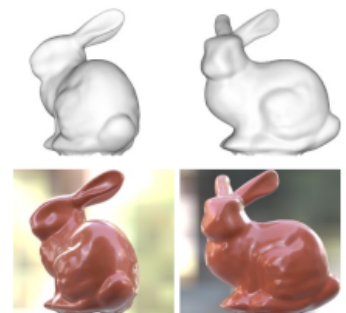
本研究室では、コンピュータビジョン、すなわちコンピュータに視覚を与えるための理論的基盤とその実装に関する研究をおこなっています。主に機械学習や光学を道具とし、単純に画像や映像を効率的に消費するための手段にとどまらない、ただ見るだけではなく、知覚として「見る」視覚知能としてのコンピュータビジョンの実現を目指しています。

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

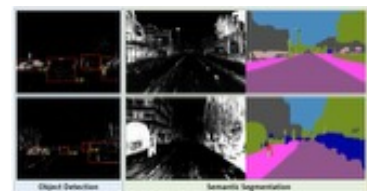
III より良く視る：人間は二つの目を用いて、可視光範囲内でこの世界を見ていますが、コンピュータはこのような撮像系に限られる必要はありません。本研究室では、より豊かな視覚情報を得るための、情報処理が一体化された新たな撮像システム（コンピューショナルフォト



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

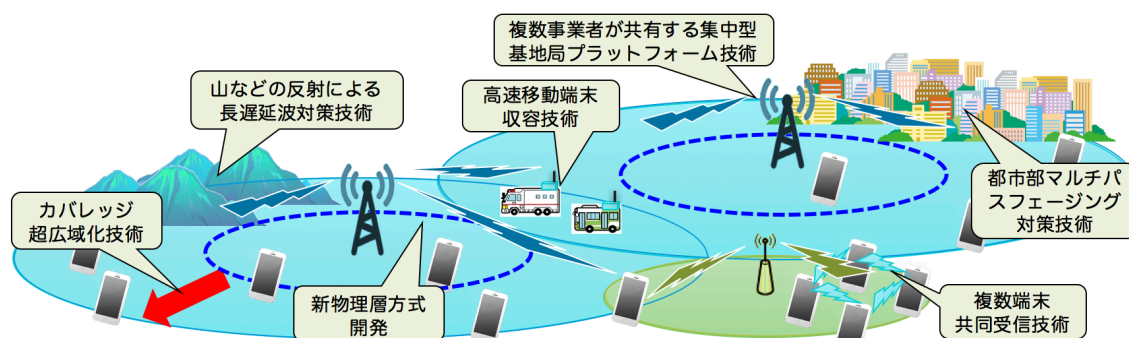
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

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

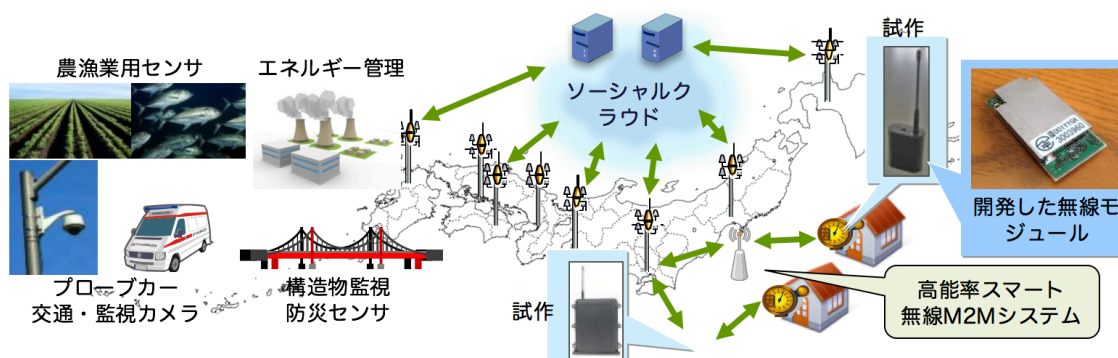
現在は誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、高速な伝送速度だけでなく、より高い信頼性や、リアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に「人と人の通信」だけでなく、ありとあらゆる物に無線機が内蔵され、様々な情報を収集するような「物と物との通信」など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信に使用出来る周波数資源には限りがあるため、このままでは爆発的に増加する無線通信への要求に応えることができません。現在、第 4 世代移動通信シ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

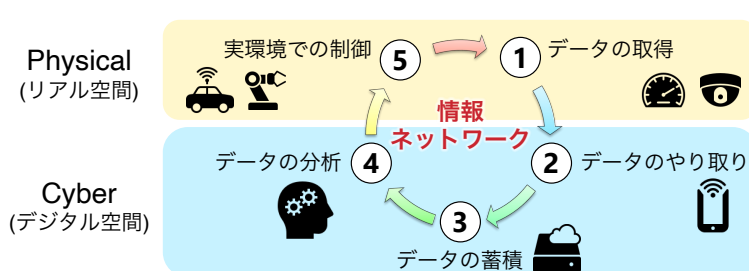


図1: データ駆動型のネットワークシステム

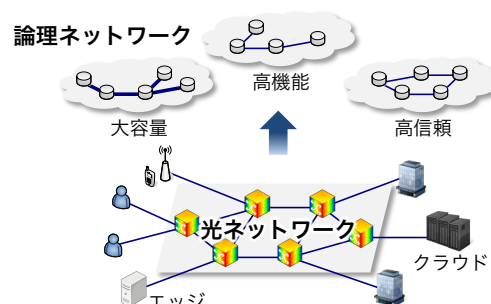


図2: 大木研究室の研究テーマ

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。

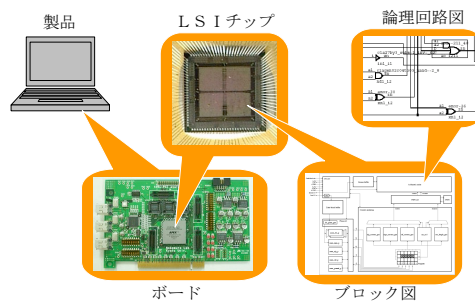


図 1: 情報機器の中身

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。

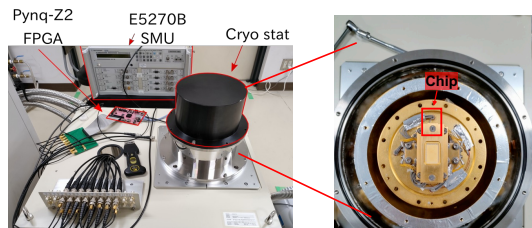


図 2: 極低温測定環境

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。

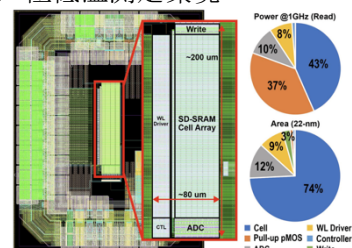


図 3: メモリ内で計算まで行う AI アクセラレータ

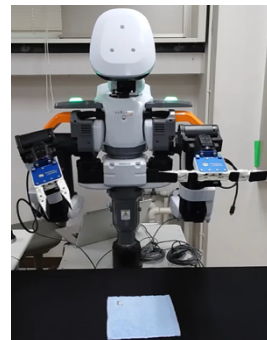


図 3: ロボット実験環境

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。

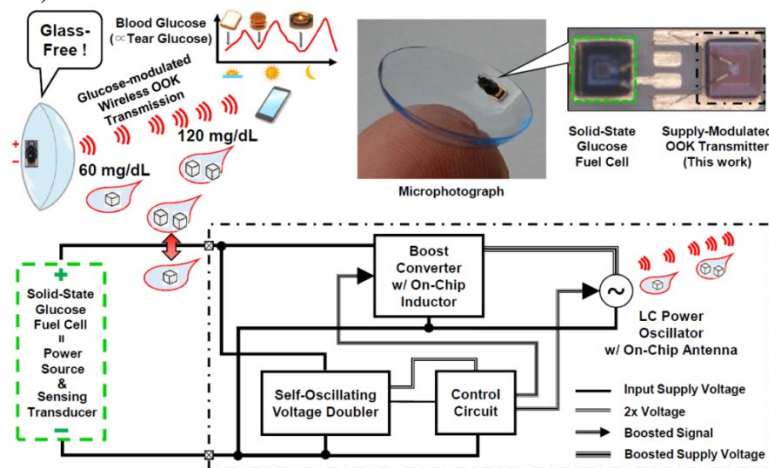
- ・環境適応自立動作 IoT 向け高エネルギー効率集積回路設計基盤技術(JST・さががけ)
- ・Beyond5G/6G に向けた 300GHz CMOS 無線トランシーバ集積回路(総務省・NICT Beyond 5G プログラム)
- ・3次元高空間分解能バイオイメージングに向けた分散型センサ集積技術(科研費・基盤 B)

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

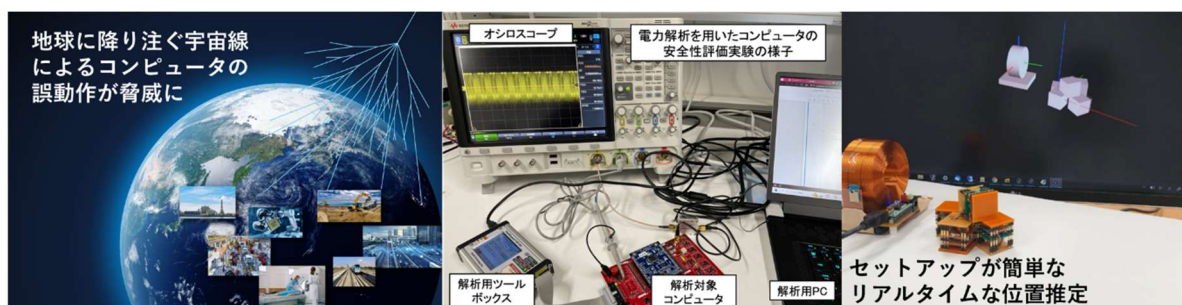
地上には宇宙線に起因する粒子が降り注ぎ、毎秒いくつもの粒子が我々の体も通り抜けています。この粒子が運悪くコンピュータのメモリ付近でシリコン原子と核反応を起こすと、ソフトエラーと呼ばれるビット反転が発生します。ソフトエラーは、システムの誤動作やクラッシュを招き、自動運転や介護ロボットでは人命の危機を招きます。本研究室では、実機評価とシミュレーションによるソフトエラーメカニズムの解明、システムのエラー耐性評価技術の開発を行っています。

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

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(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、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。

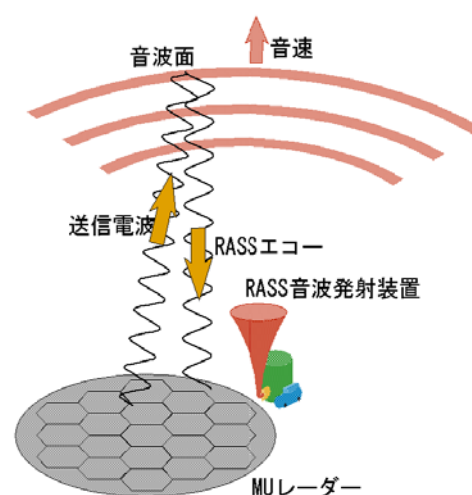
情報学研究科 通信情報システムコース 地球大気計測分野

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。

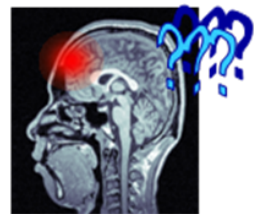
論理生命学分野

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.

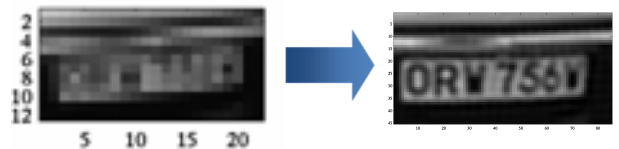


計算神経科学とニューロインフォマティクス

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.

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。

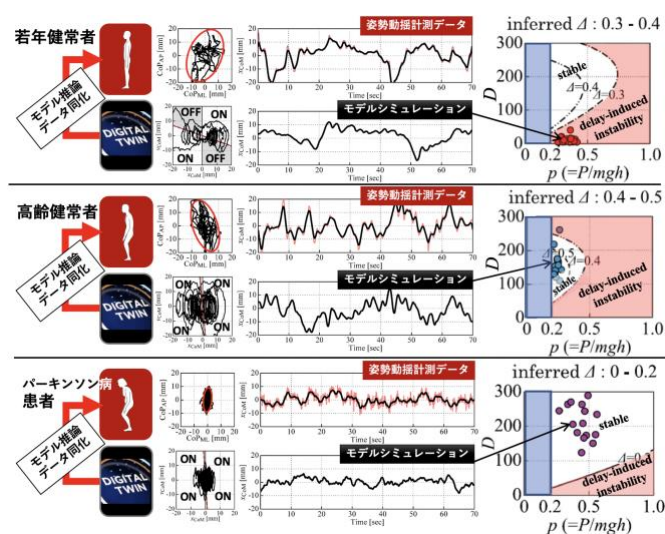


図 1. ヒト立位姿勢デジタルツインに基づく姿勢ゆらぎ解析

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



フュージョン（核融合）エネルギー ～ 宇宙のエネルギー源

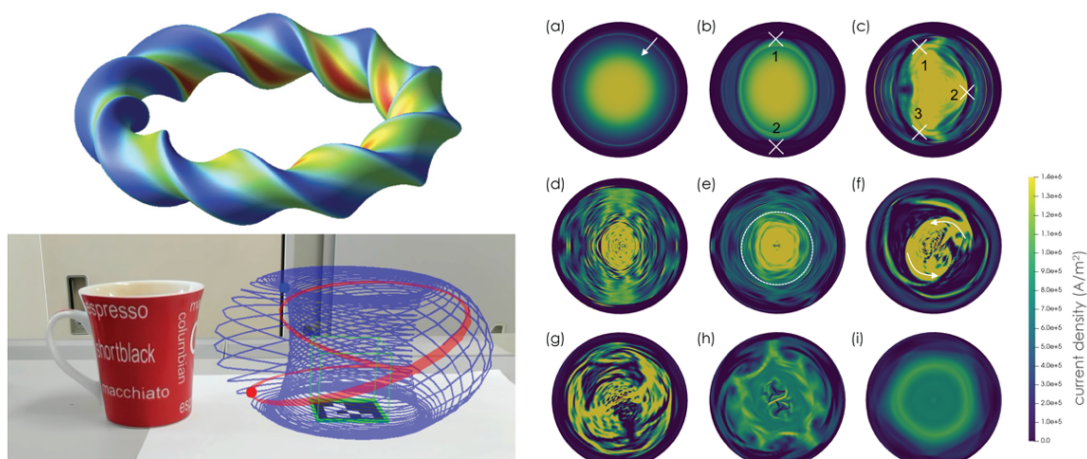
水素やヘリウムなどの軽い原子の核同士がぶつかって起こる「核融合反応」は、わたしたちの宇宙が誕生してから 3 分後、宇宙の温度が約 10 億度のときに活発だったとされています。核融合は、太陽が輝き続けるエネルギー源でもあり、人類が手にできる究極のエネルギー源の一つです。私たちの研究室では、この核融合エネルギーを利用するための手段として、1 億度を超える超高温のプラズマを磁場の力でコントロールする手法を研究しています。

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

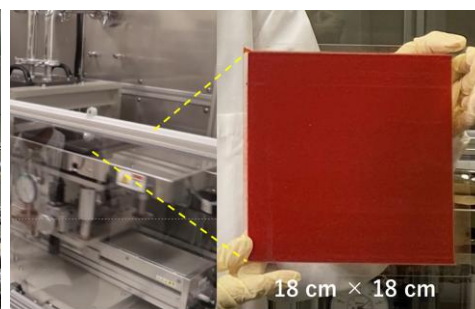


写真 3. 大面積ミスト CVD 装置と大面積成膜の例

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)。

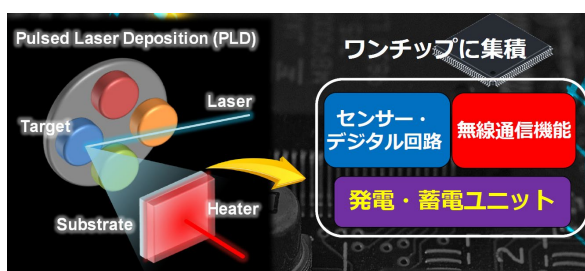


図1. 薄膜技術を用いた機能集積の概念図

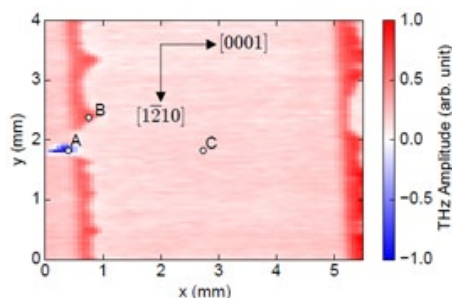


図2. テラヘルツ波による GaN 表面の分極構造の可視化



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2025 実行委員会

目 次

(本文中の所属は執筆当時のものです)

1. 人工知能技術に基づく人間（脳）の情報処理の解明（第49号）	
石井 信	1
2. プラズマの光から何がわかる？～プラズマ分光学への第一歩～（第50号）	
門 信一郎	6
3. 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	13
4. 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	18
5. 入出力システムと制御理論（第53号）	
萩原朋道	25

人工知能技術に基づく人間（脳）の情報処理の解明

情報学研究科 システム科学専攻 論理生命学分野
石 井 信

1. はじめに

現在、各種の大規模なデータベースが整備され、それらビッグデータを用いた機械学習による人工知能（AI）が開発されることで、われわれの世界は大きく変えられつつあります。そこで用いられている機械学習器は、しばしば「深層学習」器ともよばれるニューラルネットワーク（NN）です。この NN は、F. Rosenblatt により 1958 年に提案されたパーセプトロンという神経細胞のモデルを源流とします。つまり、今の AI は脳の学習素子である神経細胞の機構を模擬するところからスタートし、独自の発展を遂げたものと言えます。また、脳の計算機構の理解から発展し、実用化されてきた技術も多数あります。例えば、ノイズキャンセラーなどに用いられているブラインド信号分離は、混線した複数の信号を分離する工学技術ですが、これはカクテルパーティ効果（パーティ会場のような、複数の音声や音楽が混じった雑多な音響環境であっても、われわれは特定の相手の発話だけを聞き出せること）、すなわち、脳の信号分離能力のモデル化の研究から始まっています。このように、脳の計算機構の解明と AI 技術とは、互いに影響を与えながら相互に発展してきました。当研究室では、これらの「計算神経科学」（脳の計算機構の解明を目指す科学）および「脳型人工知能」（脳のモデルを基本とする AI 技術）の発展の歴史を踏まえ、最先端の AI 技術に基づく脳科学研究、また、最新の脳科学の知見を踏まえた次世代の AI 技術の開発、さらには、そうした AI 技術を実社会で動作するロボットなどに応用するという、融合的かつ学際的な研究を進めています。

以下では、2022 年に当研究室から発表された 2 報の論文の成果を中心に、最新の AI 技術がいかに計算神経科学、すなわち、人間の脳が担う情報処理機構の解明につながるのかについて紹介します。

2. 人工知能技術を用いた視覚注意機構の解明（文献 [1]）

われわれ人間は何かを見るとき、網膜を通して膨大な情報を受け取ります。この時、それらの情報を効率よく処理するために、重要そうなものから順に焦点をあてていく「視覚注意」という機能が働きます。この視覚注意には、トップダウン型とボトムアップ型の二種類があるとされています。ボトムアップ型注意とは、ものの色・輝度・方位などの特徴が周囲と大きく異なることによって受動的に引き起こされるもので、例えばまぶしいものや蛍光色に思わず視線を向けてしまうのはこのタイプの注意によります。一方トップダウン型注意とは、経験や課題によって能動的に起こされる注意で、例えば何かものを探すときに視線が動くのはこのトップダウン型注意によるものです。眠っていない動物ではこれらの二つの注意は神経活動上で重なっているため、それらを区別するような解析は難しいという問題があります。当研究室の藤本啓介君（博士後期課程 1 回生）、林浩次郎君（修士課程 2 回生）らは、ボトムアップ型注意を誘発する強さを表現した顕著性マップ（図 1 下段）が同じになるような画像を生成することで、この問題を解決できると考えました。この研究では、同じ顕著性マップを持つ異なる画像を複数生成する技術を開発することと、その技術により生成された画像が、トップダウン型注意のメカニズムの解析に有用かを調べることを目的としました。そのために、AI 技術として近年の注目を集めている深層学

習を用いた画像変換技術を開発し、類似した顕著性マップを持つ自然な画像（以後、「自然画像」）と自然でない画像（以後、「非自然画像」）のデータセットを生成することで、それらの画像を人に見せたときの脳活動（機能的核磁気共鳴画像法、fMRI）について実験と解析を行いました。

自然画像から顕著性マップを求める手法は既にいくつか提案されていますが、顕著性マップを逆変換して画像を作り出すような研究はまだありませんでした。この研究では、深層学習を用いることによってこの逆変換を実現し、自然画像からその自然画像と類似した顕著性マップを持つ非自然画像を作り出すことに成功しました（図1右上）。

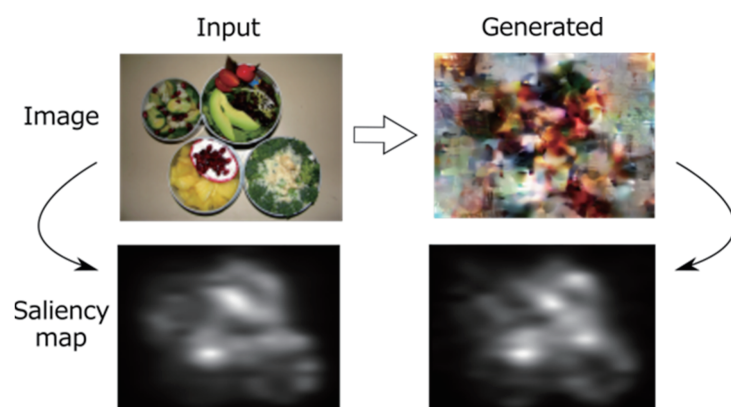


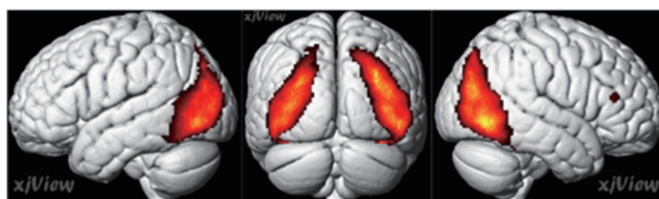
図1. 本研究で生成した画像ペアの一例
左上が自然画像で、右上が非自然画像、それぞれの下にある画像がそれぞれの顕著性マップ。顕著性マップは、白色に対応する位置に目が惹かれやすいことを示す。それぞれの顕著性マップは類似しているが、自然画像と非自然画像は全く異なる画像となっており、非自然画像では文脈情報が少ない。

自然画像を見た時は、トップダウン型とボトムアップ型の2つの注意を誘発します。それに対し、ペアの非自然画像を見た時は、自然画像と同様のボトムアップ型注意を引き起こすのにも関わらず、文脈情報が少ない（何が映っているかわかりにくい）ため、トップダウン型注意はあまり誘発されないと考えられます。顕著性マップが類似した自然画像・非自然画像のペアを作り出すこの技術の開発により、今までは不可能だった、視覚注意をボトムアップ型とトップダウン型に切り分ける実験が可能になると考えられます。

開発した画像生成技術によって作られた自然画像と非自然画像のデータセットが、実際に人の視覚注意に関する実験に有効なものであるかを評価するため、脳の活動を非侵襲的に計測する手法の一つであるfMRIを用いた実験を行いました。実験では、用意した自然画像と非自然画像のデータセットから画像をランダムに実験参加者に見せ、fMRIによってそのときの脳活動を計測しました。自然画像を見ているときは、非自然画像を見ているときよりも両側の高次視覚野が有意に高い活動を示しました（図2(a)）。一方で、非自然画像を見ているときは、自然画像を見ているときよりも両側の一次視覚野と両側の下頭頂小葉が高い活動を示しました。こうした脳領域は、これまでもトップダウン型およびボトムアップ型注意に関わることが示唆されてきており、この研究で用意したデータセットが、人の視覚注意機構の解明のための新しいツールとなる可能性を示唆しています。

この研究では、トップダウン型注意とボトムアップ型注意の仕組みについて解明するためのAIツールを用意することを目的としましたが、もしこのような視覚注意に関する仕組みが解明できれば、脳活動からトップダウン型注意に基づいて見ているものを復元するなど、新たなブレイン・マシン・インターフェース（BMI）技術の開発につながる可能性があります。こうした脳活動からの視覚情報の復元などの技術は、医療や犯罪捜査から家電や娯楽までさまざまな分野への応用が考えられます。また、ボトムアップ型注意の仕組みを解明することによって、建設作業や運転時の注意の欠如・逸れによる事故を予防するなど、危機管理サポートなどへの応用も考えられます。このように、人間の視覚注意のメカニズムを探ることは、われわれの日常に大きく影響を与える重要なものであると考えられます。

(a) Natural image > Generated image



(b) Generated image > Natural image

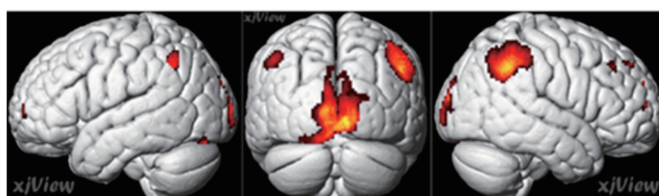


図 2. 脳活動解析の結果

自然画像と非自然画像を見せたときの脳活動の差分析。図 2 (a) は自然画像を見ているとき非自然画像を見ているときよりも（統計的に）有意に活動が高い脳領域で、図 2 (b) はその逆。

自然画像を見ているときは両側の高次視覚野が高い活動を示し、非自然画像を見ているときは両側の一次視覚野と両側の下頭頂小葉が高い活動を示した。

3. 部分観測迷路を探索する際の予測および確信度を脳活動から解釈（文献 [2]）

われわれのいる実世界はしばしば曖昧さを含みますが、人はそのような曖昧な状況でも適切な意思決定を行うことができます。例えば、ターミナル駅など見た目が似通った構造が多く存在するような複雑な環境では、自分がどこにいるかがわからなくなり、その結果、目的地に向かってどう移動するかを決めるのが難しくなることがあります。こうした状況では、人は周辺の風景（シーン）などを手掛かりとして現在の位置に当たりをつけて、それを踏まえて目的地まで移動しようとしします。この時、移動しながらこの後で出現するシーンを予想し、その予想と新たに得られる観測とを比較することで、自分の位置の予想を正しいものへと更新していきます。この際の「予想」はこれから得られるであろう観測に対するものですので、脳の中に自身が創り出した「仮想現実」です。また、直感的に、自身にとって予想に自信があるかないかは、この仮想現実の脳内表現に影響があると思われます。当研究室の片山梨沙さん（博士後期課程 2 回生）はオックスフォード大学の吉田和子博士の協力を得て、こうした脳の中の仮想現実が、脳活動から AI により取り出せる（再現できる）か、また、人が内省的に考える自信も AI により取り出せるか、さらには、それらの再現性の間に関連があるのか（例えば、自信がある際に仮想現実が良く再現できるか）を調べました。そのために、実験参加者が、自身の位置が分からないまま未知のゴールを目指すバーチャルリアリティ（VR）迷路内で空間移動ゲームを行う際の脳活動を計測し、AI 技術を用いた脳情報解釈解析を行いました。

実験参加者に、fMRI 計測装置内で空間移動ゲームに取り組んでもらい、脳活動を計測しました（図 3）。ゲームは、格子状に部屋が並んだ VR 迷路内を探索しながら、移動する先の部屋のシーンを、ドアを開ける前に予測し、また、その予測に対する自信（確信度）を回答するというものです。事前に迷路の地図を記憶した実験参加者は、スタート位置や探索中の現在位置を教えずに貫えなくても関わらず、自分の意思で探索を進めるにつれてシーン予測に正解できるようになり、予測に対する自信も高くなりました。このことは、実験参加者がこれまでのシーンの観測を用いて迷路内での自身の位置を推定し、その位置推定と記憶した地図に基づいて、次に進む部屋のシーンの予測を行っていることを示しています。また実験参加者は、予測に自信がある（確信度が高い）時に、自信がない（確信度が低い）時と比較してより素早く予測シーンを回答していました。このことは、予測に対する確信度が高い時、実験参加者がより明瞭に予測シーンを思い浮かべられることを示唆しています。

実験参加者が次の部屋のシーンを予測している時に強い活動を示した脳領域を対象に、AI 技術を用いて、実験参加者の脳活動から予測シーンとその予測に対する確信度が解釈できるかを調べました。そ

の結果、予測シーンは上頭頂小葉・下頭頂小葉と背側運動前野から、予測に対する確信度はこれらの領域に加え前部前頭前野からも解読できることが示されました。また上頭頂小葉では、実験参加者のシーン予測に対する確信度が高い時、予測したシーンの解読精度も高くなることが明らかになりました。このことは、予測に対する自信が強い場合、予測シーンを表現する脳活動がより明瞭になることを意味しています。さらに、実験参加者が直接回答していない、迷路内での位置の予想に対する確信度を AI 技術を用いて推定したところ、下頭頂小葉では、AI が推定した（客観的な）自信の強さによって予測シーンの解読精度に差があることがわかりました。このことから、下頭頂小葉では迷路内の位置の予測が、上頭頂小葉ではその位置予測から導かれるシーンの予測が表現されている可能性があると考えられます。

本研究でのシーン予測とは部屋のドアの様子としていましたが、さらに一般化して、人間がイメージする快適な部屋や昔住んでいた家や街の様子を脳活動に基づき再現するなど、BMI を発展させた新しいコミュニケーションツールの開発につながる可能性があります。こうした空間移動（ナビゲーション）に付随するシーンの脳活動からの再現は、人を身体の拘束から解き放つ「メタバース」研究の課題の一つとなっています。また、われわれの空間移動に伴うシーンの予測は、ドローンや車両などの移動人工物に対して、脳と AI とをつないだ制御法など新しい応用につながります。例えば、移動人工物が交差点を曲がる際に、交差点の先の状態に関する人間の予測レベルの評価ができれば、人間と AI との協調的制御が車の運転などに使える可能性があります。この例の場合ですと、交差点の先のシーン予測の確信度が低い場合、AI への依存度を高め慎重に制御を行うなどが想定されます。さらに、人間の予測という心的世界の再現、また、それへの内省的評価（メタ認知）の再現は、われわれの自己意識の根源を探る意味で、学際的な意義があると思われます。

4. まとめ

AI 研究に関わっていて時々受ける質問に「このまま行くと AI が意識を持つようになりますか」というものがありますが、それに対して「人間の意識が何のためにどのように発生するのが分からないので答えようがない」と回答しています。人間の意識研究はこの 10 年間で大きく進んだと言えますが、いまだ、「意識レベルの定量化」に留まっていて「何のためにどのように」に答えることはできていません。2 節で紹介した研究で「トップダウン型注意」という用語がありましたが、これは脳の自らの経験に基づく能動的な情報処理ということで意識と関連がありますし、3 節で紹介した研究での「確信度」はメタ認知の一種で、内省的な自己評価として、これもまた意識と関連があります。意識の定式化への一つの手がかりは、動的に環境に適合する動物の効率的な学習能力にあると考えています。実際に、現在の AI をもってしても、この効率的な学習能力は再現できていません。つまり、「機械の知」すなわち AI、と「人間の知」すなわち脳機能モデリングとの対比こそが、「なぜわれわれは存在していると（自ら）考えているのか」に対する答に近づく道であると考え、研究を進めています。

研究室の活動については以下の HP をご参照ください。

<https://ishiilab.jp/>

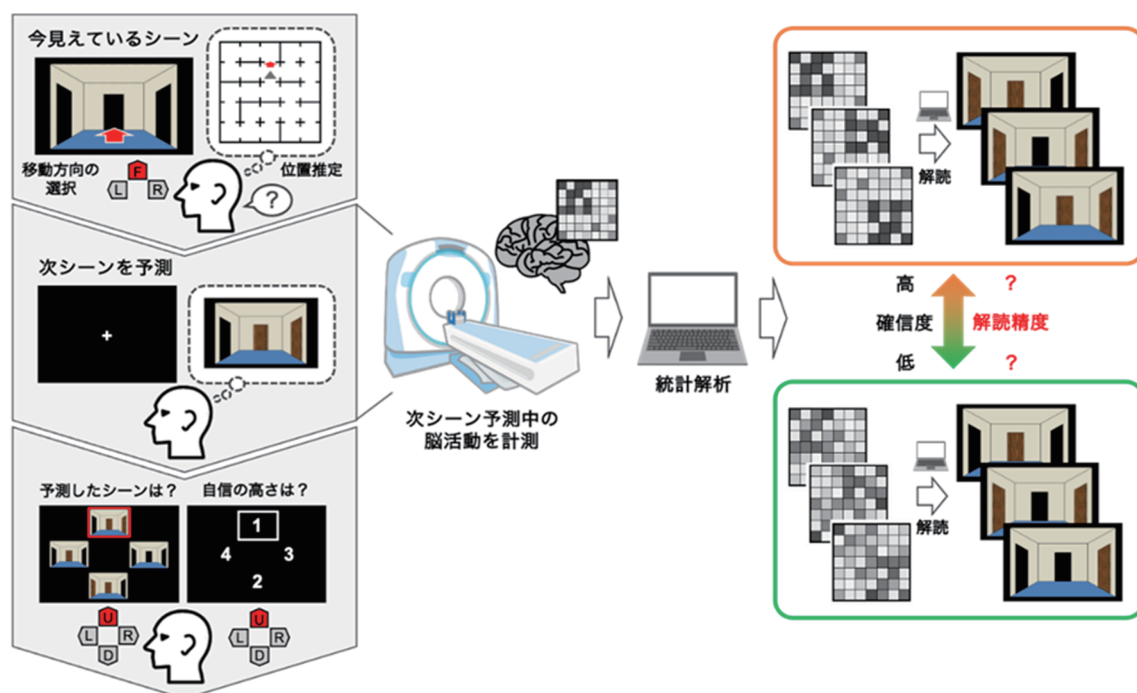


図 3. シーン予測課題と解析手法の概念図

実験参加者は事前に学習したグリッド構造のバーチャルリアリティ迷路内を、未知の初期位置から探索する。探索中、移動方向選択後に実験参加者は次に現れるシーンを予測し、その予測に対する確信度を評価するよう指示される。実験参加者は迷路内での現在位置を教示されないため、シーン予測課題に正答するためには、探索中の行動（どちらに移動したか）および観測シーンの履歴から現在位置を推定する必要がある。次に現れるシーンを予測している時の脳活動を計測し、AI による解析によって予測シーンおよび確信度を解読する。また、データセットを確信度レベルに応じて分割し、予測シーンの解読精度を比較する。

参考文献

- [1] Fujimoto, K., Hayashi, K., Katayama, R., Lee, S., Liang, Z., Yoshida, W., Ishii S. (2022). Deep learning-based image deconstruction method with maintained saliency. *Neural Networks*, 155, 224-241, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.08.015>
- [2] Katayama, R., Yoshida, Y., Ishii, S. (2022). Confidence modulates the decodability of scene prediction during partially-observable maze exploration in humans. *Communications Biology*, 5: 367. doi: 10.1038/s42003-022-03314-y.

プラズマの光から何がわかる？ ～プラズマ分光学への第一歩～

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稲垣研）
門 信一郎

1. はじめに

中学理科の「電気」の内容で、オーロラ、雷、ネオンサイン、蛍光灯、真空放電（正しくは気体放電）など、「プラズマ」という用語は使われなくても、皆さんは、プラズマ現象について多く学んできています。さらに高校の物理や化学では、水素原子が発する輝線スペクトルや炎色反応について学び、気体が発光する原理にも触れつつあると想像します。そこで、本稿では、自然界のプラズマや実験室のプラズマを例に、その現象解明に大きな役割を担っている「分光学」について紹介します。

2. 地上の放電現象、天空の光とプラズマでつながる！

天空からは様々な光がやってきました。太陽光は私たちに最もなじみのある光です。1666年、ニュートンはプリズムを用いて初めて太陽光を観察し、虹色の「連続スペクトル」を発見しました。1814年、フラウンホーファーは三角プリズムを望遠鏡の対物レンズの前に配置し、精密な角度調整によって太陽光のスペクトルを観測し、574本ものとびとびの黒い暗線（吸収線）を同定しました（図1）。さらにシリウス星に現れる暗線と比較し、地球ではなく、太陽由来のものであることも示しましたが、その物理的な解明にまでは至れませんでした（彼はその後、260本の平行ワイヤーを使った回折格子分光器を開発[1]）。太陽や他の様々な恒星が発する光のスペクトルだけでなく、北極や南極近辺に見られる大気が発光現象であるオーロラも天空からの光です。

一方地上では、ボルタ電池と真空技術の発明で、ペトロフ、デービー（1803年）が独立にアーク放電ランプを発明しました（1821年に光がアーク状に曲がることから命名）。本格的な気体放電（グロー放電）をファラデーが確立（1835頃）すると、真空技術の進歩とともに放電研究が進展しました。クルックスは、ファラデーの講演録「物質は、固体・液体・固体・ラジアント（radiant matter）からなる」、を引用し、後に陰極線（1876年）、現代では電子ビームと言われる radiant matter の研究を精力的に行い、エッ

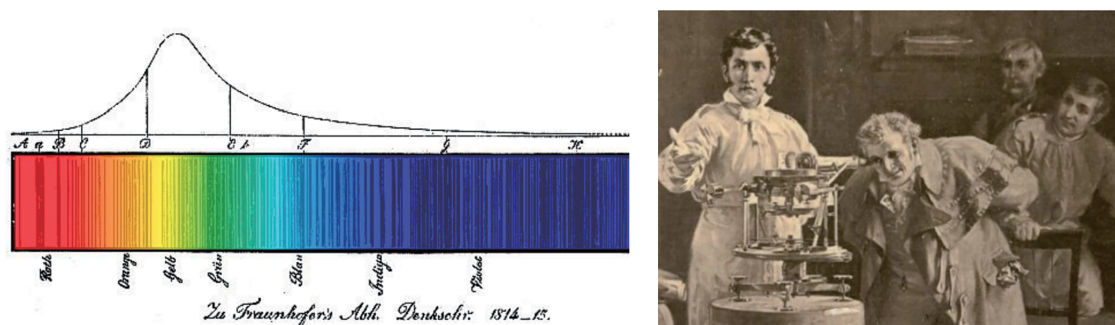


図1 フラウンホーファーが発見した太陽スペクトルにおける無数の暗線（1817年図の再現[2]）と、演示実験の様子[Public domain, Wikimedia]。望遠鏡の先にプリズムが見える。

クス線を発生するクルックス管 (1872 年) を発明しました。中学高校の理科で学ぶ**真空放電**の項目には、グロー放電と陰極線が同等に掲載されていますが、**プラズマ中の電子の衝突で気体が発光するグロー放電と、陰極から放出された電子ビームの衝突によりガラス管が光る陰極線**は異なる素過程によるものです。

このグロー放電陽光柱に電極を挿入し、電流電圧特性を調べることで、その物性が次々と明らかになってきました。陽光柱の中の物質（正確には物質の状態）をラングミュアは「**プラズマ**」と名付けました。1928 年 6 月 21 日のことです（プラズマ記念日？）。

1838 年にファラデーが気体放電によってオーロラに似た光を発光させると、両者の関連性を見出そうとする研究が盛んになりました [3]。オーロラの発光が物質固有の色であろう、と思いついたのは、ブンゼンとキルヒホフの**炎色反応**のことを知ったオングストロームです。キルヒホフは、1859 年、この暗線が太陽大気の原因による吸収スペクトルであることを示し、オングストロームはオーロラグリーンとして知られる代表的な緑色の発光 (557.7 nm) のスペクトルを観測し、これを 5567 という数字で表しました (1868 年)。この値は、**オングストロームという長さの単位**の起源にもなりました。1923 年になると、夜空に微弱なオーロラグリーンを放つ**夜間大気光**が干渉法といわれる手法で測定され、 5577.350 ± 0.001 という正確な値が得られています。やがて、太陽はプラズマの塊、オーロラは地球上空のプラズマによる発光現象という事が明らかになっていきます。

3. プラズマ発光分光法

3.1 プラズマで炎色反応？

光のスペクトルとは光の強度の波長依存性です。スペクトルには 2 種類あります。輝線 / 暗線を表す**線スペクトル**と**連続スペクトル**です。線スペクトルの波長は物質固有のものなので、炎色反応のように、元素分析さらには、その価数の同定が可能です。炎色反応では、火炎の熱エネルギーを励起源にするので、アルカリ金属やアルカリ土類金属など、電子の結合の弱い、周期表の左寄りのものが主体となりますが、プラズマを使えば、原理的には（可視光に限定しなければ）**周期表のあらゆる元素を光らせる**ことができます（図 2）。たとえば法医学や科捜研のドラマにでてくる（と思う）、ICP 発光分光分析装置は、アルゴンの高周波誘導結合プラズマ（ICP）を励起源として、元素を光らせ、スペクトルの波長から物質の種類を、スペクトル強度から濃度を特定するものです。

一方、連続スペクトルは温度で決まり物質によりません。これは放射温度計の原理と同じです。青白

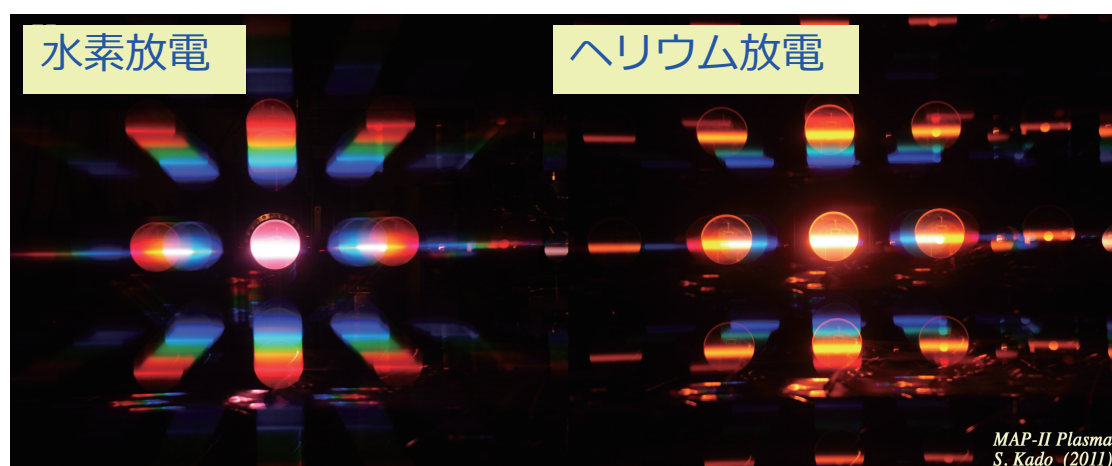


図 2 直線型装置 MAP-II 装置における、水素とヘリウムの直流アーク放電放電のスペクトル写真。クロス回折格子フィルムを通してカラー撮影。

い星は高温、赤い星は低温、というように、星の温度も連続スペクトルを用いて測定します。放射温度計は「透き通った物質」の温度は測れません。星はプラズマの密度が極めて高いために、分光学の言葉を借りれば「光学的に厚い」＝「透き通っていない」と言います。

3.2 励起・発光の物理モデル

プラズマの輝線強度は、多くのパラメータ（電子密度、電子温度、対象とする元素の種類や密度、輝線を発する量子準位）に依存します。前節の ICP 分析は、励起源のプラズマ条件を一定にし、既知の濃度の物質を測定して較正されている「検量線」を使って、対象物質の濃度を推定します。しかし、プラズマ実験の多くは、プラズマも混入元素も未知であるため、輝線強度を与える「物理モデル」を構築して、それを数式で表現する必要があります。まずは図 3 (a) を例にしましょう。[M] から [L] への水の流量を測定量とします。この場合、[M] の容器に着目します。[M] へは [K] にある水から毎分 10% を汲み上げて注ぎます。[K] 以外の所の水からは汲み上げない、と想定します。[M] からは [L] と [K] に、毎分 [M] の水の 3%、5% をそれぞれ流出します。[M] の水量のバランスを考えると、[L] からの行き先は無視します。やがて、[M] での流入量と放出量がつりあったとき、[M] の水量は定常状態になります。[M] の出入りを考えます。[M] に溜まった水量を [M]、時間の単位を分で書くと

$$\frac{d[M]}{dt} = [\text{K から流入}] - \sum_{\text{行き先}} [\text{M から流出}] = [K] \times 0.01 - [M] \times (0.03 + 0.05)$$

と表せます。定常になった状態を式に書くと、時間変化を表す左辺が 0 ですから、[M]/[K] = 1/8、すなわち、[M] には [K] の水溜めの 1/8 の量が溜まった状態に維持されていることになります。[M] から [L] への流量の絶対値が測定可能なら、[K] にある水量の絶対値を推定することが可能です。[K] に水がないと、汲み上げることもできませんから、これは大切な物理量です。

これを図 3 (b) に示すプラズマ中の水素原子集団に適用します。水素は原子核と電子 1 個からなりますので、その 1 個の電子が基底状態にあるものを状態 [K] の水素、励起状態 [L 殻]、[M 殻] にあるものを、状態 [L][M] の水素とし、それ以外の殻に励起電子をもつ水素は無視できるほど少ないと仮定します。

ここで、(a) の組み上げる水の量は (b) の電子衝突による励起に対応します。(a) の蛇口からの水の流出量は (b) の輝線の発光強度に対応します。したがって、[M] から [L] への電子遷移に伴う発光を観測することで、[K] すなわち基底状態にある水素の量を推定することができます。しかし、もし外に

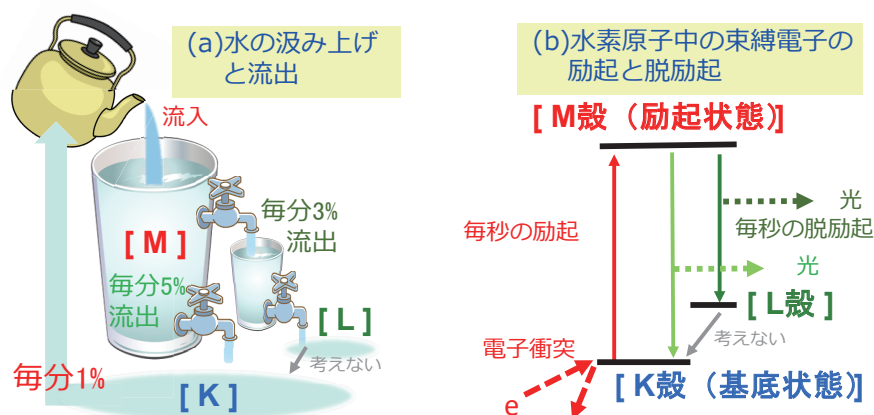


図 3 (a) 水の汲み上げと放出のバランス方程式を与える物理モデル。(b) 3 準位に着目した、プラズマ中の原子過程を記述する物理モデル。

流出する蛇口がとても狭く、たとえばポタポタ水漏れするぐらいだったとしましょう。[M]の水の行き場がなく、溜まる一方です。原子では、励起準位にある電子の寿命が極めて長く、発光も極めて微弱になります。このような励起準位を「準安定準位」、準安定準位からの発光を「禁制遷移」と言います。その遷移が許容遷移か禁制遷移か、というのは量子論からわかります。

禁制遷移を実験室で観測することは、極めて困難です。遷移1回につき、放出する光子が1個なので、寿命が長い、ということは、単位時間あたりの放出光子数が少なく、極めて微弱な発光となるからです。発光前に電子が再度衝突してきたり、自分が壁にあたったりすると、発光をせずに基底に戻りますから、光りません。

4. オーロラ発光の謎

この禁制遷移は、美しいオーロラ発光の原因なのですが、その素過程は長い間謎でした。気体放電でも出ない、窒素ではない、アルゴンでもない、... クリプトン説 (Ramsay, 1915 年) までありました。やがて、1924-1925 年頃、ヘリウムやアルゴンの気体放電に酸素を少し入れるとそれっぽいのがでることが McLennan と Shrum によって確認され、McLennan のイギリス王立協会学術誌講演録 (1928 年) で、**酸素の禁制遷移**であることが述べられています。

図4にオーロラの写真 (a) とエネルギー準位 (b) を示します。量子準位の記号 S、P、D や全角運動量の量子数 J も記載されていますが、現段階ではそれらは無視して、波長 (λ) と秒 (s) で表される準位寿命に着目してください。禁制遷移は M1、E2 とラベルされています。許容遷移の寿命は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s すなわち、ナノ秒のオーダーですので、557.7 nm の緑の発光 0.8 秒、さらには 630.0、636.4 nm の数 100 秒は桁違いに長く、すなわち発光強度も桁違いに小さいことが読み取れます。

オーロラは上空 100-300 km に現れます。上空では、酸素分子が解離しており、窒素も少ないため、酸素原子が主要な粒子種です。プラズマの密度が低く、壁もないため、酸素が励起したまま長時間存在し、ゆっくり発光する「猶予」があります。酸素原子の赤と緑の色の違いは励起準位の違いで、これは、高度によって生成や消失する素過程が異なるためで、窒素が触媒的に作用して生じる緑が下方に現れ、緑より準位寿命がさらに長い赤は、他粒子との衝突による消失も増えてきます。この赤いオーロラ (Type-D オーロラと分類される) は、太陽活動が活発であれば、低緯度の地域でも観測されていて、日本でも

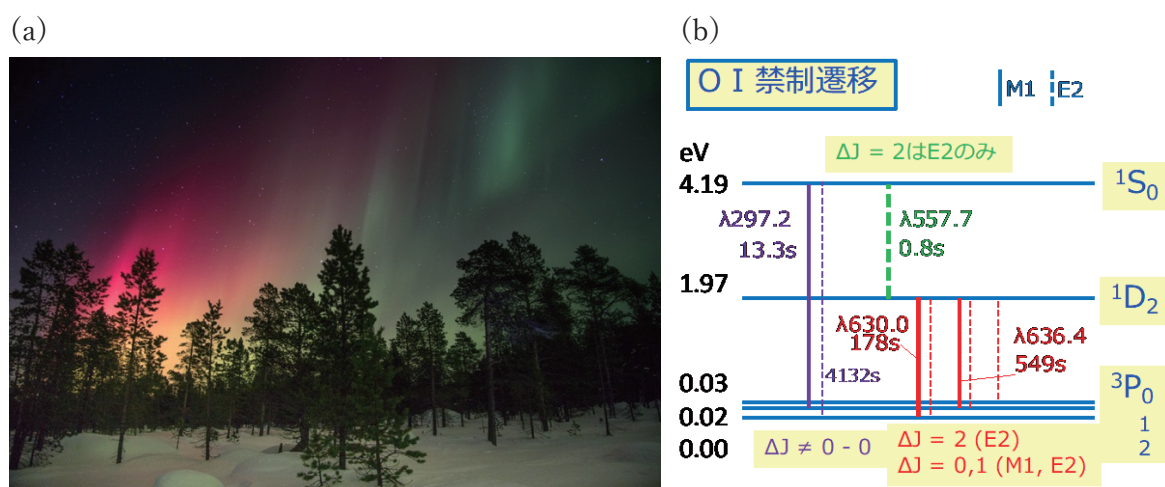


図4 (a) 典型的な緑 (557.7nm) と赤 (630.0、636.4 nm) の Type-A オーロラ [Public Domain, <https://publicdomainq.net>]. (b) 酸素原子 (O I) の禁制遷移を表すエネルギー準位図。λ は波長 [nm]、s の前の数字は準位寿命 [秒]

1400 年前の日本書紀や 1204 年藤原定家の明月記に「赤気（せっき）」として記録が残っています。

このように、オーロラが緑や赤の光を発する素過程は、酸素原子の発光でありながら、地上の放電とは異なる励起過程が関連していますので、それを地上で再現することは極めて困難なのがおわかりでしょうか。

一方、低高度下限付近では、気体密度が増え、さらに窒素の割合が増えるため、窒素分子、窒素分子イオンの紫のスペクトルが鮮やかに見えます。**Type-B オーロラ**として知られます。太陽活動が活発で、その高度まで到達するほど、高いエネルギーのプラズマが降り注ぐ必要がありますが、こちらは許容遷移による発光であるため、窒素を含む放電実験によって再現することができます。

5. 準安定準位を利用するガスレーザー

プラズマからの発光の利用は、前述のアークランプ（開放型）に始まりますが、放電管が最初に光源として利用されたのはムーア管（1893 年）です。その後、ネオン管（1910 年）や蛍光灯（1938 年）、最近ではプラズマディスプレイパネル（1992 年）などに応用されてきました [4]。

アインシュタインが 1917 年に光の共鳴吸収・誘導放出の原理を導くと、それから 40 年の時を経て、反転分布と共振器を利用したメーザー（1954 年）やレーザー（1960 年）として実を結びました。本節では、放電プラズマ中の準安定準位を巧みに利用した「ガスレーザー」の発振原理を見てみましょう。

単一ガスによる放電では、下の方の準位ほど、エネルギー的に安定しているので、下から上への遷移で光を吸収する過程のほうが、上から下への遷移で光り放出する過程よりも多く発生します。

そこで、「準安定準位」の登場です。ヘリウムの準安定準位は、ネオンの励起準位のすぐ近くにあり（そういう「相方」を探してきます）。図 5 のように、混合ガスを用いることで、ヘリウムの準安定準位を蓄積し、共鳴的に特定のネオン原子を励起します。上準位の密度のほうが下準位よりも高い状態、これを「反転分布」と言います。反転分布した上準位からの発光を「共振器」と言われる「合わせ鏡」構造内に閉じ込めると、吸収より発光のほうが多く、共振器の中を光が行き来するうちに、だんだん増幅されて、レーザー発振に至ります。図中の写真は He-Ne レーザーの放電管を回折格子フィルムを介

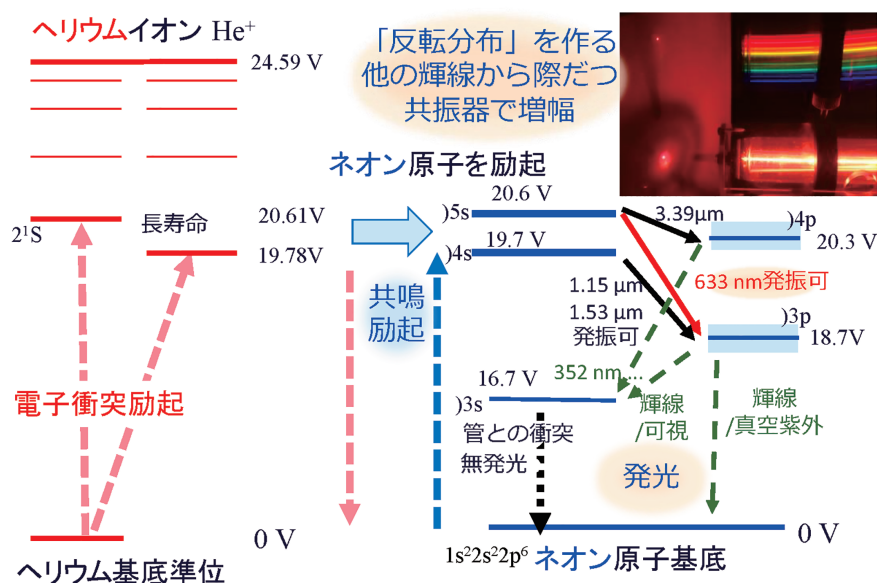


図 5 ヘリウム・ネオンレーザー発振に関連するエネルギー準位図。ネオンの励起準位の“()”は、便宜上、基底にあった 2p 電子の 1 つが“()”の後に書かれた軌道に励起していることを表す。

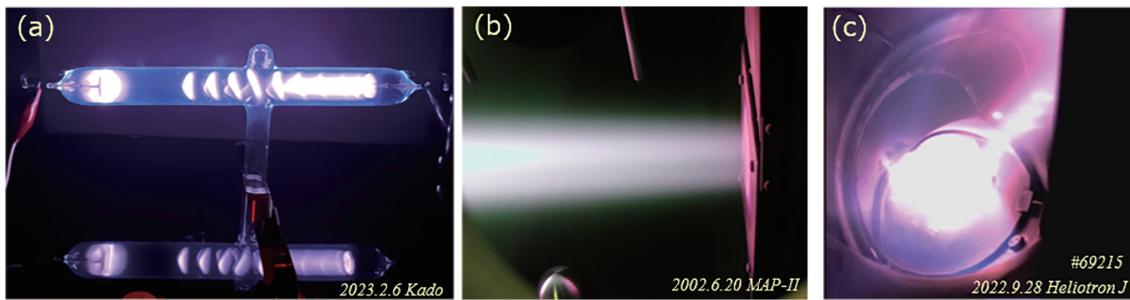


図6 (a) 直流グロー放電による水素プラズマ（電子温度約4万℃）、(b) 直線型ダイバータプラズマ模擬装置 MAP-II において、ヘリウム放電に水素を混合しプラズマの温度を下げる実験（約1～2万℃）。(c) ヘリカル型核融合実験装置ヘリオトロンJにおける重水素放電に固体軽水素を入射する実験（約1千万℃）。

して観測し、スペクトルの色を観察したものです。黄、赤、緑、青などのネオンの輝線が多数観測されます。そのうち、反転分布となった上準位より発する633nmの赤い輝線のみ増幅され、単色のレーザーが発振されます。

6. プラズマ核融合とプラズマ分光

太陽がプラズマの塊であり、その発光のエネルギー源が核融合反応 [6] であることが示され、プラズマによる核融合が可能であるとの理論が生まれることにより、高温プラズマの生成・加熱実験が盛んになると、弱電離を扱う放電（図6 (a)）と完全電離を扱うプラズマ物理（図6 (c)）は乖離していきました。太陽内部や核融合炉心のプラズマは完全電離しており、軌道電子をもたず、輝線を発しないからです。しかし近年、ダイバータ・境界層プラズマと言われる、核融合プラズマ周辺部は、壁からリサイクルされた原子分子や意図的に入射された中性の気体により、電離度が低い領域が重要視されています。太陽大気も弱電離のプラズマであり、様々な元素が存在しています。現代の分光学、素過程の知見で、実験室、太陽、オーロラなど、様々なプラズマを比較することで、フ라운ホーファーやキルヒホフが思い描くことすらできなかった、両者の素過程の類似性や相違点が明らかになってきています（図6 (b)）。

スペクトルの波長はプラズマ中の不純物の種類や価数の特定に、強度は元素の量や励起源である電子の温度や密度を、スペクトルのシフト（ドップラー効果）からプラズマの流れ速度を、熱運動によるスペクトルの広がりから発光元素の温度を・・・など、分光診断から得られる情報は多岐にわたります。さらには意図的に不純物元素をトレーサーとして導入したり、レーザーや粒子ビームを打ち込んだりして誘起された発光を計測するなど、様々な能動的計測法も実用化され、活躍しています。

5. おわりに

プラズマの「素過程」と「分光診断」は、量子論や原子物理学などの聞き慣れない用語が次々と出てくるので、最初はとっつきにくい印象を感じる方が多いと思います。しかし、正直にいうと、量子論を完璧に理解して、分光診断に利用する、というわけではなく、先人たちの知見の蓄積のなかから、実験的に検証された「評価済みデータベース」を利用します。その過程で、実験との矛盾が確認されれば、新しい現象の発見や、それまで無視していた素過程の重要性につながることも少なくありません。

扱うプラズマのパラメータ領域や元素が近年ますます拡大し [6]、分光診断は、プラズマ中の元素分析や価数、励起源であるプラズマの密度や温度等を調べる手法として、様々な装置、様々な分野において、重要な計測手段として発展を続けています。

この先、読者の皆さんと一緒に研究できる機会があればこの上なく喜ばしいです。そうでなくても、

どの分野に進んでも、分光光学に支えられた分析装置や解析方法を目にしたいと思います。その時に、ふと本稿を思い出して、核融合や天体、オーロラなどのプラズマ研究が、どれだけ進歩したか、振り返って関心をもってもらえたら嬉しい限りです。その時の期待に答えられるよう、我々研究者は探求し続けます！ [7]

参考文献（オープンアクセスの和文誌と一般入門書を挙げました）

- [1] 波岡 武「第1 講分光器概論」分光研究 (1985) 34 巻1 号 41-53
- [2] <http://www.exo.net/~pauld/workshops/Stars/Stars.htm> (2023 年 7 月閲覧)
- [3] 小口 高 著 「オーロラの物理学入門」(2.6 節) 名古屋大学太陽地球環境研究所編集 [https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/public-notice/post_25.html]
- [4] 板谷良平「20 世紀におけるプラズマ物理の歴史と将来展望」応用物理 69, p971 (2000)
- [5] 「プラズマエネルギーのすべて」 日本実業出版社 (2007/2/22)
- [6] 「図解でよくわかる 核融合エネルギーのきほん」 誠文堂新光社 (2021/1/12)
- [7] 門信一郎「すぐにわかるプラズマと核融合エネルギー」国立大学共同利用・共同研究拠点協議会 YouTube [<https://youtu.be/YwkTx9W918Q>] (2021 年 1 月配信)

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

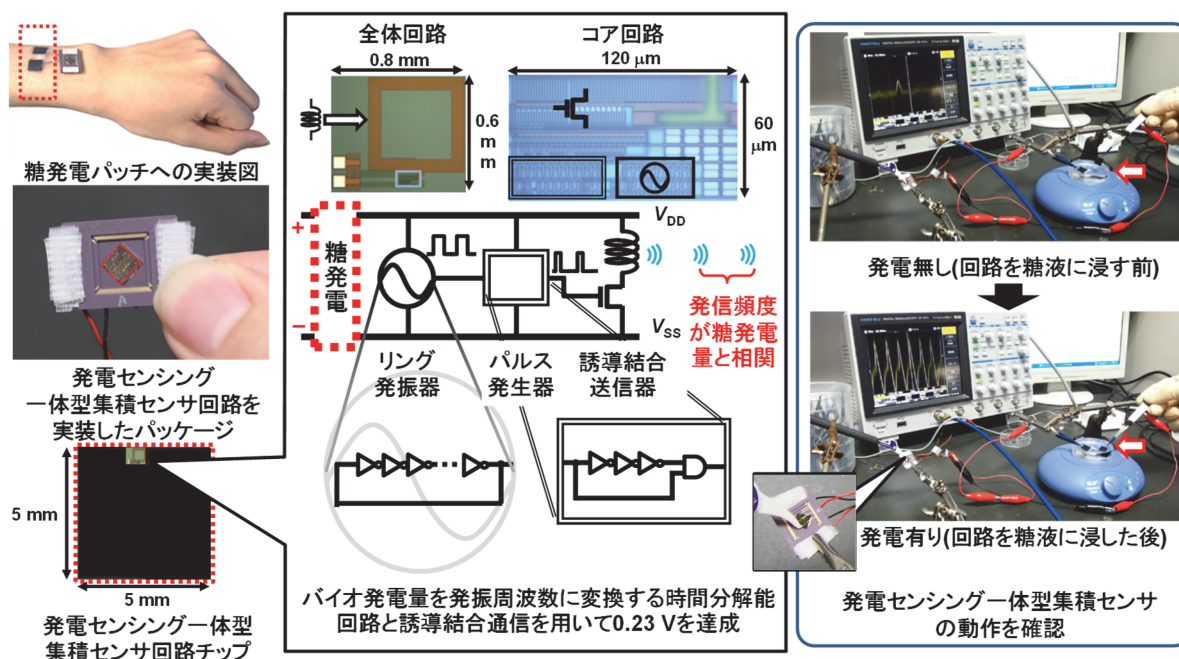


図 1：開発した世界初のバイオ発電素子（糖発電素子）と融合した電力自立バイオセンサ：発電量をそのままセンシング信号としても活用する「発電センシング一体型集積センサ技術」の有効性を実証、時間分解能回路と誘導結合通信の導入により 0.23V を達成

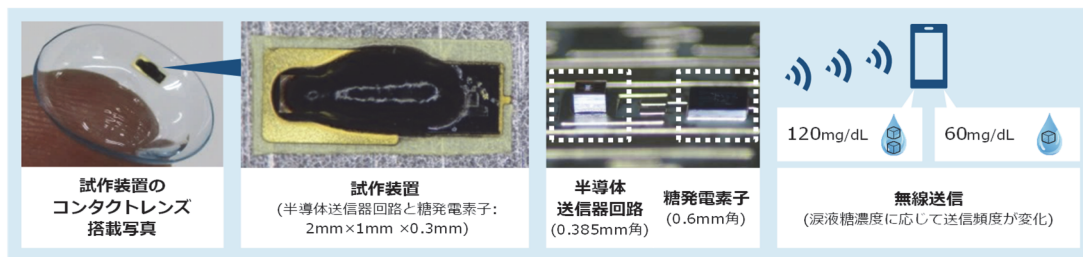


図 2：開発した発電センシング一体型集積センサ技術を用いた電力自立持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

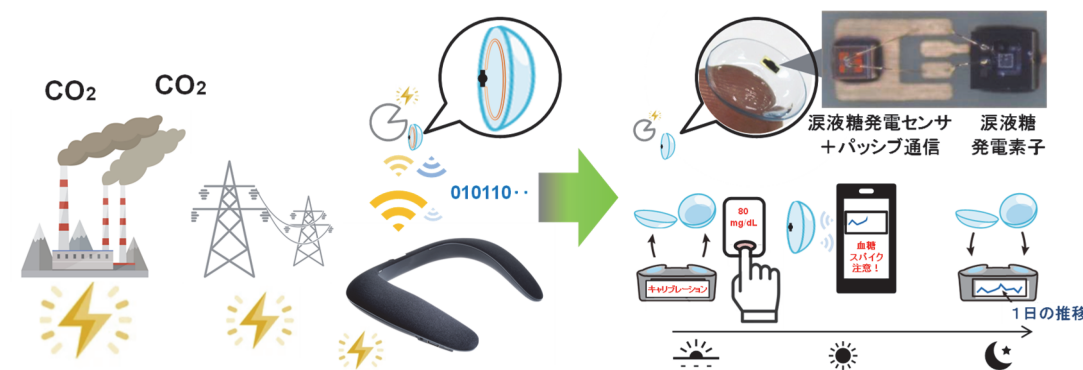


図 3：エネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズのコンセプト図

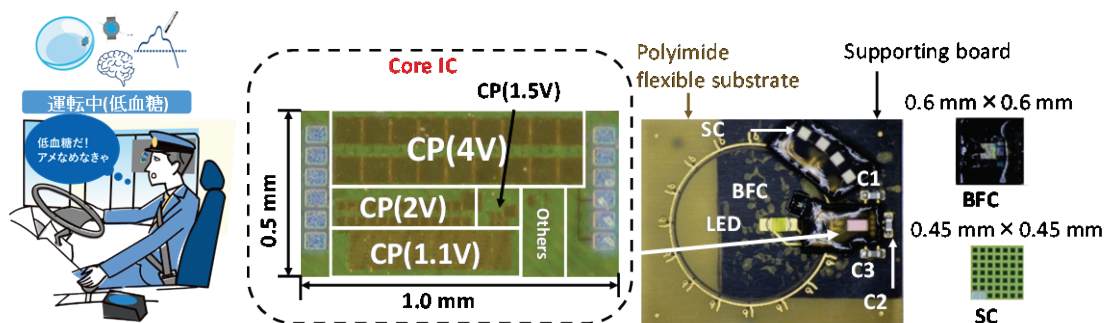
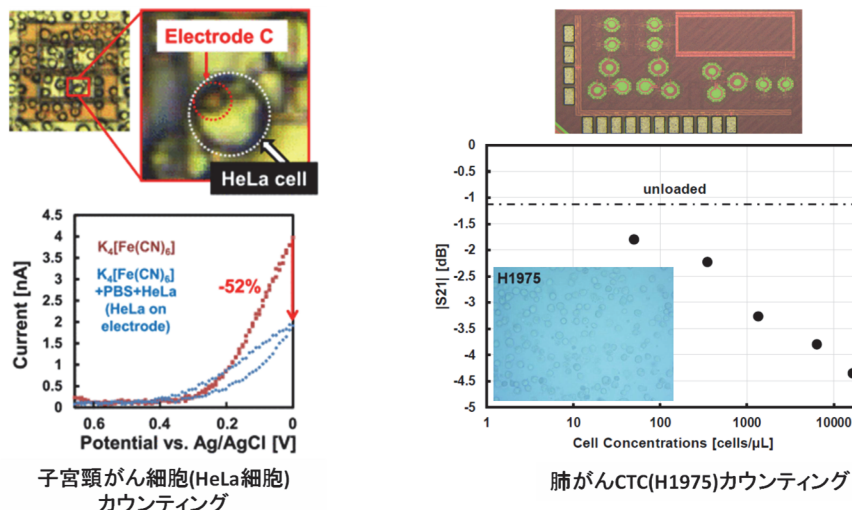


図 4：開発したエネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

の伝送です。エネルギーの伝送においては無線電力伝送を、データの伝送においては無線通信が活用されますが、集積回路システム内での伝送に比べると、エネルギー効率が悪いという課題があります。そこで、エネルギー・データをその場で生成 / 活用するエネルギー・データの地産地消方式による IoT

- 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 μm × 4.45 μm 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 μm × 2.05 μm 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。

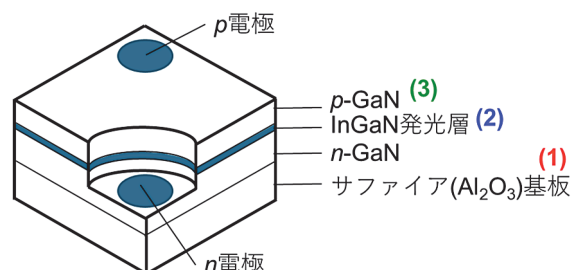


図 1：窒化物半導体による発光素子の基本的な構造

(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]。

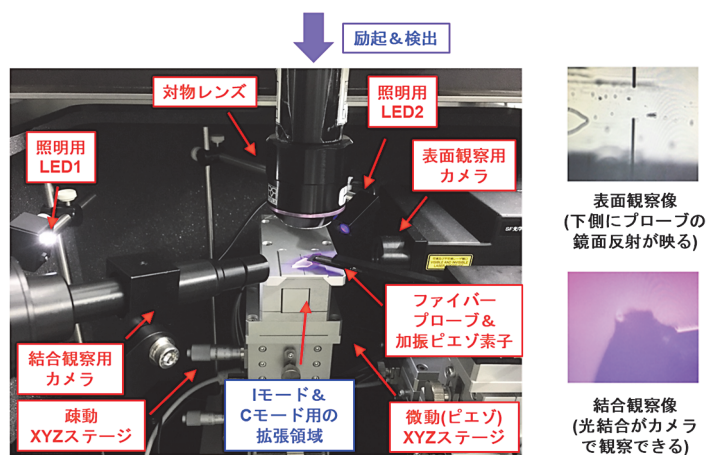


図 3：紫外 SNOM 装置の開発

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あります。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。

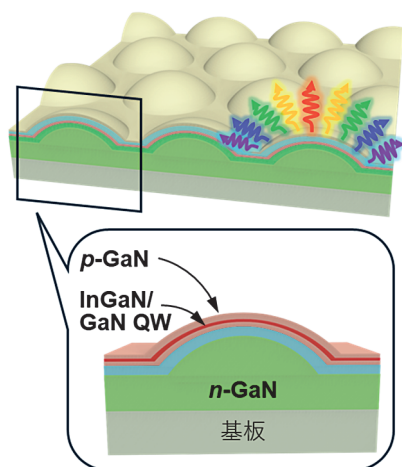


図4：非安定結晶面による3D構造

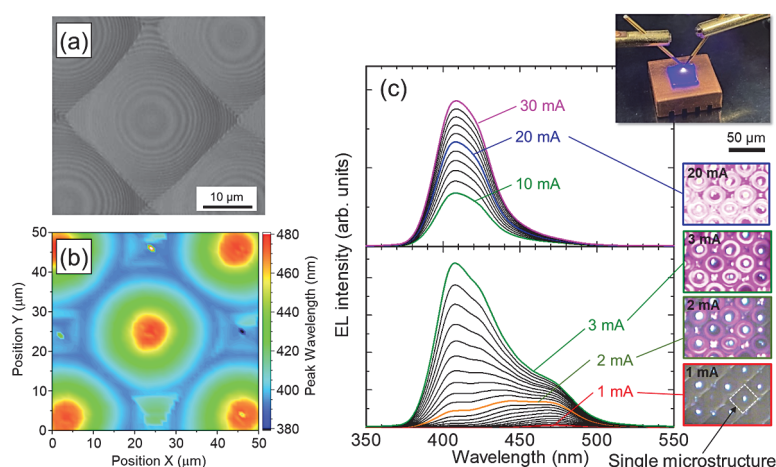


図5：(a) 顕微鏡による表面観察。(b) 発光波長マッピング。(c) LED動作の確認

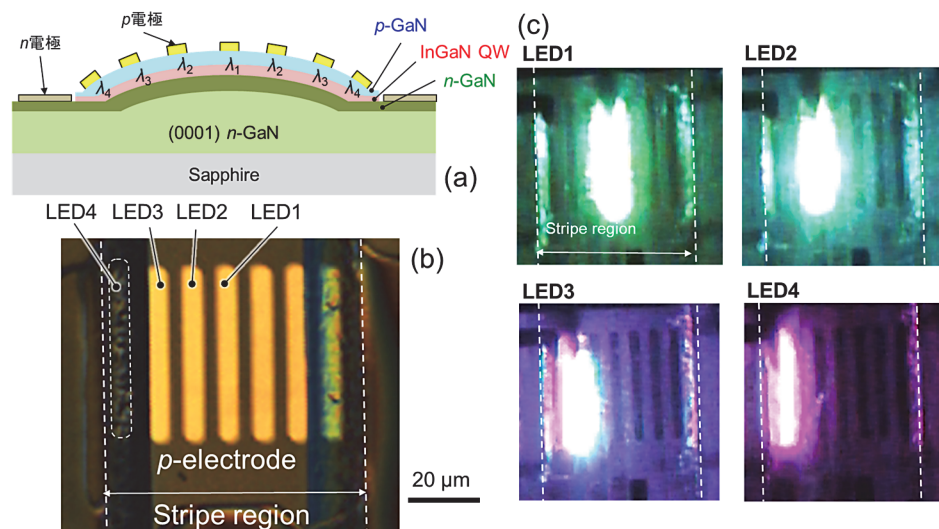


図 6：(a) 断面の概略図。(b) 顕微鏡により観察した、集積マイクロ LED 構造の表面。(c) 各 LED の発光の様子

(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。

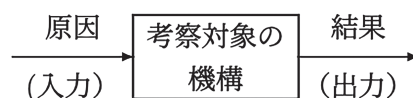


図1：入出力システム。

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。

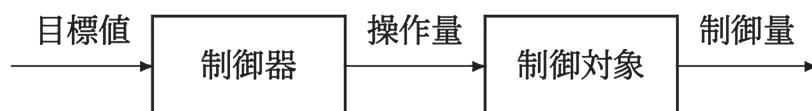


図2：フィードフォワード制御系。

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「○○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

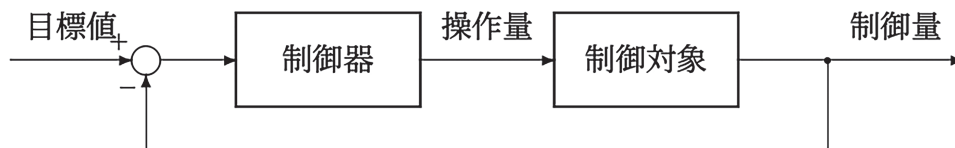


図3：フィードバック制御系。

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や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えます。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えます。

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えます。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) バネの引き伸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) モータにかか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について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いただけたなら、大変幸いです。