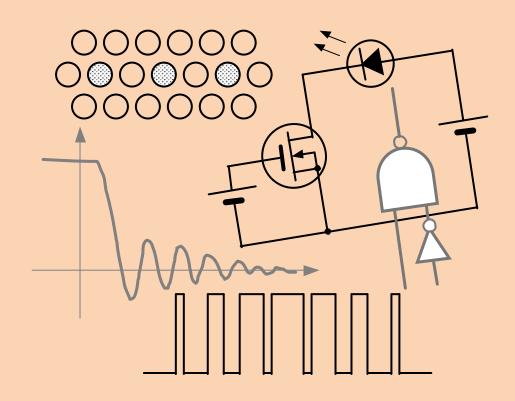
京都大学オープンキャンパス2024

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が、一昔前とは違って、少し下降傾向にあります。我々教員は不思議に思っているのですが、多分、携帯電話やパソコン、簿型 TV などの多くの電子機器があまりにも完成していて、中身はわからなくても使えるし、日常的なものになってしまっているせいで、構造や仕組みに深い興味が湧いてこないのかも知れません。あるいは、電気や電子は直接目に見えないせいかも知れません。しかし電気電子工学が生み出す技術はますます進歩しているのです。

ますます進化するエレクトロニクス 電気電子工学科では、電子や光を利用した機能素子 や装置(デバイス)に用いられる半導体や誘電体、磁性

体、超伝導体などの電子材料に関する基礎科学や、イオンビームやプラズマを利用したナノテク技術による新しいデバイスの創成、それらを応用した計測・制御や医療・福祉関連技術とそれらに関するハードウェアとソフトウェアなどの最先端技術と、その基盤となっている基礎学理の教育研究を行っています。

人と地球に優しいエネルギー・環境関連技術 21世紀では、化石

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、送電や配電系統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 同等に必要不可欠なものとなってきています。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となってきています。 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。

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、各自のモティ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。

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、知識と思考の幅を拡げます。

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

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

電気系教室(電気電子工学科および関連部門)の組織

工学研究科

電気工学専攻

先端電気システム論講座

システム基礎論講座自動制御工学分野

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野

生体医工学講座生体機能工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野

電磁工学講座電磁回路工学分野

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座

電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野

電子物理工学講座応用量子物性分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

量子機能工学講座光材料物性工学分野

量子機能工学講座光量子電子工学分野

量子機能工学講座量子電磁工学分野

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野 デバイス創生部門先端電子材料分野

情報学研究科

知能情報学コース

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ィジタル通信分野 通信システム工学講座伝送メディア分野 通信システム工学講座知的通信網分野 集積システム工学講座情報回路方式分野 集積システム工学講座大規模集積回路分野 集積システム工学講座お高速信号処理分野

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医用工学分野

エネルギー科学研究科

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 生存圏開発創成研究系宇宙圏電磁環境探査分野 生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野

もくじ

上字研究科	
電気工学専攻	
自動制御工学分野【萩原研】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
システム創成論分野【阪本研】······7	
複合システム論分野【土居研】・・・・・・・8	
生体機能工学分野【吉井研】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
超伝導工学分野【雨宮研】・・・・・・・10	
電磁回路工学分野 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
電磁エネルギー工学分野【松尾研】・・・・・・・・・12	
宇宙電波工学分野【小嶋研】・・・・・・・・・・・・・・・13	
マイクロ波エネルギー伝送分野【篠原研】・・・・・・・・・14	
電波科学シミュレーション分野【海老原研】······15	
電子工学専攻	
集積機能工学講座【米澤研】······16	
極微電子工学分野【白石研】・・・・・・・・・・・17	
応用量子物性分野【竹内研】・・・・・・・・・・・・・・・18	
半導体物性工学分野【木本研】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
電子材料物性工学分野 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
光材料物性工学分野【川上研】······21	
光量子電子工学分野【野田研】······22	
量子電磁工学分野 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
ナノプロセス工学分野 ·······24	
7 / / / C C C 工 子 分 以	
库把 兴 证办到	
情報学研究科	
知能情報学コース	
言語メディア分野・・・・・・25	
画像メディア分野【西野研】・・・・・・26	
通信情報システムコース	
ディジタル通信分野【原田研】・・・・・・・27	
知的通信網分野【大木研】・・・・・・・28	
情報回路方式分野【佐藤研】・・・・・・・・・・29	
大規模集積回路分野【新津研】・・・・・・・・・・・・・・・・30	
超高速信号処理分野【橋本研】・・・・・・・・・・・・・・31	
リモートセンシング工学分野【山本研】・・・・・・・・・・32	
地球大気計測分野【橋口研】・・・・・・・・・・33	
システム科学コース	
論理生命学分野【石井研】・・・・・・・・・・・・・・・・・34	
医用工学分野【野村研】・・・・・・・35	
エネルギー科学研究科	
エネルギー情報学分野【下田研】・・・・・・・・・・・・・・・・36	
エネルギー情報子分野【下声研】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
エネルギー基礎科子等以 エネルギー物理学分野【中村研】・・・・・・・・・・・・・・・・・・37	
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】	
· / F/ +7 · / F · 7 · / F/ / F · · · · · · · · · · · · · ·	

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, 持山志宇

電気電子に関わるシステムの特性は、物理量の関係---例えば、電気電子回路では電圧と電流、微小デバイスでは電界と電荷、大きな力を得たいモータなどの機器では磁界と電流---で決まります。システムの設計において、その特性が線形であること---1 つの物理量を変化させると他の物理量が比例して変化する---が理想的とされてきました。しかしながら、現実の電気的特性、磁気的特性、機械的・構造的特性では、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情報科学の先端理論と、そのエネルギー・モビリティ・ロボットへの応用について研究を進めています。

- 1. **応用数学・データ科学・情報科学**: 非線形数理科学とデータ科学の融合であるクープマン作用素(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. <u>エネルギーシステム・モビリティ</u>: 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. <u>ロボット・制御応用</u>: 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、誤って隣り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).

自動制御はなくてはならない technology!!



ハードディスクのヘッド制御



ロボットアームの軌道追従制御



ロケットの姿勢制御



電力系統の安定運用

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



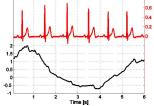


図1 電波による非接触心拍計測(左)と測定信号(右)

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)。

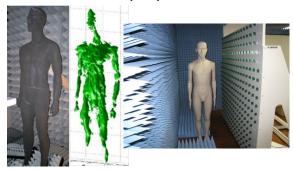
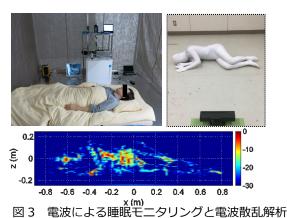


図 2 人体模型(左),電波イメージング立体画像(中央),アレーレーダシステム(右)





電波によるジェスチャー識別実験と信号軌跡

工学研究科 電気工学専攻 複合システム論分野

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

土居 伸二, 田中 俊二

1. 複合システム論とは

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

2. 複合システムとしての生命

複合システムという観点から、生命の仕組みを明らかにし、工学や医学への応用を目指す研究を行っています。我々の身体は、臓器という部品が集まり、臓器どうしが互いに情報・信号をやり取りすることで生命活動を維持しています。さらに、臓器は細胞という備品が集まって…という感じです。つまり、生体・生命は、非常に複雑で階層的な複合システムの代表例と言えます。たとえば、心臓や膵臓は、電気信号を用いて心拍や血糖値の制

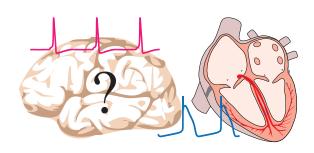


図 1: 脳や心臓と電気信号

御を行っています. もちろん, 私たちの脳も電気信号を用いて, いろんなことを「考えて」います. これらの仕組みを理解するために, 数学やシステム工学は大変役に立ちます. 仕組みが分かれば, 生命を真似た高性能の機械を作ったり, 画期的な治療法を開発できると考えています.

3. システム最適化

最適化問題とは、ある条件のもとでもっと もよい解を見つける問題のことです。たと えば、目的地にもっとも早く着くような道 順を求めるといった身近な問題から、もっと も頑丈な鉄橋の構造を求める問題まで、最 適化問題は様々な場面で現われます。当研 究室では、生産システムや配送・輸送シス

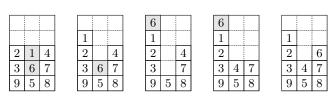


図 2: コンテナを積み替えて整列する問題 (下から上へと番号が減少する順に並べ直す)

テムにおける最適化問題として、最適な生産計画を求める問題、エレベータの運行を最適化する問題、コンテナを積み替える問題などを扱っています。なかでも、組合せ最適化問題と呼ばれる、順列や組合せで解を表せる問題を対象としています。たとえば、コンテナを積み替えて整列する(上から下へ、コンテナ番号が昇順に並んだ状態にする)問題は、どのコンテナをどこに、どのような順序で積み替えるかを、必要となる積み替えの回数が最小となるよう決定する問題です。したがって、コンテナとその積み替え先の組合せを並べた列で解を表現することができます。このような組合せ最適化問題のもっともよい解(最適解)を高速に見つけるためのアルゴリズムの研究・開発を行っています。

工学研究科 電気工学専攻 生体機能工学分野

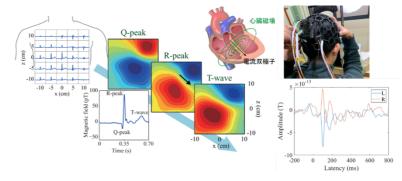
吉井 和佳 伊藤 陽介 上田 博之

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、スピンロックシーケンスを用いて神経磁場を直接計測し、神経磁場の発生時期と位

置を精度良く推定する技術を開発しています。また、物理方程式に基づく観測信号の生成過程を考慮した確率モデルを定式化し、直接観測できない信号源に対する統計的推論を行うことで、物理的な計測限界突破と高スループットを達成することに取り組んでいます。



時空間視聴覚場の分析合成系 ―タイムマシンをつくる―

従来のビデオに代わる究極の視聴覚メディアとして、自らの耳や目を用いて過去を追体験・再体験可能なタイムマシンの研究を行っています。このシステムでは、拡張現実 (AR) スマートグラスを用いて、過去にその場に存在した人・物体の自由視点での鑑賞を可能にし、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・カメラアレイから得られる多チャネル観測信号を上下階層にもつ「視聴覚場」(時空間上の連続関数)の

分析合成系を実現する必要があります。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。

工学研究科 電気工学専攻 超伝導工学分野

雨宮尚之、曽我部友輔

http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/

1. 超伝導とは?

超伝導体という物質は、液体窒素 (沸点-196℃) や液体へリウム (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することができます。**損失なく電流を流せること、非常に大きな磁界を発生できること**、これらの超伝導のメリットを活用すれば、様々な分野でイノベーションを起こすことができます。

2. 雨宮研究室の取り組み

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

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



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

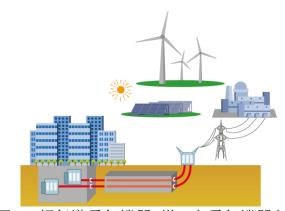


図 2 超伝導電気機器:様々な電気機器を超伝導化して省エネかつコンパクト化

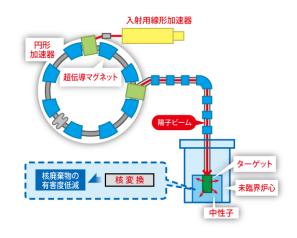


図3 超伝導電磁石を用いた加速器駆動核変換システム(ADS):核廃棄物の有害度を低減するシステム

工学研究科 電気工学専攻 電磁回路工学分野

久門 尚史

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

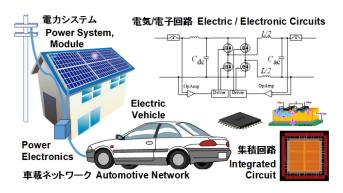


図 1 デバイスからシステムまでの統合回路

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.

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,

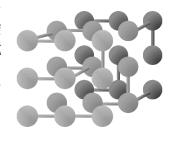


図2メタマテリアル

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.

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 図 3 P2P エネルギー伝送 一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.

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

工学研究科 電気工学専攻 電磁エネルギー工学研究室

教授:松尾 哲司,講師:美舩 健,助教:比留間 真悟

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

1. 計算電磁気学

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

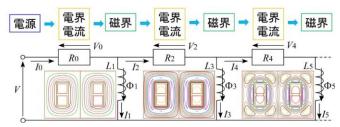


図1 電磁界の等価回路表現

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

最近では、電磁界を直交関数分解して、電磁界の応答を精度を損なうことなく、少ない変数の電気回路で再現する方法を開発し、モータ応答のシミュレーションに応用しています。図1では、まず、電圧源により生じる電流を $I_0 = V_0/R_0$ で表し、その電流が作る磁束を $\Phi_1 = L_1I_1$ 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により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。回転子部分は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モータに関する深い知識が必要です。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。

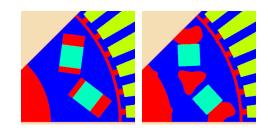


図2 基本形状(左)と最適化形状(右)

工学研究科 電気工学専攻 宇宙電波工学分野(生存圏研究所)

小嶋 浩嗣、栗田 怜、上田 義勝

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



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

1. 科学衛星による宇宙空間探査とデータ解析

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

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

2. 科学衛星・ロケットに搭載する超小型観測器の開発

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

3. 新規材料開発としての微細気泡の利用とその基礎特性の研究

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

工学研究科 電気工学専攻 マイクロ波エネルギー伝送分野(生存圏研究所)

篠原 真毅、三谷 友彦

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

1. ワイヤレス給電(マイクロ波送電)に関する研究

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

2. 宇宙太陽発電所 SPS 実現を目指した研究

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

3. マイクロ波加熱応用研究

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



図1 巨大なワイヤレス給電用実験装置 AMETLAB

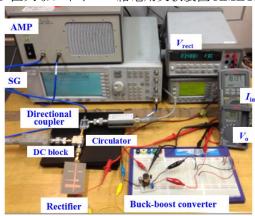


図2 測定中のマイクロ波受電整流回路

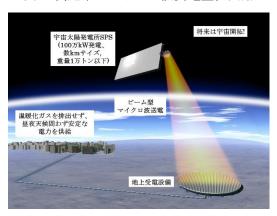


図3 宇宙太陽発電所 SPS のイメージ(2050 年頃?)

工学研究科 電気工学専攻 電波科学シミュレーション分野 (生存圏研究所) 大村善治、海老原祐輔

人類の活動領域は宇宙に広がり、宇宙の実利用は急速に進んでいます。しかし、光の速さに近いスピードを持つ粒子が飛び交い、高温のプラズマで満たされているなど、宇宙の環境は大変過酷です。宇宙環境変動は電力網に深刻な影響を与えることもあります。当研究室では、スーパーコンピュータ(図 1)を用いた大規模計算機シミュレーションによって宇宙環境を模擬し、その変動を正確に予測できる宇宙天気数値モデルの実現を目指しています。

地球放射線帯の形成メカニズム

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

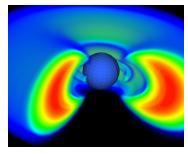


図 2: 地球放射線帯の模式図。

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。

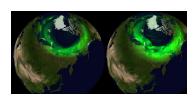


図3: オーロラに伴って流れる電流の強さ。左は現在の地球、右は約600年後の地球。

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

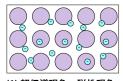
http//sk.kuee.kyoto-u.ac.jp/

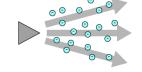
集積機能工学研究室の紹介

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、個々の性質だけからは想像できないような超伝導・磁性・テ

物質中に集積された電子や原子

真空中に集積された電子やイオン





(1) 超伝導現象・磁性現象(2) テラヘルツ発光

(3) 電界放出現象

図1:集積機能工学研究室の研究内容。

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。

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、

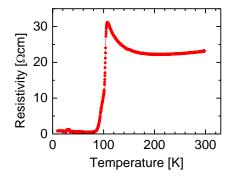


図 2: ビスマス系高温超伝導体の電気抵抗の温度依存性. 100 ケルビン前後で超伝導転移が起きている. *c*軸方向に 1 層だけ取り出して測定している.

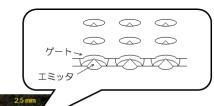
一見複雑な現象を「物理学」という言葉を使って自然と対話しながら簡潔に理解し、その機能性を引き出し、持続可能な社会の形成へ貢献することが私たちの研究目標です。

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。

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

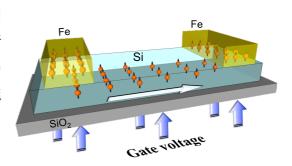
1. 研究室の方向性

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く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、衞藤雄二郎、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」いると、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、人口原子とのインターフェースが容易です。私たちは、光子を自在に制御、検出するために、ナノスケールの微小光デバイスを使った光量子デバイスや単一光子源の実現について研究しています。また、光子を操る光量子回路のほか、通常の光の限界を超えた「光計測」の研究にも取り組んでいます。

2. 研究テーマ

光量子回路

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

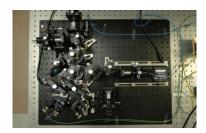


図 1. 量子もつれ光生成装置

光量子計測

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

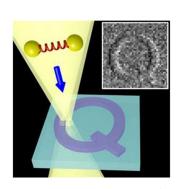


図 2. 量子もつれ顕微鏡

ナノフォトニクスデバイスの開発

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

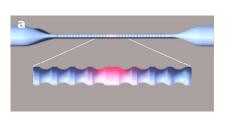


図 3. 光子を操る、微小光素子

工学研究科 電子工学専攻 半導体物性工学分野(木本研究室) 木本 恒暢、西 佑介、金子 光顕

1. 半導体とは

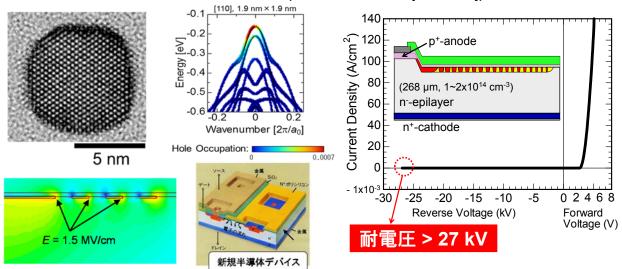
皆さんは「半導体」という言葉を聞いたことがあるでしょうか? 導体と絶縁体の中間? 半導体は、パソコン、スマホ、太陽電池はもちろんのこと、エアコン、炊飯器、ゲーム機、電車、銀行 ATM など、あらゆる電気電子機器に必ず使われ、その中核的役割を果たしています。2014年にノーベル物理学賞の対象となった青色/白色発光ダイオードも半導体です。我が国が強みを発揮している自動車も高度に電子化され、その性能は半導体で決まると言っても過言ではありません。このように半導体は、現在の高度エレクトロニクス社会を支えるハードウェアと言えます。

2. 研究背景と研究室の取り組み

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

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

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



工学研究科 電子工学専攻 電子材料物性工学分野

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が、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 (CO_2) 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をで、金属電極の間に棒状の分子が橋渡しされています。

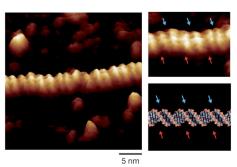


図1: 原子間力顕微鏡により捉えられたDNAの二重らせん構造. 右上図: 二重らせんの2種類の溝(主溝と副溝)の拡大像. 右下図: 構造モデル図.

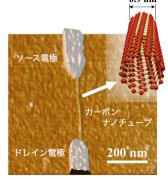


図 2: 2 つの金属電極 (300 nm 間隔) を つなぐカーボンナノチューブ分子. 右上: そのモデル図.

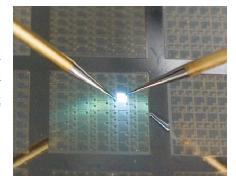
工学研究科 電子工学専攻 光材料物性工学分野

川上 養一、船戸 充、石井 良太

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

図はその一例として、私たちが提案した微細三次元構造 LED からの白色発光を示したものです。通常の LED チップは二次元構造をしており、赤や青など単色光は出せますが、直接白色を得ることはできません。(市販の白色 LED には、ある工夫がなされています。調べてみましょう。) それに対して、微細三次元構造では、構造表面を構成する複数の面が異なった色で発光するため、その加色混和によって白色をはじめ、パステル色などさまざまな発光色が得られることを特長としています。ただし、その作製には、ナノメートル (nm) オーダで制御された光材料結晶の育成技術の確立が必須です。また、微細構造の光学的特性は nm スケールで空間分解して評価しなければなりません。そこで、材料からの発光を、数十 nm の分解能で観察することが可能な顕微鏡を開発し、企業と共同で製品化しました。一

方、新たな応用分野としては、白色 LED を医療照明に 用いることを提案して、LED を組み込んだゴーグルを 試作し、手術に使用してもらっています.以上のよう な研究は、研究室の中だけでできるものではありませ ん. 私たちは、国内外の大学、企業などと共同的に研 究を行い、多くの人の技術・知恵を結集して新しい成 果を生み出そうとしています.半導体による固体照明 は新しい技術ですから、まだ見えていない応用分野が たくさんあると考えています.



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

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」 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

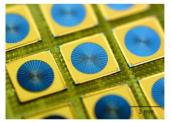
7-1

ザ

力

土曜日

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 🔼

2022年(令和4年)11月12日

電気自動車

E V

のモータ

京大G「フォトニック結晶」で

EVの加工 応用期待

只都大のグループが発表した。 ザーを作ることに成功したと、

亲厅

ク結晶」で、高出力の青色レー

の穴から光を出す「フォトニッ

半導体に規則的にあけた極小

色レーザーは、

銅をはじめ金属

着B

剪钗

窒化ガリウムを原料とする青

リアルズにこのほど掲載され

誌コミュニケーションズ・マテ

、の応用が期待される。英科学

に使われる銅の加工技術など

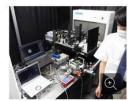
ク結晶」による半導体レーザーで、従来の大 型レーザーに匹敵する輝度(単位面積、単位 広がりあたりの光の出力) にまで高め、連続 して動かすことに成功した。

京都大の野田進教授らの研究チームが、基 板の上に規則正しく穴を開けた「フォトニッ

① 毎日新聞 ①

高出力で小型化可能 「熱光発電」に熱視線 京大チーム理論限界突破

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 課題である発雷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 - ムが、加熱した光源から取り出せる光工 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。

日本經濟 新聞

2023年(令和5年)6月15日(木曜日)

金属加工レーサー 数十分の1に小型化

京大が技術、価格も安く

れる可能性がある。 という素子を使い、

は 上が中心と高価で使用す 辺が数十歩が以上と大き タイプなどがあった。 を流してレーザ を満たした箱の中に電気 杉
が
の
装置を
つくり、 高まった。 ンズなどが不要で、 一酸化炭素(CO罩

加工コストを引き下げら 明るさを高めた。価格も する「フォトニック結晶」 できるフォトニック結晶 じ込めたり、増幅したり 研究成果は英科学誌ネ 掲載された。光を閉 自動車や機械の (電子版) に14

企業と協力して直径約1 集中しやすく、 従来の加工用レーザー 光を制御する多数のレ 価格も200万円以 光の明る 実

言言 衆斤 图 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様キャンパスで)

距離を測る高性能の光セ

不可欠とされる。 車やロボットの自動走行に

大の野田進教授らが米国 ンサーを開発したと、

出力のレーザー光を出すた

従来は、まっすぐ進む高

めには、複数のレンズを組

広い応用が期待できると

装置が必要だった。 み合わせるなど大がかりな



結晶」を使い、対象までの できる素材「フォトニック 自動運転に応用 光の進路を精密に制御

間から、距離を計算する。 こうしたセンサー技術は、

物体に当てたレーザー光いう。 が跳ね返ってくるまでの時

高

京大教授ら「フォトニック結晶」採用

なしでも、30が先で直径5 ることに成功した。レンズ を広げずに高出力で照射す 小な穴の構造を工夫し、光 たレーザーの実現にめどを にフォトニック結晶を使っ 先では光線が広がって弱ま で程度までしか広がらない ってしまう。 を使わないと、例えば1025 野田教授らは1999年 センサーのメーカ

ップを開発したと、 ている。 ープは、フォトニック結晶 る予定となっている。 ーションズに発表した。レ 誌ネイチャー・コミュニケ る35・
が四方の微小なチ ーザー光の方向を制御でき を利用して、電気信号でレ 晶の実用化に向けて大きな また、 歩を踏み出せた」と話し 野田教授らのグル 「フォトニック結

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

工学研究科の野田進教授らは

積み重ねて幅広い分野での産業 は「まずは大きな える出力が必要で、 工に用いるにはさらに10倍を超 心用を目指したい」 ただ、 青色レーザーを金属加 一歩。改良を 野田教授

級の青色レーザーを実現でき 来に比べて千倍以上となる1ペ れるようにした。その結果、 した。穴の形や大きさも均一にせ取り出す層の間隔などを工夫 元を増幅させる層と光を共振さ 光の漏れや広がりを抑えら 従

デバイス全体の構造を見直し、

工学研究科 電子工学専攻 量子電磁工学分野

杉山 和彦、中西 俊博

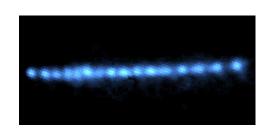
1 概略

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

2 主な研究テーマ

イオントラップ

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



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

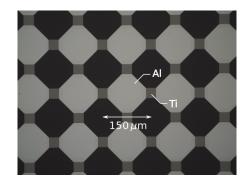
モード同期レーザによる周波数計測

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



メタ物質

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



変えることで、より機能性の高いメタマテリアルを実現することを目標とした研究も行っています.

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

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野

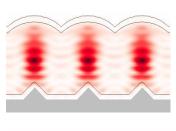
Menaka De Zoysa、井上 卓也

1. はじめに

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

2. 研究内容

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



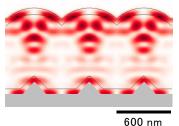
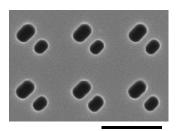
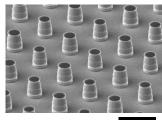


図1: 光ナノ構造の電磁界解析例 (光ナノ構造を導入した太陽電池)



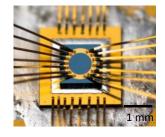
300 nm



Max

電界強度

図2:種々の光ナノ構造の



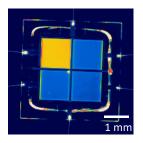


図3:光ナノ構造を利用した 次世代光源の開発例

- (上)高出力レーザ
- (下)多波長熱輻射光源

電子顕微鏡写真

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 Chenhui Chu 村脇 有吾 Yin Jou Huang Fei Cheng https://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/

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

文化差を乗り越えるための機械翻訳周辺技術の開発

機械翻訳はここ5年ほどで劇的に精度が向上しました。Google Translate や DeepL のような機械翻訳サービスは身近になっていると思います。ただ、機械翻訳を使って本当に異文化コミュニケーションを実現しようとすると、言語間でうまく対応がつかな



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

視覚・音声・言語のマルチモーダル翻訳 機械翻訳 の精度向上の背景にはニューラルネットとよばれる モデルの導入があります。ニューラルネットには、 言語に加えて、視覚や音声の情報を柔軟に統合できるという利点があります。例えば、ドラマのセリフ



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

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



情報学研究科 知能情報学専攻 コンピュータビジョン分野

西野 恒 櫻田 健 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「視る」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.

L 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



遠くからの視線行動理解

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。

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



素材と物体形状復元

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。

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,





運転環境における死角推定

情報処理が一体化された新たな撮像システム(コンピュテーショナルフォトグラフィ)の 開発をおこなっています。最近の研究では、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。

情報学研究科 通信情報システムコース ディジタル通信分野 (原田研究室)

原田博司教授 水谷圭一准教授 香田優介助教

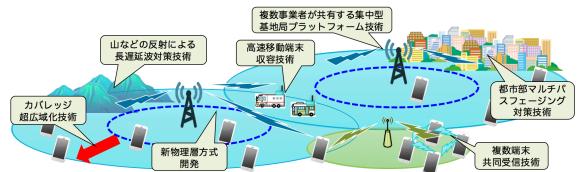
http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

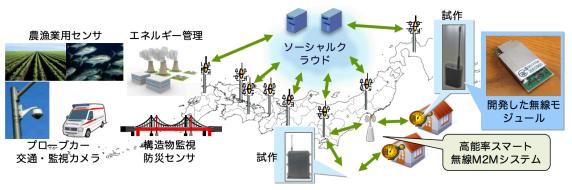
現在は誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、高速な伝送速度だけでなく、より高い信頼性や、リアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に「人と人の通信」だけでなく、ありとあらゆる物に無線機が内蔵され、様々な情報を収集するような「物と物との通信」など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信に使用出来る周波数資源には限りがあるため、このままでは爆発的に増加する無線通信への要求に応えることができません。現在、第4世代移動通信システ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

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

本気で世の中を変え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

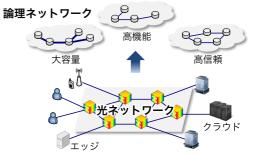


図 2: 大木研究室の研究テーマ

情報学研究科 通信情報システムコース 情報回路方式分野

佐藤 高史 粟野 皓光 http://www.pass.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

1. システム LSI とは?

私たちの身の回りにはパソコン、携帯電話、デジタルカメラ、デジタルテレビ、ビデオ録画・再生機器、電子辞書、ゲーム機など、様々な情報機器があふれており、生活に欠かせないものとなっています。これら情報機器には、高速な通信や、高度なメディア処理(画像、音声など)を行うための複雑な大規模集積回路(LSI)が使われています。皆さんはこれらの機器を分解してみたことはあるでしょうか? 図 1 に示すように、情報機器の中にはボード(基板)と呼ばれるものの上に様々な電子部品が載っています。LSI はその中核をなす部品です。数センチ角の小

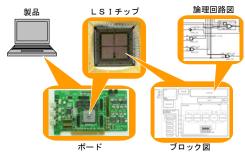


図1:情報機器の中身

さな部品ですが、中には<u>数十億個のトランジスタ</u>が作り込まれ、意味のある動作をするように互いに結線されています。 大規模で複雑な LSI を製造するために高度な技術が必要となるのはもちろんですが、<u>高性能で低消費電力となる合</u> 理的な構成を考え、誤りなく動作するものを短期間に設計する技術も非常に重要です。

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

2. 研究室の取り組み

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

「高信頼」回路設計技術: 自動車やロボット、医療分野など、LSI の応用範囲が広がるにつれて、回路の性能を高めることと同時に、信頼性を確保することが強く求められています。物理が支配する素子レベルのミクロな視点から、システム全体を俯瞰するマクロな視点までを的確に抽象化・モデル化して、回路を最適に設計する技術が必要となります。我々の研究室では、大規模な回路の性能と信頼性を設計するための数理的手法、回路構成手法、および設計手法

<u>についてハードウェアとソフトウェアの両面から</u>研究しています。特に、微細化されたトランジスタの振る舞いを模擬する統計的素子モデリング技術、回路特性をモニタして安定動作に役立てるセンサ回路技術、回路の振る舞いを製造前に予測する統計的シミュレーション技術、回路が設計どおりに動作するかを判定するテスト技術について研究をすすめています。

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

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

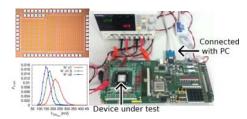


図 2: 試作チップとその測定の様子

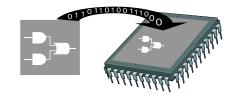


図 3:「書き換え」可能な回路



図 4: 画像認識システムの例

情報学研究科 情報学専攻 通信情報システムコース 大規模集積回路分野 新津 葵一

https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ http://id-lab.jp/

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。

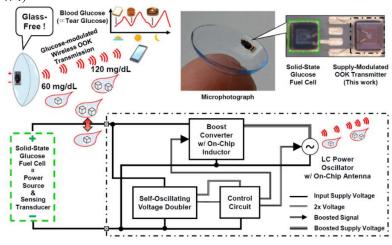
本研究室では、この大規模集積回路の製造プロセスの進化に親和性が高く、半導体産業の発展に伴って拡張的に性能向上が可能(スケーラブル)な、高エネルギー効率・大規模集積回路設計基盤技術に取り組みます。回路技術をイラスト上で定性的に構想するところから、計算機での定量的なシミュレーション、そして実集積回路デバイス上での評価までを一貫して実施します。深い集積回路への知識と共に、応用を見据えて回路性能に落とし込む幅広い視野を育むことを目指します。下記にテーマ例を示します。

- ・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・さきがけ)
- ・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、これまでに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着け、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 通信情報システム専攻 超高速信号処理分野 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、天気に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(「ウィンダス」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。ウィンダスの導入によって、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よね。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。地上ー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

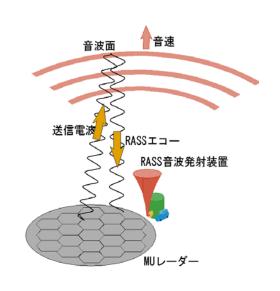
教授: 橋口浩之、准教授: 西村耕司、特任准教授: 矢吹正教

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て気圧、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

とトの高次情報処理である「意思決定」過程の解明に、情報学と認知科学との融合的アプローチによって取り組んでいる。個体による意思決定・環境適合のモデルである「強化学習」に注目し、変動するあるいは複数のエージェントが存在するような複雑な環境に対して、効率よく適合する機械学習の方式を開発し、ロボットの制御などへ応用すること、また、機械学習法として開発された「機械の知」が「自然な知」である脳において実現可能であるかどうかを認知科学実験と非侵



襲脳活動計測装置を用いて検証すること、などを具体的な研究課題としている. さらに、ヒトの脳活動から意思決定に関する信号を再構成する、ブレインマシンインターフェースの研究も行っている.

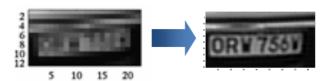
計算神経科学とニューロインフォマティクス

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

ベイズ超解像と画像情報表現

情報学手法によって物理過程である光学系が規定する性能を超えた解像(逆光学)性能を獲得する技術を「超」解像と呼ぶ. 数理統計科学が開発してきたベイズ統計と仮説検定の理論がその基礎となっている. 超解像技術

の発展により,生命現象のモデリングに必須な生体高分子 の高精度時空間計測や,人間の認知あるいは感性に関わる 情報の可視化技術の研究を行っている.



統計的バイオインフォマティクス

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

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

情報学研究科・システム科学コース・システム情報論講座医用工学分野(野村研究室) 教授 野村泰伸、助教 今井宏彦

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が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。

モデルベースド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常者と患者の分類や、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ドアプローチは、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常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。

モデルベースド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。

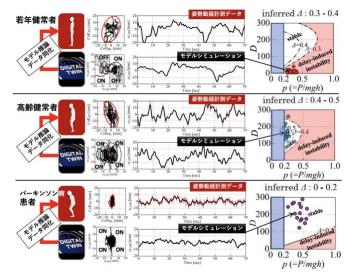


図 1. ヒト立位姿勢デジタルツインに基づく姿勢ゆらぎ解析

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報的に人の知覚を拡張する拡張現実感技術を用いて、発電プラントの現場作業を支援する新しい手法の研究開発を進めています。

2. オフィス環境と執務者の知的生産性向上

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

3. 環境配慮行動の促進

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

知的生産性 人間情報行動計測

コミュニケーション支援

オ流張現実感技術

デ・ジ・ダルサイネージ

CO2排出量規制

(中業支援

ヒューマンインタフェース技術で支える 新しいエネルギー社会システムの創成

エネルギー科学研究科・エネルギー基礎科学専攻 電磁エネルギー学分野 中村祐司、松山顕之

http://www.em-energy.energy.kyoto-u.ac.jp

当研究室では、人類の究極のエネルギー源として期待される核融合(フュージョン)エネルギーの実現に向け、高温プラズマの閉じ込めに関する理論・数値シミュレーションと実験解析を行っています。特に、ドーナツ型のプラズマの平衡状態や流体安定性、非線形現象の解析など、最新の理論・数値シミュレーション手法を駆使し、1 億度の超高温プラズマにおける物理現象の理解に迫ります。

1. 高温磁化プラズマの電磁流体力学に関する理論・シミュレーション研究

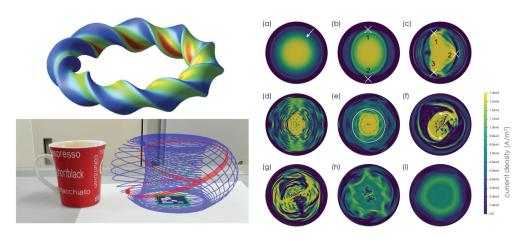
ドーナツ型のプラズマ閉じ込め装置における高温プラズマの磁気流体力学的な性質を、理論・シミュレーションを通じて解明します。当研究室では、特に計算科学や数理物理手法を駆使し、対称性を持たない系における力学的平衡状態を同定する「3次元平衡」に焦点を当てた研究を進めています。

2. 高温プラズマの崩壊現象 (ディスラプション) に関する研究

フランスで建設が進む核融合実験炉 ITER における最難関課題とされる高温プラズマの崩壊現象 (ディスラプション) に関する研究を行っています。ディスラプションの物理機構を解明するとともに、世界中の研究者と協力し、ディスラプション発生時に装置を保護する制御手法の開発を進めています。

3. フュージョンエネルギー開発を加速するサイバー技術の研究開発

フュージョンエネルギーの実現には、1 億度を超える炉心プラズマを安定に保持する技術が必要です。人工知能や機械学習、大域的最適化、ネットワーク技術、仮想現実感技術など、さまざまな情報科学技術を活用するプラズマ・インフォマティクスの研究を進めています。



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

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

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

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

(1)結晶方位を揃えた高温超伝導線材の開発

高温超伝導体物質はどこでも手に入る液体窒素で冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態とな る画期的な材料です。当研究室ではこの高温超伝導物質が世界規模の送電線網の候補材料と 考えています。写真1のように、独自に開発した結晶方位を揃えた金属テープ上に、半導体 製造技術とプラズマ、イオンビーム、レーザー(写真2)などを組み合わせた新しい成膜技術を 駆使して結晶の向きを揃えた高温超伝導体物質を作製することに成功しました。また、新規 は結晶整列手法、エピタキシャル成長技術、分析・解析技術の開発にも取り組んでいます。

(2)次世代 MRI 診断装置向け超伝導線材開発に関する研究

X線による被爆なしに身体内部の立体画像が撮影できる MRI 診断装置は、広く普及してい ます。しかし、その運転には高価で資源の枯渇が心配されている(液化)へリウムを要します。 当研究室では、液化ヘリウムを使わない MRI 診断装置の実用化を目指して、金属系で最も高 い超伝導転移温度を有し安価で加工性が良い MgB2 超伝導体に着目し、薄膜型超伝導電線の 開発を行っています。



じ方向に揃えた金属テープ



写真1.全ての結晶の向きを同 写真2.レーザー蒸着装置と イオンビーム蒸着装置



写真3. 電子顕微鏡と 原子の配列状態を観察する装置

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻 プロセスエネルギー学分野 川山 巌

https://dpe.energy.kyoto-u.ac.jp/

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「畜エネルギー」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1THz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・デイバ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)。

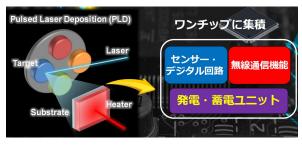


図1. 薄膜技術を用いた機能集積の概念図

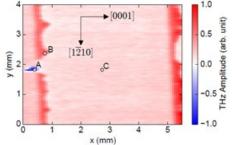


図2. テラヘルツ波による GaN 表面 の分極構造の可視化



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の私たちの研究活動の概要 を「cue」から読み取っていただけると思います。



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2024 実行委員会

目 次

(本文中の所属は執筆当時のものです)

1.	電気電子工学とは? その面目さど寸偏範囲(第47号)
	和田修己
2.	宇宙線による情報システムの誤動作
	―メカニズム解明と対策技術の開発を目指して―(第48号)
	橋本昌宜6
3.	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 ······ 10
4 .	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15
5.	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)

電気電子工学とは? その面白さと守備範囲

電気工学専攻 電磁回路工学分野 和 田 修 己

1. はじめに

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

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

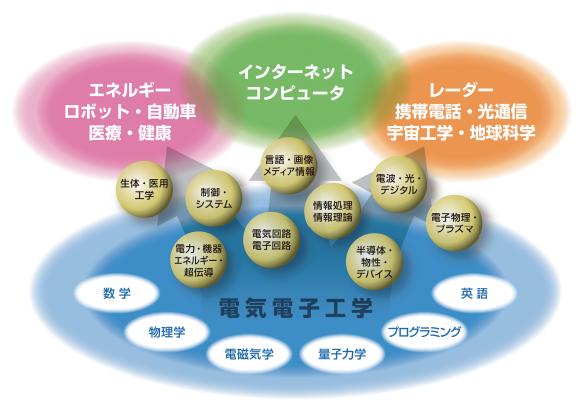


図1:電気電子工学の守備範囲

2. ものつくりと電気電子工学

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

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

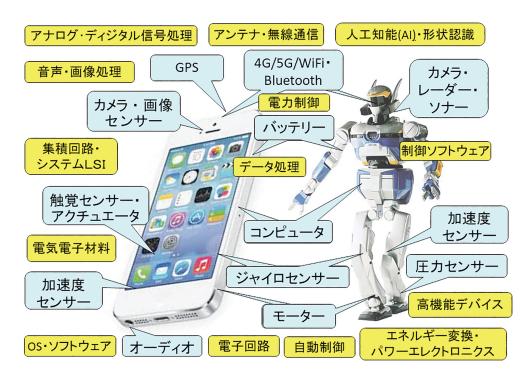


図 2: ものつくり (ハードウェアの開発・設計) と電気電子工学

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

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

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

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

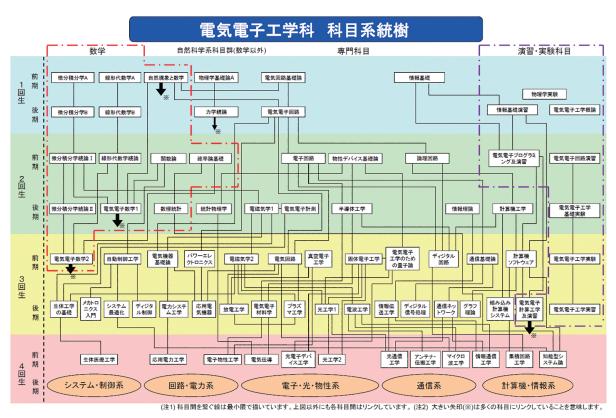


図3:電気電子工学のカリキュラムと科目構成とその相互関係

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

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

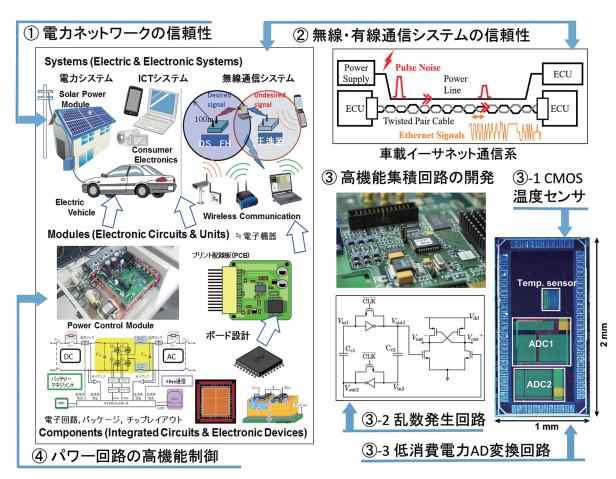


図 4:電磁回路工学分野の全体像と守備範囲・研究テーマ

3. 電磁回路工学研究室での研究テーマ

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

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

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

4. おわりに

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

宇宙線による情報システムの誤動作 一メカニズム解明と対策技術の開発を目指して一

情報学研究科 通信情報システム専攻 超高速信号処理分野 橋 本 昌 官

1. はじめに

AI や IoT (モノのインターネット; Internet of Things) などの発達により、社会はますます情報システム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、さらにはその中核を担う半導体集積デバイス (LSI や VLSI と呼ばれることが多いです) には高い信頼性が求められます。トランジスタの微細化によってもたらされた集積デバイスの極低電力化・極小体積化は、環境に溶け込んで存在に気づかないコンピューティングを実現しつつあります。一方で、トランジスタの微細化が不透明さを増す中、新しい原理に基づいたコンピューティングの模索が続いています。本分野では「コンピューティング基盤を創る」を掲げて、以下の項目に答えるべく研究を行っています。

- 信頼できる高性能コンピュータをいかに設計するか
- 新原理次世代コンピューティングをどう実現するか
- 我々の生活を変えるコンピューティングシステムはな にか

cue46号の新設研究室の紹介で、それぞれの概要を紹介しましたので、今回は集積デバイスの信頼性に注目し、宇宙線による誤動作問題を取り上げたいと思います。

2. 地上に降り注ぐ宇宙線とソフトエラー

宇宙線は、宇宙空間を飛び交う高いエネルギーを持つ放射線のことで、主な成分は陽子です。原子核は、陽子と中性子と呼ばれる粒子から構成されていて、陽子は水素イオン(H+)です。中性子は原子番号に影響せず電荷を持ちませんが、陽子とほぼ同じ質量を持っており、質量数に影響します(宇宙のスケールから、原子核、陽子や中性子、さらには素粒子までの大きさの違いを直感的に理解する動画を紹介します https://www.youtube.com/watch?v=44cv416bKP4)。

宇宙線は、地球磁場の影響で大気圏に侵入はしにくくなっているものの、常時飛来してきています。大気圏に突入した宇宙線は、大気を構成する原子核に衝突し、2次粒子を発生させます。この現象が連鎖的に生じ、大気中で大量の2次粒子が発生する現象は空気シャワーと呼ばれています(図1)。大量発生する2次粒子には、中性子やミューオンが含まれています。ミューオンは電子と同じ電荷量を持ち、



図1:宇宙線と空気シャワー

電子より 207 倍重い粒子です。

中性子やミューオンは高い物質透過性を持ちます。例えば、ミューオンはピラミッドや火山も透過するため、その特性を使って内部構造を調べる取り組みがあります。NHKスペシャルなどでご覧になった方もいるかも知れません。当然、我々の体の中も透過しています。手のひらをかざすと、毎秒1個程度の高速な中性子やミューオンが突き抜けています。

一方で運が悪いと(つまり低い確率で)物質中の原子核と中性子やミューオンが相互作用を起こします。同様に集積デバイスを構成する原子核とも相互作用を起こします。一例を図 2 に示します。シリコン原子が中性子と反応し、この例では酸素原子に変化しています。また、陽子や α 粒子(ヘリウムイオン)が生成され、トランジスタ近傍を移動しています。これらの粒子はエネルギーを電子生成に費やして、最終的にエネルギーがなくなって止まります。その結果、粒子が移動した軌跡上の電子の密度が高くなり、トランジスタにノイズ電流を与えます。

集積デバイス中には、ディジタルの 0, 1 を覚えておくためのメモリ素子が多数存在します。メモリ素子にはトランジスタが含まれており、先に述べた電流ノイズによって記憶値が 0 から 1 に変わったり、1 から 0 に変わったりします。このように起こる値の反転をソフトエラーと呼びます。トランジスタなどのハードウェアが壊れてしまうのではなく、ただ値だけが全く痕跡を残さず壊れ、その後も動作し続けることができるので、「ソフト」エラーと呼ばれています。

3. ソフトエラーが社会に与える影響

パソコンやスマートフォンでみなさんの写真やメッセージなどのデータはもちろん、プログラムや計算の途中結果などもメモリ素子に置かれます。例えば写真の表示プログラムでは、1ビットのデータの値が0から1に変化しても多くの場合は気づかないと思います。一方で、同じ画像を入力としても、自動運転の車が歩行者を見つけるプログラムでは、歩行者の有無を表すデータが間違うと大惨事になる可能性があります。介護ロボットが誤動作すると、人間が怪我をする可能性があります。他にも、銀行口

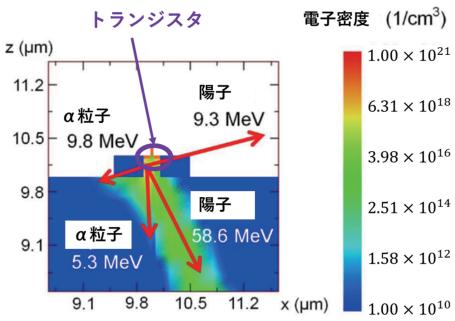


図 2:トランジスタ近傍での核反応例 (n+28Si -> 3n + 2p + 2 α +16O)。核反応によって原子番号が変化し、陽子、 α 粒子などが飛散している。陽子や α 粒子によって、トランジスタ近傍の電子の数が増えている。 n は中性子、p は陽子、 α は α 粒子、原子番号の左上の数字は質量数。MeV はエネルギーの単位。

座の管理も電子化されていますので、例えば残高が変わってしまうかもしれません。実際に飛行機の急降下事故の要因として、ソフトエラーの影響の可能性が最も高いとした海外のレポートがあります。

情報がオンラインシステム上にあり、それらが連携する社会システムが広がっています。これは高い信頼性で情報システム、さらにそれを構成する集積デバイスが高い信頼性で動作することを前提としています。もちろん、集積デバイスの信頼性が高くても、ソフトウェアにバグがあれば誤動作しますが、高い信頼性を必要とするシステムでは、ソフトウェアも信頼性を高める設計方法が導入されています。一方で、宇宙線を起因とするソフトエラーは確率的に起こる現象で、完全に取り除くことができません。例えば、なにかの材料で覆って中性子やミューオンが入ってこないようにしようとしても、高い物質透過性を持っているので効果がほとんどありません。したがって、確率は低いもののエラーが起こる前提で高信頼システムを設計する必要があります。

ここで、確率の低さには注意が必要です。例えば1台のコンピュータに注目すると10年に一度しかソフトエラー起こらない場合でも、10万台のコンピュータが動作していると、1時間に一度はいずれかのコンピュータにエラーが起こります。スマートフォンだと多くは再起動すれば済む話だと思います(そもそもソフトウェアのバグの影響のほうが大きいと思います)が、大規模なスーパーコンピュータでは、再起動が頻繁すぎて計算どころではなくなってしまいます。実際、スーパーコンピュータではこの問題がよく理解されており、神戸のポートアイランドに設置された京や富岳などでも最後に紹介するエラーを訂正する設計が取り入れられています。他にも、多数あるネットワーク通信装置で、ソフトエラーが原因の誤動作が頻繁に起こっていることも新聞報道されました。

4. ソフトエラーの評価方法の研究

ソフトエラーは不可避の問題ではあるものの、確率が低いのも事実であり、社会の脅威となるかは、慎重に見極める必要があります。この見極めには、実際に大量の粒子からなるビームを集積デバイスに照射する加速試験が一般に行われます。図3に実際に我々が実験を行っている一例を紹介します。この写真では上部からビームが飛んできます。その軌跡の上にメモリやプロセッサなどを並べて動作させ、エラーの頻度を評価します。

地上に届く中性子は様々なエネルギーを 持っています。地上で動作する集積デバイスのエラー確率の評価には、地上のエネル ギー分布を持つビームを照射すべきです。 しかし、地上のエネルギー分布を持つビームが出力できる施設は世界に4箇所しかありません。これらの施設は物理実験が主目的であり、集積デバイスの評価には不足しています。

そこで、我々は企業や大学、研究機関の 方と力を合わせて、地上のエネルギー分布



図3: 粒子ビームを用いたソフトエラー確率評価実験の 実験風景

を持たないビームであってもエラー確率の評価に利用できるようにする手法の開発を進めています。現在は、開発した手法が有効かどうかを、様々な集積デバイスで評価する検証段階にあります。将来的には、世界標準となる評価手法にしたいと考えています。

5. ソフトエラーの動向

集積デバイスは、御存知の通りトランジスタが微細化されることで、性能向上を続けてきました。近年は微細化だけでなく、トランジスタ形状も進化を続けています。ソフトエラーの観点では、トランジスタ形状の変化は、ノイズ電流量の変化や、ノイズ耐性の変化につながるため、常に最新のトランジスタでの状況を把握し、その傾向がシミュレーションで確認できるように調査し続ける必要があります。

トランジスタの微細化は、新たな粒子の脅威を生む可能性があります。冒頭に、中性子とミューオンがソフトエラーを起こすと紹介しましたが、つい最近までミューオンはソフトエラーを起こす要因とは考えられていませんでした。我々のグループが、実験でミューオンがソフトエラーの驚異となりうることを世界に先駆けて確認しました。その後も、微細化したトランジスタへの影響調査や、ミューオンがソフトエラーを起こす現象をシミュレーションで再現する研究を継続して行っていて、将来の影響の大きさを明らかにする研究を進めています(図 4)。この研究は、理学部の先生や学生との共同研究となっており、理学と工学の興味が重なる面白い研究テーマとなっています。

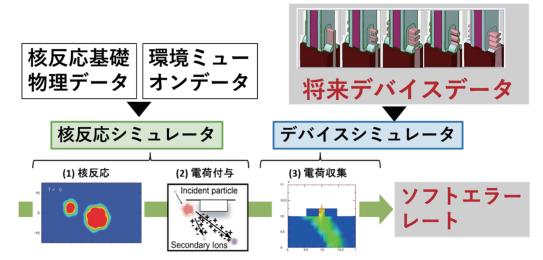


図 4: ミューオンによるソフトエラーをシミュレーションで再現し、将来動向を見極める研究

6. 今後の展開

最初に説明したようにソフトエラーは集積デバイス中に必ず発生します。したがって、エラーが発生してもシステム全体が問題を起こさないようにする必要があります。例えば、集積デバイス内では、エラーを見つけたり訂正したりできるエラー訂正符号の利用がメモリに対して進められています。しかし、エラー訂正符号が適用できない回路部分も多く存在します。ソフトエラーがシステム内をどのように伝搬するのかを把握し、エラーをいち早く見つける技術が求められています。これらの技術開発は、集積デバイスの中だけでなく、オペレーティングシステムやソフトウェアとも強調して進めていく必要があります。一方でこれらのエラー対策技術は性能を低下させたり、製品コストを上昇させたりする要因となります。我々も組み込みプロセッサや GPU と呼ばれる並列プロセッサに注目して、エラーを素早く効率よく見つける方法の開発を進めています。必要十分な対策が施された安全安心な社会システムの実現に向けて、研究活動を今後も進めていきます。

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ので、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)。

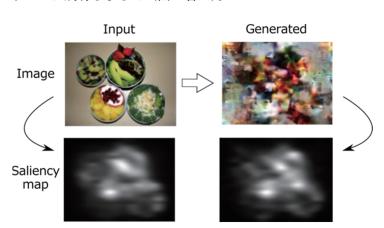


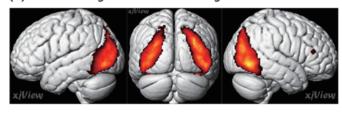
図 1. 本研究で生成した画像ペアの一例 左上が自然画像で、右上が非自然画像、 それぞれの下にある画像がそれぞれの 顕著性マップ。顕著性マップは、白色 に対応する位置に目が惹かれやすいこ とを示す。 それぞれの顕著性マップは 類似しているが、自然画像と非自然画 像は全く異なる画像となっており、非 自然画像では文脈情報が少ない。

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、これまでに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

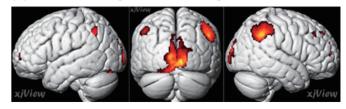


図 2. 脳活動解析の結果

自然画像と非自然画像を見せたときの脳活動の差分解析。 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読(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)はオックスオ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読解析を行いました。

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て貰えないにも関わらず、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読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か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/

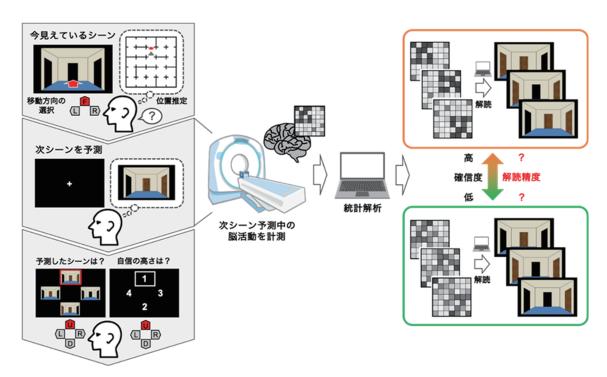


図3. シーン予測課題と解析手法の概念図

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ています。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の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

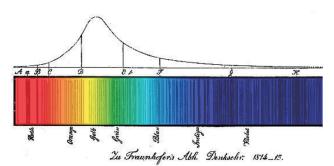




図 1 フラウンホーファーが発見した太陽スペクトルにおける無数の暗線(1817 年図の再現 [2])と、 演示実験の様子 [Public domain, Wikimedia]。望遠鏡の先にプリズムが見える。

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元素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

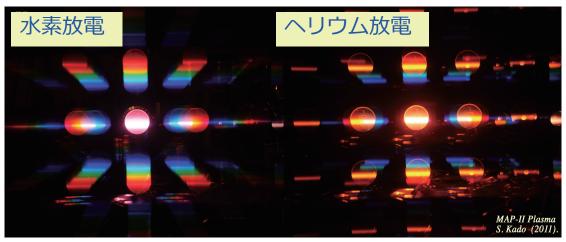


図 2 直線型装置 MAP-II 装置における、水素とヘリウムの直流アーク放電放電のスペクトル写真。クロス回折格子フィルムを通してカラー撮影。

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き、[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

$$\frac{d[M]}{dt} = \left[\text{K から流入} \right] - \sum_{\substack{f \in \pm \pm \\ }} \left[\text{M から流出} \right] = \left[\text{K} \right] \times 0.01 - \left[\text{M} \right] \times (0.03 + 0.05)$$

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 殼]、[M 殼] 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

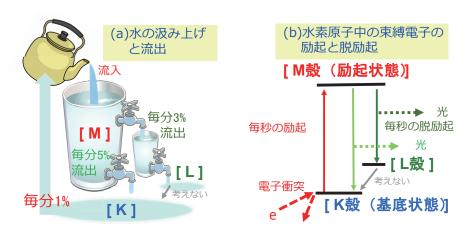


図3 (a) 水の汲み上げと放出のバランス方程式を与える物理モデル。(b) 3 準位に着目した、プラズマ中の原子過程を記述する物理モデル。

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、美しいオーロラの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ていることが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 $10^7 \sim 10^8 \mathrm{s}$ すなわち、ナノ秒のオーダですので、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

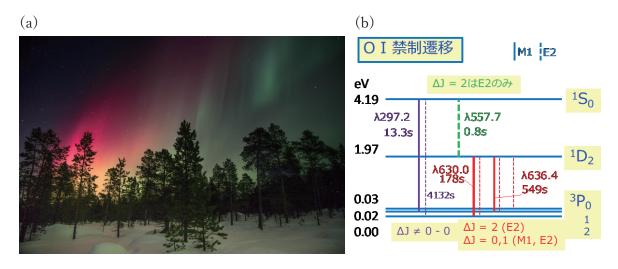


図4 (a) 典型的な緑(557.7nm)と赤(630.0、636.4 nm)の Type-A オーロラ [Public Domain, https://publicdomainq.net]。(b)酸素原子(O I)の禁制遷移を表すエネルギー準位図。 λ は波長 [nm]、s の前の数字は準位寿命 [秒]

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ます(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

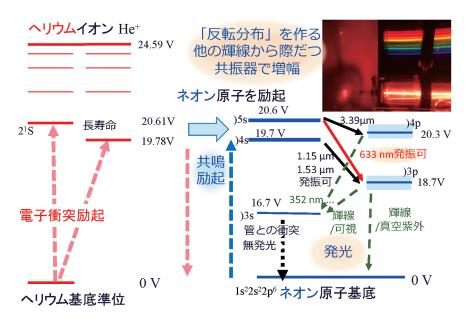
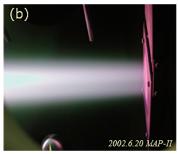


図 5 ヘリウム・ネオンレーザー発振に関連するエネルギー準位図。ネオンの励起準位の")"は、便宜上、基底にあった 2p 電子の 1 つが")"の後に書かれた軌道に励起していることを表す。





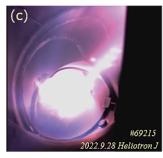


図 6 (a) 直流グロー放電による水素プラズマ(電子温度約 4 万 \mathbb{C})、(b) 直線型ダイバータプラズマ模擬装置 MAP-II において、ヘリウム放電に水素を混合しプラズマの温度を下げる実験(約 1 \sim 2 万 \mathbb{C})。(c) ヘリカル型核融合実験装置ヘリオトロン J における重水素放電に固体軽水素を入射する実験(約 1 千万 \mathbb{C})。

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、フラウンホーファーやキルヒホフが思い描くことすらできかった、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

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。

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。

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し続けています。

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、分光学に支えられた分析装置や解析方法を目にすると思います。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大企業のみでしたが、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拓を行っています。

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。

発電センシングー体型集積センサは、"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ー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

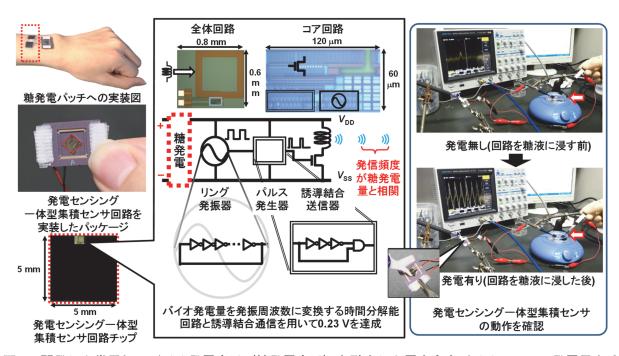


図 1: 開発した世界初のバイオ発電素子 (糖発電素子) と融合した電力自立バイオセンサ: 発電量をそのままセンシング信号としても活用する「発電センシングー体型集積センサ技術」の有効性を実証、時間分解能回路と誘導結合通信の導入により 0.23V を達成

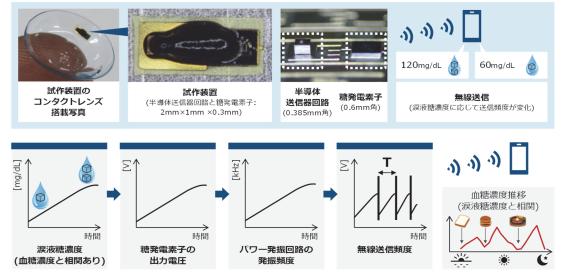


図 2: 開発した発電センシングー体型集積センサ技術を用いた電力自立持続血糖モニタリングスマート コンタクトレンズ



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

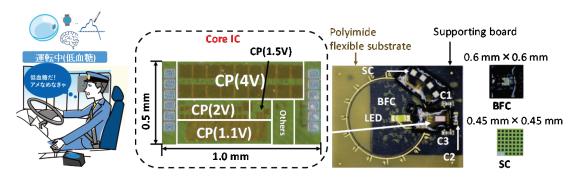
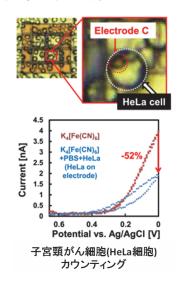
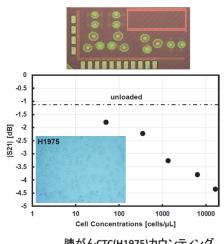


図 4: 開発したエネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

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





肺がんCTC(H1975)カウンティング

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

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

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

3. 高速動作を活かした非侵襲・早期がん診断を行う半導体集積回路の開発

低侵襲がん治療向け半導体集積回路システムを提案しました。1024 × 1024 画素・3.6 μ m × 4.45 μ m ピッチと世界最高密度のバイオセンサ回路を実現し、がん細胞(子宮頸がん細胞)のカウンティングに 成功しました。従来用いられていなかった無電解金メッキ技術を集積回路上の電極形成に活用し、 1.2 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 × 3 × 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.