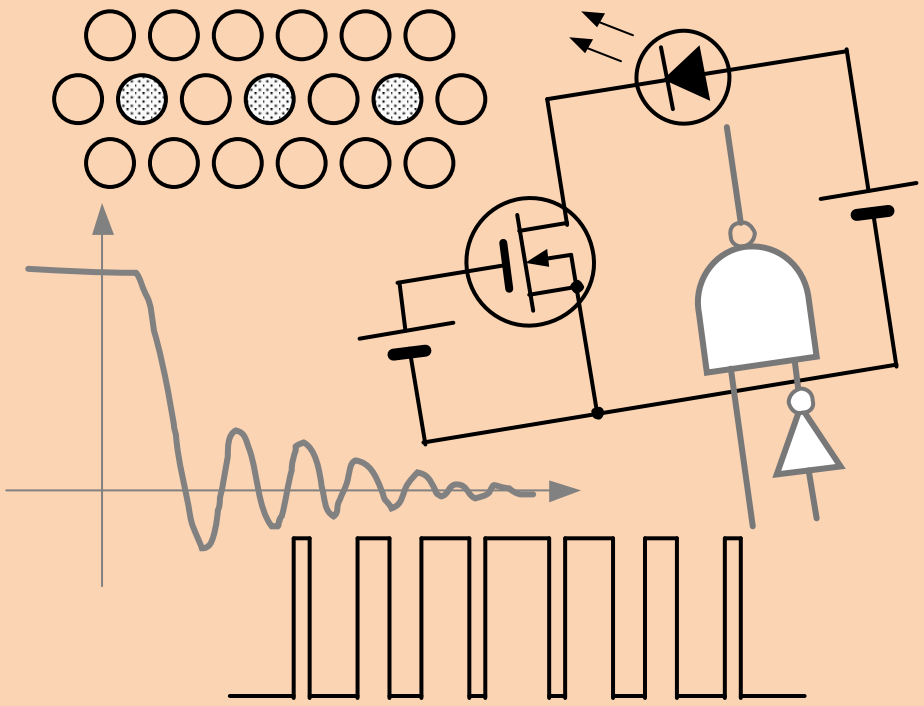
京都大学オープンキャンパス2020

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。

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

はい、これらは全て電気電子工学科で研究教育されているテーマです。他にもまだまだ面白そうなテーマがありますが、全ては網羅できません。この小冊子を手がかりにして、関連のホームページを検索するなどして、各自のモ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。

どんな科目を勉強するのですか

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

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

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野
知能メディア講座コンピュータビジョン分野

通信情報システム専攻

通信システム工学講座ディジタル通信分野
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超高速信号処理分野

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野
システム情報論講座医用工学分野

エネルギー科学研究科

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野

エネルギー応用科学専攻

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

エネルギー理工学研究所

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

生存圏研究所

中核研究部

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

学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアライゼーション研究分野
教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野

もくじ

工学研究科

電気工学専攻

先端電気システム論講座【引原研】……5
自動制御工学分野【萩原研】……6
システム創成論分野……7
複合システム論分野【土居研】……8
生体機能工学分野【小林研】……9
超伝導工学分野【雨宮研】……10
電磁回路工学分野【和田研】……11
電磁エネルギー工学分野【松尾研】……12
宇宙電波工学分野【小嶋研】……13
マイクロ波エネルギー伝送分野【篠原研】……14
情報可視化分野【小山田研】……15
複合メディア分野【中村研】……16

電子工学専攻

集積機能工学講座 ……17
極微電子工学分野【白石研】 ……18
応用量子物性分野【竹内研】……19
半導体物性工学分野【木本研】……20
電子材料物性工学分野【山田研】……21
光材料物性工学分野【川上研】……22
光量子電子工学分野【野田研】……23
量子電磁工学分野 ……24
ナノプロセス工学分野 ……25
先進電子材料分野【藤田研】……26

情報学研究科

知能情報学専攻

言語メディア分野【黒橋研】……27
画像メディア分野【西野研】……28

通信情報システム専攻

ディジタル通信分野【原田研】……29
伝送メディア分野【守倉研】……30
知的通信網分野【大木研】……31
情報回路方式分野【佐藤研】……32
大規模集積回路分野【小野寺研】……33
リモートセンシング工学分野【山本研】……34
地球大気計測分野【橋口研】……35

システム科学専攻

論理生命学分野【石井研】……36
医用工学分野【松田研】……37

エネルギー科学研究科

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー情報学分野【下田研】……38

エネルギー応用科学専攻

エネルギー応用基礎学分野【土井研】……39

工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座

引原 隆士，持山　志宇

電気に関わるシステムの特性は物理量の関係—例えば，電気電子回路では電圧と電流，微小デバイスでは電界と電荷，大きな力を得たいモータなどの機器では磁界と電流—で決まります．システムの設計においてその特性は線形—ある 1 つの物理量を変化させると他の物理量が比例して変化する—であることが理想的とされてきました．しかしながら，現実の電気的特性，磁気的特性，機械的 (構造的) 特性では，その比例関係が大きな変化に対して保たれない場合が多く見られます．そのような特性は**非線形特性**と呼ばれます．私たちの研究室の使命は，非線形特性をもつ素子，装置，システムを対象として，特性の記述 (モデル化)，解析，そして制御を行うことにより，新しい機能を有する先端的な電気電子回路やシステムを提案することにあります

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

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

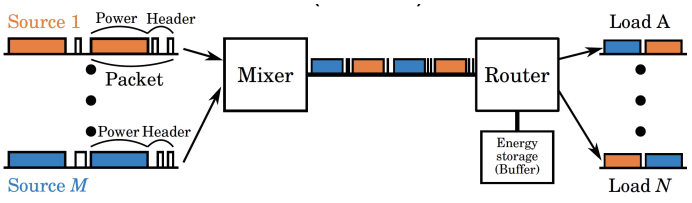


図 1: 電力パケット: 電力と情報を同時に伝送することで高機能な電気エネルギーシステムを実現！

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

工学研究科 電気工学専攻 自動制御工学分野

萩原 朋道，細江 陽平

1．自動制御とは　ハードディスクや CD-ROM のドライブでは，極めて狭いトラック間隔でデータ領域が並ぶ中を，誤って隣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)．

ハードディスクのヘッド制御

ロケットの姿勢制御

自動制御はなくてはならない technology!!

ロボットアームの軌道追従制御

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　准教授

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

ワイヤレス人体センシング：新時代の幕開け

当研究室では、システム理論的アプローチによる人体の波動センシング技術の研究を行っています。人体センシングといえば、アップルウォッチなどのウェアラブルデバイスやKinectセンサーなどの距離カメラによる人体計測が普及しています。こうした従来の方法とは異なり、電波センシングはセンサー装着の不快感が無く、プライバシーの懸念もないことに加え、衣服を透過して皮膚表面を直接測定できるという利点があります。

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。こうした変位を電波で測定すると、遠くから非接触で生体情報が得られます。当研究室では、信号の持つトポロジー的特徴を用いた心拍測定法を開発し、心拍数を約１%という高精度で測定する技術を開発しました(図1)。

電波による人体イメージング

現在、空港等で用いられる乗客のスキャナ装置は、隠し持った武器などを自動検出することができるため普及が進んでいます。従来の測定を高速化するため、当研究室では信号の特徴点群を用いる新手法を開発し、データの圧縮と著しい高速化が実現されました。人体模型を用いた測定(図2)により、人体イメージングを約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し、健康管理のためには睡眠を正確かつ長期にわたって記録することが重要です。電波計測はカメラとは異なりプライバシーの問題を回避し、心電計のような不快感もなく、快適に睡眠を測定することができます。当研究室では呼吸・心拍・体動などの人体の情報を総合的に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画面に触れることなく操作可能になり、次世代のインターフェースとして注目されています。当研究室では、電波と機械学習（人工知能）を使ったジェスチャー認識技術の開発を進めています(図4)。

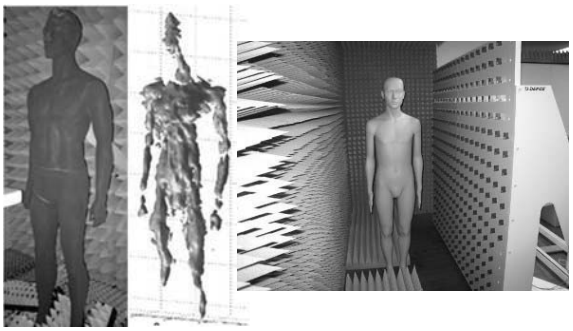


図２　人体模型(左)，電波イメージング立体画像(中央)，アレーレーダシステム（右）

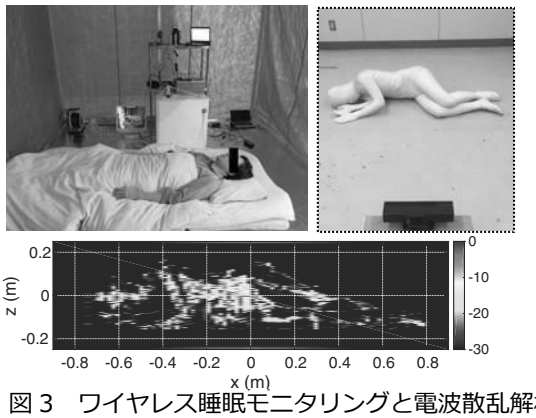


図３　ワイヤレス睡眠モニタリングと電波散乱解析

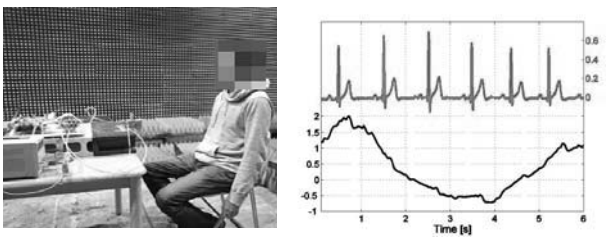


図１　電波による非接触心拍計測(左)と測定信号(右)

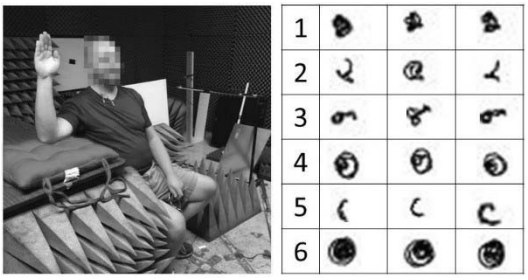


図４　電波によるジェスチャー識別実験と信号軌跡

工学研究科 電気工学専攻 複合システム論分野

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

土居 伸二，田中 俊二，木村 真之

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

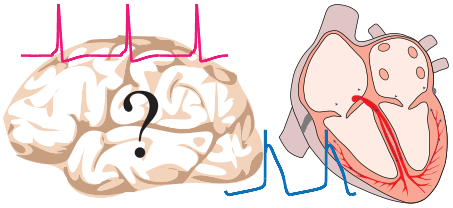


図 1: 脳や心臓と電気信号

3. システム最適化

最適化問題とは，ある条件のもとでもっともよい解を見つける問題のことです．たとえば，目的地にもっとも早く着くような道順を求めるといった身近な問題から，もっとも頑丈な鉄橋の構造を求める問題まで，最適化問題は様々な場面で現われます．当研究室では，生産システムや配送・輸送システムにおける最適化問題として，最適な生産計画を求める問題，エレベータの運行を最適化する問題，コンテナを積み替える問題などを扱っています．とくに，順列や組合せで解が表せる，組合せ最適化問題と呼ばれる問題に対し，最適な解を高速に見つけることのできるアルゴリズムの研究を行っています．

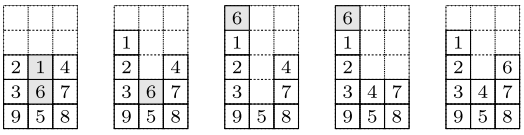


図 2: コンテナを積み替えて整列する問題 (下から上へと番号が減少する順に並べ直す)

4. 結合振動子におけるエネルギー局在現象

結合振動子とは，振り子のように振動するものが互いに影響を及ぼし合うよう結合されたものです．たとえば，高速道路などの橋梁やメガフロート，DNA やカーボンナノチューブなどは結合振動子としてモデル化することができます．通常，これらの結合振動子では，力学的エネルギーは結合を介して系全体へと広がろうとします．ところが，結合振動子の空間的離散性と非線形性によって，エネルギーが広がらず局在を保てることがあります．このような現象をエネルギー局在現象といいます．当研究室では，現象そのものの性質を研究するとともに，工学的な応用についても検討しています．

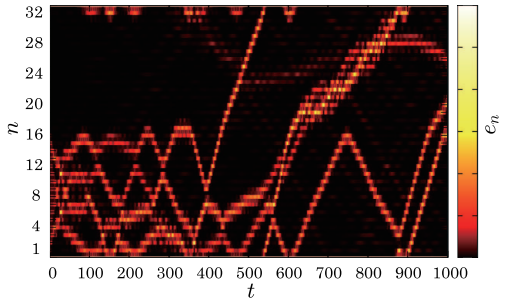


図 3: 乱雑に移動するエネルギー局在振動の閉じ込め．横軸は時刻，縦軸は空間で，結合振動子の特性が上半分と下半分で異なる．色の明るい部分が高エネルギー状態に対応する．

工学研究科 電気工学専攻 生体機能工学分野

小林 哲生、濱田 昌司、笈田 武範、伊藤 陽介、夏川 浩明

私達の研究室では、生体の有する優れた機能を探り、その知見を応用する**生体機能工学**に関して、医学研究科や企業との連携により以下のような研究・開発を行っています。

１．人間の脳神経系の機能を計測・解析・イメージングし（図１）、脳が実現している高度な機能、特に視覚的認知や記憶の仕組みを探ると共に、ブレインマシンインターフェースなどの研究に取り組んでいます。

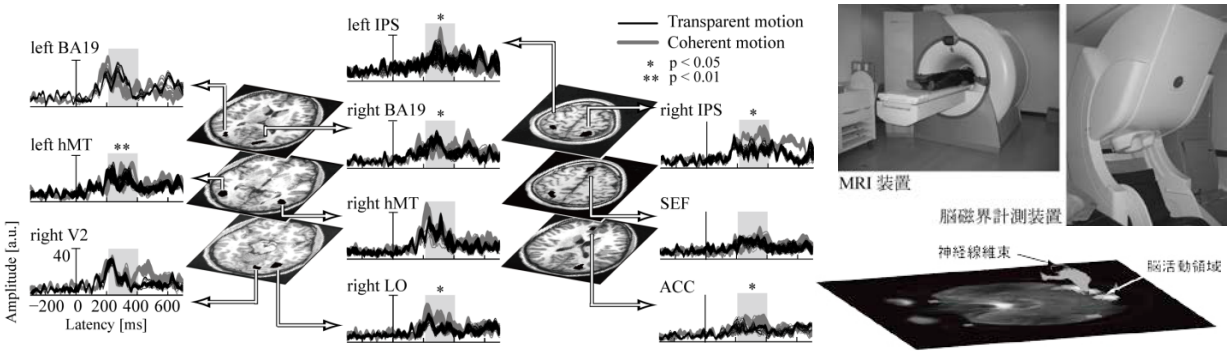


図１．視覚認知実験の fMRI-MEG 統合解析例(左)、計測装置(右上)、神経線維束解析例(右下)

２．電界・磁界・電磁界の数値計算法の高精度・高速・大容量化の研究を行うとともに、生体内外の電磁界解析に基づき、脳神経活動計測技術や生体内誘導場評価技術の高度化に寄与しています（図２）。

３．光ポンピング原子磁気センサを利用した MEG 計測装置や超低磁場 MRI 計測装置の開発は、小型化や低コスト化を可能にし、超高感度な計測によって脳機能研究や医用イメージング分野においても更なる発展をもたらすことが期待されており、当該分野における先導的役割を担う研究に位置づけられています。

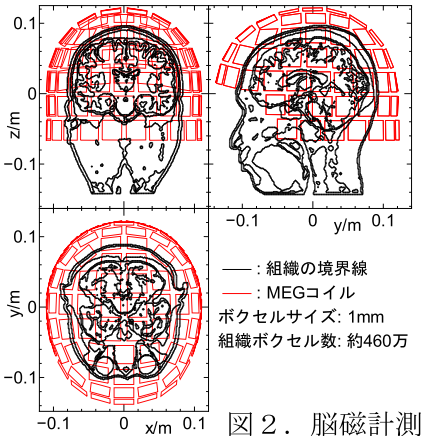
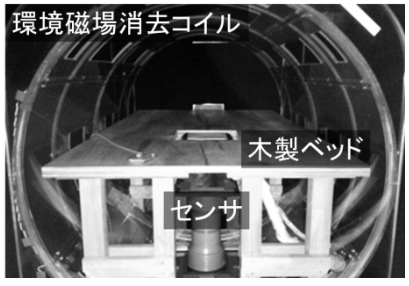


図２．脳磁計測用解析モデル例



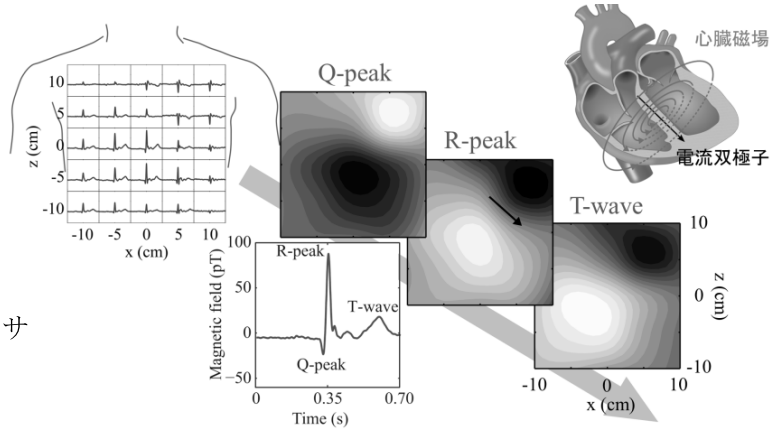


図３．光ポンピング原子磁気センサを利用したヒト心磁図計測の例

☆ 興味のある方は、研究室の Website（http://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/）をご覧下さい。

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

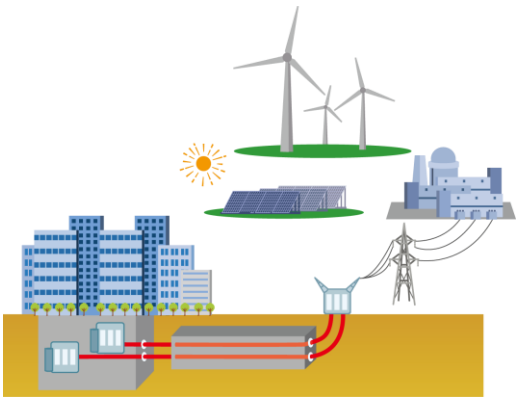


図 2　超伝導電気機器：様々な電気機器を超伝導化して省エネかつコンパクト化

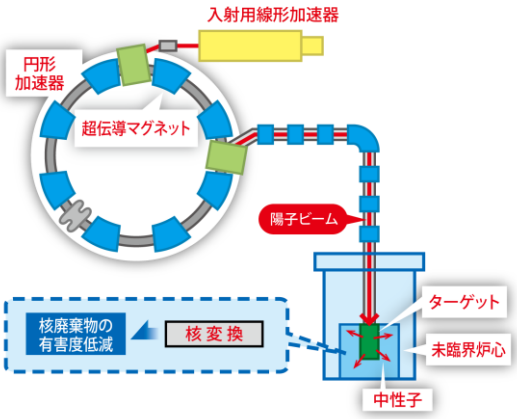
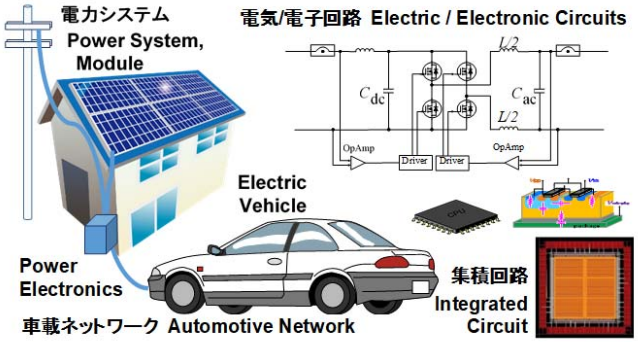


図 3　超伝導電磁石を用いた加速器駆動核変換システム（ADS）：核廃棄物の有害度を低減するシステム

工学研究科 電気工学専攻 電磁回路工学分野

和田 修己，久門 尚史，イスラム マーフズル

１．回路とシステムの解析と設計

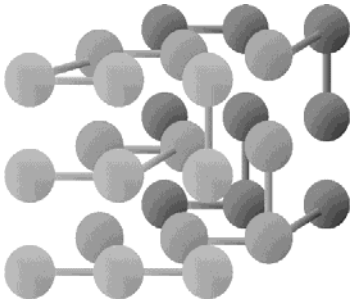


電磁回路工学は、電気・電子・情報通信システムを支える電気回路・電子回路・電磁回路の統合設計を扱う分野です。アナログ・ディジタル機器だけでなく、自動車や電力ネットワークも今や高機能化した電気・電子モジュールを統合した相互結合系になっています。電磁回路と聞くと、なんだか難しそうな、正体不明のもののような気がされるかもしれません。しかし我々が目指す電磁回路工学は、従来の電磁波理論（Electromagnetic Theory）と、電気回路・電子回路（Electric and Electronic Circuit）の分野を融合させ、さらに発展させる新しい研究分野です。

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

２．回路による電磁現象の設計

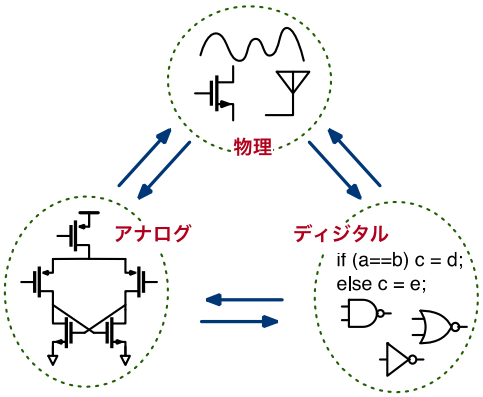
電気回路は、皆さんが物理で習う電磁気の物理現象を制御するシステムと考えることもできます。つまり、コンデンサやコイルなどは、電磁現象を制御しやすいように小さい空間に閉じ込めて操る部品ということです。一方で、最近ではアンテナのように空間に広がった電磁波も電気回路によって操ろうとする取り組みが進んでいます。数学や物理の理論を用いて設計法を研究しています。また、超高速で動作する半導体スイッチを用いると、これまでにない特性の素子ができます。これらを用いた新しい形のエネルギーや情報の処理・伝送が期待されています。当研究室ではこのような、新しいタイプの回路を用いて様々な電磁現象を設計する取り組みを行っていま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



メタマテリアルの特性解析

３．未来の集積回路システムの設計

今後のスマートな社会の実現と気候変動の防止の両立には、情報を収集・処理するデバイスのエネルギー効率を 1,000 倍以上向上することが求められます。1,000 倍を超えるエネルギー効率の向上は、従来技術の単なる延長では実現できず、情報処理システムの従来の常識を破る革新的なシステムが必要です。本研究では物理（物性と電磁気）とアナログ回路とディジタル回路の協調を最大限発揮させるよう、新たな回路方式の研究に取り込んでいます。具体的には、超低消費電力のセンサ回路や、アナログ量をディジタルに変換する回路や、安定した電源を供給する回路の設計を行っています。いずれも独自のアイディアを中心に、複数方面から消費エネルギーや動作速度の限界へ挑戦するものです。



物理・アナログ・ディジタルの協調系

詳しくは研究室のホームページ（http://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

松尾 哲司，美舩 健

先進的な電気電子機器の設計開発や電気電子材料の開発のために，計算機シミュレーションが大きな役割を果たしています。本研究室では，電磁界や磁性材料などの計算機シミュレーションにおけるキーとなる理論や手法の研究を行っています。その中では，連続的な電磁界変数の関係式をデ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。

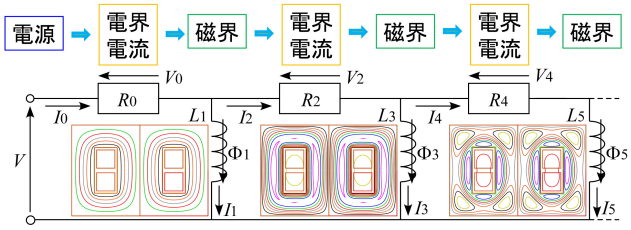


図１　電磁界の等価回路表現

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

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

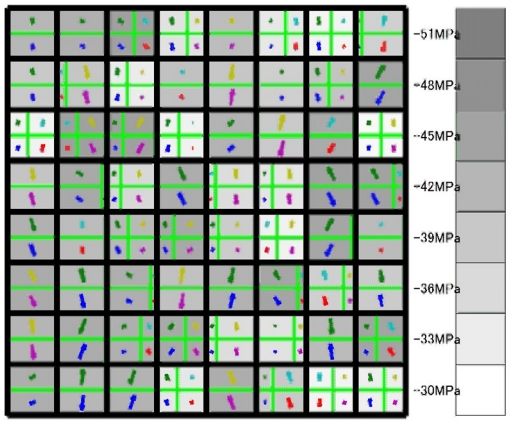


図２　磁性材料シミュレータによる磁化過程解析

ホームページ http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/

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、JAXA にて次世代水再生実証システムの中でも利用されており、宇宙圏での水質浄化などで技術利用されています。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。また、応用利用用途として化学反応によるナノ粒子生成、水耕栽培による植物栽培促進効果なども共同研究として行い、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。

図 1 巨大なワイヤレス給電用実験装置 AMETLAB

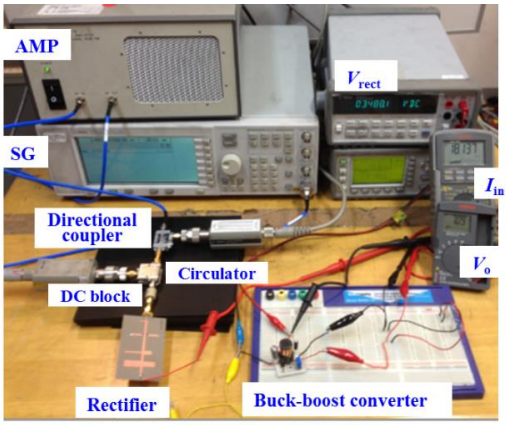


図 2 測定中のマイクロ波受電整流回路

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。

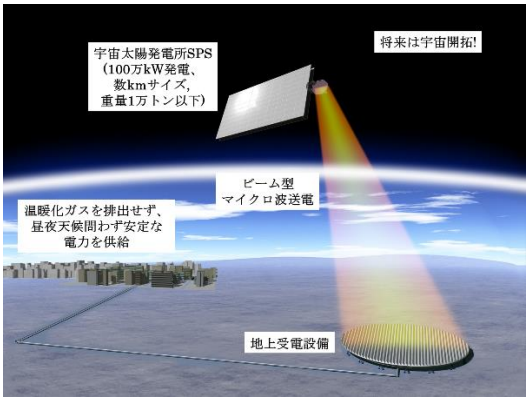


図 3 宇宙太陽発電所 SPS のイメージ(2050 年頃?)

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。

工学研究科 電気工学専攻 情報可視化分野

小山田 耕二，江原 康生，夏川 浩明

ビッグデータ時代，データを人間に認識させるためにコンピュータグラフィックスを使った可視化技術の重要性は多くの方に理解されています．特に，最新の可視化技術である Visual Analytics (データに対して適切な視覚的表現を行い，人間の発想を支援する技術）を適用し，高性能計算技術・ビッグデータ解析技術と連携させることにより，様々な学術分野における知識創造を促進することが期待されています．本研究室では，大規模データから，因果関係をはじめとする科学的発見を支援する可視化技術とその適用について研究しています．

１．線虫の発生動態の解明

理化学研究所、京大医学研究科との共同プロジェクトにおいて線虫をモデル系として，**多細胞生物の発生のメカニズムを解明**するデータ駆動型の研究手法の開発を目指しています．実験データや論文情報を統合し，科学的発見に資する新たな仮説構築を支援するための，**インタラクティブな因果ネットワーク探索の視覚的分析システム**を提案しています．

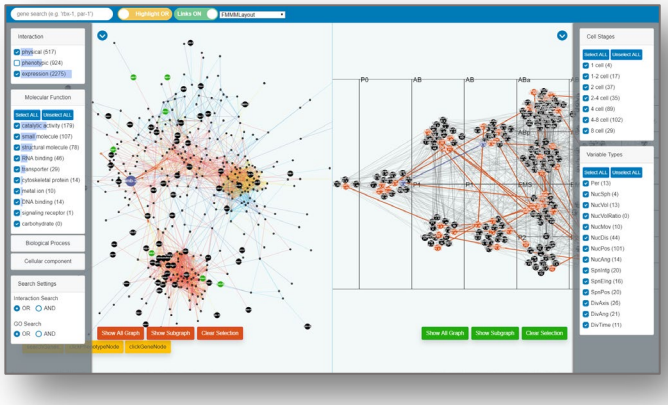


図１．表現型特徴ー遺伝子ネットワークの横断的探索のための視覚的分析システム

２．気象変動適応策の社会実装

日本全国の地方自治体等が行う気候変動対応策の検討・策定に汎用的に生かされるような**信頼性の高い近未来の気候変動予測技術**や気候変動影響に対する適応策の影響評価を可能とする**アプリ技術の開発**を実施しています．

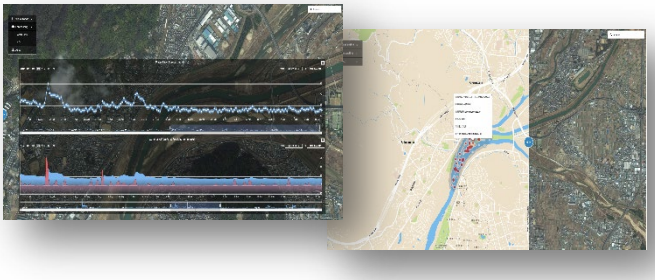


図２．河川水位の予測を可視化し，環境状態と共に分析するツール

３．情報可視化技術の評価

可視化や視覚的分析では，視覚機能を通じた**「人と計算機のインタラクション」**が極めて重要です．可視化を利用するときの人の特性や戦略，内的状態を分析し，それらの情報を用いた**可視化の評価や高度化**を目指しています．

図３．可視化利用における行動特性を分析し，デザインの改良につなげる

☆ 興味のある方は，研究室の Website (http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/) をご覧下さい．

工学研究科　電気工学専攻　中村研究室

中村裕一，　近藤一晃

研究の背景

そう遠くない未来，人間とロボットと種々のコンピュータがネットワークで結ばれ，共に生活する世界がくるでしょう．掃除ロボットと談笑し，キッチン内蔵のコンピュータに料理を教わり，腕時計感覚で小型コンピュータを身につけて歩く．そんな近未来世界のコミュニケーションを支えるメディア（情報の媒体）には，どのような機能が必要となるでしょうか？　人間を見守るメディア，教えてくれるメディア，人間どうしをつないでくれるメディアなど，私たちは，人間と機械，人間と人間のコミュニケーションをサポートする知的情報システムの構築や，それらを支える高機能ネットワークの実現を目指して研究に取り組んでいます．

研究の概要

ウェアラブルカメラによる個人と集団の体験記録

頭や体につけたカメラによって目前で起こったできごと（体験）を映像として記録します．集団活動を行う全員に対してこれを行うと，たくさんの動き回るカメラで活動を記録することになります．このような記録は，自分自身の体験を思い出すだけでなく，他人の体験を知ったり，他人から見た自分の体験を見たり，関わり合いを調べたりといったように，様々な見方で活動を振り返るのに役立ちます．本研究では，このような映像記録をわかりやすく見せたり（ブラウジングと言います），個人や集団の行動の特性を自動的に分析したりします．

表面筋電位を用いた筋活動の分析と伝達

筋肉の動きと電気の流れ方には関係があるため，皮膚に貼り付けたセンサで電気のパターンを計測して分析することで，筋肉がどのように活性化したのかを知ることができます．この仕組みをうまく利用して，外から見ただけではわからない筋の活動を詳細に分析します．またその結果を人間に伝達・提示することで運動機能のリハビリテーションやスポーツトレーニングを支援します．例えば効果的なリハビリには正しいリハビリ運動の反復が大切ですが，患者自身がそれを判断するのはとても難しいことです．そこで筋活動のモニタリングを通して正しいリハビリ運動かどうかを判断して患者に伝えます．

画像センシングを用いた動作と意図の分析

私たちは動作や振る舞いを見るだけでその人の考えや意図をある程度推察することができ，それに基づいて円滑なコミュニケーションを行っています．近い未来，コンピュータやロボットが人間と共生し人間の生活を支援するためには，このような機能を自動化する必要があります．このテーマでは，特殊なカメラを用いた画像センシングを通して人間の振る舞いを計測し，わずかな動作の違いからそのときの意図を推定する技術について研究しています．

☆興味を持たれた方は当研究室のホームページ(http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/)もご覧ください．

工学研究科　電子工学専攻　集積機能工学講座

掛谷　一弘

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

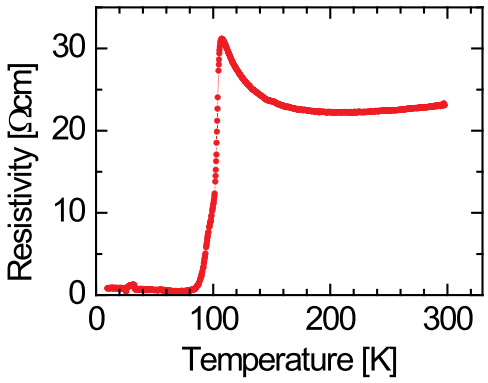
超伝導体における物理現象の理解を通じた革新的デバイスの開発

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

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

超伝導は目に見える永久運動

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



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

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

研究活動：高温超伝導量子ビット素子およびテラヘルツ光源

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

工学研究科　電子工学専攻　極微電子工学分野

白石誠司、安藤裕一郎、大島諒

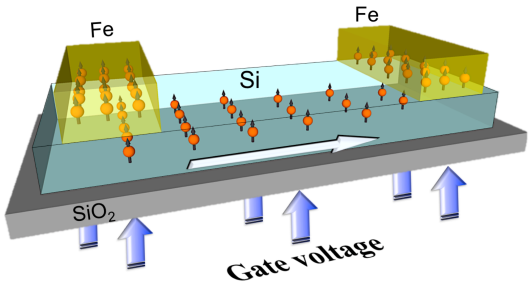
1.　研究室の方向性

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

１．概略

光は光子という素粒子の集まりです。光子は、古典力学的な"粒"とは異なる、奇妙なふるまいをします。例えば、１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、２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１粒１粒を発生させ、その状態間の量子もつれを自在に制御することで、これまでの「光」を超える「新しい光」の実現と応用について実験的な研究を行っています。光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェイスが容易です。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」、「光リソグラフィー」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、２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半透鏡、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本となる光量子回路を実現することに成功しています。

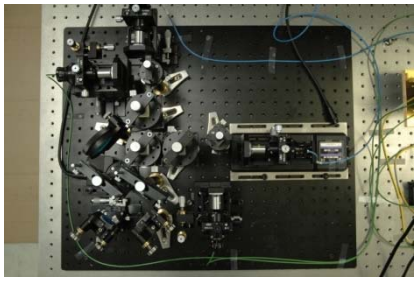


図 1. 量子もつれ光生成装置

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。最近、世界で初めて，古典物理学の限界を超えた感度をもつ「量子もつれ顕微鏡」を実現しました。

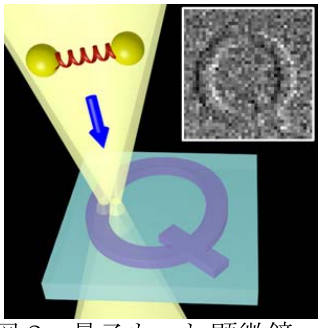


図 2. 量子もつれ顕微鏡

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量子間の量子状態を制御する素子の開発をめざし、テーパファイバや微小球共振器といったナノフォトニクスデバイスとダイヤモンド中の単一窒素欠陥中心や半導体量子ドットなどを結合させたシステムの研究を行っています。

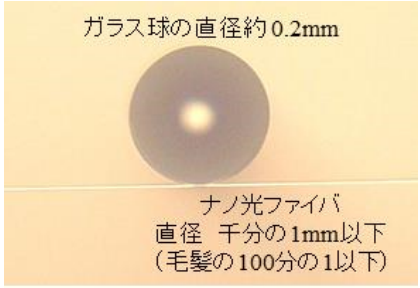


図 3. 光子を操る、微小光素子

工学研究科　電子工学専攻　半導体物性工学分野（木本研究室）

木本 恒暢、西　佑介、金子 光顕

1. 半導体とは

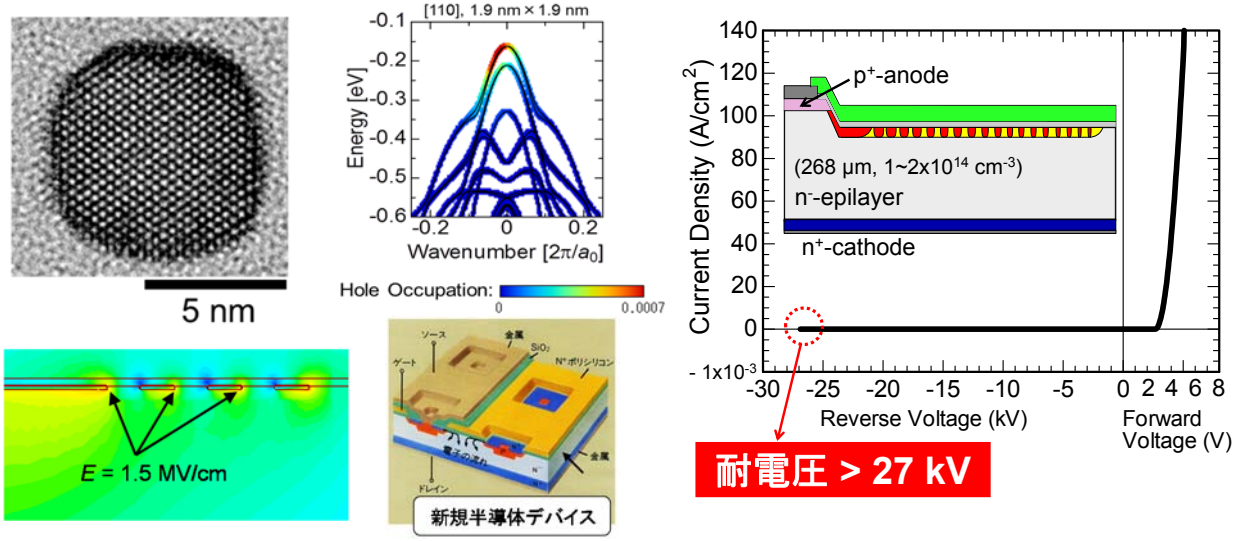
皆さんは「半導体」という言葉を聞いたことがあるでしょうか？ 導体と絶縁体の中間？ 半導体は、パソコン、スマホ、太陽電池はもちろんのこと、エアコン、炊飯器、ゲーム機、電車、銀行 ATM など、あらゆる電気電子機器に必ず使われ、その中核的役割を果たしています。2014 年にノーベル物理学賞の対象となった青色／白色発光ダイオードも半導体です。我が国が強みを発揮している自動車も高度に電子化され、その性能は半導体で決まると言っても過言ではありません。このように半導体は、現在の高度エレクトロニクス社会を支えるハードウェアと言えます。

2. 研究背景と研究室の取り組み

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

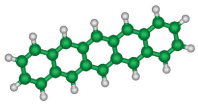
当研究室では、新しい概念、あるいは新しい材料を活用することによって、従来の半導体では達成できない画期的な半導体デバイス（トランジスタなど）を実現すること、およびその基礎となる半導体物理の研究に取り組んでいます。例えば、原子レベルの細線状半導体を形成すれば電子の運動が根本的に変化し、高性能トランジスタを実現できます。また、ある酸化物薄膜を用いれば、超高性能メモリ（記憶素子）や人工知能のハードウェアとなるシナプス素子を実現できます。さらに、炭化珪素という半導体を用いれば、桁違いに損失の少ない電力用トランジスタや 500℃の高温でも動作する集積回路を実現できます。このように、半導体材料からデバイスに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

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



工学研究科 電子工学専攻 電子材料物性工学分野

山田 啓文、小林 圭



1. ナノテク最前線: ナノの世界で「ものを見る、作る」とは？

「ナノテクノロジー」という言葉を、皆さんはどこかで耳にしたことがあるかと思います。人の髪の毛の太さの１万分の１から１０万分の１程度という極めて小さい「ナノ」の世界、言いかえれば、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。皆さんも、子どもの頃と比べれば携帯電話からスマートフォンへと情報端末が着実に小型・軽量・高性能化を遂げてきたと感じていると思いますが、最近では、腕時計やめがねなどのアクセサリーに情報端末としての機能をもたせた画期的な商品が登場し始めていますね。このような情報端末の発展は、実はナノテクノロジーの進歩によるところが大きいのです。一方、今のところ治療が困難な病気に対して有効となる新しい薬や治療法を開発してゆくためには、生体中にあるいろいろな分子がどのような役割を果たしているのかを、分子レベルで解明していく必要があります。また、さまざまな物理・化学現象をナノスケールで解き明かすことで、省エネルギーかつ二酸化炭素（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という装置の開発を行っており、実際にいろいろな原子や分子の観察をしています。図１には、その装置を使って、DNAの二重らせん構造を観察した例を示しています。DNAは、生物個体の全遺伝情報を蓄積・伝達する役割を担っており、最も基本的な生体分子の一つですが、生体内環境と同じ条件下でのDNA直接観察に成功しています。近い将来、生体機能に関わる多くの謎の解明に大きく役立つ技術として注目を集めています。一方、「ものを作る」ことについては、一つの有機分子を金属電極の間（間隔が300 nm = 0.3 μm）に挟み、電極に加えた電圧とこの有機分子を流れる電流の関係を調べています。図２はカーボンナノチューブというワイヤー状の分子を使用した例を示しており、金属電極の間に棒状の分子が橋渡しされています。ここで紹介した研究例以外にも、ナノスケールで「ものを見る、作る」という観点から、さまざまな研究を推進しています。

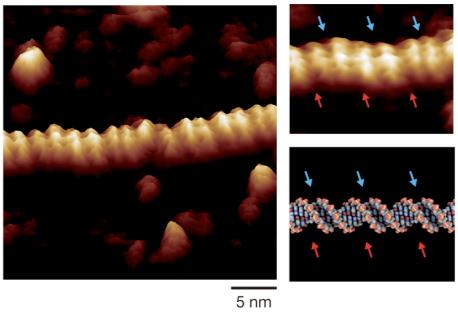


図１ 原子間力顕微鏡により捉えられたDNAの二重らせん構造．右上図：二重らせんの２種の溝（主溝と副溝）の拡大像．右下図：構造モデル図.

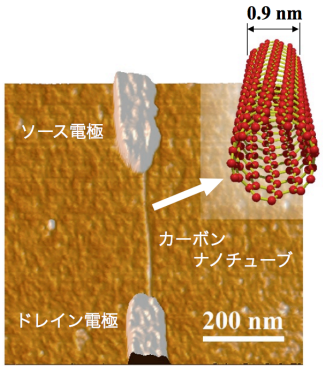


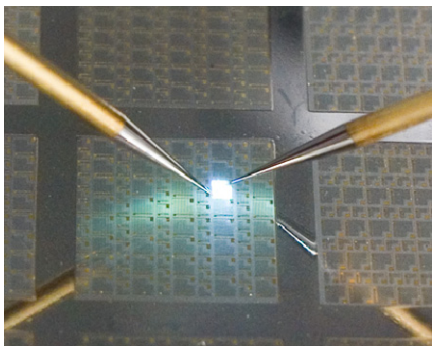
図２ ２つの金属電極（300 nm 間隔）をつなぐカーボンナノチューブ分子．
右上：そのモデル図.

工学研究科　電子工学専攻　光材料物性工学分野

川上　養一，船戸　充，石井　良太

19 世紀末期のエジソンによる電灯の事業化以来，わたしたちは，さまざまな波長域において，いわゆる「ランプ」光源を使用しています．最も身近な光源は蛍光灯に代表される可視波長域の照明機器でしょう．紫外波長域のランプ光源も，殺菌・消毒，LSI や液晶パネルの製造工程など，バイオ応用からエレクトロニクスまで幅広い分野で私たちの生活を支えています．その結果として，ランプによる消費電力は，人類が製造する全電力のうち約 20%にも達しています．しかし，ランプの発光効率は高くても約 30%ですので，全電力のうち 14%は熱として捨てられていることになります．省エネが全世界的な課題である現在，この無駄を極力減らすことが重要であり，ランプ光源に代わる新しい光源として窒化物半導体 InGaN や 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.

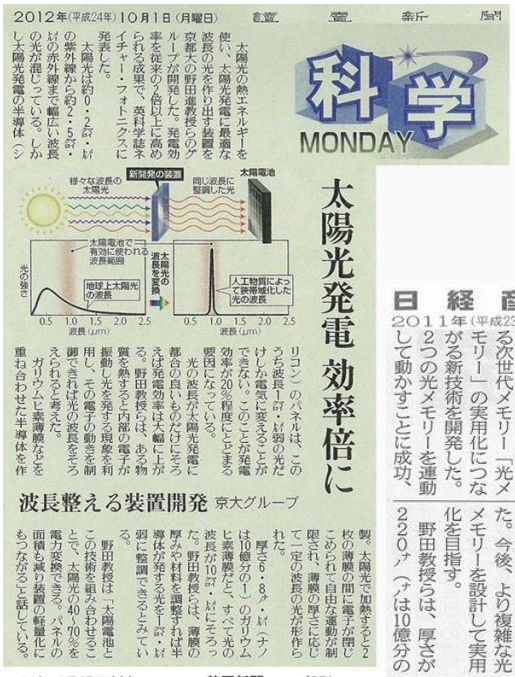


工学研究科　電子工学専攻　量子機能工学講座　光量子電子工学分野
野田進、浅野卓、石崎賢司

私たちの研究室では、”光（フォトン）”を自由自在に操り、使いこなし、その潜在能力の全てを活用して21世紀を切り拓くことを目標としています。そして、光の物理的性質を極限まで活用することで、光の超高速性や量子的性質を活かした新しい通信・情報処理方式や、環境・エネルギー問題を解決できる超低消費電力照明や超高効率太陽電池などの、夢の科学技術が生まれてくると期待しています。その目標へ向けて、最先端のナノ微細加工技術を駆使し、光のための人工結晶、「フォトニック結晶」をキーワードとして研究を進めています。

これまでにフォトニック結晶を用いることで、例えば、CPU 内の光配線につながるシリコンレーザや三次元光回路を開発することに成功しています。また、太陽電池の飛躍的な効率向上に向けた新技術の提案も行っています。さらには、携帯電話内蔵型プロジェクタ、医療用カプセル内蔵レーザメスなどの次世代型光技術や、産業用加工機の大幅な小型化につながる、新しいレーザ光源の開発にも成功しています。

最近新聞に掲載された我々の研究の紹介記事を下に示します。もっと詳しく知りたい方は、私たちのホームページ(http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/)を参考にして下さい。



2012年(平成24年)10月1日(月曜日)　京都新聞　朝刊

科学 MONDAY

太陽光発電 効率倍に

波長整える装置開発 京大グループ

太陽光の熱エネルギーを使い、太陽光発電に最適な波長の光を作り出す装置を京都大の野田進教授らのグループが開発した。発電効率を従来の2倍以上に高められる成果で、英科学誌ネイチャー・フォトニクスに発表した。

太陽光は約0・2㍍・㍍の紫外線から約2・5㍍・㍍の赤外線まで幅広い波長の光が混じっている。しかし太陽光発電の半導体（シリコン）のパネルは、このうち波長1㍍・㍍弱の光だけしか電気に変えることができない。このことが発電効率が20%程度にとどまる要因になっている。

光の波長が太陽光発電に都合の良いものだけにそろえば発電効率は大幅に上がる。野田教授らは、ある物質を熱すると一定の波長の光が形作られ、厚さ6・8㍍・㍍（ナノは10億分の1）のガリウムヒ素薄膜だと、すべて光の波長が10㍍・㍍にそろった。野田教授らは、薄膜の厚みや材料を調整すれば半導体が発する光を1㍍・㍍の面積で減り装置の軽量化にもつながると話している。

野田教授は「太陽電池とこの技術を組み合わせることで、太陽光の40～70%を電力変換できる。パネルの面積で減り装置の軽量化にもつながると話している。

3　総合　京都　滋賀　奈良　届聞　2013年(平成25年)1月21日　月曜日

微小空間に立体的光回路構築

熱暴走しない超高速デバイスに期待

京大グループ成功

200㍍(ナノは10億分の1)角の柱を500㍍間隔で組んだ井桁構造の半導体結晶（3次元フォトニック結晶）を使い、柱を抜くなどして光の通り道を作った。通り道の接合部分の形状を工夫して、光を垂直方向にも曲げることに成功した。

コンピューターなどに用いられる電子デバイスを高速化や高集積化で消費電力が増え、発熱による誤動作（熱暴走）も起こりやすくなるが、光で回路を作れば省エネや高性能化が期待できる。

野田教授は「電子部品と接続する発光体や光センサーの開発も進めており、光だけで動作する光チップを実現したい」と話している。（松尾浩道）

3次元光回路の模式図（光（赤、黄、青）を上下方向に進めたり、直角に曲げたりすることができる。下灰色部はトランジスタなどの電子部品）（野田進京都大教授撮影）

微小空間に立体的な光回路を構築することに、京都大工学研究科の野田進教授や石崎賢司助教らのグループが成功した。「熱暴走」しない超高速デバイス（素子）の実現に近づく成果といい、英科学誌ネイチャー・フォトニクスで21日発表する。

京都　滋賀　奈良　届聞　2

超小型レーザー開発

集積回路材料のシリコンで光

京大など PC高性能化期待

超小型シリコンレーザー素子の電子顕微鏡写真。直径650㍍の穴が開き、穴のない部分に光が閉じ込められ、光が発生する（京都大提供）

これまでの1万分の1以下の面積の超小型チャーで27日発表する。英科学誌ネイ発に、京都大工学研究科の野田進教授や大学院生の乾善貴さん、大阪府立大の高橋和雄助らのグループが成功した。集積回路を光で

超小型レーザーは直径1㍍（1㍍は1000分の1㍉）の円盤状の半導体の薄膜に穴を開けた構造。穴の間隔が光の波長と同じ程度になると、光が閉じ込められ、結晶の振動と相互作用して光が放出される「ラマン効果」によって、レーザー光が発生した。

一辺10㍍の正方形（㍍は1000分の1㍉）に穴を1万分の1㍉で、100万分の1㍉単位で、米インテル社が発表したシリコンレーザーの1万分の1の面積。野田教授は「素子に電流を入れてもレーザー光が発生できるのではないか。光と電子が融合した理想のシリコンチップへの道が開けた」と話している。（松尾浩道）

光メモリー2個連動

京大、実用化へ向け前進

京都大学の野田進教授ら、複数の光信号によって制御できることを確かめた。今後、より複雑な光メモリーを設計して実用化を目指す。

野田教授らは、厚さが220㍍（㍍は10億分の1）㍍のシリコン薄膜を使って直径240㍍㍍の穴を規則正しく開け、一部分の間隔をずらしてそこに光を閉じ込められるようにした。光の有無で情報を記憶する光メモリーになる。今回、光メモリーを2つ作製、連動して動かせる実験した。

2つの光メモリーの間に導波路と呼ばれる光の通り道をつくる。光メモリーとの距離は入力する光信号の波長によって調整。波長1・5㍍（㍍は100万分の1）㍍の光を入力する際、導波路の長さを83㍍㍍にした。

そうすると別々の光メモリーが連動して動くことが判明。別の光信号を入れると、一方の光メモリーにだけ光がとどまる通り道をつくる。光メモリーといった制御もできた。これまで複数の光メモリーを連動して動かすことは難しく、実用的なメモリーの実現に向け一歩前進したという。

14年 4月15日(火)　静岡新聞　朝刊

半導体レーザー

1.5トン 高出力化成功

浜ホトと京大 金属加工応用に期待

高品質の光を高出力で発振できる半導体レーザーの開発を進める京都大と浜松ホトニクスが、品質を保ったまま出力を1ワット級に高めることに成功した。軽量小型でいた半導体レーザーの特長を生かしながら、これまで対応できなかった金属加工などへの用途が期待される。

13日（日本時間14日）、イギリスの学術誌「ネイチャーホトニクス」電子版に掲載された。

高出力で高品質を両立した「フォトニック結晶レーザー」

半導体レーザーは小型で消費電力が少なく、通信や記録用に使われている。ただ、発振する構造を用いて高出力のファイバーレーザーは現在、海外製が優勢という。同社開発者は「次世代の半導体レーザーと位置付けて開発を進め、日本のものづくりに貢献したい」と話している。今後は出力10㍗を目標に開発を進めるという。

光回路を立体化することに成功した野田教授ら。「熱暴走」しない超高速デバイス（素子）の実現に近づく成果といい、英科学誌ネイチャー・フォトニクスで21日発表する。

14年 4月15日(火)　朝日新聞　朝刊

新レーザーはレンズなし

浜松ホトニクスと京大開発

超小型で高出力

次世代レーザーは直径1㍉程度の大きさ、小型で軽く、安価が特徴の「半導体レーザー」の一種。半導体にレーザーは光ファイバー通信やDVDプレーヤーなどに使われている。

野田進・京大学教授ら研究グループはレンズや光を絞って照射しており、熱や揺れでレンズの位置がずれると出力が落ち、微調整が必要だった。

浜松ホトニクスと京大は今後、一つの半導体素子あたり10㍗まで出力を増やし、応用を広げる考えだ。

電子機器大手の浜松ホトニクス（浜松市）と京都大は14日、新しい方式の高出力レーザーの実用化に成功し、英学術誌「ネイチャー フォトニクス」に成果を載せたと発表した。開発したのはレンズを使わない「次世代レーザー」。極小型で割安なため、部品としてだけでなく、ものづくりの現場にある加工用レーザーの置き換えも狙う。

これまでは、レーザーは直径1㍉程度が限界で、それ以下の小型化は難しかった。

次世代レーザーは、穴の開いた半導体の薄膜に光を閉じ込めて発振させる。穴の間隔や大きさを変えることで、光の波長や強さを制御できる。

野田教授は「光ファイバーなどの通信用レーザーは、光の波長や強さを制御できる次世代レーザーの開発を目指してきた。今回、小型で高出力のレーザーを実現できたことは大きな成果だ」と話している。

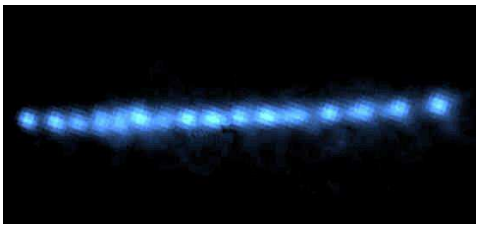
工学研究科　電子工学専攻　量子電磁工学分野
杉山 和彦、中西 俊博

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。

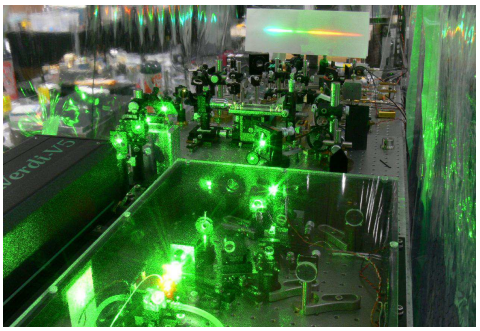
2　主な研究テーマ

イオントラップ



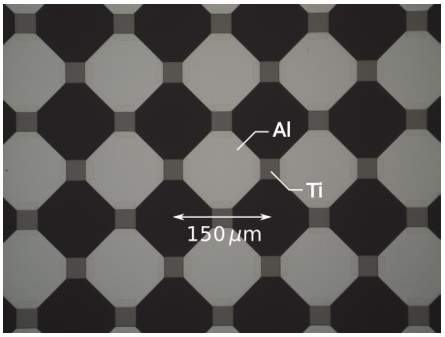
電気的な力を利用して、イオンを真空中の狭い領域に閉じ込めます。さらにレーザ光が物質に及ぼす力を利用する、レーザ冷却という手法で、イオンを極低温まで冷却し、たった 1 個のイオンを真空中に浮かせて静止させます。このようなイオンは周りの影響を受けにくいので、イオンと共鳴する電磁波の周波数が正確に決まり、精度のよい周波数の標準、その逆数として時計ができます。図は静止させた 1 6 個のイオンの蛍光像です。複数個を並べたものは、現在の計算機では膨大な計算時間がかかる問題を短時間で解く、量子計算への応用が注目されています。

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。

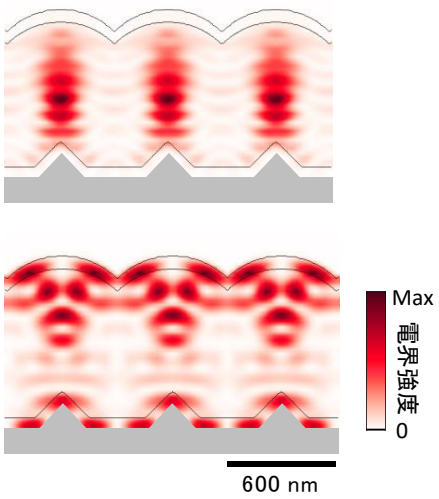


図1:光ナノ構造の電磁界解析例
（光ナノ構造を導入した太陽電池）

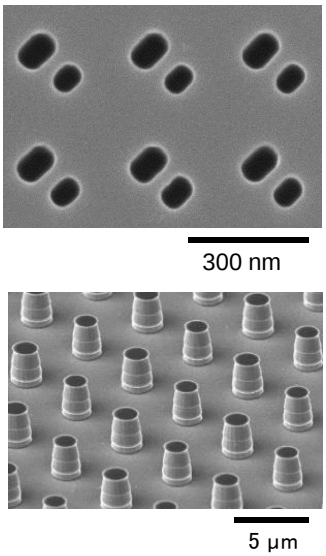


図2:種々の光ナノ構造の
電子顕微鏡写真

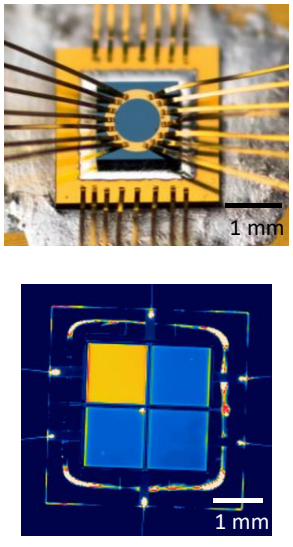


図3 :光ナノ構造を利用した
次世代光源の開発例
（上）高出力レーザ
（下）多波長熱輻射光源

工学研究科　電子工学専攻　先進電子材料分野

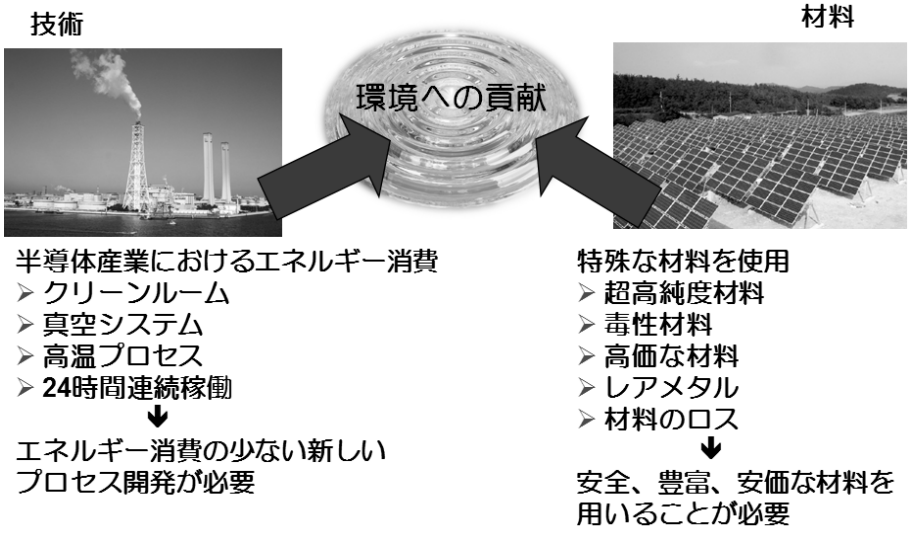
藤田 静雄、金子 健太郎

地球環境に優しい材料・技術でわたしたちの地球を守り、子孫の穏やかな暮らしをもたらせたい

半導体は、コンピュータ、光通信、携帯電話、ディスプレイ、太陽電池、照明など多くの電気電子工学分野を支える装置の基礎を担っています。新しい半導体の開発が、新しい装置を実用化して、私たちの暮らしに恩恵を与えてきたことは事実です。そして今後もますます新しい装置の実現に寄与することが期待されています。みなさんは、これからの社会でどんな装置が欲しいと思っておられるでしょうか。印刷した絵のように美しいテレビ、薄くて曲げることのできるスマートフォン、天井全体が光るような照明、車のフロントガラスに浮き上がるカーナビ、超小型のコンピュータ、など多くの技術者は夢を描いています。

半導体産業は夢を実現するための鍵として大きな発展を遂げてきました。しかし半導体の製造に大きなエネルギーを要し、毒性の材料や地球上に多く存在しない元素を必要としてきたことは事実です。しかし今後の地球環境と半導体産業の発展を両立させるためには、このような問題に向き合い、新しい観点で半導体産業を進展させることが必要だと考えられます。

わたしたちは、安全で地球に多く存在するような元素をもとにした半導体材料（Green Materials）を創り、またそれを創りだす過程でできるだけエネルギーを必要としない技術（Green Chemistry）を開発し、得られた半導体が地球環境の保護に役立つような働きをする（Green Applications）ことを目指した研究を進めています。半導体として、これまで注目が薄かった酸化物をとりあげます。酸化物は多くが安全で化学的に安定な材料です。このような酸化物が半導体としての働きをして、省エネルギーを達成するための役割を果たしてくれることがわたしたちの夢です。この夢がわたしたちからみなさんに引き継がれ、みなさんのさらに子孫が環境やエネルギーへの不安なく、健やかな暮らしを送る社会に貢献できればいいと思っています。



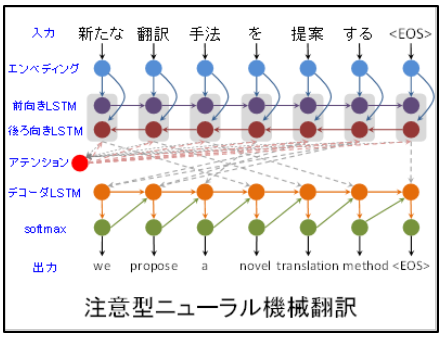
情報学研究科 知能情報学専攻 言語メディア分野

黒橋禎夫　村脇 有吾　Fei Cheng　田中 リベカ
http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/

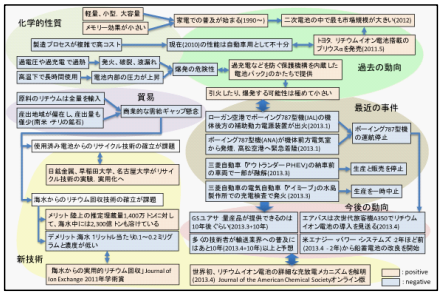
本研究室では，言語の仕組み，それを用いたコミュニケーションの仕組みを計算機が扱える正確さで解明するという理論的研究と，それによって情報検索，自動翻訳，マンマシンインタフェース等をより高度化して人間の活動を支援するという工学的研究を行っています．

言語理解の基礎的研究　計算機による言語理解を実現するためには，計算機に常識・世界知識を与える必要があります．近年の計算機パワーと計算機ネットワークの進展，さらにディープラーニング技術の進展により，柔軟な知識表現が可能となり、超大規模テキストから常識を自動獲得することが可能になってきました．我々の研究室でも，Web から収集した 100 億文超の大規模テキストをクラスタ計算機で処理することにより，同義語・類義語知識，述語項構造パターン，事態間関係知識等の自動学習を行っています．
さらに，このような知識を利用して，計算機による文章理解，すなわち文章中の語/句/文間の関係性の解析について研究を進めています．

自動翻訳　ニューラルネットワークの利用によって大きく精度が向上した自動翻訳はさまざまな場面で活用され始めています．本研究室で開発したニューラル機械翻訳システムも科学技術振興機構や新聞社において実際に利用されていますが，まだまだ改善の余地があり，その高度化に取り組んでいます．さらに，大学講義の同時翻訳（音声認識＋自動翻訳）のプロジェクトも開始しています．



情報集約・知識処理　言語処理の高度化に伴い，あらゆる分野で言語処理の利用が始まっています．SNS テキストの集約，コンタクトセンター問合せログの集約，電子カルテ等の医療テキストの意味解析と構造化，行政サービスに関する対話システム等を含む言語処理の実社会応用を、実データを持つ様々な機関と協力しながら展開しています．



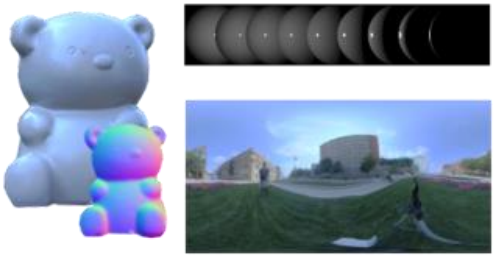
情報学研究科 知能情報学専攻 コンピュータビジョン分野

西野恒　延原章平
http://vision.ist.i.kyoto-u.ac.jp

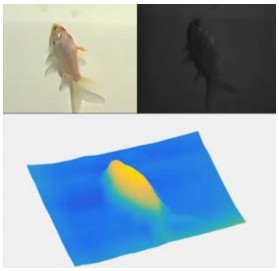
本研究室では，コンピュータビジョン，すなわちコンピュータに視覚知能を与えるための理論的基盤とその実装，ならびに，そこから得られる知見の人間の視覚知能の解明への応用に関する研究をおこなっています．主に機械学習や光学を道具とし，単純に画像や映像を効率的に消費するための手段にとどまらない，ただ見るだけではなく，知覚として「視る」ためのコンピュータビジョンの実現を目指しています．

群衆追跡

I　人を視る：人はその見た目や行動に，性別や身長などの外見的属性にとどまらない，その人の内面や考えを映す豊かな情報を含んでいます．例えば，我々は人の気分や意図を瞬時にその人の動きや表情から読み取ることができます．本研究室では，人を見ることによりその人の見ているものを判断したり，人混みでの動きを予測する研究をおこなってきました．人が何を見て，何を意図し，どのように体を使って動き，集団としてどのように影響を及ぼし合うか，視覚から理解するための研究を進めています．


反射率・光源環境推定

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


水中 3 次元形状計測

III　より良く視る：人間は二つの目を用いて，可視光範囲内でこの世界を見ていますが，コンピュータはこのような撮像系に限られる必要はありません．本研究室では，より豊かな視覚情報を得るための，情報処理が一体化された新たな撮像システム（コンピュ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，近赤外光と光の散乱に着目し，泳いでいる魚などの水中の物体の実時間 3 次元撮像や，半透明物体の内部における光の逐次伝搬の撮像などを実現しました．

情報学研究科　通信情報システム専攻　ディジタル通信分野　（原田研究室）

原田博司教授　村田英一准教授　水谷圭一助教

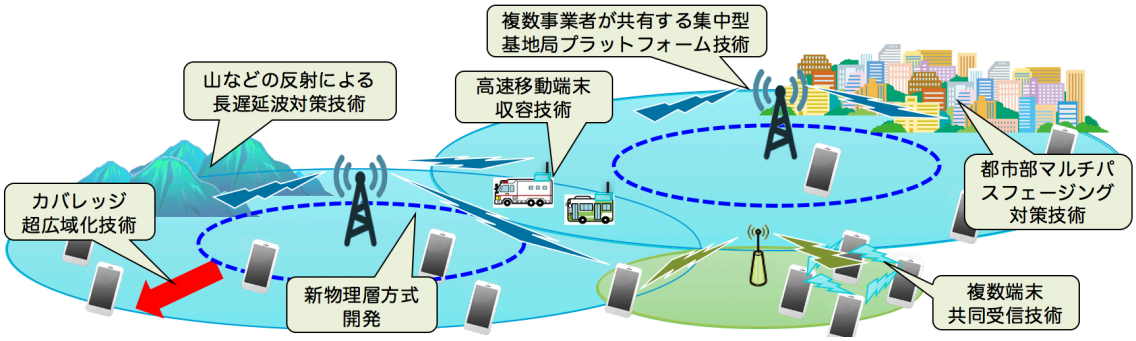
http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

第 6 世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

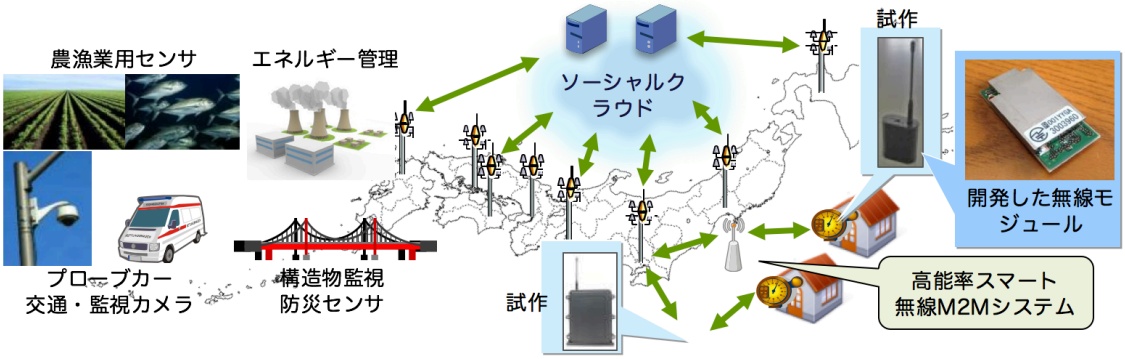
現在は誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、高速な伝送速度だけでなく、より高い信頼性や、リアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に「人と人の通信」だけでなく、ありとあらゆる物に無線機が内蔵され、様々な情報を収集するような「物と物との通信」など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信に使用出来る周波数資源には限りがあるため、このままでは爆発的に増加する無線通信への要求に応えることができません。現在、第 4 世代移動通信システム（4G）として LTE や WiMAX2 などの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでいますが、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

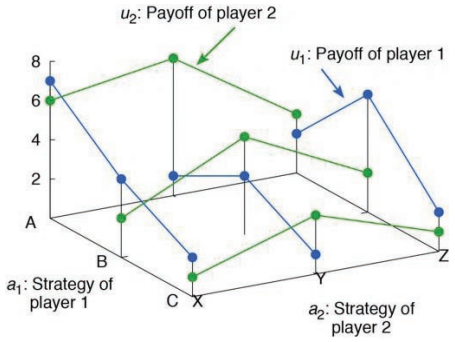
情報学研究科　通信情報システム専攻　伝送メディア分野

守倉　正博　　山本　高至　　西尾　理志

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

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

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



高密度無線LAN最適制御技術

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

画像情報処理に基づくミリ波通信制御

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

研究室ホームページ　http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

情報学研究科　通信情報システム専攻　知的通信網分野

大木 英司　　新熊 亮一　　佐藤 丈博

当研究室は通信ネットワークの研究を行っています。ネットワークとは、図1のように複数のモノ(機器、人、データなど)が相互につながっているものです。つながりのない単体のモノ(特に機器)を「スタンドアローン(Stand alone)」と表現します。例えば、スタンドアローンのパソコンでも、文書を作成したり、画像を編集したりすることができます。しかし、図2のように、たくさんのパソコンと他の機器が相互につながりネットワークを形成し、現在の世界規模のインターネットへと成長しました。WWW(World Wide Web)による情報発信やメールによる情報伝達は、私たちの生活に大きなインパクトを与え、そして普及しました。スタンドアローンよりもネットワークの方が大きな価値を生み出すことができる、これは、人が独りではなくチームや会社といった組織を形成することで、より大きなことを成し得ることができるのと同様です。

通信ネットワークは、情報のやりとりを目的とし、機器によって構成されるネットワークです。前述のインターネットにより、通信ネットワークの価値が広く認知され、あらゆるモノがつなげられるようになりました。スマートフォンや、ゲーム機、テレビ・録画機などが身近な例として挙げられます。今後はモノのインターネット(IoT: Internet of Things)の時代と言われており、図3のように、家電や、住居、自動車、などがつながり、通信ネットワークが新たな価値を生み出すと期待されています。例えば、街全体のモノが連動することによって、交通渋滞、犯罪、大気汚染、エネルギーの非効率利用といった社会問題を解消できるかもしれません。あるいは、新産業を生み出すことができるかもしれません。

通信ネットワークの研究には、大きく分けて 3 つの軸があります。

1. 通信帯域の容量を増加させる研究
2. 通信帯域の使い方で品質を向上させる研究
3. 通信プロトコルの設計

当研究室は主に2. と3. に関する研究を行っています。通信帯域とは、その通信ネットワークが伝達可能な情報の量を表します。テーマパークに例えれば、収容可能な来場者数です。テーマパークのどの来場者も、入場料に見合ったサービス品質を期待していると言えます。しかし、週末など多くの人々にとって都合の良い日時に来場者が集中してしまいます。このような場合、入場制限が行われたり、人気のアトラクションに来場者が集中し長い行列ができたりします。通信ネットワークにおいても、図 4 のように、同じような問題が生じます。もし、通信帯域が無限であれば、どのような量の情報も瞬時にすべての機器に届けることができてしまいますが、実際には通信帯域は限られています。そこで、2. の研究においては、

- 情報の流量を制御する
- 情報の経路を制御する
- 通信帯域の不要な使用を削減する

といったアプローチにより通信ネットワークの品質を高めています。一方、機器をつなげてネットワークを形成するとは、単にケーブルなどでつなぐということではありません。図5のように、機器間で情報のやりとりができるよう通信プロトコルを設計する必要があります。これは、例えば人にとっての言語に相当します。設計された通信プロトコルが優れているほど、機器間で速く無駄なく情報のやりとりができます。

最後に、当研究室が研究対象としている通信ネットワークの例を以下に挙げます。

- 光ネットワーク
- モバイルネットワーク
- IoT ネットワーク
- コンテンツネットワーク
- コンピューティングネットワーク(クラウドなど)
- 仮想ネットワーク

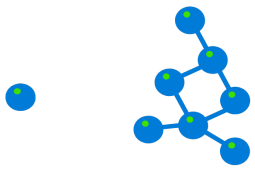


図1: スタンドアローン(左)とネットワーク(右)

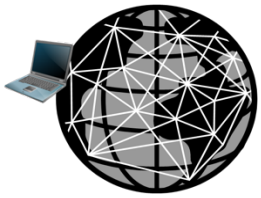


図2: インターネット

図3: あらゆる機器がつながる時代に

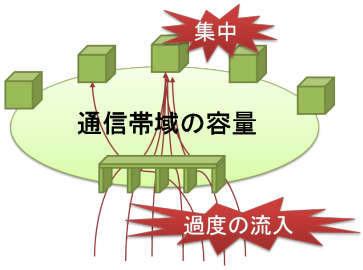


図4: 通信ネットワークで生じる問題

図5: 通信プロトコル

情報学研究科 通信情報システム専攻 情報回路方式分野

佐藤 高史　　辺 松
http://www.pass.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

1. システム LSI とは?

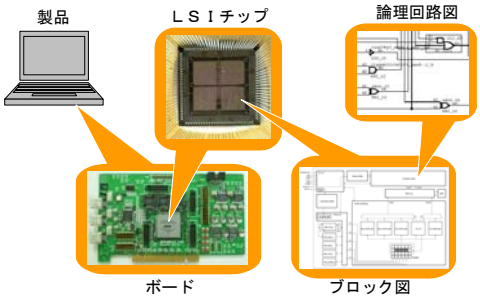


図 1: 情報機器の中身

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

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

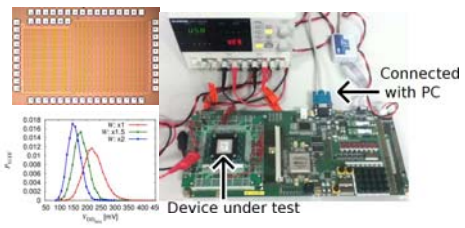


図 2: 試作チップとその測定の様子

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

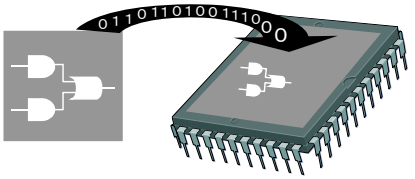


図 3: 「書き換え」可能な回路

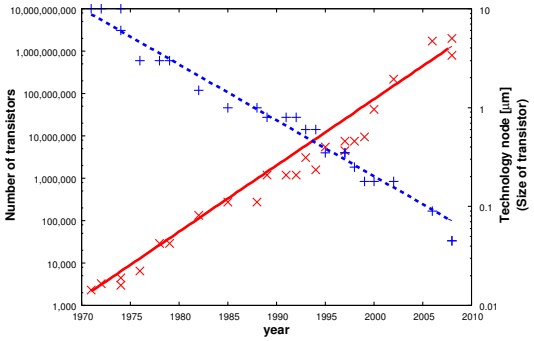
「高性能」画像処理システム: 画像処理は今や様々な分野で欠かすことのできない重要な技術です。画像処理では一般に取り扱う情報量が膨大であるため、**ハードウェア/ソフトウェアを組み合わせたシステム全体としての最適化**が必要不可欠となります。我々の研究室では画像処理アルゴリズムおよびその実装に関する検討を相補的に行うことにより、効率の良い画像処理システムの構成手法について研究しています。

図 4: 画像認識システムの例

情報学研究科 通信情報システム専攻 大規模集積回路分野 (小野寺研究室)
小野寺秀俊 教授，塩見準 助教
http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/

集積回路とは

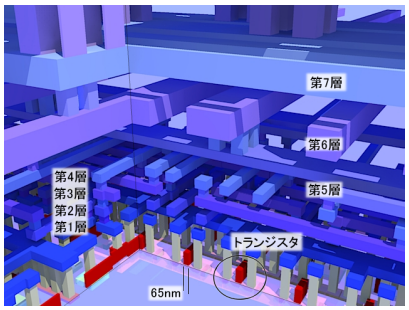
集積回路 (LSI) とは，半導体基板の上に微細な電子回路を作り込んだものです．パソコンなどに代表されるコンピュータが集積回路を使っていることを知っている人は多いかも知れません．しかし，集積回路はコンピュータだけではなく，携帯電話，自動車，家電製品など身のまわりのものや，産業用ロボットなど，あるゆる場所で使われています．1960年ごろ生まれた集積回路は，その後の技術の進歩により右の図のように発展してきました．2020 年現在，製造プロセス (トランジスタの最小幅) は 7 nm (0.000007 mm)，わずか 1cm 四方のチップに 85 億個以上のトランジスタが集積されるまでになりました．



トランジスタ数と製造プロセス

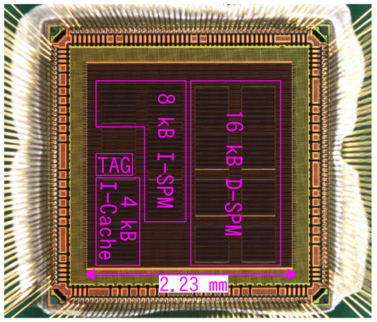
研究の取り組み

我々の研究室は，このような大量の微細トランジスタを「どのように利用すれば高性能かつ低消費電力な集積回路を実現できるか」を研究しています．現在のスマートホンはわずか 10 数年前のスーパーコンピュータに匹敵する演算能力をもつだけでなく，無線通信，GPS，加速度センサーなど様々な機能を備えています．現在の集積回路は右の模式図にあるように，数十億個のトランジスタが 10 層以上にもおよぶ立体交差した配線で接続されており，どのように設計すれば最大の性能を発揮するかは非常に複雑な問題です．



集積回路の内部構造模式図

集積回路はますます応用範囲を広げており，例えば医療の分野では患者の体に負担をかけずに体内を検査できる超小型センサーや失われた視覚や聴覚を代替するためのデバイスも開発が進んでいます．また，今後あらゆるモノがネットワークに接続される IoT(Internet of Things) 時代が到来すると予想されています．集積回路はそのような社会を実現するための基礎を担っているのです．



設計・試作したプロセッサ

あらゆる場所で集積回路が使われる時代を考えてみましょう．これまで通り，小型・多機能・低消費電力であることはますます重要です．それに加えて信頼性が重視されてきています．医療用デバイスや自動車の制御などに使われているデバイスに故障は許されません．また，身の回りのものに埋め込まれた回路がすぐに壊れて頻繁に交換や買い替えが必要なようでは誰も使おうとはしないでしょう．そのため，過酷な環境 (温度，振動など) や長期間の使用でも劣化や故障を起こさないデバイスであることが求められています．数億個のトランジスタが数億分の 1 秒という速度で動作している集積回路で高信頼性を達成することは容易ではありません．我々はこれまで培ってきた回路設計技術に加えて，回路の劣化やばらつきを検出する技術，周辺環境からのエネルギーを蓄積する技術 (エナジーハーベスティング) などを駆使して新しい社会を支えるデバイスの実現に向けた研究を行なっています．

情報学研究科 通信情報システム専攻 リモートセンシング工学分野

教授: 山本 衛、准教授: 横山 竜宏
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab/

当研究室では、天気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 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－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。

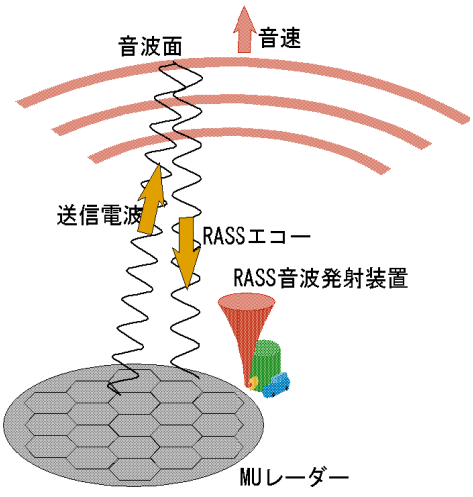
☆ 当研究室は宇治キャンパスの生存圏研究所レーダー大気圏科学分野に属しており、工学部電気電子工学科、及び大学院情報学研究科通信情報システム専攻の研究指導を行っています。

情報学研究科 通信情報システム専攻 地球大気計測分野

教授: 橋口浩之、助教: 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/

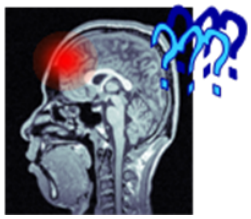
☆当研究室は宇治キャンパスの生存圏研究所 大気圏精測診断分野に属しており、工学部 電気電子工学科の卒業論文、及び情報学研究科 通信情報システム専攻の修士・博士論文の研究指導を行っています。

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



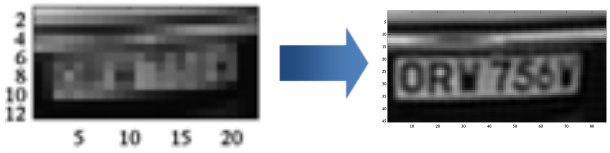
ヒトの高次情報処理である「意思決定」過程の解明に，情報学と認知科学との融合的アプローチによって取り組んでいる．個体による意思決定・環境適合のモデルである「強化学習」に注目し，変動するあるいは複数のエージェントが存在するような複雑な環境に対して，効率よく適合する機械学習の方式を開発し，ロボットの制御などへ応用すること，また，機械学習法として開発された「機械の知」が「自然な知」である脳において実現可能であるかどうかを認知科学実験と非侵襲脳活動計測装置を用いて検証すること，などを具体的な研究課題としている．さらに， ヒトの脳活動から意思決定に関する信号を再構成する， ブレインマシンインターフェースの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

計算神経科学とニューロインフォマティクス

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

ベイズ超解像と画像情報表現

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



統計的バイオインフォマティクス

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

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

情報学研究科 システム科学専攻 医用工学分野

教授:松田 哲也　**准教授**:中尾 恵　**助教**:今井 宏彦
URL: http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp

■ 研究概要

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

■ 研究分野

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

■ 研究内容

(1) MRI による生体の硬さ・動きの計測

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

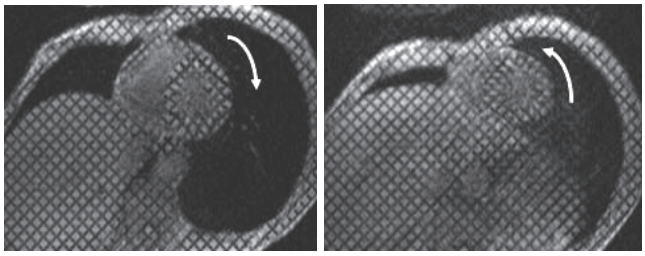


Fig.1 MRI による心臓の運動解析

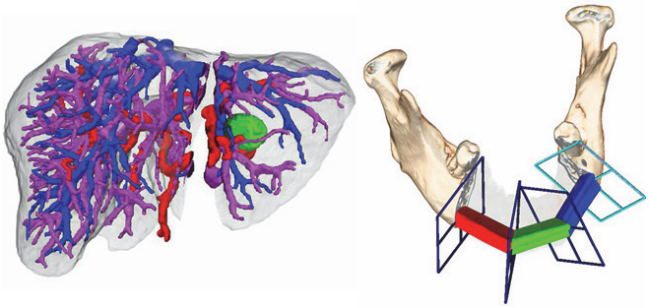


Fig.2 三次元画像を用いた手術シミュレーション

(2) 医用画像解析と治療支援

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

(3) 触力覚情報の保存・共有

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

(4) 心臓の細胞・機能シミュレーション

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

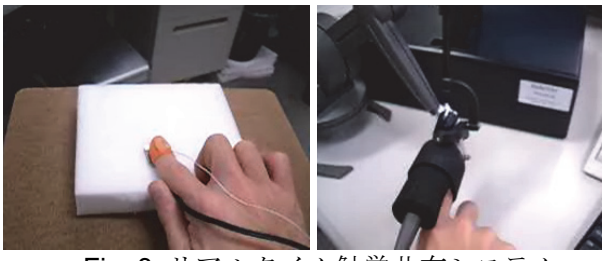


Fig. 3 リアルタイム触覚共有システム

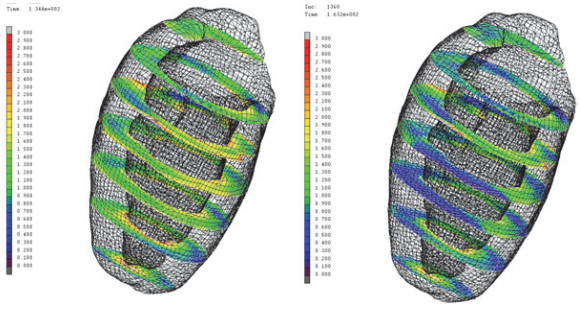


Fig. 4 心筋に生じる応力分布の解析

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻 エネルギー情報学分野

下田 宏、 石井 裕剛

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. 異文化コミュニケーションの促進

エネルギー資源のほとんどを輸入に頼る我が国にとって、他国と良い関係を構築・継続していくことは死活問題です。その為には、市民レベルでの交流を活発にすることも重要になってきます。この研究では、日本人と外国人との交流促進を目的として、デジタルサイネージを用いて文化背景の異なる外国人へ適切な情報を提示する手法やコミュニケーションを誘発する手法について研究しています。

ヒューマンインタフェース技術で支える
新しいエネルギー社会システムの創成

エネルギー科学研究科・エネルギー応用科学専攻
エネルギー応用基礎学分野

教授：土井俊哉、准教授：川山巌

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%）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、電池、タッチパネルなどの研究にも応用できます。以下に研究内容の詳細を記します。

(1)結晶方位を揃えた高温超伝導線材の開発

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

(2)次世代 MRI 診断装置向け超伝導線材開発に関する研究

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

写真１．全ての結晶の向きを同じ方向に揃えた金属テープ

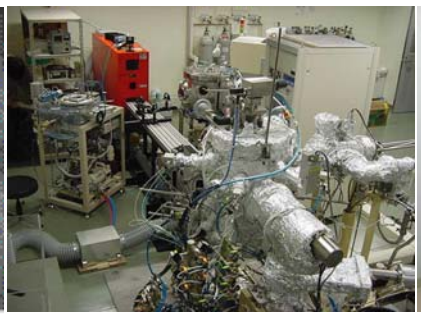


写真２．レーザー蒸着装置とイオンビーム蒸着装置

写真３．電子顕微鏡と原子の配列状態を観察する装置

cue

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。本誌はモノクロ印刷ですが、web ページにはカラー版も用意してあります。

ぜひ一度、web ページを訪問してみてください。

電気電子工学科 オープンキャンパス2020 実行委員会

目　　次

(本文中の所属は執筆当時のものです)

１．熱から生じる光を自在に操る（第39号）
浅野 卓，井上卓也，メーナカ デゾイサ，野田 進 …… 1

２．原子力プラント解体作業支援のための拡張現実感システム（第40号）
石井裕剛，下田 宏 …… 5

３．ナノの世界を可視化する
－ ナノデバイスから生体分子へと展開する可視化技術 －（第41号）
小林 圭，山田啓文 …… 10

４．医療とコンピューター 医用画像を中心に －（第42号）
中尾 恵，松田哲也 …… 15

５．科学衛星による宇宙の電磁環境探査（第43号）
小嶋浩嗣，上田義勝 …… 19

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。本誌はモノクロ印刷ですが、web ページにはカラー版も用意してあります。

ぜひ一度、web ページを訪問してみてください。

電気電子工学科 オープンキャンパス2019 実行委員会

目　　次

(本文中の所属は執筆当時のものです)

１．レーザーの光で一億度を測る（第37号）
南貴司，水内亨 …… 1

２．人に寄り添う安全安心なコンピュータの実現を目指して（第38号）
石原亨，小野寺秀俊 …… 7

３．熱から生じる光を自在に操る（第39号）
浅野卓，井上卓也，メーナカ デゾイサ，野田進 …… 13

４．原子力プラント解体作業支援のための拡張現実感システム（第40号）
石井裕剛，下田宏 …… 17

５．ナノの世界を可視化する
－ ナノデバイスから生体分子へと展開する可視化技術 －（第41号）
小林圭，山田啓文 …… 23

熱から生じる光を自在に操る

工学研究科　電子工学専攻　量子機能工学講座　光量子電子工学分野
浅　野　　卓、井　上　卓　也、メーナカ デゾイサ、野　田　　進

はじめに

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

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

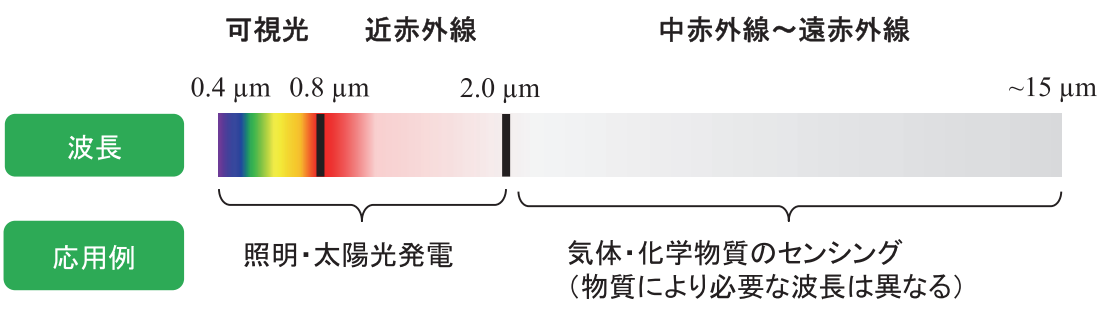


図1　熱輻射に含まれる各波長の光の応用例

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

熱輻射の起源となる電子と光の相互作用を制御する

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

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

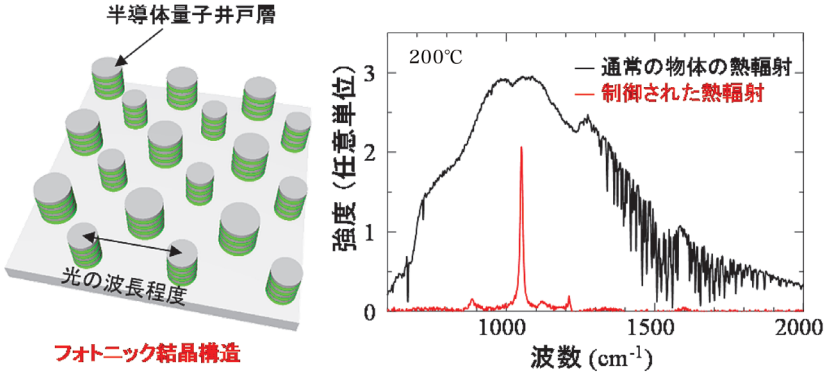


図２　半導体フォトニック結晶を用いた熱輻射光源の模式図（左）と実現した狭帯域な熱輻射スペクトルの例（右）

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

「熱輻射の応答は遅い」という常識を覆す

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

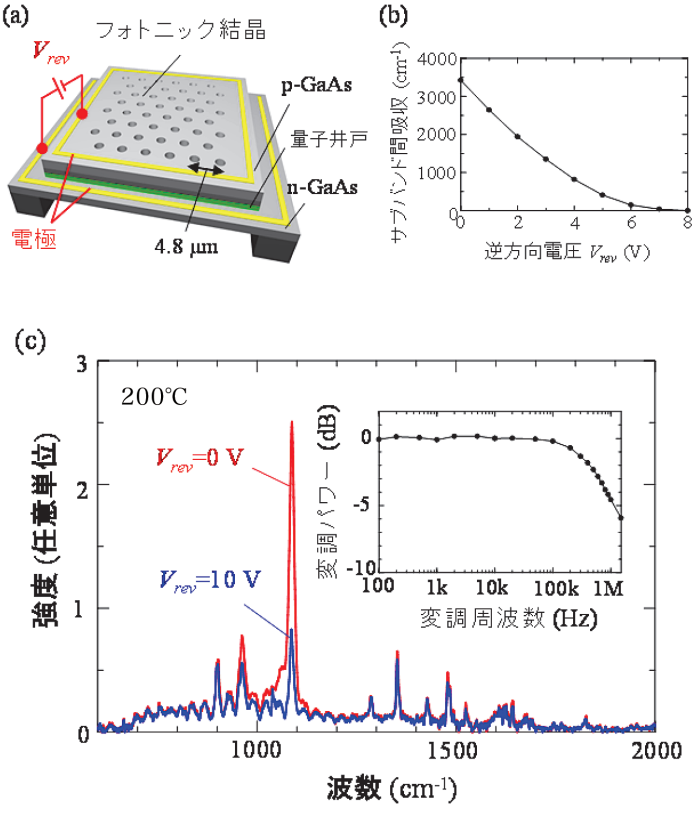


図３：熱輻射強度の電気制御

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

熱輻射制御の発電応用

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

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

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

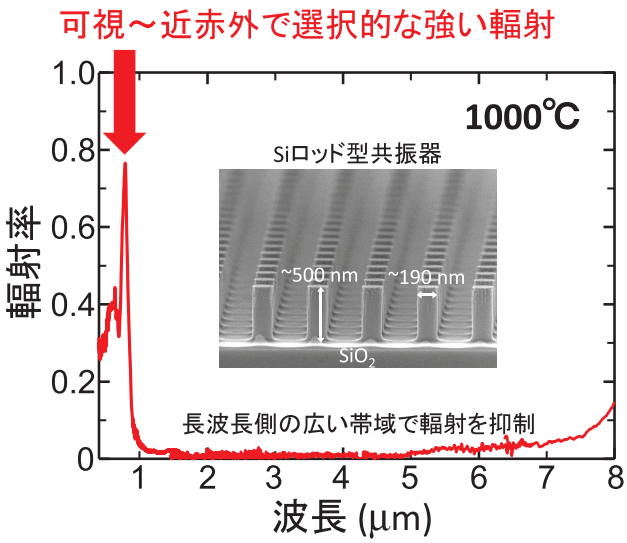


図 4：熱光発電用熱輻射光源

最後に

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

原子力プラント解体作業支援のための拡張現実感システム

エネルギー科学研究科
石　井　裕　剛、下　田　　宏

1. はじめに

2011 年に起こった東日本大震災に伴い、福島第一原子力発電所で原子力プラントの核燃料が溶けてしまう大事故がおきました。この事故では、想定されていなかった高さ 10m を超える津波が原子力プラントを襲ったことで、炉心を冷却するために必要な電力を発生させる非常用ディーゼル発電機が水に浸かって動かなかったことが原因でした。この対策として我が国では、原子力プラントの安全基準をより厳しくしていますが、その基準をクリアするためには安全設備を追加するための投資が必要になります。一方、我が国の商用原子力プラントは 1970 年の美浜原子力発電所 1 号機、1971 年の福島第一原子力発電所 1 号機から始まり、50 機以上のプラントが建設され、発電単価が安く、二酸化炭素を発生させない準国産エネルギーとして我が国の発展を支えてきました。しかし、その設計寿命は 30 年程度のものが多く、発電電力の小さい古い発電所は経済的な観点から追加投資して安全基準をクリアさせず、廃止してしまうことになっています。我が国では、これまで廃止が決まったプラントは 10 機以上にもなりますが、その解体作業はあまり進んでいません。

原子力プラントの解体作業は他の工業プラントの解体作業と大きく異なります。その違いは、原子力プラントの場合、長年の運転により炉心周りの構造材が放射線を浴びて放射線を放出する性質に変わっていることです。そのため、解体時に有害な解体物を厳重に管理しなければなりません。これまで、多くの原子力プラントを建設してきた我が国では、建設のための技術は蓄積されていますが、解体作業については安全かつ効率のいい方法はあまり開発されていませんでした。特に近年では、世間から見た原子力プラントの印象は悪く、その現場で働こうという若い人が少なくなり、これまで培ってきた現場作業技術の継承も難しくなってきています。

2. 拡張現実感技術とその特徴

拡張現実感技術は、現実の世界にコンピュータで生成した物体を合成して表示することにより、その物体が実際に存在するかのようにユーザに見せる技術です。最近では、スマホゲーム等にも使われているので、ご存知の人も多いでしょう。スマートフォンやヘッドマウントディスプレイに取り付けられたカメラによって現実の世界を撮影し、その映像にリアルタイムで仮想の物体を合成して表示します。その際、表示する物体の表示位置や姿勢をうまく調整することで、どの方向から見てもその物体があたかも現実世界内に存在するかのように見せることができます。例えば、ユーザが右側から見れば、右側から見たときの物体の映像を生成して適切な位置に表示してやればいいわけです。

この拡張現実感技術を利用すれば、その名の通り、現実の世界を情報的に拡張することができます。例えば、現実には裸眼では見えないものを見えるようにしたり、現実の物体に注釈を付け加えたりすることができます。この技術を利用すれば、作業者の視界に直接、作業手順や作業のコツ等を提示することができます。これにより図 1 に示すように、従来のような紙ベースの作業手順書に比べてわかりやすく、かつ間違いのない作業ができるようになります。

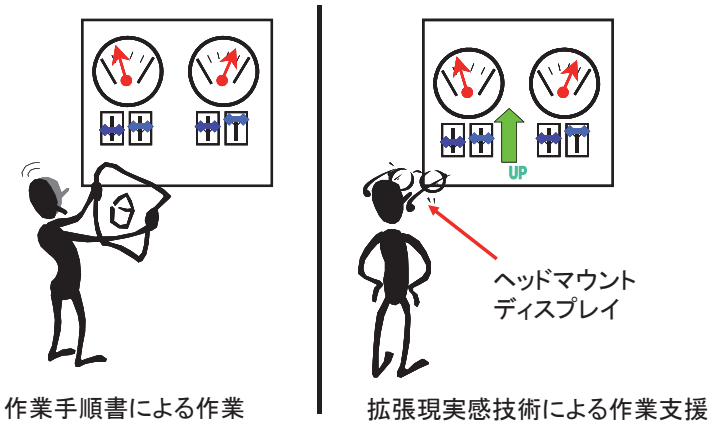


図 1. 作業手順書と拡張現実感技術による作業支援

3. 拡張現実感技術の要素技術

拡張現実感技術を実現するためには大きく分けて 4 つの要素技術が必要です。それらは、(1) 表示技術、(2) レジストレーション技術、(3) キャリブレーション技術、(4) トラッキング技術です。(1) 表示技術は仮想の物体をユーザに提示するための技術で、表示デバイスに関する技術も含みます。(2) レジストレーション技術は、現実の世界の物体と仮想の物体の位置を合わせる技術です。(3) キャリブレーション技術は映像を表示する際の歪み等を調整して、仮想物体を合成する際の精密な位置調整をする技術です。(4) トラッキング技術はリアルタイムでユーザの視線の位置と方向を検出する技術です。

この中でも (4) トラッキング技術は拡張現実感を実現するうえで重要な技術です。もし、ユーザの視線の位置や方向の検出にずれがあると、仮想の物体の表示位置が意図していたところからずれてしまいます。拡張現実感技術を原子力プラントの現場作業支援に利用している場合、表示位置のずれは作業ミスを誘発しかねません。これまでは、トラッキング技術としてマーカと呼ばれる QR コードのような模様が描かれた板とカメラを使う方法（マーカベーストラッキング）が、安価で精度の高い方法として利用されてきました。これは、カメラをユーザの視線に見立て、図 2 のようにカメラを使って撮影したマーカの画像からマーカとカメラの相対的な位置や方向を検出するものです。そのため、プラント構内でこの技術を利用するためには、環境内に多くのマーカを貼り付けて事前にそれらのマーカの位置と方向を計測しておく必要があります。こうしておけば、マーカを撮影したカメラの画像からマーカとカメラの相対位置がわかり、さらに事前に計測した環境中のマーカの位置と方向から、最終的に環境中のカメラの位置と方向がわかります。

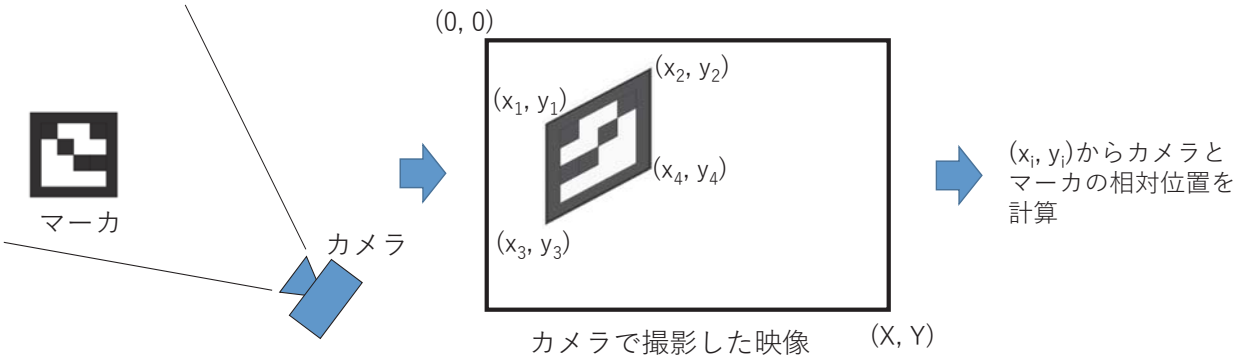


図 2. マーカベーストラッキング

近年では、マーカの代わりに環境中にある装置の角や直線部分などの特徴的な部分をマーカの代わりに利用してカメラの位置や方向を検出するトラッキング技術もあり、マーカレストラッキングと呼ばれています。この方法では事前にマーカを環境内に貼り付ける必要がないため簡単な方法であり、最近では無料のプログラムが公開されていて基本的なプログラミングの技術があれば簡単に利用できるようになっています。

しかし、マーカレストラッキングをプラントの現場作業支援に利用しようとするとまだ問題があります。マーカレストラッキングでカメラの位置と方向を正しく検出するためには、環境中に特徴となる点や線が数多く存在し、なおかつ似ているような部分がないことが必要です。例えば環境中に同じ形の装置が複数ある場合は、カメラの位置を一か所に断定することはできません。さらに、この技術を原子力プラントの解体現場で利用しようとすると、解体中に日々刻々と変わっていく現場では、適切にカメラの位置と方向を検出するのは難しく、今後のさらなる技術開発が望まれます。

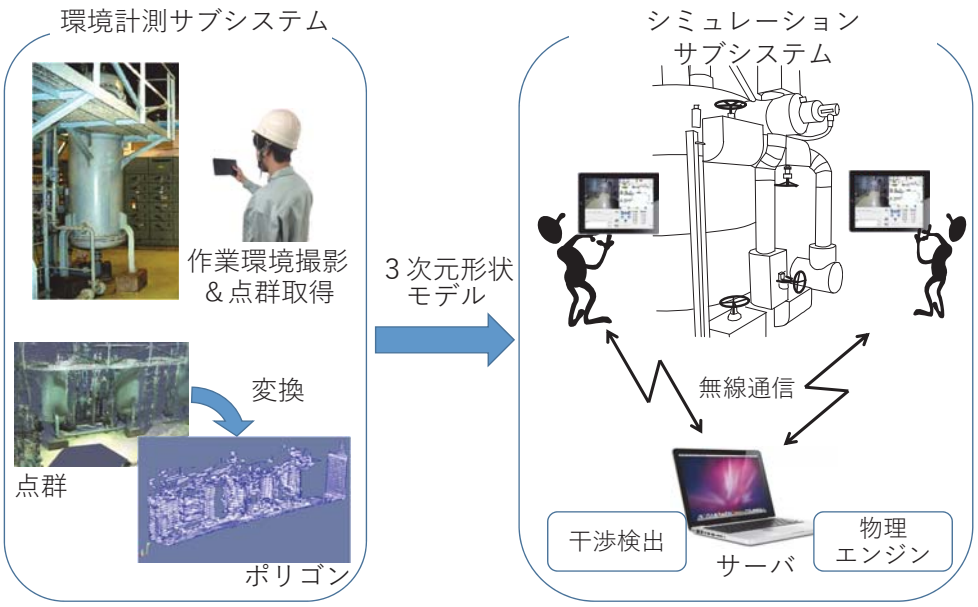
4. プラント解体作業支援の例

ここで私達が開発している原子力プラント解体作業支援システムの一つを紹介しましょう。原子力プラント内は狭い部分が多く、分解・切断して解体した機器を一時的に置いておいたり運び出したりするスペースが十分にありません。そのため、事前に分解する機器やその周辺のスペースを精密に計測し、必要なスペースが確保できるのかや、分解した部品を運び出す経路が確保できるのかを調べて、それをもとに分解・運搬計画を立てています。この作業は解体作業の進行に伴って変化する機器や環境の3次元的な形状を扱うために非常に複雑で、時間もかかりミスも起きやすい作業です。

近年では、ビデオ撮影した物体の動画像から立体構造を再構成する技術やレーザスキャナの性能が向上しており、これらを利用することによりプラント内の機器や環境の3次元形状を計測してモデル化することができるようになってきました。この技術を利用すると、計測した3次元形状モデルを使って仮想的にコンピュータ上で解体作業を実施し、作業スペースや運搬スペースが十分かどうかを調べることができます。さらに、これを作業現場で実施すれば、作業員が作業現場で直観的に作業計画を検討することができます。

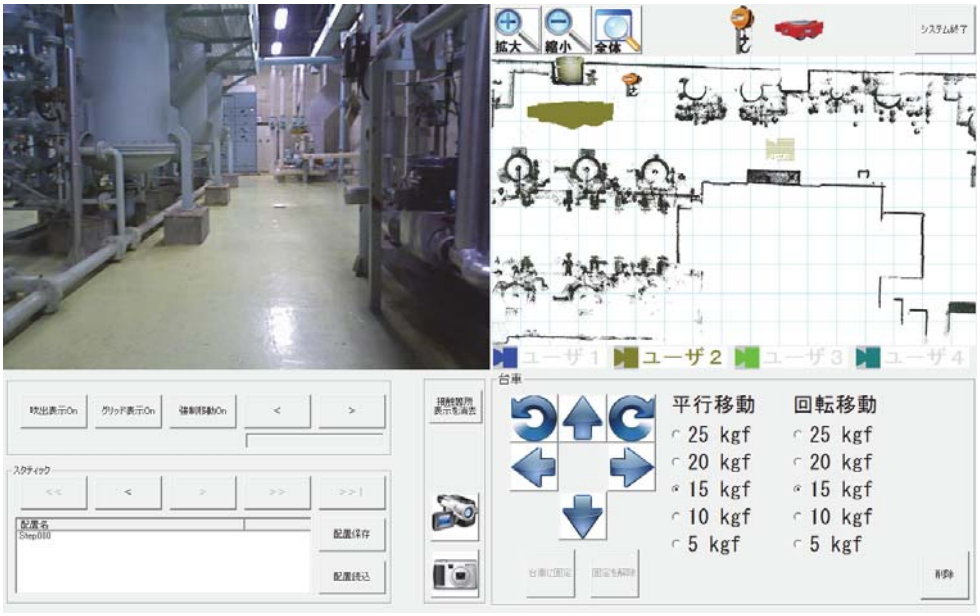
図3に機器の分解・運搬作業シミュレーションシステムの概要を示します。環境計測サブシステムではカメラやレーザスキャナを利用して作業現場や分解対象機器の3次元形状モデルを作成します。シミュレーションサブシステムでは、この3次元形状モデルを基に物理エンジンを用いて、対象機器の分解や移動の際に周囲の物体に干渉しないかどうかを調べます。

シミュレーションサブシステムの画面例を図4に示します。タブレットPCに付属のカメラで作業現場を撮影すると、その映像が画面上に表示されるだけでなく、その上に作業対象機器の3次元モデルも表示されます。ここでは、画面右の見取り図や画面下のボタン等を使って仮想的に作業対象機器を分解したり、クレーンや台車で移動させたりすることができます。また、仮想的な作業の際、作業対象機器が周囲の機器類に干渉した場合には、図5に示すように拡張現実感技術を用いてその干渉個所が着色されて表示されます。この着色位置を確認することにより、実際の作業の際にどの部分が干渉するのかを事前に確認することができます。



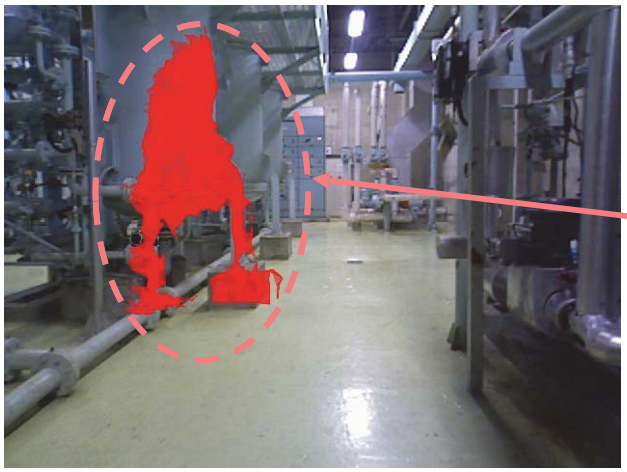
© 2017 Japan Atomic Energy Agency

図 3.　分解・運搬作業シミュレーションシステム



© 2017 Japan Atomic Energy Agency

図 4.　シミュレーションサブシステムの画面例



© 2017 Japan Atomic Energy Agency

図 5. 拡張現実感により示された干渉個所を示す着色

5. まとめ

情報通信技術が発達した今日でも、私達はサイバーワールドに暮らしているわけではなく現実の世界で生活しています。拡張現実感技術は現実の世界を情報的に拡張する技術であり、私達の現実の生活を、より便利に、より快適にサポートしていくことができる技術です。ここでは特に原子力プラントの解体作業の支援を取り上げましたが、スマートフォンが普及した社会では、スマートフォンを使った拡張現実感技術により、私達の日常生活がより便利になる未来も遠くないことでしょう。

ナノの世界を可視化する
ー ナノデバイスから生体分子へと展開する可視化技術 ー

工学研究科　電子工学専攻　電子材料物性講座　電子材料物性工学分野
小　林　　圭、山　田　啓　文

1. はじめに

一昨年、話題となったスカーレット・ヨハンソン主演の SF 映画「ゴースト・イン・ザ・シェル」は、士郎正宗の作品「攻殻機動隊」が原案となっていますが、その近未来に対する独特な世界感は衝撃的であり、日本ではもとより全世界でも高く評価されています。作中では、生体器官をサイボーグ化する義体化技術や、脳の神経ネットにデバイス素子を接続する電脳化に重要な役割を果たすナノマシンが登場します。このナノマシンは、体内において細胞小器官のような機能を発現する想像上の極微なマシンですが、現実世界においても、作品中に描かれているほどの高度なレベルには到底至っていないものの、ナノトランジスタ、原子スイッチあるいは分子標的カプセルと言った、さまざまなナノデバイスやナノマシンの実用化研究が進みつつあります。

ナノというのは 10^{9} を示す単位の接頭辞ですが、上述したナノマシンやナノデバイスのように、多くの場合、ナノという言葉は、ナノメートル（10^{9}m）の大きさを示しており、原子や分子の世界における大きさに対応します。図 1 に示すように、例えば、水素原子の直径は 0.1 nm、NaCl の大きさは 0.5 nm であり、また、二重らせん構造をもつ DNA 鎖の直径は 2 nm となります。髪の毛の直径が 100 μm（= 100,000 nm）程度であり、私たちの体を構成する細胞の大きさでさえも 10 ～ 30 μm（10,000 ～ 30,000 nm）であることを考えると、ナノの世界は極めて小さな世界だと改めて認識できます。このような極

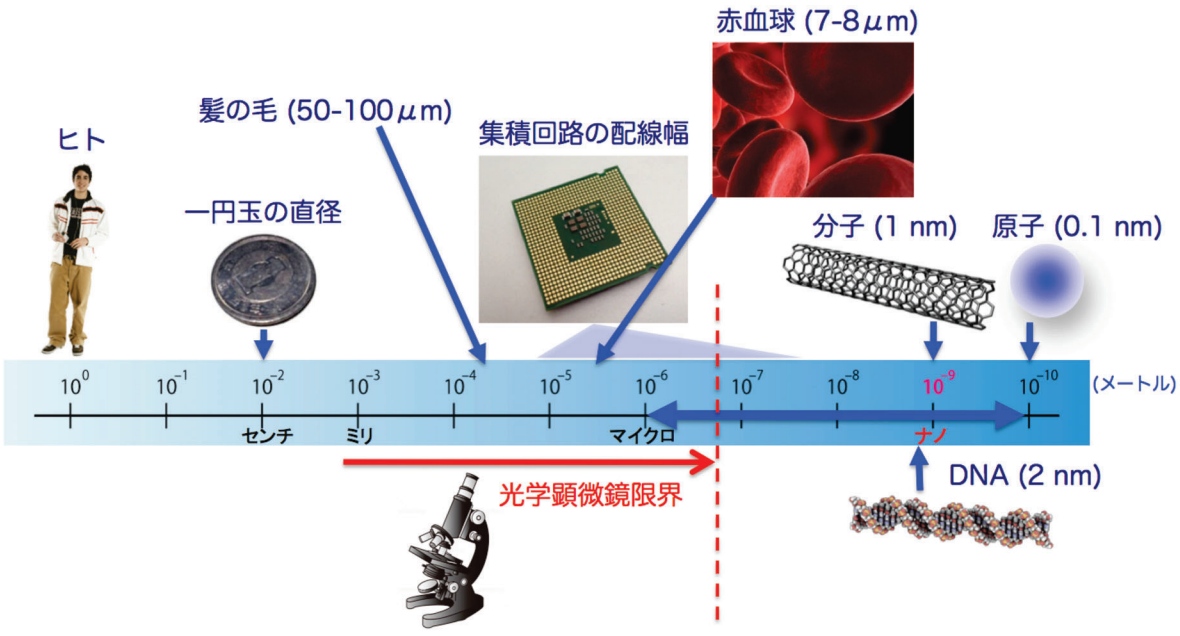


図 1　ナノ世界：大きさの目安。

微の世界は、一見われわれの日常とは無縁の、隔絶した世界のように思えますが、実は思っている以上に身近な世界です。最新のスマートフォンのチップ（SoC：システムオンチップ）の電極間のサイズ（チャネル長）は既に 10 nm を切っていますし、ドラッグデリバリーシステムとして、ガン細胞の標的医療に使用されるナノカプセルは数 10 nm のサイズです。ナノの世界は、私たちの周辺にある通信や医療技術として、既に身近な存在になりつつあるのです。

2. ナノ世界を可視化するには？

微視的世界を可視化する手段としてすぐに思いつくものは光学顕微鏡です。光学顕微鏡は 17 世紀に確立されて以来、現在では広く普及していますが、その解像度には理論的限界があり、可視光の波長 λ 以下の大きさのものを捉えることはできません（レーリーの 2 点識別分解能：0.61 λ / 開口数）。一方、20 世紀初頭に開発された電子顕微鏡を用いると、等価的な波長（電子波長）が小さくなり、解像度は飛躍的に向上しますが、高エネルギーの電子線を使用することから、観察試料は電子線照射によるダメージに対して耐性のある材料に限られ、また観察環境も電子線が散乱されない真空中に限られます。しかしながら、近年、観察試料や測定動作環境にこうした制限の少ない、走査型プローブ顕微鏡と呼ばれる、全く異なるタイプの顕微鏡が開発されました。特に、走査型プローブ顕微鏡の一種である原子間力顕微鏡（AFM：Atomic Force Microscopy）は、観察対象・測定環境に対する制約が原理的に存在しないという際立った特徴をもっており、金属・半導体にとどまらず誘電体結晶、分子材料、生体試料などさまざまな試料のナノスケール構造・物性評価に大きく貢献しています。

ところで、現代では、ほぼ全ての記録がそうであるように、音楽記録もディジタル記録ですが、こうした中、アナログレコードが意外な人気を博しています。実は、このアナログレコードの記録・再生の方法は、AFM の仕組みと極めて似通っています。レコードの記録情報は、レコード溝に沿って作られている左右の微小な凹凸が持っており、この凹凸によって引き起こされる（溝に接触している）レコード針の左右の運動が電気的な信号として再生され、最終的に音響信号に変換されます。AFM では、原子レベルで尖った針（探針と呼ばれます）が用いられますが、この針を観察試料の表面に沿って（接触状態で）水平に動かします。針は試料表面の凹凸に沿って上下動しますが、この動きはレーザー光によって高感度に測定され、電気信号に変換されて、表面の凹凸情報（＝表面微細形状）として記録されます（AFM 像：図 2（a）を参照ください）。実際には、針は微細な“ばね”（マイクロカンチレバーと呼ばれる板ばね）で支えられており、針の上

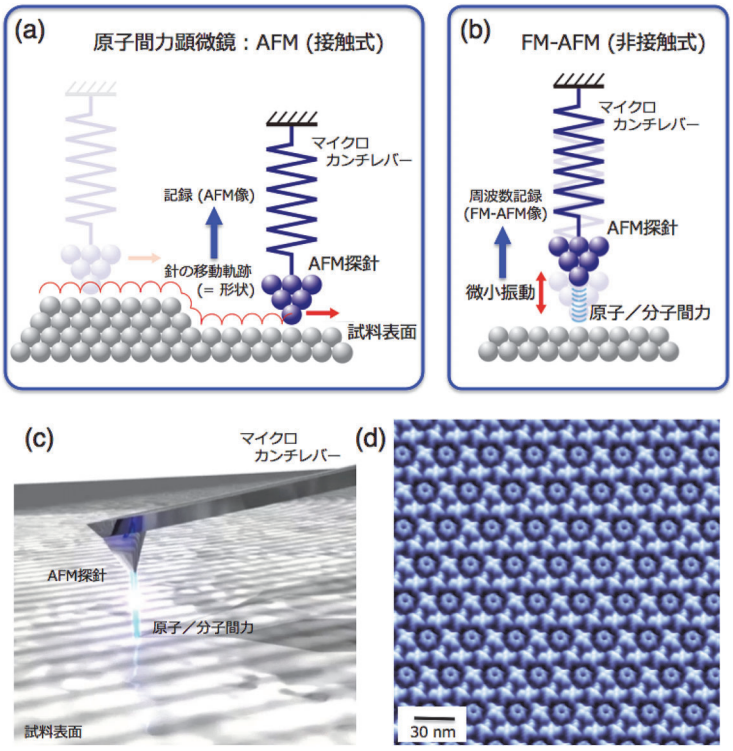


図 2　原子間力顕微鏡（AFM）。(a) AFM 動作の仕組み。(b) 周波数変調式の AFM（FM-AFM）動作の仕組み。(c) AFM 探針およびマイクロカンチレバーが、原子間力／分子間力を検出する様子を表す CG 図。(d) 溶液中でイメージングされたたんぱく質分子結晶（抗体分子）の FM-AFM 像。

下動はこのばねの変形量となり、針が受ける原子間力がセンシングされることになります（力学におけるフックの法則）。こんな単純な方法で、微細な構造が果たして観察できるのかと思ってしまいますが、実際のところ、その解像度は原子レベルに及びます。現在までに AFM は飛躍的な発展を遂げ、最新の AFM では、針を試料表面から 0.1 ～ 1 nm 程離した状態の非接触状態（あるいは疑似接触状態）で、微小振動させながら動作するようになっています。この振動周波数を AFM の針（実際には針の支持部分：マイクロカンチレバー部）がもつ機械的な共鳴周波数に設定しておくと、AFM の針と試料表面原子（あるいは分子）との間に原子間力（分子間力）がはたらいたときに、この微小振動の共鳴周波数はわずかに変化します。この周波数変化が表面微細構造として記録されます（図 2（b），(c)）。周波数変化を記録する AFM 法であることから、周波数変調 AFM（FM-AFM）法と呼ばれます。この FM-AFM による可視化技術は、さまざまな材料のナノスケール構造評価法として既に確立されていますが、現在では生体分子の直接観察（図 2（d））、さらには単一原子の原子種分析も可能となるまでに発展しています。また、次節に述べるようにナノ領域の電位や電荷を可視化することも実現しています。

3. 電位や電荷を可視化する（ナノトランジスタの可視化）

炭素 6 個がベンゼン環のように六角形に結合し、蜂の巣状の格子を組むと、グラフェンと呼ばれる 2 次元シートの結晶になります。この 2 次元シートを円筒状に丸めたものが単層カーボンナノチューブ（単層 CNT）です。単層 CNT はその直径が約 1 nm で、究極的な 1 次元材料と言えますが、一方で、CNT は極めて高い導電性、熱伝導性、耐熱性をもち、ユニークな電気・機械特性を示す次世代のナノマテリアルとして、既にさまざまな分野でその応用開発が進められています。エレクトロニクス分野においても、CNT 内における電荷の担い手であるキャリア（電子／正孔）が高速で移動でき（高移動度）、また、散乱を受けずに移動しうる（弾道輸送）ことから、高速動作可能な電界効果トランジスタ（FET）などナノ電子素子としての実用化研究が進められています。

こうしたナノ FET デバイス開発にあたっては、その動作特性解析のために、FET の電流経路となるチャネルの電気特性を測定することが必須となります。CNT の FET の場合、チャネルは CNT そのものに相当しますが（図 3（a）参照）、CNT の直径は約 1 nm なので、その測定は容易ではありません。しかしながら、AFM を用いることによって、CNT の電気測定を行うことが可能になります。AFM では、AFM 探針と試料原子・分子との間にはたらく原子間力や分子間力を測定していますが、試料が電位（電荷）をもっている場合は、静電気的な力を測定することで、電位（電荷）を計測・可視化することが可能となります。この可視化法は電気力顕微鏡と呼ばれます。図 3（b）~（d）にその測定例を示します。図 3（b）は試料として用いた CNT-FET の AFM 像で、AFM 像内の S、D はそれぞれ FET のソースおよびドレイン電極に相当します。この 2 つの電極の間には、これらをつなぐ CNT が可視化されてい

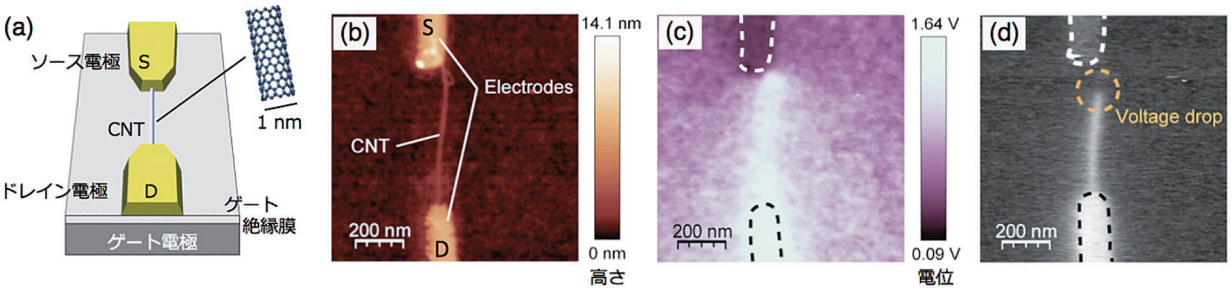


図 3　(a) カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ（CNT-FET）の模式図。(b) CNT-FET の AFM 像。(c) CNT-FET チャネル上の電位可視化像。(d) 高周波の電位変化に対する応答像（トラップ電荷は可視化されない）。

ます（= CNT チャネル）。図 3（c）は、同一領域の表面電位の可視化像に相当しますが、下部のソース電極が明るく、上部のドレイン電極が暗く見えるのは、それぞれの電極がその明るさに応じた電位を持っているためです。電極および CNT 以外の部分は、ゲート絶縁膜（シリコン酸化膜）の表面に相当しますが、全面にわたって中間的な明るさ（0.5 ～ 1 V に相当）を持っているのは、広範囲の絶縁部に電荷がトラップされていることを表しています（特にチャネルに沿った絶縁部）。一方、図 3（d）は、ドレイン電極に高い周波数で交流的に変化する電圧を加え、その周波数で応答する静電気力のみを可視化した像で、高周波で応答しないトラップ電荷は可視化されません。従って、トラップ電荷の影響を除去した電位の可視化像に相当することになります。この等価的な電位像では、チャネルに沿って明るく見える線が、破線の円の中心付近で突然暗くなっており、電位がこの点で急激に低下していることが分かります。これは、CNT チャネル上のこの点に、局所的な電位障壁となる欠陥があるためです。このように、AFM を利用した表面電位可視化法によって、チャネル周辺におけるトラップ電荷や、CNT チャネル上の欠陥位置を明確に可視化でき、新規ナノデバイス開発を行う上で、さまざまな有益な情報を取得することができます。

4. DNA 分子の可視化

インフルエンザの流行が懸念され始めると、予防接種を受けることを強く推奨されますが、これは毒性のないインフルエンザワクチンを抗原として、その抗体を私たちの体内に作り出すことによって免疫性を獲得するためです。そこには、抗体がそれに対する抗原にしか結合しないという抗原 – 抗体結合（= 特異結合）のもつ特殊な性質が利用されています。こうした特異結合は分子認識的であり、体内にあるさまざまな生体分子（DNA、タンパク質分子など）がはたらく際に、極めて重要な役割を果たしています。冒頭で触れた作品「攻殻機動隊」におけるナノマシンは、このような生体分子を代替する人工マシンとして描かれたものだと思われます。いずれにしても、生体の機能を微視的に理解するためには、DNA や各種タンパク質分子などの生体分子を直接観察することが必要不可欠となります。

DNA 分子は、デオキシリボース（5 つの炭素から成る環状の糖分子）とリン酸で構成される 2 本の鎖（糖 – リン酸鎖）が、アデニン、グアニン、シトシン、チミンと呼ばれる 4 種の（核酸）塩基によって平行に結合した構造（二重鎖）をしています。これら塩基の配列順序は遺伝情報を担っており、生体維持の根源的役割を果たしています。DNA が右巻き二重らせん構造を形成していることは広く知られ

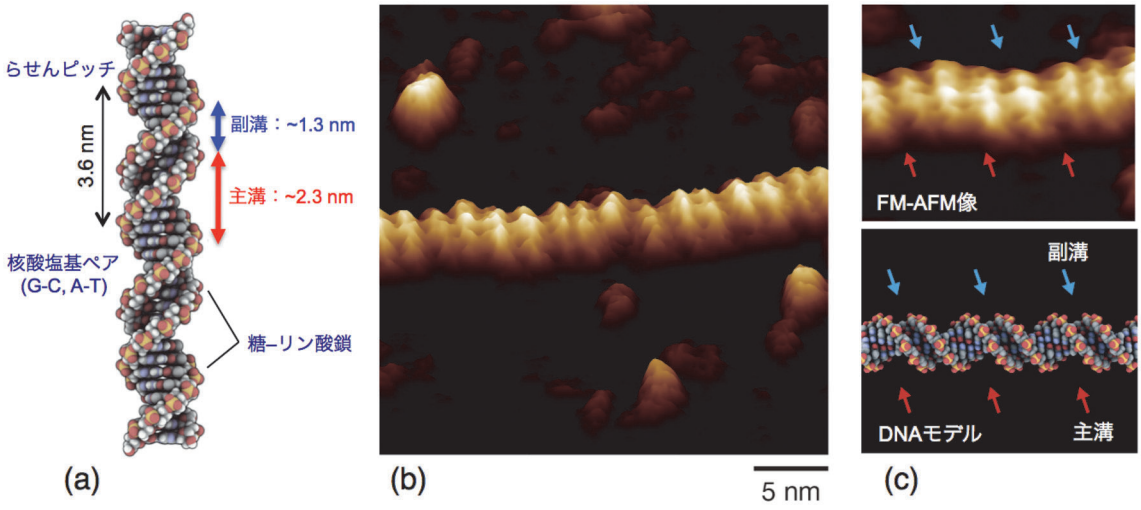


図 4　(a) DNA の二重らせん構造。(b) 生理環境下の DNA の FM-AFM 像。(c) 二重らせん部の拡大 FM-AFM 像（上）とそのモデル（下）。

ていますが、これを解明したのはワトソンとクリックという二人の分子生物学者であり、これもまた広く知られていますが、この二重らせん構造はワトソン・クリックモデルと呼ばれています。

DNA 二重らせん構造は、結晶化した試料に対して X 線構造解析を行うことで解明されてきましたが、この手法では生理環境下での DNA の状態を観察することは難しく、また DNA– タンパク質複合体など、DNA 分子の特定位置の構造を解析することは困難でした。こうした理由から、溶液中で測定が可能な AFM による DNA 観察が試みられ、一定の成果を挙げてきたものの、二重らせんを解像できるような高分解能観察の報告は長くありませんでした。近年、FM-AFM の開発によって、基本的には AFM 探針と試料は接触することはなくなり、生体分子の溶液中の自然な構造を壊すことのない、分子スケールでの観察が可能となりました。

図 4（a）に、溶液中における DNA 分子（プラスミド DNA）の FM-AFM 像を、また、図 4（b）、(c) にその拡大像と対応する構造モデルを示します。この AFM 像は、右巻き二重らせんモデル（ワトソン・クリックモデル）に対応し、交互に現れる幅の広い溝（主溝）とやや狭い溝（副溝）の 2 つの溝によって、二重らせん周期が形作られていることが分かります。観察された二重らせん周期は、3.7 nm であり、ワトソン・クリックモデルの 3.4 nm より明らかに長く、生理条件下ではその構造が緩和して、モデルとの違いを生み出していると考えられます。

最小の生体分子である DNA の直接観察が実現したことは、生体内に存在する多様な生体分子の構造・機能解析を大きく進展させることになり、さらには、こうした構造・機能解析によって、医薬分野で求められているナノバイオデバイス／センサー開発を加速する多くの情報がもたらされると期待されています。

5. おわりに

この 10 年の間で AFM による可視化技術は目覚ましい発展を遂げました。この解説記事では、カーボンナノチューブの電位可視化、および生理環境下の DNA 二重らせん構造観察という 2 つの話題を取り上げましたが、これ以外にも、AFM 可視化技術については、エポックメイキングな発展がいくつもありました。例えば、その一つに表面原子／分子周囲の水分子の直接可視化があります。液体状態の水分子は、当然ながら短時間でランダムに揺らぎ、拡散していますが、固体表面近傍の水分子は統計力学平均的には平衡位置に留まることから、水分子分布の可視化が実現しました。さらには、溶液中のイオンも固体表面の帯電状態を反映して、その空間分布に分子スケールの偏りがあることが見いだされました。こうした研究は、固液界面における物理・化学現象を利用した種々のデバイス開発、さらには、生体内のより複雑な高次機能の分子メカニズムの解明へとつながるため、今後の技術展開が注目されています。一方、これまでのナノ構造の顕微分析においては、主にその空間分解能の高さに焦点が当てられており、測定対象は静的であるか、比較的ゆっくりと変化する場合がほとんどでした。近年、高速 AFM 法および時間分解 AFM 技術が急速に発展し、溶液中におけるモータータンパク質分子の回転運動が高速 AFM によって可視化され、また、FET チャネル上のキャリアの移動・緩和過程が時間分解 AFM ／電気力顕微鏡によって直接可視化されるようになりました。特に、時間分解 AFM 法は、空間マッピングという手法に基づいており、詳細には触れませんが、時間分解能と空間分解能とは相補的な関係にないため、2 つの分解能を同時に向上することが可能であり、さまざまな分野における原子・分子スケールの動的プロセスの可視化法として発展することが期待されます。

今後、ナノエレクトロニクス、ナノ材料科学・工学やナノ機械工学などさまざまな科学技術分野が多面的に融合して行く中で、ナノ可視化およびそれから派生した技術はさらに発展して行くものと考えられ、例えば、冒頭で触れた高度なナノマシンの実現につながればと密かに期待しています。

医療とコンピュータ
ー 医用画像を中心に ー

情報学研究科　システム科学専攻　システム情報論講座　医用工学分野
中　尾　　恵、松　田　哲　也

1. 医療におけるコンピュータ

近年におけるコンピュータの処理能力の向上や通信・ネットワーク技術の進歩により、スマートフォンや様々な家電製品のようにコンピュータの関わりが容易に想像できるものだけでなく、金融、小売業、飲食店、運輸、サービス業など、社会における幅広い領域で情報技術（IT）は不可欠なものとなっています。医学・医療の分野も例にもれず、学術的な研究領域のみならず一般臨床の場にもIT化の波が押し寄せています。病院の診察室で医師が紙のカルテではなくコンピュータに診療内容を記入している様子を見たことがあるかもしれません。これは電子カルテといって、複数の医師がいる病院では、他の医師が行った診療内容を共有するために既に必須のものとなっており、最近では開業医でも広く普及しています。このような電子カルテは診療内容の記録だけではなく、医療費の計算の自動化にも役立っていますし、薬剤師への処方箋データの自動送付、看護師や他の医療スタッフへの指示、注意事項の伝達など、様々な情報のやりとりが行われます。大きな病院では多くの検査装置や診断装置あるいは治療支援システムなどにコンピュータが利用されており、現代の医療はコンピュータ無しには成立しないと言っても過言ではありません。このようなコンピュータの医療への関わりの中でも、医用画像はコンピュータが最も活躍している領域で、コンピュータが社会に広く普及する以前から利用されてきました。

様々な疾病の診断に用いられる画像を医用画像と呼びますが、X線画像は最も普及している医用画像で、みなさんも学校の検診時などに撮影された経験があると思います。他にも超音波を用いて人体の内部を観察する超音波断層像、放射線同位元素を含む製剤を注射し同位元素が放出する放射線を検出器で捉えて画像化する核医学画像、脳の電気活動を磁力の変化として捉える脳磁図、強力な磁場の中で磁場と人体の水や脂肪に含まれる水素原子核との相互作用を利用したMRI（Magnetic Resonance Imaging）など、病院では様々な医用画像が用いられており、これらの撮影装置を画像診断装置と呼びますが、これらはすべてコンピュータによって画像化されています。健診で撮影するようなレントゲン写真についても、レントゲンフィルムに匹敵するほどの高精細の画像デジタル化技術が実現し、フィルムを用いない放射線科診療が一般的になっており、高速の院内ネットワークを整備した近代的な医療施設では、様々な画像診断装置で撮影したデジタル画像データを直ちに診察室で観察できるようになっています。

このような様々な画像診断装置の中でもX線コンピュータ断層撮影（X線CT, CT: computerized tomographyまたはcomputed tomography）はコンピュータが活躍する画像診断装置の代表と言えます。X線CTは、対になったX線照射管と検出器が人体を取り囲むように一回転することにより人体を透過するX線の強弱を様々な方向から観測し（図1）、得られた各データを放射線の照射方向に基づいてコンピュータで再構成計算して断層像（断面図）として画像化する方法で、1972年に英国EMI社の技術者であるハンスフィールド氏が開発し、1979年にノーベル医学生理学賞の対象となりました。従来のX線画像は投影像であり、X線が照射された奥行き方向の情報は検出できないため人体内部の様子を立体的に捉えることはできませんでしたが、X線CTは人体内部の3次元構造を画像化できるため、画像

診断の進め方を大きく変える画期的な装置でした。そして、製品化されると急速に普及し、今やその稼働台数は国内だけでも１万台を超えるとされています。最近ではさらに進歩を遂げ、平面的な断層像のみならず３次元の画像を撮影できる装置も臨床的に用いられるようになっています。

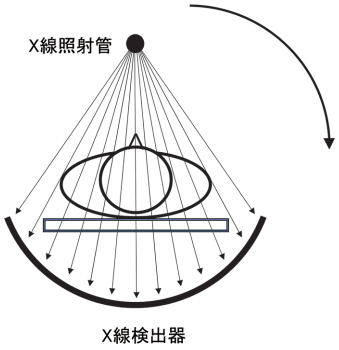


図１：X 線 CT の撮像原理

コンピュータは医用画像を生成する際に利用されるだけでは無く、得られた医用画像に対して様々な処理や解析を行い、診断に役立つ情報を抽出して提示する画像処理にも利用されています。次節では、日常診療の幅広い領域で利用されているコンピュータの中でも特に関わりの深い医用画像処理の現状を紹介します。

2. 医用画像処理の現状

様々な画像診断装置で撮影された医用画像から疾病や傷害の診断につながる情報を導き出す画像処理技術は、情報技術の中でも代表的な研究領域のひとつであり、画像をデジタル信号の行列として取り扱うことによって、様々な処理や解析を実現しています。最先端の画像診断装置では、人体全体を１ mm 以下の細かさで３次元画像として撮影することも可能となっています。仮に１ mm の細かさの３次元デジタル画像を考えると、約２ m の身長の大人であれば、１ mm 毎の輪切りの断層画像として 2000 枚の画像から構成される膨大な量の３次元データとなります。X 線 CT のように短時間で撮影が可能な画像診断装置では、10－20 分程度で 2000 枚もの断層像が取得できますが、画像を詳細に観察して異常の有無を判断しなければならない放射線科医にとっては、このように膨大な数の画像は大きな負担となります。そこで、様々な画像処理技術が活躍します。

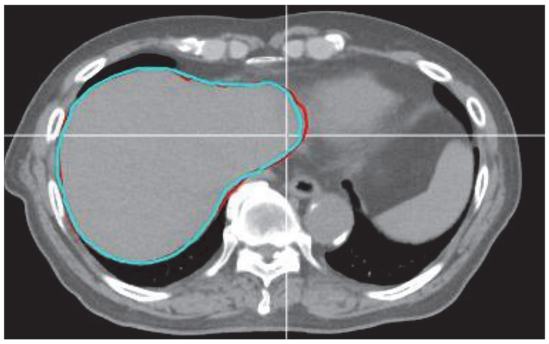


図２：CT 画像における肝臓領域の検出
赤：医師が指定した輪郭、青：自動抽出された輪郭

コンピュータハードウェアの進歩によって、このように大きなデジタル画像データを取り扱うことも容易となり、膨大な数の断面像を積み重ねて３次元画像データとして取り扱うことにより、放射線科医が診断に用いるコンピュータ端末では輪切りの断面だけではなく任意の方向の断面として表示したり、各臓器を立体的に表示するなど、人体内部の様子を容易に観察できるよう様々な方法で表示されます。また、情報科学の研究者が蓄積してきた膨大なデジタル画像処理技術を活用することによって、各種臓器や骨あるいは血管などを自動抽出して（図 2)、必要な臓器・組織のみを表示することも可能となっています。ほかにも、腫瘍の境界を自動的に判別してその体積を算出し抗がん剤による治療効果の判定に利用したり、心臓のように運動する臓器では拡張期と収縮期の内容積を自動検出し、心臓から拍出される血液量を算出して機能評価に利用されています。

さらに最近では人工知能（AI: Artificial Intelligence）の技術も画像解析に利用されるようになっており、様々な疾病について、これまでに蓄積されてきた膨大な画像データを参照して病変部の特徴を抽出し、画像上で異常が疑われる部分を自動的に候補領域として医師に提示する診断支援システムも活発な研究対象となっています。このようなシステムでは、過去に診断が確定している類似病変を参照例とし

て提示したり、画像に現れた異常を引き起こし得る候補病名を順位付けしてリストアップしたり、さらに自動推定の確かさやその根拠を示すなど、診断が容易となるような様々な工夫が提案されており、医用画像の自動診断も夢ではなくなりつつあります。

3. 3次元医用画像の応用

人体の3次元画像は疾病の診断に加えて、病変部に対する治療の目的においても様々に利用されています。例えば、がん病変部位の切除を目的とした外科手術や、放射線をがん細胞に対して局所的に照射することによって、切らずに治す治療として知られる放射線治療においても、コンピュータによる医用画像の処理は必要不可欠となっています。

臓器個別の3次元形状や動き、変形などの幾何学的あるいは力学的な情報はベクトルデータとしてコンピュータ内で扱われます。個人差が大きい臓器の形や動きに関する情報をコンピュータ内で正確に扱うために、臓器や血管、病変部位などの3次元構造を記述した形状モデル（図3）が3次元画像から自動生成され、利用される機会が増えています。例えば、放射線治療において、動画のように時系列的に撮像されたCT画像からがん病変とその周辺の正常な臓器の位置や呼吸に伴う動きの情報を抽出し、正常な臓器を避けてがん病変のみに効率的に放射線を照射できるような計画を自動算出する方法や、治療当日の姿勢や呼吸の状態に基づいて治療内容をカスタマイズすることによって、治療効果の向上を目指す研究が行われています。

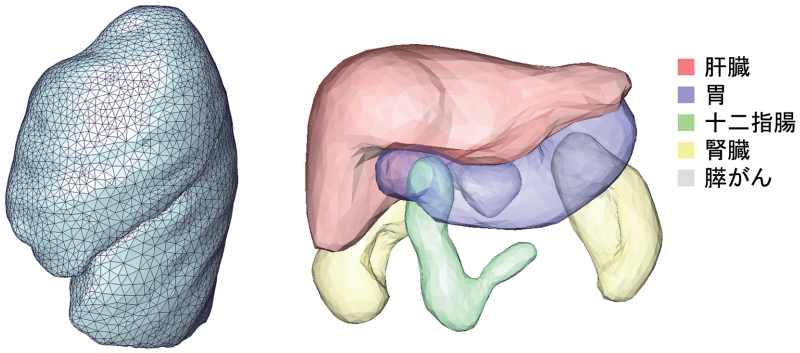


図3：臓器の3次元形状モデル
（a）肺の上葉と下葉のメッシュモデル、（b）腹部臓器の形状モデル

外科手術では、病変部位をできるだけ正確かつ迅速に切除することが望まれます。しかし、多くの病変部位は臓器内部に位置し、外科医は手術開始時には目視することができません。個人差が大きい臓器内部の血管構造を頭の中だけでイメージして必要な部分だけを正確に切除することは熟練した外科医であっても難しく、時間を要する場合があります。このような外科手術における課題に対して、個人の医用画像から切除対象の腫瘍や血管構造を表現した3次元臓器モデルを手術前に作り出し、臓器

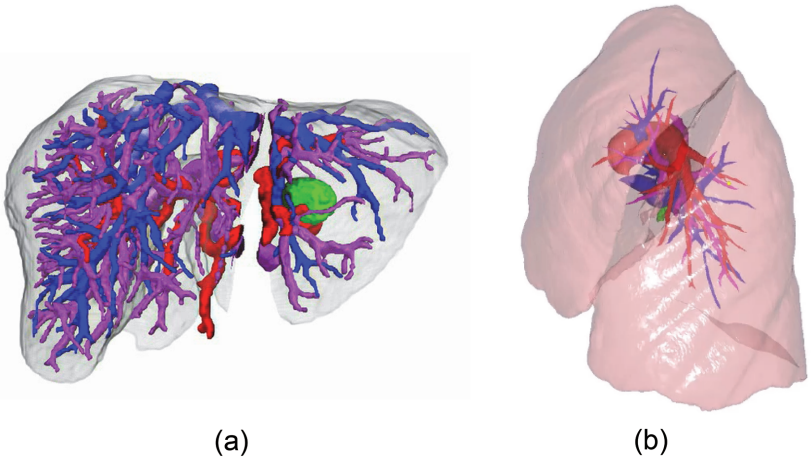


図4：がん病変に対する臓器切除シミュレーション（緑：がん病変）
（a）肝切除術、（b）肺切除術

に対する手術操作や切除をシミュレートすることによって、病変部位に対する手術の流れを事前に計画できるシステムが開発されています（図 4)。また、手術室内でモニターに 3 次元臓器モデルを表示して病変部位との位置関係を確認しながら手術を進める手術ナビゲーションもまだ適用可能な手術は限られているものの実利用がなされ始めています。

3 次元医用画像の計測技術とコンピュータによる画像処理や数理モデル化の技術は世界的にも日進月歩で研究が進められています。医用画像に基づいて診断や治療を支援する医用システムのさらなる深化によって、患者への負担が少ない高品質な医療がより多くの医療機関で提供されることが期待されます。

4. むすび

医療の場で利用されているコンピュータや情報技術について、医用画像を中心に実例を挙げながら簡単に紹介しました。私たちの研究室でも、より高度な医療を目指して、様々な医用画像に対する画像処理や画像提示法の開発を行っています。医師に対して、様々な疾病の診断が容易となるよう画像を自動解析したり、コンピュータ上で画像をバーチャルに取り回し病変部を切除する過程について試行錯誤できるような環境を提供するなど、高度な医療を安全に、正確に、容易に行うための様々な方法を提案しています。また、これらの技術は、医師だけでなく患者さんにとっても自分の病状の理解を助けることに繋がると期待されます。近い将来の新しい医療の一端を担う技術として、現在進めている研究が少しでも役に立つことを願っています。

科学衛星による宇宙の電磁環境探査

生存圏研究所　宇宙圏電磁環境探査分野
小　嶋　浩　嗣、上　田　義　勝

1. 宇宙プラズマ大気

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

ところで、宇宙プラズマには、大きく分けて二種類のものがあります。

太陽風プラズマ
惑星大気プラズマ

です。

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

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

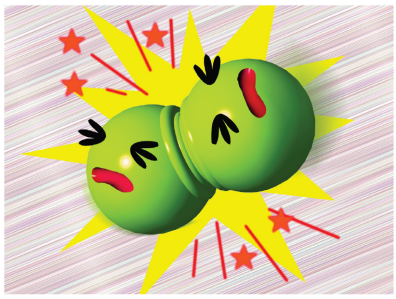


図 1：衝突する場合.

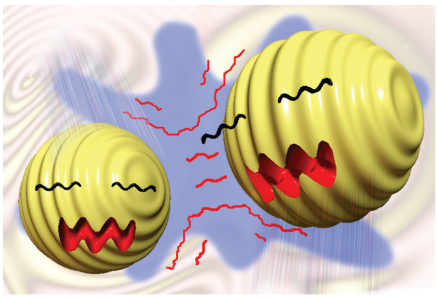


図 2：無衝突の場合.

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

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

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

2. 無衝突プラズマとプラズマ波動

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

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

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

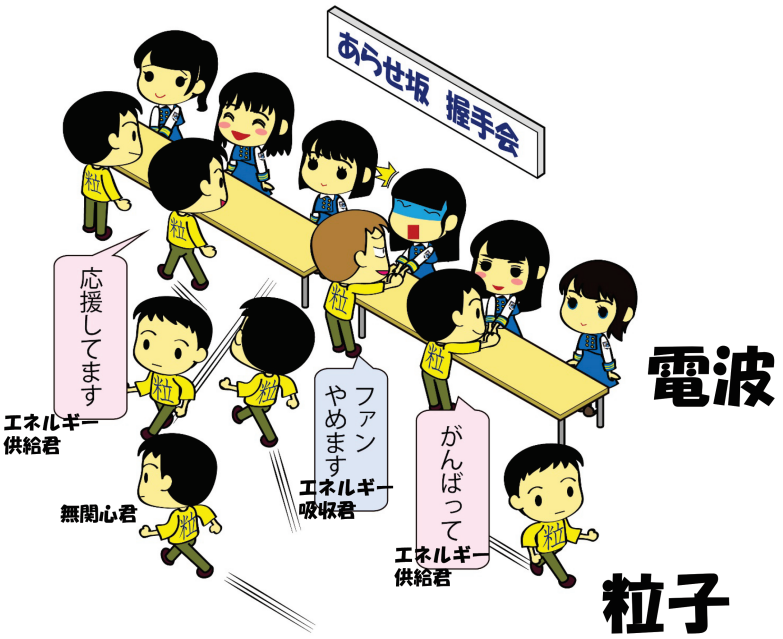


図 3：アイドルさんの握手会は電子と電波のエネルギーのやりとりに似ています（イラスト：熨斗千華子さん）.

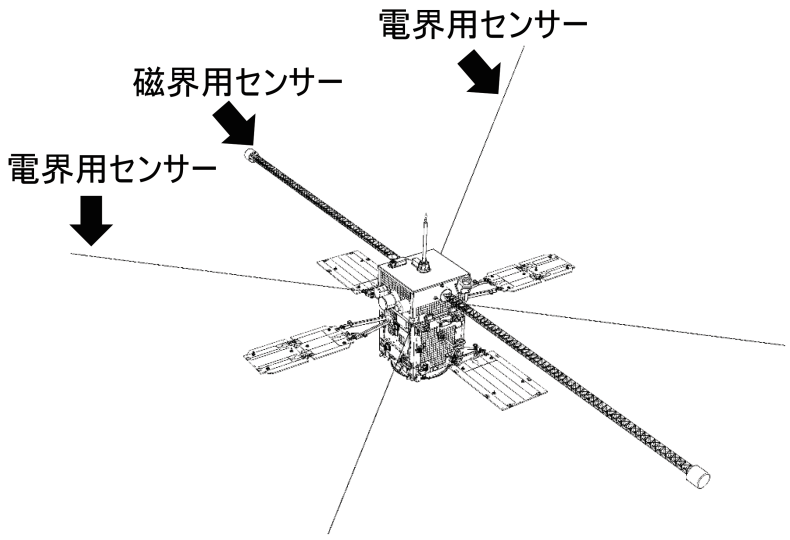


図 4：日本の科学衛星「Arase」（2016 年 12 月打ち上げ）。地球の放射線帯を観測しており、その中でプラズマ波動観測は高いエネルギーの電子をつくりだす波動の解析など重要な役割を担っている（©JAXA）.

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

3. プラズマ波動の衛星による観測

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

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

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

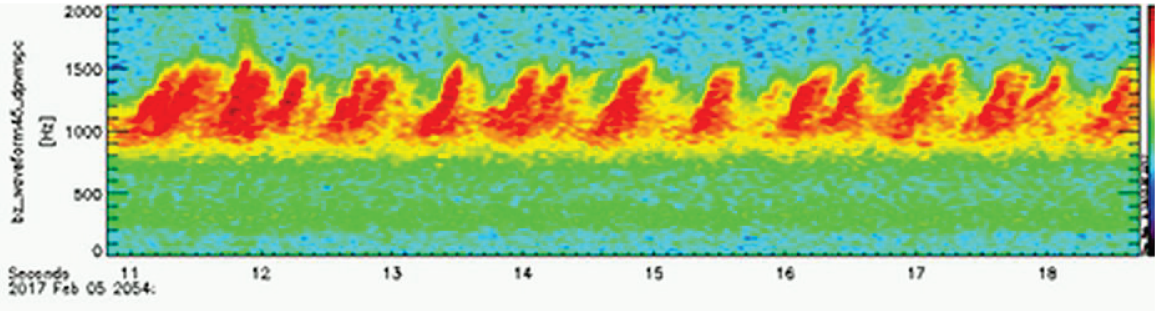


図 5：Arase 衛星で観測されたコーラス現象のスペクトル。縦軸は周波数（単位はヘルツ）、横軸は時間（単位は秒）（Arase 衛星プラズマ波動チーム提供）.

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

4. 水星へ

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

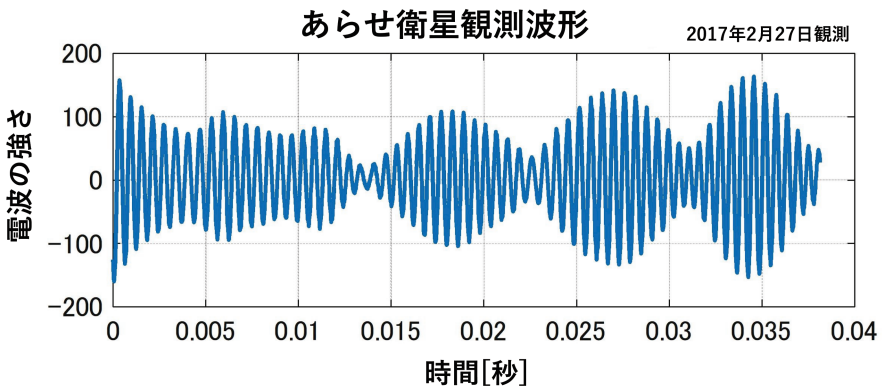


図 6：Arase 衛星に搭載されたプラズマ波動観測器で観測された放射線帯で発生している電波の波形.

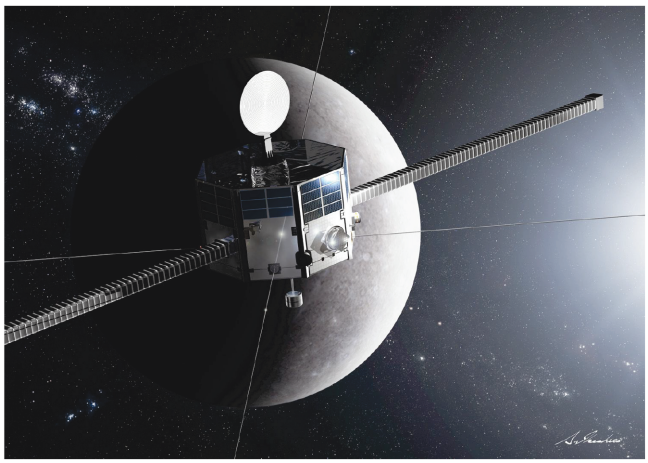


図 7：日欧共同水星磁気圏探査衛星 BepiColombo MIO（2018 年 10 月打ち上げ（イラスト：池下章裕氏、提供：JAXA））.

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