

# CUE

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.36 SEPTEMBER 2016

[第36号]

.....  
卷頭言

奥村 浩士

.....  
大学の研究・動向

.....  
高温超伝導を用いた粒子加速器用マグネットの研究  
工学研究科 電気工学専攻  
電磁工学講座 超伝導工学分野

.....  
産業界の技術動向

.....  
株式会社ウェザーニューズ  
手柴 充博

研究室紹介

平成 27 年度修士論文テーマ紹介

高校生ページ

学生の声

教室通信

編集後記

**cue**：きっかけ、合図、手掛かり、という意味  
の他、研究の「究」（きわめる）を意味す  
る。さらに KUEE（Kyoto University  
Electrical Engineering）に通じる。

cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環として京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員やその他の企業の協力により発行されています。

## cue 36号 目次

### 巻頭言

猪苗代送電線に想う

…………… 昭和 41 年卒 京都大学名誉教授 奥村 浩士…………… 1

### 大学の研究・動向

高温超伝導を用いた粒子加速器用マグネットの研究

……………工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 超伝導工学分野  
…………… 雨宮 尚之, 中村 武恒…………… 3

### 産業界の技術動向

気象におけるセンサーデータの利活用

……………株式会社ウェザーニューズ 手柴 充博…………… 8

研究室紹介…………… 13

平成 27 年度修士論文テーマ紹介 …………… 33

### 高校生のページ

電力・水素協調エネルギーインフラ（カーボンフリーを目指して）

……………大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻 白井 康之…………… 53

### 学生の声

NASA の懐に飛び込んで

……………工学研究科 電気工学専攻 大村研究室 博士後期課程 3 年 中山 洋平…………… 58

「はんだづけ同好会」の活動

……………工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学研究室 博士後期課程 3 年 野村 義樹…………… 58

### 教室通信

特色入試の導入と実施について

……………工学研究科 電子工学専攻 木本 恒暢…………… 59

編集後記…………… 60



## 巻頭言

## 猪苗代送電線に想う

昭和41年卒 名誉教授 奥村浩士



第一次世界大戦期の日本経済について述べた文の中から正しいものを選ぶ四者択一問題が、2015年度大学入試センター試験の日本史Aの問題として出題されています。正解は「水力発電が盛んになり、猪苗代 - 東京間で長距離送電が開始された」です。高校の日本史に登場する猪苗代送電系統は大正3年に建設された歴史ある電力系統です。ところが、昭和2年新設の猪苗代第二送電線の試送電のとき異常振動が起ったのです。発電所全体が鳴動した電気振動と記録されています。原因究明に取り組んだ後藤以紀氏はその4年後、論文「送電系統の不減衰電気振動と電気的不安定状態」で異常振動は送電線の対地容量と変圧器の励磁特性に基づく共振現象であることを明らかにします。わが国における非線形振動の研究の草分けです。その後、試送電のときの異常振動は昭和30年ごろ関西電力(株)習子 - 新宮幹線で起こりました。この幹線は直列コンデンサ補償系統でわが電気系教室の林重憲、近藤文治、木嶋昭先生がアナログ計算機を駆使して解明に当たっておられます。

50年前の卒業当時、これらの異常現象に興味をもち、修士課程ではその解析法の確立と室内規模の実験で解明することを研究テーマにしました。なまやさしい問題ではないことは覚悟していました。大きな実験装置を手作りし、現象を観測して理論の構築を考えました。当時は2階の非線形微分方程式系の文献や本が大多数で、変数の多い高次元の非線形微分方程式論はボゴリュエボフ・ミトロポリスキーの漸近法くらいしかありませんでした。しかも、それそのものを適用しても現象を近似する解が得られず、拡張して初めてある程度満足できる解が得られました。その後、インターバルアナリシス、グレーブナー基底の理論など難しい数学の助けを借りながら、一步一步進めていきました。ある数学の先生が言われました。「非線形特性を指数関数で近似すればいいことがありますよ。」そして、久門尚史先生が励磁特性を指数関数で近似すると系統の状態方程式は可積分系になることを見出し、クノイド波という楕円関数で表わされる厳密解を求めることに成功しました。そのうえ、室内実験によっても実証できたのです。猪苗代送電線の不減衰電気振動は実はクノイド波だったのです。また、習子 - 新宮幹線の異常振動は多次元のホモトピー法により、3台の変圧器のうち2台が共振に関与する分数調波振動であることも明らかになりました。退官を数年後に迎えるときで、ほっとしたすがすがしい気分になったことを覚えています。コンピュータのハード、ソフトの性能が向上する時代を見据え、いろいろな数学を実際問題に如何に応用するかを常に意識してきた成果といってもいいかもしれません。

現在、原子力発電所の再稼働が注目されています。原子炉は安全に運転できても、発電した電力を送電線にのせる試送電の段階で異常が起きないだろうか、ちょっとした杞憂です。

研究分野を広げながらも、修士課程で始めたテーマを研究課題の一つとして何の押しつけもなく自分の思うままに自由に研究させていただきました。これは寛容な電気系教室と優秀な学生・院生の御蔭です。このような雰囲気 of 電気系教室がいつまでも続くことを願っています。



## 大学の研究・動向

# 高温超伝導を用いた粒子加速器用マグネットの研究

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

教授 雨宮尚之  
准教授 中村武恒

## 1. はじめに

私たちの研究室では、平成22年1月から、科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」の支援を受けて「高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦」という課題名の研究プロジェクトを、株式会社東芝、高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、京都大学原子炉実験所、日本原子力研究開発機構と共同で推進しています。このプロジェクトは、高温超伝導マグネットを粒子加速器に応用するための基盤技術の構築を目指すものですが、プロジェクト開始より6年余を経て、当初は、どんな「形」のものかもはっきりしていなかった、高温超伝導を用いた粒子加速器用のマグネットも、その姿が具体化し、この3月には、これまで、共同で研究開発を進めてきた基盤技術を検証するためのモデルマグネットというマグネットを製作し、その試験を開始するに至りました。本稿では、高温超伝導や粒子加速器の基礎から説き起こして、上記プロジェクトにおける産学連携による研究成果の一端について紹介させていただきます。

## 2. 超伝導線と超伝導マグネット

超伝導体（超伝導材料）は、超伝導状態になる温度である臨界温度により、低温超伝導体と高温超伝導体に大きく分類されることが多いです。このうち、低温超伝導体は、主に合金ないし金属間化合物で、ニオブチタン合金 NbTi（臨界温度 9.8 K）がその代表例です。一方、1986 年以降、相次いで発見された高温超伝導体は、イットリウムやビスマスなどの銅酸化物です。高温超伝導体は、元来、脆いセラミックスではありますが、ビスマス-ストロンチウム-カルシウム-銅酸化物  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2223)（臨界温度 110 K）や  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$  (Bi-2212)（臨界温度 90 K）、イットリウム-バリウム-銅酸化物  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$  (Y-123)（臨界温度 92 K）（イットリウム (Y) は、ガドリニウム (Gd)、サマリウム (Sm) などの希土類で置き換え可) について、金属と複合することにより柔軟性をもった実用的な高温超伝導線が市販されるに至っています (図 1)。

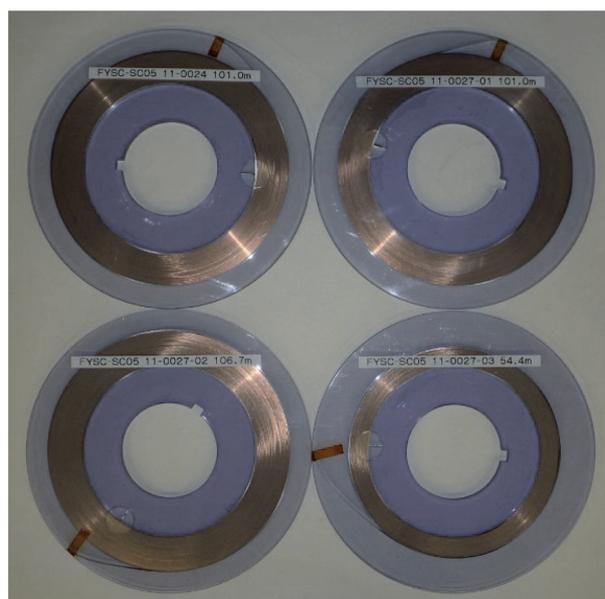


図 1 筆者らが購入した市販の高温超伝導線 (350 m)

NbTi 超伝導線を用いた超伝導マグネットは、MRI マグネットなど、広く実用に供されています。欧州原子核研究機構の世界最大の粒子加速器 LHC では、約 1700 台の NbTi 超伝導線で作られた超伝導マグネットが稼動しています。一方、高温超伝導線を用いた超伝導マグネットの本当の意味での実用化はこれからです。しかし、相対的に高い温度で運転できることが、擾乱に対する高い超伝導安定性（温度が高い故の大きな比熱に起因）や冷却効率の点で魅力的であるほか、液体ヘリウム温度では低温超伝導線よりずっと臨界磁界が高いために、超強磁界マグネットの実現の可能性という点でも強い興味を持たれています。

### 3. 円形粒子加速器

一般に粒子加速器では電界により荷電粒子を加速しますが、円形加速器では、加速部（高周波加速空洞など）を効率的に利用するため、荷電粒子を周回させ加速部を何度も通過させて、通過のたびに荷電粒子を少しずつ加速していきます。荷電粒子の軌道を偏向させ周回させるために、軌道面に垂直に磁界をかけて、これによるローレンツ力を向心力として利用します。磁束密度の大きさが  $B$  であるとき、質量  $m$ 、電荷  $q$ 、速さ  $v$  の荷電粒子の軌道半径は次式で与えられます。

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (1)$$

実際の円形加速器では、粒子の速さ  $v$  は次第に大きくなっていくので、 $B$  が一定であれば  $r$  も大きくなっていきます。空間的にもほぼ一様で時間的にも一定な磁界で、粒子にらせん状の軌道を描かせながら加速する加速器がサイクロトロンです。これに対し、加速に応じて磁界を増加させ、軌道半径を一定に留める加速器がシンクロトロンです。また、円形加速器の中心から遠ざかるにつれて非線形に大きくなるように分布した磁界を与え（具体的には中心からの距離のべき乗に比例させる）、加速につれて軌道半径は大きくなるものの、大きくなり具合を抑え込むような加速器に固定磁界強集束（FFAG）加速器があります。シンクロトロンと FFAG 加速器には荷電粒子のビームを強く集束できるという利点があります。サイクロトロンと FFAG 加速器には直流マグネットで実現できるという利点があります。実績という点では、FFAG 加速器はサイクロトロンとシンクロトロンに劣ります。

電流密度を高くできない銅線で巻いたマグネットでは起磁力を大きくできないため、鉄心により磁気抵抗の小さい磁気回路を構成し、鉄心間のギャップを粒子ビームが通過するような構造をしています。鉄の磁気飽和のために 2 T を超える磁束密度を得ることは困難です。これに対して、超伝導線には銅線に比べて格段に高い密度で電流を流すことができるので、鉄心に頼らず、すなわち、鉄心の飽和磁束密度は気にせず、コイルの起磁力を大きくすることによって高い磁束密度を得る超伝導マグネットが実現できます。マグネットを高磁界化できれば、(1) 式からわかるように小さな軌道半径で荷電粒子を曲げることができるので円形加速器を小型化できます。また、鉄心に頼らないのでマグネットを軽量化できます。さらに、水冷の銅マグネットは莫大な電力を直接消費し、加えて建屋空調にも大きな電力を必要としますが、超伝導マグネットでは、冷却システムの低い効率を考慮しても、消費電力を低減できます。

## 4. 高温超伝導マグネットを応用した円形加速器の展望

### 4.1 重粒子線がん治療装置のコンパクト化・省エネ化に向けた展望

粒子線がん治療は、がんの放射線治療の一種です。放射線治療に用いられる主な放射線にはガンマ線のような電磁波や陽子線、炭素イオン線（重粒子線）のような粒子線があり、比較的簡易な装置で発生できることからガンマ線のような電磁波の方が広く用いられています。しかし、粒子線には、体内深部の病巣に線量を集中できること、生物効果（細胞に対する影響）が大きいことといった利点があります。さらに、重粒子線には、生物効果が大きいこと、散乱が小さくがん組織と周囲の正常組織に対する線量

のコントラストを高められることといった優位性があると言われていています。重粒子線がん治療装置の概念を図2に示します。荷電粒子を治療に必要なエネルギーまで加速するための粒子加速器や加速された荷電粒子を患者まで導き患部に照射するための高エネルギービーム輸送系・照射系が必要で、治療施設が大がかりなものになってしまうことが欠点です。

この欠点を少しでも克服することが、重粒子線がん治療の普及のために重要ですが、超伝導を用いた偏向マグネットの高磁界化は小型化のための本質的な解となり得ます。以下、シンクロトロンを用いた重粒子線がん治療装置を例に簡単な試算を示します。超伝導化によって偏向マグネットの磁界を1.5 Tから4.5 Tと3倍にできればビーム軌道半径は3分の1となり、偏向マグネット間の直線部の存在を考慮してもリング直径は2分の1程度になると考えられ、面積で見れば4分の1の小型化が期待できます。治療室の上方から照射する固定ポートにかかわる高エネルギービーム輸送系についても、高さの低減が期待できます。また、小型・軽量の回転ガントリー（高エネルギービーム輸送系・照射系の最終段を患者の周りで回転できるようにして、360度任意の方向からの照射を可能にする装置）も実用化できます。シンクロトロンと回転ガントリーを超伝導化することにより、重粒子線がん治療装置を設置するための放射線シールド建屋を、建屋面積で40%減、建屋高さで30%減と大幅に小さくでき、その建設コスト節減の効果は大きいです。建設コストのみならず、設置面積を小さくできることは治療施設の立地上大きな利点であり、重粒子線がん治療の普及に大きく貢献すると期待されています。また、重粒子線がん治療装置の年間ランニングコストは10億円を超えますが、その半分以上はマグネットの運転や建屋空調の電気使用料であり、この節減の効果も期待できます。

重粒子線がん治療装置への超伝導応用は、回転ガントリーで先行しており、最近、放射線医学総合研究所にNbTi伝導冷却マグネットを用いた回転ガントリーが設置されました。この回転ガントリーに用いられているマグネットは最大約3 Tの磁界を発生することができ、回転ガントリーの重量は300トン程度と、銅マグネットを用いたドイツの回転ガントリー（600トン）に比べると大幅な軽量化に成功しています。ただ、より高磁界化をはかり、陽子線回転ガントリーなみの200トン程度まで軽量化するためには、臨界温度が高く本質的に超伝導安定性に優れた高温超伝導の利用が必要であると考えられ、東芝・京都大学・高エネルギー加速器研究機構による研究開発が行われています。円形加速器本体に関しては、ビームを強く集束ができ、かつ、超伝導化の容易な直流マグネットで構成可能なFFAG加速器への高温超伝導応用が、京都大学・東芝・高エネルギー加速器研究機構・放射線医学総合研究所・日本原子力研究開発機構により検討され、基盤技術の研究開発が進められてきました。これらの研究開発の結果、テープ形状の高温超伝導線に立体形状のコイルを精度良く巻く技術や、超伝導線内部の電磁現象を理解し高精度の磁界を発生する技術など、高温超伝導を応用して重粒子線がん治療装置のコンパクト化・省エネ化をはかるために必要な技術が着実に構築されつつあります。

#### 4.2 加速器駆動システムを成立させ得る高効率高強度陽子加速器の実現に向けた展望

加速器駆動システム（ADS）は、加速器駆動未臨界炉とも呼ばれ、加速器で加速した陽子をターゲット（液体鉛・ビスマス）に当て、発生した中性子を未臨界核燃料体系に当てて燃焼させる原子炉です。その概念を図3に示します。そもそも未臨界の燃料体系しかもたないため加速器の運転を止めれば炉も止まること、核廃棄物のうち高放射性・長寿命核種の短寿命化が可能であることなどから興味を持たれています。ADSは、物理的には実証されているものの、加速器の高効率化がその実用化のためには必須です。加速器のビーム電力効率を、「ビーム電力／加速器運転に必要な総電力」で定義します。銅マグネットを用いた加速器のビーム電力効率はせいぜい数%とまじりです。ビーム電力を10 MW、ビーム電力効率を5-10%とすると、加速器運転のために500 MW-1000 MWの電力が必要となり、中規模原子力発電所一基分の発電電力に相当します。これでは、核廃棄物処理ではなく核廃棄物をより多く生産する

システムとなり破綻します。核廃棄物処理を目的とした ADS が成立するためには最低 30% 以上のビーム電力効率が必要であるといわれています。

筆者らは、ADS 用の FFAG 加速器ならびにこれを構成する高温超伝導マグネットの概念設計を行いました。設計した加速器は、200 MeV の陽子を 1 GeV まで加速し、2 mA のビーム電流が得られるものです。ビーム電力（エネルギー利得）は、 $(1 \text{ GV} - 200 \text{ MV}) \times 2 \text{ mA} = 1.6 \text{ MW}$  となり、これに対し入力電力は、高周波電力  $350 \text{ kW} \times 11 = 3.85 \text{ MW}$ 、マグネット冷却用冷凍機消費電力  $6.5 \text{ kW} \times 32 = 0.21 \text{ MW}$ 、合計約 4 MW と見積もられました。すなわち、ビーム電力効率は約 40% となり、成立要件を満たしています。

今後の世界規模のエネルギー需要の増大、二酸化炭素排出量抑制の必要性を鑑みると、再生可能エネルギーを最大限導入しつつも、核分裂による原子力エネルギーも重要であると考えられます。ADS は、それ自身でエネルギーを発生すると同時に、高レベル放射能核廃棄物問題の解決にも資するものであり、その実用化が期待され、そのためには高温超伝導マグネットを利用した高効率高強度陽子加速器の実現が不可欠です。

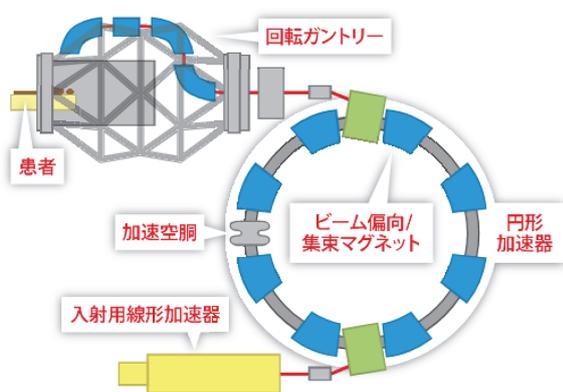


図2 重粒子線がん治療装置の概念図

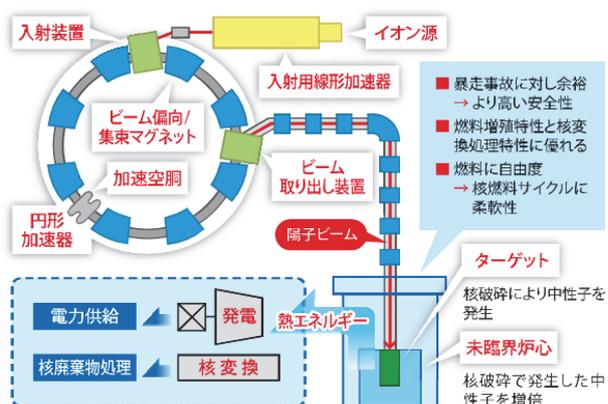


図3 加速器駆動システムの概念図

### 5. 京都大学における取り組み

超伝導の中でも、高温超伝導は、20 K から 30 K といった比較的高い温度で使うことができ、資源問題があり大型システムでは法規制も受ける液体ヘリウムによる冷却システムを使わずに、冷凍機とよばれる装置で直接冷却し運転できるマグネットを構成しやすいです。高温超伝導マグネットは加速器用マグネットとしても非常に魅力的ではありますが、これを実現するためには、解決しなければならない技術課題も多いです。まず、多くの加速器用マグネットでは超伝導線を複雑な 3 次元のコイルに巻く必要があるため、これを実現する巻線技術の開発が必要です。すなわち、テープ形状をした高温超伝導線の機械的特性を考慮しつつ、3 次元形状のコイルを巻く技術を開発しなければなりません。その際、高精度の磁界を発生するために高い巻線精度も要求されます。また、全てを巻線技術に押し付けるのではなく、なるべく巻線が容易なコイル形状で、必要な分布・強度・精度の磁界を発生できるマグネットの設計も重要です。また、テープ形状をした高温超伝導線において、テープ面上を流れる遮蔽電流（極めて減衰時定数の長い渦電流）が磁界精度を低下させる懸念もあり、これを克服する技術の研究開発も必要です。

このような技術課題の解決に向けて、筆者らは、科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援を受け、東芝、高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、京都大学原子炉実験所、日本原子力研究開発機構と共同で、「高温超伝導を用い

た高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦」という課題名の研究開発プロジェクトを推進しています。これまで、

1. 高温超伝導による機能結合型マグネット技術：偏向、集束といった複数の機能をひとつのマグネットで実現する技術
2. 高精度磁場発生技術：粒子軌道制御に必要な高精度の磁場を発生する技術
3. 高精度3次元巻線技術：加速器マグネット特有の立体的巻線を高精度で実現する技術
4. 高効率伝導冷却マグネット技術：加速器特有の発熱を考慮した伝導冷却マグネット技術
5. 放射線環境対応技術：ビーム損失による放射線負荷に対応する技術
6. 高温超伝導加速器システム技術：ビーム光学など加速器としてのシステム設計技術

などの要素技術の研究開発を進め、それを総合的に検証するためのモデルマグネットを平成27年度には製作しました（図4）。現在、このモデルマグネットの性能を確認する試験を行っている段階です。



図4 高温超伝導モデルマグネット

**産業界の技術動向****気象におけるセンサーデータの利活用**

株式会社ウェザーニューズ レーダープロジェクト チームリーダー

手 柴 充 博

**1. はじめに**

「気象」という分野の特徴として、今、目の前で何が起きているかを様々な方法で測る「観測」と、それに基づいて今の気象状況を知る「解析」及びこれから起こることを予測する「予報」が、我々の生活に直結していることが挙げられる。その為、学際分野でもビジネス分野でも様々な取り組みが行われており、「観測」については、小学校に設置されている百葉箱で毎日の気温を観測したり、小学生の夏休みの日記にその日の天気を記載したり、といった基礎的な事だけでなく、最近では自動気象観測器、例えば netatmo (引用 1)、が比較的手軽に手に入るようになり、様々な形で気象について知ることができるようになってきた。これまで株式会社ウェザーニューズ (以降 WNI) では、WNI を様々な形で応援してくださる方を BtoB (企業向け) サービス、BtoC (個人向け) サービス問わず「サポーター」と呼ばせて頂き、サポーターの方々からの様々な情報を集約して解析を行ってきた。さらには、昨今の IoT (Internet of Things) の考え方により、気圧計や温度計といった、気象状況を表現するようなセンサーが様々なデバイスに搭載されてきている。ここでは、これまでのセンサーに対する取り組みを踏まえ、今後のセンサーデータの扱いについての展望を述べる。

**2. ウェザーニューズにおけるセンサーの活用**

WNI では、「知る・測る・参加する」をモットーとして、サポーターの方々に参加する観測プロジェクトを行っている。例えば、2006 年から行っている「花粉プロジェクト」(引用 2、3) では、花粉と気象センサーを組み合わせた「ポールンロボ」を毎年一定数、花粉症の方を中心に配布し、花粉の数を「ポールンロボ」で自動連続カウントして WNI ヘデータをアップロードするだけでなく、その日の花粉症の程度も併せてレポートとして送って頂き、それらの結果をもとに、周辺の花粉症の方への花粉の飛散状況及びその対策をお伝えしている。これは単に花粉の数をカウントするだけでは花粉症の対応策に繋がりにくいですが、併せて花粉症の方の感覚情報 (今日はひどいのか軽いのか、など) と照らし合わせることで、花粉症の具体的な対策に繋げることができる。「ポールンロボ」は年々バージョンアップが図られ、現在は (図 1) のような、花粉の数に応じて「ポールンロボ」の目の色 (LED で発色) が変化する仕組みになっている。

2011 年からは、KDDI 株式会社と共同で地上観測装置「ソラテナ」(図 2、引用 4) を携帯基地局を中心に約 3000 ヶ所設置して運用している。これは、気象要素である気圧・気温・湿度だけでなく紫外線量や日射量も観測することで、地上観測の高度化及びそれをういたコンテンツの高度化に



図 1: WNI 花粉観測器「ポールンロボ」外観。

寄与している。例えば、関東地方で降雪がある場合、交通機関に影響がでて社会的なインパクトも大きい。そのため、「雨か雪か」というのは非常に重要な情報であるが、気象庁の観測網だけでなく、このソラテナの観測とサポーターの方々からの雨や雪の特徴や降り方の情報を合わせると、リアルタイムで雨雪の分布が詳細にわかり（図3）、その後の対策、例えばBtoB向けサービスであれば、列車の運行管理や道路の除雪のタイミングなど、に非常に役立つことが分かっている（引用5）。

また、地球観測衛星や気象レーダーといった、従来から使われている観測システムについても、機能を特化させることで不要な冗長化を無くしたり、部品や製品として民生品を用いることで、比較的



図2：WNI地上観測器「ソラテナ」外観。

コストで製作し展開することが可能になった。WNIでは、WNI衛星1号機「WNISAT-1」（図4、引用6）を株式会社アクセルスペースと共同開発し、「WNISAT-1」は2013年11月にロシアのヤースヌイから打ち上げられ、現在も稼働中である。この衛星の当初のメインミッションは北極海の海水監視である。北極海の海水面積がここ最近減少傾向にあり（引用7）、それに伴ってヨーロッパとアジアを結ぶ新たな航路（北極海航路）が航行可能になっている。この北極海航路を航行する船舶は、従来のスエズ運河や喜望峰を回る航路に比べて距離でそれぞれ、約2/3や約半分となっており、運航コストの削減に大きく寄与することが期待される。北極海航路を航行するにあたって、海水の状況をリアルタイムで監視し航行中の海水の動きを予測することが、船舶を運航する海運会社から求められており、これに応じる形での衛星の打ち上げを計画した。打ち上げは成功したものの、後に搭載機器の不具合が発生し当初のメインミッションは実行できなくなったが、衛星搭載の磁気センサーを用いた地磁気観測をメインミッション

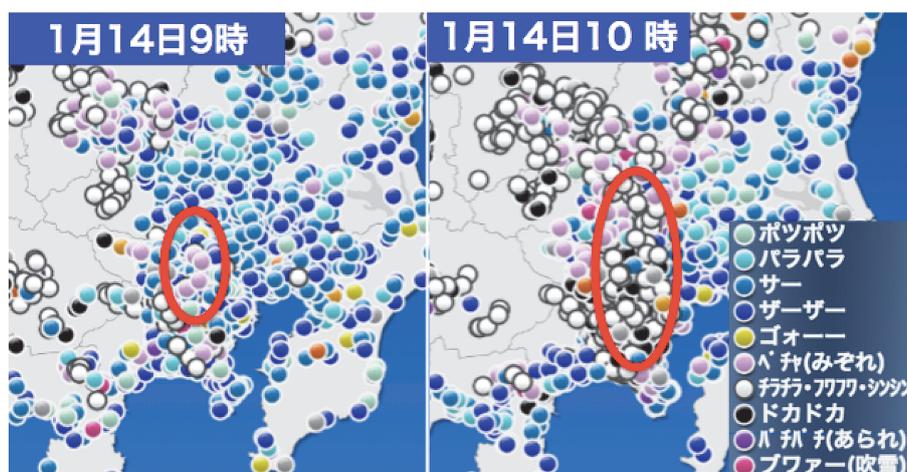


図3：2013年1月14日（左）9時、（右）10時における、WNIサポーターから送られてきたウェザーレポート。レポートは単に雨か雪かだけでなく、「チラチラ」「ドカドカ」といった、量や降り方を表す表現で送られてくる。

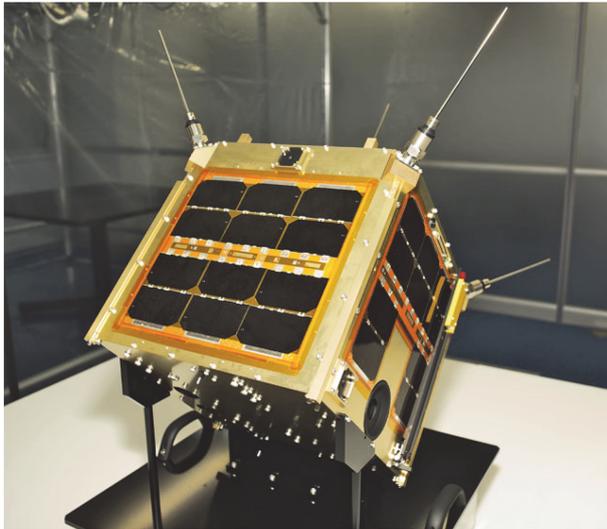


図4：民間企業初の商業衛星「WNISAT-1」。

に変更し、現在も観測を行っている。地磁気擾乱は、北極圏を航行する航空機にとって、搭載計器に異常が出る可能性があるため、この磁気センサーによって地磁気擾乱の状況を観測・監視している。一方で、「WNISAT-1」の当初のメインミッションであった北極海航路の海水監視については、リカバリー衛星

として「WNISAT-1R」を2016年秋に打ち上げ予定である。「WNISAT-1R」は、海水監視のための可視・近赤外線カメラのほか、曇天時や夜間でも観測可能な電波を用いた観測 GNSS-R (Global Navigation Satellite System; 衛星測位システムー Reflectometry) の可能性調査を行う計画となっている。

気象レーダーについては、既存の気象レーダーは大型で広範囲（数百 km レンジ）をカバーするように設計されているが、カバーできる水平範囲は広いものの地球の曲率を考えると、レーダーから離れた場所ではレーダービームが地表から離れていき、地表付近を観測することが困難となる。また、積乱雲に伴う強雨や顕著現象の代表例である竜巻といった現象は地表付近で起こるため、気象学的にも地表付近の観測を密にすることが求められている。そこで、既存の大型気象レーダーではカバーしにくい地表付近のデータを取得し、またレーダーの設置や移動がしやすいような気象レーダーとして、「WITH レーダー」を開発した（図5、引用8）。WITH レーダーは、航空機の先端に搭載されている、これから飛行する先の気象状況を把握するための航空機搭載型気象レーダーをベースとし、さらに必要な機能、レーダー制御、設置・回転を可能とする台座やレーダーを覆うためのレドーム、受信信号を解析しレーダー反射強度やドップラー速度といったレーダーパラメータを計算するための信号処理装置、インターネット回線に接続するための周辺機器などを自社開発して、2016年現在、日本全国80か所に展開している。航空機搭載型気象レーダーは、元々レーダーから近い場所を観測し、航空機に搭載するために小型・軽量、且つ高い技術基準で設計・生産されており、また地上設置型の気象レーダーよりも生産台数が多いため、航空機外である地上で運用してもレーダーの故障率が低く、併せて初期費用が従来型よりも1/10程度に抑えることが可能となった。現在日本国内では実験試験局として運用しており、これらを実用局化するべく米国オクラホマ大学と協同し新しい気象レーダーを開発中である。気象レーダーに関しては、「WITH レーダー」のような小型のレーダーばかりではなく、XRAIN（引用9）のような大型且つ観測パラメータを増やしたレーダーや、フェーズドアレイレーダーのように、レーダービームを電子的に制



図5：WNI 気象レーダー「WITH レーダー」。

御する気象レーダー（引用 10）も開発され、日本国内で展開が進んでいる。

### 3. 今後のセンサー展開についての課題

IoT の進行と共に、スマートフォンにも気圧計や温度計が搭載されるようになってきており、気象会社としてはこのようなデータも積極的に活用していくことで、今まで解析できなかった事例も解析できる可能性がある。前述した関東地方の雨雪解析ではウェザーリポートに含まれている気温や気圧の情報を解析している他、スマートフォンの気圧観測については（引用 11）のように気象予報モデルへ観測データを取り込むデータ同化の試みが始まっている。このようなデータは一般に、センサーの精度やセンサー自体の設置環境が様々であり、それぞれのデータがどのような性質のものかを、一つのデータのみから判断するのは困難であるが、データが集まってくることで質の低いあるいは誤りの含んだデータが相対的に無視できるようになり、解析した結果は意味のある情報となる。一方、レポートが少ない、あるいはセンサーの数が少ない場所では、少ないデータセットがそれなりの精度を保ったデータとなることが期待される。このような場所にセンサーを設置する場合、センサーの設置環境を整え、データを転送するための通信環境も確保するとともに、センサー本体を整備することに加えて、設置や通信環境に手間や金銭面のコストがかかるため、日本国内でも人口が少ない地域では未だ不十分であるところが多い。自動で観測できるロボットやドローンは、設置環境をカメラや GNSS による測位によって把握できるので、観測精度を保てる可能性があり、併せて常設の観測器よりも設置コストを抑えられる可能性があるが、安全性や信頼性を含めて未だ技術的な課題が残る。一方、通信環境については、公衆無線 LAN や携帯電話回線等を使う方法、衛星通信を使う方法などが考えられるが、通信コストのようなランニングコストはセンサー本体の価格に比べて高くなることが多い。また、新たに無線免許の周波数帯域を確保し、センサー同士がアドホックに接続するようなネットワーク構成も開発されているが、通信モジュールの通信範囲やセンサー自体の消費電力などを考えると未だ実用に至るまでには時間がかかると考えられる。このように、センサー設置や通信に伴うコストをいかに抑えられるかが成功の鍵となる。一方、気象学の観点からセンサー設置を最適化する実験（Observing System Simulation Experiments; OSSE、引用 12）を試みることで、センサー展開とその活用方法を前もってシミュレーションし最適化することができる。現在では気象学だけでなく様々な観点から、どのようなセンサーが必要かを検討できる環境にあると言える。

### 参考文献

1. Netatmo Official Site:  
<https://www.netatmo.com/ja-JP/site>
2. WNI プレスリリース：花粉症 100 家族を募集!、2006：  
<http://weathernews.com/ja/nc/press/2006/060124.html>
3. WNI プレスリリース：各都道府県の 200 家庭で花粉観測をスタート、2008：  
<http://weathernews.com/ja/nc/press/2008/080213.html>
4. WNI プレスリリース：気象情報を活用したサービス「ソラテナ」の全国展開について、2011：  
<http://weathernews.com/ja/nc/press/2011/110530.html>
5. WNI プレスリリース：2013 年 1 月 14 日関東地方の大雪に関して、2013：  
<http://weathernews.com/ja/nc/press/2013/130117.html>
6. WNI プレスリリース：新たな宇宙ビジネスの第一歩  
ウェザーニューズの超小型独自衛星「WNISAT-1」、打ち上げ成功、2013：  
<http://weathernews.com/ja/nc/press/2013/131122.html>

7. WNI プレスリリース：北極海の海水がこの夏最小に、観測史上4番目の小ささ、2015：  
<https://jp.weathernews.com/news/3840/>
8. WNI プレスリリース：小型レーダーネットワークを活用した革新的な取り組みが始動、2009：  
<http://weathernews.com/ja/nc/press/2009/091007.html>
9. 国立研究開発法人防災科学研究所 Xバンドマルチパラメータレーダーによる降雨観測：  
<http://www.bosai.go.jp/kiban/radar/index.htm>
10. 株式会社東芝プレスリリース：日本初「フェーズドアレイ気象レーダ」を開発：  
[https://www.toshiba.co.jp/about/press/2012\\_08/pr\\_j3101.htm](https://www.toshiba.co.jp/about/press/2012_08/pr_j3101.htm)
11. Hanson, Glen S. Impact of Assimilating Surface Pressure Observations from Smartphones on a Regional, High Resolution Ensemble Forecast: Observing System Simulation Experiments. Diss. The Pennsylvania State University, 2016.
12. Arnold Jr, Charles P., and Clifford H. Dey. "Observing-systems simulation experiments: Past, present, and future." *Bulletin of the American Meteorological Society* 67.6 (1986): 687-695.

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、\*は「新設研究室紹介」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科 (大学院)

##### 電気工学専攻

##### 先端電気システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

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 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研)

##### 電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研) ☆

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

##### 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 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野 (北野研)

##### 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

デバイス創成部門先進電子材料分野 (藤田研)

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野 (松山研)

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

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 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

##### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### 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 (下田研)

##### 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 (中村祐研)

##### 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 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研) #

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

#### 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 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

#### 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

(小山田研究室)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野 (中村裕研)

先端電気システム論講座 (引原研究室)

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

SiC MOSFET の高周波スイッチングのためのゲートドライブ回路開発

昨今, SiC, GaN パワーデバイスが商品化されるに至り, 従来の Si パワーデバイスの SiC および GaN パワーデバイスへの置き換えの試みが始まっている. 本研究室では, 21 世紀 COE, GCOE, 科研費, ALCA, 環境ナノクラスター事業, スーパークラスター事業, そして SIP の支援等を継続的に受け, これまでに SiC の物理的優位性を生かした回路・システム応用を, 研究テーマの一つとして推進してきた. SiC の物理的優位性として, 低 ON 抵抗, 高耐圧特性, 高速スイッチング特性, 高温耐性等が知られている. それらの特性に着目し, これまでにも, 世界で初めて 400°C の高温下でスイッチ素子の安定な動作と変換回路の駆動が可能であること確認した [1]. この温度余裕の下, パワーデバイスの高速・高周波スイッチング駆動が可能になれば, 電力変換回路においてエネルギー蓄積要素である受動素子を小型化し, パワー集積回路の実現への道が開ける.

小容量の電力変換回路, すなわちアダプタや dc/dc コンバータでは, Si パワーデバイスが数百 kHz のスイッチングで駆動されている. この周波数を十数 MHz まで増加すれば, 受動素子を 1/10 程度まで小さくすることができる. SiC パワーデバイスの高速・高周波スイッチング特性はそのような適用が可能な素子である. しかしながら, SiC FET を高周波変換回路に適用するには, 高周波駆動可能な絶縁ゲートドライブ回路の開発が不可欠となる (本解説では, 以下 SiC MOSFET を対象とする).

一般的な絶縁素子であるフォトカプラは MHz 以上の周波数の駆動に適さない. また磁気結合はコアの磁気特性のため数 MHz 程度の限界がある. 10MHz 以上の周波数の信号の伝送における絶縁素子には RF 結合素子を用いる必要がある. 次に, オン・オフの駆動信号を受けて SiC MOSFET を駆動するには, ゲートソース間の接合容量  $C_{gs}$  の蓄積電荷を高速で出し入れしなければならない. Si パワーデバイスは Si MOS のプッシュプル回路で駆動される. 信号レベルであれば Si 素子も高速に駆動できるが, SiC のパワー素子を駆動するのに必要な瞬時 20 ~ 30W の出力を連続的にドライブすることは難しい. これがスイッチング周波数に優位性がある SiC パワーデバイスに対して, その特性を生かした回路開発が進まない原因となって来た. 我々は, SiC MOSFET の物理的優位性を生かした回路・システム開発を目指すという観点から, 高周波ゲートドライブ回路の開発を行い, 10MHz 以上のスイッチング周波数, 数百 W 以上の出力の dc/dc コンバータの駆動を達成した [2]. 図 1 は開発した MOSFET のゲートドライブ回路である. ドライブ回路は, 絶縁部, 信号伝送部, 駆動部の三段構成で, 駆動部には GaN FET を適用し, 駆動信号の信号からパワーへの変換を図っている. 図 2 は, 3 MHz で発熱により駆動不可能となった Si ベースの汎用ドライブ素子を凌ぐ周波数と効率で, SiC MOSFET の駆動が実現できていることを示している.

SiC, GaN パワーデバイスは Si とは異なる動作領域において優位性がある. その利用には周辺の技術開発が急務で有り, 既存技術の使い回しで新たな回路開発を怠れば素子の利用に未来が無いのではないだろうか.

参考文献

- [1] T.Funaki, et al., IEEE trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 4, 1321-1329 (2007).
- [2] K.Nagaoka, et al., IEICE Electronics Express Vol. 12, No. 11, 20150285 (2015).

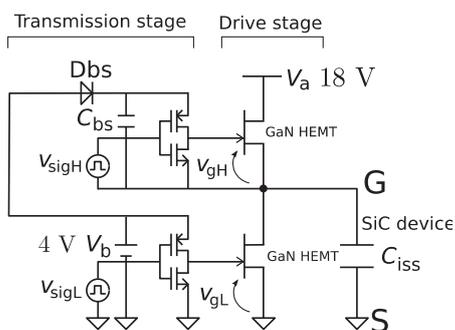


図 1 SiC MOSFET ゲートドライブ回路

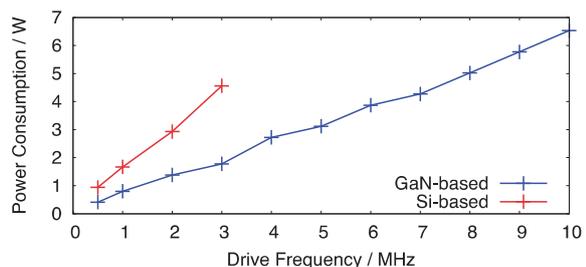


図 2 ドライブ回路の特性

## 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野 (松尾研究室)

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/>

## 「電磁界有限要素解析のための過去の求解プロセス情報を利用した誤差修正法の開発」

電気電子機器の設計開発等の場で、解析的に解くことの困難な電磁界方程式に対して計算機シミュレーションによって近似解を得ることがしばしば行われている。電磁界方程式に対する計算機シミュレーションでは有限要素法と呼ばれる数値解析手法が広く用いられており、有限要素法による計算機シミュレーションの高速化・高精度化を目指す多様な研究が行われている。

有限要素法によって計算機シミュレーションを行う際には多くの未知数を含む連立方程式の求解が最終的に必要とされるが、特に電磁界方程式を時間発展的に解くことが求められる場合、次の形で表される連立方程式

$$A_k \mathbf{x}_k = \mathbf{b}_k \quad (1)$$

を繰り返し解くことが求められ、しばしば膨大な計算コストが消費される。ここで  $A_k$ ,  $\mathbf{x}_k$ ,  $\mathbf{b}_k$  はそれぞれ  $k$  回目の時間ステップで解く連立方程式の係数行列、未知数ベクトル、(既知の) 右辺ベクトルを表す。係数行列  $A_k$  は全てのステップで類似している、または同じ行列であることが珍しくないが、直接的な LU 分解が現実的でない程の大規模問題で反復解法が採用される場合には、過去のステップで行った計算を再利用することによる計算高速化の可能性については限定的にしか検討が行われてこなかった。

本研究室の最近の研究テーマの一つとして、式 (1) の反復求解において速やかな反復収束の妨げとなるベクトル成分が全ての  $k$  について共通である場合が実用的に多い点に着目し、各ステップの求解プロセス情報から問題となるベクトル成分を推定し以降のステップの計算高速化に積極的に活用する計算手法の開発に取り組んでいる。最も単純な発想としては、最初のステップ ( $k=1$ ) の反復計算において

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1^n \quad (2)$$

を収束を妨げるベクトル成分の推定とすることが考えられる。ここで  $\mathbf{x}_1^n$  は反復求解中の  $n$  反復目で得られた近似解であり、適切な  $n$  を選び、反復により最終的に得られた解との差をとることによって、問題となるベクトル成分の良い推定を得ることが狙いである。以降のステップで  $\mathbf{e}_1$  を用いて収束性を改善するための手法、2 回目のステップ以降も同様の推定を継続して行う手法などの開発に現在取り組んでいる。図 1 に提案手法の有効性を確認するためのテストモデルを、図 2 に提案手法を適用した場合に反復解法の収束性が改善される様子を示す<sup>[1]</sup>。図 1 に示される疑似導体 (fake conductor) の存在が、通常の反復解法 ( $k_m = 0$ ) の 250 反復目以降の相対残差ノルムの収束に悪影響を及ぼしている。このテストモデルについては収束の妨げとなるベクトル成分を理論的に特定することも可能であるが、提案手法 ( $k_m = 1, 2, 4$ ) を導入することで解析対象に関する知見に頼ることなく収束性の問題を解消できている。計算コストの増大につながるベクトル成分が未知である多くの実用問題について、本手法は計算高速化の観点で有力であるのみでなく、新たな理論的知見を得るための支援となる可能性も期待される。

[1] 河口、美船、岩下、松尾、平成 28 年電気学会全国大会、5-062、2016

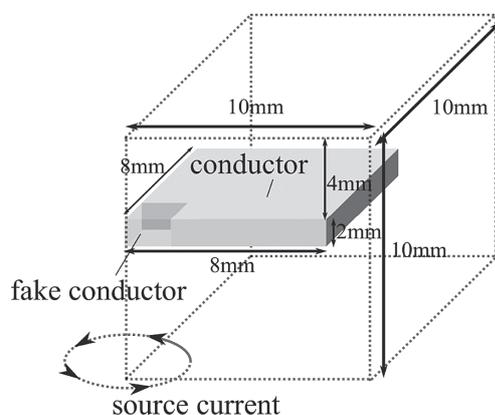


図 1 テスト解析モデル

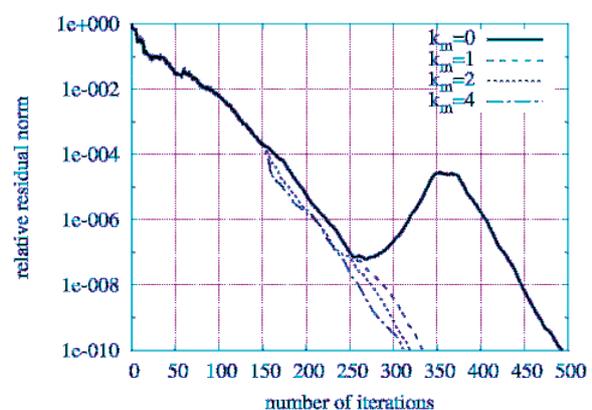


図 2 反復解法の収束特性

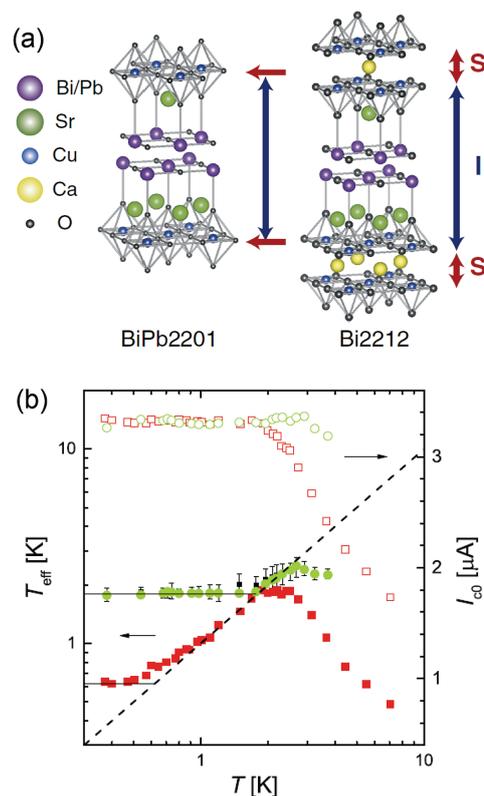
## 集積機能工学講座

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

## 高温超伝導体固有ジョセフソン接合における協力的量子トンネル現象

超伝導現象は、電子の波動性が巨視的に現れる巨視的量子現象の代表例であり、巨視的な世界では非常識な現象が観測されます。そのひとつがジョセフソン接合に見られる巨視的量子トンネル現象です。ハイゼンベルグが予言した不確定性によるトンネル効果が、電流電圧特性のゆらぎに現れ、この現象は量子計算機を構成する量子ビットの動作原理となります。最近、カナダのベンチャー企業である D-Wave 社から最適化問題を解く量子アニーリング装置が発売され、NASA、ロッキードマーチンなどが導入したことが大きな話題となりました。ここで使われているデバイスもジョセフソン接合における量子トンネルを応用したものです。また、Google は超伝導量子ビットで世界をリードしてきたカリフォルニア大学サンタバーバラ校の John Martinis 教授の研究室を丸ごと買収し、量子計算機の独自開発を進めています。一方、高温超伝導体の c 軸方向には、およそ 1 nm という結晶構造の周期で超伝導性の強さが空間的に強く変調されているため、ジョセフソン接合が積層していると考えられます。この接合を固有ジョセフソン接合と呼びます。積層する固有ジョセフソン接合は、多数層を含む長距離的な相互作用と、隣接層間だけに及ぶ短距離的な相互作用により結合しており、これが多様な現象をもたらします。私たちは、高温超伝導体固有ジョセフソン接合間の短距離的な相互作用に由来する現象を抽出することに成功しました。これは、技術的に困難といわれてきた固有ジョセフソン接合を量子ビットとして利用するためのブレークスルーとなり、希釈冷凍機が不要な、大幅に小型化された量子計算機を実現することができます。

私たちは、独自の技術を用いて少数の固有ジョセフソン接合が積層するメサ構造を抽出し、特定の固有ジョセフソン接合がゼロ電圧状態から有限電圧状態に転移する電圧スイッチング特性を 0.4 ケルビンの極低温まで測定しました。メサ構造は、Bi2201, Bi2212, Bi2223 と呼ばれる 3 種類の超伝導体の単結晶に作製しました。これらの超伝導体では、ジョセフソン接合の周期が 1.2, 1.5, 1.8 nm と変化していく点を利用して、相互作用を変化できることに着目しました。メサ構造の最上にある第一接合と、第二接合のスイッチング特性における量子ゆらぎを評価したところ、Bi2201 と Bi2212 では、第二接合の量子ゆらぎを示す温度が第一接合のその十倍程度を示しているのに対して、ジョセフソン接合が比較的離れた Bi2223 では、両接合の量子ゆらぎは同等になるという結果が得られました。これは、Bi2201 と Bi2212 では、前述の短距離的な相互作用により協力的な量子トンネル現象が起きており、それがわずか 0.3 nm のジョセフソン接合間距離の増加により消失してしまうという興味深い事実を示しています。



図：(a) Bi2201 (左) と Bi2212 (右) の結晶構造。S と書かれている原子層に超伝導性が集中して、ジョセフソン接合を形成。(b) Bi2201 における第一接合 (赤; 濃色) と第二接合 (緑; 淡色) のスイッチ揺らぎを示す温度が素子温度によって変化していく様子。0.4 ケルビンにおいて観測される量子ゆらぎは第二接合では第一接合に比べて顕著。

## 電子物理工学講座 極微電子工学分野 (白石研究室)

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

## 「半導体スピントロニクスデバイスの実現に向けた取り組み」

スピントロニクスとは電子の内部自由度であるスピンを利用して新規デバイスの創成を目指す研究分野です。電子スピンは $+(1/2)\hbar$ または $-(1/2)\hbar$ の角運動量を持ちますが、それぞれをアップスピン、ダウンスピンと呼んでいます。強磁性体（鉄やコバルトなど）ではアップスピンとダウンスピンの状態密度が異なっており、伝導率に違いが生じます。その結果、強磁性体中に電流を流せば、スピンの数に偏りがある“スピン偏極電流”が生成されます。スピンの偏りの定量的指標を“スピン偏極率”と呼び、例えばアップスピンのみで構成された電流はスピン偏極率 100%、一般的な電流は 0% となります。スピン偏極率はスピントロニクスデバイスの性能を決定する非常に重要なパラメータです。ここで強磁性体 A を用いて生成したスピン偏極電流を、別の強磁性体 B に注入する場合を考えます。強磁性体 B もアップスピンとダウンスピンの伝導率に差がある為、強磁性体 A に対する強磁性体 B の磁化の向きが平行、または反平行により抵抗が変化します。このような現象を“スピン依存抵抗”と呼びます。強磁性体の磁化の向きは電源を切っても維持するため、強磁性体 A、B は不揮発性のメモリとして利用できます。これまでに強磁性体 A、B の間に非磁性金属薄膜を挟んだ素子（巨大磁気抵抗素子）や膜厚 1 nm 以下のトンネル絶縁膜を挟んだ素子（トンネル磁気抵抗素子）が実用化されてきました。

我々の研究室では強磁性体 A、B の間を半導体にした素子のデバイス応用を研究しています。代表的な素子は通常の MOS (metal-oxide-semiconductor) トランジスタのソース・ドレイン部分が強磁性体に置き換わった構造をしており (図 1)、スピン MOSFET と呼ばれています。この場合、半導体チャネル中のスピン偏極電流を磁界や電界を用いて変調したり、反対にトランスコンダクタンスを磁化配置で制御することが可能です。再構成可能な論理回路への応用が期待されています。しかし、半導体にスピン偏極電流を注入するには課題があります。1つ目に、半導体と強磁性金属では伝導率の差が大きく、半導体中に注入したスピンの拡散流として強磁性体に逆流する「コンダクタンスミスマッチ問題」が顕在化します。2つ目に強磁性体と半導体の界面は反応しやすく、強磁性体の性質の劣下が生じます。どちらの問題もドレイン電流のスピン偏極率の低下を招きます。我々の研究室では、1 nm 以下の酸化マグネシウム (MgO) 膜を鉄 (Fe) とシリコン (Si) の界面に挿入し、この2つの問題を解決しました。その結果、縮退および非縮退 Si 中の室温スピン輸送 (図 2 (a)) や磁界を用いたスピンの操作に成功しました。近年ではスピン MOSFET の室温実証に成功し、強磁性体の磁化配置制御によるトランスコンダクタンスの変調にも成功しています (図 2 (b))。現在はドレイン電流のスピン偏極率の向上や、半導体デバイスで問題となる発熱を再利用したスピndeviceの創成を目指した研究を進めています。

参考文献：Takayuki Tahara et al., “Room-temperature operation of spin MOSFET with high on/off spin signal ratio” Applied Physics Express, **8**, 113004 (2015).

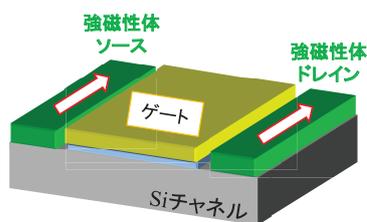


図 1 シリコンスピン MOSFET の素子構造。

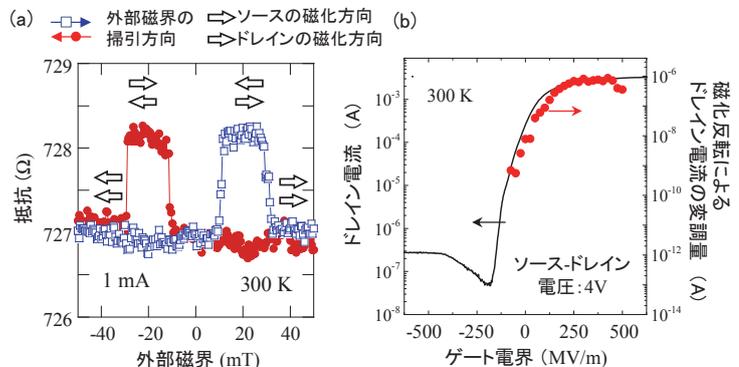


図 2 (a) シリコンスピン MOSFET におけるスピン依存抵抗の測定結果. および (b) 磁化反転によるドレイン電流の変調量のゲート依存性.

## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

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

## 「超ワイドギャップ半導体 AlN における励起子光物性」

低損失高耐圧パワーデバイスを実現した SiC ( $E_g = 3.2$  eV), ノーベル物理学賞の受賞対象となった高輝度青色 LED の基盤材料である GaN ( $E_g = 3.4$  eV), これらとともにワイドギャップ半導体と呼ばれる材料群に属している。近年, SiC や GaN に続く次世代の光・電子デバイス基盤材料として, さらにバンドギャップの大きいダイヤモンド ( $E_g = 5.5$  eV) や AlN ( $E_g = 6.0$  eV) といった材料 (ここでは超ワイドギャップ半導体と呼ぶ) に注目が集まっている。例えば発光素子に着目すると, 超ワイドギャップ半導体を用いることで, 浄水・殺菌に有効な深紫外 LED の作製が可能となる。しかしながら, 深紫外 LED の発光効率は青色 LED と比べて低いのが現状であり (1/10 程度), 高効率深紫外 LED の実現に向けて, 超ワイドギャップ半導体における基礎光物性の解明が望まれている。当研究室では, 超ワイドギャップ半導体の 1 つである AlN の気相成長に取り組んでおり, 近年, 高品質 AlN ホモエピタキシャル薄膜の作製に成功した [ref. *APEX* 5, 082001 (2012)]. そして, この試料の発光スペクトルを精査することで, AlN における特異な光物性を発見し, その起源を明らかにした [ref. *PRB* 87, 161204 (2013)].

有機金属気相成長法を用いて AlN ホモエピタキシャル薄膜を作製した。作製した薄膜層における不純物量は基板に比べて大幅に低減されていることを二次イオン質量分析法により確認した。AlN ホモエピタキシャル薄膜に対して極低温下 (10 K) におけるフォトルミネッセンス (PL) 測定を行った結果を図 1 に示す。4 つのピークが観測されていることが分かる。これまで, FX は AlN 固有の発光 (自由励起子発光), それ以外は結晶不純物に起因する発光 (束縛励起子発光) と考えられてきた。ここで“励起子”とは, 結晶中において電子と正孔がクーロン力によって互いに結びついた状態のことであり, 束縛励起子発光は通常室温では観測されないことが知られている。我々は, 試料からの発光の偏光状態と配光状態を制御することで, 室温でも X は観測されることを見出した (図 2)。すなわち, FX と同様に X も AlN の自由励起子発光であることを明らかにした。FX と X のエネルギー差は 13.6 meV と大きく, それぞれの自由励起子のスピン角運動量の違いがこのエネルギー差を生み出すと考えている (交換相互作用)。図 3 に, 種々の材料における交換相互作用の大きさ と有効原子間距離 (原子間距離  $\times$  誘電率) の関係を示す。交換相互作用と有効原子間距離の間には明確な相関が存在し, AlN における交換相互作用の大きさは典型化合物半導体の中で最大となることが分かった。このように, 超ワイドギャップ半導体である AlN では, 電子と正孔が結合した素励起状態である励起子が室温において十分に安定に存在し, これらキャリアの交換相互作用が光物性の発現に重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

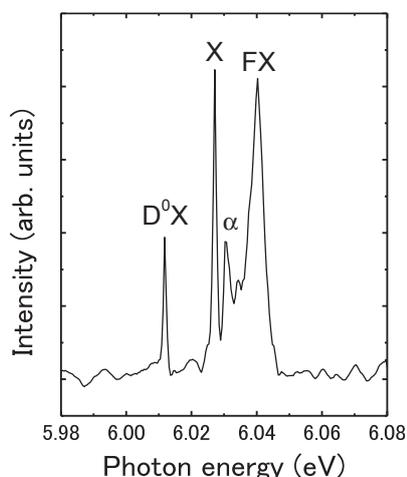


図 1. 10 K における AlN の PL スペクトル

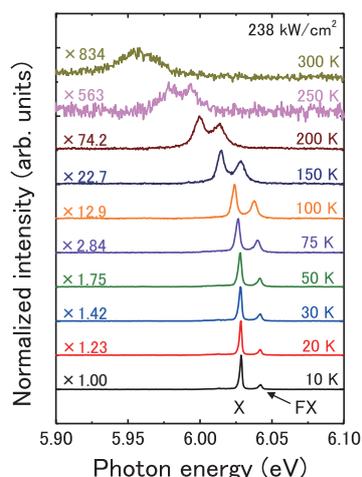


図 2. 偏光状態と配光状態を制御して取得した AlN の PL スペクトルの温度依存性

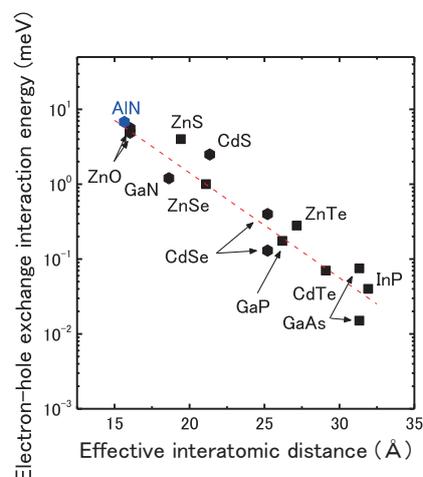


図 3. 電子正孔交換相互作用定数と有効原子間距離の関係 (AlN は最大の値となっている)

## 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

[http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess\\_eng/index.html](http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html)

## 「イオン液体イオン源の開発と固体表面改質応用の検討」

多原子分子のイオンは固体表面処理への応用を考えた場合、官能基による化学反応や大質量電荷比に起因する照射効果があるため、様々な応用が期待できます。最近では、特異な性質を持つイオン液体のイオンビームについて関心が持たれてきています。イオン液体は近年注目されている溶媒材料で、カチオン（陽イオン）とアニオン（陰イオン）で構成された室温で液体の塩です。水・油・アルコール等とは混ざり合わず、導電性を示し、発火せず、化学的に安定であるため、合成化学や電池応用への研究が進められています。さらにイオン液体は常温では殆ど蒸発しないため、真空中での電界放出によるイオンビーム形成が可能です。このため、宇宙推進用のイオンエンジンや、表面微細加工用の収束イオンビームへの応用が研究されています。また、カチオンには炭素と窒素、アニオンにはフッ化物を持つものが多いといった特徴から、様々な固体表面処理への応用が期待できます。

本研究にて開発したイオン液体イオン源を図1に示します。種々のエミッタ材料を検討した結果、イオン液体との濡れ性が高く、導電性を有する竹炭を針材としています。竹炭は nm から  $\mu\text{m}$  オーダーの多数の細孔が繊維方向に貫通しており、イオン液体は竹炭内部に保持されると共にチップ表面に最適な速度で供給されるため、これまで使用していたグラファイトチップよりもさらに安定したイオン放出を長時間行なうことが可能となりました。エミッタ先端では、電界印加による静電力がイオン液体の表面張力を上回るため、イオン液体はテーラーコーンと呼ばれる円錐形状となっており、その先端からイオン液体中のイオンが主に電界蒸発により放出されます。図2の質量分析の結果から、イオン液体 BMIM-PF<sub>6</sub> および EMIM-BF<sub>4</sub> では、負イオンビームの生成によりアニオン単体と小さいクラスターが放出されていることがわかりました。一方イオン液体 EMIM-DCA では、ほぼアニオン単体の放出であることも明かにしています。

この様に多原子分子の負イオンビームを容易に生成できることから、フッ素系アニオンビームはフッ素の電気陰性度を利用した高収率な二次イオン質量分析への応用を、ジシアナミド (DCA) アニオンビームはバントギャップを有するグラフェンとして知られる  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  薄膜形成への応用が期待できることがわかり、現在検討を行なっています。

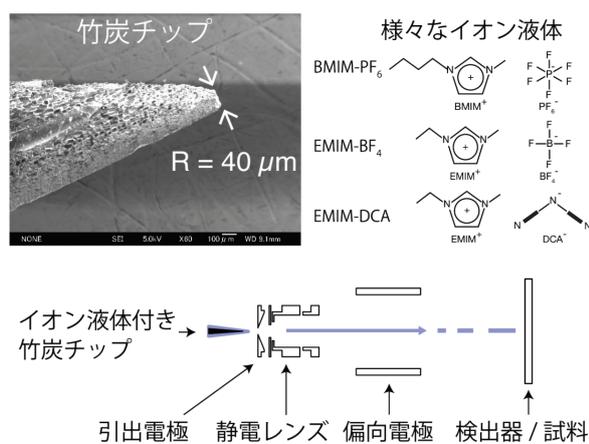


図1 竹炭をエミッタとしたイオン液体イオン源

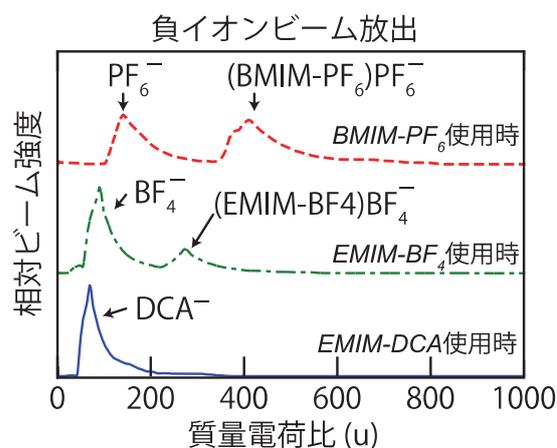


図2 生成したイオン液体イオンビームの質量分析

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野（藤田研究室）  
<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html>  
 「半導体のバンドギャップの限界に挑む」

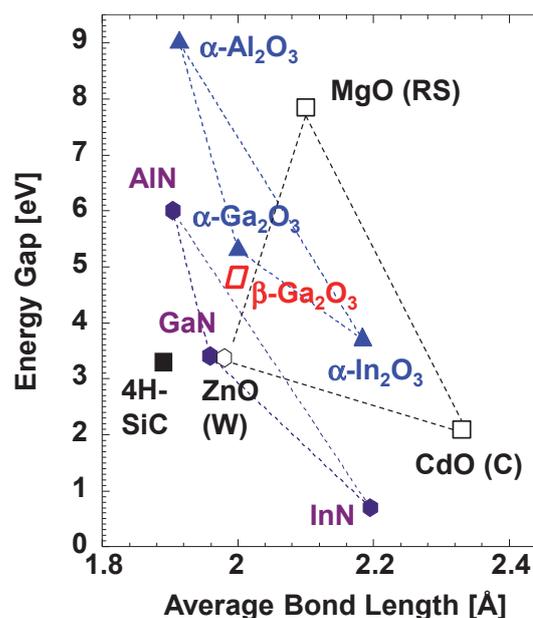
筆者（藤田）の博士学位論文は、バンドギャップ 5.1 eV を持つ絶縁膜としてシリコンプロセスに用いられるシリコン窒化膜（SiN）の物性に関するものであった。一方で今は、バンドギャップ 5.3 eV を持つ酸化ガリウム（Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）半導体の研究を行っている。ドナーのドーピングにより、n型のキャリア密度 10<sup>17</sup> ~ 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>、ドナー活性化エネルギー 37 meV という値が得られ、室温でほぼ出払い領域にある半導体である。共同研究を行っている株式会社 FLOSFIA は、この材料を用いて低いオン抵抗（0.1 mΩ・cm<sup>2</sup>）と高い逆耐圧（531 V）を持つショットキーバリアダイオードを報告している<sup>1)</sup>。

バンドギャップの大きい半導体をデバイスに用いる意義は大きく言って2つある。1つは、オン抵抗の低減と逆耐圧の増加により、低損失の電力変換用デバイス（パワーデバイス）への応用が期待できる点である。もう1つは、より短い波長での発光・受光機能である。現在、深紫外領域での光源としては、水銀ランプに代表される気体からの発光が利用されており、発光波長が限られている。任意の波長での発光とともに水銀を利用しない光源の開発は、社会から強く要請されている。また深紫外光の受光は、炎検出により火災検知<sup>2)</sup>や燃焼制御を可能とする。

半導体の材料開発の一つの流れは、赤外から可視、さらに紫外領域に対応する、より広いバンドギャップを持つ材料を求めるものである。そのフロンティアにあり、パワーデバイスや青色LEDとして実用化に至っている材料が、「ワイドバンドギャップ（wide band gap; WBG）半導体」と呼ばれるSiCとGaNである。これらはバンドギャップ 3.4 eV という値を持つ。一方で、パワーデバイスの一層の高耐圧化、より短波長での発光を求めて、さらにバンドギャップの大きい半導体材料を開発する流れが加速している。このような目標に対し、最近になって「超ワイドギャップ（ultra-wide band gap; UWBG）半導体」という語が用いられるようになってきた。AlN、ダイヤモンド、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>といった材料がこれに含まれる。しかし、波長 200 nm 以下の深紫外光機能を持たせようとする、窒化物半導体で最大のバンドギャップ約 6 eV を持つ AlN よりもさらに大きいバンドギャップが必要である。そうなることは絶縁膜とどこが違うのだろうか。これは半導体の「極み」に挑むものである。しかし、これにより高耐圧のパワーデバイスができ、量子構造によって深紫外の任意の波長で発光すれば、社会に向けた大きなインパクトとなり、材料科学の観点でも半導体と絶縁体の差がなにかという新しい視点をもたらすだろう。

私たちは、(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と MgZnO という半導体系に注目して研究を行っている。これまで、220 nm (5.6 eV) のカソードルミネセンスが見られており、もう一息で AlN で不可能な波長領域に入る。しかし、このような深紫外光に対しては、分光器の感度が低く、190 nm 以下では酸素による吸収が生じるため測定が難しい。結晶技術と測定技術の両面で、なんとか半導体の限界を極めてゆきたいと考えている。

- 1) M. Oda 他, Appl. Phys. Express **9**, 021101 (2016).
- 2) T. Oshima 他, Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 011605 (2009).



各種半導体のバンドギャップ

## 知能メディア講座 言語メディア分野（黒橋研究室）

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

### 語彙的言語知識および意味的言語知識に基づく形態素解析モデルの構築

世の中にある大量の文書进行处理し、そこからあらたな知識を得るためには、テキストを自動的かつ高度に解析する必要があります。高次の文脈解析を正確に行うには、意味の基本単位で、照応・省略の基本単位でもある単語の認識（形態素解析）を極めて高い精度で行っておく必要があります。従来の形態素解析は98%前後の精度が達成されていますが、この観点からはまだ十分な精度とはいえません。

従来の形態素解析には、語彙の不足と、解析において意味を考慮していないという、2つの大きな問題点が残されていました。語彙の不足は、その単語を適切な単位で認識できないというだけでなく、その前後の単語の解析にも悪影響を及ぼすことが少なくありません。意味を考慮していない問題は、特に複数の解釈がありうる複合名詞の分割などで問題となります。例えば日本語テキストの解析で広く利用されている形態素解析器 JUMAN や MeCab では、「外国人参政権」という文字列を「外国 / 人参 / 政権」のように誤って分割してしまいます（図1）。

この研究ではまず、Wikipedia、Wiktionary および Web テキストコーパスから、合計で90万語程度の語彙を獲得し、これによって、未知語による形態素解析誤りを大きく削減しました。さらに、大規模な Web テキストコーパスを解析することにより語彙の意味的な振る舞いに関する知識を、統計的言語モデルとして獲得しました。統計的言語モデルというのは、「雨が」には「降る」や「止んだ」が続くやすいというような単語の出現のしやすさを確率として表す統計的な知識です。日本語や中国語のように単語が空白で区切られていない言語では、言語モデルを構築するために形態素解析システムの出力が必要ですが、このシステムの出力には、「外国 / 人参 / 政権」のような誤った解析が含まれてしまいます。そのため、このような形態素解析の誤りから学習された言語モデルをそのまま形態素解析に利用したとしても、単に誤りを再生産してしまいます。しかし、意味的に汎化したレベルからこの単語の並びを見ると、<国>-<野菜>-<政治>のような特異的な並びになっているため、Web テキストコーパスを解析して得られる妥当な大多数の解析により、意味的に不自然な解析誤りの悪影響を打ち消すことができます。

この研究では、RNNLM（Recurrent Neural Network Language Model）と呼ばれる意味的に汎化された言語モデルを用いることで、意味的に不自然な解析を抑える形態素解析手法を提案しました。Web 上のリソースから獲得した語彙知識による辞書の更新と合わせ、新聞および WEB 一般のテキストで評価したところ、大幅な精度の改善を達成しました（図2）。

#### 参考文献

Hajime Morita, Daisuke Kawahara and Sadao Kurohashi: Morphological Analysis for Unsegmented Languages using Recurrent Neural Network Language Model, Proceedings of EMNLP 2015, pp.2292-2297, (2015.9.17).

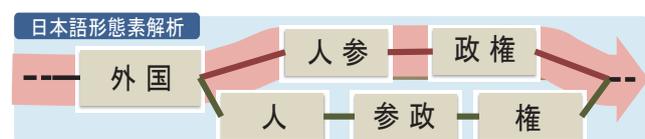


図1：日本語形態素解析の分割誤りの例

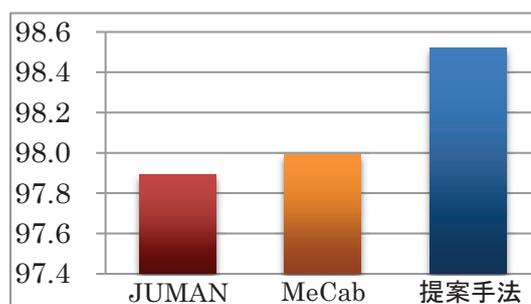


図2：提案手法による精度向上

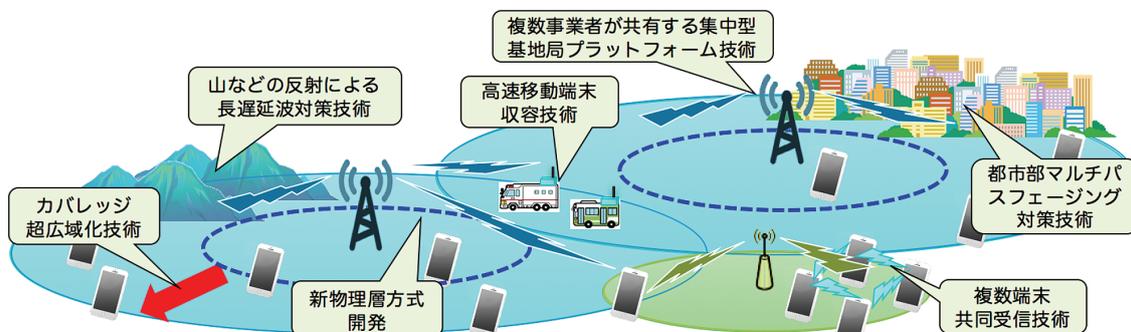
## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（原田研究室）

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

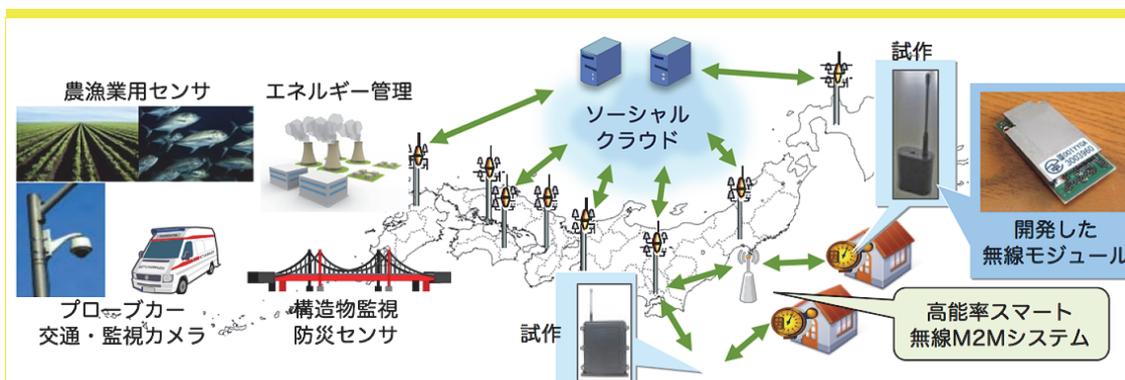
### 第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

昨今、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ク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、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性および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のみならず、物と物（M2M）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、無線通信用途に使用出来る周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。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（5G）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5G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。なお「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」に関する研究開発は総務省から受託した「電波資源拡大のための研究開発」によって実施しています。また「高能率スマート無線M2M通信システム」に関する研究開発は内閣府革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」により、科学技術振興機構を通して委託された研究開発として実施しています。



本研究室における第5世代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

## 通信システム工学講座 伝送メディア分野 (守倉研究室)

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

### [5G に向けたデータベース駆動型周波数共用の知識ベース共有条件更新]

第5世代移動通信システム (5G) においては、大容量かつ高速な通信の実現のため、新たな周波数資源の開拓だけでなく、既存システム (一次利用者) に割り当てられた周波数の効率的な再利用が検討されている。後者を実現する手法の一つであるデータベース駆動型の周波数共用技術では、あらかじめデータベース上に各エリアにおける周波数の一次利用状況などにに基づき周波数共用条件を作成し、その後データベースに問い合わせた周波数共用システム (二次利用者) に対して利用可能な周波数を通知する。このとき、たとえ二次利用者がデータベースの通知する周波数を用いる場合であっても、地形状況の変化及びランダムな電波伝搬の影響による一次利用者における電波干渉等の影響が懸念される。そのため、データベース上の周波数共用条件を適宜更新する必要がある。

本研究の目的は、データベースにどのような情報を保持すればどれくらい周波数共用の効率向上させることができるのかの評価である。本研究では、確率幾何学の適用により、一次利用者の二次利用者から受ける総干渉電力がしきい値を上回る確率を導出し、この確率の目標値を下回するために必要な周波数共用条件について評価を実施した [1]。

図1にシステムの一例を示す。一次利用者受信局 (PR) を原点とする二次元座標系において、二次利用者送信局 (ST) のある密度での一様ランダムな存在を仮定する。すなわち、ポアソン点過程に従う ST の座標を想定する。データベースは PR を中心とする円形の一次利用者排他領域 (PER) を定めて PER 外の ST のみに送信許可を通知し、送信許可を通知された ST が同時刻に一齐に送信を行う。このとき、送信する ST の数が PER 半径に依存するため、PER 半径が大きいほど PR の ST から受ける総干渉電力の平均は小さくなる。

上記のシステムに対して、PER 半径に対する、PR の ST から受ける総干渉電力がしきい値を上回る確率を導出し、数値評価を実施した。図2にデータベースの利用可能情報の種類に対する、全く情報がない場合と比較した最小の PER 半径の比率を示す。なおデータベースの利用可能情報として、二次利用者の密度情報及び送信電力分布情報の二種類を採用している。本図より、データベース上に二次利用者の密度及び送信電力の分布に関する詳細な情報がある場合ほど、一次利用者における干渉発生率を所望値以下にするために必要な PER 半径をより小さくできる。

(参考文献) [1] S. Yamashita, K. Yamamoto, T. Nishio, and M. Morikura, "Knowledge-based update of primary exclusive region for database-driven spectrum sharing towards 5G," Proc. IEEE WCNC-IWSS 2016, pp.473-476, Doha, Qatar, April 2016.

(謝辞) 本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発」の平成27年度案件として開始した「複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術に関する研究開発」の一環として実施した。

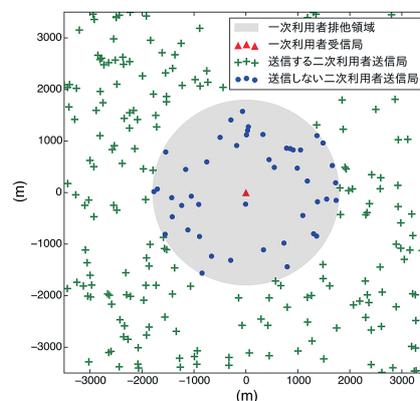


図1：システムの一例

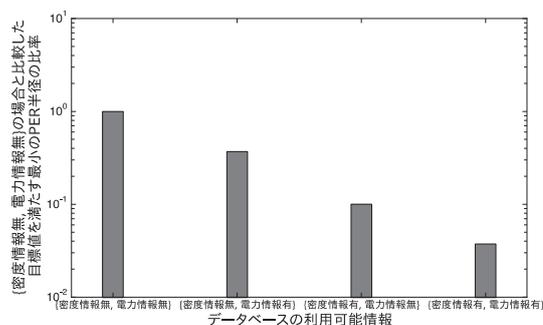


図2：データベース利用可能情報に対する最小 PER 半径

## 集積システム工学講座 大規模集積回路分野（小野寺研）

<http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 集積回路特性ばらつきのオンチップモニタ回路

当研究室では、原子レベルの揺らぎが存在しても少ない消費電力で安定に動作しうる集積回路の実現に向けて、微細デバイスに内在する本質的な特性ばらつきや製造性の劣化、信頼性の低下などの物理的フォールトを克服する設計技術に取り組んでいます。特に、デバイスの特性ばらつきの影響は、低消費電力動作に有効な低電圧動作において顕著に現れます。ここでは、動作中のデバイスの特性ばらつきをリアルタイムに評価することができるオンチップモニタ回路について紹介します。

集積回路の特性ばらつきには、時間的に変化しない成分と時間的に変化する成分があります。前者は、デバイスの構造や製造プロセスに起因するばらつきで、周辺のデバイスが相関をもって変動する成分（大域ばらつき）と個々のデバイスがランダムに変動する成分（局所ばらつき）から構成されます。後者の主要な要因には、ランダムテレグラフノイズがあります。これはデバイス中のキャリアが格子欠陥等にトラップされたり放出されたりするために生じるドレイン電流の時間的ゆらぎで、その大きさはデバイス毎に大きく異なります。

動作中のデバイス特性のばらつきの評価には、リング発振回路（RO）が一般的に用いられてきました。リング発振回路とは奇数段の論理反転ゲートをリング状に接続して発振信号を得る回路です。発振周期によりデバイス特性の推定が可能です。しかし、通常のリング発振回路では、回路内の全トランジスタの平均的な特性しか予測できません。先の分類では、大域ばらつきに相当する成分となりますが、nMOS トランジスタと pMOS トランジスタの成分を独立に評価することができません。

nMOS トランジスタと pMOS トランジスタのそれぞれについて、大域ばらつき成分、局所ばらつき成分、ランダムテレグラフノイズ成分を独立に評価可能なオンチップモニタとして、当研究室では図1に示す再構成可能型リング発振回路を開発しました。この回路の要は、図1（b）に示す再構成可能型反転論理ゲートです。プルアップとプルダウンの回路をそれぞれ2種類もち、パストランジスタに与える制御信号により回路構成を図1（c）、（d）、（e）のように変更する事が可能です。図1（d）と（e）の回路特性は、それぞれ nMOS トランジスタと pMOS トランジスタの特性に敏感です。従って、図1（a）に示すすべての遅延素子を図1のいずれかの構成にすることで、nMOS トランジスタと pMOS トランジスタのそれぞれの大域ばらつき成分を評価可能です。また、遅延素子のいずれか1個のみを図1（d）もしくは（e）として、他の全てを（c）とすることにより、該当トランジスタの局所ばらつき成分とランダムテレグラフノイズ成分の評価が可能です。

当研究室では、この回路を利用して特性ばらつきのすべての成分を観察し、成分毎にばらつきのモデル化を行っています。このモデルを用いることにより、適正な動作マージンを確保した設計が可能になります。また、本モニタを回路内に埋め込むことにより、回路の動作中にリアルタイムでのばらつき評価が可能になります。この情報に基づき、動作電圧や周波数を最適な値に調整することにより、動作エネルギーの最小化を図ることができます。現在、28nm と 65nm プロセスでの試作評価を経て、実アプリケーションへの展開に向けた検討を進めています。

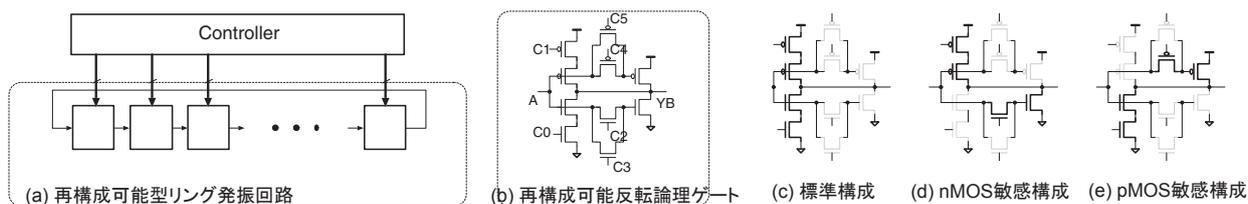


図 1. 再構成可能型オンチップモニタ回路

## システム情報論講座医用工学分野 (松田研究室)

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

## 「左心室拍動現象の連成シミュレーションにおけるメッシュ分割の影響」

心臓は、血液を全身に循環させる働きを持つ生命維持に欠かせない臓器である。心壁は主として心筋と呼ばれる筋肉で構成されており、自ら拍動して血液を拍出する。この心拍動現象を解析し理解することは非常に重要である。心筋細胞は、刺激伝導系と呼ばれる経路を伝わる電氣的刺激を受けると電氣的活動を生じ、それに起因する細胞内の生理学現象の連鎖により収縮力を生じる。その収縮力によって心筋が線維方向に収縮することで心臓が拍動する。このように心拍動は、細胞や組織・臓器といった異なる階層における様々な現象の相互作用により成り立っており、細胞などを用いた実験による詳細な解析は困難な場合も多い。そこで、心拍動現象を解析する手段として、複数の現象を同時に扱う連成シミュレーションが注目されている。本研究室では、心筋細胞の生理学現象を詳細に表現した数理モデルを用いた、心拍動現象の連成シミュレーション研究を進めている。

心壁の変形運動の計算には、有限要素法による構造力学解析を用いることが一般的である。しかし、通常の構造力学解析では外力による受動的な変形を求めるのに対して、心拍動の連成シミュレーションでは、心筋組織の線維方向に生じる自発的収縮力による変形を計算しなければならない。有限要素法では、対象形状を四面体や六面体の要素にメッシュ分割して計算を行うが、一般にメッシュ分割の相違は計算結果に影響を与えるとされている。しかし、通常の構造解析では扱われない自発的収縮力を考慮した心拍動の連成シミュレーションにおいて、メッシュ分割が計算結果に与える影響については、これまでに報告されていなかった。そこで、左心室拍動連成シミュレーションを対象に、左心室形状モデルにおけるメッシュ分割の差異がシミュレーション結果に与える影響について検討した [文献 1]。

本研究では、左心室を一般化して表現した形状として、上部を削除した厚肉回転楕円体 (図 1) を用いた。同心の切頂回転楕円体面を四角形メッシュに分割することで、左心室形状を六面体要素に分割する。回転楕円体面の四角形メッシュとして、経緯線に沿って分割したもの (図 1-a)、半正多面体である斜方二十・十二面体を細分割することで生成したもの (図 1-b) の 2 種類を作成した。これらのメッシュ形状を用いて、心筋細胞による自発的収縮力と心筋の線維方向を考慮した左心室拍動連成シミュレーションを行い、計算結果を詳細に比較した。図 1 下段には、心内膜面において組織に加わる力 (ミーゼス応力) を示している。各位置のミーゼス応力を最大値から最小値まで濃淡で示す。両メッシュモデルのシミュレーション結果は、全体としては概ね同様の分布傾向であるが、心内膜面の心尖部 (図の下部) 付近で顕著な差が認められた。一方、ひずみに応じて生じる受動的な応力については両者の間に大きな相違は認められなかった。詳細な解析により、このような計算結果の相違は、メッシュモデル間の心筋線維方向および細胞の自発的収縮力の差異に起因していることが明らかとなった。本研究を通じて、心拍動連成シミュレーションでは、通常の構造解析よりもメッシュ分割が計算結果に与える影響が大きいことが明らかとなった。

文献 1 嶋吉, 小川, 松田: 「左心室拍動シミュレーションにおけるメッシュ分割の影響」. 電子情報通信学会論文誌 D, 99, pp.571-578, 2016.

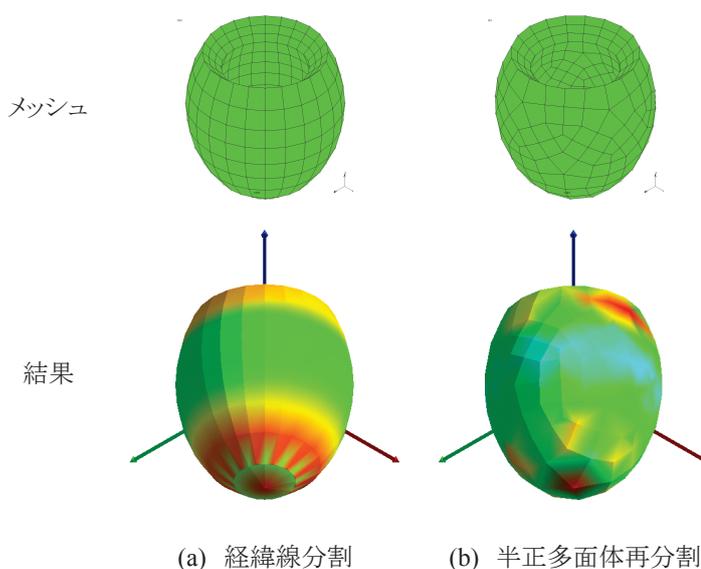


図 1 左心室メッシュモデルとシミュレーション結果

## エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野（下田研究室）

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

## 「どこでも地震体験システム」

自然災害による被害を低減させるには、インフラ整備を進めるだけでなく、個々人の防災意識を向上させる必要があります。防災意識を向上させる試みとして、Virtual Reality（VR）技術を用いて地震を模擬体験させる方法があります。この方法では、体験者が仮想空間内に没入し、シミュレーションされた地震を体験します。安全に地震を模擬体験できるという利点がありますが、体験環境の3次元形状モデルなどのコンテンツを、専門家が予め手作業で作成しておく必要があります。体験者が普段生活している環境と異なる環境での体験になるため、地震は身近に発生するものであるという「我こと感」を醸成することが難しいという問題がありました。

そこで本研究では、体験の対象となる環境を計測して得た3次元点群モデルから、地震のシミュレーションの実行に必要な3次元モデルや音を自動的に生成する機能を備えた「どこでも地震体験システム」を開発しました。本システムを用いることにより、体験者が普段生活している環境で地震が発生する様子を模擬体験することが容易になり、「我こと感」を醸成できるようになると期待されます。

図1に、本研究で開発した地震体験システムの概要を示します。本システムは、(1) 体験対象の環境を計測する計測サブシステム、(2) 地震シミュレーションに必要なデータを生成するコンテンツ生成サブシステム、(3) 生成したデータと地震の揺れデータを元に映像と音で地震を模擬体験可能にする体験サブシステムの3つのサブシステムで構成されます。計測サブシステムでは、地震体験の対象となる屋内環境をレーザスキャナとカメラを用いて計測し、環境の3次元点群モデルとカラー画像を取得します。コンテンツ生成サブシステムでは、計測サブシステムで得た体験環境の3次元点群モデル、地震の揺れデータ、予め準備した様々な物体同士の衝突音から、立体映像をレンダリングするための外観形状モデルと剛体挙動シミュレーションの為の衝突形状モデル、地鳴り音など、地震のシミュレーションの実行に必要なデータを生成します。体験サブシステムは、両眼広視野HMD、環境ノイズ低減ヘッドホン、パソコンで構成され、体験者は仮想空間に没入して地震を模擬体験できます。

図2に、本システムで地震体験コンテンツを自動生成した例を示します。右上が実際の部屋の写真、右下が自動生成したモデルです。本システムを18名に体験してもらったところ、視覚と聴覚以外の刺激提示が無い場合でも、体験者の半数以上が地震に対する恐怖を感じることができていることを確認しました。今後、オフィスや学校での地震体験イベントの開催などに活用していきたいと考えています。

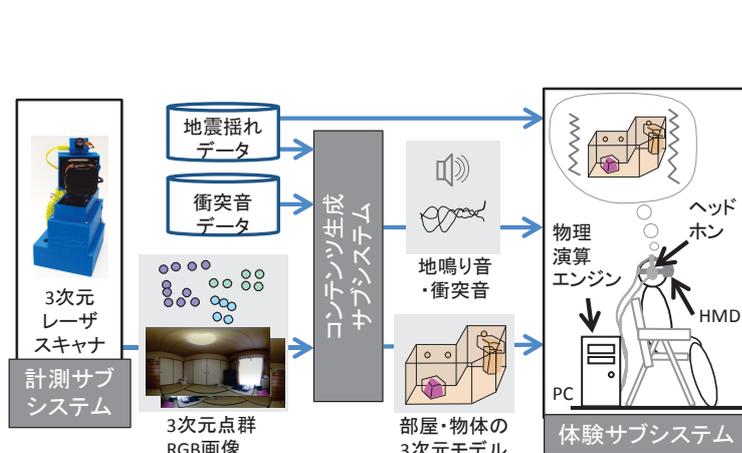


図1 どこでも地震体験システムの概要



図2 自動生成した地震体験環境の例

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻  
 エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野 (土井研究室)  
<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/index.html>  
 ニホウ化マグネシウムを用いた超伝導線材の高性能化

エネルギー応用基礎学分野 (土井研究室) では、エネルギー材料に関する研究として、成膜技術を活用したニホウ化マグネシウム ( $\text{MgB}_2$ ) 超伝導線材の開発にも取り組んでいます。

$\text{MgB}_2$  は金属系超伝導体の中で最も高い臨界温度 ( $T_c$ ) を有し、約 40 K で超伝導性を示します。これは、比較的熱効率の高い冷凍機で実現できる温度や液体水素の沸点に相当する 20 K で利用可能な超伝導体であり、液体ヘリウム (沸点: 4.2 K) での冷却が不要です。また、軽元素のみで構成されるため非常に軽い (低比重) という長所を有しています。一方で、酸化しやすい Mg を構成元素に含むため  $\text{MgO}$  などの絶縁物が線材内部に形成されやすく、超伝導電流の阻害因子となります。そこで、当研究室では、超高真空中でも成膜可能な電子ビーム蒸着法 (図 1 参照) に着目しました。この技術を用いて、 $\text{MgO}$  などの不純物の形成がなく、また成膜温度の低温化によってナノレベルの柱状組織を実現することで高い性能を持つ  $\text{MgB}_2$  超伝導線材を開発してきました。

さらに、最近、高真空中でのアニールにより、20 K での通電性能がさらに向上することを見出しました。図 2 に通電性能の指標である臨界電流密度 (電気抵抗 0 で流せる直流電流密度の上限) の磁場依存性を示します。アニールによって全磁場領域の臨界電流密度が向上していることが分かります。アニールにより実現したこの臨界電流密度は実用レベルに達しています。この性能向上は、低温成膜した  $\text{MgB}_2$  の深刻な問題点の一つである低い  $T_c$  (30 ~ 33 K 程度) が適切なアニールにより 2 ~ 3 K 程度上昇したことによるものです。透過型電子顕微鏡での組織観察からアニールによって柱状組織の変化や酸化は起こらず、アニールプロセスは実用に向けて大きな利点をもつことが確認されました。

このほか、中間層を利用した柱状組織制御を通じて更なる性能向上の可能性も見出しています。 $\text{MgB}_2$  超伝導線材を使うことで装置の大幅な軽量化も期待できることなどから、医療用 MRI 装置やリニア中央新幹線への実装が期待され、現在、民間企業との共同研究も進めています。

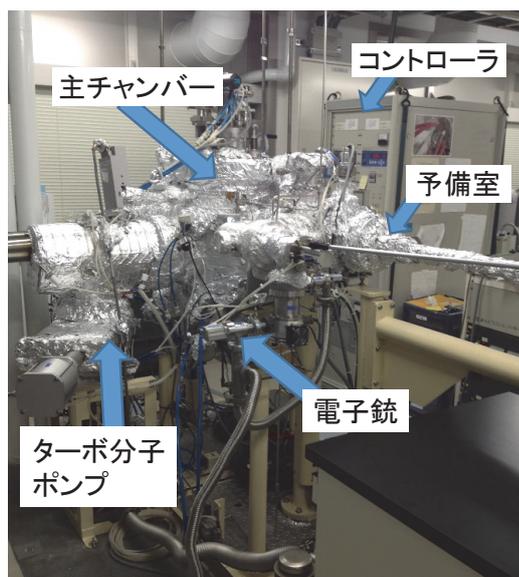


図 1 電子ビーム蒸着薄膜作製装置。

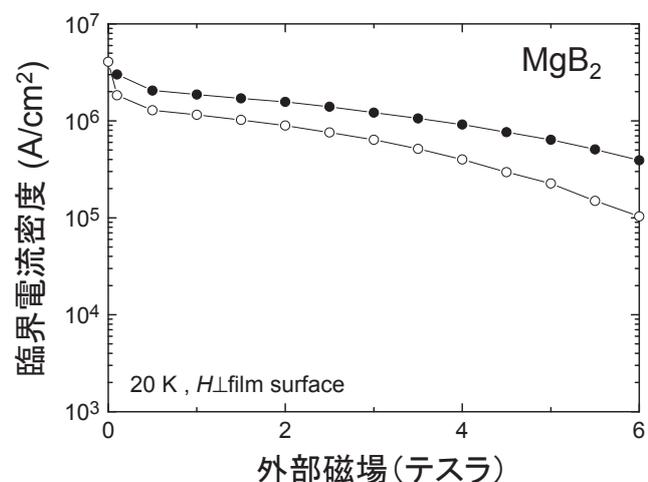


図 2  $\text{MgB}_2$  薄膜の臨界電流密度の外部印加磁場依存性。  
 ●はアニール後、○は as-grown 状態の薄膜の結果。

## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/sanok/index.html>

## 「ヘリオトロンJ」における NBI および ICRF 重畳加熱による高速イオン生成

核融合発電を目指す磁場閉じ込め方式のプラズマ研究は国際協力による ITER を中心として各国で進展しています。重水素、三重水素による核融合を考えた場合、反応によって生成される  $\alpha$  粒子はプラズマ加熱の大部分を担うため、その閉じ込めは重要な課題です。外部磁場のみで閉じ込め磁場を形成する単純なヘリカル系装置においては無衝突領域のリップル損失が存在するため、これを低減する磁場配位を考える必要があります。エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置では、この損失低減を目的とし、様々な磁場配位を生成することができます。また、プラズマ加熱装置として設置されている中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱では最大 30keV まで加速された水素ビームを入射することができます。ここではヘリオトロンJの2種類の磁場配位に対して、NBIによる高速イオンをさらにイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱を用いて加速させ、閉じ込めた場合の実験結果について紹介します。

プラズマは少数イオンの水素と多数イオンの重水素の混合プラズマを用いており、ICRF入射前のイオン温度は 0.2keV 程度です。このような2種イオンのプラズマに ICRF 加熱を行うと主に NBI 入射ビーム (ここでは入射エネルギー 25keV) を含めた少数イオンである水素イオンにエネルギーが吸収されるため、高速イオンを容易に生成することができます。プラズマ中のイオンは中性原子との荷電交換反応によってプラズマ外へ排出されるので、これらの粒子を解析すればプラズマ中のイオンについて調べることができます。

電子サイクロトロン加熱 (ECH) と NBI 加熱で生成したターゲットプラズマに ICRF 加熱を重畳し、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の密度での加熱実験を行ないました。NBI (約 400 kW)、ICRF (約 300 kW)、ECH (約 330 kW) という条件です。荷電交換中性粒子分析器 (CX-NPA) を入射エネルギー 25 keV の NBI 入射方向に計測視線を向け、少数イオンである水素を観測しました。ここで少数イオンである水素比は ICRF パルス中で 10% 程度です。磁場配位は低  $\varepsilon_t$  (図 1 (a)) および高バンピネス (図 1 (b)) でのエネルギースペクトルの測定結果を上を示します。低  $\varepsilon_t$  配位は、新古典理論でよい閉じ込めが期待できる配位です。また、高バンピネス配位はバンピネス (トーラス方向の磁場リップル) を変えた実験で最も高エネルギーイオンが生成された配位です。図 1 (a) では、ICRF 入射前の水素のエネルギースペクトルに、NBI 入射エネルギーを  $E_0$  として  $E_0/2$ 、 $E_0/3$  にピークがあるのが分かります。4 keV から 10 keV の範囲では ICRF パルス中に粒子束は減少していますが、それ以上のエネルギーでは粒子数が増加していることも分かります。最大検出エネルギーは 60 keV に達していて、この計測で得られた最大エネルギーです。

図 1 (b) の高バンピネス配位では最大観測エネルギーは 33 keV であり、低  $\varepsilon_t$  配位の場合に比較すると低いことが分かりました。今回分かった高速イオン生成に対する低  $\varepsilon_t$  配位の優位性を、広範囲の計測視線で確認し、エネルギースペクトルの全体的な特性を含めバルクプラズマの加熱特性に対する総合的な特性に対しても調べる予定です。

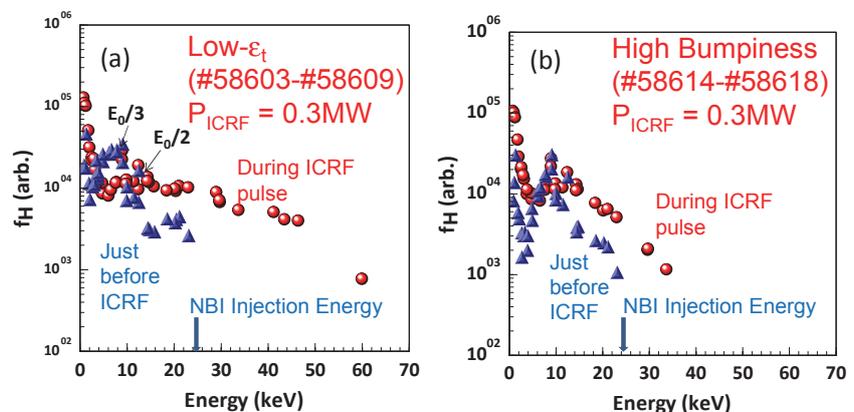


図1 NBI + ECHプラズマをターゲットにした場合のICRFによる高エネルギー粒子生成。ICRF入射直前とICRFパルス中のエネルギースペクトル。(a) 低  $\varepsilon_t$  配位、(b) 高バンピネス配位。

## 生存圏研究所 生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (津田研)

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/lasd/>

### レーダーと音波を併用して気温を連続測定 (RASS: Radio Acoustic Sounding System)

温暖化の影響で集中豪雨が頻繁に起こる傾向があると報告されている。極端気象のメカニズムを理解し、天気予報の精度を向上させ、減災を目指すことが重要である。数値モデルの高度化により天気予報精度が格段に改善されているが、同時に観測結果をもとに数値モデルの予報値を修正するデータ同化の発展も大変重要である。

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る。また、高層大気では、ラジオゾンデ (小型気球) による高度プロファイルの直接測定に加えて、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る。我々は、既存の測定手法の精度 (accuracy と precision) を改善する努力を続ける一方、従来測定できなかった大気情報を得るための新技術の開発を行っている。

電波による風速測定では、降雨時には雨滴散乱を用いた気象レーダーが用いられ、晴天時は wind profiling radar (WPR) により鉛直風を含む風速3成分が観測できる。また、気温と湿度の観測にはラマン散乱等を用いたライダーが開発されている。本稿では、WPR と音波を併用して気温の高度プロファイルを測定する斬新なレーダー技術である RASS (ラス、Radio Acoustic Sounding System) を紹介する。

WPR 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) を検出する。RASS では音波で人工的に屈折率変動を作り、これを WPR のターゲットとする。WPR の近傍から発射された音波が大気中を伝搬する際に、音波波長スケールの周期的な大気密度の粗密 (大気屈折率変動) が起こる。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 ( $C_s$ ) が求まるが、 $C_s$  (m/s) は気温  $T$  (K) の平方根に比例するので ( $C_s = \kappa \sqrt{T}$ )、音波パルスが通過する各高度における気温が得られる。ここで、比例係数  $\kappa$  は比熱比と平均分子量で決まる定数で、乾燥大気中で約 20.047 となる (ただし、水蒸気を含む湿潤大気ではわずかに変化する)。

RASS エコーを検出するには、レーダー波長と音波波長の比が 2:1 となる必要がある (ブラッグ条件)。また、WPR のアンテナビーム方向が音波面と直交する必要がある。音波面は基本的には同心球状に広がるが、背景風により変形するため、実際には背景風を想定したレイトレーシングを行って、音波面とアンテナビームが直行する条件を調べる<sup>[1]</sup>。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る。そのため、単一の音波周波数はレーダー波長とのブラッグ条件を特定の高度でしか満たさない。適切な音域に広がったスペクトルを持つ音波 (例えば、FM チャープ信号) を発射すれば、広い高度範囲で RASS エコーを観測できる。

RASS は 1960 年代に発案されたが、当初は数 GHz 帯レーダー (と数 kHz の音波) が用いられたため、音波減衰が激しく観測高度は約 1 km 以下であった。我々は、1980 年代に MU レーダー (46.5 MHz) に RASS を適用し、約 100 Hz の低周波の音波を用いたところ、高度約 22 km まで気温を観測できた<sup>[2]</sup>。この成果をもとに RASS の観測技術に関する研究が進み<sup>[1, 3]</sup>、400 MHz 帯、1.3 GHz 帯で運用される各種の WPR に RASS が適用された。我々は、MU レーダー以外に、京大・生存研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、およびインド大気科学研究所の Gadanki MST レーダーを用いた RASS 観測を行っている<sup>[4]</sup>。

VHF 帯 WPR の RASS では、気温を高度約 10–20 km まで 150 m の分解能で観測でき、ラジオゾンデと比較して 0.2–0.5 K の精度である。しかも、測定間隔は約 1–2 分であり、WPR による風速 3 成分の測定と併用すれば、短時間変動するメソ現象の構造を明らかにできる<sup>[3]</sup>。また、温度構造は大気物質の輸送や乱流拡散過程に大きな影響を与えている。例えば対流圏下部に現れる温度逆転層は混合を抑制するとされている。一方、熱帯では、水蒸気やオゾンをはじめとする大気微量成分は高度 15 km 付近に位置する対流圏界面を通して輸送されるが、その高度域における温度ならびに大気安定度 (温度の高度勾配) の微細構造の連続測定が重要である<sup>[4]</sup>。

[1] Masuda Y., Radio Sci., 23, 647-654, 1988.

[2] Matuura et al., Nature, 323, 426-428, 1986.

[3] Adachi T. et al., Radio Sci., 28, 571-583, 1993.

[4] Sarma T.V.C., et al., Ann. Geophys., 26, 2531-2542, 2008

## 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研究室）

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/omura-lab/>

### 「オーロラ・ブレイクアップの謎に迫る」

オーロラが突然明るく光り出すオーロラ・ブレイクアップと呼ばれる現象があります。太陽風から磁気圏（地球固有の磁場が支配する宇宙空間）に流入したエネルギーが爆発的に解放される現象とされていますが、その仕組みは良く分かっておらず、半世紀以上において宇宙空間物理学における最大の謎の一つとなっています。一方、オーロラ・ブレイクアップが起こると熱いプラズマが内部磁気圏に注入されます。すると様々な電磁波動が励起され、電子は加速や散乱を受け、放射線帯（ヴァンアレン帯）が増減すると考えられています。また、オーロラを流れる電流が急に増えることで地磁気誘導電流が急増し、変電所の変圧器が損傷する可能性も指摘されており、オーロラ・ブレイクアップは宇宙生存圏を理解する上で重要な現象と言えます。

田中高史九州大学名誉教授が開発したグローバル電磁流体シミュレーションを用いて太陽風と地球磁場の相互作用を解き、オーロラ・ブレイクアップの問題に取り組んでいます。特異点が無い格子を用いて地球周囲の宇宙空間を数千万に分割し、磁気圏と電離圏という性質の異なる領域を結合することで、オーロラ・ブレイクアップをはじめとする多くの関連現象をよく再現することが可能となっています。シミュレーションで再現したブレイクアップの例を図1に示します。オーバル状に分布しているオーロラの一部が突然明るく光り出し、極方向そして西方向に広がっていくことがわかります（オーロラ・サージ）。電流、ダイナモ、力学の3つの観点でシミュレーション結果を詳しく解析し、オーロラ・ブレイクアップの新しい発生メカニズムを提案しました [1, 2, 3]。オーロラ・ブレイクアップを特徴づける電流線をシミュレーションで調べると、これまで定説とされていた電流系とは全く異なることがわかりました。オーロラ・ブレイクアップ時には高温のプラズマが地球近傍に集まり、磁力線に垂直方向の電流が発達するため、これまで定説とされた電流系が存在することは難しいようです。また、突然明るく光りだしたオーロラが極方向・西方向に拡大するというオーロラ・ブレイクアップの最大の特徴を電磁流体シミュレーションでよく再現できたことから、ミクロスケールのプラズマ不安定性はオーロラ・ブレイクアップの必要条件ではない可能性が高まりました。磁気圏と電離圏が密接に相互作用しながらオーロラ・サージが作られることもわかり、性質の異なるプラズマ領域間の結合の重要性も明らかになりました。

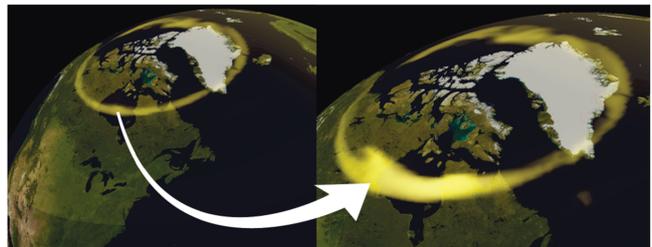


図1：シミュレーションで再現したオーロラ・ブレイクアップ現象。

#### 参考文献

- [1] Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2015JA021516, 2015.
- [2] Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Formation of westward traveling surge, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2015JA021697, 2015.
- [3] Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Quiet and N-S arcs preceding auroral breakup, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 1201–1218, doi:10.1002/2015JA021831, 2016.

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 (小山田研究室)  
<http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/>  
 「生命科学ビッグデータにおける因果関係のビジュアル分析」

物事の因果関係を解き明かすことは科学の本質的な目的の1つです。例えば、再生医療のための基礎研究が近年活発になっていますが、そこでは遺伝子や環境といった要因が個体の発生にどのような影響を与えるのかという因果関係の解明が重要となります。生命科学分野では、様々な研究成果が大規模データベースとして集積され、それを利用した、研究のデータ駆動化が進んでいます。すなわち、大量に存在するデータを活用して、仮説の探索・検証を行う新しい科学のアプローチが必要になっています。可視化は、このような、大量に存在するデータを活用して新たな科学的発見を促す上で重要な役割を果たしています。そのため、近年の可視化研究では、欧米を中心に、ビジュアル分析と呼ばれる可視化を利用した対話的分析に関する研究が進んできました。

私たちは、線虫の発生動態データベース [1] から得た、線虫胚表現型特徴ネットワークを対象としたビジュアル分析の研究を行っています。このデータは、線虫の胚が発生する過程で、細胞の核の大きさや位置関係などを測定した特徴量を含んでいます。時間的に前後関係がある特徴量間の相関が高い場合に、それらが発生に関わる因果関係を表している場合があります。データの中から未知の因果関係を発見することが課題となっています。しかし、この因果関係のネットワーク構造を従来通りの方法で可視化した場合は、辺が非常に密で視認性の悪い結果となり、ここから新たな知見を見出すことが困難でした。そこで、私たちはこのデータに対して辺集中化 (Edge Concentration) と呼ばれるアプローチを適用し、辺集中化の新たなアルゴリズムを開発することで、より視認性の高い可視化を達成しました [2]。辺集中化では、入力グラフに含まれる完全二部部分グラフを抽出し、それらをより簡単な構造のグラフで置き換えることで視認性の向上をおこないます。また、辺集中化で得られた完全二部部分グラフを、発現現象を説明する潜在変数と捉えたモデルの統計的な検証にも取り組んでいます。

線虫データに対して構築されたビジュアル分析の方法は、いずれはマウスやヒトなどのより複雑な生物に対するデータにも適用され、今後の再生医療の研究などで役立てられることが期待されています。

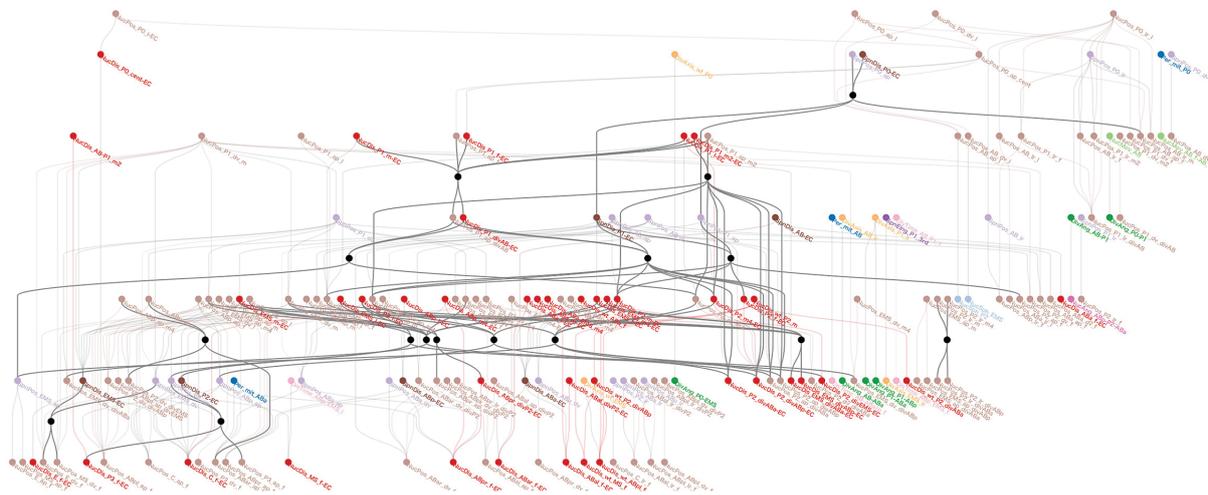


図1 線虫胚表現型特徴ネットワークの可視化結果。受精卵1細胞から8細胞までの間で計測された248個の特徴量間の因果関係を表している。

#### 参考文献

- [1] K. Kyoda, E. Adachi, E. Masuda, Y. Nagai, Y. Suzuki, T. Oguro, M. Urai, R. Arai, M. Furukawa, K. Shimada, J. Kuramochi, E. Nagai, and S. Onami, "WDDD: Worm Developmental Dynamics Database.," *Nucleic Acids Res.*, vol. 41, no. Database issue, pp. D732-7, Jan. 2013.
- [2] Y. Onoue, N. Kukimoto, N. Sakamoto, and K. Koyamada, "Minimizing the Number of Edges via Edge Concentration in Dense Layered Graphs," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 22, no. 6, pp. 1652-1661, 2016.

学術情報メディアセンター 教育支援システム研究部門 遠隔教育システム研究分野 (中村研究室)  
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>  
 「認知症患者の QoL を推定するための観測と表情認識」

認知症患者の数は年々増加しており、大きな社会問題となっている。現在の医療では根治が望めないため、症状の進行を遅らせるための治療がなされる一方で、認知症と折り合いをつけながら生活するための介護や支援を提供することが重要な課題となっている。中でも、「自尊心を持って人間らしく日々を過ごす」こと、すなわち、生活の質 (Quality of Life) を高く維持することに重点を置いた”パーソンセンタードケア (person-centered-care)”の重要性が認識され始めている。しかし、患者や被介護者の状態を長時間にわたって観測し続けることが難しく、ケアの良さや改善方法に関する客観的な指針を得ることが難しいという問題があった。

このような問題に対し、本研究では、患者や被介護者の生活の場を画像センサやその他の非侵襲的なセンサで観測し、表情やしぐさを認識することによって、本人の内部状態、特に、本人が満足できる状態にあるかどうかを客観的に計測することを試みている。そのために、実際の介護現場での調査とプロトタイプシステム構築を行ってきた。このような状況では、本人が移動したり、周囲の人達との

会話やインタラクションが発生し、単純な表情認識手法では誤りが多くなることが確認されており、(a) 自然な生活状態で質の良い映像を得るためのカメラ配置、および、写される人に意識されないための設計などの撮影環境の設計、(b) 自然な生活状態での表情やしぐさを計測・認識するためのパターン認識手法、(c) 個人的な特徴をできるだけ隠した提示など、プライバシーに配慮した記録・呈示手法など、種々の新しい技術が必要となる。これまでの研究では、テーブルを囲んだ団欒や作業療法などを対象として、被介護者の表情を観測することによって、笑顔を検出する手法を提案した。また、表情を時系列パターンと考えて経験的モード分解を適用することによって、発話などが発生している場合の表情認識の精度を改善できることを示した。これらの手法を更に発展させ、精度の向上を図るとともに、日常生活の中で適用できる場所を増やしていくことによって、長時間の計測や経時的な解析ができるようにシステムを拡張する予定である。

S.Sako, K.Kondo, Y.Nakamura, Y.Matsuoka, T.Ohtsuka, "Facial Expression Recognition for Evaluating QoL of Dementia Patients", International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems, pp.203-210, 2015

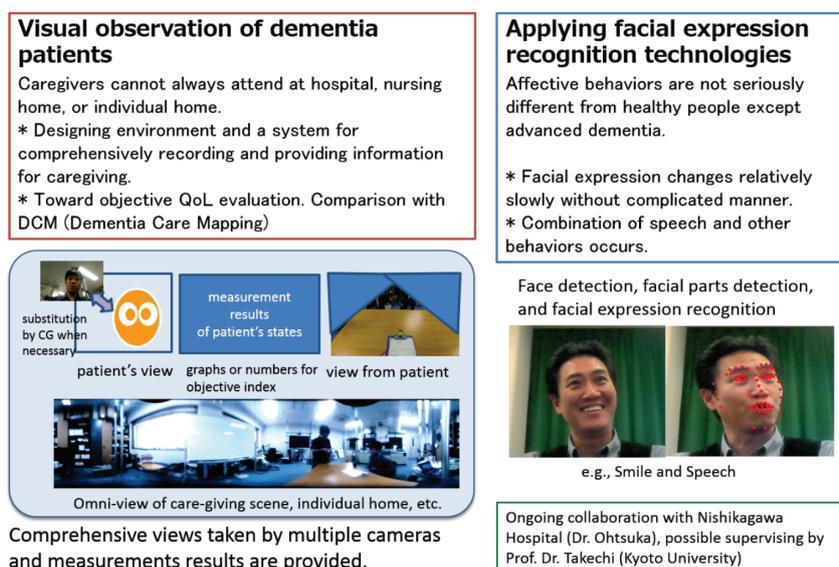


図 1 : 認知症患者の観測とその結果の表示 (左) と表情認識 (右)

## 平成 27 年度修士論文テーマ紹介

### 工学研究科 電気工学専攻

#### 小 野 愛 実 (引原教授) 「パワーデバイスの高周波スイッチングによる電源回路の構成とその特性に関する研究」

電源回路におけるパワーデバイスの高周波スイッチングにより生じる課題について、実験およびシミュレーションにより検討した。さらに、その課題を解決する方法としてアクティブクランプ回路の適用についてシミュレーションにより検討した。

#### 河 野 洋 平 (引原教授) 「センサデータを用いたビル内温度分布のマルチスケールモデリング」

室内熱移動を拡散としてモデル化し、人感センサデータをモデルに組み込むことで、人占有の温度分布への影響を表現した。また、アトリウムを介した部屋間熱移動を拡散または移流としてモデル化し、温度データ及び空調運転データに基づき、熱移動に関するパラメータを同定した。

#### 中 村 洋 平 (引原教授) 「高周波応用のための SiC パワー MOSFET の特性測定とデバイスモデリング」

SiC パワー MOSFET の特性を測定するため、大電力用の電流 - 電圧測定システムを開発した。また、測定システムによって得られたデータに基づいてデバイスモデリングを行った。その結果、最大 3MHz のスイッチング周波数で動作する昇圧コンバータの実測の模擬を実現した。

#### 西 原 大 智 (引原教授) 「交流電力ルータの三相化およびその回線切換えに関する検討」

ビル・工場などへ電力ルーティングの適用を目指し、三相交流電力ルータを開発した。本研究では、三相交流電力ルータの構成、回線切換え方法の提案、そして動作時の電圧電流を測定した。その結果、低圧配電下の回線切換えを達成し、回線切換え方法によりサージ電圧・突入電流の抑制を確認した。

#### 朝比奈 和 希 (萩原教授) 「ディスクリプタ非負システムに対する解析および制御器設計」

係数行列  $E$  が正則とは限らないディスクリプタシステムが非負となるための必要十分条件を行列対の標準形を用いて導いた。さらに線形計画問題および線形行列不等式を用いて、 $E$  が正則であるディスクリプタ非負システムを解析し、さらにその結果に基づき制御器設計を行った。

#### 新 谷 翔 吾 (萩原教授) 「複数の不安定零点・不安定極を有する 1 入出力系の双対 LMI を用いた $H_\infty$ 性能限界解析」

1 入出力系の  $H_\infty$  制御系設計において達成可能な  $H_\infty$  ノルム ( $H_\infty$  性能限界) の解析を行った。制御系設計のための線形行列不等式 (LMI) の双対に着目し、その解構造を零点や極の情報に基づいて解析することで、感度関数を含む 3 つの伝達関数の  $H_\infty$  性能限界およびその下界値を解析的に導出した。

#### 西 尾 直 也 (萩原教授) 「直達項を有するサブシステムで構成される遅延結合非負システムの安定性と支配極の解析」

直達項を有する複数の非負のサブシステムが遅延のある通信経路を介して互いに結合することで構成される遅延結合非負システムを解析対象とし、このシステムが安定となるための必要十分条件を導出し

た。さらに、このシステムの収束速度の指標となる支配極の計算手法を示した。

#### 福 場 真 佑 (萩原教授) 「サイクリングに基づく因果的・非因果的周期時変スケーリングのロバスト安定解析における相互関係」

離散時間周期時変系に対するロバスト安定解析のアプローチであるサイクリングに基づく因果的・非因果的周期時変スケーリング間のロバスト安定解析の保守性に関する相互関係を、無限行列表現の枠組みを介して解明した。また、動的時不変な不確かさの取り扱いについて論じた。

#### 小 川 芳 樹 (土居教授) 「生物学的ペースメーカ創成を目指したヒト心筋細胞モデルの非線形解析」

ペースメーカ機器に替わる心臓の治療法である生物学的ペースメーカについて、非線形微分方程式モデルを用いた詳細な解析を行い、どのようにイオンチャネルコンダクタンスを遺伝子工学的に改変すれば、望ましいペースメーカ細胞が得られるかを明らかにした。

#### 谷 口 将大朗 (土居教授) 「複数の鎮痛度指標に基づくファジィ推論を用いた麻酔鎮痛度評価法の提案と鎮痛度制御への応用」

心拍間隔変動、脈波、および筋電信号のそれぞれに基づく鎮痛度指標からファジィ推論を用いて麻酔中の鎮痛度を評価する方法を提案し、その有効性を臨床データに基づいて確認するとともに、その鎮痛度評価値に基づいて麻酔鎮痛度を制御するシステムを構成した。

#### 橋 本 将 吾 (土居教授) 「1型糖尿病患者の食事時の血糖値制御 一食事の事前情報を利用した制御法とロバスト性能の改善法の検討一」

1型糖尿病患者を対象として、食事の事前情報に基づく最適な制御とその最適な血糖値変化からの誤差を抑制する制御を組み合わせた食事時の血糖値制御法と、低血糖回避性能と、事前情報やモデルの誤差に対するロバスト性能の高い血糖値制御系の設計法を提案した。

#### 加 賀 裕 樹 (小林教授) 「超低磁場における原子磁気センサを用いた超偏極 Xe の MR イメージングに関する検討」

原子磁気センサを用いた超偏極 Xe の超低磁場 MRI 実現に向けて、シミュレーションおよび計測実験により SWIFT 法の周波数帯域幅や時間帯域積について検討を行い、広帯域幅の SWIFT 法が超偏極 Xe の超低磁場 MRI 計測に有効であることを確認した。

#### 田 中 佑 卓 (小林教授) 「機能的 MRI・脳磁図・眼球運動計測による運動透明刺激観察時の内因的知覚交替に関する研究」

競合する二方向にドリフト運動するランダムドットパターンが2つの奥行き異なる面として知覚される運動透明視において、奥と手前の面が交替して知覚される現象の脳内機構に関わる動的な神経活動を機能的 MRI と脳磁図の統合解析により明らかにした。

#### 民 輪 一 博 (小林教授) 「超低磁場 MRI における圧縮センシングを用いた T1 強調画像の高速撮像に関する検討」

超低磁場 MRI で課題となる信号取得時間の延長に対して、圧縮センシングを用いた高速撮像法についてシミュレーション画像を用いた検討を行い、圧縮センシングを用いた信号読み出し時間の短縮が T1 強調画像撮像法の高速化に有効であることを確認した。

### 三 木 穂 高 (小林教授) 「精神神経疾患の病態神経回路同定を目指した白質神経線維束自動追跡法の開発」

統合失調症やアルツハイマー病といった様々な精神神経疾患に関与する脳内神経回路の同定を目的として、全脳を百数十の領域に区分けしたパーセレーションマップと拡散テンソル MRI に基づく白質神経線維束トラクトグラフィ法を組み合わせた自動解析手法を開発した。

### 矢 野 貴 文 (小林教授) 「統計的モデル選択による機能的 MRI- 脳磁図統合解析法の改善」

機能的 MRI により同定された脳神経活動部位の時間的変動を脳磁図データの再構成により捉える統合解析手法において、機能的 MRI で非捕捉の活動部位を統計的モデル選択の手法により推定する事で再構成精度を向上させる新たな手法の開発を行った。

### 東 祥 平 (雨宮教授) 「加速器用マグネットを想定した高温超伝導薄膜線材の局所的・過渡的擾乱に対する熱的安定性についての基礎検討」

本研究では、粒子線加速器用途を想定した希土類系高温超伝導コイルの局所的・過渡的擾乱に対する熱的安定性について、実験的・解析的研究を行った。線材の詳細な非線形電流輸送特性を導入した解析の結果、当該熱安定性に関する新しい知見を得ることができた。

### 曾我部 友 輔 (雨宮教授) 「薄膜超伝導線材で巻かれたマグネットにおける線材磁化を考慮した電磁界解析」

本研究では、薄膜超伝導線材で巻かれたマグネットの線材磁化を考慮した電磁界解析を行った。計算負荷軽減のための各種モデルについて検討し、コサインシート型二極マグネットの三次元解析に成功したほか、加速器用マグネットの断面構成と磁場精度の関係について検討した。

### 西 本 拓 馬 (雨宮教授) 「マルチフィラメント化された薄膜高温超伝導線材とその積層集合体におけるフィラメント間結合の実験的検討」

本研究では、磁化低減を目的としてマルチフィラメント化された薄膜高温超伝導線材ならびにコイルを模擬した線材積層集合体を対象に、フィラメント間の結合を実験的に評価した。結合時定数の線材長依存性、積層による変化などを明らかにし、コイルにしたときの特性も検討した。

### 村 中 啓太郎 (雨宮教授) 「車載用高温超伝導誘導同期モータの最適制御に向けた過渡駆動特性に関する基礎研究」

本研究では、輸送機器応用を志向した高温超伝導誘導同期モータについて、急発進時の加速特性について実験的・解析的研究を実施した。20 kW 級プロトタイプ機について検討したところ、上記モータの優れたゼロ発進特性や可変速制御特性を明確化することができた。

### 渡 邊 潤 (雨宮教授) 「輸送機器用高温超伝導駆動モータの実現に向けた冷却システムに関する基礎研究」

本研究では、輸送機器向け 20 kW 級高温超伝導誘導同期駆動システムについて、モータ本体の熱負荷やクライオスタットの熱侵入を明らかにした。さらに、パルス管冷凍機の開発も同時に行い、同冷凍能力で冷却できる駆動システムの要求仕様を明確化することに成功した。

**大石 克哉 (和田教授) 「電磁結合の遅延を考慮したメタマテリアルの集中定数等価回路モデル」**

電磁結合に遅延を持たせることによって、通常は実数であるインダクタンスやキャパシタンスが複素数になる。この近傍界遅延による虚部が放射損に対応することを理論的に明らかにするとともに、分散特性のライトラインにおける特異性を与えることを示した。

**富田 大將 (和田教授) 「パルス妨害との衝突確率とシンボル誤り率を考慮したパケット通信速度の推定法」**

デジタル無線通信システムに対する妨害波の評価法確立の基礎検討として、パルス性妨害波のインターバルと継続時間を踏まえて、妨害波パルスとパケット内シンボルの衝突確率を考慮してシンボル誤り率を推定し、さらにパケット誤り率を推定する手法を提案した。

**宮原 秀敏 (和田教授) 「リニアレギュレータの内部電圧 / 電流変動の推定によるイミュニティ評価モデル」**

LDO 電圧レギュレータ回路を対象に、伝導性妨害波による出力電圧変動と回路内部の端子電圧との関係を明確にした。さらに、内部回路を機能ブロックに分割し、ブロックごとに妨害波伝達特性と誤動作情報を持つイミュニティマクロモデルの構築方法を提案した。

**荒井 航大 (松尾教授) 「時空間有限積分法における PML およびサブグリッドの接続に関する研究」**

時空間有限積分法に関して、4次元時空間におけるサブグリッドおよび PML 吸収境界の接続手法について検討した。PML 吸収境界によって時空間有限積分法の定量的な精度検証が可能となった。時空間有限積分法に基づくサブグリッド法は従来法よりも高精度であることを示した。

**木村 翼 (松尾教授) 「メッシュ不整合な媒質境界を均質化処理する幾何マルチグリッド有限要素解析の研究」**

幾何マルチグリッド法と均質化法を用いる高速かつ高精度な有限要素解析手法を開発した。計算高速化に資する幾何マルチグリッド法には、解析対象の形状表現能力の面で課題がある。精度を損なうことなく不整合メッシュを許容する均質化法によりこの課題を解決した。

**新見 淳一 (松尾教授) 「移動物体を含む渦電流解析のための時空間有限要素法の開発」**

時空間で計算格子を構成する有限要素法を開発し、移動物体を含む渦電流解析に応用した。時空間要素と座標変換との関係を論じ、通常の有限要素渦電流解析の定式化法との相違点を明らかにした。提案手法により、電動機など運動領域を含む渦電流解析を行った。

**藤永 隆史 (松尾教授) 「ベクトルプレイモデルの磁気エネルギーに基づく構成と交流ヒステリシス特性表現への応用」**

磁束密度に対して平行な成分と垂直な成分に分解してプレイモデルを構成することで、異方性ヒステリシス特性の表現精度を改善するとともに、二次元磁気計測を要しないベクトルモデル構築法を開発した。また Cauer 回路表現を用いた交流ベクトルヒステリシスモデルを開発した。

## 工学研究科 電子工学専攻

### 温 一 凡 (掛谷准教授) 「La 置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合におけるテラヘルツ発振」

ビスマス系高温超伝導体テラヘルツ光源の多機能化を目指して、研究をおこなった。 $\text{Sr}^{2+}$  を  $\text{La}^{3+}$  に一部置換すると、キャリア量が減少するため、超伝導の異方性が高くなる。その結果、テラヘルツ発振を起こす条件が満たされやすくなり、素子作成のプロセスが簡略化された。また、発振周波数の上昇も観測された。

### 鶴 沢 旭 (掛谷准教授) 「テラヘルツ時間領域分光法を用いた 1212 型銅酸化物高温超伝導体の高周波伝導度に関する研究」

テラヘルツ時間領域分光法により、 $\text{LaAlO}_3$  基板上に育成した  $\text{Pb}1212$  および YBCO エピタキシャル膜のテラヘルツ領域交流伝導度を測定した。 $\text{Pb}1212$  については、超伝導の異方性が異なる試料について、超伝導転移温度以上で、有限の超伝導電子密度が測定される超伝導揺らぎが観測された。

### 入 場 紀 明 (白石教授) 「電界イオン顕微鏡像の動画像処理を用いた金属エミッタ上の有機分子吸着位置の分析」

有機溶媒中における電圧印加や真空蒸着法を用いて金属エミッタ上に有機分子を吸着させた試料を作製し、エミッタ上で分子が付着している領域を電界イオン顕微鏡により観察した。通常行われる表面の観察のみでなく、電界脱離により有機分子を表面から脱離させ、その都度現れる有機分子由来の輝点を画像処理で抽出、積算することで有機分子が分布する全領域を明らかにした。

### 藤 原 裕 史 (白石教授) 「スパッタ法における基板への粒子入射の異方性を利用したタングステン薄膜の配向制御の試み」

高周波マグネトロンスパッタ法において薄膜の結晶配向性が成膜位置のわずかな違いに依存する原因を解明するために、成膜に寄与する粒子の入射角度やエネルギーが結晶配向に及ぼす影響を調べた。ターゲット遮蔽板による反射粒子の入射制御、基板バイアスによる入射粒子エネルギー制御、傾斜基板による入射粒子方向制御などを通して、薄膜の配向制御に必要な知見を得た。

### 田 原 貴 之 (白石教授) 「シリコンスピン MOS トランジスタのデバイス物性の研究」

世界初のシリコンスピン MOS トランジスタの室温動作の成功をベースに、スピン MOS トランジスタのスピンチャンネルである非縮退シリコン中のスピンドリフト効果と出力信号との相関をチャンネルの伝導度に対するスケーリング則として系統的に理解した他、印加電界によるスピンドリフト速度の変調とその観測などのデバイス物性を精査した。

### 岩 井 亮 憲 (竹内教授) 「Enhanced Second-harmonic-wave Generation in Plasma-metamaterial Composite with Effective Negative Refractive Indexes」 (実効負屈折率を有したプラズマメタマテリアル複合体による高強度二次高調波生成)

負の巨視的透磁率を示すメタマテリアル構造内に、大電力マイクロ波を入射して負の誘電率を持つプラズマを生成して、両者の複合体を実験的に構成した。プラズマのみの場合と比較して、入射マイクロ波の 2 倍高調波成分が強く発生したが、その原因は屈折率が負となって誘電率を負に維持可能であることで説明できた。

**木原直也 (竹内教授) 「還元性大気圧プラズマを用いた光応答性銀粒子パターンの生成過程モデル化と検証」**

大気圧プラズマ中で還元性分子であるヒドラジンを生成し、それによる硝酸銀水溶液の還元処理によりフラクタル様の銀粒子パターンの析出を確認し、またそのパターンが赤外線領域で構造由来の吸収スペクトルを持つことを実験的に確認した。形成パターンは、数値計算モデルによる解析で良く説明された。

**浅田聡志 (木本教授) 「SiC バイポーラトランジスタの高性能化に向けた p 型 SiC の電気的特性および pn 接合におけるキャリア再結合の評価」**

SiC バイポーラトランジスタの性能を支配する少数キャリアの再結合過程とベース領域の電気的性質に関する基礎研究に取り組んだ。電流増幅率が表面再結合およびベース内の注入レベルの影響を大きく受けることを明らかにすると共に、p 型 SiC における Hall 散乱因子に関する新たな知見を得た。

**篠倉弘樹 (木本教授) 「フォーミングに二つのモードを示す Pt/NiO/Pt 素子における抵抗スイッチング特性」**

抵抗変化現象を用いた不揮発性メモリの基礎研究として、NiO 薄膜の抵抗スイッチング現象の基礎研究に取り組んだ。初期特性におけるフォーミング（電圧印加による最初の低抵抗化）現象に着目し、特定の酸素組成を有する NiO 薄膜において、量子ポイントコンタクトが形成されることを見出した。

**藤原寛朗 (木本教授) 「高温動作 IC を目指した半絶縁性 SiC 基板上相補型 JFET の作製」**

Si の限界を越える高温動作 IC の実現を目指して、SiC を用いた相補型 JFET を提案した。半絶縁性 SiC 基板にイオン注入することにより形成した n 型、p 型領域の電気的性質（電気的活性化率、移動度）が良好であること、および本プロセスで作製した SiC JFET が高温で動作することを実証した。

**山田恭輔 (木本教授) 「高耐圧 SiC PiN ダイオードの性能限界の検討およびキャリア寿命制御が特性に及ぼす影響の評価」**

10 kV 超級の高耐圧 SiC PiN ダイオードの設計、作製、および特性解析の研究に取り組んだ。シミュレーションにより SiC PiN ダイオードの性能限界を明らかにし、その物理的要因を考察した。また、キャリア寿命制御を施したダイオードを作製し、その静特性と動特性を解析して新たな知見を得た。

**黄雲飛 (山田教授) 「液中原子間力顕微鏡を用いた生体分子の構造観察と機能計測に関する研究」**

液中環境で動作する原子間力顕微鏡を用いて IgM 抗体分子および IgM 抗体 - 抗原複合体の高分解能観察に成功した。また、二本鎖 DNA を等間隔で連結した長方形 DNA オリガミにおいて、連結点間距離や観察溶液環境が DNA オリガミの幅と長さを与える影響を調べた。

**黄子玲 (山田教授) 「有機トランジスタにおける局所電気特性の温度依存性評価に関する研究」**

温度可変ケルビンプローブフォース顕微鏡により動作中の有機トランジスタの表面電位計測を行い、電極 / 有機薄膜界面およびグレイン境界における電位差の温度依存性から局所活性化エネルギーを導出した。また、探針直下の領域を局所加熱できるカンチレバーを用いた走査型熱ゲート顕微鏡を提案した。

**清水太一 (山田教授) 「デュアルプローブ原子間力顕微鏡を用いた有機半導体の局所電気特性評価」**

デュアルプローブ原子間力顕微鏡 (DP-AFM) を用いて、アルキル鎖が導入された有機半導体の塗布

成膜によって得られた高結晶性有機薄膜の電気特性評価を行った。DP-AFM の一方の探針により電圧印加および電流計測を行い、同時に別の探針により相関の表面電位差を計測し、分子層間の抵抗評価を行った。

#### 長谷川 俊 (山田教授)「原子間力顕微鏡による無機結晶表面の固液界面構造評価に関する研究」

原子間力顕微鏡を用いてアルカリハライド単結晶とその飽和水溶液界面における水和構造評価を行った。また、チタン酸ストロンチウムの固液界面における水和構造評価を紫外光照射の前後に行い、光触媒作用が固液界面構造に与える影響を議論した。

#### 熊本 恭介 (川上教授)「AlGa<sub>N</sub> 系量子井戸の高効率発光に向けた格子不整転位の導入箇所制御と光物性評価」

紫外発光素子として有望な AlGa<sub>N</sub> 量子井戸は通常 AlN 上に形成するため、両者の格子定数差に起因した不整転位が量子井戸に導入され、非発光中心として働く。AlGa<sub>N</sub> 緩衝層を導入することによって不整転位の発生位置を量子井戸から遠ざけることを提案し、発光の高効率化に成功した。

#### 塚本 真大 (川上教授)「フォトルミネッセンス法と過渡レンズ法による窒化物半導体のキャリア・熱ダイナミクスの直接観察」

フォトルミネッセンス法と過渡レンズ法を併用することにより GaN における非輻射過程を定量し、貫通転位が非輻射中心であることを明らかにした。また、近接場光学顕微鏡を用いることにより、InGa<sub>N</sub> 量子井戸におけるキャリアの空間分布と輻射・非輻射再結合の空間分布の相関を明らかにした。

#### 中島 嘉久 (川上教授)「深紫外顕微分光法を用いた AlGa<sub>N</sub>/AlN 量子井戸の光物性評価」

深紫外用に開発を進めてきた光学顕微鏡を用いて、室温における AlGa<sub>N</sub>/AlN 量子井戸からの発光を空間分解することに成功した。点欠陥が再結合過程に強い影響を与えることが明らかになった。空間分解能を高めるため、深紫外用近接場光学顕微鏡の構築に向けた要素技術の検討を行った。

#### 安田 大貴 (野田教授)「変調フォトニック結晶レーザにおけるビーム出射方向の電氣的制御に関する研究」

ワンチップで2次元的なビーム走査が可能なフォトニック結晶レーザデバイスを作製した。正方格子の格子点位置を周期的に変調した変調フォトニック結晶構造の設計を行い、分割した駆動電極の切り替えと電極への注入電流バランスの調節により離散的ならびに連続的なビーム走査を実証した。

#### 中川 遥之 (野田教授)「高 Q 値ナノ共振器およびその結合系の電氣的制御に関する研究」

チップ上に形成した複数のフォトニックナノ共振器の結合系に pin 構造やヒータを組み込むことで、電氣的制御によって共振器間で光を転送する構造を提案した。また、その構造を作製し、制御による屈折率の過渡的な変化を詳細に測定する事で、電氣的制御による光転送の実証に向けた指針を示した。

#### 前川 享平 (野田教授)「フォトニック結晶レーザの格子点立体形状制御による円偏光ビーム出射に関する研究」

フォトニック結晶レーザにおける、より自由度の高い偏光制御に向けた、格子点の立体形状設計の提案を行った。初期的な実証として、従来の設計では実現が困難な円偏光ビームを出射する格子点形状の設計を行った。さらに、デバイスを作製し、円偏光成分を含むビームを得ることに成功した。

**藤田 奨也 (野田教授) 「フォトニック結晶を有する超薄膜単結晶シリコン太陽電池に関する研究」**  
薄膜太陽電池の変換効率向上のため、フォトニック結晶構造を太陽電池に導入し、光吸収を増大させることを検討した。5 $\mu\text{m}$ 程度の非常に薄い結晶シリコンを用いた太陽電池の作製及び評価を行い、フォトニック結晶の導入によって、50 $\mu\text{m}$ の厚さに相当する光吸収が得られることを示した。

**山口 祐樹 (野田教授) 「SiCを用いた微小梁型光共振器に関する研究」**

SiCを用いたフォトニック結晶ナノ共振器における損失の主要因が構造作製時における不完全性ではなく光吸収損失によることを明らかにした。さらに、この損失を回避した微小梁型光共振器の提案、設計及び作製を行い、Q値2万をもつ共振器作製に成功した。

**梶原 翔 (北野教授) 「金属 Lieb 格子における擬表面プラズモンのフラットバンドの観測」**

Lieb 格子を形成する平面金属構造上に存在する擬表面プラズモンの分散特性を、通常の透過測定と全反射減衰分光法によって測定した。テラヘルツ領域の実験により、広い波数範囲で分散関係が平坦になるフラットバンド現象を確認した。

**土肥 慎爾 (北野教授) 「導電率変調を用いたメタマテリアルによる電磁波の保存・再生」**

導電率変調素子を導入したメタマテリアルによって、電磁波を保存及び再生する方法を考案し、実験的検証を行った。電磁界解析による電磁波パルスの完全保存・再生の実証と、マイクロ波領域における電磁波の部分保存・再生の実験検証を実現した。

**西田 圭佑 (北野教授) 「奇数同位体 Ba<sup>+</sup> のレーザー冷却のための光源開発」**

Ba<sup>+</sup>の奇数同位体は複雑な超微細構造をもつものの、電場、磁場に対して鈍感な遷移をもち、光時計の基準として有望である。超微細構造間の光ポンピングを避けるため、合計5台のレーザーを準備し、単一の奇数同位体 Ba<sup>+</sup>のトラップとレーザー冷却に成功した。

**宮地 孝輔 (北野教授) 「運動する連続体媒質中における電磁場の運動量の微分幾何学による定式化」**

微分幾何学を用いて古典電磁気を再定式化した。共変な記述のため電磁量の変換性が明確になり、相對論によることなく運動媒質中の構成方程式を導出できる。また、物質中における電磁場の運動量を幾何学的観点から解析し、対立する2つの定義の違いについて考察した。

## 光・電子理工学教育研究センター

**上田 弘貴 (高岡教授) 「イオン液体 EMIM-BF<sub>4</sub> イオンビームを用いた二次イオン質量分析に関する研究」**

イオン液体 EMIM-BF<sub>4</sub> からイオンビームを形成し、固体表面の低損傷エッチングと二次イオン放出の高収率化について検討した。BF<sub>4</sub><sup>-</sup> 負イオンビームは絶縁体を殆ど帯電させることなくスパッタすると共に、高い二次イオン収率を示すことを明らかとした。

**織田 啓佑 (高岡教授) 「クラスターイオンビーム誘起発光スペクトルに関する研究」**

クラスターイオンビームを用いた半導体加工時のオンラインモニタリングや反応メカニズムの研究への応用が期待される、クラスターイオンビーム誘起発光スペクトルを測定した。固体表面に衝突するクラスターイオンおよび衝突された固体試料に由来する発光が観測された。

### 高 文 菲 (高岡教授) 「酸素クラスターイオンビーム援用蒸着による有機薄膜の作製と応用に関する研究」

TEOSの真空蒸着を酸素クラスターイオンビームの照射下で行なうことにより、水蒸気透過率の低い有機薄膜の作製を試みた。その結果、室温にてSi-O-C薄膜が形成され、通常のカパリアフィルムに匹敵する水蒸気透過率であることを示した。

### 藤 田 朗 人 (高岡教授) 「真空蒸着法を用いた不飽和脂肪酸中での金ナノ粒子の合成に関する研究」

蒸気圧の低い不飽和脂肪酸を基板として金を真空蒸着することで金ナノ粒子を合成し、その物性と形成メカニズムを検討した。その結果、蒸着後の溶媒の酸化により金ナノ粒子が分散することを明らかとし、4 nm前後の単分散な金ナノ粒子が得られることを示した。

### 星 出 優 輝 (高岡教授) 「イオン液体 EMIM-DCA イオンビームの生成と表面処理応用に関する研究」

イオン液体 EMIM-DCA からイオンビームを形成し、固体表面の低損傷エッチングと窒化炭素薄膜形成について検討した。その結果、Si表面を低損傷かつ高速にスパッタリングされることを明らかとし、アモルファス窒化炭素薄膜の形成を実証した。

### 北 島 雅 士 (藤田教授) 「コランダム構造酸化インジウム薄膜の諸特性にアニール処理が及ぼす影響」

広いバンドギャップ (3.7 eV) を持つコランダム構造  $\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜の電子デバイス応用を目指し、キャリアガスへのオゾン導入とポストアニールにより酸素欠陥の低減と移動度の向上を達成し、ドレイン電流の明確な飽和特性を持ち、オンオフ比  $10^5$  の MOSFET を実証した。電界効果移動度は  $187 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  と大きかった。

### 高 木 良 輔 (藤田教授) 「燃料電池金属セパレータ応用を目指した高導電性高耐食性酸化膜に関する研究」

固体高分子燃料電池 (PEFC) に用いる SUS 製セパレータ開発を目指し、導電性と耐食性に優れた  $\text{SnO}_2$  コーティング膜の大気下成膜を達成した。PEFC として 750h 以上の連続発電を実証し、今後 SUS/ $\text{SnO}_2$  界面の制御により実用レベルの SUS 製セパレータが実現できることを示した。

## 情報学研究科 知能情報学専攻

### 盧 元 梅 (黒橋教授) 「Korean-to-Chinese Technical Term Translation using Chinese Character Knowledge」 (漢字知識を利用した韓中専門用語翻訳)

韓国語には中国語由来の漢字語が数多く存在するが、ハングルと漢字には対応関係があり、文字の置き換えにより中国語に翻訳できる。本研究ではハングルと漢字のマッピングテーブルを構築し、いくつかの情報を利用して韓国語専門用語の中国語への翻訳を行った。

### 栗 村 誉 (黒橋教授) 「ユーザのライフログに対する健康アドバイス自動生成システムの構築」

高齢化社会を迎える先進国では、近い将来国民が自らの健康を能動的に管理していくことが求められる。本研究では、ユーザの自然言語によるライフログの書き込みを解析し、中間表現を利用することで適切なアドバイスを生成するシステムの構築を行った。

**岸 本 裕 大 (黒橋教授) 「大規模コーパスからの因果関係知識の自動抽出と談話関係解析への適用」**  
人間が談話関係を理解する際、“だから”などの表層情報だけでなく、談話単位間に含まれる因果関係も利用している。本研究では、大規模 Web コーパスから因果関係知識を抽出し、談話関係の自動解析に適用することで談話関係解析の精度向上を試みた。

**沈 昱 (黒橋教授) 「Cross-language Projection of Dependency Trees for Tree-to-Tree Machine Translation」 (機械翻訳における依存構造木の言語間プロジェクション)**  
Tree-to-tree の機械翻訳モデルは原言語側と目的言語側の両方で高精度な構文解析が求められる。本研究では、構文解析の精度が高い言語側から精度が低い言語側に依存構文木をプロジェクトする方法を提案し、翻訳実験でその有効性を確認した。

**Arseny Tolmachev (黒橋教授) 「Automatic Extraction of Diverse and High-quality Example Sentences from Large Scale Corpora for Language Learning」 (外国語学習のための大規模コーパスからの多様かつ高品質な例文の自動抽出)**  
外国語の学習には例文が不可欠である。多様性と適切な難易度の観点から例文を自動抽出するシステムを提案し実装した。日本語学習者と日本語を母語とする日本語教師によりシステムの評価を行い、提案手法の有効性を確認した。

**石 原 裕 之 (松山教授) 「屈折面における光線空間の幾何光学的・波動光学的変化を用いた透明物体の 3 次元形状復元」**  
本論文は任意の屈折面における光線空間の幾何光学的変化および波動光学的変化から透明物体の 3 次元形状復元を単一カメラで実現することを目的としたものであり、屈折と偏光状態の整合性をともに満たすような光路の奥行きを各画素について推定する手法を提案した。

**柏 野 孝 士 (松山教授) 「複合鏡による相互干渉を考慮した単一深度カメラ全周囲 3 次元形状計測システム」**  
本論文は位相差検出に基づく ToF カメラと複合鏡を用いた全周囲 3 次元形状計測を目的として、振幅変調された照射光の直接波・反射波間の相互干渉に起因する計測誤りの訂正法を考案するとともに、鏡のキャリブレーションおよび物体の全周囲 3 次元形状計測手法を提案した。

**兼 近 悠 (松山教授) 「状態変化を誘発する映像刺激を用いた魚群のインタラクション解析」**  
カメラで計測した水槽内の魚群の軌跡データから群れの相互作用解析を行う枠組みとして、魚群への映像提示を用いて「群がり」から「群泳」への状態変化を誘発した際の、群れの相互作用ネットワークの変化を、各個体の行動モデルを通じて解析する手法を提案した。

**小 林 直 広 (松山教授) 「対話的働きかけに対する反応分析のための動的な表情構造記述」**  
本論文は e ラーニングの対話的支援システムを想定し、音声による働きかけを通じて受講者の理解状況を推定する際の、表情反応の動的構造解析を目的としたものであり、顔部位の動きを区間単位でクラスタリングすることで多様な表情に適用できる表情記述獲得法を提案した。

**松 井 一 弘 (松山教授) 「オンデマンド型電力制御システムの設計」**  
本論文では、多種多様な家電や電源を扱う汎用的な電力管理の枠組みを提案した。ユーザの操作や自

律動作によって動的に変化する機器をエージェントとしてモデル化し、各家電、電源の電力割当てをエージェント間の協調動作により決定するプロトコルを設計した。

## 情報学研究科 通信情報システム専攻

**施 肖 亮 (原田教授) 「Study of Transmission Performance of User Collaboration Links in the Presence of Interference」 (干渉存在下におけるユーザ共用リンクの伝送特性に関する研究)**

端末が共同して受信信号処理を行うシステムにおいて必須となる端末間連携通信リンクを簡易にモデル化することに取り組んだ。伝送実験結果に基づいて構築した提案モデルの妥当性を実験結果と詳細に比較することによって明らかにした。

**奥 原 大 智 (守倉教授) 「高密度無線 LAN のための送信電力・キャリア検出しきい値反比例設定法」**

高密度無線 LAN 環境において、空間的チャネル再利用を促進させる手段である送信電力及びキャリア検出しきい値反比例設定法の検討を行った。数値評価及び実験により、本設定法を用いることでスループットが増加し、無線 LAN 端末間で不公平性が発生しないことを明らかにした。

**坂 口 晃 一 (守倉教授) 「Radio Resource Allocation for Wireless Networks with Microwave Power Transmission and Full-duplex Transmission」 (マイクロ波給電及び全二重通信を用いる無線ネットワークのためのリソース割り当て法)**

無線センサネットワークにおいて、複数給電源による無線センサ端末への給電法の実現可能性を実験により明らかにした。また、全二重通信と半二重通信が混在する環境において、ネットワークスループットの向上を目指すチャネル割り当て法をゲーム理論を用いて定式化を行った。

**長 嶋 圭 太 (守倉教授) 「高密度無線 LAN のためのカバレッジ最適化法」**

無線 LAN 基地局が自律的に送信電力、無線チャネルを変更し、カバレッジを最適化する手法をゲーム理論に基づき提案した。計算機シミュレーション及び実験により提案方式がカバレッジホールの発生を抑えつつもセルオーバーラップを縮小できることを確認した。

**平 田 龍 一 (守倉教授) 「無線 LAN 稠密環境でのスループット改善に向けたランダム AIFSN 方式の研究」**

無線 LAN 稠密環境での TCP 通信におけるスループットおよび QoS 向上のためのランダム AIFSN 方式を提案し、提案方式のスループットおよび QoS 改善効果をシミュレーションにより評価した。また、市販の通信機器にランダム AIFSN 方式を実装し、動作していることを確認した。

**山 田 太 郎 (守倉教授) 「ミリ波通信オフロードによるマルチバンド無線 LAN スループットの改善」**

IEEE 802.11ad 準拠ミリ波通信機の特性を実験的に明らかにした。また、いくつかのミリ波無線 LAN 使用の場面を仮定し、それぞれに適したマルチバンド無線 LAN スループット改善のための方式の提案を行った。

**石 原 健 司 (新熊准教授) 「エージェントモデルを用いた通信品質制御に関する研究」**

通信ユーザの利用形態をモデル化し、利用形態に応じて帯域を制御する方式を提案した。プログレッ

シブダウンロード型映像配信を想定した計算機シミュレーションを行ない、提案方式を用いることでユーザ全体の平均サービス品質を向上できることを示した。

#### 河合直人（新熊准教授）「モバイル環境におけるネットワークグラフ型のコンテキストモデルによる行動予測に関する研究」

通信ユーザ間の通信機会をリンクとして形成されるネットワークにおいて、参照信号との相関やスペクトルのエネルギー分布を用いて高い時間特性を有するリンクを抽出し、それらのリンクのみを用いて新規に発生する通信機会を精度高く予測できることを示した。

#### 高見文隆（新熊准教授）「DTNにおける輻輳状態を考慮したバッファ制御方式」

DTNにおいて、網内のバッファが不足した輻輳状態においても、通信により網内から消失するデータ数を削減することでデータ到達率を向上させるデータ交換方式を提案した。様々なシミュレーション条件における評価により提案方式の有効性を示した。

#### 竹本大輝（新熊准教授）「センサクラウドのための自律移動センサによるデータ収集手法」

センサクラウドによるデータ収集時に、類似データが削減されるようセンサの送信確率を制御することで、データ収集コスト対カバー率を向上させる手法を提案した。計算機シミュレーションにより提案手法の性能を評価しその有効性を示した。

#### 中原正隆（新熊准教授）「コミュニティに基づくネットワーク仮想化とその応用の研究」

ネットワーク仮想化技術を用い、社会的に近いユーザにより形成されるコミュニティに対し独立なネットワーク空間を提供することで、ネットワークレベルでのプライバシー制御を可能とするアーキテクチャを提案した。数値評価により提案手法の有効性を示した。

#### 高垣勇登（佐藤（高）教授）「高周波ノイズ伝搬経路特定と対策に向けたDC-DCコンバータ回路のモデル化手法」

直流電圧変換器起因の高周波ノイズを表現するモデル化手法を提案した。スイッチング回路部によるノイズ発生と基板回路部での伝達特性を等価回路表現することでリングングノイズの広帯域な模擬を可能とし、ノイズ伝搬経路の特定と対策に有効に活用できることを確認した。

#### 鎌苅竜也（小野寺教授）「極低電圧動作におけるラッチ回路の動作安定性解析手法」

トランジスタが弱反転状態となる極めて低い電源電圧において、ラッチ回路が正しく値を保持するための条件を解析的に求めた。また、任意の電圧に対する歩留まり推定手法を示し、テストチップによる実測結果との比較により開発手法の有効性を示した。

#### 塩見準（小野寺教授）「しきい値近傍電圧動作のための解析的性能予測を用いた集積回路設計手法」

低電圧動作するCMOS回路の性能ばらつきをモデル化し、要求動作速度で回路が動作する確率である性能歩留まりを解析的に求めた。性能歩留まりを高める回路構造を検討し、従来型SRAMに対し同等の性能歩留まりと2倍以上のエネルギー効率を有す低電圧オンチップメモリ構造を解明した。

**藤原将倫 (小野寺教授) 「多チャンネル実装時のノイズ低減を目指した差動トランスインピーダンスアンプ」**

光通信の高速化に向けた受信回路並列実装において問題となるノイズを低減する回路について検討した。電源・グラウンドのノイズが性能に強く影響することを明らかにし、影響を低減する差動回路を提案することでノイズの影響を10分の1に低減することに成功した。

**秋山大地 (佐藤 (亨) 教授) 「超広帯域レーダによるテクスチャ法を用いた複数運動目標の分離」**

UWB ドップラーレーダを用いて、瞬時のデータから歩行者の速度を推定する手法としてテクスチャ法がある。これを同時同距離に複数の歩行者が存在する場合に適用できるように拡張し、その特性を数値シミュレーションにより検証して有効性を確認した。

**園部達也 (佐藤 (亨) 教授) 「光コヒーレント検波における搬送波位相 / 周波数オフセット推定へ適用するカルマンフィルタのパラメータ設定」**

光コヒーレント受信機において、カルマンフィルタを利用した搬送波位相 / 周波数オフセット推定法を提案した。補償後の受信特性についてシミュレーション評価を行い、その有効性を検証した。さらに提案手法におけるサイクルスリップ発生の原因を特定し抑制法を提案した。

**情報学研究科 システム科学専攻****大月 龍 (石井教授) 「評価値推定の曖昧さを考慮に入れた確率的探索方策の提案」**

木探索法の一種であるモンテカルロ木探索は、各ノードの評価値を予め必要とせず、終端ノードの探索に基づき評価値を更新する。しかし、更新される各ノードの評価値の信頼度を考慮しない。そこで、評価値の不確実性を考慮することで効率化した探索手法を提案した。

**櫻井俊輔 (石井教授) 「逆強化学習における学習過程データの利用」**

逆強化学習は、対象エージェントの状態行動履歴からそのエージェントの報酬関数を推定する枠組みである。しかし、従来法は学習後の状態行動履歴しか用いていなかった。本研究では学習後だけでなく学習中の状態行動履歴を利用した新しい逆強化学習手法を提案した。

**蘇 徳 帥 (石井教授) 「Sparse VARX Model with Kalman-smoother and Its Application to Blood Chemical Analysis」 (スパース VARX モデルとカルマン smoother による血中分子濃度の解析)**

ヒト血中生化学物質の不規則間隔時系列データから生体内代謝システムの個人差を検出するため、カルマン smoother とスパース VARX モデルを組み合わせたシステム同定法を提案した。提案手法により、被験者間個人差を表すパラメタのスパースな構造を発見した。

**竹村 葉子 (石井教授) 「マウスメゾスケール神経回路の配線効率について」**

マウスのメゾコネクティクスデータに基づき、領野間の結合構造を保つ条件のもとで、領野配置を様々な変化させて配線コストを比較した。実際の配置が最適ではないこと、主にハブ度・オーソリティー度の高い領野によって配線コストが生じていることが分かった。

**白 定 勳 (石井教授) 「Descriptive, Generative, and Hybrid Approaches for Neural Connectivity Inference from Neural Activity Data」 (神経活動データからの神経結合性推定における記述統計、生成モデル、およびその統合によるアプローチ)**

多数の神経細胞の活動を記録した大規模神経活動データをもとにした神経結合性の高速な推定を目的とし、記述統計に基づく結合の存在の識別後に、神経活動の生成モデルに基づく各結合の強度推定を行うハイブリッドアプローチを提案し、有効性を確認した。

**宮 戸 岳 (石井教授) 「分布の局所平滑化による正則化」**

回帰、分類問題では、しばしばモデルの過学習を防ぐために正則化を行う。本研究ではモデルの出力分布を訓練データサンプル近傍で滑らかにする正則化を新しく提案し、その正則化項を尤度項に加える事で汎化性能が向上することを示した。

**麻 生 晋 併 (松田教授) 「下顎骨再建術における腭骨移植計画の自動化に関する研究」**

下顎骨再建における腭骨移植工程の定量化と術前計画の自動化を目指し、手術前後の下顎の形状と対称性を定量する評価関数に基づく再建計画モデルを提案した。症例 CT データを用いた実験を通して、医師の計画に近い再建計画が算出可能であることを確認した。

**市 原 光 基 (松田教授) 「局所識別可能な画素パターンを用いた Tagging MRI 法の提案」**

生体組織に低輝度の空間パターンを印加して心臓の壁運動を追跡する Tagging MRI 法に対し、従来の単純な周期的パターンではなく局所識別可能なパターンを用いる手法を提案し、実装条件や局所識別能を考慮した生成手法について検討を加え、提案手法の有効性および問題点を実験的に確認した。

**妹 尾 昌 幸 (松田教授) 「実物体を対象とした手指による押し込み及びなぞり操作に関する定量分析」**

実物体に対する手指操作の定量的理解を目指して、指先感覚を阻害しない手指操作計測システムを構築し、弾性体に対する押し込みとなぞりを指標化する特徴量を選定した。被験者実験を通して、求めた特徴量に基づく線形決定境界が手指操作の識別に有効であることを確認した。

**山 崎 貴 史 (松田教授) 「心筋収縮力を考慮した心拍出現象の流体構造連成シミュレーション」**

心筋細胞の自発収縮を考慮した左心室壁応力解析モデルにより計算される左心室壁内面の変位を境界条件として用いた左心室腔内の血流についての簡易的な流体解析を行い、心室内血流のシミュレーションにおいて心壁の能動運動を考慮することが重要であることを確認した。

**エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻**

**Yongxin Wang (下田教授) 「A Proposal and Evaluation of Presentation Methods on AR-based Support System for Decommissioning of Nuclear Power Plants」 (AR を用いた原子力プラント解体作業支援システムの情報提示手法の提案と評価)**

AR を用いた作業支援システムにおいて、どのような情報提示手法が正確かつ容易に仮想物体と実物体の間の位置関係を示せるかを模索するために、直線提示法、グリッドモデル法、強制移動法を提案・実装し、被験者実験によりそれらを比較した。

**金川 英弘 (下田教授) 「集中状態に着目した知的生産性評価の検討」**

集中状態に着目した知的生産性を検討するため、作業状態への遷移確率、状態遷移に要する時間、認知タスク1問の解答に必要なステップ数を指標として、環境条件、覚醒度、モチベーションが異なる場合においてどのような差が見られるのかを調べた。

**古田 真也 (下田教授) 「冬季における室内気流環境が知的集中に及ぼす影響の実験研究」**

比較的室内温度が低く、風に当たることが好ましくない冬季において、作業間に定期的に休息を取り、気分転換を促す気流環境を提案した。気流を曝露している間に休息を取ることで、疲労感の軽減や集中度・パフォーマンスの向上が期待できることを示した。

**上東 大祐 (下田教授) 「執務環境変化による知的生産性変化の分析フレームワークの研究」**

執務環境変化による知的生産性変化のメカニズムを解明するため、異なる専門知識が必要な手法を体系的に結びつける手法を、知的生産性変化の分析フレームワークとして提案し、ケーススタディからその有用性と課題を評価した。

**藤井 巧哉 (下田教授) 「An Auto-multiscopic 3D Display using Light Diffusion within 3-dimensionally positioned Micro Regions」 (3次元配置した微小領域での光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイの開発)**

3次元配置した微小領域での光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイを開発した。本ディスプレイは、裸眼で立体視が可能であり、視覚疲労や3D酔いを誘発しにくい。さらに、複数の観察者が自由な視点から同時に観察できる。

**徳丸 博紀 (下田教授) 「線分特徴を用いた絞り込み処理によるリローカリゼーション手法の開発」**

線分特徴を利用した絞り込み処理によるリローカリゼーション手法を開発した。本手法では負荷の小さい処理から順に段階的に処理を行い、最後に計算負荷は大きい精度が高い処理を適用することで、全体として処理時間が短く精度が高い手法を実現した。

**エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻****寺田 遼平 (中村(祐)教授) 「バーチャル・ケーシング法を用いた HINT2 コードによる自由境界 MHD 平衡解析」**

ヘリカル型プラズマの MHD 平衡を磁気面の存在を仮定することなく計算できる三次元 MHD 平衡コードとして開発された HINT2 コードを、トカマクプラズマにおける非軸対称性の影響の解析に適用するために、計算領域境界における境界条件の改善を試みた。本研究ではバーチャル・ケーシング法を用いて境界条件を更新することで、HINT2 を用いたトカマク平衡計算が改善されることを示した。

**堀田 海斗 (中村(祐)教授) 「反復法によるトカマクプラズマの MHD 平衡計算」**

既存コードの問題点を解消した新しい MHD 平衡コードを反復法に基づき開発することを目的とし、その初期段階として軸対称トカマクを対象とした2次元コードの開発を行った。このコードは入れ子状の磁気面の存在を仮定せずに平衡計算を行うため、MHD 平衡方程式を直接、反復法により解く。ポロイダル磁場制御アルゴリズムにより、トカマクのダイバータ配位に対する平衡計算が可能となった。

## エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

### 永澤 良之 (土井教授) 「低コスト $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材開発に向けた Nd:YAG レーザ蒸着法による Nb ドープ $\text{SrTiO}_3$ 導電性中間層の作製」

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  高温超伝導線材の高性能・低コスト化のために必要な導電性酸化物バッファ層の開発を行った。Nb ドープ量および成膜条件を変化させた単結晶薄膜試料を作製し、Nb ドープ量および成膜条件が抵抗率に与える影響を明らかにした。

### 橋本 真幸 (土井教授) 「 $\{100\}\langle 001\rangle$ 集合組織 Cu テープ上に Nb ドープ $\text{SrTiO}_3$ を導電性中間層として配置した新規構造 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材の開発」

$\{100\}\langle 001\rangle$  集合組織 Cu テープ上に Nb ドープ  $\text{SrTiO}_3$  をエピタキシャル成長させ、その上に  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  超伝導薄膜をエピタキシャル成長させる新規な構造により、高性能低コストな高温超伝導線材の開発を試みた。中間層および超伝導層の膜厚および成膜条件の最適化を行い、新規構造においても従来構造と同等の高い臨界電流密度 ( $2.6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  at 77 K) が得られることを実証した。

### 竹原 寛人 (土井教授) 「ポストアニールおよび Ni 導入による電子ビーム蒸着 $\text{MgB}_2$ 超伝導薄膜の高臨界電流密度化」

$\text{MgB}_2$  薄膜の高臨界電流密度化を目指して、ポストアニールによる結晶性向上、および Ni 微細結晶の分散析出による量子化磁束線ピン止め点の導入を試みた。超高真空中のポストアニールにより超伝導臨界温度および臨界電流密度が向上することを明らかにした。また Ni 導入はピン止め効果は発揮するもののマトリックス  $\text{MgB}_2$  超伝導相の臨界温度を下げる為、実用的には効果が無いことを明らかにした。

### 藤岡 祥太郎 (土井教授) 「双晶組織を含む $(\text{Y}_{1-x}\text{Er}_x)$ $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超伝導体の二軸磁場配向」

磁場配向法を用いて 3 軸結晶配向を実現するために好ましい組成の探索を実施し、 $(\text{Y}_{1-x}\text{Er}_x)$   $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  固溶系適切な組成と磁場配向プロセスパラメータの組み合わせを明らかにした。また、超伝導物質粉末のスラリーに磁場配向法を適用することで、3 軸配向  $(\text{Y}_{0.5}\text{Er}_{0.5})$   $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  厚膜の作製に成功した。

### 茂田 宏樹 (白井教授) 「液体水素循環ループを用いた強制対流熱伝達試験及び液体水素冷却 $\text{MgB}_2$ 超伝導線材の過電流特性に関する数値解析」

液体水素冷却超伝導機器の開発を目指して、その冷却システムの基礎コンポーネントの開発として液体水素循環ループを開発製作し、循環運転特性試験を実施した。またこれを用いて、液体水素熱伝達特性試験および  $\text{MgB}_2$  超伝導線材の通電特性試験を行った。

### 西口 宏治 (白井教授) 「システム同定による配電システムモデルの実験的検討及び新幹線き電システムの安定度解析に関する研究」

半導体電力変換器を用いた能動的負荷や分散電源などを含んだ配電システムの動的モデルをシステムデータからシステム同定の手法を用いて構築し、その妥当性を検討した。また、新幹線のき電システムにおける電圧の安定性を評価するモデルを構築し、安定度解析を行った。

**張 馳 (白井教授) 「Comparison of Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter and Superconducting Coil in DC Power System」 (直流系統における変圧器磁気遮蔽型超伝導限流器と超伝導コイルの限流特性の解析)**

直流送電系統における直流リアクトルの代わりに、変圧器磁気遮蔽型超伝導限流器を適用することを提案し、シミュレーションおよび基礎実験による検討を行った。通常運用時には直流リアクトルとして動作し、直流系の事故時には限流器として働くことを確認した。

**源 将 (白井教授) 「蓄電池を含む風力・潮力ハイブリッド発電システムにおける出力変動補償の検討」**

風力発電と潮力発電を一体化した発電システムに蓄電池システムを導入し、風力発電の出力変動の変動周波数によって、出力変動補償を分担するシステムを、シミュレーションおよび模擬実験で検討した。すなわち比較的緩やかな変動は、潮力発電機によって補償し、残りの変動成分を蓄電池システムで補償する。

**吉 川 正 基 (白井教授) 「高温超電導 MRI マグネットの高均一磁場制御のための基礎実験」**

高い空間磁場均一性と磁場安定性が要求される MRI 用マグネットを、高温超電導線材で実現するための励磁電源の開発、高精度磁場計測およびその制御システムを提案し、実験によって実証した。

**比 嘉 大 輔 (白井教授) 「Basic Study for Improvement of Recovery Characteristics of Superconducting Fault Current Limiter」 (液体窒素冷却超電導限流器の復帰特性向上に向けた基礎検討)**

高温超電導テープ線材を用いた抵抗型超電導限流器について、系統保護継電器に対応できる高速復帰特性を実現するため、線材表面を工夫することで冷却特性を大幅に改善できることを実験的に示した。

## エネルギー理工学研究所

**鹿 島 良 介 (長崎教授) 「慣性静電閉じ込めプラズマ計測のための静電プローブシステムの開発と浮遊電位分布計測」**

慣性静電閉じ込め装置性能に影響するとされるプラズマ中の電位分布形成を、開発した静電プローブシステムにより評価した。従来法では計測できなかった高電位にある球殻陰極内の計測を可能とする装置構成を適用し、浮遊電位分布の放電電流・電圧やガス種への依存性を明らかにした。

**岸 川 英 樹 (長崎教授) 「ヘリオトロン J における Ka バンドマイクロ波反射計を用いた電子密度揺動 2 点同時計測」**

ヘリオトロン J において電子密度揺動相関を計測するため、Ka バンドマイクロ波反射システムを 2 周波数計測へと拡張した。閉じ込め改善モードへの遷移後に揺動強度が抑制されるとともに、遷移後に径方向相互相関の周波数幅が 2 倍程度に広がることを明らかにした。

**野 儀 武 志 (長崎教授) 「電子銃陰極近傍の空間電荷効果による径方向位相空間分布の自己線形化」**

極低エミッタンス電子ビーム生成への利用が期待される径方向位相空間分布の自己線形化現象を数値シミュレーションで解析した。陰極の極近傍での鏡像効果を含む非線形な空間電荷力と、これに起因す

る径方向電流密度分布の非一様性が自己線形化の要因となっていることを解明した。

#### 小 田 大 輔 (水内教授) 「高速カメラと静電プローブを用いたヘリオトロンJにおけるダイバータプラズマ挙動の研究」

ヘリオトロンJダイバータプラズマ分布やその揺動を調べ、プラズマ分布の時間変化の要因が、プラズマ電流による周辺磁場構造変化に加え、加熱による周辺プラズマ分布変化にもあることを示唆した。またダイバータプラズマ揺動が、トロイダル方向に同期している可能性を初めて示した。

#### 中 野 裕一郎 (水内教授) 「冷陰極放電を用いたヘリオトロンJプラズマ周辺中性粒子密度の高時間分解計測法の開発」

ヘリオトロンJで予測される早い時間スケールでのプラズマ周辺部の中性粒子密度変化を実測する手法として、プラズマ閉じ込め磁場を利用した冷陰極放電による発光を利用した中性粒子密度高時間分解計測法を提案し、基礎実験によりその有用性と実機実装での問題点を明らかにした。

#### 松 田 啓 嗣 (水内教授) 「高密度プラズマを目指したヘリオトロンJ給気最適化実験における密度揺動分布解析」

高強度ガスパフ法を用いた高密度プラズマ生成実験において、周辺部で8-17kHzのバースト様密度揺動を観測した。バーストが消える時刻で周辺部密度勾配の上昇およびH $\alpha$ 線発光強度の低下が見られ、閉じ込め改善時の輸送障壁形成の動的変化を明らかにした。

#### 村 上 弘一郎 (岡田准教授) 「ヘリオトロンJにおける熱いプラズマモデルによる3次元波動解析コードを用いたイオンサイクロトロン周波数帯加熱解析」

3次元波動解析コードTASK/WMをヘリオトロンJプラズマに適用し、熱いプラズマモデルを用いた。ICRF加熱時の波動伝播および吸収に対する少数イオン比等の依存性を調べ、少数イオン比の増加による波動伝播や吸収パワー分布の変化を明らかにした。

#### 神 野 洋 介 (岡田准教授) 「モンテカルロ法を用いたイオンサイクロトロン周波数帯加熱時におけるヘリオトロンJプラズマ中の高速イオンの磁場配位依存性解析」

3次元磁場配位であるヘリオトロンJプラズマの高周波加熱解析のためにモンテカルロ法を用いて、磁場配位等による高速イオン生成・閉じ込めについて解析した結果、生成されるテール部分の配位依存性についての知見を得、さらに実験値との比較・検討を行った。

#### 塚 崎 僚 (門准教授) 「低分散・高スループット可視分光計測システムを用いたヘリオトロンJプラズマの分光診断」

障害となる強い輝線成分を除去可能な空間フィルタを備えた可視分光システムを開発し、ヘリオトロンJのヘリウム含有プラズマを計測した。衝突輻射モデルによるパラメータ推定により、本システムによる電子温度・密度の時間発展計測が可能であることが示唆された。

## 生存圏研究所

#### 万 城 孝 弘 (山本教授) 「MUレーダー実時間アダプティブクラッター抑圧システムの開発」

大気レーダー観測において、しばしばクラッターエコー(山や建物からのエコー)が問題となること

がある。本研究では、MU レーダーに対して、ノルム・方向拘束付電力最小化 (NC-DCMP) 法を用いてクラッター抑圧する実時間処理システムを開発した。

**矢野 謙也 (山本教授) 「ドップラーライダーと高分解能数値モデルによる都市の極端気象メカニズムに関する研究」**

局地的豪雨には、地表付近の湿った空気の収束が重要な役割を果たしている。本研究ではドップラーライダーを超高層ビルの屋上に設置し、都心における水平風を連続観測した。さらに非静力学気象予報モデルにライダーデータを同化し、その効果を検証した。

**鈴木 翔大 (山本教授) 「GPS-TEC 観測による電離圏リアルタイムトモグラフィの開発」**

電離圏電子分布のリアルタイム情報は、衛星航法の計測誤差補正等に必要とされる。本研究では、GEONET を利用したトモグラフィにより、電離圏 3次元リアルタイム構造解析システムを開発した。2016年3月から、電子航法研究所にて実運用されている。

**竹田 悠二 (津田教授) 「稠密 GNSS 受信ネットワークによるリアルタイム可降水量測定に関する研究」**

GNSS (全球測位衛星システム) の電波について、大気圏と電離圏における伝搬遅延を水平間隔 1-2 km の超稠密受信ネットワークで測定し、水蒸気と電子密度の変動特性を研究した。特に、中規模電離層擾乱にともなう電子密度の時間・空間変動を明らかにした。

**岡谷 良和 (津田教授) 「多波長分光検出器を用いた気温計測用紫外域ラマンライダーに関する研究」**

空気分子の回転ラマン散乱スペクトルの検出を基礎とした、ラマンライダー手法による気温推定精度を評価した。多波長分光器の各チャンネル間の受光効率を補正するため、標準光源を用いた校正手法を新たに提案して検証実験を行った。

**大西 啓介 (山川教授) 「波動粒子相互作用直接観測システムにおける粒子検出回路の小型化に関する研究」**

宇宙プラズマ中の波動粒子相互作用を観測するために、プラズマ波動観測器にプラズマ粒子センサーの出力を入力する高速アンプを ASIC 内に実現し、数 mm 角の大きさでかつナノ秒の粒子検出パルス立ち上がりを捕捉できるデバイスの開発に成功した。

**岩永 直也 (山川教授) 「スペースデブリの軌道上光学観測に関する研究」**

人工衛星に搭載した光学センサによる微小スペースデブリ (宇宙ごみ) の観測可能性を明らかにするために、光学センサの基本仕様、人工衛星の投入軌道の概念設計を行い、10 cm 前後のスペースデブリの観測可能性を明らかにした。

**増成 一樹 (山川教授) 「地球周辺電磁場を考慮した微小スペースデブリの軌道推移に関する研究」**

直径 10 cm 以下のスペースデブリの挙動を予測するために、従来は考慮されていなかった地球周辺電磁場が帯電したスペースデブリの軌道に与える影響を、数値シミュレーションにより解析することで、デブリの軌道要素の変動の傾向を明らかにした。

#### 後藤 宏明 (篠原教授) 「自動車エンジンルーム内ワイヤレスセンサシステムのマイクロ波伝送特性に関する研究」

自動車の配線コスト低減を目指したエンジンルーム内センサへのマイクロ波電力伝送を実現するために、電磁界シミュレーションおよび実験によりエンジンルーム内のマイクロ波伝送特性を調べた。周波数 900MHz 帯、アンテナ間距離 18cm 以下のとき、伝送効率目標値 28% 以上を達成した。

#### 塚本 優 (篠原教授) 「車両上部マイクロ波給電システムの受電アンテナ及び安全性に関する研究」

停車中大型車両へのマイクロ波給電システムの実現に向け、周辺への電力漏洩を低減するための受電アンテナおよび安全性に関する研究を行った。FDTD法を用いた計算機実験により、受電アンテナアレー各素子の放射インピーダンスを調整することで、受電効率 99% 以上を達成した。

#### 西村 貴希 (篠原教授) 「GaN ショットキーバリアダイオードを用いた大電力用整流回路の研究」

回路シミュレーションおよび実験により、GaN ショットキーバリアダイオードを用いた数十 W 級の大電力マイクロ波入力に対する整流回路を研究した。周波数 2.45GHz、入力電力 20W において、実測でのマイクロ波-直流変換効率 45.1% を達成した。

### 高等教育研究開発推進センター

#### 小澤 啓太 (小山田教授) 「評価構造における単語間の関係性可視化に関する研究」

評価構造のグラフ可視化において指摘されてきた、ノード数の増加に伴う視認性低下と分析の効率性低下という問題に対して、評価項目内の単語の頻度と単語間の位置関係を反映した可視化手法を提案した。ケーススタディを使った評価実験により、本手法の有効性を検証した。

#### 高見 円仁 (小山田教授) 「時系列データを使った漁獲モデル開発に関する研究」

漁獲高予測モデル開発において、従来、時系列データが使われなかったため、過去の情報を取り込むことができなかった。この問題を解決するために、モデル開発にあたり、漁獲場所を通過する流跡線上でサンプリングして作成した時系列データを利用した。数値実験により、提案モデルの有用性を検証した。

### 学術情報メディアセンター

#### 梅崎 雄二郎 (中村 (裕) 教授) 「機器操作体験映像の重畳提示に関する研究」

機器を操作する際の体験を映像で記録し、それを他の利用者や評価者にわかりやすく提示する手法を検討した。特に、手による操作が複雑かつ多様性がある場合に、複数の体験を重畳して一覧性を高めたり、比較しやすくする方法について提案した。

#### 迫 匠一郎 (中村 (裕) 教授) 「認知症者を対象とした笑顔と発話認識による QOL 評価システムの設計」

認知症患者の様子を映像により観測し、その状態 (Quality of Life) を評価するための基礎的な検討と実験について報告した。患者に不安を与えないように観測するためのカメラ設定や、観測された映像から笑顔を検出するための手法について提案した。

## 高校生のページ

# 電力・水素協調エネルギーインフラ (カーボンフリーを目指して)

大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻  
白井康之

## 1. 地球温暖化とエネルギー

みなさんもよく知っているように、地球温暖化は全世界的な問題として取り上げられています。現在の科学技術が作り上げてきた私たちが享受している現在の豊かな生活のために、将来の地球環境を犠牲にはしてはいけません。よく言われる「持続可能な発展 (Sustainable Development)」とは、「将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させるような発展」と説明されます。政府が発表している「新成長戦略」は「グリーン・イノベーション」と「ライフ・イノベーション」を二大戦略と定めています。経済成長の原動力は技術革新にあるとされますが、持続可能な発展を可能にするイノベーションを生み出して、成長に繋げなければなりません。

日本は2030年の温室効果ガス排出量を2013年比で26%削減するという目標を世界に提示しました。この実現のためには、まず現在の技術で実現できる省エネルギー行動を、産業界と国民が協力して実施することが求められます。2011年3月に発生した東日本大震災の後、省エネルギーは全国に拡がり、例えば電力の使用量は震災前に比べて1割近く減っています。しかしながら、震災以降、原子力発電所の稼働は制限され、その代わりに火力発電所による発電が多くなって、地球温暖化につながる炭酸ガスの排出量は増えてしまっています。

着実に進める省エネルギーの技術とともに、私たち大学の研究者はゲーム・チェンジングな新技術の可能性を探る研究を行い、より早くより高いレベルでより小さな国民負担で温室効果ガス削減を目指す必要があります。「超革新」的なイノベーションを環境エネルギーの分野で生み出すことは、新たな世界の形、価値観を作り出すことにつながり、ひいては世界の平和に資するものだと考えています。この意味で、水素と超伝導はエネルギー分野のパラダイムシフトをもたらすことのできるものだと思います。

## 2. 電力と水素

電力も水素もその利用時には、炭酸ガスを発生しないクリーンなエネルギーです。我が国の原油・石油製品供給に対する自動車部門の割合はおよそ1/3、発電部門の割合は1/5であり、あわせて半分以上を占めます。20万kWのLNG発電設備では年間約40万t、自動車1台が1日50km走行するとおよそ1.2t/年のCO<sub>2</sub>が発生します。これらのエネルギー源を水素に転換することで、非常に大きい低炭素効果が得られることはよく知られています。水素を燃料として、燃料電池（水素を燃焼ではなく、空気中の酸素と化学反応させて電気エネルギーを直接得るもの）で走行する燃料電池車(図1)が販売され、これらに水素を供給する水素ステーションなどの設置が急ピッチで進んでいます(図2)。

これらの水素利用を進めていけば、水素は電力に取って代わるのでしょうか？そう



図1 TOYOTA 燃料電池車 MIRAI

ではありません。水素が我々の利用するエネルギーの大きな部分を占めるようになるためには大量の水素のサプライチェーン（製造・運搬・分配・利用）の整備が必要です。しかし、水素は体積当たりのエネルギーが小さいので、輸送・分配には適していません。したがって、将来の低炭素エネルギーインフラ（基盤）では、輸送や分配に有利な現在の電力系統によるカーボンフリーエネルギーの電力と、貯蔵に有利で自動車などの移動体のエネルギー源に適した水素とを協調したシステムが理想の形態と考えられるのです。

だから、現在は天然ガスや石炭などを燃料とする火力発電所での電力発生時の低炭素化が、あわせて目指されるべきです。すなわち、再生可能エネルギーによる発電や天然ガスや石炭にかわって水素をエネルギー源とした発電の導入を加速しなければならないといえます。

現在の電力エネルギーの大半を占めている天然ガスや石炭による火力発電を水素による発電に転換するためには、先ほど述べた大量の水素のサプライチェーンが必要になります。体積エネルギー密度の小さい大量の水素を運搬するための一つの方法として、水素ガスを液体（LH<sub>2</sub>：-253度：20K）にして運ぶことが考えられています。水素ガスは、液体にすると体積がおよそ1/800となります。因みに天然ガスは、-162度の液化天然ガス（LNG：体積1/600）にしてタンカーで大量に輸入されています。これを水素で置き換えるわけです。（図3参照）しかし、大きな問題は液体にするために比較的大きなエネルギーが必要とされることです。LNGでもこの冷熱の有効利用は一つの課題ですが、液体水素ではさらに温度が低いのでその有効利用は大きな課題です。

### 3. 超伝導と水素

一方、話は変わりますが、超伝導は直流電気抵抗がゼロであることに大きな特長があり、それを適用した電力機器における大幅な低損失化、そしてその結果として低炭素化の実現に大きなポテンシャルを有しています。これらを活かして、電力分野ではこれまで超伝導発電機、超伝導電力ケーブル、超伝導エネルギー貯蔵装置などの研究開発が進められ、超伝導技術は従来の技術体系を大きく変える次世代システム技術として極めて有望であることが明らかになっています。また、輸送機器、産業機器、情報機器など電気エネルギーを利用する分野への超伝導技術の適用も重要です。例えば、現在建設が進んでいる中央新幹線の超伝導リニアモーターカーでよく知られている超伝導モーターに大きな技術的可能性があるほか、先端的な各種要素技術と組み合わせることによってエネルギー利用効率を大きく高めることが可能です。

しかしながら、超伝導の状態を実現するためには、図4に示すように三つの条件を満たさなければなりません。すなわち、磁場（磁束密度）と温度によって流せる電流の大きさが制限されます。超伝導の機械（例えば発電機やモーターなど）で扱えるエネルギーを大きくするには、（電流）×（磁場）が大きいたることが必要です。そのためには、低い温度が必要となるわけです。実際に超伝導のコイルに使われる

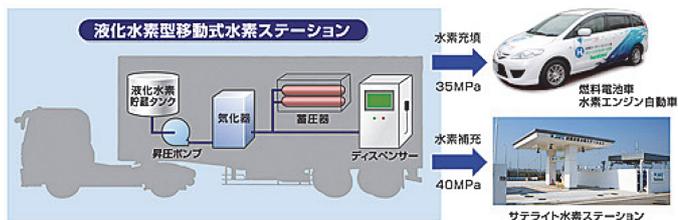


図2 液体水素コンテナによる水素配給とサテライト水素ステーション（岩谷産業）



図3 液体水素タンカーと液体水素コンテナ（川崎重工）

ような超電導材料には、図5に示すような NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn、BSCCO、YBCO、MgB<sub>2</sub> などがあり、それぞれの超伝導になる三つの条件を持っています。図5は、わかりやすいように、温度をパラメータとして、磁場と電流の平面でそれぞれの材料の超伝導になるための臨界条件の特性を示したものです。材料名に付して示したパラメータとした温度は、冷媒として用いられる液体ヘリウム（沸点 4.2K；-269 度）、液体水素（沸点 20.3K；-253 度）、液体窒素（沸点 77.3K；-196 度）の大気圧での沸点です。このなかで NbTi と Nb<sub>3</sub>Sn は液体ヘリウムで冷却するしかありません。MgB<sub>2</sub> は液体ヘリウムでも液体水素でも超伝導になります。BSCCO や YBCO は、いずれの冷媒でも超伝導になり、高温超伝導材料と呼ばれます。高温といっても液体窒素で -196 度ですからかなり低温で使わなければなりません。

実際に実用化されている超伝導の機器としては、医療用の MRI-CT（核磁気共鳴断層撮影装置）や先ほど出てきた超伝導リニアモーターカーがあげられますが、これらは液体ヘリウムで冷却した NbTi を使った超伝導コイルで作られています。しかしながら、ヘリウムは希少な有限資源で枯渇が心配されており、ヘリウムを使わない超伝導機器が期待されており、液体水素や液体窒素で使える高温超伝導材料を使った機器が活発に研究開発されています。

ここで、もう一度図5をみてみると、BSCCO は液体窒素ではほとんど磁場がかけられませんが、液体水素ではかなり特性がよくなります（赤矢印）し、YBCO では液体ヘリウムでの特性を大きく損なうことなく液体水素で利用できることがわかります（青矢印）。また、MgB<sub>2</sub> は液体窒素では使えませんが、液体水素で超伝導になる比較的安価な新しい超伝導材料です。また、液体水素は蒸発潜熱（気体になるときに奪う質量当たりの熱）がヘリウムの 20 倍、窒素の 2 倍以上あり、粘性も窒素の 1/10 で、冷媒としての優れた特性を有しています。このように、超電導材料にとっては液体水素を冷媒にすることが有利であることがわかります。しかしながら、液体水素冷却の超伝導機器の研究はほとんど進んでいません。これは、ヘリウムや窒素と違って、水素は可燃性のガスで扱いに注意が必要だからです。

4. 水素と電力を協調したエネルギーシステムの実現のためには

先に紹介したように、地球温暖化防止を目的とした水素社会に向かって大きな変革が進みつつあります。液体水素が大量の水素エネルギーを運搬する手段として社会の中に組み込まれていくということは、これを超伝導機器の立場から見ると、ヘリウムや窒素では冷却のためだけにこれらを液体にする必要があったのに対して、液体水素という優良な冷媒が存在することになります。運搬のために液化しないといけないわけですが、この冷熱を無駄にせず真に有効に使えるのは超伝導機器の冷却といえるわけです。

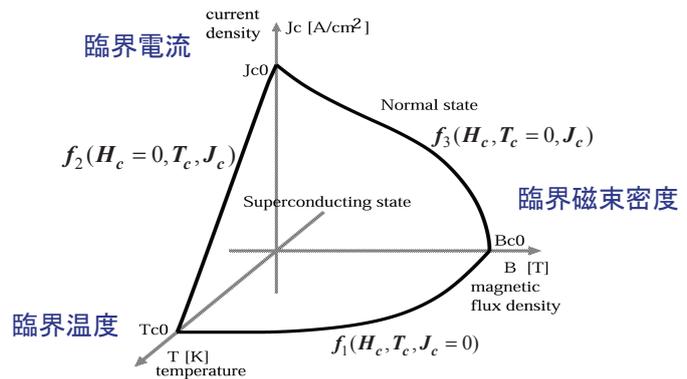


図4 超伝導の現れる条件（上記の曲面の内側）

Jc-B characteristics of superconductors

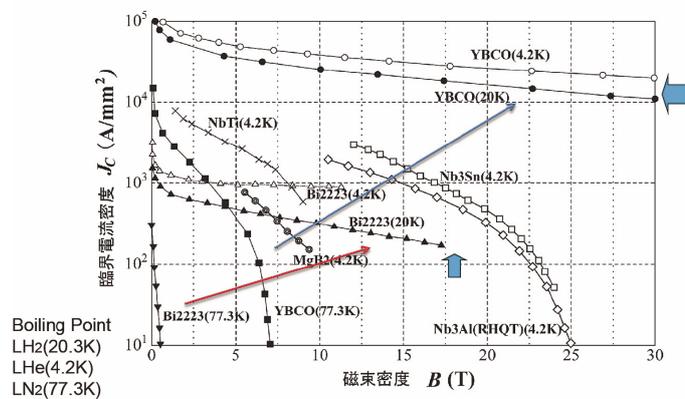


図5 超伝導材料と磁場 - 電流特性（パラメータ：温度）

例えば、図6のようなシステムが考えられます。液体水素がタンカーによって受入基地（現在のLNG受入基地のような形）に入り、貯蔵タンクに蓄えられ、これを気化して水素燃焼ガスタービン発電を行います。この発電機を液体水素で冷却し高効率でコンパクトな超伝導発電機とします。これによって蒸発したガスは当然燃料として使用します。受入タンクは、水素のサプライチェーンの基軸となり液体水素コンテナやトレーラで水素ステーションに分配し、水素自動車などへの供給を行います。（実は、現在の超伝導でない発電機の中には水素ガスで冷却されているものが多くあります。水素もちゃんと管理して使えば問題の無いことの実証でもあります。）

このように、液体水素で冷却した超伝導応用エネルギー機器をキーとした現在の電力エネルギーの大きな変革と、水素エネルギーと協調した新しい低炭素化エネルギー供給基盤の構築は、将来の環境に優しいエネルギーシステムの究極の形だと考えています。

しかしながら、私たちが研究を始める前（2008年）は、液体水素を超伝導機器の冷媒として利用する研究はほとんど行われておらず、液体水素冷却超伝導機器を設計・製作するに際して、例えば液体水素中へどのように電流を導入すればいいのか、そのときの安全性の確保はどうすればいいのか、そもそも超伝導線材を冷却する液体水素の熱流動特性そのものはどうなのかなど、多くの技術的課題がありました。これらの問題を解決すべく、私たちは、科学技術振興機構の支援を得て、液体水素冷却超伝導機器を想定した実験機器を設計製作し、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の能代ロケット実験場で実際に実験を実施してきています。例えばパワーリード（電流導入端子）のブランク構造（万が一の水素漏れによる爆発を避けるために、電流ケーブルそのものを窒素ガスで封入する）などを提案・製作して、県庁から認可を受けました。液体水素を使った冷却特性試験、超伝導特性評価実験をこれまで15回（2015/07現在）実施し、安全な運用実績を作ってきています。

このプロジェクトで整備した液体水素冷却超伝導機器を想定した実験設備（図7）は、液体水素浸漬

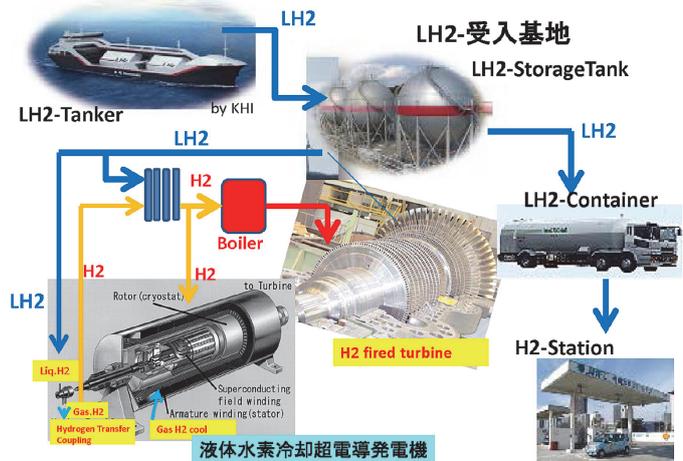


図6 水素と電力を協調したエネルギーシステムの構成例

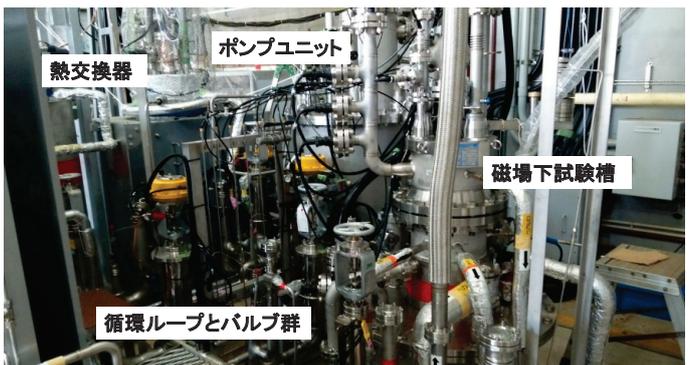
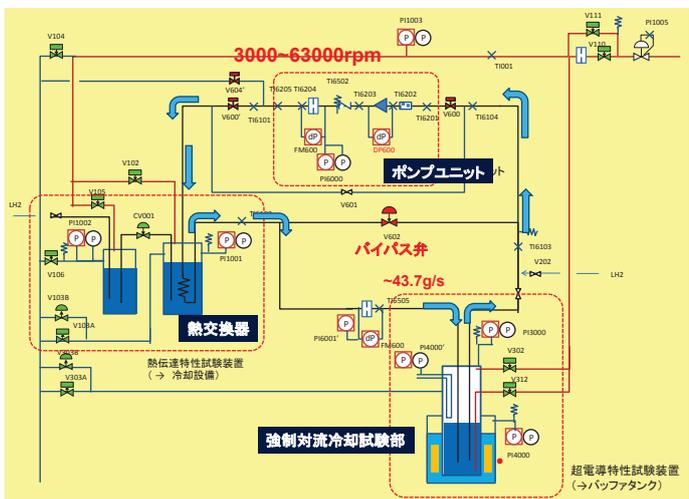


図7 液体水素冷却超伝導機器の実験設備の系統図と外観写真

---

冷却超電導機器、強制対流冷却超電導機器（超伝導ケーブルや CICC 導体など）の実験ができます。これらの設備は世界で最初のもので、このような試みを実際に行い、実績を積み上げて安全な液体水素冷却超伝導機器システムの設計・法的整備に貢献し、社会への実装につなげていきたいと考えています。

## 5. まとめ

2011年3月に発生した東日本大震災以降、日本のエネルギーに関する議論が活発になり、その重要性が再認識されています。原子力発電は停止し二酸化炭素の排出が多い火力発電の割合が増えています。地球温暖化抑止のため再生可能エネルギーの導入促進が急ピッチで進み、水素社会の実現も加速しています。水素と電力とを協調した理想のエネルギー供給基盤をめざした研究に、君たちも参加してみませんか？

## 学生の声

## NASA の懐に飛び込んで

工学研究科 電気工学専攻 大村研究室 博士後期課程3年 中山 洋 平

私は2015年6月から12月までの半年間 The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory と NASA Goddard Space Flight Center にて在外研究を行いました。この度、本稿執筆のお話をいただいたので在外研究で学んだことをみなさんと共有できればと思います。

まず私の研究分野ですが、宇宙天気と呼ばれる人類の健康や社会インフラに悪影響を与える宇宙環境変動を扱う分野であり、研究アプローチの方法として理論、観測、シミュレーションの三つがあります。大村研究室では特にシミュレーションによる分野への貢献を行っており、私は理論、観測の研究者と共同研究について議論するため在外研究を行いました。しかしながら、赴任した当初、現地研究者に相手にされず関係構築に苦労しました。その原因を探るにつれ、他の研究者が自分の研究の優位性を示すだけでなく、どう既存の研究に応用できるかを提案していることに気づきました。そこで私も自分のシミュレーションの話をするだけでなく、シミュレーション結果を使ってもらうことでどう互いの研究に利益があるのかをアピールすることに注力しました。その結果、徐々に受け入れられ、最終的には論文の共著に入っていたなど深い信頼関係を築くことができました。

今回の在外研究を通して、研究を進めることはもちろん、他者の立場を理解して互いに有益な提案するという姿勢の重要性を学ぶことができ、非常に有意義なものとなりました。最後に、博士課程の学生という立場でありながら、在外研究の機会を与えてくださった大村先生、海老原先生にこの場を借りて心より感謝いたします。

## 「はんだづけ同好会」の活動

工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学研究室 博士後期課程3年 野村 義樹

2015年の学祭(NF)にて「はんだづけ同好会」という名称で、来場者に電子工作(はんだ付け)をしてもらうという企画を行いました。電子工作をはじめるとき、いくつかの壁を乗り越える必要があります。1: 部品をどこで買ったかわからない、2: 工具(道具)の使い方がわからない、3: 作製したものの見た目が悪い...、などなど。体験企画では1、2は私たちが部品を用意し、はんだ付けのやり方も教えるので問題ないです。しかし3に関してはユニバーサル基板にLEDや抵抗を取り付けてもらうというのは味気ないものです。

そこで今回はユニバーサル基板に代わり、クリスマスツリー型のプリント基板を設計、生産することにしました。KiCadというフリーソフトウェアを利用し、中国のプリント基板製造会社に発注しました。近年は個人でもオリジナルの基板を安価に作製することができます。このように準備して臨んだ「はんだづけ同好会」ですが、想定していたよりも盛況で、電子工作やものづくりに興味のある方はまだ多いのだなと感じると同時に、取り組みやすい環境を構築することも重要であると認識しました。

企画を通じて感じたことは、「幅広く情報を収集しておくこと、知識を蓄えておくこと」と「とりあえずやってみること、興味を持つこと」の重要性です。NFの企画に興味を持たなければこの活動は生まれませんでしたし、仮に興味を持っても、もしKiCadを知らなければ、個人でも基板を安価に製造できることを知らなければ今回の企画は生まれなかったでしょう。新しいことをするとき、今の社会の技術で何ができるのか?を知るというのは重要なことです。

最後に、もし「とりあえずやってみる」きっかけがほしいなら、学部生のみなさんは「サマーキャンプ」に参加するとよいかと思います。「興味はあるけど参加することはちょっと...」という人は、「Maker Faire Tokyo」や「Makers Bazaar」などに足を運んでみるのもいいかもしれません。よい経験になると思います。

## 特色入試の導入と実施について

電子工学専攻 木本恒暢

京都大学では、高等学校における幅広い学びと接続したいいわゆる「高大接続型」の入学選抜の一つとして、平成28年度入試より全学部で特色入試を導入し、実施しました。本特色入試では、多様選抜の一環として、従来の一般入試（筆記試験）だけでは測れない能力を評価することを目指しました。入試の実施内容は完全に各学部任せ、高い数学能力を求める学部や長文の英語読解力と思考力を求める学部もありました。工学部では平成24年頃から本格的な議論を始め、「将来、世界を牽引するグローバルリーダーとなり得る特筆すべき能力、リーダーシップと高い基礎学力を持つ人材」を求めることとし、科学技術に関する顕著な活動実績とセンター試験の成績を総合して選抜する推薦入試を導入しました。本稿では、電気電子工学科で実施した特色入試について簡単にご紹介申し上げます。

上述のように本特色入試は単なるAO入試ではなく、推薦入試として実施しました。所属する高校の校長先生の推薦書を求め、合格した暁には必ず入学していただくという制度です。各学校長が本学電気電子工学科に推薦できる人数を1名とし、本学科の募集人員は5名としました（なお、電気電子工学科全体の入学定員は130名です）。つまり、もし特色入試で5名の合格者が出た場合には、一般入試の募集定員は125名となります。初年度でもありますので、一般入試に過度な影響を与えないように配慮しました。11月初旬に出願、書類審査とセンター試験を経て、翌年2月10日に合格発表を行うというスケジュールで実施しました。したがって、もし本特色入試が不首尾であったとしても、一般入試の受験（2月25、26日）を妨げないようにしています。

本学科では、出願および推薦の要件として以下の項目を設定しました。

- ・高等学校または中等教育学校を平成28年3月卒業見込みの者（いわゆる現役生）
- ・人格・識見ともに特段に優れている者
- ・特筆すべき能力、リーダーシップと高い基礎学力を有する者
- ・授業科目の一環として実施した課題研究や科学に関する課外活動において顕著な実績を挙げた者
- ・本学電気電子工学科での学びを強く志望し、合格した場合は必ず入学することを確約する者

この中で、「授業科目の一環として実施した課題研究や科学に関する課外活動において顕著な実績を挙げた者」がポイントとなります。この実績を客観的に示すエビデンス（賞状のコピーなど）を上記の推薦書や調査書と一緒に提出してもらいました。また、出願時には京大入学後の学修計画や将来の抱負を記述する「学びの設計書」（京大特色入試において全学部で設定）の提出も求めました。

選抜は提出された書類の審査に重点を置き、まず提出書類をA、B、C、Dの4段階で評価しました。この後、A評価の者の内、センター試験の合計得点が80%を越えた者を合格者としました。

初めての試みであり、まず多くの高校生に出願してもらえるかどうか懸念しました。そこで、工学部特色入試パンフレットの作成と全国の高校への送付、各種入試イベントでの広報活動に加えて、本学科の先生方にもご協力をいただき、母校を訪問してアピールしてもらおうなどの準備を行いました。この結果、12名という工学部の中では群を抜く数の出願者がありました。11～12月に慎重に書類審査を進め、センター試験を経て最終的に3名の合格者を出しました。3名とも大変優れた活動実績を挙げておられると伺いました。

特色入試と一般入試により、やや異なる能力を有する学生が電気電子工学科で出会い、お互いに切磋琢磨することによって相乗効果が発揮されることを期待いたします。今後も科学技術に対する高い興味と勉強意欲を持ち、優れた活動実績と高い基礎学力を兼備した多くの高校生が、本学科での学びを志望してくれることを強く願っています。産官学の先輩諸氏の皆様方におかれましては、本特色入試にご期待いただくと共に、より一層のご支援と御鞭撻を賜ることができれば幸いです。

## 編集後記

この cue を手にとっていらっしゃる方の多くは、京都から離れて暮らしていらっしゃるかと思います。その京都が米大手旅行雑誌の観光都市世界ランキングで2年連続「一位」となったとの報道を耳にされた方も多いかと思います。今の京都は海外からいらした方であふれ、市バスの中では日本以外のアジア諸国の言葉しか聞こえないこともあります。

「一位」や「最初」は大きなインパクトがあります。ライト兄弟の次に動力飛行に成功した人がいったい誰なのか、ほとんどの人が知らないのも現実でしょう。しかし、米雑誌編集者は如何にして、多様な側面があろう「観光都市」に意味ある単一の順番を与え得たのか。学术界でも「最良」「最初」は大きな価値ですが、範囲や基準を明確にしないと論文が返戻になってしまいます。料理の評価ポイントと景観の評価ポイントはどのように1つの数値にまとめることができたのでしょうか。

最後になりましたが、ご多忙のところご寄稿いただいた皆様をはじめ、日頃より cue 誌及び電気関係教室の活動にご支援いただいている多くの皆様に厚く御礼申し上げます。

[H.M. 記]

## 協力支援企業

新日鐵住金株式会社  
鉄道情報システム株式会社  
株式会社 村田製作所  
ローム株式会社  
(アイウエオ順)

発行日：平成28年9月

編集：電気系教室 cue 編集委員会  
大村 善治、松尾 哲司、石原 亨、  
掛谷 一弘、古谷 栄光、村田 英一、  
龍頭 啓充、荒木 光彦（洛友会）  
京都大学工学部電気系教室内  
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp  
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発行：京都大学電気関係教室  
援助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会  
電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社 田中プリント

