

Cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.46 SEPTEMBER 2021

[第46号]

卷頭言

塩津 正博

大学の研究・動向

グラフエンを超えて：

極限二次元半導体の光科学とデバイス応用
工学研究科 エネルギー理工学研究所ナノ光科学研究分野

産業界の技術動向

誰もが分かり合えるユニバーサルコミュニケーションの
実現に向けた取り組み

国立研究開発法人情報通信研究機構

ユニバーサルコミュニケーション研究所 内元 清貴

新設研究室紹介

研究室紹介

令和2年度修士論文テーマ紹介

高校生のページ

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 46 号 目次

巻頭言

沸騰研究 50 年	昭和 41 年卒業 京都大学名誉教授 塩津 正博……	1
-----------	----------------------------	---

大学の研究・動向

グラフエンを超えて：極限二次元半導体の光科学とデバイス応用	工学研究科 エネルギー理工学研究所 ナノ光科学研究分野……	4
-------------------------------	-------------------------------	---

産業界の技術動向

誰もが分かり合えるユニバーサルコミュニケーションの実現に向けた取り組み	…国立研究開発法人情報通信研究機構 ユニバーサルコミュニケーション研究所 内元 清貴……	10
-------------------------------------	--	----

新設研究室紹介	18
---------	----

研究室紹介	19
-------	----

令和 2 年度修士論文テーマ紹介	39
------------------	----

高校生のページ

電力のパケット化 一電力と情報の統合を目指して—	工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座	持山 志宇、引原 隆士……	61
--------------------------	--------------------------	---------------	----

学生の声

論文投稿を通して得られたもの	情報学研究科 知能情報学専攻 黒橋研究室 博士後期課程 1 年 植田 暢大……	66
研究室での 3 年間	工学研究科 電子工学専攻 木本研究室 博士後期課程 1 年 原 征大……	66

教室通信

コロナ禍での電気系教室	電気電子工学科 学科長 黒橋 祐夫……	67
-------------	---------------------	----

編集後記	70
------	----

卷頭言

沸騰研究 50 年

昭和 41 年卒業 京都大学名誉教授 塩 津 正 博



私がエネルギーに関連する沸騰研究を始めたのは 50 年以上前で、当時京都大学原子エネルギー研究所に勤務していた。最初は、軽水炉の反応度事故に関連し発熱が指數関数状に急激に上昇する場合の過渡沸騰の研究、次に米国スリーマイル島の原子炉の一次系配管破断事故に関連した圧力急減時の水の過渡沸騰の研究であった。電気的な過渡現象について講義で学習していたので、熱伝達を研究テリトリーとしていた機械工学や化学工学の研究者たちよりとっつきやすかったためかもしれない。

その後、軽水炉で燃焼済みの燃料を再生したプルトニウムを多く含む再生燃料を燃焼可能な高速増殖炉が、我が国のような資源少国の大出力として期待されるようになり、その冷却剤としての液体金属ナトリウムの自然対流及び強制対流沸騰を研究した。液体金属ナトリウムは、非沸騰状態で高い熱伝達係数を持つため平常時は沸騰させることなく使用されるが、万一事故が起こって流れが遅くなったり出力が異常に高くなったりすると沸騰する。そのため沸騰状態も研究の必要があった。沸点が 900°C 近傍と非常に高いのと万一漏洩すると発火するので安全性に大変な注意を要する難しい研究であった。

廃棄物を出さず大出力が可能な核融合炉が提唱されると、核融合実験装置のプラズマ閉じ込め用マグネットの安定な冷却剤として超流動状態を含む液体ヘリウム冷却の研究に取り組んだ。超流動は、液体ヘリウムを 2.17 K 以下に冷却したときに現れる特有な性質で沸騰を起こすことなく高い熱伝達がえられる。広範囲の条件で熱伝達特性を明らかにした。さらに、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の超電導マグネットでクエンチを起こさせた場合に片側のみに常電導部が伝搬するという現象が生じた際、京大の実験装置（図 1）でその原因を実験的に解明したことははっきり記憶に残っている。外部磁場印加用の最高磁場 7T の超電導マグネット（図中 2）を備えた京大の超流動ヘリウム冷却実験装置内に、外部磁場コイルと同心軸上に LHD 導体と同じ導体を数回巻いたコイルを巻き始めと終わりを短絡させて設置し（図中 1）、外部磁場を直線状に変化させて変流器の原理で試験コイルに大電流を得た。外部磁場 1 ~ 7T、試験コイル電流 10 ~ 20 kA の条件で、試験コイル中央に貼り付けたヒータをパルス加熱し、常電導部の片側伝搬が起こる範囲を明確化し、現象を説明しうる物理モデルを提示した。

定年を迎えた後、低炭素化社会の実現を目指した水素利用の研究が盛んとなり、液化水素の冷熱を高温超

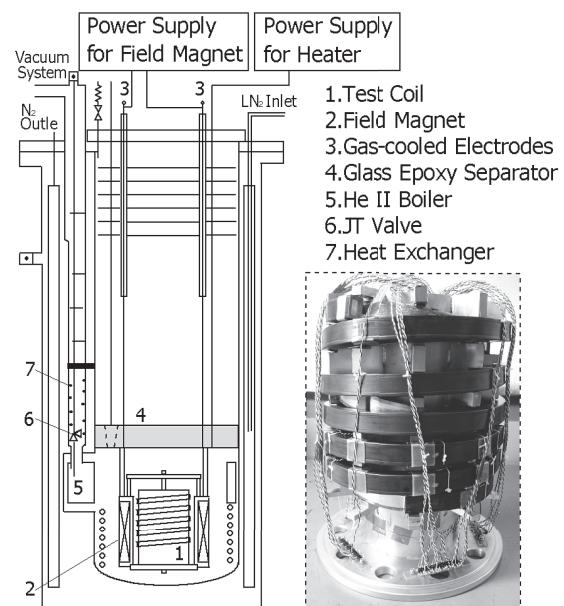


図 1 LHD 導体コイル試験装置

電導マグネット冷却を利用する共同研究に参加した。液体水素は沸点が約 20 K であり、液体水素冷却では液体窒素冷却よりはるかに高い臨界電流密度がえられる。液体水素は取り扱いの難しい液体であるが、JAXA の共同研究者の指導と協力を得て、沸騰熱伝達や液体水素冷却超電導マグネットの基礎研究さらに液体水素冷却回転機の基礎研究を行っている。

ここまで、私の沸騰研究を振り返ったが、読者は沸騰なんて日常生活でも見られるし昔から知られているのではないのか。どうして冷却液の種類が変わるたびに研究しなくてはならないのかと不思議に思われるかもしれません。

いろいろな流体の熱伝達特性は、液または蒸気の単層の場合本質的な相違はなく、物性値の違いだけを考慮すればよい。相違があるのは、沸騰のような相変化を伴う場合である。液体が気体に相変化する現象を蒸発 (evaporation) という。たとえば液体を入れた容器を静かに加熱すると、自由液面に蒸発が生じる、このとき蒸発する分子は自由液面で潜熱を吸収する。そしてこの潜熱は、自由液面下、約 1 mm 程度の深さの液層に生ずる温度勾配により、主として熱伝導（自然対流も伴うが）によって液体内部から蒸発面に伝えられる。従って自由液面が飽和蒸気に接して蒸発を生じているとき、液体内部（対流のため温度ほとんど一様）は過熱状態にある。容器の加熱を強めるとそれに比例して蒸発量も増す。そして必要な蒸発潜熱を自由液面に伝えるために液体内部の過熱度も大きくなる。

しかし過熱液は準安定状態 (metastable condition) であるから、無制限の過熱は許されない。たとえば液体や蒸気の平衡状態を示す p_v 線図 (v は非容積) において、圧力 p にある液体は周知のように a 点（飽和温度 T_s ）から b 点（温度 T_1 ）までしか過熱し得ません。そして分子論的には次のようなことになる。液体分子のいくつかは一般に平均より大きなエネルギーを持つが、過熱度が増すにつれて蒸発を生ずるに十分な高エネルギー分子が一個所に集まる確率が増す。そして十分多数の活性分子が集まって一塊りになると気泡 (bubble) が液内に発生する可能性がある。これを自発核生成という。自発核生成温度は臨界温度よりわずかに低くなる。

しかし実際には（少なくとも普通の条件下では）、きわめて僅かな過熱度で定常的な液内蒸発を開始する。これがいわゆる沸騰 (boiling) で一般に加熱面上で気泡を発生する。これは現実の伝熱面に存在する微小な割れ目、不純物、あるいは液中などにひそむ気体が、それに直接接する過熱液の蒸発を助けてしまうためである。液体中に気泡が形成されるためには、液体を蒸気に転換し、また気液界面をつくるためのエネルギーが必要である。このエネルギーは液体が過熱されておれば、周囲の液体から与えられる。気泡を発生させるに必要な過熱度は表面張力によって制御され、脱気水やきわめて清浄にされたなめらかなガラスのように気泡発生核がない場合には van der Waals の方程式から予知される値とよく一致した非常に高い過熱度がえられる。（突沸現象として知られており、理科の実験などで試験管を加熱する場合には必ず沸石と呼ばれる多孔質の石を入れるよう指導されている）。

しかし沸騰は、通常このような高い過熱度ではなく遙かに低い過熱度で発生する。沸騰を生じるには微小ではあるが有限の半径（臨界半径）の気泡核が必要である。このような核は通常固体表面の顕微鏡的不完全さ、すなわちビットや搔き傷から成り立っていると考えられる。核の大きさは通常 $1 \mu\text{m}$ から 0.1mm の範囲にあり、これが気泡発生に有効に作用するか否かは液体の表面張力や系の圧力と液温の履歴、加熱面の過熱度等によって異なる。気泡核による沸騰は核沸騰と呼ばれ非常に大きな熱伝達が得ら

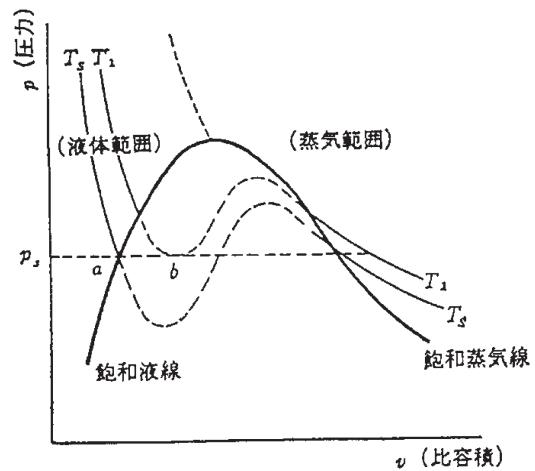


図 2 物質の状態図

れる。新しい分野でこれまで経験の少ない冷却液の沸騰冷却を利用しようとする場合に、この大きな不確定領域の存在が実験による沸騰冷却特性解明を必要とする理由である。

定年以後に手がけた液体水素の実験は、秋田県能代市の JAXA 能代ロケット実験場で共同研究として行われている。3 週間位ずつ年 4 回程度だが、もう 10 年以上となるので、行くたびに故郷に帰ってきたような気がする。能代は、江戸時代から北前船による鉱業資源、木材などのとりひきで栄えた町で文化程度が高く気持ちの良い町である。研究は大詰めだがあと数年続くことを期待している。

大学の研究・動向

グラフェンを超えて： 極限二次元半導体の光科学とデバイス応用

エネルギー理工学研究所 ナノ光科学研究分野

教授 松田一成

助教 篠北啓介

1. はじめに

我々の生活を支えるエレクトロニクスやフォトニクスは、新しい半導体やその量子構造、さらにはそこに内在する半導体物理の研究とともに進展してきた事は周知の通りである。近年、わずか原子一層（数層）からなる極めて薄い物質（カーボンナノチューブ [1]、グラフェン [2]、遷移金属ダイカルコゲナイト [3]）が実現し、大きなパラダイムシフトを迎える。これらは原子層物質もしくは原子層半導体と呼ばれ、例えば、炭素原子一層のシートである「グラフェン」、グラフェンを一巻きしたシリンダー（筒）構造の「カーボンナノチューブ」、グラフェンと類似の構造を有する「遷移金属ダイカルコゲナイト」などが含まれる。これまでに我々は、原子層半導体の中で最も早く実現された、カーボンナノチューブをモデルケースとして研究を展開し、量子現象によって発現する光学的性質（光物性）の解明と機能性デバイスの研究を進めてきた[5-8]。原子層物質の中でも、鉛筆の芯などに含まれる黒鉛（グラファイト）を原材料として、炭素原子のシートからなるグラフェンの発見は驚きをもって迎えられ、2010年のGeimとNovoselovらによるノーベル物理学賞の受賞を記憶している方も多いと思われる。グラファイトをスコッチテープで機械剥離するという、非常に単純な方法（スコッチテープ法）でそれが実現された事、それに加え、シリコンに代表される半導体中の電子とは大きく異なるディラック電子系であり、あらゆる物質中で最高の電子移動度を有するなど、これまでの半導体物理の常識を覆すことが明らかとなった。このため炭素原子一層からなるグラフェンは、究極の物質とも呼ばれている。しかし、グラフェンによる電界効果トランジスタ（FET）などの研究が進んだ一方で、バンドギャップがない（半金属的）ことが、デバイス応用上の制限となっていることが指摘されている。これらグラフェンの研究が契機となって、“beyond graphene”と呼ばれるバンドギャップを有する新たな原子層半導体の研究が勃興した。

本稿では、遷移金属ダイカルコゲナイト (MX_2 ; M=Mo, W, X=S, Se, Te) と呼ばれる、新しい原子層半導体を中心に述べる。

これら一連の物質群 MX_2 は、図1下に示すように、X-M-Xの原子三層を基本単位として（これを単層と呼ぶ）、それらがファンデルワールス力で積層した層状物質で、古くから潤滑剤として工業的にも広く用いられている。そのため、グラフェンと同様にいわゆるスコッチテープ法で薄く機械剥離することで、わずか原子三層（厚みが 1 nm）からなる単層半導体 MX_2 を手にすることができます。後述するように、極めて薄い二次元半導体であり、その中に存在する電子やホールは、強い量子閉じ込め効果を受ける。それに加え单層 MX_2 では、空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用により、波数空間

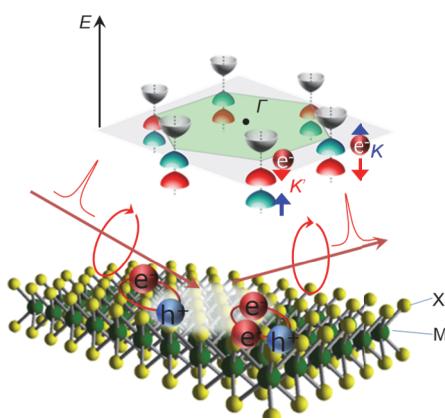


図1 原子層半導体とバレースpin

での谷「バレー」自由度（縮重度）と電子の「 спин」自由度が結合し、バレースピンと呼ばれる新たな物理自由度が発現する [4]。このため潤滑剤として古くから知られている物質にもかかわらず、これまでにない極めて薄い究極の二次元半導体であること、バレースピンと呼ばれる新しい物理自由度を内在していることが、“*beyond graphene*”と呼ばれる所以でもある。図1上で示すように、空間反転対称性の消失と強いスピンドル轨道相互作用によるクラマース縮重の破れから、ゼロ磁場でも価電子帯でのスピンドル分裂が生じる。これは磁場がない状態でも、特定のバレー（例えば、Kバレー）に上向きスピントリオンのみが分極（バレースピン分極と呼ばれる）している。このようなバレースピン分極した状態を情報担体として用いることで、従来の電子の電荷自由度のみを利用した電子（エレクトロニクス）応用とは異なる、バレートロニクスと呼ばれる新たな研究分野へと発展しうる事が期待されている。さらに原子レベルで薄い二次元半導体は、半導体デバイスで用いられている半導体量子井戸の究極の形であり、そこに閉じ込められた電子系は非常に強い量子閉じ込めを受ける。そのため、通常の半導体では極低温でしか現れない量子効果が、室温のような高温でも顕在化する。このように、原子レベルで薄くかつバレースピンという新しい自由度を活用しうる原子層二次元半導体は、バレートロニクスなどに向けた研究舞台として、学術・応用両面においても興味深い系である。そこで本稿では、原子層二次元半導体における新しい光科学とデバイス応用の観点から進めている、我々の最近の研究成果を中心に紹介する [8-18]。

2. 様々な物質バリエーションを有する二次元半導体

まず具体的な研究成果について述べる前に、二次元半導体を含む原子層物質の全体を俯瞰してみることにする。既に述べたように、グラフェンの研究を経て、そこで蓄積された知見をもとに、その研究が二次元半導体である遷移金属ダイカルコゲナイトへと広がった。以降、シリコン原子のシートからなるシリセン、黒リンからなるフォスフォレンなど、様々な原子層半導体が実現し、その裾野が広がっている。ここでは、主に光学的な性質を含む光科学について解説するために、バンドギャップエネルギーを反映する最低光学遷移エネルギー（光波長）で、さまざまな物質を整理したものを図2に示す。大まかに分類すると、赤外光領域にあたる（ギャップレス）グラフェン、近赤外から可視光領域の遷移金属ダイカルコゲナイト、フォスフォレン、紫外光領域の絶縁体である窒化ホウ素（*h-BN*）、などに大別できる。なお、原子層物質の多くで層数（厚み）によってエネルギーが変化するため、ここでは単層の場合を示している。このように原子層物質を選ぶことによって、赤外から紫外光に渡る幅広い領域をカバーすることができる。特に、光科学やフォトニクス応用において最も重要な領域にあたる可視光領域においては、遷移金属ダイカルコゲナイトが最も代表的である。

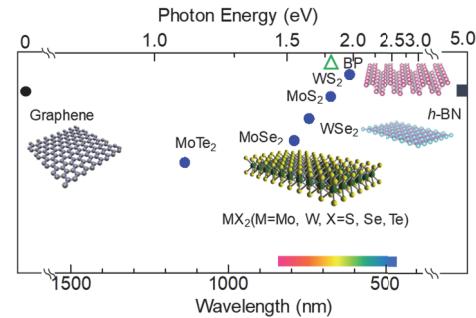


図2 原子層物質とそのバンドギャップ [20]

3. 原子層半導体の作製・デバイス作製技術の進展

原子層半導体を作製する方法として、グラフェン同様にスコッチテープなどを利用し、単結晶を機械剥離する方法が一般的に用いられている。その一方で、化学気相成長法（Chemical Vapor Deposition, CVD）で、大面積基板上に原子層半導体が作製できるようになってきている。しかし現時点では、原子層半導体の品質という観点からすると発展途上な技術でもあり、高純度なバルク単結晶から出発した機械剥離法で作製されることが多い。スコッチテープを利用した機械剥離という方法から容易に想像ができるように、その作製も主に先端研究と呼ぶには程遠い手作業で進められる。さらに、そのような機械剥離法では、基板上に様々な厚みの剥片ができ、そこから顕微鏡下で、手作業で膜厚の薄い原子層半導

体を目視で探す作業によっており、その歩留まりが研究進捗の大きな足かせとなっている。そのため、これまでのような一連の手作業を、図3下に示す自動ステージと画像認識プログラムからなる自動化システムを構築し省力化することで、大きく改善している。特に、様々な種類の単原子層半導体の画像情報を参照することで、比較的大きな原子層半導体を省力化かつ短時間での探索が可能となった。これは、後述する高次データー科学のためのビッグデーターの取得が容易になると同時に、デバイス作製の研究進捗を加速している。一方、図2で示したように原子層半導体は、その物質バリエーションも豊富であり、中には酸素や水などが多く含まれる大気中で不安定なものも存在する。そのため図3上に示すように、酸素や水を除去した嫌気下環境であるグローブボックス内で、原子層半導体の作製を可能とすることで、物質選択の幅が大きく広がっている。合わせて、原子層物質を構成要素として、単独の原子層だけでなく異なる原子層同士をファンデルワールス力で、自由自在に重ね合わせることも可能である。これは後述するように、原子層人工ヘテロ構造と呼べる全く新しい物質系とも言える。

このような、新しい原子層半導体を用いた学術・応用研究を進める上で、デバイス作製技術を確立することも同時に求められる。電子線描画など微細加工技術を用いて、電界効果トランジスタ（FET）デバイス作製などを進めている。特に、標準的な作製方法ではウエットプロセスを併用するため、汚染物が原子層半導体の光学特性に大きな悪影響を及ぼす。それらを避けるため、ドライトランジスターによる転写プロセスと絶縁体バリア（h-BN）である表面保護層を設けることで、高い発光特性を有するデバイスを作製した。これにより原子層半導体FETデバイスにおいて、外部からのゲート電圧の印可によってキャリア数を精密制御し、詳細な光学測定と物理を議論する事が可能となった。またデバイス性能の更なる向上のため、グラフェン自身をゲート電極とした光学的に極めて高品質なデバイス作製を可能とするなどの進展があった。

4. バレートロニクスに向けたバレースピン生成・検出とその制御

原子層半導体において、新たな物理自由度であるバレースpin生成・検出とその本質である緩和メカニズムに関する理解を進め、バレートロニクスに向けたバレースpin制御へと挑戦している。その詳細は原著論文[14]を参照頂くとして、ここではその概略を述べる。まず、バレースpinが十分に分極した状態（バレースpin分極）を制御するには、その情報が失われるプロセスである緩和のメカニズムを明らかにする必要がある。そこで、単層二セレン化タンゲステン（WSe₂）を対象として、円偏光励起で束縛電子-ホール対（励起子）のバレースpin分極を生成した後、発光の円偏光度からバレースpin分極率を光学的に検出し、温度依存性を詳細に調べた（図4左）。同時に、発光の時間分解測定などから、励起子寿命（緩和時間）に関する情報を得た（図4右）。これら電

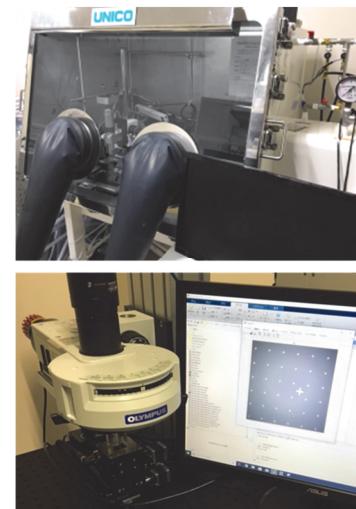


図3 原子層構造作製システム

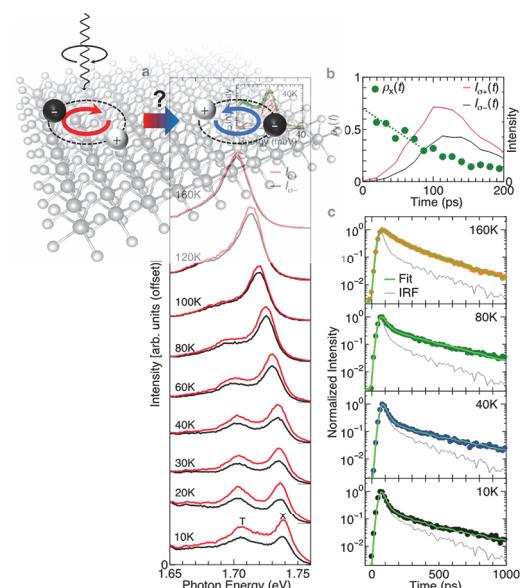


図4 バレースpin緩和の模式図と発光スペクトルと時間分解減衰[14]

子とホールからなる励起子のバレースピン分極を支配する緩和時間・プロセスを明らかにするため、微視的物理機構の解明に取り組んだ。クーロン相互作用に起因する交換相互作用と、ドープされたキャリアによるクーロン遮蔽効果に注目することで、多体効果を考慮したバレー緩和時間を理論的に導くことができた。この理論計算と実験の結果を直接比較することで、バレースピン緩和時間の温度変化やキャリア濃度に対する依存性を定量的に理解することができた。これら一連の成果から、バレートロニクスに向けて必要とされるバレースピン制御において、最も重要なバレースピン緩和時間延長と、それに伴うバレースピン分極率の増大に必要な指針を新たに得た。さらに、近年進展が著しい高次データー科学を、積極的にバレースピン物理の研究に取り入れた研究も進めている[16]。30000にも及ぶ大量のバレースピン分極の情報を基に、ランダムフォレストと呼ばれる機械学習のアルゴリズムを活用することで、バレースピン分極の値を極低温下での実験を経ることなく、予測する手法を開発するなど、新たな研究進展も見られている。

さらにバレートロニクスに向けて非常に重要な、バレースピン分極の外部からの連続制御と増大に挑戦した。上記で得られた重要な知見から、外部からキャリア数を制御して増減することで、クーロン遮蔽を通じて、バレー緩和を支配する交換相互作用を変調しうることを着想した。この実現には、既に述べた高性能な電界効果トランジスタ(FET)の特徴と利点を最大限活用している。実際に、ゲート電圧の印可によって、外部からキャリア数を連続的に制御し、発光円偏光度からバレースピン分極率を測定した。その結果、図5に示すように、我々が期待するようにキャリア数を増加させることで、バレースピン分極の外部制御とその増大に成功している[15]。この方法は、外部からのゲート電圧という簡便な方法によって、連続的にバレースピン分極を制御しうる新しいストラテジーを提示したと言え、バレートロニクスに向けて大きな一歩であると考えられる。

一方で、極めて薄い原子層半導体では、電子とホールからなる束縛状態である励起子のみならず、例えば、複数の電子とホールからなる荷電励起子(トリオン)が存在する。これら、励起子や荷電励起子のバレースピン緩和の初期過程を、実時間で追跡するために、フェムト秒時間分解測定システムを構築し調べた。当初の予想に反し、非常に早い時間領域(数ps)でバレースピン緩和を含む現象が明らかとなった[17]。より詳細な測定と解析により、光学不活性なダーク励起子やトリオンなどのバレースピン緩和が生じている事など、新たな知見が得られている。また、原子レベルで薄くフラットな原子層半導体を別の物質と重ねることで、新しい機能や物性を付加することができる。実際に図6に模式的に示すように、二セレン化モリブデン(MoSe₂)と酸化物磁性体・伝導体を重ねた人工ヘテロ構造を作製することで、原子層半導体中の励起子や荷電励起子が、ヘテロ界面近傍のスピニや電荷の影響を強く感じ、その光学的性質が大きく変調されるなど新たな物性も発現しうることを見出している[18]。

5. 原子層半導体のフォトニクスデバイス

これまでの研究成果を基盤として、原子層半導体のバレースピン制御を利用したデバイス実現に向け、

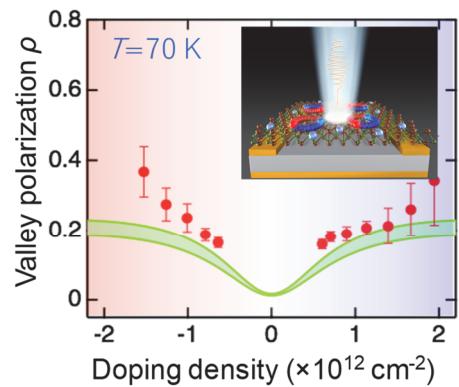


図5 バレースピン制御とその模式 [15]

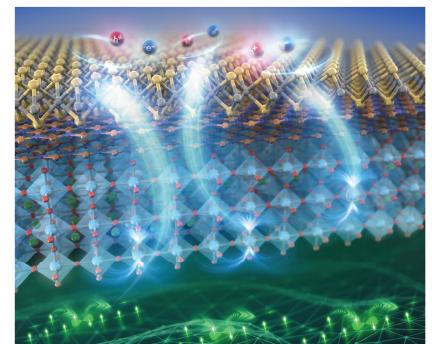


図6 人工ヘテロ構造(原子層半導体/酸化物)でのイメージ図[18]

名古屋大学の竹延教授らとの共同研究により、原子一層からなる電界発光デバイスや微小共振器作製などの研究を進めている[13]。これらは、電流注入による発光変調デバイス、また共振器を利用した低閾値レーザー、の基盤技術として位置付けられる。原子層半導体は、結晶成長技術を工夫することによって、面内接合した WSe₂/MoS₂ ヘテロ構造を実現することができる。このヘテロ界面でのバンドアラインメントの不連続を利用し、電子とホールを電極から注入し再結合させることで、図 7 に示すように電界発光とその実空間イメージングに成功した。さらに、原子層物質と透明微小球からなる微小共振器発光デバイスを作製し、光が微小共振器に閉じ込められ周回する、ウイスパリング・ギャラリー・モードによる強い光閉じ込めと、高い発光効率により低閾値の非線形な光放出が観測されている（図 8）。さらに、歪と電流注入により空間反転対称性を破ることで、室温においてバレー間のキャリア数の不均衡を創り出し、円偏光した新たなデバイスの実現に成功するなど研究進展している。このように、物理などの基礎学術のみならず、バレートロニクスの光学応用の展開である「バレースピンフォトニクス」を体現するデバイスの実証に成功している。

6. まとめ

本稿では、グラフェンの研究が契機となって始まった、“beyond graphene”とも呼ばれる極限的な原子層二次元半導体における最近の研究進展について、多くの共同研究を通じてなされた我々の成果を中心に紹介した。原子レベルで薄く、かつ、バレースピンと呼ばれる物理自由度を内在する、究極の半導体である原子層半導体は、新しい半導体物理や光科学の研究の舞台であると同時に、バレースピンを利用したフォトニクス応用（バレースピンフォトニクス）という新しい研究の方向性を提示しており、これからも数多くの研究がなされ更に発展してゆくことが期待される。

謝辞

本稿で紹介した一連の研究を行うにあたり御協力を頂いた、竹延大志、北浦良（名古屋大学）、江田剛輝（シンガポール国立大学）、小鍋悟（法政大学）、渡辺賢司、谷口尚（NIMS）、菅大介、島川祐一、宮内雄平（京都大学）各氏、ならびに研究分野所属の博士研究員、学生諸氏に深く感謝します。

参考文献

- [1] S. Iijima, *Nature*, **354**, 56, (1991).
- [2] K. S Novoselov, A. K Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I.V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Nature* **306**, 666 (2004).
- [3] K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, and T. F. Heinz, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 136805 (2010).
- [4] D. Xiao, G-B. Liu, W. Feng, X. Xu, and W. Yao, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 196802 (2012).
- [5] R. Matsunaga, K. Matsuda, and K. Kanemitsu, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 037404 (2011).

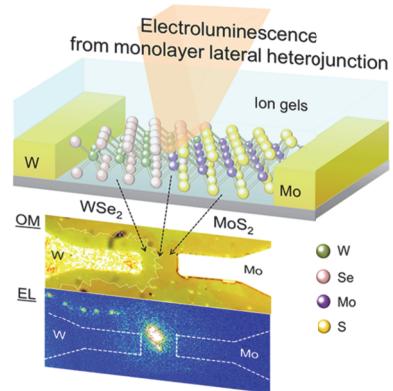


図 7 原子層ヘテロデバイス構造の模式図と電界発光イメージ [13]

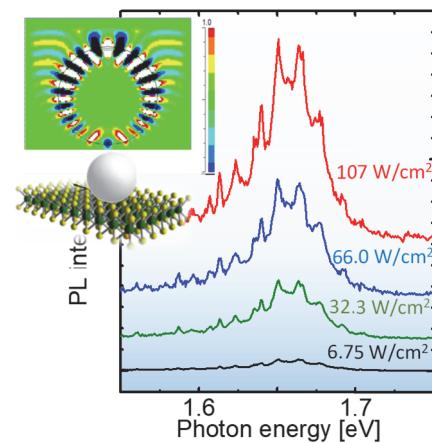


図 8 微小共振器発光デバイスの模式図とスペクトル

- [6] Y. Miyauchi, M. Iwamura, S. Mouri, T. Kawazoe, M. Ohtsu, and K. Matsuda, *Nature Photonics*, **7**, 715 (2013).
- [7] N. Akizuki, S. Aota, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, *Nature Commun.*, **6**, 8920 (2015).
- [8] F. Wang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, K. Hiraoka, S. Mouri, Y. Ohno, and K. Matsuda, *Nature Commun.*, **6**, 6305 (2015).
- [9] S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, *Nano Lett.*, **13**, 594 (2013).
- [10] D. Kozawa, R. Kumar, A. Carvalho, K. K. Amara, W. Zhao, S. Wang, M. Toh, R. M. Ribeiro, A. H. Castro Neto, K. Matsuda, and G. Eda, *Nature Commun.*, **5**, 4543 (2014).
- [11] Y. Tsuboi, F. Wang, D. Kozawa, K. Funahashi, S. Mouri, Y. Miyauchi, T. Takenobu, and K. Matsuda, *Nanoscale* **7**, 14476 (2015).
- [12] T. Yamaoka, H-E. Lim, S. Koirala, K. Shinokita, M. Maruyama, S. Okada, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, *Adv. Func. Mater.*, **28**, 1801021 (2018).
- [13] M-Y. Li, J. Pu, J-K. Huang, Y. Miyauchi, K. Matsuda, T. Takenobu, and L-J Li, *Adv. Func. Mater.*, **28**, 1706860 (2018).
- [14] Y. Miyauchi, S. Konabe, F. Wang, W. Zhang, A. Hwang, Y. Hasegawa, L. Zhou, S. Mouri, M. Toh, G. Eda, and K. Matsuda, *Nature Commun.*, **9**, 2598 (2018).
- [15] K. Shinokita, X. Wang, Y. Miyauchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Adv. Func. Mater.*, **29**, 1900260 (2019).
- [16] K. Tanaka, K. Hachiya, W. Zhang, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, *ACS Nano*, **13**, 12687 (2019).
- [17] K. Shinokita, X. Wang, Y. Miyauchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, and K. Matsuda, *Phys. Rev. B* **100**, 161304 (R) (2019).
- [18] Y. Zhang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Goto, D. Kan, Y. Shimakawa, Y. Moritomo, T. Nishihara, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, *Adv. Mater.*, **32**, 2003501 (2020).
- [19] K. Shinokita, Y. Miyauchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nano Lett.* **21**, 5938 (2021).
- [20] 松田一成, 応用物理学会誌, **86**, 369 (2017).

産業界の技術動向

誰もが分かり合えるユニバーサルコミュニケーションの実現に向けた取り組み

国立研究開発法人情報通信研究機構 ユニバーサルコミュニケーション研究所
内 元 清 貴

1. はじめに

近年、国際化とともに多文化共生の社会になりつつあり、コミュニケーションの内容や手段は多様化しています。コミュニケーションのインフラとしての情報通信技術は進化し続けており、全てのモノがインターネットに接続可能となる IoT (Internet of Things) 技術により、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）の境目はなくなりつつあります。両空間に溢れる多種多様かつ膨大な情報（ビッグデータ）を人工知能（AI）技術により解析し、新たな価値を創出することも可能となってきました。これにより、言葉の壁や少子高齢化に伴う人手不足等の社会課題の解決に繋がる糸口も見つかりつつあります。しかしそれでも、ビッグデータから本当に価値のある情報を見出し、誰もがその情報を駆使して相互に理解し合い、次の行動を適切にとれるようになるかというとそれは容易なことではありません。

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）ユニバーサルコミュニケーション研究所では、誰もが分かり合えるユニバーサルコミュニケーションの実現を目指し、図1に示すように、日本語を中心とした分野に特化した高品質・大規模データベースを核とするAI研究基盤を構築し、その基盤を活用した3つのコア技術、すなわち、ビジネスで使える低遅延のAI同時通訳を可能とする多言語コミュニケーション



図1：ユニバーサルコミュニケーション研究所における研究開発と社会実装

ン技術、仮想的人格を用いてユーザの興味・背景に合わせた対話を可能とする社会知コミュニケーション技術、パブリック／プライベートデータを連携させて実世界の状況分析・予測を可能とするスマートデータ利活用基盤技術及びそれらの技術を社会実装する上で必要となる、コミュニケーションの質向上させる技術を研究開発しています。これにより、国際ビジネス、高齢者ケア、環境リスク低減等における言葉の壁・知識の壁・データ利活用の壁をなくし、社会課題の解決や新たな価値創造等に貢献します。

本稿では、これらの技術のうち、言葉の壁をなくす多言語コミュニケーション技術にフォーカスを当て、その基盤技術としてこれまで我々が進めてきた多言語音声翻訳技術の研究開発と社会実装の状況、及び、今後の計画についてご紹介します。

2. 多言語音声翻訳技術の研究開発

新型コロナウィルスがまん延する2019年以前までは、訪日外客数は増え続け、政府は2020年の目標を4,000万人としていました。これに先立ち、総務省は2014年4月に、世界の「言葉の壁」をなくし、グローバルで自由な交流を実現することを目標とする「グローバルコミュニケーション計画¹⁾」を発表しました。この目標を達成し、言葉で困らない社会を実現するために、NICTでは民間企業と共にオールジャパン体制で多言語音声翻訳技術の性能向上と対応可能な言語・分野の拡大及び実証実験・社会実装を進めてきました。

NICTは独自の多言語音声翻訳技術をネットワーク型の音声翻訳アプリ“VoiceTra[®]（ボイストラ）²⁾”に実装しApp StoreやGoogle Playで公開しています。VoiceTraは旅行会話に好適で、テキストでは31言語間の翻訳に対応しています。スマートフォンから入力された音声は、図2のようにネットワークを介してサーバに送信され、サーバ内で音声認識、機械翻訳、音声合成の処理がなされた後、翻訳された音声がそのサーバから再びネットワークを介してスマートフォンに返送され再生されます。サーバ内の各処理は、いずれも、言葉のデータベース（コーパス）から深層学習により学習し処理する機構を探

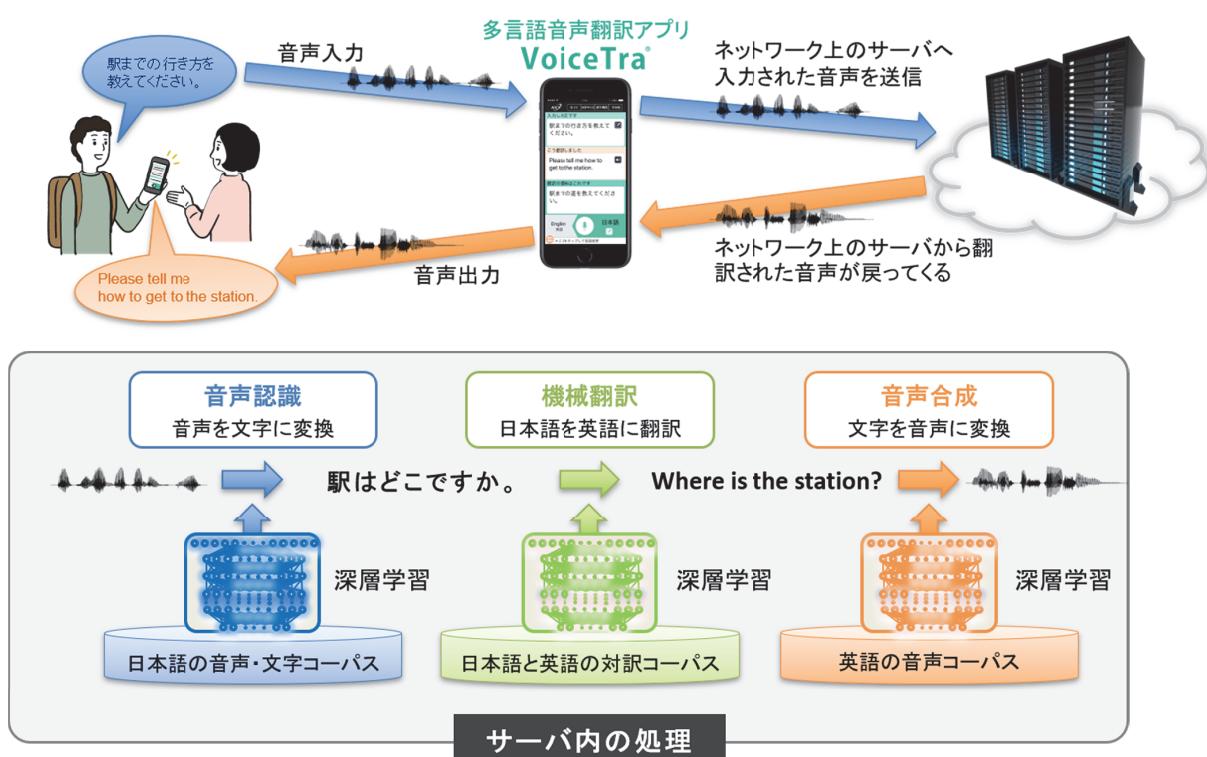


図2：ネットワーク型多言語音声翻訳の仕組み

用しています。

音声翻訳の精度は基盤となるコーパスの量と質に大きく依存します。NICTでは、対象分野を絞り、VoiceTraの利用ログ情報も活用して効率良くコーパスを構築することにより、高い精度を実現してきました。これまで、旅行会話から、日常会話を対象とした生活、災害、医療の分野へと対応範囲を広げてきました。しかし、言語や分野、発話スタイルによっては十分な性能が得られない場合があります。性能向上の鍵となるのは大規模・高品質のコーパスの収集・構築です。NICTでは、低コスト化や多分野化、技術の高精度化の加速のため、産学官の協力により翻訳データ（対訳コーパス）をNICTに集積する“翻訳バンク^③”の運用を開始し、拡充しています。この翻訳バンクの枠組みでは、提供いただいた対訳コーパスを用いて翻訳システムを高精度化し、提供元の組織に対し、高精度化した翻訳システムを安くライセンス供与しています（図3参照）。これまでに、中央官庁、地方自治体、民間企業、各種団体など、データを提供してくださった組織は80者を超えるました。例えば、医薬業界については、アストラゼネカから提供いただいた対訳コーパスを用いて翻訳精度を向上させ、その高精度化した翻訳システムを活用することにより、アストラゼネカ社内での翻訳業務の労力を半分にすることができるという画期的な効果が確認されました⁴。対訳コーパスの提供は、医薬だけでなく、特許や金融など様々な分野に広がっています。これに伴い、対応できる言語や分野も増えつつあります。

一方、音声コーパスの収集・構築に関しては、VoiceTraなどのスマートフォン上のアプリを介して実利用データが簡便に収集できるようになってきました。このようにして収集したデータは、音声コーパスの構築コスト削減に貢献しています。さらに翻訳バンクの枠組みを音声コーパスにも適用することにより、種々の発話スタイルの音声コーパスの収集、さらには、音声認識の精度向上にもつながると期待されます。VoiceTraの利用ログ情報などの実利用データは他の用途にも役立つことが確認されています。NICTは、VoiceTraの実利用データを活用することにより、複数の言語に対し、入力音声の言語がどの言語であるかを瞬時にかつ高精度で識別できる技術を開発しました⁵。音声を入出力のインターフェースとして利用するアプリやシステムの多くは、入出力の言語を予め指定する必要がありますが、この自動言語識別技術を利用することにより、予め言語を指定する必要がなくなります。例えば、案内ロボットはタッチパネルなどの言語選択が不要となり、コールセンターでは適切な言語で対応できるオペレータにスムーズにつなぐことができるようになります。この自動言語識別技術はVoiceTraにも組み込まれており、手軽に試していただけます。

これらの技術は、以下に述べるように、産学官連携による実証実験を経て、様々な形態で民間サービ

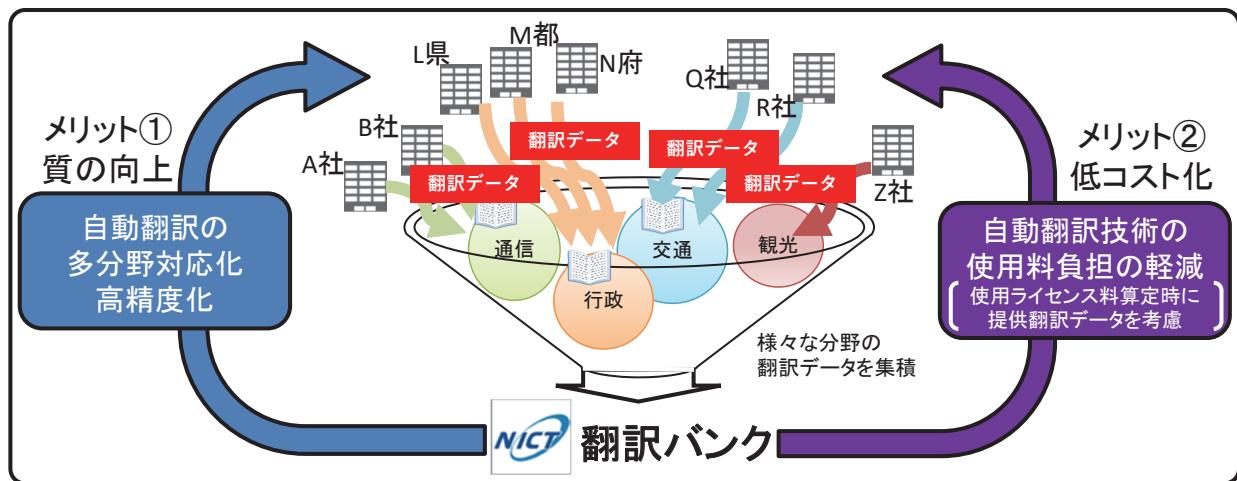


図3：翻訳バンクの枠組み

ス等に採用されるようになりました。今や、多言語音声翻訳技術は普通に使われる技術となりました。2020年以降のコロナ禍により、インバウンドの需要は減少傾向ですが、その一方で、在日外国人への対応やリモート観光、リモート会議での活用などの需要が増えつつあります。

3. 産学官連携による実証実験

グローバルコミュニケーション計画が発表された当初、グローバルコミュニケーション計画の推進に資することを目的として、2014年12月にはグローバルコミュニケーション開発推進協議会⁶を設立しました。さらに、2015年10月には、総務省委託研究開発・多言語音声翻訳技術推進コンソーシアム⁷を設立し、NICTと民間企業が協力してハードとソフトの両面で社会実装に向けた研究開発や実証実験に取り組み、協議会会員の独自の実証実験も含め、様々なシーンで、様々なユーザインタフェース（UI）により技術検証を行いました。例えば、タクシー分野では、KDDIが運転座席・後部座席運動型の音声翻訳機を開発し、鳥取市、東京都、那覇市などで実証実験を実施しました⁸。医療分野では、富士通研究所がタブレット型やIDカード型ハンズフリー音声翻訳端末⁹などを開発し、全国各地の病院や介護施設で臨床試験や実証実験を行いました。鉄道分野では、京浜急行電鉄、ブリックス、日立グループとの共同研究により、駅構内での実証実験を行い、その成果を活用して、日立ソリューションズ・テクノロジーが新たな鉄道向け多機能翻訳アプリ“駅コンシェル^{®10}”を開発・商用化し、2018年7月、京浜急行電鉄の全駅（泉岳寺駅を除く）への導入が実現しました¹¹。ここでは、鉄道分野でよく用いるフレーズへの対応を強化して翻訳性能を向上させるとともに、UIの工夫や、よく使うフレーズを自由に登録・編集できる定型文機能、電話通訳を簡単に呼び出せる機能などを組み合わせることにより、鉄道分野に適したアプリを実現しました。災害分野では、NTT東日本が、東京都の防災訓練などにおいて、避難情報の伝達や避難者の誘導にVoiceTraやパナソニックのメガホン型翻訳機“メガホンヤク¹²”などを活用する実証実験を行いました。また、消防庁の消防研究センターとの共同研究に基づき、VoiceTraに定型文機能を追加した救急隊用多言語音声翻訳アプリ“救急ボイストラ”を開発しました。このアプリは消防訓練などで救急隊が活用しており、救急搬送時の実務などでの実利用も全国的に広がっています。特に、非常時の利用では、定型文機能が有用です。“救急ボイストラ”は2021年1月1日時点で、47都道府県における726消防本部中631本部（86.9%）で導入済みです。警察関連では、27都道府県の警察でVoiceTraが試験利用されており、岡山県警や沖縄県警、警視庁、徳島県警のように独自のアプリとサーバによる運用を始める県警も増えています。警察庁も2020年に独自運用を始めました¹³。

日本に長期滞在する外国人も多く、自治体での多言語対応も求められています。NICTでは、委託研究「自治体向け音声翻訳システムに関する研究開発¹⁴」により、自治体窓口業務を対象としたコーパスの構築や音声翻訳サーバ、アプリの試作を行い、前橋市、板橋区、綾瀬市などの自治体窓口で実証実験を行いました。凸版印刷はこの成果を活かし、2018年7月には、訪日・在日ベトナム人向け音声翻訳アプリ“NhaTra（ニヤトラ）¹⁵”を、2019年8月1日には、フィリピン人向け音声翻訳アプリ“SalamaTra（サラマトラ）¹⁶”の無償提供を開始しました。

4. 多言語音声翻訳技術の社会展開

分野や使われるシーンに合わせた商用製品・サービス¹⁷も複数生まれました（図4参照）。例えば、凸版印刷の音声翻訳アプリ“VoiceBiz[®]（ボイスビズ）¹⁸”、日本電気の多言語音声翻訳サービス、パナソニックの多言語音声翻訳サービス“対面ホンヤク¹⁹”、ソースネクストのクラウド型音声通訳機“POCKETALK[®] W／POCKETALK[®] S²⁰”、コニカミノルタの医療通訳タブレット“MELON²¹”、ハイブリッド式多言語通訳サービス“KOTOBAL²²”、電話通訳と自動音声翻訳を組み合せたブリックスのサービス“ネイティブheart^{®23}”などです。凸版印刷の音声翻訳アプリは、日本郵便「郵便局窓口音声

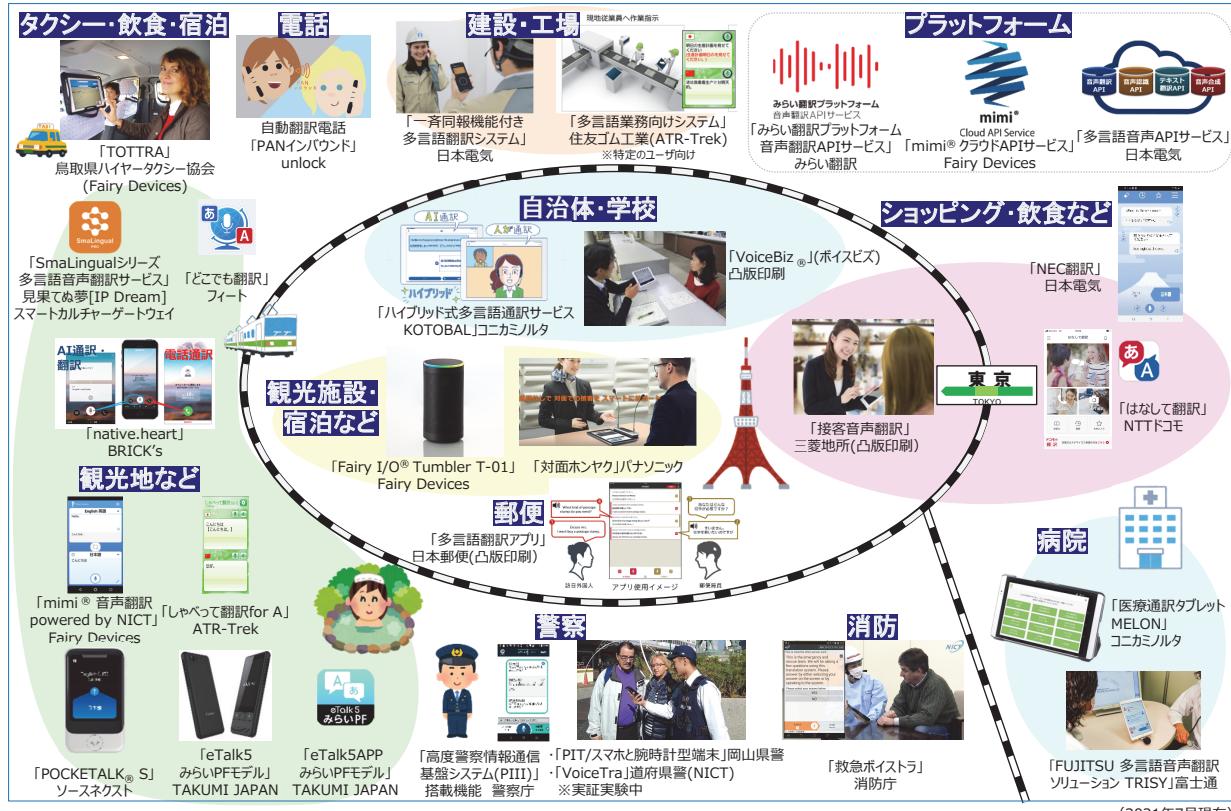


図4：NICT 多言語音声翻訳技術の社会展開例（一部）

翻訳²⁴」として、全国約20,000の郵便局（簡易郵便局は除く）に導入されました。自治体窓口での実証実験を踏まえ、綾瀬市など全国70団体へ導入されるなど、自治体等による採用も広がっています。警察庁では、NICTが開発した多言語音声翻訳機能を搭載したスマートフォン合計5万台を導入し、全国47都道府県警への配備を進めています。これらの商用製品・サービスは、NICTの多言語音声翻訳技術のライセンスを受けて実現されています。ライセンスを受けることにより、独自にサーバを立ててサービスを提供することが可能となります。2019年4月には、みらい翻訳が、多言語音声翻訳プラットフォームのサービス提供と音声翻訳ソフトウェアのライセンス事業を開始しました²⁵。この他、音声翻訳のAPIサービスについてはフェアリーデバイセズ²⁶や日本電気²⁷も提供しています。これらのプラットフォームサービスを利用すれば、NICTから直接ライセンスを受けなくても、多言語音声翻訳技術を使った独自のサービスを展開できます。多言語音声翻訳技術を使う目的はコミュニケーション支援であり、民間サービスでは、総合的にコミュニケーションを支援するために、他のツールや技術と組み合わせ、様々な工夫が行われています。例えば、地図などを併用したり、電話通訳などのサービスにシームレスにつないだりと、使われるシーンに合わせて、ベストミックスとなる組み合わせを見つける努力がなされてきました。今後も、さらに有用な使い方のアイデアが生まれ、新しいサービスにつながることを期待しています。

5. 多言語音声翻訳技術のさらなる展開

グローバル化が加速する中、ビジネス・国際会議などの講演や議論の場面、企業での協業の場面などのニーズが広がりつつあります。そのような状況に鑑み、総務省は、2020年3月に「グローバルコミュニケーション計画2025²⁸」を発表しました。この計画では、大阪・関西万博が開催される2025年を見据え、これまでの一文単位の「逐次翻訳」から、「同時通訳」へと技術を進化させ、ビジネスや国

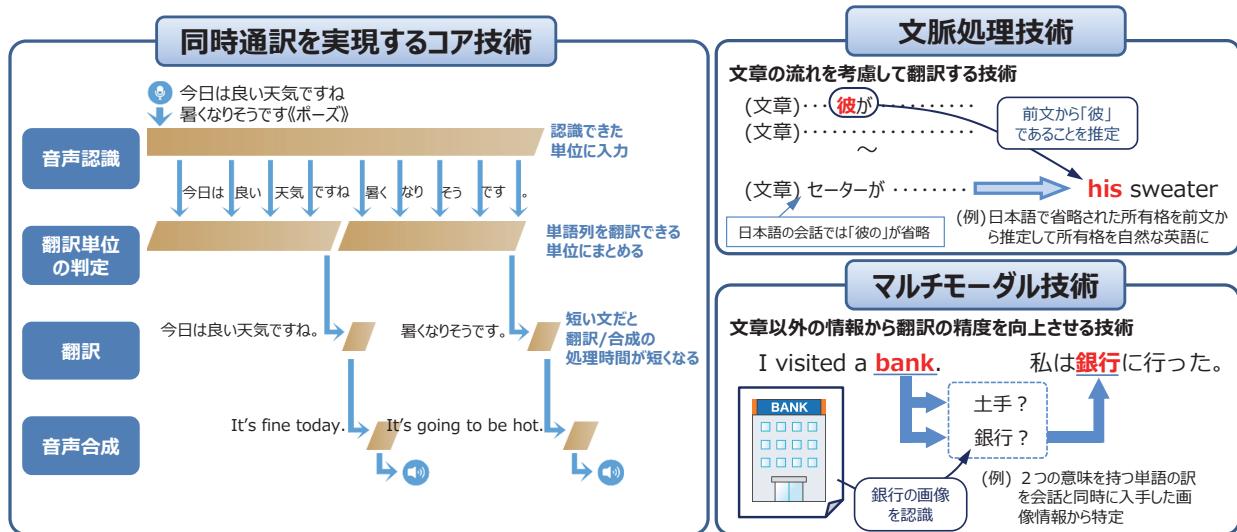


図5：AI同時通訳実現のための革新的多言語翻訳技術の研究開発
(https://www.soumu.go.jp/main_content/000678485.pdf より抜粋)

際会議等の場面においても利用可能な実用レベルのAI同時通訳を実現することを目指しています。コロナ禍の影響により生活スタイルが大きく変化したことにより、リモートによる多言語対応のニーズも増え、計画の重要性もますます高まっています。上述の多言語音声翻訳は、入力の発話を一文単位で翻訳する「逐次翻訳」のため、ビジネスシーンのように長い発話のやりとりがある場面では、翻訳結果が得られるまでに時間がかかってしまいます。また、省略の多い日本語を外国語に翻訳する際に、話の流れを考慮して省略を適切に補うといったことができません。これらの課題を解消するため、人間の同時通訳者のように発話の途中でも訳出できるところから訳出するとともに、文脈などから多様な情報を取り込んで曖昧性を解消し、低遅延と高精度を両立させる必要があります。そのため、NICTでは、民間企業とともに、図5に示すような、文より短い翻訳単位で訳出する技術、文章の流れを考慮して翻訳する文脈処理技術、文章以外の情報から翻訳の精度を向上させるマルチモーダル技術などの研究開発に取り組み、2025年を目途に実用レベルのAI同時通訳の実現を目指すとともに、例えば、図6に示すような講演通訳、ガイド通訳、会議通訳、遠隔協業など、様々な場面で活用されるよう、技術の普及に努めます。

6. おわりに

本稿では、誰もが分かり合えるユニバーサルコミュニケーションの実現に向けた取り組みとして、NICTユニバーサルコミュニケーション研究所が研究開発に取り組んでいる技術のうち、言葉の壁をなくす多言語コミュニケーション技術にフォーカスを当ててご紹介しました。2025年にはAI同時通訳が普通に使われる技術になることを目指します。さらに、総務省が推進するグローバルコミュニケーション計画2025では、2025年の5年先、2030年を目途に、シビアな交渉にも使える同時通訳を実現するという目標が掲げられています。この一段高い目標を達成するには、言葉の壁をなくすだけではなく、相互理解を支援する工夫も必要となります。そのために、図1に挙げた3つのコア技術を有機的に結びつけ、その課題を克服したいと考えています。



図 6：AI 同時通訳技術の社会実装例（イメージ）

注

- 1 https://www.soumu.go.jp/main_content/000285578.pdf
- 2 <https://voicetra.nict.go.jp/>
- 3 <https://h-bank.nict.go.jp/>
- 4 <https://h-bank.nict.go.jp/event/pdf/AZTanaka190306.pdf>
- 5 <https://www.nict.go.jp/press/2018/10/18-1.html>
- 6 <https://gcp.nict.go.jp/>
- 7 <https://www.nict.go.jp/press/2015/10/26-1.html>
- 8 <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2019/11/12/4134.html>
- 9 <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2017/09/19.html>
- 10 https://www.hitachi-solutions-tech.co.jp/eos/Ruby_Concierge/railway_index.html
- 11 https://www.keikyu.co.jp/company/news/2017/20180328HP_17271TS.html
- 12 <https://panasonic.biz/cns/invc/megahonyaku/>
- 13 <https://www.nict.go.jp/press/2020/06/25-1.html>
- 14 https://www.soumu.go.jp/main_content/000684191.pdf
- 15 https://www.toppan.co.jp/news/2018/07/newsrelease180704_1.html
- 16 <https://www.toppan.co.jp/news/2019/08/newsrelease190801.html>
- 17 https://gcp.nict.go.jp/news/products_and_services_GCP.pdf

- 18 <https://www.toppan.co.jp/news/2018/05/newsrelease1805141.html>
- 19 <https://panasonic.biz/cns/invc/taimenhonyaku/>
- 20 <https://pocketalk.jp/>
- 21 <https://www.konicaminolta.jp/melon/>
- 22 <https://www.konicaminolta.jp/kotobal/>
- 23 <https://www.bricks-corp.com/news/20190619-2>
- 24 <https://www.toppan.co.jp/news/2018/04/newsrelease1804252.html>
- 25 https://miraitranslate.com/uploads/2019/04/MiraiTranslate_MultilingualPlatform_pressrelease_20190426.pdf
- 26 <https://fairydevices.jp/price>
- 27 https://jpn.nec.com/cloud/service/platform_service/multilingual/index.html
- 28 https://www.soumu.go.jp/main_content/000285578.pdf

新設研究室紹介

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（橋本研究室）

社会はAIやIoTなどますます情報システム基盤に依存するようになってきています。人命や財産を取り扱う情報システムには高い信頼性が求められます。トランジスタの微細化によってもたらされた半導体デバイスの極低電力化・極小体積化は、環境に溶け込んだアンビエントコンピューティングを実現しつつあります。一方で、トランジスタの微細化が不透明さを増す中、新しい原理に基づいたコンピューティングの模索が続いています。本分野では「コンピューティング基盤を創る」を掲げて研究を行っています。

高信頼コンピューティング

地上には宇宙線に起因する粒子が降り注ぎ、毎秒いくつもの粒子が我々の体も通り抜けています。この粒子が運悪くコンピュータのメモリ付近でシリコン原子と核反応を起こすと、ソフトエラーと呼ばれるビット反転が発生します。ソフトエラーは、システムの誤動作やクラッシュを招き、自動運転や介護ロボットでは人命の危機を招きます（図1）。本研究室では、実機評価とシミュレーションによるソフトエラーメカニズムの解明、システムのエラー耐性評価技術の開発を行っています。

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

新原理コンピューティング

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

アンビエントセンシング

我々の身の回りにはこれまでセンシングされていなかったけれども、生活の質向上や人間関係の円滑化に有益な情報が多くあります。プライバシーに配慮した方法で、センシングを意識することなく情報収集可能なセンシングデバイスの開発や（図2）、それを用いた人間とコンピュータのかかわりについて研究を進めています。



図 1

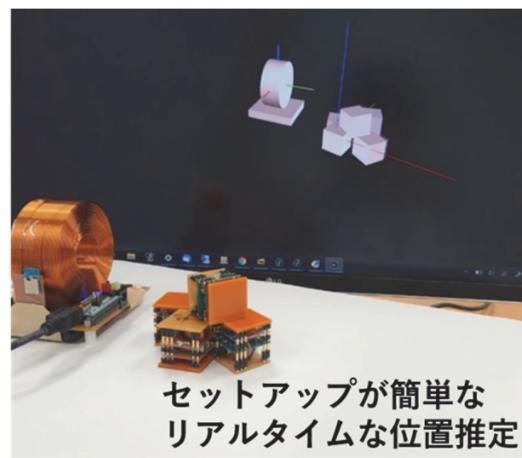


図 2

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）

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研）

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

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創生部門先進電子材料分野

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）

知能メディア講座コンピュータビジョン分野（西野研）

通信情報システム専攻

通信システム工学講座ディジタル通信分野（原田研）

通信システム工学講座伝送メディア分野

通信システム工学講座知的通信網分野（大木研）

集積システム工学講座情報回路方式分野（佐藤研）

集積システム工学講座超高速信号処理分野（橋本研）*

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（松田哲研）

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プラズマエネルギー研究分野（長崎研）

エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田一研）☆

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（橋口研）

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野（小嶋研）

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

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）

システム基礎論講座 システム創成論分野

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

「多人数の呼吸を非接触かつ同時に計測する呼吸空間クラスタリング技術」

実現が期待される超スマート社会では、職場・学校・保育所・デイケア・病院など多くの場面で、多人数の体調をさりげなく見守るサービスが当然のインフラとなると考えられている。現在、例えば保育園の午睡では数十人の乳幼児の姿勢や呼吸を目視によって数分ごとに確認する必要があり、保育士らの負担は大きい。こうした負担を緩和すべく、我々はレーダーを用いた非接触見守りセンサ（図1）を開発し、7人の被験者が参加するレーダー計測実験（図2）を実施した。同レーダーは79 GHz帯、帯域幅4 GHzのミリ波レーダーであり、送信3素子、受信4素子を有する多入力多出力アレイレーダーである。このアレイの仮想ベースライン長5.5波長で定まる角度分解能は約8.5度であるため、アンテナからの距離35 m以上ではクロスレンジ分解能は0.5mを超え、一般的な肩幅0.4 mを上回り、近接する人体を分離できなくなる。分解能向上には相関行列の固有値を用いる方法やスパース性を用いる方法などが知られているが、いずれも高いSN比が求められ、アンテナから遠く離れた人体の計測には適さない。

従来、関連研究ではレーダーディメージングにより対象人体の座標を求め、その座標位置での信号の位相変化から呼吸運動を抽出する処理が用いられてきた。我々は、この処理の順番を逆転させ、対象者の存在しない場所も含めた全ての座標位置から「呼吸」の推定を試み、呼吸パターンに個人差があることを利用した信号分離手法を開発した。開発手法では室内位置を表す2次元の空間座標に加え、過去の呼吸数の履歴を新たな次元として取り入れた多次元の「呼吸空間」を提唱し、この空間を利用した「呼吸空間クラスタリング法」を開発した。提案する呼吸空間クラスタリング法により、アレイアンテナのベースライン長で決まる従来の分解能の限界を超えて、近接する人体の呼吸を高精度かつ安定に同時計測することに成功した。7人の被験者が参加する実験（図2）では、提案する呼吸空間クラスタリング法により全員の呼吸運動がレーダーにより正しく計測され、各被験者が装着したベルト型呼吸計の変位とよい一致が見られる事を示した（図3）。提案法により推定された呼吸間隔の平均誤差は172 msであり、典型的な呼吸間隔（3-5 s）と比べて十分に高い精度が達成され、多人数の呼吸同時計測が実証された。

参考文献 [1] T. Koda, T. Sakamoto, et al., IEEE Access, vol. 9, pp. 106895-106906, 2021.

[2] T. Sakamoto, et al., PCT International Application no. PCT/US21/20315 (2021).



図1 開発したミリ波非接触見守りセンサ



図2 複数被験者（7人）のレーダー計測

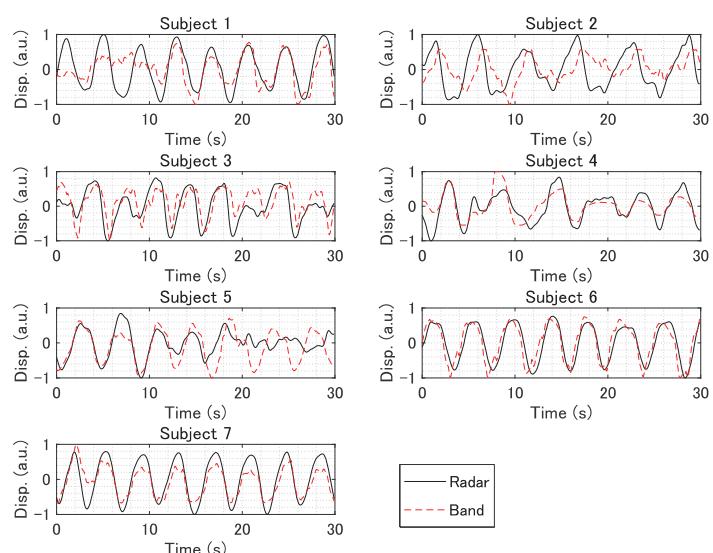


図3 被験者7人の呼吸運動に伴う皮膚変位波形をレーダ（黒線）とベルト型接触呼吸計（赤破線）で同時に計測した例

電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

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

超伝導マグネットによる精密な高磁界発生についての研究

大空間における高磁界の発生は、超伝導線を使った超伝導マグネット(電磁石)を用いてのみ実現でき、銅線やアルミニウム線を使った常伝導マグネットや永久磁石では実現できません。例えば、病院にあるMRIでは、人体が入るような空間に1.5 T、3 Tといった高磁界を発生しなければなりませんが、このような磁界は、超伝導マグネットを用いることによってのみ発生できます。がん治療や物理学研究のための粒子加速器において、荷電粒子の軌道を制御するために用いられるマグネットも高磁界を大空間に発生する必要があり、超伝導マグネットが用いられています。しかし、MRIや粒子加速器に用いられるマグネットでは、高いだけではなく精密な磁界、すなわち、空間分布が精密に制御され時間的にも極めて安定な磁界の発生が求められ、要求される磁界精度は相対値で1 ppmから0.01%と非常に高いものです。超伝導線には、主に4.2 Kの液体ヘリウムで冷却して用いられる低温超伝導線と、数十ケルビン以上で用いることができる高温超伝導線に分類できます。高温超伝導線は、比較的高い温度における使用が可能であることから、冷却に必要な電力の削減、比熱が温度と共に大きくなることに起因する熱擾乱に対する高い超伝導安定性といった利点から、注目されています。

しかし、実用的な高温超伝導線は幅が4 mm程度のテープ形状をしており、マグネットの中でテープ面に垂直な磁界成分が加わると、超伝導、つまり極低抵抗に起因して、「持続的な」渦電流(persistent eddy current)が流れ、この設計時には想定されない持続的渦電流が磁界の空間分布や時間的安定度を損なう可能性があります。我々の研究室では、希土類銅酸化物薄膜高温超伝導線を用いたマグネットにおける、持続的渦電流が発生する磁界(「遮蔽電流磁界」と呼ばれます)が磁界精度に与える影響について研究してきました。図1は、医療用粒子加速器への応用を目指して試作した試験用高温超伝導マグネットにおける磁界の測定結果です。試験用マグネットは液体ヘリウムを用いず、極低温冷凍機と超伝導コイルを熱伝導部材で接続し、熱伝導により冷却しています。実験では、粒子線がん治療装置における応用を念頭に、発生磁界を繰り返し変化させ、粒子線照射に用いる消磁過程の途中の磁界が一定の「ステップ」における、持続的渦電流のわずかな減衰による磁界のドリフト、繰り返し励消磁をおこなったときの磁界の再現性を調べたものです。磁界のドリフト、再現性ともに0.01%以下と十分小さいことを確かめることができました。

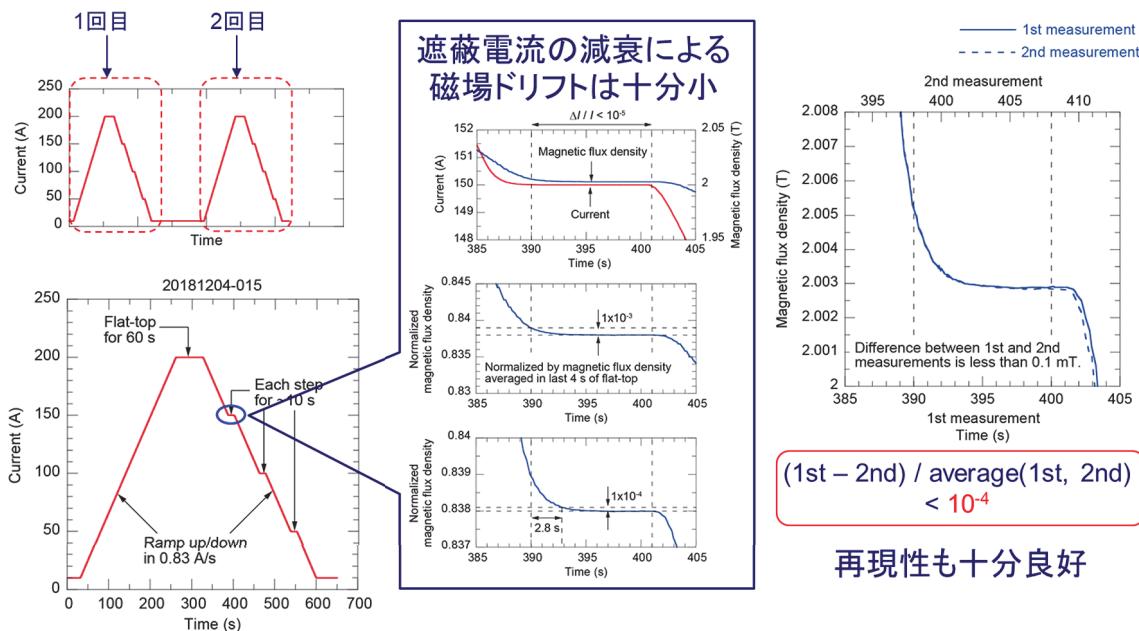


図1 試験用高温超伝導マグネットにおける磁界測定結果(磁界のドリフトと再現性)

再現性も十分良好

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/index.html>

「風力熱 / 蓄熱発電用回転型誘導発熱機の基礎的検討」

風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入が進むにつれて、その出力安定化が重要な課題となっている。代表的な方策としては、大規模電力ネットワークによる出力平準化が挙げられるが、待機火力発電所が必要な点からその規模拡大には制限がある。そこで、電池と比較してはるかに低コストに蓄エネルギーが可能な蓄熱技術が注目されている。例えば、風力熱発電は、風力エネルギーを熱に変換して蓄積し、必要なときに蒸気タービンで発電するシステムであり、電池を使用して出力を安定化するより、低成本で長時間の安定出力を保証できると試算されている [1]。風力を熱に変換する仕組みとしては、誘導加熱の原理により直接運動エネルギーを熱に変換する回転型誘導発熱機が効率的と考えられる。風力に加えて、太陽光による電力を用いてモータで発熱機を駆動することで、太陽光からの蓄エネルギーも可能である(蓄熱発電)。モータによって駆動する場合と風力によって駆動する場合とで、回転数が大きく異なるが誘導加熱の原理は共通であるため、発熱機の共通する設計指針を与え、概念設計を可能にする理論が求められる。

図1 (a) は回転型誘導発熱機の概念図である。発熱部分である円筒導体を図1 (b) のように平面導体板とみなし、回転する磁極を進行波磁界で近似する。導体部分に磁束を通すためには透磁率は高い方がよいが、表皮厚程度浸透すると磁束密度が一様になるとすると透磁率は小さい方がよい。そこで、半径方向 (図の y 方向) に透磁率が高く、円周方向 (x 方向) に透磁率が低い磁気異方性媒質を用いるとする。この場合の渦電流界には解析解があり理論的な発熱量を算出することができる。最適な透磁率、導電率および極数を近似的に求めることができ、軸方向単位長さあたりの発熱量 W の最大値は、

$$W_{\max} = \pi^2 R^2 f_0 B_a^2 / \sqrt{2 / \mu_0} \quad (1)$$

で評価される [2]。ここで R は発熱導体の内半径、 f_0 は回転数、 B_a は磁極の磁束密度、 μ_0 は磁気定数である。風力で駆動する場合を考え、 $f_0 = 0.25$ Hz、 $R = 2.5$ m、 $B_a = 1$ T を仮定すると、 W_{\max} は 8.8 MW となる。モータ駆動の場合は回転数が大きくなるが、回転数の平方根に反比例して半径 R を小さくすることで同じ発熱量が得られる。このときの透磁率・導電率・極数の最適値は変わらない。すなわち、スケール則が成り立ち、式 (1) は風力熱 / 蓄熱発電における発熱量と発熱機の回転数や発熱機サイズとの関係を見積もるのに便利であり、蓄熱システムの概念設計の際に有用である。有限要素磁界解析による回転型誘導発熱機の検討によると、解析解は近似式として十分な精度を持つことが示されている(図2)。

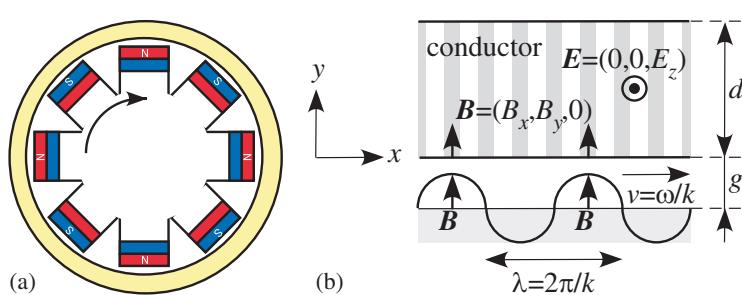


図1 回転型誘導発熱機の概念図：(a) 磁極と円筒型導体、
(b) 進行波近似

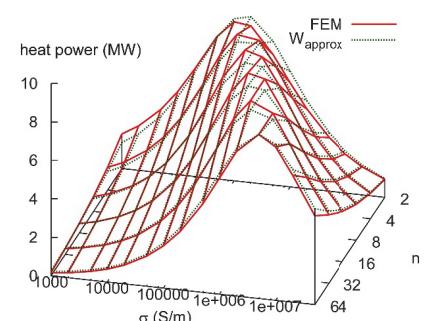


図2 有限要素渦電流解析 (FEM)
と解析解 (W_{approx}) : n は磁極数、
 σ は発熱導体の導電率

[1] T. Okazaki, Y. Shirai, T. Nakamura, *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 332-338, 2015.

[2] T. Matsuo, T. Okazaki, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, 8110605, 2017.

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村（武）研究室）

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

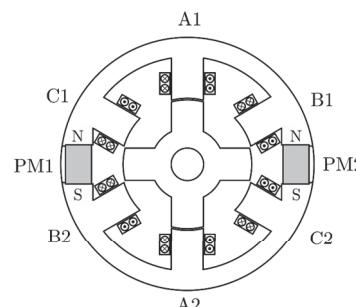
「可変磁束技術を実現する永久磁石補助スイッチトリラクタンスマータの研究」

スイッチトリラクタンスマータ（Switched Reluctance Motor: SRM）は、固定子突極子に巻回された巻線を励磁し、適切な組み合わせで設けられた回転子突極子との磁気的相互作用を利用して回転する。その基本構造は、銅線他導電材料とケイ素鋼板他磁性材料のみで構成されており、安価で堅牢という特長を有する。また、概念としての回転原理は直感的に理解できる（ただし、電気－機械エネルギー変換過程が非線形であることから、精密な制御には複雑な知識が必要である）。

SRM の応用として、電気自動車他の輸送機器が検討されており、特有の駆動条件（トルク、回転数）に対して適切な可変速駆動が必須である。その場合、最頻駆動条件付近を中心としてできるだけ広範な条件で高効率を維持することが求められる。当該実現する方法として、ギャップ磁束の可変制御技術が考えられ、巻線界磁や永久磁石界磁回転機、あるいは誘導機では可能である。しかしながら、SRM ではリラクタンスマルクを駆動原理としていることもあり、従来上記可変磁束の実現が困難であった。それに対して本研究では、図 1 (a) のように固定子バックヨークの適切な場所に AlNiCo 磁石等の低保磁力磁石 (PM1, PM2) を設置することで、出力や効率、力率が改善することを解析的に示した (Permanent Magnet assisted SRM: PM-SRM)[1]。

AlNiCo 磁石は、非希土類系磁石にもかかわらず高い残留磁束密度を有している。欠点は低い保磁力であるが、上記構成では駆動中の磁界変化が小さく問題ない。さらに、AlNiCo 磁石の Curie 点は 850°C 程度であり、高温駆動の可能性を有している。

さらに、上記低保磁力を積極的に利用し、固定子巻線からのパルス着磁技術によって、AlNiCo 磁石の着磁束を制御する提案を行っている [2]。図 1 (b) の 1 kW 級 PM-SRM を用いてパルス着磁実験を行ったところ、図 2 のように固定子 AlNiCo 磁石の着磁制御に成功した（図では、負荷側モータから駆動した際の無負荷誘起電力波形によって着磁量を評価している）[3-5]。本成功によって、SRM の可変磁束技術の可能性を実証することができた。なお、本研究開発は JST-OPERA プロジェクト (No. JPMJOP1841) の一環として実施された。



(a) 断面概略図



(b) 試作機外観

図 1: JST-OPERA プロジェクトで開発した 1 kW 級 PM-SRM [2-5]

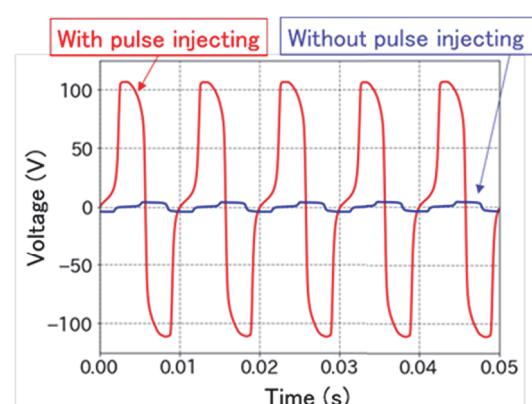


図 2：固定子巻線を用いたパルス着磁特性 [3-5]

参考文献

- [1] F. Kucuk and T. Nakamura, IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng., vol. 15 (2020) pp. 1213–1218, [2] 日経エレクトロニクス 12月号, pp. 31-33, Nov. 2019, [3] Y. Okamoto, T. Nakamura, et al., Proc. EVTeC 2021, [4] 岡本侑己, 中村武恒, 他, 自動車技術会年次大会, [5] Y. Okamoto, T. Nakamura, et al., in preparation

電子物理工学講座 極微電子工学分野 (白石研究室)

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

「半導体シリコンでの人工スピン軌道相互作用の創発」

電子の有する電荷とスピン角運動量を同時に用いるスピントロニクスは電子工学をさらに発展させる候補技術として期待を集めている。例えば、スピンを情報媒体として活用することで、ジュール熱を抑制し電子回路内の素子数を画期的に低減できると考えられている。物質内のスピン情報を電気的に操作するための手法として、ポテンシャル中における電子のスピンと軌道間の相対論的な効果であるスピン軌道相互作用が用いられる。故に、スピン情報を操作するためにはスピン軌道相互作用の大きい材料が望ましい。従来の研究では、原子番号の大きいビスマスやプラチナなどの元素、結晶の空間反転対称性が破れている化合物結晶 (Dresselhaus 型)、そして構造上の反転対称性が破れている低次元伝導系 (Rashba 型) がスピン軌道相互作用研究のための代表的な材料として探索されてきた。一方で、シリコンは軽元素からなり更に結晶の空間反転対称性を有するためシリコンそのもののスpin軌道相互作用は無視できるほど小さいこともあり、これまでスpin軌道相互作用の研究対象としては注目されてこなかった。

筆者らはシリコンのバルクではなく、金属-酸化物-半導体 (MOS) 構造におけるゲート電圧を印加下で界面付近のキャリアの蓄積によるバンドの曲がりによってポテンシャルが生じる電界効果に着目した。内部のスpin軌道相互作用が非常に小さいシリコンにおいても MOS 界面付近で人工的に創発された電場によるスpin軌道相互作用を利用できると目論んだ (図 1)。このように創発されたスpin軌道相互作用は構造上の反転対称性を用いているため、「人工 Rashba 型スpin軌道相互作用」と呼ぶことができる。Rashba 型スpin軌道相互作用では面直方向の電場ポテンシャルと面内の電子の移動により面内方向の有効磁場が生じる。この有効磁場を利用してスpin情報を操作することができる。一方で有効磁場は常に面内方向を向いており、磁場はスpin歳差運動を介してスpin情報を緩和させるため、スpin情報のコヒーレンスが緩和する時間スケールであるスpin寿命はスpinの向いている方向に対して異方的になる。

筆者らの事件では本研究室のスpin流生成・観測技術を基盤としてシリコン MOS におけるスpin信号の非局所測定を行った。また、様々な角度から外部磁場を印加して観測されるスpin信号の応答からスpin寿命の異方性を評価した。スpin軌道相互作用による有効磁場が存在する場合、外部磁場との合成磁場でスpin緩和が行われるため、外部磁場の印加角度の変化に対して非線形的な信号の変化が得られる。理論式を用いた実験結果の解析によって系のスpin寿命の異方性を面内スpinと面直スpin寿命の比 (ζ) として見積もることができる [1]。図 2 に測定されたスpin寿命の異方性比のゲート電場 (E_g) 依存性を示す。強いゲート電圧が印加されると、異方的なスpin寿命が観測され、これはゲート電場による人工 Rashba スpin軌道相互作用の創発を意味する。驚くべきことに、0.05 V/nm の弱いゲート電場が印加された時は完全等方的なスpin寿命が観測された。これはゼロゲート状態においても界面に僅かな内蔵電場が存在することを示唆する。本成果はシリコンにおけるスpin流物性の従来の認識を覆すとともに、人工 Rashba スpin軌道相互作用系という固体物理における新たな探求対象を提示するものである [2]。

[1] B. Raes *et al.*, Nat. Commun. 7, 11444 (2016). [2] S. Lee, M. Shiraishi *et al.*, Nat. Mater. Published (2021).

図1

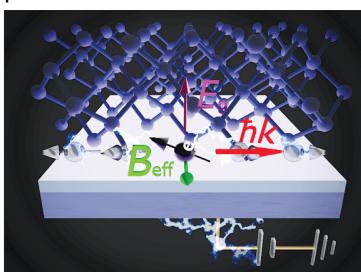


図2

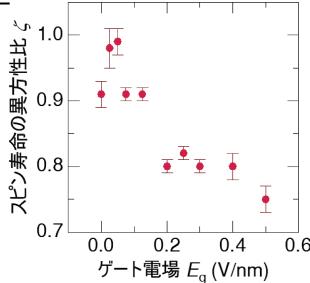


図1. 金属-酸化物-半導体(MOS)構造における人工Rashbaスpin軌道相互作用の模式図。x方向の運動量($\hbar k$)を持つ電子に対してz軸方向のゲート電場(E_g)が印加された際、y軸方向に有効磁場(B_{eff})が生じる。

図2. シリコンMOS構造におけるスpin寿命の異方性比(ζ)のゲート電場依存性。スpin軌道相互作用がない場合、スpin寿命は等方的($\zeta = 1$)になる。

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>
「AlGaN 系ナノアーキテクチャを用いた UV 発光の高効率化」

紫外光は、殺菌、消毒、キュアリング、リソグラフィーなど広い分野で既に使用されている。従来、例えば Hg ランプや ArF、KrCl エキシマランプなどランプ系の紫外光源が用いられてきたが、構成元素の環境負荷が高く、装置構成にガラス部を必ず含むことから、（蛍光灯が白色 LED に置き換えられたことと同様に）固体紫外光源の実現が期待されている。窒化物半導体の GaN と AlN による混晶 AlGaN は、GaN と AlN の組成比により禁制帯幅を 3.4 eV（波長 365 nm 相当）から 6.0 eV（207 nm）まで変化させることができるので、この固体紫外光源用材料として盛んに研究されている。

通常 AlGaN 発光素子としては、AlGaN 薄膜層をより Al リッチな AlGaN（極端な場合 AlN）でサンドイッチした量子井戸（QW）構造が用いられる。LED やレーザダイオードなどのデモンストレーションも進んでいるが、そこでの内部量子効率が発光の短波長化に従って急激に低下することが大きな問題となっている。内部量子効率は輻射再結合と非輻射再結合の競合で決定され、前者が速く、後者が遅いほど輻射再結合が支配的となり内部量子効率は上がる。これまで、例えば、GaAs などの III-V 族半導体では、V 字型の溝を形成した基板上に量子構造を作製すると量子細線として機能し、輻射再結合確率、ひいては、内部量子効率が向上することが知られている。

われわれは、基板の結晶面を (0001) 面から数度傾斜させると、その上に結晶成長した AlN 表面に分子ステップが集まったマクロステップが形成されることを利用して、その上に AlGaN ナノ構造を作製し、その特性を評価してきた。図 1 は、透過型電子顕微鏡（TEM）で断面からこのような構造を観察した例である。イメージ中央付近のマクロステップ上の QW では、膜厚が少し厚く、別の測定で Ga 組成が大きいこともわかっている。これらのため、マクロステップ上 QW は、周りの QW に比べてボテンシャルが低く、紙面奥行方向に伸びた量子細線的な構造となっている。当初の意図は、III-V 族における V 字型溝における量子細線同様、輻射再結合確率の向上であり、実際それを示唆する結果も得られた [SPIE Proc. 9926, 99260S-1]。興味深いことに、輻射再結合確率の向上だけではなく、非輻射再結合の抑制効果もあることが時間分解蛍光（PL）測定から明らかになった [Adv. Opt. Mater. 7, 1801106]。この効果は当初意図したものではなく、結晶成長表面での原子のマイグレーションによる、ステップ端での局所的な過飽和度の増加とそれに伴う点欠陥の抑制が一因であると考えている。これらの結果として、PL の低温室温強度比（内部量子効率に相当）が、図 2 に示すように、従来の平坦な AlGaN 系 QW と比較してサファイア基板上で一桁、AlN 基板を用いて貫通転位を低減するとさらに一桁向上することが明らかとなり、UV 発光素子として有望であることが示された。

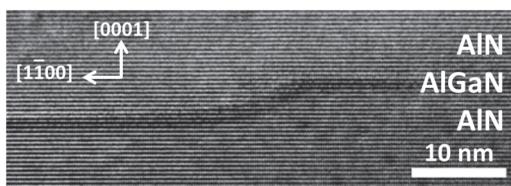


図 1 作製した QW の断面 TEM 像

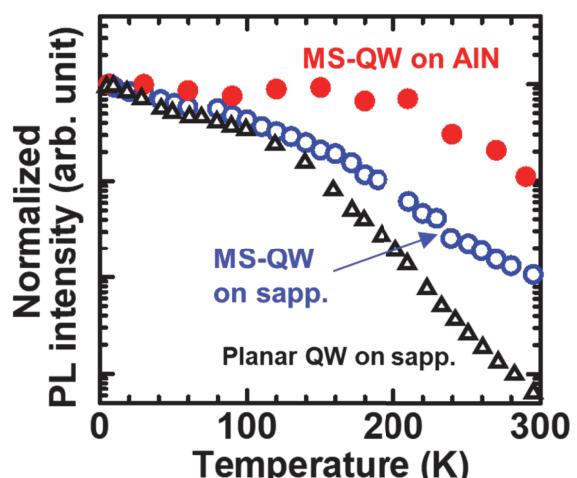


図 2 作製したマクロステップ上 QW (MS-QW) の PL の温度依存性。発光波長は室温で約 245nm。従来の平坦な AlGaN QW と比較した。サファイア基板上で一桁、AlN 基板を用いて貫通転位を低減するとさらに一桁、温度消光が抑制されている

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野

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

「レーザー出射機能と光検出機能の両立が可能な光電子デバイス」

レーザー光を照射して対象物からの反射光を検出することによる測距センシング技術は、自動運転、ロボットの自動走行、医療等の分野において大きな注目を集めている。このようなセンシング技術においては、一般に、レーザー出射と光検出は異なるデバイスを用いて行われるが、もし、レーザー出射と光検出を单一デバイスにおいて実現できれば、より小型かつ高効率なセンシングシステム等の実現が期待される。本稿では、レーザー出射機能と光検出機能の両立が可能なフォトニックナノ構造を導入した光電子デバイスを開発した研究成果について紹介する。なお、本研究は、電子工学専攻光量子電子工学研究室と共同で行った。

今回作製したデバイスの断面の電子顕微鏡(SEM)写真を図(a)に示す。本構造において、光放射・吸収のための多重量子井戸(InGaAs)付近に、2次元フォトニック結晶構造を設けており、レーザー発振および光検出の両者において、本結晶構造における大面積バント端共振効果を採用する。ここで、フォトニック結晶層と多重量子井戸は、低屈折率のクラッド層に挟まれており、pin層構造となっている。本デバイスに対して、順方向に電圧を印加することで、活性層から放射される光がフォトニック結晶構造で共振し、フォトニック結晶レーザーとして機能する¹⁾。図(b)に、直径500μmの共振領域を有するデバイスにおけるレーザー発振特性を示す。大面積でコヒーレント発振が実現でき、高出力においても、極めて狭い発散角(FWHM < 0.15°)の単峰性の遠視像(FFP)が得られていることがわかる。また、本レーザーの発振波長は938nmであり、フォトニック結晶における複数のバンド端共振モードの中で、最も損失が低い(Q値が高い)モードで発振が生じることを確認した。一方、本デバイスに対して、逆方向に電圧を印加した状態で、波長を変化させながら外部光を入射し、光検出特性を評価した結果を図(c)に示す²⁾。Q値が低い複数のバンド端B/TM、TM/B、C & Dの共振状態に由来して、発振波長(938nm)も含む930~940nm帯域において、強い応答が観測されていることがわかる。同図より、非共鳴時(波長925nm)と比較して、共鳴時(波長937.5nm)には、約17倍の検出強度が得られることがわかった。また、雑音等価電力(NEP)を見積もった結果、 $\sim 1 \times 10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度と低い値であることもわかった。さらに、本デバイスを用いた測距センシングの実証にも成功している²⁾。以上の結果より、单一デバイスにおいて、レーザー発振機能・光検出機能の両立が可能であることの原理実証に成功したと言え、今後、様々な分野への応用が期待される。

参考文献 [1] M. Yoshida, M. De Zoysa, S. Noda, et al., *Nat. Mater.* **18**, 121 (2019). [2] M. De Zoysa, T. Inoue, S. Noda, et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, DOI: 10.1109/JQE.2021.3091153 (2021).

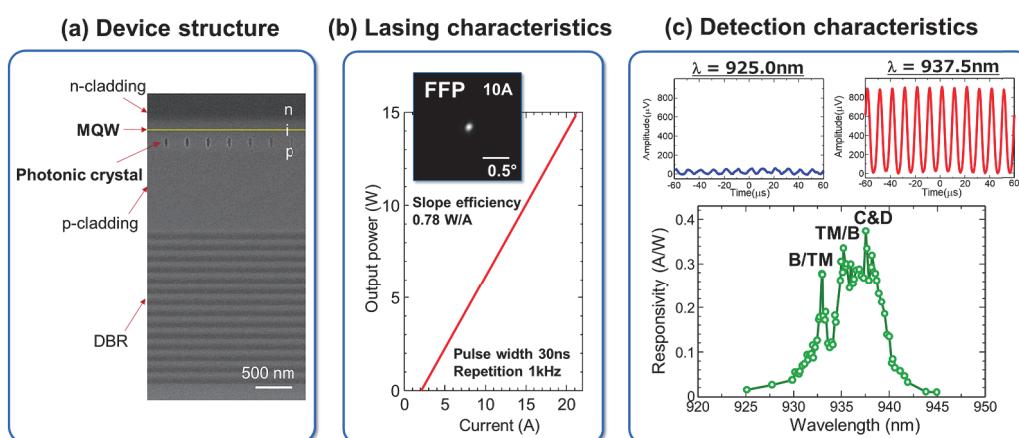


Figure (a) : Cross-sectional SEM image of photonic crystal introduced opto-electronic device. **(b) :** Light-output characteristic and the far-field pattern at an injection current of 10 A at forward bias. **(c) :** Measured wavelength-dependent responsivity to light at normal incidence at reverse bias. The top two figures show the temporal response when the wavelength of the incident light is off-resonance (925.0 nm) and on-resonance (937.5 nm).

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
<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index-j.html>
「準安定相・非平衡系材料の新ルートによる合成と開拓」

半導体の材料研究は安全性や信頼性の観点から、熱や光、湿度等に対して安定である熱的安定相が主に研究されてきました。一方で、それらの外部要因に対して不安定である準安定相や非平衡系と呼ばれる熱的不安定相材料は、製品の信頼性を第一優先とする考え方から、材料研究の候補から外されてきました。さらに、それらの準安定相や非平衡系座材料の薄膜結晶やバルク結晶を作製するには高温・高圧での処理が必要となります。均質な製品を大量生産する必要がある工業製品の観点からも、それらが応用される事はほとんどありませんでした。また、そのような合成の困難さから材料探索研究においても、敬遠されがちな材料がありました。

しかしながら、これら準安定相や非平衡系と呼ばれる材料群には、手付かずの未知の領域が多く残っており、中には素晴らしい物性を示すものもたくさんあります。一方で、それらを合成するには高温・高圧という高エネルギー条件下での処理が必要になり、また無理矢理結晶相を安定相から相転移させるため、良好な結晶、特に物性探索において重要な薄膜結晶を作製する事が大変困難でした。

しかし、筆者（金子）は、低エネルギーの成長方法を用い、さらに結晶性基板からの機械的応力を利用する事で、同一合成条件であっても基板の結晶構造を変える事で、安定相や準安定相を自在に作り分ける事が出来る事を示しました^{(1) (2)}。この新合成ルートの開拓によって、これまで結晶性薄膜の合成が非常に困難であった準安定相材料（ α -In₂O₃、 α -Rh₂O₃、 α -Ir₂O₃など）⁽³⁾を自在に合成出来るようになります。その物性開拓を行っています。また、半導体材料のみならず、あらゆる準安定相や非平衡系材料の可能性を追求しています。例えば、抗血栓特性を示す準安定相材料を内留置型ステント表面に緻密に結晶成長させる事も可能です。このように当研究室では、熱的不安定相の高品質薄膜の合成と物性開拓を柱にして研究活動を行っています。

しかしながら、せっかく生み出した高機能の準安定相材料も、工業製品として応用されるためには、安定化させる処理が必要となります。そのためには、安定相を少し添加したり、また混晶化するなど工夫が必要です。さらに、基板からの機械的応力を利用する事で、準安定相が安定相に相転移する事を強制的にロックさせる事も可能です。このような工業応用のための研究も様々な企業と共同で行っています。

1) K. Kaneko, H. Ito, S.D. Lee, and S. Fujita,
“Oriented growth of beta gallium oxide thin films on yttrium-stabilized zirconia substrates”, Physica Status Solidi (c), Vol.10, No.11, pp.1596-1599 (2013).

2) K. Kaneko
“Synthesis of Metastable or Non-Equilibrium-Phased Oxides by the Mist CVD method”, Journal of the Society of Materials Science, Japan Vol.70, No.5, pp.369-373 (2021)

3) K. Kaneko, S. Fujita and T. Hitora,
“A power device material of corundum-structured α -Ga₂O₃ fabricated by MIST EPITAXY® technique” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.57, No.2, pp.02CB18 (1-5) (2018).

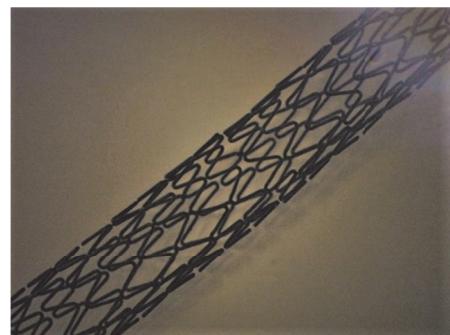


図1 抗血栓材料を被覆した内留置型ステントの写真²⁾。

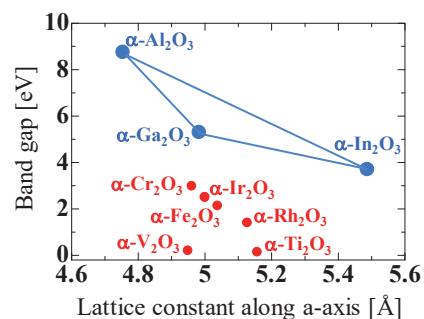


図2 同じ結晶構造をもつ準安定相材料群の一例³⁾。

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/>

Visually Grounded Paraphrase Identification and Classification (視覚に基づく言い換えの認識と分類)

Thanks to the development of deep learning, vision and language understanding research has been significantly promoted. However, how to address language variations that can represent the same visual concept remains a very challenging problem in various vision and language understanding tasks. For instance, without understanding language variations, visual question answering systems cannot answer same questions with different expressions (such as “a male” and “the pitcher” in Figure 1) properly; similarly, image/video captioning systems cannot be accurately evaluated. In our JST ACT-I project, we studied a novel concept to identify visually grounded paraphrases (VGPs) [1] (Figure 1) for vision and language understanding, which are different phrasal expressions describing the same visual concept in an image. VGP research is the key to address the language variation problem.

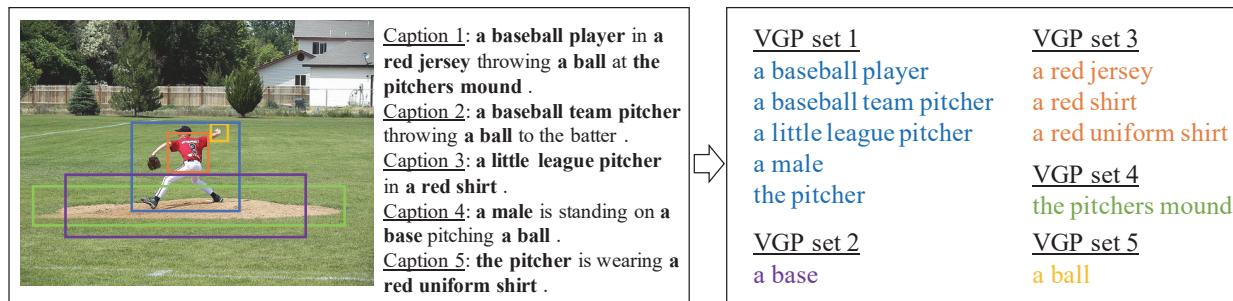


Figure 1: An example of VGP identification.

1. VGP identification. Our detailed analysis indicates that VGPs with different lexical similarities require different weights on language and visual features to maximize identification performance. This motivates us to propose a gated neural network model (Figure 2) to adaptively control the weights [1]. In addition, because VGP identification is closely related to phrase localization, we also propose a way to explicitly incorporate phrase-object correspondences. From our evaluation in detail, we confirmed our model outperforms the state-of-the-art model.

2. VGP typology classification. Previous studies treat VGP identification as a binary classification task, which ignores various phenomena behind VGPs such as linguistic paraphrases and VGPs from different aspects. We propose semantic typology for VGPs, aiming to elucidate the VGP phenomena. We construct a large VGP dataset that annotates the class to which each VGP pair belongs according to our typology. In addition, we present a classification model that fuses language and visual features for VGP classification on our dataset. Experiments indicate that joint language and vision representation learning is important for VGP classification.

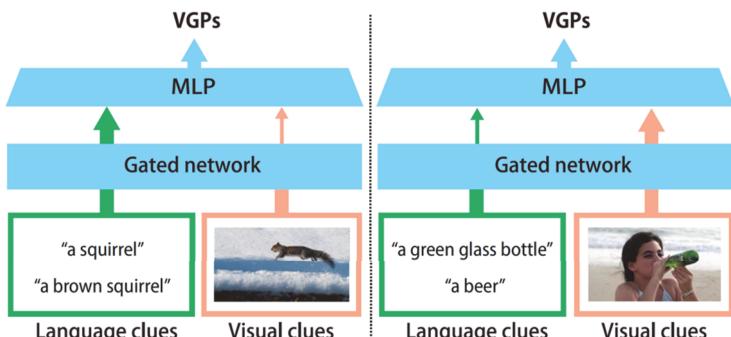


Figure 2: Our gated network for VGP identification.

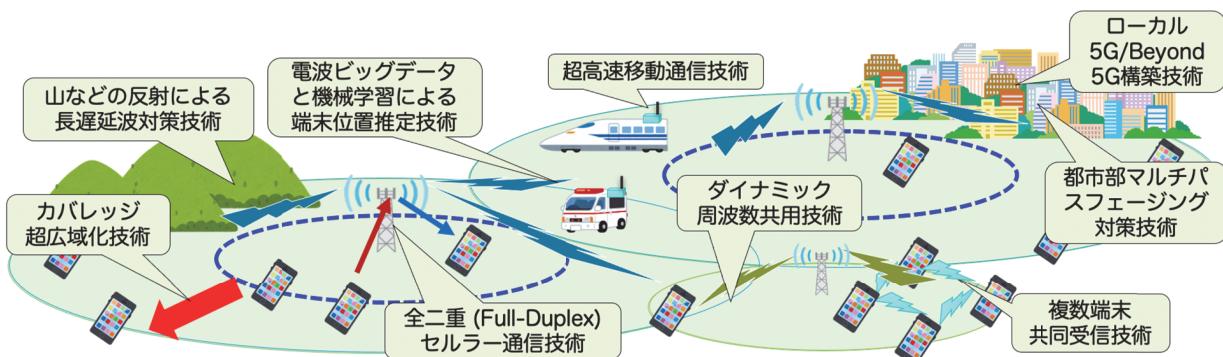
[1] Mayu Otani, Chenhui Chu, Yuta Nakashima. Visually Grounded Paraphrase Identification via Gating and Phrase Localization. Neurocomputing, vol. 404, pp. 165-172, (2020).

通信システム工学講座 ディジタル通信分野 (原田研究室)

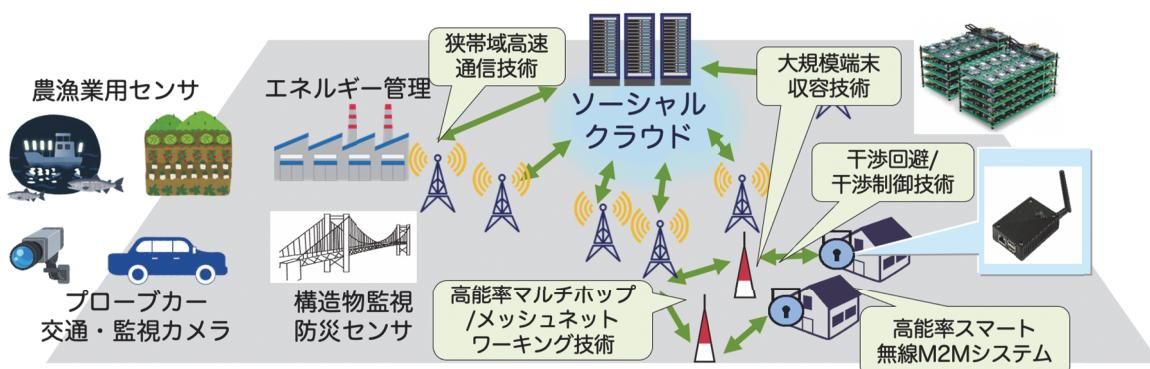
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

第6世代プ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可能な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、4GシステムとしてLTE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おり、また2020年からは5Gが一部の国においてサービスが開始されました。しかし、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。現在、すでに5G以降のシステム（Beyond 5G）および6Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室ではBeyond 5G/6Gに関する研究として、超広域プロードバンド移動通信システム、全二重複信（Full-duplex）セルラシステム、周波数共用システム、新信号波形・新物理層方式、高周波帯を活用した端末共同多重MIMO伝送技術、高能率スマート無線M2M通信システム、機械学習の通信システムへの応用、仮想空間における電波模擬システム技術の高度化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「全二重複信セルラシステム」に関する研究開発は総務省委託研究「第5世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発（JPJ000254）」の一環として、また「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化」に関する研究開発は総務省委託研究「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発（JPJ000254）」の一環として実施しています。またまた「機械学習の通信システムへの応用」および「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総務省SCOPEの委託研究（JP19600002）の一環として実施しています。



本研究室における第6世代プ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
<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>
「送信区間履歴に基づくフレーム損失要因解析」

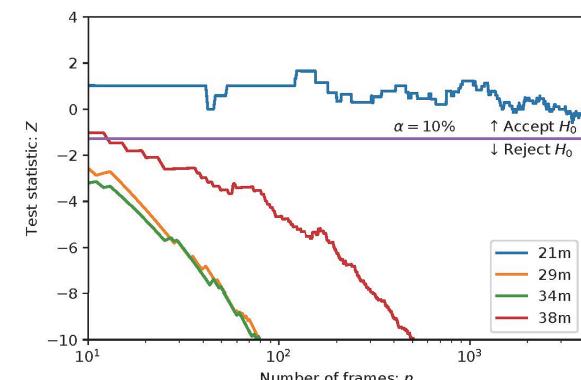
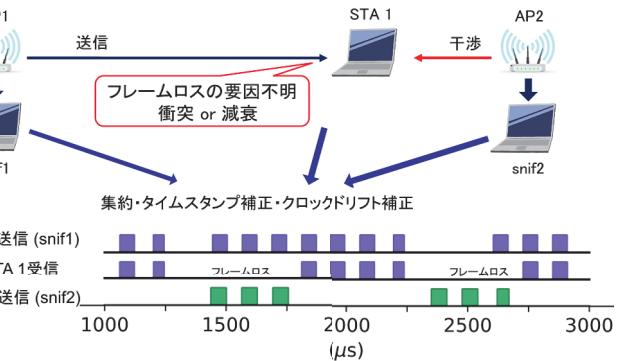
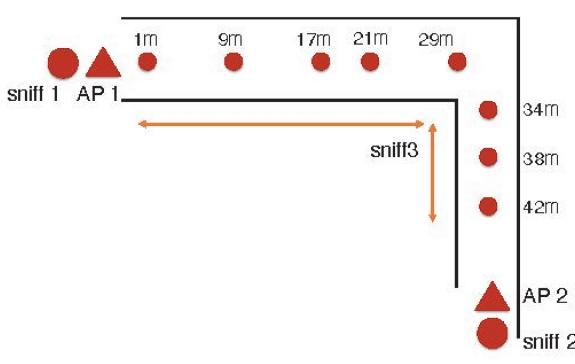
無線通信においては一般に、通信品質劣化要因を知ることは難しく、障害原因の特定を困難にしている。すなわち、送信したフレーム（無線パケット）の受信失敗、すなわちフレーム損失に関して、送信機・受信機はフレーム損失を観測できる一方、なぜフレーム損失が発生したかの要因の推測は、原理的に困難なためである。

今回実現した無線 LAN におけるフレーム損失要因解析の仕組みを右図で説明する。

無線 LAN アクセスポイント AP 1 の通信において、各フレームの端末（STA 1）における受信成否に加え、AP 1 の各フレームの送信区間、他のアクセスポイント（図中 AP 2）の各フレームの送信区間を送信区間履歴と呼び、これを集約する。AP 1 の送信フレームのうち、AP 2 の送信区間と一部でも重なっているものと、そうでないものに分類し、フレーム損失の発生頻度を比較した際、AP 2 の影響があるとすれば、送信区間に重なりがない場合に比べ、重なりがある場合はフレーム損失率が大きくなると言える。従ってこの課題は、フレーム損失の発生頻度に差がないことを帰無仮説として検定する、二標本検定問題として定式化できる。

無線 LAN 送信機が送信区間履歴を提供できれば、上述の原理通りのフレーム損失要因解析が可能であるが、送信区間履歴を出力する新たな無線 LAN デバイスを設計することなく実現するため、無線 LAN スニファ（パケットキャプチャ）を用いた実証実験を行った。無線 LAN スニファとは、送信されている無線 LAN フレームの傍受およびそのための機器であり、これによって各フレームの送信開始、終了時刻や、各フレームのシーケンス番号などを取得できる。

下左図に実験環境の概要を示す。L 字型廊下の両端に AP 1、AP 2 をそれぞれ配置する。この配置において、両 AP は互いに信号が検出できない（隠れ端末）ことを確認している。受信局（sniff 3）のそれぞれ位置において上記送信区間履歴を集約し、これを元に 2 標本検定を行った結果を下右図に示す。横軸は解析に用いたフレーム数、縦軸は帰無仮説が採択される場合に正規分布に従う統計検定量であり、21 m 地点では帰無仮説が採択され、AP 2 の影響がないと判定される。一方、それ以外の場合には帰無仮説が棄却され、フレーム損失の要因が AP 2 からの干渉によるものと判定される。



本研究開発は総務省 SCOPE（受付番号 JP196000002）の委託を受けたものである。

システム情報論講座 医用工学分野 (松田(哲)研究室)

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

パターン認識技術を応用した心臓 MRI による新しい心機能計測法の開発

心疾患の診断には、超音波画像法、X線 CT、核医学など、様々な画像診断法が用いられるが、MRI は明瞭なコントラストで心筋壁と心腔内を識別でき、空間分解能も高いことから、左心室容積や収縮の指標である駆出率の計測をはじめとした心機能評価には最も信頼できる標準的な画像診断法とされている。Cine MRI 法は拡張と収縮を繰り返す心臓の運動を心電図に同期して撮像し動画として表示する手法であるが、これに対してさらに拡張期に磁気的な標識 (tag) を印加し、収縮に伴って tag が移動していく様子を観測することによって壁運動の詳細な解析を実現する撮像法は tagging MRI と呼ばれている。通常の cine MRI では心筋壁の輪郭の移動が観察できるが、tagging MRI では、さらに与えた tag の移動から心筋上の各点の絶対的な位置変化が計測可能となる。例えば、心筋はらせん状に配列しているため収縮する際には雑巾絞りのような捻れ運動を示すが、このような捻れは tagging MRI では容易に観測できるものの、cine MRI では何らかの特徴的な点がある場合しか捉えることができない。従来の tagging MRI では、tag として細い直線状の低信号となる領域を空間的に放射状、ストライプ状、あるいは格子状などに配置した空間パターンが用いられているが、このような tag で絶対的な位置変化を追跡できるのは細線状の tag と心筋壁輪郭との交点や格子点のみであり、tag 上の他の点は補間により推定することになる。また、格子状の tagging MRI では、心機能解析の際に MRI 画像から格子点を抽出する必要が生じるが、完全な自動抽出は困難であり、その煩雑さから臨床研究などを目的とした特殊な場合に用いられているにすぎない。

当研究室では、従来の tagging MRI における解析の煩雑さや絶対的な位置計測の困難さという問題点に対し、MRI 画像における個々の画素のレベルで高 / 低の信号強度となるような tag を印加する手法を提案し、その実現を目指した研究開発を行っている。個々の画素レベルで tag を生成するため、すべての画素について絶対的な位置計測が可能となるが、さらに高 / 低信号の tag の配置についても、解析の際に近傍の画素も参照することによって他の画素と識別し自動的な追跡が可能となるような空間パターンとし、MRI 撮像装置を用いて本提案手法の実証実験を進めている。図 1 に提案手法の概要を示す。これは図の A-P で示した 4x4=16 画素を基本単位とする tag パターンの一例で、A, B, C, F, G, P の 6 画素が低信号となるよう tag パターンを印可する。A-P の各画素について図右のように自身を含む隣接 9 画素に注目すると、すべての画素に関する隣接 9 画素のパターンが異なっており、9 画素のパターンから A-P の画素を識別できることになる。基本単位は 5x5, 6x6 などにも拡張可能で、これらが平面内に繰り返すような tag を生成すれば、画素単位で追跡できることになり、その識別も極めて容易である。複雑な tag パターンでは高 / 低の信号強度を画素単位で生成する際に歪みなどが生じるため、計算機シミュレーションにより歪みの少ないパターンを探索し、図 2 示したような tagging MRI が得られている。

まだファントムを対象とした実験

結果であるが、ファントムの領域内の 80% 以上の画素について画素単位の移動を正しく追跡できており、臨床応用を目指してさらに改良を進めている。

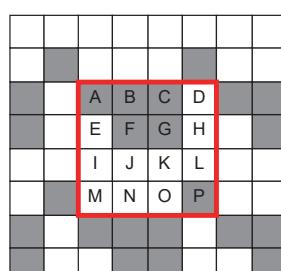


図 1：提案手法の概要

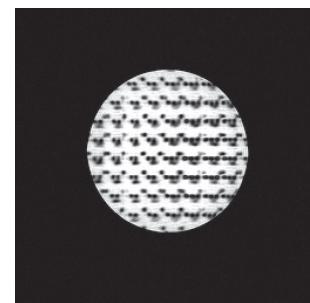


図 2：得られたタギング MRI

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/>

「インスタ映えを用いた環境配慮行動促進に関する研究」

近年、環境・エネルギー問題の深刻化に伴い、エネルギーの効率的な利用が必要とされています。現在、家庭部門における最終エネルギー消費量は減少傾向ですが、今後もこの傾向を維持するためには、省エネルギーや省資源等の技術革新だけでなく、私たち自身が省エネルギーを心掛けた生活をすることも重要となります。本研究では、地球環境に良いとされる行動（環境配慮行動、Pro-Environmental Behavior、以下 PEB）を促進する方法として、写真・動画共有SNS「Instagram」上で、映え（ばえ）を意識した写真に、好奇心をくすぐるキャプションやハッシュタグを付与して投稿する「インスタ映え」に着目しました。

Instagramでは、投稿が他者からの「いいね」で評価されます。他者の投稿が「いいね」で評価されている様子を見て、自分も評価されたいという承認欲求や、自分も皆の真似をしたいという社会的証明の心理が働いてInstagramに投稿をする人も多く、「インスタ映え」には行動を促す力があると考えられています。これをPEB促進に利用できるかどうかについて実験を元に検討しました。

評価実験用に、「見切り品の購入」「節電モードの使用」等の様々なPEBに関して、それぞれ映える写真・映えない写真を準備する必要があります。そこで、図1のようにディープラーニングにより写真の映える・映えないを判別する「映え判別器」を作成し、一定の基準で客観的に映える・映えないと判別された写真を評価に利用します。図2には「古紙再利用」に関する映える・映えない写真の例を示しています。

PEBに関する映える写真と映えない写真を見た際に、どちらが真似してPEBを実施したくなるかを問う実験では、20種のPEB × 映える・映えない = 40枚の写真を38名の参加者に評価して頂いた結果、映えるPEB写真の方が有意に高く評価され、映えない写真よりも真似してPEBを実施したくなることがわかりました。

Instagram上で知り合いが投稿した映えるPEB写真を見た際のPEB促進効果を、各6名からなる3グループを対象に、9日間のケーススタディを元に検討しました。事前に各グループに2名ずつサクラを指名し、映えるPEB写真を投稿してもらったところ、ケーススタディの前後で参加者全体では環境意識やPEB実行頻度に有意な差は見られなかったものの、サクラを担当した参加者において顕著に環境意識の向上が見られた等、ケーススタディの活動そのものがPEB促進につながっていた可能性が示唆されました。

今後は、映えるPEB写真を見て抱いた「真似したい」という気持ちを実際の行動につなげるため、Instagram上の写真の運用方法等を検討する必要があります。



図1 映え判別器の作成



映える写真
(判別器の出力: 0.9842)
映えない写真
(判別器の出力: 0.1036)

図2 映え判別器により
映える・映えないと判別された写真の例
(出力は映える確率を0～1で表している)

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/>

「Cu テープ上に導電性酸化物をバッファ層としてエピ成長させて作製する高温超伝導線材」

超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、リニア中央新幹線、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器などの様々な製品が作り出されています。

超伝導体の中でも、特に高温超伝導体と呼ばれる1群の材料はどこでも入手可能で安価な液体窒素に浸漬して冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、これを用いた電線（超伝導線材）を実用化できれば、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導線材の使用が広がることが確実視されています。また、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、それらの太陽光発電装置群を高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込んでしまえば、地球上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算もあります（Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [1]）。

我々は半導体製造分野で発展させられてきた薄膜成長技術（エピタキシャル成長技術）と材料加工技術を融合することで、安価で工業生産に向いた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数kmの長さに渡って単結晶のように揃える（3軸結晶配向）新技術の開発に成功しています[2]。具体的には圧延と加熱によって3軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) をエピタキシャル成長させた高温超伝導線材の開発に成功しました。このようにして単結晶的に結晶方位を揃えた高温超伝導層を電気抵抗ゼロで流れる電流の電流密度は液体窒素中 (77 K) で 20,000 A/mm² 以上に達しています。これまでに、高性能を維持しながら劇的な低コスト化を達成するために貴金属を不使用とした新規構造（図1）の開発に成功し[3, 4]、現在、国プロ等を活用して実用化に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は様々なエネルギーデバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めています。現在、Liイオン電池、IoTデバイス、太陽電池、燃料電池などへの応用も研究中です。

参考文献

- [1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8** (2000) 53-60.
- [2] 土井俊哉、東山和寿、 “配向基板上へのタリウム系高温酸化物超伝導厚膜の形成”, 応用物理, 第 65 卷, 1996, pp.372-376.
- [3] 土井俊哉、堀井滋、 “金属系および高温超電導線材の高性能化”, 応用物理, 第 85 卷, 2015, pp.419-422.
- [4] Toshiya Doi, Takeo Morimura, Shigeru Horii, and Ataru Ichinose, Applied Physics Express **12** (2019) 023010.

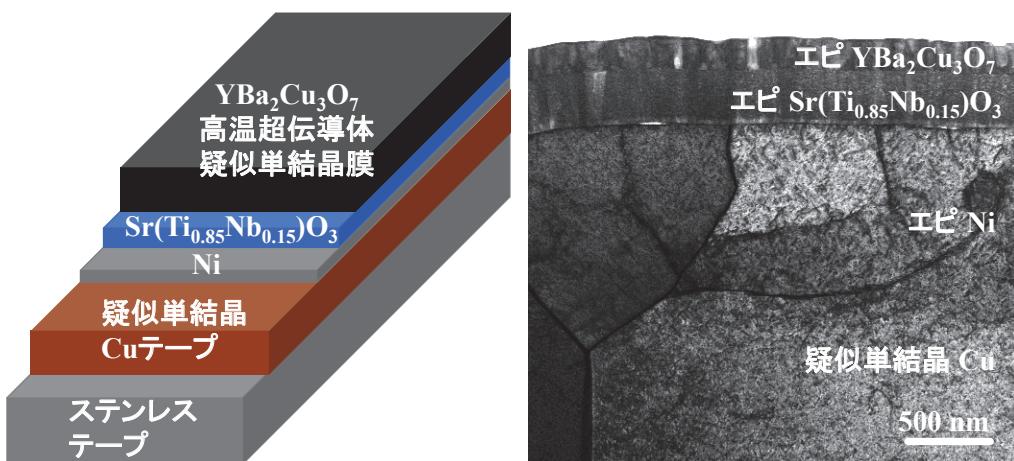


図1 開発した高温超伝導線材の概略構造および断面の透過型電子顕微鏡写真

エネルギー科学研究科（エネルギー応用科学専攻）プロセスエネルギー学分野 （白井研）
<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>
「伝導冷却高温超電導 MRI マグネットシステムの開発」

1. はじめに

当研究室では、超電導応用エネルギー機器とこれらを導入した先進エネルギーシステムをテーマとしている。今回は、NEDO「高温超電導実用化促進技術開発／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」プロジェクト（三菱電機・京都大学・東北大）において実施している液体ヘリウムを使わない伝導冷却高温超電導 Magnetic Resonance Imaging (MRI) システムの開発について紹介する。

開発課題は、超電導特性が劣化しないコイル構造の開発、高精度のコイル製作方法、高均一磁場発生コイルの設計、高温超電導コイルでの高安定磁場発生などがあげられる。特に高温超電導マグネットでは、テープ線材に遮蔽電流が流れること、また現状では超電導接続ができないため、低温超電導マグネットで行われている永久電流モードでの運用が難しいことが、高安定磁場発生の障害となっている。

2. 電源駆動による高安定磁場の発生

これらの問題に対処するため、電源によるドライブモード運転での MRI イメージングに必要とされる変動 1ppm/h 以下の高安定磁場発生をめざし、超高安定励磁電源システムとその磁場制御システムの開発を行っている。電力損失が小さく（空冷）運用も容易だが電流リップルが大きいスイッチング式電源（図 2）と電力損失は大きい（水冷）が電流安定性の高いドロッパ式電源（図 3）とを用いて、高均一かつ高安定磁場を発生できるモデルマグネットを試作（図 1）し、イメージングによる実証を行って磁場安定性と電力損失の観点で評価した。

その結果、どちらの電源でも励磁しながら永久電流モードと遜色ないイメージングが可能であることを確認した。ドロッパ電源に比べて出力安定度の低いスイッチング電源でも、励磁回路構成と制御の工夫によってノイズを低減しつつ、損失を 1/8 として鮮明なイメージング画像を得た。

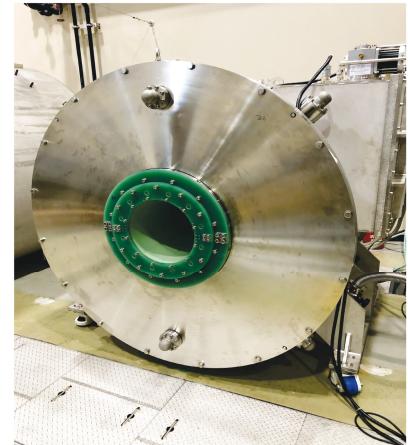


図 1 Half サイズ 3T 高温超電導 MRI マグネット

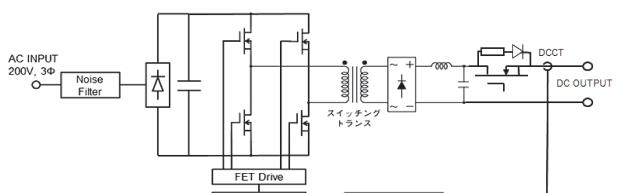


図 2 PWM 制御による安定励磁電源システム

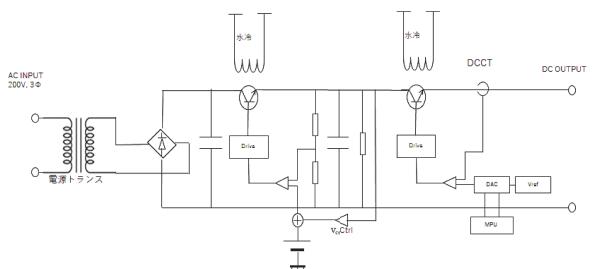


図 3 ドロッパ制御による超高安定励磁電源システム

エネルギー理工学研究所（複合系プラズマ）
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex/index.html>
磁気島によるプラズマの内部輸送障壁により生成された超高温領域の瞬時拡大

核融合エネルギーの実現には超高温の水素プラズマを生成し閉じ込めておく必要があります。プラズマを閉じ込める磁場中に超高温のプラズマを閉じ込めておく内部輸送障壁よばれる断熱層を作ることができます。これまでの研究では中心に近いところに輸送障壁があったため超高温の領域が狭いという問題がありました。今回、ヘリオトロンJ装置を用いて、プラズマの中心部分の輸送障壁で閉じ込められた約2000万度の狭い超高温領域を瞬時に拡大させることに世界で初めて成功しました[1]。

プラズマを閉じ込んでいる磁場にプラズマ電流を流すと磁気島よばれる孤立した閉じ込め領域が形成されます。本研究ではヘリオトロンJ装置を用いて同装置がプラズマを閉じ込める磁場容器の構造を自在に制御できる特徴を活かし、さまざまな形状のプラズマに対しプラズマ電流を流すことによって磁気島を形成し輸送障壁の移動と磁気島の関係を調べました。プラズマ電流が磁気島を形成できる大きさに到達しプラズマ中に磁気島を形成すると出現した磁気島の位置へ輸送障壁が移動することを発見しました（図1）。さらに、プラズマ電流を増加させ磁気島の位置を制御することで輸送障壁の位置を自在に制御できることを見いだしました。この手法により水素プラズマの中心部分の輸送障壁で閉じ込められた超高温領域を、プラズマの広い領域に1万分の1秒で瞬時に拡大させることに成功しました。

本研究は核融合科学研究所の釤持尚輝助教と我々による共同研究グループにより達成された成果です。今回発見した手法は、将来の磁場閉じ込め核融合発電炉の運転において重要なプラズマ圧力分布の制御手段として活用されることが期待されます。また、磁気島を生成することで輸送障壁の位置を瞬時に移動させることができるために、プラズマの放電状態によってリアルタイムにプラズマ圧力形状を制御（フィードバック制御）できる可能性があります。現在フランスで建設中の核融合実験炉ITERや将来の核融合発電炉において重要な運転制御の手法として期待されます。

今後は、今回開発された輸送障壁の位置制御により、輸送障壁をプラズマのより外側に移動させることでこれまで以上にエネルギーの高いプラズマを実現するとともに、外部からの磁場を加えることで磁気島を制御する、積極的な輸送障壁の位置制御手法の開発を進めていきます。

参考文献

I.N. Kenmochi et al., Scientific Reports (2020), 10.

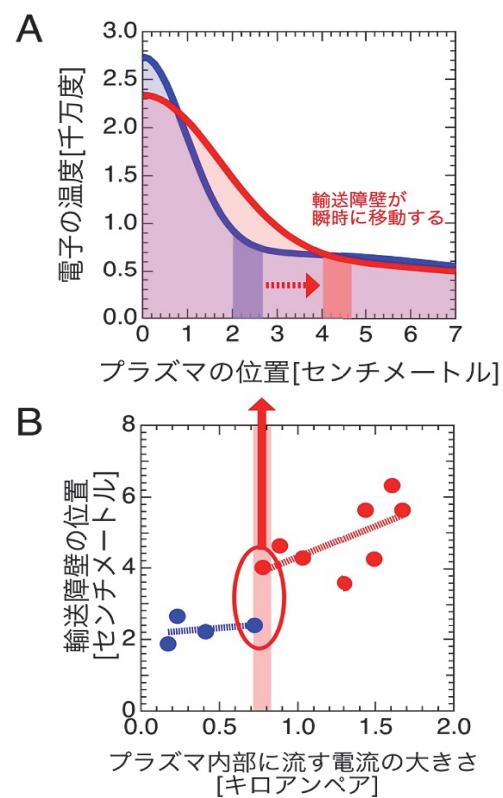


図1：
A 磁気島の出現前後の電子温度分布の変化。磁気島が出現した時に輸送障壁が瞬時に移動する。
B プラズマ電流と輸送障壁の位置の関係。電流量を増やすと磁気島の位置が変わり、輸送障壁の位置を外側に移動させることができる。

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 (橋口研究室)

http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/

「赤道大気レーダーと赤道周回気球による熱帯対流圏界層の国際協同観測」

赤道域は地表へ入射する太陽放射エネルギーを最も強く受ける領域で、地球大気の各種現象の駆動源であるが、その中でも特にインドネシア海洋大陸域では、太陽光による島嶼（とうしょ）の加熱と周辺の海洋からの水蒸気供給によって、地球上で最も対流活動が活発である。水蒸気が豊富で対流が活発な対流圏とオゾン濃度が高く比較的安定な成層圏の境界は対流圏界面と呼ばれるが、熱帯域では高度14～18km辺りに熱帯対流圏界層（Tropical Tropopause Layer: TTL）と呼ばれる対流圏とも成層圏ともつかない熱帯域特有の遷移領域が存在している。気候変動に重要な役割を果たす成層圏・対流圏物質交換（Stratosphere-Troposphere Exchange: STE）にTTL内のプロセスが影響すると言われている。我々の研究室ではインドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に大型大気レーダーである赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar: EAR）を設置し、TTLを含む多くの研究を行ってきた。これまでのEAR観測からTTLに発生する間欠的な乱流層がSTEに貢献していることなどが示されてきたが、まだ解析事例は少なく、重要な物質輸送との関連など未知の課題が残されている。

フランスを中心とする研究グループにより、スーパープレッシャー気球を用いた国際的な熱帯下部成層圏・TTL観測プロジェクト「Strateole-2」が計画され、2019年11月～2020年2月にプレキャンペーン観測が実施された。鉛直方向の観測を目的とした通常のラジオゾンデ観測で使用されるゴム気球では、高度上昇とともに周囲の気圧が下がり気球が膨らみ、最終的に気球の皮膜が気球内部に封入された水素やヘリウムの内圧に耐えられず破裂することで観測が終了する。水平観測を目的としたスーパープレッシャー気球では、特殊なプラスチック性の皮膜を用いることで高い耐圧性を実現し、体積を一定に保ったまま長期間上空で滞留することを可能としている。TTL高度で滞留させる場合、その大きさは直径11mほどになる。プレキャンペーン期間では、インド洋のセーシェル諸島から放球された気球は西風に乗って移動し、2～3ヶ月間かけて赤道に沿って地球を1周半ほど周回しながら各種気象パラメータが測定された。

我々はStrateole-2 プレキャンペーンに協同して、赤道大気レーダーによる連続観測に加えて、同観測所からオゾンラジオゾンデ気球を放球する集中観測を実施した。観測データを詳細に解析し、赤道に沿って東進する赤道ケルビン波の歪みによる東西風の強い鉛直シアと対流圏からの深い対流システムが影響し、ケルビン・ヘルムホルツ不安定が発生し、TTL内の約1kmの高度領域で強い乱流が生成されていることが示唆された。またオゾンの変動は主に赤道ケルビン波の歪みや碎波による気温鉛直分布の変動によって起こり、乱流による混合の影響は二次的であることを見出した。さらに、EARとその近傍を通過した赤道周回気球との同時観測から、乱流を生成するような大気の構造は500kmを超える水平スケールで広がっている可能性が示された。

さらに統計解析を実施し、EAR観測で得られる乱流層高度とオゾンの鉛直分布は連動しており、乱流層が物質圏界面に対応することが示唆された。また、乱流層の高度や強度は季節によって変動し、赤道ケルビン波や対流活動度、季節風の影響が現れていた。これらの結果は、乱流層は赤道ケルビン波の歪みや碎波によって発生すること、そしてこの赤道ケルビン波の歪みや碎波はオゾンの分布を変動させることを明瞭に示唆しており、EARによって継続的に高い鉛直分解能で観測可能な乱流層が、このような大規模擾乱の指標となり得る可能性を示している。



赤道大気レーダー（アンテナ直径110m）



赤道大気レーダー観測所におけるラジオゾンデ観測風景

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・サブストームと地球磁場強度の関係

オーロラ・サブストームは太陽風・地球磁場相互作用の結果おこる激しい擾乱現象の一つである。内部磁気圏に注入された熱いプラズマは人工衛星の帶電リスクを高め、発達したジェット電流は高緯度地域で停電のリスクを高める。サブストームを理解することは宇宙由来の災害を低減する上で重要である。地球磁場強度は過去 150 年間に約 9% の割合で減少していることが知られており、今後サブストームの様相が変わる可能性が高い。地球磁場強度を様々に変えたグローバル磁気流体シミュレーションを用い、サブストームの発達を模擬した。地球磁場を現在と比べて 1.5 倍弱めたところ、地球近傍で磁気再結合が起き、熱いプラズマがより地球近くに侵入した(図 1)。これは地球磁場が持つ圧力が低下したことが原因と考えられる。またオーロラ・サブストームの発達が遅れるものの、オーロラ・オーバルが低緯度側に数度下がり、ジェット電流が増強した。地球磁場が弱まると太陽風から磁気圏に流入するエネルギー量は減るが、地球磁場減少により電離圏の電気伝導度が上がったことが原因と考えられる(図 2)。この結果はオーロラ・サブストームに対する電離圏の役割が非常に大きいことを示唆している。(Ebihara and Tanaka, 2021)

Ebihara, Y. & Tanaka, T. (2021). How do auroral substorms depend on Earth's dipole magnetic moment? Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2020JA028009. <https://doi.org/10.1029/2020JA028009>

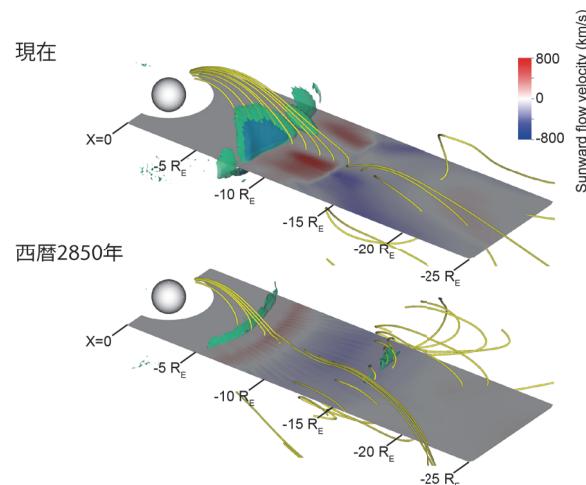


図 1：上は現在の地球磁場を用いた場合、下は地球磁場を 1.5 倍弱めた場合（西暦 2850 年頃に相当）の地球周囲の環境。黄色の線は磁力線を、赤色・青色の面はそれぞれ太陽方向・反太陽方向のプラズマの速度を表す。緑色の領域はダイナモ領域 ($J \cdot E < 0$) を示す。赤色と青色の領域が接している領域で磁気再結合が発生している。太陽は左上方向にある。(Ebihara and Tanaka, 2021 を改変)

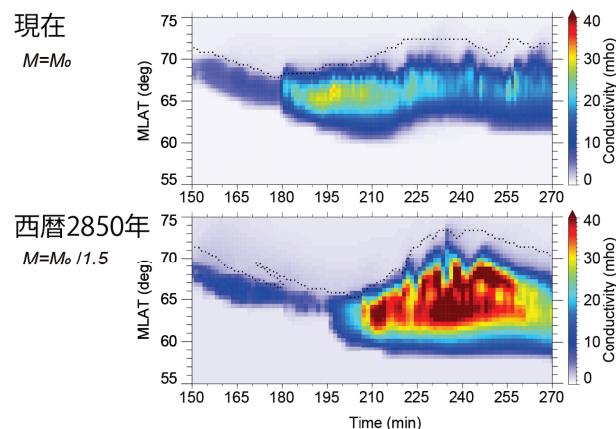


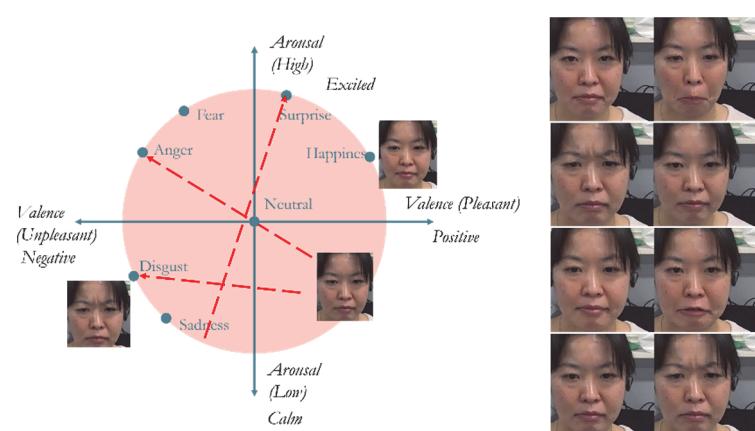
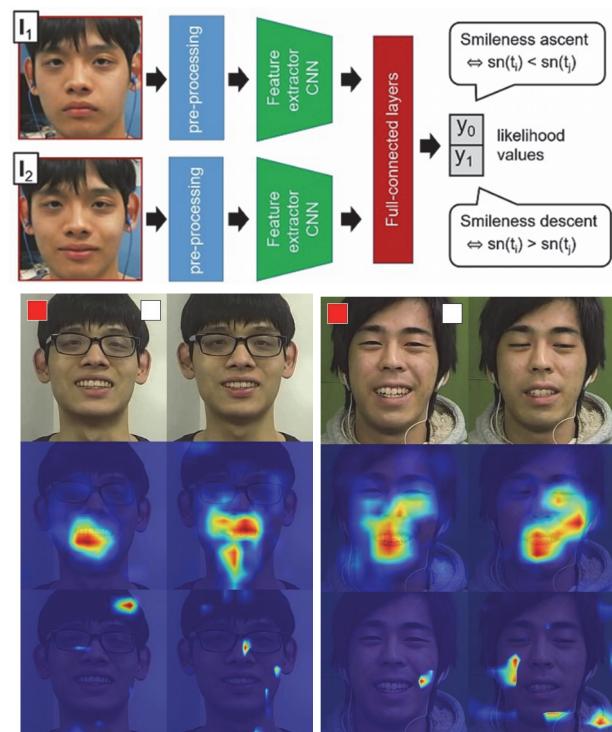
図 2：磁気的な真夜中における電離圏電気伝導度（縦軸は磁気緯度、横軸は時間（分））。上は現在の地球磁場を用いた場合、下は地球磁場を 1.5 倍弱めた場合（西暦 2850 年頃に相当）を示す。帯状に広がる電気伝導度が高い領域（オーロラ・アーク）が低緯度側に向かって移動し（サブストーム成長相）、やがて電気伝導度が急増する（サブストーム拡大相の開始）。電気伝導度が高い領域が高緯度側、低緯度側に広がる（オーロラの拡大に対応）。(Ebihara and Tanaka, 2021 を改変)

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(裕)研究室) <http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>
 「QOL 推定を目的とした微細な表情変化の認識～笑顔からより一般的な表情へ～」

表情はコミュニケーションのための重要な機能であるとともに、心理的な内部状態を読み取るためのチャネルでもあるため、心理学、工学の分野において数多くの研究の対象となってきた。近年では、笑顔をシャッターなど、表情認識を利用した製品が市販されるだけでなく、心理的な状態や QOL (Quality Of Life) を評価する手段としても期待されている。しかし、日常生活では、わかりやすい表情だけではなく、わずかに微笑んだり、嬉しいながらも少し不安そうにする表情などが頻繁に起こる。このような問題を扱うためには、一瞬の表情を分類・識別するのではなく時系列的な表情の変化を認識する必要がある。そのため、本研究では深層ネットワークの一つである Siamese Network (右図上段) を用いて、一対の顔画像を比較することによって表情の表出やその変化を認識する。つまり、時間的に近接した2枚の画像を比較し、そのどちらにより強く表情の特徴が現れているかを判定することを繰り返し、それによって表情変化を認識する。

映像から4フレーム毎（約133msec 間隔）で抽出した顔画像に対して総当たりのペアを作り、本手法を適用したところ、90%程度の正答率を得ることができた。人間でも識別に難しいペアや、表情変化が非単調である部分などの誤答があるが、それ以外の部分については良好な結果となっている。右図下段に正しく認識された例をあげる（それぞれ左が笑顔の度合いが大きい）。図中のヒートマップ表示は、識別の手がかりとなった部分を Grad-CAM の手法で示したものである（上が正答に寄与した部分、下が逆に寄与する部分）。ただし、発話などによって口や周辺の形状が大きく変化する場合には大幅に精度が落ちることが確認されており、このような場合の対処法は今後の課題となっている。また、200枚強の顔画像を総当たり比較によりランク付けすると、その一貫性が高く（98%程度）なった。これにより、笑顔度の基準となる画像のセットを予め選び、それらと現在の画像を比較することにより、現在の画像の笑顔度のランク付けが可能となることがわかった。

現在は、笑顔に関する表情変化に加え、右の顔画像に見られるような、より一般的な表情への本手法の適用を検討している。右図は感情を2次元の平面（valence, arousal を軸とする）上に配置したものであり、強く現れた表情は円環の外側に位置するが、弱い・中間的な表情は内部に位置する。これまでの研究によって、これらの認識について少しづつ良い結果が得られ始めている。



令和2年度修士論文テーマ紹介

工学研究科 電気工学専攻

鍵 昌 弘（引原教授）「マニピュレータのアシスト制御のためのベースモデルと補償手法に関する数値的検討」

本論文は、適当なゲインパラメータを与えたPID制御により動作する平面2自由度マニピュレータを対象に、アシスト制御について検討したものである。軌道追従と姿勢保持の観点から、ゲインパラメータを変更することなく動作補償可能な制御について検討し、数値的に比較することでアシスト制御を得た。

古 藤 和 浩（引原教授）「電力パケットネットワークにおけるフロー制御と最短経路探索」

本論文は、電力パケット伝送システムへのフローネットワークの適用について検討したものである。パケットネットワークについて、物理モデルの構築と電力伝送による損失をコストとする経路探索の適用をシミュレーションにより検討した。その結果、経路探索を適用する場合、経路探索を適用しない場合に比べて、電力伝送による損失を小さくできることを示した。

高 山 創（引原教授）「SiC MOSFET のためのデジタルアクティブゲートドライバの開発に関する研究」

本論文は、SiC MOSFET のゲートドライバのデジタル化のコンセプトや回路構成について検討したものである。提案するゲートドライバは、動作条件や素子の特性に合わせて柔軟にゲート信号列を調整し、駆動を行うことができる。動作検証のための実験およびシミュレーションを行い、サージ電圧やリングングの抑制に対する有効性を確認した。

Yanran Wang（引原教授）「Analysis and Control of Swarm Formation in Two Dimensional Time-invariant External Potential（二次元時不变外部ポテンシャルにおける群編成の解析と制御）」

In this paper, we combine the idea of Swarm Intelligence with Wireless Sensor Networks (WSNs) and design an algorithm that captures the environmental information through analyzing the change in sensor cluster formations. In this approach, it is clarified that the necessity for the Base Station of WSNs is eliminated, and the formation is controllable based on the obtained information.

石 井 大 智（萩原教授）「スイッチド非負システムの L_q/L_p ハンケルノルム解析とFMアルゴリズムの最適パラメータ調整への応用」

連続時間スイッチド非負システムの L_q/L_p ハンケルノルムの解析に関する検討を行った。さらにこれらの解析結果を、無線通信における自律分散型送信電力制御アルゴリズムであるFMアルゴリズムの最適パラメータ調整へ応用し、数値例を用いて提案手法の有効性を示した。

大 崎 健 太（萩原教授）「確率系制御のための非線形フィルタを用いた分布推定と安定化制御」

確率的な動特性をもつ離散時間線形系に関する既存の研究成果を紹介し、その研究成果と非線形フィルタを利用して確率的な動特性をもつ実対象を制御する手法を提案した。また、提案手法の有効性検証

のために、数値例を用いた検証およびDCモータを用いた実験による検証を行った。

加藤光樹（萩原教授）「リフティングとLMIに基づく不確かな線形系およびルーリエ系のロバスト性能解析と設計」

不確かな離散時間線形系のリフティングとLMIに基づくロバスト状態フィードバック設計手法を提案した。さらに、リフティングとIQCに基づくルーリエ系のロバスト性能解析条件を導出し、その有効性を再帰型ニューラルネットワークの数値例を通して実証した。

築瀬正太郎（萩原教授）「補正型状態予測2自由度LQIサーボ系と相補感度関数に基づくロバスト安定解析」

補正型状態予測制御および状態予測2自由度LQIサーボ系を参考に、補正型状態予測2自由度LQIサーボ系と呼ぶサーボ系を導入した。そしてこのサーボ系の安定条件や目標値応答、外乱応答について議論し、さらには補正項の導入がロバスト安定性の向上に寄与しうることを例証した。

高田健太郎（土居教授）「2つのクレーン動作モデルを考慮したコンテナ整列問題に対する厳密解法」

コンテナ整列問題とは、積み重ねられたコンテナをクレーン用いて順序よく整列するのに必要な手間を最小化する問題である。本研究では、2種類のクレーン移動モデルを想定して、分枝限定法に基づく厳密解法を構成するとともに、数値実験により有効性を検証した。

中澤杏咲（土居教授）「心筋細胞モデルにおける種々のイオン電流の役割と筋小胞内の電流が引き起こす不整脈に関する検討」

心筋細胞では、多くのイオン電流が心筋細胞の活動電位発生及び筋収縮に関わっている。本研究では、細胞内小器官である筋小胞体に関係する電流に注目し、既存の抗不整脈薬がこれらの電流に及ぼす影響を調べることで抗不整脈の効果及び副作用について検討した。

西出悠人（土居教授）「膵 β 細胞のインスリン分泌を介したパラクリン効果と血糖値による膵 α 細胞の電気活動の調節」

膵島を構成する細胞集団が行う血糖値制御機構を明らかにするために、 α 細胞と β 細胞の電気生理モデル及びインスリン顆粒放出モデルからなる結合系モデルを構築し、血糖値変化に対する α ・ β 細胞の活動電位応答及び細胞間相互作用（パラクリン効果）を調べた。

山口郁馬（土居教授）「柔軟な1次元FPU-KG混合格子における非線形局在振動の安定性交替と移動性に関する研究」

配列方向以外にも自由度を持ち、全体が柔軟に変形可能な1次元非線形格子において、静止型非線形局在振動の存在性や安定性について検討した。さらに空間対称性の異なる2種の解が安定性を交替する分岐点に着目し、移動型局在振動の存在を確認した。

吳逾倫（土居教授）「Mixed-Integer Programming Approaches to Group Control of Elevator Systems with Destination Hall Call Registration」（行き先階登録方式エレベータにおけるエレベータ群管理に対する混合整数計画アプローチ）

各階で直接行き先階を登録可能なエレベータシステムの群管理問題を対象とし、乗客のかごへの割当てとかごの運行を決定する問題を混合整数計画問題として定式化した。そして、乗客が次々に呼びを登

録する動的な状況下での有効性を、シミュレーションにより検討した。

XIA, Yuanyi (土居教授) 「An Integer Programming Formulation and Heuristic Algorithms for the Dynamic Block Relocation Problem」(動的ブロック積み替え問題の整数計画問題としての定式化および近似解法の提案)

積み上げられたブロック・新たに到着するブロックを順番に取り出すものとして、積み替えの手間を最小化するという動的ブロック積み替え問題を対象とした。この問題を整数計画問題として定式化するとともに、貪欲法およびアントコロニー最適化による近似解法を構成した。

神 谷 美 花 (小林教授) 「精神・神経疾患の診断支援に向けた皮質間接続と形状に基づいた白質神経線維のクラスタリングに関する研究」

精神・神経疾患の診断支援に向けて、拡散 MRI データから形状類似性に基づき全脳に対して得られた神経線維のクラスタリングを行う新たな白質神経線維解析法を提案した。本方法を、シミュレーション及び大うつ病性障害の臨床データへ適用し、その妥当性と有効性を示した。

曾我部 智 之 (小林教授) 「脳神経磁場の直接計測に向けたスピンドル撮像法における MR 信号変化に関する検討」

脳神経活動に伴って発生する磁場を捉えるスピンドル MR撮像法の感度向上を目的として 0.3 T 低磁場 MRI を用いたファントム実験と数値シミュレーションによる検討を行った。その結果、計測対象磁場の方向が MR 信号に及ぼす影響などに関する新知見を得た。

中 山 貢 (小林教授) 「多チャネル光ポンピング磁気センサの高感度化に向けたノイズ低減に関する研究」

原子磁気センサ (OPM) アレイによる高感度計測に向け、環境磁気ノイズの低減に関する検討を行い、計測面積の少ない平面型多チャネル OPM アレイであっても、複数の小型 OPM をその周囲に配置することにより環境磁気ノイズを低減できることを理論的に示した。

安 田 順 司 (小林教授) 「超低磁場 MRI における撮像時間短縮に向けた深層学習を用いた超解像法」

光ポンピング原子磁気センサを用いた超低磁場 MRI に向けて、位相エンコードステップ数の減少により撮像時間を短縮することをシミュレーションにより検討した。その結果、取得画像の分解能低下の問題を深層学習による超解像法の適用により解決できることを示した。

王 寧 (雨宮教授) 「Coupling time constant measurements of spiral copper-plated striated coated-conductor cables」(スパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体の結合時定数測定)

短尺の直線状銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線と、それを円断面コアの周囲に螺旋状に巻き付けた SCSC ケーブルを対象に結合時定数測定を行った。理論通り、結合時定数が試料内に誘導される結合電流の長さの二乗に比例することを実験的に確かめた。

秋 丸 大 甫 (和田教授) 「遅延電磁結合を含む等価回路モデルによるメタマテリアルの時間領域解析の安定化」

遅延電磁結合を含む等価回路を時間領域で扱うため、中立型の遅延微分方程式による表現を提案した。

また、素子の相互結合の周波数依存性が大きいとき、モデルが不安定になる場合があることを示し、その場合は遅延のみ分割することで安定化できることを示した。

河 本 昌 樹（和田教授）「合意制御を用いた P2P エネルギー伝送システムの送受電力均一化」

送り手と受け手が協調してエネルギー伝送を行う P2P エネルギー伝送システムにおいて、送受電力の誤差を減らすため、基準となる電流の均一化を、分散ネットワークの合意形成として定式化した。また、その合意のダイナミクスを射影行列の性質により明らかにした。

原 田 彰 吾（和田教授）「弱反転動作 MOSFET の特性差を利用したレファレンス不要な CMOS 温度センサの設計」

MOS トランジスタの弱反転動作に着目し、トランジスタ間の特性差を利用した温度センサを提案した。多数のトランジスタから統計的に 1 組のトランジスタを選択する方式とチャネル長の異なるトランジスタ組を用いる方式を検討し、レファレンス不要な温度センサの設計、試作及び評価を行った。

旭 野 昇 吾（松尾教授）「時空間有限積分法における時空間格子の生成スキームと付随する陽的時間進行法」

時空間有限積分法において、場所によって異なる時間刻み幅と基準となる空間格子とを指定するだけで双対な時空間格子を自動的に生成するスキームを開発した。その時空間格子上で電磁波伝搬計算を行う際の陽的な時間進行スキームを明示的に示す定式化を導いた。

長 嶺 英 朗（松尾教授）「非線形時間調和渦電流解析のための高効率な前処理付き反復解法の研究」

非線形時間調和渦電流解析に複素ニュートンラフソン法を適用する際に現れる大規模連立方程式の効率的な求解について検討を行った。係数行列の持つ特殊な構造に着目することで新しい前処理法を考案し、反復求解の収束性を向上できることを確かめた。

三 島 隆（松尾教授）「多磁区粒子集合モデルを用いた電磁鋼板の応力依存磁気特性評価モデルに関する研究」

多磁区粒子集合モデルを用いて、鉄芯材料である電磁鋼板の磁気特性に対する機械的応力の影響を予測する手法について検討した。励磁方向と応力方向が一致する場合の応力依存特性から、両者が異なる場合の特性を予測する応力モデルの検証を行った。

八 尾 将 央（松尾教授）「クリロフ部分空間法の観点による CLN 法の収束性に関する研究」

電磁界方程式の CLN 法によるモデル縮約の収束性について主にクリロフ部分空間法の観点から数理的検討を行った。固有値解析により CLN 法の収束性を正確に評価できること、さらに大きな計算コストを伴わない簡易的評価が可能であることなどを明らかにした。

岡 本 侑 己（中村（武）特定教授）「永久磁石補助スイッチトリラクタンスマータにおける AlNiCo 磁石のパルス磁化特性および回転特性に関する検討」

非希土類磁石である AlNiCo を使用した永久磁石補助スイッチトリラクタンスマータの車載応用に向け、固定子巻線にパルス電流を印加して磁石の磁化状態を操作する手法や、磁化状態に応じたモータの回転特性の変化について、解析と実験の両面から検討した。

木 戸 勇 志（中村(武)特定教授）「線電流近似と自己組織化を利用した回転機の電気-機械エネルギー変換過程に関する研究」

三相交流回転機の固定子巻線について、線電流近似を用いた PWM 配置および自己組織化法の考え方を導入し、経験則に依らない一意的決定法の可能性を示した。また、回転子の電気-機械エネルギー変換過程をポインティングベクトル等によって系統的に検討した。

Zhao Jiahui（中村(武)特定教授）「Study on Optimization of Structure and Control System of Induction Motor for Electric Vehicle Applications」（電気自動車用誘導電動機の構造と制御システムの最適化に関する研究）

小型電気自動車への適用を目指し、最大出力 24 kW 級かご形誘導機の最適化設計を行った。遺伝的アルゴリズムを用いた構造最適化、有限要素法解析による特性評価、およびインバータと組み合わせた特性解析の結果、上記モータの可能性を示すことができた。

工学研究科 電子工学専攻

西 嶋 泰 樹（白石教授）「Bi 系材料におけるスピニ流電流変換現象に関する研究」

Bi を含む材料のスピニ流電流変換現象を調査した。Bi を不純物として添加した Si に電流を印加したところ、試料側面においてスピニの蓄積を確認した。トポロジカル絶縁体である Bi₂Se₃ においては、スピニ流から変換された垂直方向の起電力およびその逆変換を確認した。

吉 武 慎一郎（白石教授）「イオンゲートを用いた Pd 超薄膜内のスピニ流・電流変換現象の操作に関する研究」

近年スピニ軌道相互作用 (SOI) は外部電場によって制御可能であることが理解されつつある。この現象の全体論的理解を得るために厚さ 2nm 程度の Pd 超薄膜にイオン液体ゲートにより強電界を印加して SOI の変調を観測し、フェルミ準位制御が本現象の鍵であることを明らかにした。

大 楠 良 隆（白石教授）「電界イオン顕微鏡像における輝度分布を用いた原子位置の抽出と像解析技術に関する基礎的研究」

電界イオン顕微鏡像解析を容易にすることを目的として、像における原子位置の数値的抽出と表面構造解析の手法を検討した。比較的鮮明な像を用いて原子位置決定に必要なパラメータの最適化を行い、その手法を解析の難しい像に適用して原子位置抽出が可能なことを検証した。

JANG HANEOL（白石教授）「常磁性を有する分子性絶縁体を用いたスピニ波スピニ流伝搬の研究」

2,2-ジフェニル-1-ビクリルヒドラジル (DPPH) は分子性材料でありながら不対電子による常磁性を持ち、新規スピントロニクス材料として有望である。本研究では DPPH 薄膜をチャネルとして白金電極を用いたスピニ流注入・検出実験を行い、スピニ流輸送を示す信号が得られた。

川 口 洋 生（竹内教授）「ナノダイヤモンド中の窒素欠陥中心のスピニ緩和時間に関する研究」

ナノダイヤモンド中の窒素欠陥 (NV) 中心のスピニ緩和評価に関する研究を行った。ナノダイヤモンド中の単一 NV 中心のスピニ緩和時間を評価するシステムを構築、その統計的な評価を行った。さらに、ナノ光ファイバへ結合させたナノダイヤモンド中の NV 中心のラビ振動を測定することにも成功した。

亀井祐希（竹内教授）「同一モードに生成した周波数量子もつれ光子対の空間的分離に関する研究」

二光子量子干渉過程を用いて同一の空間モードに発生した光子対を異なる空間モードに分離する方法を提案、実験により実証した。提案した実験系を、高い安定性が期待できるサニアック型の干渉計内に実装、光子対を高効率に分離できることを確認した。さらに、分離した光子が周波数相関を持つことを、分光システムを用いて実証した。

朴渠培（竹内教授）「伝令付きノンフォック状態の生成とコヒーレンス検証に関する研究」

単一光子源とビームスプリッタを用いたユニタリ変換では実現できない状態（ノンフォック状態）の、多光子多モードシステム間もつれ状態を利用した生成、およびそのコヒーレンスの検証に関する研究した。液晶リターダによって位相を制御することで、コヒーレンスの検証が可能な実験系を構築した。また、液晶リターダを精密に評価、その特性がコヒーレンス検証に与える影響を精査した。

大句拓弥（木本教授）「SiC のバルク移動度および MOS 反転層内におけるチャネル移動度の理論解析」

様々なキャリア散乱過程を考慮して SiC の電子移動度を定式化し、バルク移動度のドナー密度依存性、温度依存性を理論計算により明らかにした。また、SiC 特有の高密度界面準位への電子捕獲を考慮してチャネル移動度をモデル化し、SiC MOSFET の特性を計算する基本式を提案した。

具燦淳（木本教授）「高純度半絶縁性 SiC 基板およびそのイオン注入層の電気的性質の評価」

厳環境動作可能な集積回路の土台として有望な半絶縁性 SiC 基板の電気的性質を高温ホール効果測定により明らかにした。デバイス作製に用いる高温熱処理を施した後でも半絶縁性 SiC 基板の抵抗率は極めて高く、フェルミ準位はほぼミッドギャップ近傍に位置することがわかった。

原征大（木本教授）「高濃度ドープ SiC 上に形成したショットキー障壁におけるトンネル電流の解析」

SiC デバイスのオーム性接触の基本となる高濃度ドープ n 型 SiC 上のショットキー障壁の順方向および逆方向特性を系統的に調べ、ショットキー障壁高さと電気的特性のモデル化を行った。ゼロバイアスでも MV/cm という高電界が界面に発生すること、障壁を介したトンネル電流が電気的特性を支配することを明らかにした。

堀内孝介（山田教授）「液中原子間力顕微鏡を用いた時分割フォースマッピング法による生体分子間相互作用評価」

生体分子の間で特異的に作用する結合力を、液中原子間力顕微鏡（AFM）を用いて直接評価した。実験では、biotin 分子修飾した AFM 探針を用いて、脂質膜上の streptavidin タンパク質 2 次元結晶の構造観察を行うとともに、新たな手法である時分割フォースマッピング法を導入することで、分子分解能レベルでの特異結合力の直接解析の実現に成功した。

富浪彰人（山田教授）「ケルビンプローブフォース顕微鏡および容量原子間力顕微鏡による有機薄膜トランジスタにおけるキャリア拳動評価」

生体分子の間で特異的に作用する結合力を、液中原子間力顕微鏡（AFM）を用いて直接評価した。実験では、biotin 分子修飾した AFM 探針を用いて、脂質膜上の streptavidin タンパク質 2 次元結晶の構造観察を行うとともに、新たな手法である時分割フォースマッピング法を導入することで、分子分解

能レベルでの特異結合力の直接解析の実現に成功した。

朱 志 偉 (川上教授) 「Temperature and excitation power dependence of optical properties of violet-emitting InGaN quantum wells studied by micro-photoluminescence spectroscopy (顕微分光法による紫色 InGaN 量子井戸の発光特性の温度と励起強度依存性評価)」

395 nm 程度の近紫外で発光する InGaN 量子井戸に関して、4 ~ 500 K の温度範囲において様々な励起強度下で顕微フォトルミネッセンス測定を行った。温度が上がると刃状転位で非輻射再結合するキャリアが増えしており、素子温度が上がるハイパワー応用に向けて刃状転位の抑制が重要であることがわかった。

森 岡 政 貴 (川上教授) 「AlGaN 量子井戸の面内マクロステップ構造および光学特性の基板傾斜方位・角度依存性」

AlGaN 紫外発光量子井戸構造を 10nm 程度のマクロ分子ステップ上に形成すると、非輻射再結合が抑制され高効率発光する。本研究では、マクロステップを形成するための基板の傾斜方位・角度を精査し、ステップが折れ曲がったキンク位置でキャリア局在が促進され、より高効率に発光することを見出した。

池 田 圭 佑 (野田教授) 「厚膜 Si 热輻射光源を用いた近接場熱光発電における黒体限界を超える光電流実現に関する研究」

近接場熱輻射伝達により黒体限界を超えた光電流の実証を目指して、20μm の厚膜 Si 热輻射光源を用いた近接場熱光発電デバイスの作製・評価を行った。そして、厚膜 Si 光源と太陽電池を 150 nm の距離で近接させることで、同温度の黒体限界の 1.5 倍の光電流を得ることに成功した。

柴 田 武 志 (野田教授) 「機械学習援用による埋め込み型 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の高 Q 値化に関する研究」

機械学習による構造最適化手法を用いて、埋め込み型 2 次元フォトニック結晶光ナノ共振器の設計を行った。また、設計した構造を作製・評価した結果、埋め込み型において世界最高の実験 Q 値 184 万を達成することに成功した。

日比野 拳 三 (野田教授) 「GaN 系フォトニック結晶レーザーのワット級動作に関する研究」

GaN 系材料を用いた青色発光フォトニック結晶レーザーについて、作製法および層構造の改善による損失の低減と、放射を増大するフォトニック結晶構造の設計により、出力 2W でビーム拡がり角 0.15° と非常に狭い単峰状のビームを得ることに成功した。また、さらなる高出力化のため、高反射裏面構造の検討も行った。

和 泉 孝 紀 (野田教授) 「二重格子フォトニック結晶レーザーの大面積・高輝度化に関する研究」

二重格子フォトニック結晶レーザーの大面積・高輝度化の実現に向け、フォトニック結晶の格子点構造、及び電極構造、エピ構造等のデバイス構造全体の設計を行った。初期実証において、直径 3 mm の大面積共振領域でのレーザー発振を示し、さらに解析的にそのような大面積で 150 W の高出力かつ单一モード動作が期待されるデバイス設計に成功した。

中 西 翔（杉山准教授）「VO₂を導入したメタ表面によるテラヘルツ波の高効率周波数変換及び振幅変調」

共振型メタ表面の共振周波数を動的に変化させることで入力波の周波数を変調できることを電磁界シミュレーションで明らかにした。加えて、ポリイミド薄膜上に生成した二酸化バナジウムの温度相転移によってテラヘルツ波の振幅変調が可能であることを実証した。

湯 川 慎之介（杉山准教授）「リニア RF トランプに捕捉された Ba⁺の冷却レーザーとマイクロ運動最小化の改良」

RF干渉計を利用したオフセットロックを用いてレーザー冷却用レーザーの周波数を±50 kHzに安定化し、冷却状態の長時間維持を可能とした。また、移相器を用いてオフセット周波数を可変とした。安定化した冷却レーザーを2方向から照射して、過剰マイクロ運動最小化の改善に成功した。

工学研究科 光・電子理工学教育研究センター

北 出 大 樹（藤田教授）「ハロゲン化物原料を用いたp型コランダム構造酸化物半導体の成長と物性に関する研究」

炭素フリーのIr前駆体原料において熱重量示唆熱分析(TG-DTA)を行い、また放射温度計を用いた反応部の精密な温度測定によって、その分解過程の考察を行った。その結果、これまで用いていた原料よりも幅広い温度域でのα-Ir₂O₃薄膜の厚膜成長に成功した。

星 翔 馬（藤田教授）「超ワイドバンドギャップMgZnO薄膜の成長と深紫外光物性に関する研究」

200 nm未満の発光を示すMgZnO薄膜のSpring-8でのX線測定から、Mg原子の局在や局所的な面内欠陥が確認され、ストークス様シフトの原因の一つである事が解明された。さらに、多結晶MgZnOでのシフトが小さい事から、微小な高結晶領域の存在が重要である事が判明した。

前 田 純 也（De Zoysa講師）「可飽和吸収領域を導入したフォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化」

可飽和吸収領域を内部に導入したフォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化に向けて、発振領域の面積を直径800 μmに拡大したデバイスの設計を行った。また、設計したデバイスの作製および過渡応答特性の評価を行った結果、ピーク出力40W超、パルス幅44ピコ秒程度の短パルス発振の実証に成功した。

岩 田 錦太郎（De Zoysa講師）「複合変調フォトニック結晶レーザーへの裏面反射構造導入によるスロープ効率増大に関する研究」

複合変調フォトニック結晶レーザーによる2次元ビーム走査の実現に向け、スロープ効率の向上を目指して、裏面反射構造を導入することを理論・実験の面から検討した。裏面反射構造としてDBR(Distributed Bragg Reflector)構造を導入したことで、出射角度0°～30°の範囲で同一層構造において0.8 W/A程度の高いスロープ効率を得ることに成功した。

情報学研究科 知能情報学専攻

児玉貴志（黒橋教授）「映画推薦対話を具体例とした対話中の話者内部状態のモデル化と活用」

本研究では、対話中の話者内部状態のモデル化に取り組んだ。また、モデル化した話者内部状態の有無に応じて応答を適切に変更する対話システムを構築した。実験の結果、話者内部状態を考慮することでシステムがより自然な応答を行えることを示した。

Qianying Liu（黒橋教授）「Solving Arithmetic Word Problems with Mathematical Logic」（数学的論理を用いた算数文章題の解答）

本研究では、数学的論理が算数文章題の解答にとって重要であることを示した。数学的論理の推論に役立つためにツリー構造ニューラルネットワークを提案した。また、逆の操作に基づいて、データへの増強法を提案した。実験の結果、算数文章題の解答の質が大幅に改善できたことを示した。

Haiyue Song（黒橋教授）「Bilingual Corpus Mining and Multistage Fine-Tuning for Improving Machine Translation of Lecture Transcripts」（講義翻訳改善のための対訳コーパスマイニングと多段階ファインチューニング）

本研究では、講義分野の日本語 - 英語対訳コーパスを作成し、多段階ファインチューニング手法を検証した。また、対訳コーパスを作る段階での新たな文アラインメント手法を提案した。実験の結果、日本語 - 英語の講義翻訳の質が大幅に改善できたことを示した。

Zhuoyuan Mao（黒橋教授）「Linguistically-driven Multi-task Pre-training for Low-resource Neural Machine Translation」（低資源ニューラル機械翻訳のための言語知識に基づくマルチタスク事前学習）

本研究では、低資源ニューラル機械翻訳のために、言語知識に基づく事前学習タスクとして日本語においてJASSモデル、英語に対してENSSモデルを提案した。実験の結果、低資源言語対における機械翻訳の精度が大幅に向上できることを示した。

中尾亮太（黒橋教授）「日本語話し言葉書き言葉変換による大学講義の日英翻訳の精度向上」

本研究は、日本語の話し言葉と書き言葉、対応する英語の三つ組からなるコーパスを作成し、話し言葉書き言葉変換が日英翻訳の精度を向上させることを実験的に示した。また、話し言葉特有の現象の分類に基づきどのような現象がどの程度翻訳精度に影響するか定量的に示した。

大村和正（黒橋教授）「基本イベントに基づく常識推論データセットの構築」

本研究では、拡張性・言語非依存性のある常識推論データセットの構築手法を提案した。提案手法を用いて日本語で初となる大規模な常識推論データセットを構築し、実験の結果、常識推論能力に関して計算機モデルと人間の間に開きがあることを示した。

植田暢大（黒橋教授）「BERTに基づく統合的日本語結束性解析」

本研究では、BERTを使用することで述語項構造解析をはじめとする日本語の結束性の統合的解析を取り組んだ。結果、既存手法を大幅に上回る結果が得られただけでなく、共参照関係の性質の違いを確認し、解析においては特別に扱うべきであることを示した。

田 中 佑（黒橋教授）「日本語 Wikipedia の編集履歴に基づく入力誤りデータセットと訂正システムの構築」

Wikipedia の編集履歴から入力誤りを自動収集する方法を提案し、大規模なデータセットを構築した。データセットを用いて事前学習済み seq2seq モデルを学習し、入力誤り訂正システムを構築した。他の校正システムと比較を行い、本研究のシステムが高い精度であることを示した。

枝 本 祐 典（西野教授）「Layered Stacked Capsule Autoencoders を用いたスプライト分解」

本研究は映像をオブジェクト画像とその配置によって表現するスプライト分解に取り組んだ論文であり、特にオブジェクトの形状が変化し、またそれらが相互に遮蔽しあうように運動するシーンに対応できる手法として、Layered Stacked Capsule Autoencoders を提案した。

菊 地 謙 太（西野教授）「個性操作可能な口形予測モデル」

本研究はスピーチ音声から予測された口形に任意の個性を付与することによって音声からの顔画像生成を少量の学習データから実現することを目指した論文であり、深層学習モデルにおいて個性ごとに学習可能な潜在ベクトルも最適化することで個性の潜在表現を自動的に獲得することを実現した。

柴 田 佳 祐（西野教授）「繰り返し動作を用いた一貫性のある人体の三次元形状復元」

本研究は画像を用いた 3 次元形状復元に関する論文であり、特に被写体が同じ動作を繰り返すならば、動作の反復性を手掛かりとして異なる撮影視点・時刻の動画を時間的・空間的に校正し、被写体を中心とした多視点同時撮影環境を仮想的に更生して 3 次元形状復元が可能であることを示した。

山 下 浩 平（西野教授）「陰影からの法線推定を利用した非ランバート面に関する多視点ステレオ」

本研究は多視点画像と照明環境マップを入力とした非ランバート面の 3 次元形状復元に取り組んだ論文であり、各視点において陰影情報から被写体表面法線を推定し、さらにそれらを統合して 3 次元形状復元を行う深層学習モデルを提案した。

若 木 良 介（西野教授）「道路シーンにおける素材セグメンテーション」

本研究は安全な自動車両運転の実現にむけた路面の素材認識に取り組んだ論文であり、道路シーンを可視光偏光画像、近赤外光画像および LiDAR による 3 次元点群として同時撮影したマルチモーダルデータセットを構築するとともに、それを用いた素材セグメンテーション手法を提案した。

情報学研究科 通信情報システム専攻**笠 井 万 平（原田教授）「シンボル信頼度に基づく信号処理制御を行う端末連携 MIMO 受信に関する研究」**

端末連携 MIMO 受信システムにおける端末連携に要するオーバヘッド増加に対して、周波数領域繰り返し等化の過程で生成されるシンボル信頼度に基づく等化回数の制御手法や連携端末の選択手法を提案した。屋外伝送実験での測定結果を用い提案法の有効性を示した。

酒 井 愛 富（原田教授）「周波数共用 5G システムの実現に向けた放送用無線伝送システム信号高能率検出技術」

2.3 GHz 帯放送中向け可搬型無線中継通信システムである ARIB STD-B57 準拠 FPU (Field Pickup

Unit) と、5G システムとのダイナミック周波数共用を実現するために、SNR ≤ -10 dB の非常に微弱な信号レベルにおいても FPU 信号を検出できる電波センサ技術を提案した。シミュレーション評価に加え実際のフィールドでの実証試験も実施した。

錦 織 和 樹（原田教授）「帯域内全二重通信による異種アプリケーション高効率収容法」

5G 以降のシステムを念頭に、eMBB (enhanced mobile broadband) 同士の同一アプリケーション間、および eMBB と URLLC (ultra-reliable and low latency communications) の異種アプリケーション間へ帯域内全二重通信を適用し、通信容量を拡大する手法を提案した。3GPP が定義した評価シナリオを用いた計算機シミュレーションにより有効性を示した。

速 水 誠 太（原田教授）「高能率 5G 上りリンク信号検出技術に関する研究」

ダイナミック周波数共用システムに資する 5G 上りリンク信号の高能率信号検出技術として、周波数オフセットが存在しても高精度な信号検出を可能とする手法を提案した。また 5G 上りリンク信号検出結果を用いた自動運転システムに資する端末位置推定技術を提案した。

堀 田 大 貴（原田教授）「マルチホップ無線ネットワークにおける高信頼ルーティング法に関する研究」

次世代 IoT 無線通信基盤である Wi-SUN FAN において、高信頼なネットワーク構築を実現させるルーティング法を提案した。提案法では堅牢で柔軟なネットワークを実現するための新たなリンクメトリックを導入しており、実機実験によって通信信頼性が改善できることを示した。

リュウ シヨシ（原田教授）「重畳変調及び等化技術による自己干渉キャンセルを利用した全二重通信システム」

全二重通信システム実現のための自己干渉キャンセル技術として、重畳（スーパー・ポジション）変調技術を用いたデジタルキャンセル方式を提案した。計算機シミュレーションだけでなく、ソフトウェア無線機を用いた実機実験によっても評価し、その有効性を示した。

ワヨン ロビー（原田教授）「IoT 無線マルチホップネットワークにおける高信頼移動通信のためのルーティング方式」

次世代 IoT 無線通信基盤である Wi-SUN FAN において、ノードの移動に対応するための新たなルーティング方式を提案した。提案方式では、従来の固定ノード向けルーティング方式の問題点を解決し、迅速なハンドオーバーと、ノードの移動方向に依存しない親ノード選択を実現し、計算機シミュレーションと実機実験によってその有効性を示した。

岩 崎 正 寛（守倉教授）「Wireless Received Power Prediction with Ray-tracing Simulation and Small Amount of Measurement Data」（レイトレーシングシミュレーションと少数の実測データを用いた無線受信電力予測）

深層学習を用いた受信電力予測における、データ不足による予測精度低下問題を解決するため、電波伝搬シミュレーションを用いた事前学習手法を提案した。屋内外環境で取得した少数の実測データから高精度な予測モデルを獲得できることを実験評価により示した。

新 崎 聖 峰 (守倉教授) 「On-wire Transmitter Beamforming Using Robust Adversarial Reinforcement Learning」(敵対的強化学習を用いた吊線上の送信局のビーム方向制御)

吊線上に設置されたミリ波送信局のビーム方向制御において、ロバスト性を向上するために敵対的強化学習を提案した。シミュレーション評価により、学習時と吊線の張力と質量が異なる状況下において追加学習なしでビームの不対向を解消する実現可能性を示した。

三 枝 茉 由 (守倉教授) 「無線 LAN 通信履歴情報に基づくフレーム損失要因解析」

無線 LAN 通信のフレーム損失に関し、パケットキャプチャで取得したフレーム送信時刻などの通信履歴情報を用いてフレーム衝突を要因とする損失の発生や衝突原因 AP を特定する手法を提案した。さらに、この判定問題に関する 2 標本検定の適用を提案した。

吉 田 直 矢 (守倉教授) 「Federated Learning with Client Selection for Heterogeneous Clients in Mobile Networks」(モバイルネットワークにおける異なる性能を持つ端末を用いた Federated Learning)

FL における non-IID データによる精度悪化を改善する学習方式を提案し、シミュレーションにより有効性を示した。また、MAB を用いた FL の端末選択アルゴリズムを提案し、シミュレーションと実験により学習時間の削減を実証した。

康 瑞 (大木教授) 「Modeling and Analysis of Virtual Network Functions Allocations in Service Function Chains Considering Availability Schedules」(可用性スケジュールを考慮したサービス機能チェーンにおける仮想ネットワーク機能配置のモデリングと解析)

本論文は、可用性スケジュールを考慮して、サービスの継続時間を最大化する仮想ネットワーク機能の割り当てモデルを提案した。さらに、提案モデルを拡張して、不確定な可用性スケジュールと予備の仮想ネットワーク機能を考慮するモデルを開発した。

大 津 龍 (大木教授) 「Edge computing schemes in 3D-image sensor networks with resource limitation」(3D イメージセンサネットワークにおけるリソース制限を考慮したエッジコンピューティング方式)

本論文は、イメージセンサネットワークにおける送信と計算処理の優先制御について論じた。交差点など交通事故の潜在リスクの大きい場所でのスマートモニタリングを想定し、複数の Light Detection and Ranging センサーを用いた帯域割り当て方式を提案した。

藤 田 理 沙 (大木教授) 「Shared Backup Resource Assignments and Analysis for Middleboxes」(ミドルボックスの共有予備資源割り当てと解析)

ミドルボックスはネットワークにおいて幅広い機能を提供する。ネットワーク内の機能の故障に備え、サービス提供者はそれらを適切にバックアップし、保護する必要がある。本論文は、故障に備えるために、予備資源をネットワーク内の機能に割り当てる方法を提案した。

竹 田 健 太（大木教授）「Lightpath provisioning tolerant to path failures and signal degradation in elastic optical networks」（エラスティック光ネットワークにおけるパス故障と信号劣化に耐性のある光パスの設定）

本論文では、エラスティック光ネットワークにおいて、複数パスを用いてトラヒック伝送を行う、耐故障性のある光パス設定手法を提案した。また、マルチコアファイバを用いた環境において、コア間クロストークを考慮した光パス設定モデルを提案した。

小 刀 星 輝（大木教授）「Resource Allocation Models in Software-Defined Network」（ソフトウェア定義ネットワークにおける資源割り当てモデル）

本論文では、ソフトウェア定義ネットワークにおいて、運用に必要な資源を効率的に割り当てる手法について論じた。スイッチに格納されるフローエントリ数を最小化するマルチキャストルーティングモデル、および、耐故障性を考慮したコントローラ配置モデルを提案した。

久 米 祐 貴（佐藤教授）「MOSFET クロスバアレイ回路を用いたエコーステートネットワーク向けハードウェアリザバーの設計」

再帰型ニューラルネットワークの一種であるエコーステートネットワークでは、リザバーとしてランダムな固定値を用いる。本研究では、MOSFET の製造時に避けがたく生じるしきい値電圧のばらつきを利用することで、CMOS プロセスにより集積化が可能な新たなハードウェアリザバーの構成法を示した。

大 島 國 弘（佐藤教授）「p 型有機薄膜トランジスタにおけるバイアス・ストレス劣化及び回復のモデル化」

低電圧有機薄膜トランジスタ（OTFT）で見られる電気特性の劣化を正確に表すモデルが求められている。本研究では、p 型 OTFT のストレス劣化がゲート電界による半導体へのキャリア注入に起因することを特定し、この劣化要因とその回復を表すことができるデバイスモデルを提案した。

小 野 龍 輝（佐藤教授）「Module Learning with Errors 問題に基づく耐量子鍵交換の GPU 実装向け自動パラメータチューニング」

Module Learning with Errors 問題に基づく耐量子鍵交換の実装について、様々な GPU アーキテクチャにおいてユーザーが与える評価値を最大化するパラメータを自動探索するフレームワークを提案した。複数の GPU に提案フレームワークを適用し、最適化前後で鍵交換の遅延を最大 62% 短縮した。

塚 本 裕 貴（佐藤教授）「マルコフ連鎖モンテカルロ法による任意モデルパラメータ分布に基づく統計的デバイスモデリング」

任意分布に従うデバイスモデルパラメータに対応できる、マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく統計的モデリング手法を提案した。MOSFET の電流ばらつきに提案手法を適用することで、既存手法と比較し、より高精度にモデルパラメータのばらつきと分布形状を再現できることを確認した。

永 井 健太郎（小野寺教授）「最小エネルギー動作を実現する P/N ウエルを独立制御可能な DLL 型基板電圧生成回路」

集積回路の基板電圧を適切な値に調節することにより、所定の動作速度を確保しつつ消費エネルギーを最小化する方法を開発した。P/N ウエルの基板電圧を独立に制御する機構と基板電圧生成回路を設計

試作し、実チップにより最小エネルギー動作を確認した。

荒木 佑介（小野寺教授）「先端微細加工プロセスで実現するビアスイッチ FPGA の性能の解析および向上手法」

ビアスイッチをプログラマブル配線に用いるビアスイッチ FPGA を先端微細加工プロセスで実現した場合の回路規模・動作速度・消費エネルギーを解析し、プロセススケーラビリティを示した。併せて、配線アーキテクチャ改善などの更なる性能向上への指針を検討した。

村上 健祐（小野寺教授）「ランダムテレグラフノイズに起因する遅延ばらつきの回路構造依存性解析」

微細トランジスタには、チップ内ランダムばらつきに加えて動的なランダムテレグラフノイズが発生する。これらのばらつきによる遅延変動の回路構造依存性を正確に表現する非線形モデルを開発し、実測定結果とモンテカルロ解析結果が一致することを確認した。

Chao Huang（小野寺教授）「Dynamic Energy Prediction Based on Hardware Performance Counters for Minimum Energy Point Tracking System」

（最小エネルギー点追跡のためのハードウェアパフォーマンスカウンタに基づく動的消費エネルギー予測）

プロセッサの動的消費エネルギーを、ハードウェアパフォーマンスカウンタに基づき実行時に見積もる手法を検討した。見積もり結果を用いて、所定の動作速度を確保しつつ、消費エネルギーを最小化する電源電圧と基板電圧を追跡できることを実プロセッサ測定で確認した。

寺田 匠吾（小野寺教授）「演算機能の組み込みを目指した標準セル方式に基づく低電圧オンチップメモリ」

データの読み出しと演算を同時にを行う、標準セル方式に基づく完全ディジタル型オンチップメモリのアーキテクチャを検討した。低電圧動作に特化したカスタム標準セルを提案・作成し、低電圧領域で高効率に動作する完全ディジタル型オンチップメモリを設計した。

内田 翼（小野寺教授）「幅広い電圧領域で集積回路の安定動作を実現するフリップフロップ設計に向けたタイミング解析モデル」

定格電圧領域から、トランジスタが弱反転状態で動作する低電圧領域までの幅広い範囲で、フリップフロップのセットアップ・ホールド時間を見積もる近似モデルを提案した。提案モデルに基づき、最適なタイミング特性で動作するフリップフロップ設計手法を検討した。

情報学研究科 システム科学専攻

浅井 飛鷹（石井教授）「圧力伝搬経路を伴う空気圧人工筋システムの同定と力制御」

チューブ内流体の摩擦モデルと空気圧人工筋の体積変化に伴う圧力変動から、システムにおける圧力伝搬のモデルを導出した。モデルを用いて同定を行い、圧力伝搬の影響が大きい実験条件において推定精度が上がることを確認した。最後にモデルの補償を伴う制御によって、同様の実験条件における力制御の目標軌道再現性が改善することを確認した。

石井 峻介（石井教授）「方策遷移勾配法」

意思決定問題や制御課題において、モデルベース強化学習はモデルのバイアスにより漸近的な性能が低下することがある。本論文は方策勾配法の原理を応用し、状態遷移モデルの方策に寄与する部分を重点的に学習することを提案した。提案手法は、倒立台車問題において、高い漸近性能を効率的に獲得できた。

菊川 翔真（石井教授）「被験者間類似性ネットワークを活用する脳情報デコーディング」

脳デコーディングにおける被験者間転移学習は、デコーダー作成の負担を減らす有効な手段である。本研究は、対象者の属するコミュニティを安静時の脳画像から推定することで、デコーダー選択を行う転移学習を提案した。空間注意タスクにおける fMRI デコーディングにおいて、提案手法は高い性能を示した。

片山 梨沙（石井教授）「Decoding scene prediction and its confidence during partially-observable maze exploration using fMRI (fMRI を用いた部分観測迷路探索中のシーン予測および確信度デコーディング)」

実世界のような部分観測環境において、予測の生成は不確実性を伴う。本研究では、不確実環境における脳活動パターンからの予測の解読可能性を検証するため、部分観測迷路探索中の脳活動を計測し、被験者の次時刻シーン予測およびその予測に対する確信度の解読精度を評価した。

山口 陽太郎（石井教授）「深層強化学習を用いたブリッジのビディングシステムの構築」

コントラクトブリッジのビディングシステムをニューラルネットワークを用いて、教師あり学習と強化学習で構築する。ビディングの状態を全て一意に表現するために新たなニューラルネットワークの入力表現を提案し、安定して効率的に強化学習を進めるために、非同期分散の学習アーキテクチャと、正則化項を導入する。

渡辺 俊樹（石井教授）「四脚ロボットの歩行制御のための階層的 CPG 強化学習」

本研究は、生物の周期運動のメカニズムを模倣した運動制御と、感覚フィードバック信号に応じた運動制御を持つ四脚ロボット歩行制御フレームワークを提案した。提案フレームワークは、多様な路面環境において、試行回数が少ない状況でも安定した歩行制御を獲得できた。

角谷 侑紀（松田（哲）教授）「DANTEパルスを用いた高速CEST MRIの実現に向けた撮像パラメータの検討」

プロトンの化学交換を利用して低濃度の溶質を観測する CEST MRI 法において、複数の周波数成分を持つ DANTE パルスを利用して高速化を実現するために、DANTE パルスの設定に関する最適化を行った。交換速度に応じた適切な設定や溶媒のプロトンの挙動に注意する必要性を明らかにした。

TONG Fei（松田（哲）教授）「X-ray2Shape: グラフ畳み込みネットワークを用いた単一 X-ray 画像からの臓器形状再構成」

グラフ畳み込みネットワークを用いて単一の X-ray 画像から三次元臓器形状の再構成を達成する枠組みを構築した。臓器の平均形状と患者個人の臓器間の形状差の学習に有効な損失関数を設計し、疑似 X-ray 画像から肝臓形状を高精度に推定できることを示した。

永 井 一 希（松田(哲)教授）「下顎骨再建に重要な特微量群抽出に基づく手術計画モデルの生成」

下顎骨再建術を対象として、手術計画に重要な特微量群の優先選出による手術計画モデル生成法を提案した。医師が指定した下顎骨再建計画における移植骨の本数を高い正解率で再現する低次元特微量を明らかにし、特徴抽出に要する計算量を削減できることを示した。

新 田 潤 平（松田(哲)教授）「擬似カメラ画像の内部補完学習を用いた拡張内視鏡画像の生成」

機械学習に基づく画像補完によって内視鏡画像と3次元CTモデルの位置合わせを達成し、臓器内部の腫瘍や血管構造を可視化する拡張内視鏡画像の生成法を提案した。提案法を実患者の内視鏡画像に適用し、生成した拡張内視鏡画像内の腫瘍位置同定性能を確認した。

前 川 日南子（松田(哲)教授）「気胸変形の学習に基づく肺部分形状メッシュの可変形位置合わせ」

手術時に取得可能なCone-beam CT画像に含まれる肺の部分形状を対象に、気胸変形の統計的性質の学習に基づいた可変形メッシュ位置合わせを提案した。位置合わせ誤差の定量評価を行い、従来法と比較して形状誤差及び腫瘍位置誤差が減少することを確認した。

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻**坂 本 佳 樹（下田教授）「感性に着目した合意形成メカニズムに関する実験研究」**

被験者実験により合意形成メカニズムを人間の感性の観点から解明することを目的として、2名2組の4名全員が同じ結論に至ることを目標とする「全員一致ゲーム」を考案し、感性要素として相手からの好感度の変化、相手への好感度の変化を測定した。

宮 崎 大 輔（下田教授）「知的集中の低下の予測方法に関する研究」

デスクワークなどの知的作業に対する集中を表す知的集中に着目し、知的集中の低下の予測方法を検討することを目的とした。長・短期記憶（LSTM）を用いて知的集中の低下を予測する予測器を作成したが、実環境に適用するには十分ではない予測精度となった。

大 本 悠 輔（下田教授）「プラント機器の迅速かつ確実な特定のための撮影支援手法の提案と評価」

プラント内を撮影した複数の画像から現在地を特定するシステムの実現に向けて、過去に撮影した画像から次に撮影すべき方向を決定する手法を開発・評価した。その結果、情報エントロピーを指標に用いることが撮影回数を減らすために有効であることがわかった。

坂 本 龍 平（下田教授）「認知アーキテクチャに基づく知的集中変化のシミュレーションに関する研究」

本研究では、認知アーキテクチャを用いて設計したモデルを用いて認知課題の解答プロセスをシミュレーションした。また、実験データの1問あたりの解答時間分布を再現するためのパラメータの値を用いて、知的集中の変化を認知プロセスの観点から解釈した。

高 島 由 妃（下田教授）「「映え（ばえ）」に着目した環境配慮行動促進手法に関する研究」

Instagramにおける「映え」が環境配慮行動（以下PEB）促進に繋がるかどうかを実験により調べた。その結果、映える写真を見たときの方が、映えない写真を見たときよりも有意にPEBを真似したくなるということがわかった。

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

板 野 翔 武 (中村(祐)教授) 「ヘリカル系プラズマの磁場配位最適化手法に関する研究」

ヘリカル系プラズマでは、非軸対称磁場に捕捉されながら磁気ドリフトを受ける粒子の影響で、粒子間衝突に由来する粒子及び熱の輸送が大きくなる。この輸送を抑制する磁場配位を求める手法の開発及び計算の効率化を行った。また、求めた磁場配位の安定性も評価した。

河 越 俊 平 (中村(祐)教授) 「トカマクにおけるヘリカルコアと MHD 不安定性」

近年、トカマク型プラズマ閉じ込め実験において、磁気軸近傍のプラズマがヘリカル状にねじれた平衡状態が観測されている。このヘリカルコアの形成機構を調べ、プラズマ電流が駆動する不安定性のみならず圧力が駆動する不安定性が形成機構であることを明らかにした。

中 谷 混 平 (中村(祐)教授) 「シャフラノフシフトに影響された乱流輸送のベータ値依存性」

乱流輸送はトカマクプラズマの閉じ込めを悪化させる主要因である。核融合反応率を左右する重要なパラメータである規格化圧力（ベータ値）の乱流輸送への影響を調べた。その結果、規格化圧力の増大によって生じる閉じ込め磁場のずれが乱流輸送を増大させることを示した。

花 山 侑 生 (中村(祐)教授) 「反復法を用いた非軸対称 MHD 平衡計算コードの開発」

トカマク型核融合炉におけるプラズマの平衡状態は軸対称であると考えられていたが、近年、その非軸対称性の重要性が理解されている。この非軸対称平衡を電磁流体理論に基づいて数値計算するプログラムを新たに開発した。特に、アルゴリズムの検討及びその実装を行った。

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

太 田 圭 祐 (土井教授) 「導電性中間層として La ドープ SrTiO₃ を用いた新規構造 YBa₂Cu₃O₇ 超伝導線材の研究」

{100}<001>集合組織をもつ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした新規 YBCO 線材構造の開発を目的とし、クエンチ発生時の電流回避経路を確保するための導電性バッファ層として La ドープ SrTiO₃ を使用することの可能性を検討した。

壁 谷 将 生 (土井教授) 「導電性中間層として (Sr_{1-x}Nd_x) TiO₃ を用いた YBa₂Cu₃O₇ 高温超伝導線材の研究」

{100}<001>集合組織をもつ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした新規 YBCO 線材構造の開発を目的とし、クエンチ発生時の電流回避経路を確保するための導電性バッファ層として Nd ドープ SrTiO₃ を使用することの可能性を検討した。

神 部 広 翔 (土井教授) 「薄膜型 MgB₂ 超伝導線材実用化に向けた金属基材及び金属基材 /MgB₂ 薄膜間反応防止層の検討」

SUS304 に換えて Fe テープを基材とする MgB₂ 超伝導線材の検討を行い、MgB₂ との間に Nb 拡散バリア層を挿入、MgB₂ 層上に Nb 保護層を形成し、その上に Cu 安定化層を形成する Cu/Nb/MgB₂/B/Nb/Fe の線材構造有効であることを見出した。

吉 岡 雄 太（土井教授）「 $\{110\}<110>$ 集合組織 Ag テープ上に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 層をエピタキシャル成長させた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{Ag}$ 線材を接続部に配置した超伝導接続技術の基礎検討」

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 高温超伝導超伝導線材の実用化に向けて、最大の課題となっている超伝導接続技術の開発を目指し、結晶配向 Ag テープ上に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 層をエピタキシャル成長させた補助線材を使用することで、高特性な超伝導接合が従来より短い接合作業時間で実現できることを見出した。

内 田 勇 斗（白井教授）「高温超電導 MRI マグネットの磁場安定性と電源制御方式に関する研究」

高温超電導 MRI マグネットを 2 つの制御方式の電源を用いて 20A (0.27T) まで 3 つの励磁方法で励磁し、磁場安定性と電流変動を比較した。各電源でイメージングを行い、SN 比を比較した。XTAP を用いた簡易等価回路モデルを作成し、遮蔽電流を再現した。

小 谷 藍 太（白井教授）「最適潮流計算を用いた超電導発電機の系統導入効果に関する研究」

超電導発電機を含む簡易系統モデルに対して最適潮流計算を行うことで、系統導入効果を定性的に把握した。また、実系統モデルに対しても同様の検討を行うことで、系統導入によるメリットを定量的に評価した。

田 井 宏（白井教授）「REBCO パンケーキコイルを使用した変圧器磁気遮へい型超電導限流器の限流特性と磁場解析」

三相のパンケーキ型の変圧器磁気遮へい型超電導限流器を設計、製作して、限流器の限流特性や線材温度について検討を行った。また、模擬電力系統での実験を想定して、三相限流器システムの配置構成について有限要素法磁場解析ソフトウェアを用いて検討した。

原 真太郎（白井教授）「液体水素冷却下における MgB_2 線材の超電導特性把握と解析」

液体水素浸漬冷却下における MgB_2 単芯線の常電導伝搬特性について、実験とシミュレーションによって把握を行った。また、強制対流冷却下における MgB_2 多芯線の臨界特性について実験から把握を行った後、シミュレーションによって復帰特性を評価した。

松 下 直 也（白井教授）「GdBCO 無誘導巻パンケーキコイルを用いた抵抗型超電導限流器の有負荷下での復帰特性」

高温超電導テープ線材にフロロサーフ面と Bare 面を交互に設けた試験体を作製し、線材表面の状態が限流器の復帰特性に及ぼす影響を調べた。また、故障電流限流前後に負荷電流を流して有負荷下限流実験を行い負荷電流の復帰特性への影響を調べた。

エネルギー理工学研究所

岡 佑 旗（長崎教授）「核融合プラズマにおける電子バーンシュタイン波加熱・計測のための有限要素法を用いた O-X モード変換解析」

磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて、電子バーンスタイン加熱・計測に向けた O-X モード変換を有限要素法を用いて数値解析し、2 次元スラブモデルでの有限幅ビームのモード変換効率を求めるとともに、ヘリオトロン J 磁場配位でのモード変換を調べた。

徳 原 圭一（長崎教授）「ヘリオトロンJにおける非共鳴マイクロ波加熱プラズマ中の高エネルギー電子の挙動」

トーラス型閉じ込め磁場中に非共鳴マイクロ波を入射することで MeV クラスの高速電子が観測された。この現象を解明するために高速電子のスペクトルを計測し、磁場配位依存性・進行方向依存性を調べた。その特徴から加速機構として統計加速が想定される事を明らかにした。

三 好 正 博（南准教授）「ヘリオトロンJにおける Nd:YAG レーザトムソン散乱計測のためのイベントトリガシステムの開発」

プラズマ中の高速イベント発生に同期してトリガ生成し計測を行うイベントトリガ Nd:YAG レーザートムソン散乱計測装置を設計開発した。ECH プラズマへのペレット入射実験にて急激なペレット溶発時の電子温度 / 密度分布変化を計測することに成功した。

山 中 雄 太（南准教授）「ヘリオトロンJの ECH プラズマにおける電子熱輸送の磁場配位依存性」

異なる磁場配位を有する ECH プラズマに対し電子温度密度分布を計測した。バンピネス磁場成分が小さいほど温度分布がピークし密度分布のホローネスが大きくなることを見出した。また、その時の実効電子熱拡散係数を計算し評価した。

村 田 駿 介（門准教授）「低雑音化検出器を用いたヘリオトロンJビーム放射分光法による密度揺動計測」

ビーム放射分光法に適用している APD 検出器の冷却装置を整備し、熱雑音特性を 40% 低減し、密度揺動の位相差測定の精度が向上した。高密度 NBI プラズマの 2 次元計測において、2 チャンネル間の位相差から、波数、およびポロイダルモード数を推定した。

岡 野 竜 成（門准教授）「ヘリオトロンJにおける真空紫外分光法を用いた低価数不純物に関する研究」

電子温度変化に鋭敏なベリリウム様酸素イオン (O V) の輝線対にコロナモデルを仮定し、電子温度の推定を試みた。視線掃引による多視線計測を行い、線積分値からトーラス断面の空間分布を再構成し、発光位置における電子温度の空間分布推定に成功した。

生存圏研究所

黒 川 浩 規（山本教授）「観測口ケットに搭載する TEC 観測のための 2 周波ビーコン送信機・アンテナの開発」

観測口ケットから地上までの 2 周波ビーコン観測用の送信機とアンテナを設計・試作した。送信機は周波数 150MHz と 400MHz で周波数比が正確に 3 : 8 である信号を生成する。アンテナは逆 L 型とし、打上げ時の高温（約 200° C）に耐える素材を選定し実測を行って性能を確認した。

古 元 泰 地（山本教授）「電離圏擾乱の研究に資するマルチスケール数値シミュレーションの開発」

赤道域の電離圏で発生するプラズマバブルと呼ばれる擾乱現象は不規則な密度構造を内部に持ち、測位衛星等からの電波伝搬に影響を及ぼす。本研究では、全球電離圏モデル、局所電離圏モデル双方の長所を生かした電離圏数値モデルを開発することに成功した。

高木 理絵子（山本教授）「赤道大気レーダーを用いた金環日食時の電離圏 E 領域不規則構造の研究」

日食時の電離圏 E 領域不規則構造を対象として、2019 年 12 月に東南アジア一帯で発生した金環日食時の電離圏変動を赤道大気レーダーやイオノゾンデで観測し、中性大気と電離大気の相互作用を扱う物理モデル（GAIA）によるシミュレーションとの比較検討を行った。

橋野桃子（橋口教授）「熱帯対流圏界層（TTL）における乱流層とオゾンの鉛直分布の変動」

赤道大気レーダーとオゾンゾンデによる集中観測を実施し、熱帯対流圏界層（TTL）で観測される乱流層が赤道ケルビン波の歪みや碎波によって発生すること、またそれらがオゾン変動の主要因であり、乱流混合による寄与は二次的であることを見出した。

藤田陽一郎（橋口教授）「気温分布計測用ラマンライダーの地上校正手法に関する研究」

気温の鉛直分布を計測するラマンライダーの校正係数を、大気中に照射する前のレーザー散乱光から求める手法を提案した。散乱光検出空間内の温度および計測スペクトルの安定性を様々な環境下で評価し、ラジオゾンデとの比較実験から気温推定精度を検証した。

滝朋恵（小嶋教授）「あらせ衛星によって観測される孤立静電ポテンシャルに関する研究」

地球の内部磁気圏で形成されている「孤立した静電ポテンシャルの流れ」を、Arase 衛星により捉え、そこから得られた波形観測データおよびインターフェロメトリ観測データの詳細解析を行い、ポテンシャルの空間構造・スケール、および、移動速度を定量的に明らかにした。

西田悠一郎（大村教授）「日本の送電網を流れる地磁気誘導電流のシミュレーション研究」

日本の 187-500 kV 送電網を流れる地磁気誘導電流を予測するため、地電場の観測値を用いる方法と、地質構造及び地震波速度から推定した地下電気伝導度を電磁界シミュレーションに与えて得られた地電場を用いる方法を開発した。変電所で実測した値と比較し、精度を評価した。

嶋本紘己（大村教授）「地球内部磁気圏における電磁イオンサイクロトロン波の発生領域に関するシミュレーション」

磁気流体シミュレーションと内部磁気圏粒子移流シミュレーションを組みあわせ、電磁イオンサイクロトロン波が成長可能な領域を求めた。夜側の広域で線形的に成長する一方、非線形成長は限定的であった。現実的な設定と観測結果との詳細な比較検証が必要である。

松原広之（篠原教授）「近傍界での高効率マイクロ波電力伝送に向けた移動体の方向及び距離推定」

本研究では本研究では近傍界における移動体への高効率マイクロ波電力伝送の実現を目的とし、近傍界に存在する対象の方向と距離の推定手法の開発を行った。本研究では近傍界 DOA Matrix 法とESPRIT 法を併用することで先行研究の問題を解決した。

榎木涼介（篠原教授）「電磁界結合型マイクロ波加熱装置の低漏洩化に関する研究」

本研究では電磁界結合型のマイクロ波加熱装置の改良を行い、その結果、吸収効率を増加させることに成功し、また、漏洩電力の低減も同時に達成することに成功した。漏洩電力の低減により、入力電力を上昇させることも可能となった。

楚 杰（篠原教授）「二次高調波を用いた閉ループ制御型マイクロ波電力伝送システムの研究」

本研究では受電側に外部電源の必要ない、閉ループ制御マイクロ波電力伝送システムを研究対象とした。閉ループ制御のフィードバック信号を無線で伝達するため、レクテナを用いて通信する方法を理論で示し、フィードバック信号の生成、送信及び受信システムをそれぞれ構築して、実験で評価した。

[連携]

河 合 勝 己（篠原教授）「Development of 920MHz Band Rectifier Circuit for Vital Sensors on Wireless Power Transfer」

本研究では 920MHz 帯マイクロ波送電を用いたバイタルセンサー駆動用レクテナの開発を行った。シミュレーションと測定実験の誤差要因を追求し、開発したシングルシャント型整流回路は世界最高の整流効率 89.9% を達成した。

学術情報メディアセンター

HU KUNQI（小山田教授）「A deep learning technique for visualizing the plasma shape in a Force Free Helical Reactor, FFHR（深層学習を用いるヘリカル型核融合炉におけるプラズマの形の可視化）」

融合炉設計の一環として、磁力線データからプラズマ全体の形を可視化する手法が必要とされている。深層ニューラルネットワーク（DNN）を用いて、磁力線データをボリュームデータに変換し、その結果を等値面可視化することにより、従来方法と比べ、計算時間を削減することができた。本手法の有用性は核融合研の専門家により検証された。

濱 地 瞬（小山田教授）「学術論文データを用いた IEEE Visualization 論文の引用数予測とサーベイへの活用」

学術論文データを用いた引用数予測は盛んに行われているが、その知見を活用したビジュアルインターフェースの開発は行われていなかった。これに対して、引用数予測における特微量の重要度を紐付けたネットワーク探索ベースの論文サーベイ用インターフェースを開発し、ユーザー実験により評価することでその有用性を検証した。

HAN ZHONGJIANG（小山田教授）「Page extraction of 3D booklet data based on an interactive annotation of 3D coordinates (3 次元座標のインタラクティブなアノテーションに基づく 3 次元冊子データからのページ抽出)」

デジタル化された文献の分析手法については、冊子体から生成された三次元画像から正しくページ情報を抽出する技術が期待されている。これに対して、冊子体内部点におけるページ番号と三次元座標を指定できる対話環境を用いて、ラプラス方程式厳密解による冊子体の各ページ面を等値面とするようなスカラ場を適切に生成し、その等値面を抽出し、三次元画像をマッピングすることによりページ情報を表示する手法を開発した。実験を通して提案手法の有用性を証明した。

中 村 大 地（中村(裕)教授）「深層ネットワークを用いた画像比較による笑顔を対象とした微細な表情変化の認識」

深層ネットワークを用い、時間的に近接した 2 枚の画像を比較することによって笑顔の表出やその変化を認識する手法を提案した。これによって、日常生活に現れるような小さな表情変化を認識すること

が可能となること、表出された笑顔の順序関係を設定できることなどを示した。

藤 原 巧 人（中村（裕）教授）「人間の姿勢と動作の特性に適応した指差しインターフェースの設計」

プレゼンテーション中の指示動作を計測してコンテンツの強調や図形の描画等を自動的に行うポインティングインターフェースのための、ポテンシャル関数を用いた指示対象の推定手法、および、プレゼンターの姿勢に基づいて表示の曖昧さや動きを変化させる手法を提案した。

高校生のページ

電力のパケット化 一電力と情報の統合を目指して一

工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座
持山志宇、引原隆士

はじめに

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

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

電力のパケット化

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

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



図1：電力のパケット化

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

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

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

電力のパケット化を実現するハードウェア

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

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

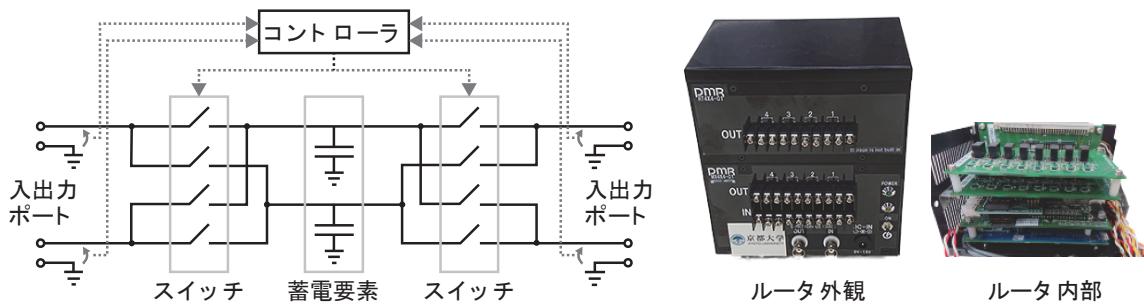


図2：電力パケットルータの回路例（左）と実機写真（右）

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

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

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

電力のルーティング

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

電力パケットの密度変調

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

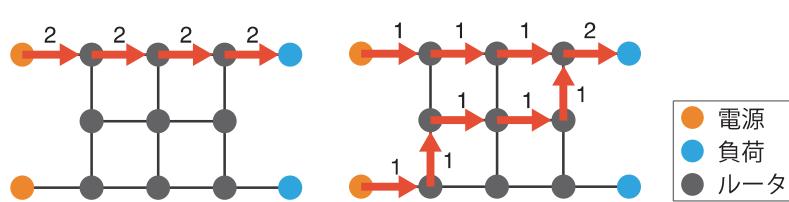


図3：電力パケットルーティングの一例

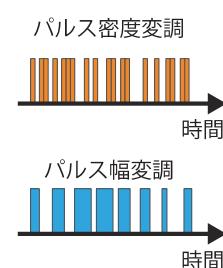


図4：変調方式

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

ロボット歩行制御への応用

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

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

電力の論理演算

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

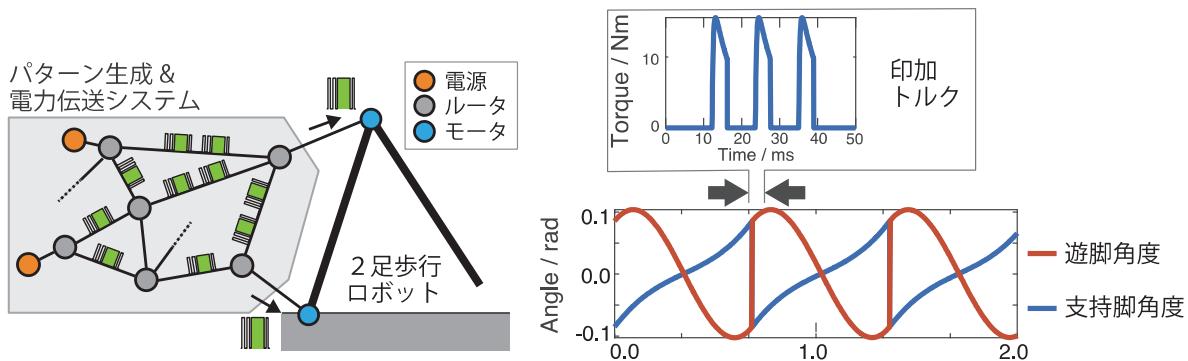


図5：電力パケットを用いたパルス給電による歩行ロボットの制御

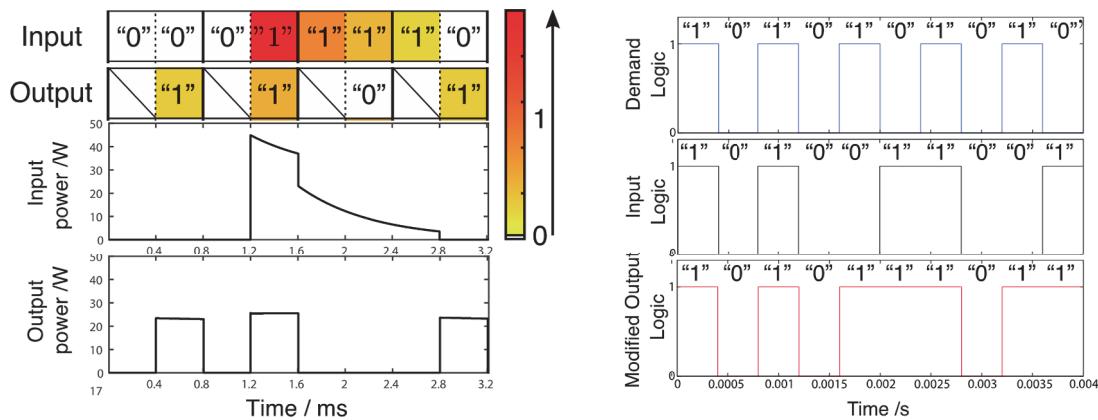


図 6：電力の論理演算（左）と誤り訂正（右）

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

おわりに

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

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

学生の声

論文投稿を通して得られたもの

情報学研究科 知能情報学専攻 黒橋研究室 博士後期課程1年 植田暢大

研究活動においては、一定の成果が得られるとそれを国際学会などに投稿することになる。私は、修士2年の頃に国際学会に論文を投稿し、発表を行った。本稿ではその経験を通して得られた学びについてその道のりとともに共有したいと思う。

私は、日本語テキストにおいて明示されていない主語や目的語を補う、述語項構造解析というタスクの精度向上に取り組んでいた。私の研究ではそれに加え、類似する他3種類のタスクも同時に解析することを試みていた。修士1年の終わり頃には一定の成果が得られたため、国内学会で発表を行った。この発表は光栄にも若手奨励賞に選ばれ、次は国際学会で発表する運びとなった。

しかし、国際学会への投稿は一筋縄ではいかなかった。解析精度の向上には成功していたが、国際学会に投稿する上で今一つ新しさが足りなかつた。そのため、さらなる精度向上のため手法の改良を様々試みたがあまり良い結果は得られず、じりじりと締め切りが近づいてきた。そこで指導教員と相談し、同時解析するタスクの組み合わせを変化させ、その性質を調べるという方向に舵を切った。全ての組み合わせで実験を行い、結果を俯瞰したところ、共参照解析という1つのタスクの特異性を見出すことができた。これを主張の大きなポイントとして、無事論文はその年の国際学会(COLING2020)に採択されることになった。

思えば、タスクの精度を改善するという視点にこだわっていれば論文採択は叶わなかっただろう。論文執筆から採択までを通して、元からの考えに囚われず、常に幅広い視野で現象を見つめることの大切さを実感した。日々研究していく上で、この経験を心に留めつつ常に幅広い視点を持てるよう精進していきたい。

研究室での3年間

工学研究科 電子工学専攻 木本研究室 博士後期課程1年 原征大

ついこの間研究室配属されたばかりのようなつもりでいたが、気づいたらD1になっていた。研究室での3年間はとても密度が濃く、研究を進めながら学会発表や論文執筆に取り組み、種々の申請書の執筆、実験装置の維持管理や講義のレポートをこなし…という感じで、忙しない日常を過ごしていた。楽な道のりではなかったが、苦労しながらも様々な知識・能力を身につけ、これまでの人生の中で最も大きく成長できた3年間だったと感じている。

新たな知識や能力を獲得し、それらをより深め磨こうするために、私自身はどのような心構えでいる(いた)だろうか、と考えてみると、「無知の知」的な意識が常に根底にあることに思い至る。最初から何でも知っていて何でもできる人はいないのだから、学びの機会があるたびに一つ一つ素直に受け入れ着実に身につけていけばいい、自分はいつでもビギナーだ、という意識をもつことが、自分の成長の土台になってきたように思う。

…と、自身の心構えについて語ってきたが、実際のところ、周囲の人たちの助けがなければ、力を伸ばすことはおろか何一つ成し遂げることなどできなかつた。人との出会いや環境に恵まれ、自分の努力だけではどうにもならないような幸運にも恵まれてきた(私が大学院に入学したのと同時に卓越大学院プログラムがスタートしたことなどはその最たる例)。とにかく感謝するばかりである。これまで享受してきたことを周囲の人に還元し、誰かの助けになれるよう努めることが、これから私の新たな役割・責任であると感じている。

D1という研究室生活の折返し地点でこの原稿を執筆する機会を頂いたので、何を書けば良いかと締め切り当日まで右往左往しつつ、これまでのことをあれこれ振り返ってみた。今後も引き続き諸々に励んでいきたい。

教室通信

コロナ禍での電気系教室

電気電子工学科 学科長 黒 橋 穎 夫

2020年4月からコロナ禍とともに学科長を務めてきましたので、この機会にコロナ禍での電気系教室の状況を振り返り、皆様にお伝えしたいと考えました。2020年2月頃、前学科長の和田先生に引き継ぎをして頂いていたころから、世の中が新型コロナウイルス感染症一色となり始めました。2019年度の卒業式は中止となりました。

2020年度前期

2020年度の入学式も中止となり、全学共通科目や各学部の専門科目は開講を5月に延期することになりました。日本のほとんどの大学でもこのような開講延期が行われる中、電気系では、オンライン講義ツール（zoom）の機能や頑健さ、学生の自宅・下宿のネットワーク環境などを至急に検討し、オンライン講義の実施が可能であると判断し、講義科目については通常の学年暦どおり4月からオンラインで開講することとしました。

学科の新入生ガイダンスも4月2日にオンラインで実施しました。学生が誰もいない電総大で、学科長の私と教務委員長の山田先生で、大学生活や科目履修について、zoomを使ってPCに向かって説明するのは初めての体験で、大きな違和感を感じました。本来であれば希望に満ちて大学生活を始められるはずの新入生があまりに気の毒でしたので、通常であればこの機会に集金する洛友会学生会費4年分を、ネットワーク環境整備支援金として相殺することとし、ぎりぎりでしたが当日朝に洛友会幹部の皆様のご了解を頂いて実行しました（学生がオンライン参加ですので、集金するとしても大変で、良いアイデアであったかと思っています）。

実験科目については、オンライン化に相当の準備が必要でしたが、担当の先生方の多大なご尽力により5月の連休明けからオンラインで開講しました。実施方法は課題ごとにさまざままで、共通の基礎的な実験機器は学生の下宿に送付して下宿で実験ができるようにしたり、教員が実験する様子をビデオで配

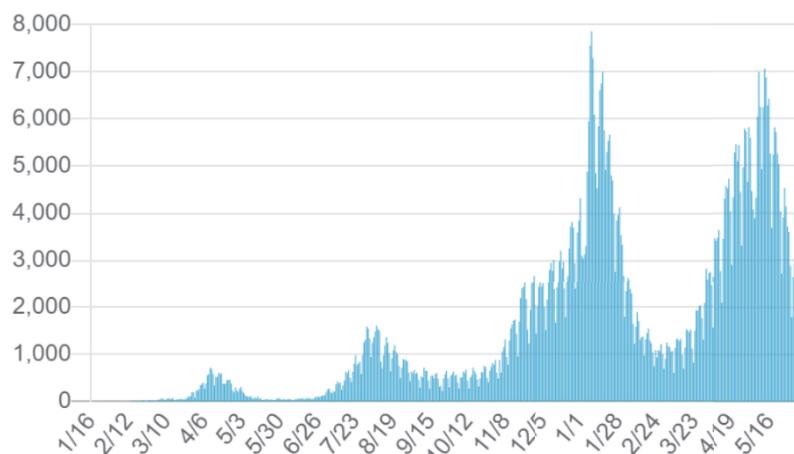


図1 新型コロナウイルス感染症陽性者数（厚生労働省ホームページ）

信し、学生はデータを受け取って分析を行ったり、なかにはオンラインで下宿から実験装置を制御できるように工夫して頂いた課題もありました。

単位認定の期末試験も大きな課題でした。試験は、そもそも席に間隔をとっており（密ではなく）、黙って紙に解答するだけですので、何とか通常どおりの対面実施ができないかと工学部執行部等にお願いしましたが、認められませんでした。そこで、レポート課題にかかる科目もありましたが、いくつかの科目ではオンライン試験を実施しました。検討の末に、持ち込み可とし、学生はカメラをオン、マイクはオフとするなど、詳細な手順書を作成して実施し、大きな問題なく実施することができました。

2020年度後期

9～10月あたりは感染状況が小康状態であったことから、2020年度後期については、講義科目はオンライン継続ですが、実験科目は対面ということでスタートしました。1回生には、学生がグループを作つて研究室を見学して学習する「電気電子工学概論」という科目があり、例年は桂の研究室見学のために吉田からバスをチャーターしています。この移動手段や、学生を研究室に受け入れることについていろいろな意見がありましたら、大学生になってもほとんど大学に来れない、友達も作れないという1回生の状況を考慮して実施に踏み切り、1回生には大変好評でした。2回生、3回生の実験・実習も原則対面とし、希望者（通学に不安があるなど）や少しでも体調が悪い学生はオンラインでも参加できることとしました。毎週、熱があるなどの理由でオンライン参加する学生が入れ替わり立ち替わりいて、実施の先生方も事務室も私もヒヤヒヤしましたが、幸いクラスターや感染者を出すことはありませんでした。

2020年度後期の定期試験は、原則、レポート試験またはオンライン試験としました（履修者数の少ない3科目では対面試験を実施）。卒業研究の試験も、教員がオンラインで入り、そこに学生が一人ずつ入ってきて発表・質疑を行うという形で実施しました。大学入学共通テストや2次試験は無事対面で実施されました。実施方法は何重にも複雑化しましたが、その詳細は省略致します。卒業式も対面実施され、その後、電総大で学科長から各学生に卒業証書を手渡しました。例年行っている飲食を伴う送別会は残念ながら不開催としました。

2021年度前期

2021年度に入り、入学式、ガイダンスは通常どおり対面で実施し、講義・実験・実習も原則対面でスタートしました（講義については講義室定員の2/3以下の履修者数の講義のみ）。しかし、感染者数の増大、いわゆる第4波によって4月25日に京都府に緊急事態宣言が発出されてから、講義は原則オンライン、実験・実習のみ対面となり、緊急事態宣言継続中の本稿執筆時（6月6日）もこの状態が続いている。とくに現2回生にとっては、やっと対面で講義が受けられるようになったのもつかの間、3週間ほどでまたもとの状態に戻ることになり、少なからずショックを受けている様子です。学科としては、従来から1回生から3回生の各学生にアドバイザー教員を割り当て、各学期始めに面談を行っていますが、これを強化し、グループでの面談なども実施して、できるだけ学生の声を聞くことを心がけています。

おわりに

以上、この1年強の教室の状況を学科長の立場から振り返りました。オンラインの生活では友達とコミュニケーションが取りづらいという大きな問題がありますが、オンライン講義（の教育効果）に対して学生は比較的肯定的です。レポート課題などが増える傾向もありましたが、学生達は講義録画ビデオの活用を含めてよく勉強したようです。従来、履修単位数が足らず4回生で研究室配属されない割合（いわゆる留年の割合）は20%程度でしたが、昨年度はこれが5%に下がりました。この数字は、コロナ禍

においても質を落とすことなく教育を継続した電気系の先生方の大変な努力の証左でもあります。学科長として、電気系教職員の熱意を大きく感じた1年でした。

今後については、ワクチン接種の拡大とともに重症者数が減少し、課外活動を含めて学生の生活が一刻も早く通常化することを願うばかりです。コロナ禍では、従来固定化していた様々なシステムが、社会全体でも大学においても大きく変化し、ある種の社会実験が行われたとも言われます。在宅勤務は、特に子育て世代の若い教員・研究員には便利な面も大きかったようです。教室会議を始め種々の会議もオンライン化され、出席コストが下がり出席率も向上しました。LMS (Learning Management System) の利用も一気に広がり、講義録画ビデオなどの提供は学生に非常に好評です。今後、コロナが収束した後に大学がどのような形になるか、電気系としては、昨年度いち早くオンライン講義に取り組んだように、今後も先駆的、積極的な取り組みを続けて行きたいと考えています。

編集後記

今期も新型コロナウィルスの影響で、講義や学会などは、基本的にオンラインとなり、パソコンの画面に向かって会話をすることが日常化されてきました。オンラインになったことで物理的な移動がないために時間の有効活用ができるものの、相手（特に複数名の場合）の表情を伺うことが難しく、うまくコミュニケーションができているかどうかの不安が残るように感じます。今年の夏頃から新型コロナウィルスワクチン接種が開始されているため、今後は、講義や学会などにおいて、オンラインツールをうまく活用しつつも、表情を見ながらコミュニケーションができるよう一部の対面化を願っております。

最後になりましたが、お忙しい中、cue46号にご寄稿・ご執筆いただきました皆様に、心より御礼申し上げます。

[M. D. Z. 記]

協力支援企業

鉄道情報システム株式会社
日本製鉄株式会社
株式会社 村田製作所
口一ム株式会社

発行日：令和3年9月

編集：電気系cue編集委員会

白井 康之、川上 養一、

山本 衛、橋本 昌宜、村田 英一、

田中 俊二、デゾイサ メーナカ

佐藤 亨（洛友会）

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

