

Cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.49

MARCH 2023

[第49号]

卷頭言

上田 哲三

大学の研究・動向

極限エレクトロニクスを目指した半導体の革新と
基礎学理

工学研究科 電子工学専攻 電子物性工学講座
半導体物性工学分野

産業界の技術動向

東海道新幹線を支える技術の歩みとたゆまぬ
進化への道筋

東海旅客鉄道株式会社 岡嶋 達也

新設研究室紹介

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

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 49 号 目次

巻頭言

- ワイドギャップ半導体の進化を振り返って
… 昭和 62 年卒 パナソニック インダストリー株式会社 技術本部 副本部長 上田 哲三…… 1

大学の研究・動向

- 極限エレクトロニクスを目指した半導体の革新と基礎学理
……………工学研究科 電子工学専攻 電子物性工学講座 半導体物性工学分野…… 3

産業界の技術動向

- 東海道新幹線を支える技術の歩みとたゆまぬ進化への道筋
……………東海旅客鉄道株式会社 常務執行役員 総合技術本部長 岡嶋 達也…… 10

新設研究室紹介……… 20

研究室紹介……… 22

博士論文概要……… 40

高校生のページ

- 人工知能技術に基づく人間（脳）の情報処理の解明
……………情報学研究科 システム科学専攻 論理生命学分野 石井 信…… 57

学生の声

- Thinking time on the commute
… 情報学研究科 通信情報システム専攻 山本研究室 博士後期課程 3 年 Weizheng Fu…… 62
研究との向き合い方を考える
……………情報学研究科 通信情報システム専攻 佐藤研究室 博士後期課程 2 年 大島 國弘…… 62

教室通信

- 電気電子工学科の入試について
……………教務委員長 佐藤 高史…… 63

賛助会員の声

- カーボンニュートラルの時代に向けた次世代自動車開発へ貢献する鉄鋼製造
……………日本製鉄(株) 名古屋製鉄所 生産技術部 設備計画室 服部 光高…… 64

編集後記……… 67

卷頭言

ワイドギャップ半導体の進化を振り返って

昭和62年卒 パナソニック インダストリー株式会社 技術本部 副本部長 上田哲三



この度、卷頭言執筆の依頼があり、私などで大丈夫かと思いながら、母校である京都大学電気系教室の学生皆さんに、私自身の経験をもとに何かしらのメッセージをお伝えしたいと思い、僭越ながら執筆させて頂くこととした。

まず表題のワイドギャップ半導体について、簡単に説明をしておく。昨今、ニュースで話題になることが多い半導体であるが、我々の周りで使われているものはそのほとんどがSi（シリコン）である。一方で2種類以上の元素で構成されている半導体を化合物半導体と呼ぶ。また、半導体にはバンドギャップ（禁制帯幅）という材料定数があり、これが大きいほど高温・高電圧の動作に優れている。ワイドギャップ半導体とは、このバンドギャップが大きく熱的に安定で大電力動作に適した半導体材料を指し、パワー半導体としての実用化が期待されるSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）がその代表例である。GaNに関してはSiで不可能な可視域での発光が実現でき、既にLED（発光ダイオード）として広く実用化されている。

私は京都大学電気系教室で松波弘之先生のご指導の下、1987年よりSiCの研究に関わることになった。その後入社したパナソニックではGaNの研究開発・事業化を担当し、計35年にわたり、化合物半導体、ワイドギャップ半導体に関する仕事をさせてもらっている。時系列で振り返ってみたい。

京都大学で私が取り組んだのはSiCの結晶成長であった。当時、大きな技術ブレークスルーである「ステップ制御エピタキシー」という結晶成長法が京都大学で見いだされており、私はその技術を再現性含め確立することを託された。その当時、結晶成長に使うSiC基板は親指の爪ほどの大きさしかなく、私はそれを研磨して結晶成長に使う基板に仕上げ、その上に結晶成長を行うことを続けた。電気工学とは少し距離を置き、日々研磨に明け暮れた日々ではあったが、良い結晶成長ができた時の喜びは格別で、大変楽しく仕事をしていたのを今でも覚えている。「ステップ制御エピタキシー」ではSiC基板を斜めに研磨することで、その上に成長するSiCの結晶性が大きく向上することが特長である。実験を進めた結果、良好な結晶を得るために必要な研磨の角度と方向を見出すことができた。SiCは現在、各種電源やEV（電気自動車）で用いられており、全てこの研磨角度と方向を採用していると聞く。それから30年以上が経ち、基板の大きさは6インチ径（150mm径）にまで大きくなった。以降、松波先生、木本恒暢先生のリーダーシップの下、優秀な研究室メンバー皆さんの頑張りで、ここまで来たと思うと大変誇らしく思う。私自身も、2013年よりパナソニックでSiCパワーデバイス開発責任者を担当することになった。基礎研究から事業化まで全て担当できたのは大変ありがたい話である。

私は修士課程を修了後、1989年にパナソニック（当時 松下電器産業）へ入社した。半導体の研究開発に携わりたいという思いで入社したのだが、メインストリームのSiではなく化合物半導体であるGaAs（ガリウムひ素）を選択した。入社に先立ち、松波先生からは「企業では尖った石になれ」というメッセージを頂いた。パナソニックでは、その教えを守り、ある意味好き勝手言わせてもらった結果として、工場立ち上げ、米国留学と様々な経験をさせてもらった。私の会社人生でもっとも重要であったと思うの

が、この米国留学、1995年にスタンフォード大学でGaNの結晶成長を始めたことである。SiCの結晶成長を経験した自分にとっては、何か良く似た材料ということがすぐに理解できた。同じ結晶形であり屈折率等の材料物性も近かったので、表面の様子は本当に似ていた。GaN基板というのものではなく、異種基板上であったので再現性という意味ではSiCより難しいとも感じた。その頃、後にノーベル賞受賞者となられたUCサンタバーバラ校 中村修二先生（当時 日亜化学）とお話をすることになった。先生は「結晶を見せてもらえば全て分かりますから」と自信満々に語っておられた。私もその領域に到達しようと日々頑張って結晶成長を続けたものである。その後、GaN基板のベンチャー企業設立に関わったが、米国駐在が6年を超えた段階で日本へ帰国することになった。米国でグローバル技術者と接し、いわゆるベンチャー精神を学んだ私は、帰国後GaNを用いた光デバイス、パワーデバイスと様々なデバイス開発に全力で取り組んだ。GaNパワーデバイス開発ではSi基板上の結晶成長から開始し、多くの技術課題を新しいデバイス構造の提案で解決した。スイッチング応用に向けてのGaNパワーデバイスはその実用化が最近始まり、PCやスマートフォン用の超小型充電器での採用が加速されている。パナソニックでのGaNパワーデバイス開発を振り返って、その源流に京都大学で学んだ結晶成長、そして研究に関する基本的な考え方があることは間違いない。多くの優れた諸先輩・後輩のご指導・ご協力も頂いた。心から感謝したい。

本稿では私自身の経験をもとにワイドギャップ半導体の進化を振り返ったが、ワイドギャップ半導体の研究開発では非常に多くの進展があった30年であった。日本では「失われた30年」という人が多い。しかしながら、私自身が目にしたワイドギャップ半導体の進化は非常に大きなものであり、加えてこれらはいずれも日本発のものであった。ワイドギャップ半導体という意味では、日本が「大きく成長した30年」だったのである。SiCは親指の爪の大きさであったものが、今では150mm径で実用化されている。GaNは電球・蛍光灯を置き換え、白色LED照明としてどの家庭にも存在することとなった。GaNを用いた小型の充電器もさらに使われることになる。これらの実用化に際しては、京都大学電気系教室、そして卒業生が寄与した部分が大きいと思う。

私の30年を振り返っただけでも、以上の通り大きな変化があった。これからの未来ではさらに大きな変化が予想される。京都大学電気系教室の皆さんには、将来の日本そして世界を支えるという気概・自信を持って、さらに世の中を変える技術・事業を創り上げてもらうことを期待したい。私自身も人生100年時代に向け、まだまだ若い皆さんと競いながら頑張っていこうと考えている。

大学の研究・動向

極限エレクトロニクスを目指した半導体の革新と基礎学理

電子工学専攻 電子物性工学講座 半導体物性工学分野

教授 木本恒暢

助教 金子光顕

1. はじめに

半導体デバイスは高度エレクトロニクス社会の根幹を支えるハードウェアです。論理演算や情報記憶の中核を担うロジックやメモリは Si 半導体を中心に長足の進展を遂げ、数々の限界説を覆してさらなる微細化・高集積化が進められています。近年、情報通信量が爆発的に増大し、様々なビッグデータを、人工知能を活用して解析する手法も急速に広まっていますが、これは消費電力量の急激な増大を伴いますので、低消費電力で脳型コンピューティングが可能な半導体デバイスが求められます。また、「カーボンニュートラル」を目指して再生可能エネルギーが急速に拡大し、ガソリン車から電気自動車（ハイブリッド車を含む）への移行も加速しています。このような分野では、革新的な低損失パワーデバイスが求められます。さらに、燃焼炉制御、資源掘削、原子炉モニター、宇宙開発などの分野では耐熱性や耐放射線性に優れた半導体集積回路やセンサーが必要となります。Si をベースとした集積回路の地位は不動と言えますが、これらの高度な要求に応えるためには、新しい電子材料の活用や新しいデバイス構造を提案しながら原理実証を行い、その学理を確立していくことが、大学における半導体研究に求められます。

本研究室では、半導体中の電気伝導を主に活用する「電子デバイス」の研究を中心に据え、半導体材料の作製、電子物性の解明と制御、およびデバイスの設計・作製に関する基礎研究に取り組んでいます。特に、将来（例えば 10 年後）の実用化が期待されているが、原理実証さえ不十分な半導体デバイスに関する研究、あるいは既に実用化が開始されているものの、その根幹をなす学理が未解明である材料・デバイスに関する研究に取り組んでいます。いずれの研究テーマにおいても、他機関では行っていない（あるいは行えない）独自性のある半導体材料・デバイスに着目し、かつ単に実験における現象論を述べるのではなく、その背後にある物理現象を捉えて定量的に説明できる物理モデルを確立することに力を注いでいます。本稿では、当研究室が最近取り組んでいる主な研究内容について紹介いたします。

2. 超高性能 SiC パワートランジスタに関する研究

SiC（炭化珪素）は高い絶縁破壊電界を有する広禁制帯幅半導体で、同耐電圧で比較すると現行の Si デバイスに比べて通電時のオン抵抗（損失に直結）を約 1/500 に低減できる画期的な半導体材料です [1,2]。本研究室が確立した酸化膜形成技術やイオン注入技術を用いて作製した耐電圧 650 V 級の縦型 SiC MOSFET のオン特性を図 1 に示します（ローム社との共同研究の成果 [3,4]）。同図には比較のため、ほぼ同じ耐電圧を有する Si パワートランジスタ（MOSFET と IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ））の特性を示しています。同図に示すように、作製した SiC MOSFET は Si デバイスに比べて 20 倍以上の性能向上（低オン抵抗化）を達成できており、世界最高性能の一つとなっています。本 SiC MOSFET は 2015 年から量産が開始され、電気自動車への搭載も始まりつつあります。

Si に比べて圧倒的な性能を示す SiC MOSFET ですが、その性能は SiC 材料が有するポテンシャル（SiC

固有の限界性能)と比べると随分劣っています。この状況を模式的に表したのが図2です[4]。同図には、電力用に用いられる縦型MOSFETの断面模式図と抵抗成分も示しています。この図では、耐電圧600, 1200, 3300 VのSiC MOSFETの典型的なオン抵抗の値とその内訳を示しています。ここで、黄色で示した成分「 R_{drift} 」がSiC半導体の材料リミットに相当します。図からわかるように、市場が大きく社会的インパクトの大きい600, 1200 V級SiC MOSFETでは、MOSチャネル部分の抵抗(図2中で赤色で示した成分「 R_{ch} 」)が全オン抵抗の半分以上を占めています。つまり、これらのMOSFETのオン抵抗はMOSチャネル部の抵抗により律速され、SiC本来の特性から大きく乖離していることがわかります。

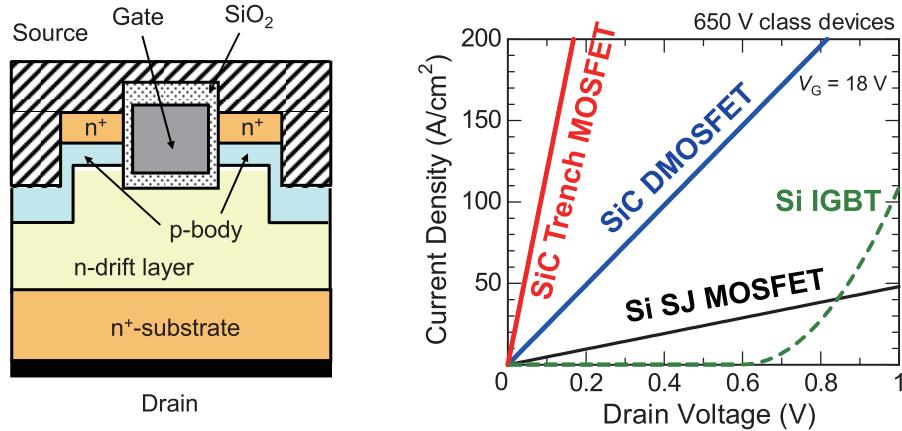


図1 耐電圧650V級のSiC MOSFET、Si MOSFET、Si IGBTのオン特性

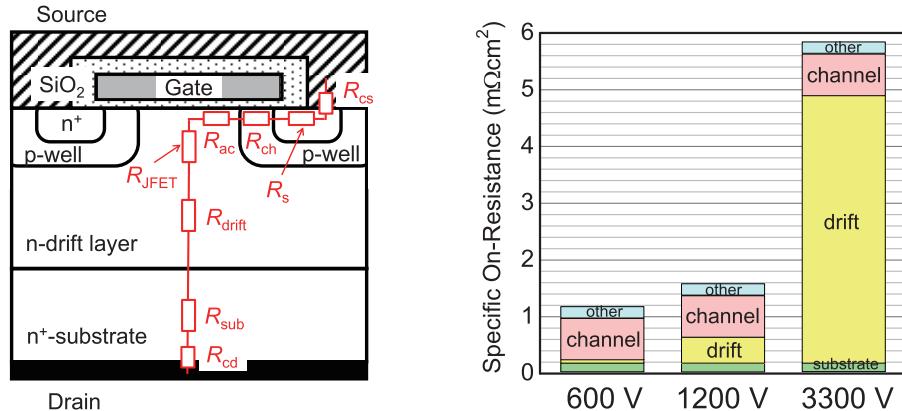


図2 パワーMOSFETの断面模式図と耐電圧600, 1200, 3300 VのSiC MOSFETの典型的なオン抵抗の値とその内訳

SiCは禁制帯幅が広いため、MOSFETのゲート絶縁膜の選択肢は、無機材料の中で最も禁制帯幅の広い SiO_2 にほぼ限定されます。従来は、Siと同様にSiCを直接熱酸化することにより表面に SiO_2 膜を形成してきました。しかしながら、SiCを熱酸化すると界面近傍に炭素起因の欠陥が形成されることが第一原理計算によって示唆されています[5]。そこで、本研究室では熱酸化することなくSiCの表面に SiO_2 膜を形成するプロセス(酸化抑制プロセス)を考案し、酸化膜/SiC界面特性を大幅に向上することに成功しました[6,7]。図3に提案するプロセスで作製した酸化膜/SiC界面の欠陥密度とMOSFET特性から得たチャネル移動度のp型ボディ領域のアクセプタ密度依存性を示します[8]。従来プロセスに比べて界面欠陥密度を顕著に低減でき、チャネル移動度の向上を達成できています。特に、究極のパワーMOSFETとして有望なトレンチMOSFETで反転チャネルが形成される(1120)(A面)、(1100)(M

面) 上では高濃度ドープされた p 型ボディ上でも $110 \sim 140 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という高い移動度を得ることに成功しました。本移動度は従来プロセスで作製した MOSFET に比べて 10 倍以上であり、当該分野「20 年ぶりの革新」と言われています。さらに、幅が約 100 nm の微細メサ構造を有する FinFET MOSFETにおいて約 $250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という高移動度を達成することにも成功し、この技術を用いて耐電圧 1 kV、オン抵抗 $0.7 \text{ m } \Omega \text{ cm}^2$ という当該分野最高の性能を得ることにも成功しています [9]。このように、SiC MOSFET は約 20 年の停滞期を経た後、学術的にも工業的にも活況を呈する研究分野となっています。最近、SiC MOSFET は各国の電気自動車のモータ駆動用インバータに搭載されて市場が急速に拡大していますが、上記の成果は、SiC 半導体の電気自動車搭載と省エネ化を加速するものです。

一方、配電系統や高電圧直流送電のような超高耐圧応用には、少数キャリア注入による低抵抗化が期待できるバイポーラ型のパワーデバイスが有望です。本研究室では既に耐電圧 27 kV の SiC pn ダイオード [10]、耐電圧 21 kV の npn 型バイポーラトランジスタ [11] を報告しています。最近は産業技術総合研究所と共同で SiC の絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) の設計と作製に取り組み、耐電圧 20 kV、オン抵抗 $29 \text{ m } \Omega \text{ cm}^2$ という半導体デバイスとして最高の性能を達成しました [12]。これらの超高耐圧デバイスは、柱上変圧器の固体電子化、スマートグリッド用半導体遮断器、医療用の高エネルギー粒子加速器等への応用が期待されています。

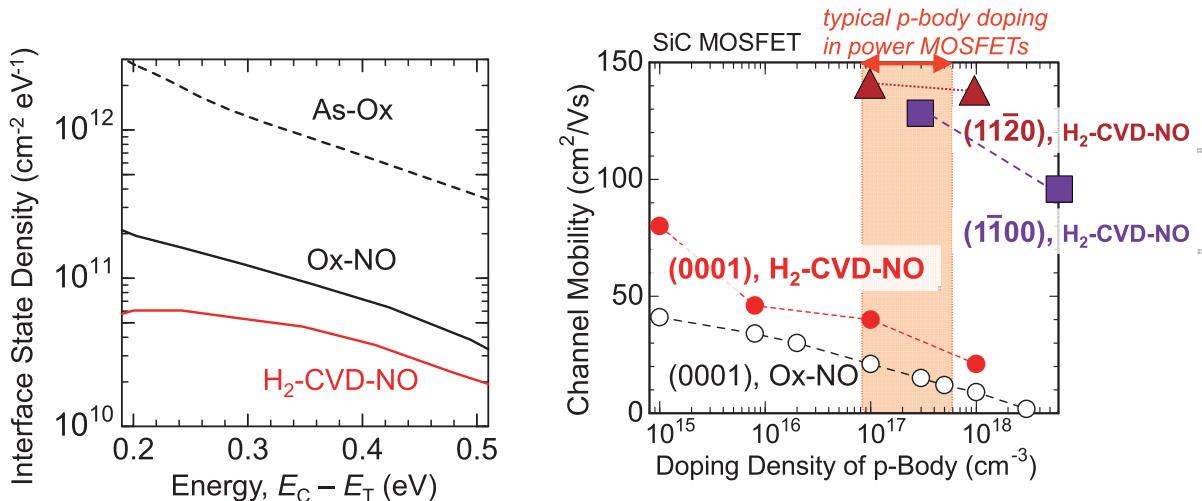


図 3 提案プロセス (H₂-CVD-NO) で作製した酸化膜 /SiC 界面の欠陥密度と MOSFET 特性から得たチャネル移動度の p 型ボディ領域のアクセプタ密度依存性

3. SiC 半導体の固有物性解明に関する研究

数十年の研究の歴史がある SiC 半導体ですが、デバイスの特性を支配する重要な物性の多くが依然として未知という状況にあります。このため、正確なデバイスシミュレーションに支障を来たしており、デバイスの設計開発やデバイスの信頼性予測に多大な時間とリソースを費やしています。SiC では、物性を精密に決定するために必要な素子構造を作製することが容易ではなく、かつ Si に比べて約 10 倍高い電界範囲、約 3 倍高い温度範囲まで測定する必要があることが、固有物性の解明を妨げています。本研究室では、SiC 半導体の結晶成長、微細加工、イオン注入、電極形成、さらには高電圧かつ高温物性評価装置を所有していますので、毎年、一歩一歩ですが、SiC 固有物性の解明に関する研究を進めています。図 4 に電子移動度のドナー密度依存性を示します [13]。このデータは特殊基板上に作製した独自の Hall バー構造を用いて Hall 効果測定により決定したものです。SiC パワーデバイスは (0001) 面ウェ

ハ上に縦型構造で作製されますので、デバイスのオン抵抗を決めるのは<0001>軸(c軸)方向(ウェハの厚み方向)の電子移動度です。従来、この方向の移動度に関するデータが欠落していましたが、本研究では広いドナー密度、温度の範囲で<0001>軸方向の移動度を決定することに成功しました。この結果、従来、測定されていた(0001)面内方向(<0001>軸に垂直方向)の移動度に比べて、<0001>軸方向の移動度は約1.2倍高いというデバイス応用上望ましい結果が得られました。

図5に衝突イオン化係数(キャリアが単位長さ走行する間に引き起こす衝突イオン化(電子・正孔対の生成)の数)の電界強度依存性と、SiCの伝導帯端近傍のエネルギーー波数の関係を示します[14]。SiCでは原子間結合力、禁制帯幅が大きいために衝突イオン化が起りにくく、Siでは絶縁破壊が生じる0.3 MV/cmの電界では、衝突イオン化係数は無視できるほど小さいことがわかります。また、SiCにおいては電子の衝突イオン化係数が例外的小さく、かつ高温でも低下しないという特異性を見出しました。これを説明するために電子のエネルギーー波数構造を計算し、かつフルバンドのモンテカルロミュレーションによる解析を行いました。この結果、上記の特異的に小さい電子の衝突イオン化係数は、SiCの伝導帯に特有のミニギャップが形成され、かつc軸格子定数が大きく逆格子空間におけるブリュアン帯域が狭いために、高電界下でも電子の加速が起りにくく、衝突イオン化を抑制している(絶縁破壊しにくい)ことに起因していることを明らかにしました[15,16]。このように、広禁制帯幅半導体であるSiCの物性は強い異方性や特異な温度依存性を示すものが多く、半導体物理の研究に適した学際分野を提供しています。

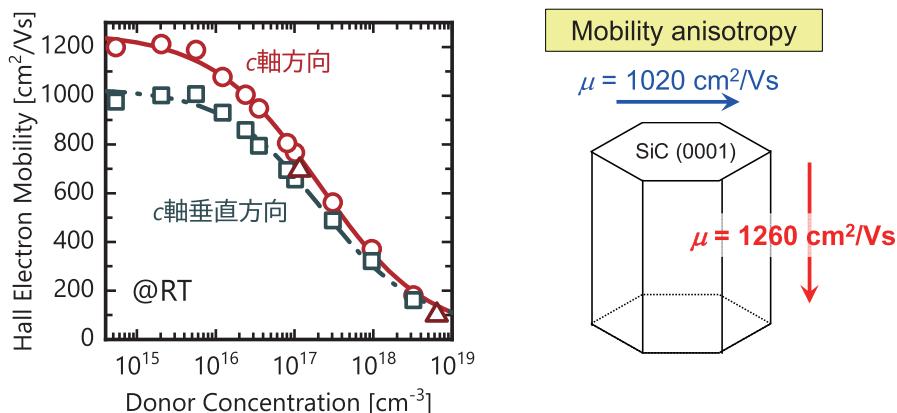


図4 SiCにおける電子移動度のドナー密度依存性(結晶方位依存性を含む)

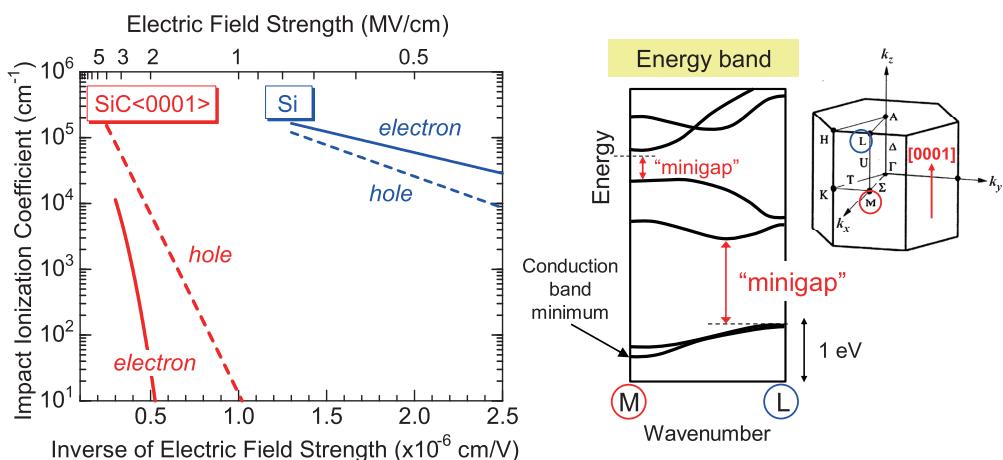


図5 SiCにおける電子および正孔の衝突イオン化係数の電界強度依存性と、SiCの伝導帯端近傍のエネルギーー波数の関係

4. 高温動作 SiC 集積回路の基礎研究

Si 集積回路の高集積化、高機能化の進展は驚異的ですが、高温や輻射下での安定動作に難があります。そこで、本研究室では、SiC の接合型 FET (JFET) を用いた相補型素子 (CJFET) を提案しています [17,18]。図 6 に CMOS および CJFET の回路図を示します。CJFET は、Si 集積回路の基本デバイスである CMOS 素子の n-MOSFET を n-JFET、p-MOSFET を p-JFET に置き換えたもので、JFET のしきい値電圧を適切に設定することによって、静的な消費電力を無視できるほど小さくすることができます。Si 集積回路でも黎明期に JFET が検討されたことはあります、禁制帯幅が狭い（約 1.1 eV）ために、電源電圧を 0.4 V 以下に設定しないと正常動作しないという制約があり、実用にはなりませんでした。しかし、SiC では禁制帯幅が広く（約 3.3 eV）、電源電圧を 1.5 ~ 2.5 V に設定できるため、集積回路動作に適しています。また、SiC JFET は高温や輻射線に対する耐性に優れた SiC バルクのみを用いてトランジスタを構成するため、究極の耐環境動作が期待できます（MOSFET は高温における酸化膜の信頼性や放射線による酸化膜の急速な劣化という本質的な問題を抱えています）。本研究室では、室温における抵抗率が $10^{12} \Omega \text{ cm}$ 以上という極めて絶縁性に優れた半絶縁性 SiC ウェハに着目しました。この半絶縁性 SiC ウェハにドナー型、アクセプタ型不純物のイオン注入を行った後に高温熱処理を施せば、注入不純物はほぼ 100% の割合で電気的に活性なドナー、アクセプタとして働くことも見出しました [19]。これらの技術を集約し、かつ独自のサイドゲート JFET 構造を採用することによって SiC CJFET を作製し、室温から 350°C までの安定動作に成功しました（図 7）[20]。これは世界初のデバイスとして、当該分野で大きな注目を集めています。今後、短チャネル化と集積化を進めて小規模集積回路の原理実証を目指します。

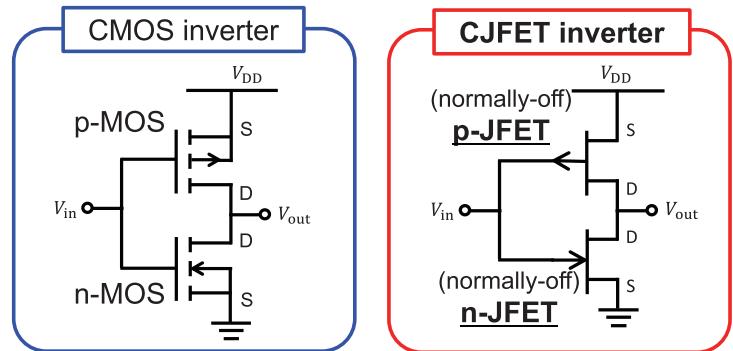


図 6 CMOS および CJFET インバータの回路図

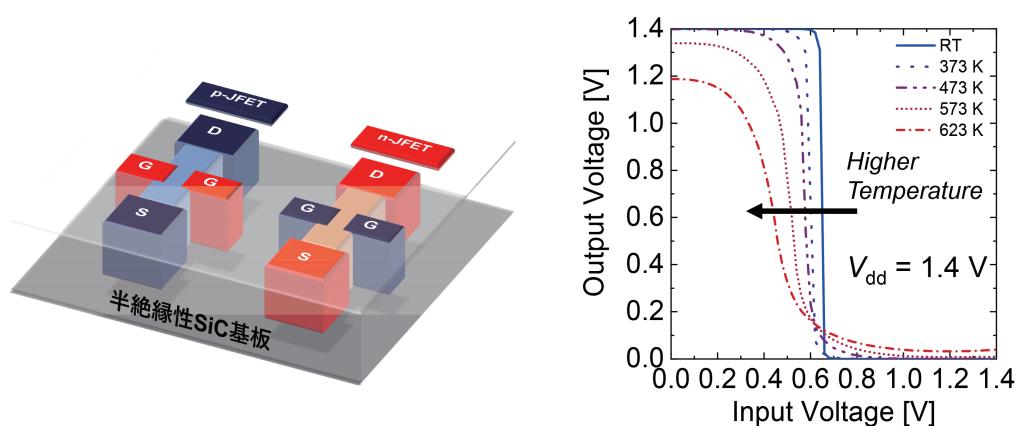


図 7 作製した SiC CJFET の模式図とインバータ動作特性

5. 脳型コンピューティングを目指したアナログ抵抗変化素子の研究

半導体不揮発性メモリの代表格であるフラッシュメモリが開発されて四半世紀が経過し、今では各種メモリカードやパソコンの記憶装置（SSD）に広く応用されています。フラッシュメモリは今後も応用分野を拡大すると予測されますが、書き換え耐性や速度に本質的な限界を抱えています。本研究室では、究極的小型・高速の不揮発性メモリ候補として遷移金属酸化物を用いた抵抗変化型メモリに注目しています。遷移金属酸化物は高抵抗状態と低抵抗状態を遷移する抵抗変化特性を示すことが知られており[21]、近年では次世代の不揮発性抵抗変化型ランダムアクセスメモリ（ReRAM）としての応用が期待されています。

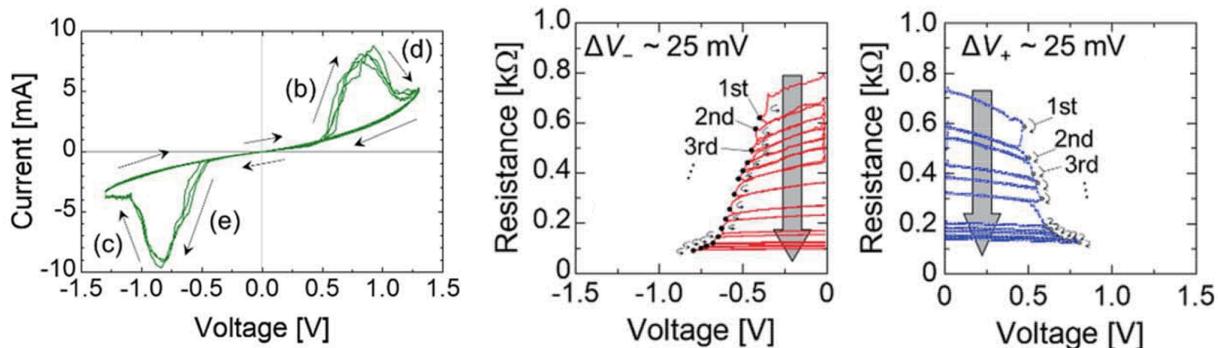


図8 作製した Pt/TaO_x/Ta₂O₅/Pt 素子の抵抗変化特性の例

本研究室では、反応性スパッタリングにより作製した酸化ニッケル（NiO）や酸化タンタル（Ta₂O₅）薄膜を用いて、抵抗変化現象を調べ、その抵抗変化のメカニズム解明や制御性の向上、量子ポイントコンタクトの観測、さらには高温動作やメモリの多値化、アナログ動作に関する研究を開拓してきました[22]。図8に、作製した Pt/TaO_x/Ta₂O₅/Pt 素子の抵抗変化特性の例を示します[23]。同図の電流-電圧特性に示しますように、電圧の極性に関わらず、約 0.5 V（あるいは -0.5 V）の電圧印加により低抵抗化が生じ、約 1 V（あるいは -1 V）の電圧印加により高抵抗化が起こることが見てとれます。これは「相補型抵抗変化特性」とも呼ぶべき非常にユニークな特性です。このメカニズムは TaO_x/Ta₂O₅ 積層構造における酸素空孔のドリフトと拡散により定性的に説明可能です。また、同図の抵抗-電圧特性に示しますように、この素子において印加する電圧を 25 mV 刻みで変化させると、素子の抵抗が段階的に変化し、約 10 に及ぶ多値化を達成できていることがわかります。また、詳細は割愛しますが、印加電圧の工夫によって素子の抵抗値を急峻（デジタル）ではなく連続的に（アナログ）変化できることを見出しました。この素子特性は「学習できるシナプス」に模擬することができ、将来の脳型コンピューティングに有用と期待されます。

6. おわりに

上述のように、本研究室では、伝統的な研究テーマと新しい研究テーマをバランスさせながら、材料科学からデバイス物理、さらには最高性能デバイスの作製に亘る幅広い研究活動を開拓するよう心掛けています。学生は、ほぼ全員が独立したテーマに取り組み、独自性の高い博士論文、修士論文、学士論文を上げられるようスタッフ共々努力しています。京都大学という恵まれた研究環境で学生を指導し、将来のリーダーを育成すべき使命、責任を重く感じながらも、学生からの積極的な提案や予想外の発見を楽しんでいます。もし当研究室の研究活動にご興味をお持ちいただけましたら、半導体物性工学研究室ホームページ (<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp>) をご覧ください。

参考文献

- [1] T. Kimoto and J. A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology* (Wiley, Singapore, 2014).
- [2] T. Kimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 040103 (2015).
- [3] T. Nakamura, Y. Nakano, M. Aketa, R. Nakamura, S. Mitani, H. Sakairi, and Y. Yokotsuji, *Tech. Digest of 2011 Int. Electron Device Meeting* (San Francisco, USA, 2011) , 26.5.1.
- [4] T. Kimoto and H. Watanabe, *Appl. Phys. Express*, **13**, 120101 (2020).
- [5] T. Kobayashi and Y. Matsushita, *J. Appl. Phys.*, **126**, 145302 (2019).
- [6] T. Kobayashi, T. Okuda, K. Tachiki, K. Ito, Y. Matsushita, and T. Kimoto, *Appl. Phys. Express*, **13**, 091003 (2020).
- [7] K. Tachiki, M. Kaneko, and T. Kimoto, *Appl. Phys. Express*, **14**, 031001 (2021).
- [8] K. Tachiki, K. Mikami, K. Ito, M. Kaneko, and T. Kimoto, *Appl. Phys. Express*, **15**, 071001 (2022).
- [9] F. Udrea, K. Naydenov, H. Kang, T. Kato, E. Kagoshima, H. Fujioka, H. Tomita, T. Nishiwaki, H. Fujiwara, and T. Kimoto, *Proc. IEEE 34th Int. Symp. on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD 2022)* (Vancouver, 2022) , 2-1.
- [10] N. Kaji, H. Niwa, J. Suda, and T. Kimoto, *IEEE Trans. Electron Devices*, **62**, 374 (2015).
- [11] H. Miyake, T. Okuda, H. Niwa, T. Kimoto, and J. Suda, *IEEE Electron Device Lett.*, **33**, 1598 (2012).
- [12] T. Kimoto and Y. Yonezawa, *Mater. Sci. Semi. Processing*, **78**, 43 (2018).
- [13] R. Ishikawa, M. Hara, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto, *Appl. Phys. Express*, **14**, 061005 (2021).
- [14] H. Niwa, J. Suda, and T. Kimoto, *IEEE Trans. Electron Devices*, **62**, 3326 (2015).
- [15] T. Kimoto, H. Niwa, T. Okuda, E. Saito, Y. Zhao, S. Asada, and J. Suda, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 363001 (2018).
- [16] H. Tanaka, T. Kimoto, and N. Mori, *J. Appl. Phys.*, **131**, 225701 (2022).
- [17] M. Kaneko and T. Kimoto, *IEEE Electron Device Lett.*, **39**, 723 (2018).
- [18] M. Nakajima, M. Kaneko and T. Kimoto, *IEEE Electron Device Lett.*, **40**, pp. 866 (2019).
- [19] H. Fujihara, J. Suda, and T. Kimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 070306 (2017).
- [20] M. Kaneko, M. Nakajima, Q. Jin, and T. Kimoto, *IEEE Electron Device Lett.*, **43**, 997 (2022).
- [21] J. F. Gibbons, and W. E. Beadle, *Solid-State Electron.*, **7**, 785 (1964).
- [22] Y. Nishi, H. Sasakura, and T. Kimoto, *J. Mater. Res.*, **32**, 2631 (2017).
- [23] T. Miyatani, Y. Nishi, and T. Kimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, SM1006 (2022).

産業界の技術動向

東海道新幹線を支える技術の歩みとたゆまぬ進化への道筋

東海旅客鉄道株式会社
常務執行役員 総合技術本部長
岡 嶋 達 也

1 はじめに

東海道新幹線は、昭和 39（1964）年 10 月 1 日の開業から 58 年を経過し、この間列車事故によるお客様の死傷事故ゼロという安全性をベースに、文字通り日本の大動脈として、我が国経済の発展に大きく貢献してきました。

国鉄改革により東海道新幹線の運営を引き継いだ東海旅客鉄道株式会社（JR 東海）においても、これまで一貫して東海道新幹線の安全性、正確性、利便性、快適性を磨き上げてきました。

現在、東海道新幹線の機能を二重系化しバイパス機能を持たせるリニア中央新幹線の建設が進む中、コロナ禍という未曾有の経営環境の変化を経て、当社の経営体力を再強化することが急務であり、東海道新幹線についても新たな進化に向けた手立てを着実に打つ必要があります。

本稿では、東海道新幹線建設から現在に至る歴史や特徴的な技術を振り返るとともに、今後の進化に向けた取組みについて紹介したいと思います。

2 東海道新幹線の歩み（国鉄時代）

東海道新幹線は、戦前に東京～下関間で計画された「弾丸列車計画」（昭和 15 年着工）において定められた軌間（レールの幅）をはじめとする基本諸元の多くが引き継がれたとともに、その中で工事に着手した新丹那トンネルなども転用されています（戦況の悪化に伴い昭和 18 年に中止）[1]。

戦後の日本経済の復興に伴い、我が國の人やモノの流れが著しく増加しましたが、特に日本の大動脈である東海道本線の輸送力逼迫の解消が急務であるとして、東海道新幹線が計画されました [2]。

昭和 34 年に着工した東海道新幹線は、途中「鴨宮モデル線」での走行実験も経て、昭和 39 年 10 月 1 日、東京オリンピック直前に開業しました（図 1）。

開業当初は、東京～新大阪間 ひかり 4 時間、こだま 5 時間、1 時間にひかり、こだまが各 1 本ずつ、最高速度 210 km/h でスタートしました。東海道新幹線は当初から在来線とは大きく異なるコンセプトで作られました。主なコンセプトを以下に記します [3]。

- ① 最高速度 210 km/h
- ② 軌間：標準軌 1,435 mm（在来線は 1,067 mm）
- ③ 高速の旅客列車専用線
- ④ 車内信号 ATC（自動列車制御装置）による保安システム

地上に設けた信号機を運転士が見ながら運転するのではなく、その時々の許容速度を運転台に表示するとともに、自動的にブレーキをかける仕組み。当初は、制御すべき速度段に応じた周波数の信号を、レールを通じて流すアナログ方式。（架線と同じ電源の高調波を搬送波として、信号波で変調、そ



図 1 東海道新幹線開業
(昭和 39 年 10 月 1 日)

の单側波帶だけを伝送する「電源同期 SSB 方式」)

⑤ 動力分散方式

重い機関車が客車を牽引するのではなく、各車両にモータを積んだ（質量を分散した）電車を連結する方式

⑥ 交流電化方式 (25kV, 60Hz)

東京～富士川付近までの 50Hz 区間は、周波数変換装置（電動発電機）で 60Hz に変換（図 2）

⑦ 最少曲線半径 2,500m（例外箇所を除く）

⑧ 最急勾配 10%（例外箇所を除く）

③、④に述べたように貨物列車や低速の旅客列車と線路を共用しないこと、道路との平面交差がないこと、ATC という高度な保安システムを備えていること、ならびに第三者による軌道内立ち入りを防護していることによる衝突回避（crash avoidance）の原則は、安全性とともに経済合理的なシステムを達成し、日本型新幹線システムとして、現在でも海外への高速鉄道展開の基本コンセプトとしています [4]。

その他開業時の設備として興味深いものは、列車乗務員と指令との間の常時連絡手段（保安通信設備）としての列車無線があります。当初は UHF 空間波無線方式で回線数も限られていたが、その後漏洩同軸ケーブル（LCX : Leaky CaXial cable）方式に変更しました。近年まで設けられていた列車公衆電話もこの仕組みを活用していました。

東海道新幹線開業後、その高速性や利便性から需要が伸び、大阪万博の開催や山陽新幹線岡山及び博多への延伸もあり、昭和 59 年時点では、1 時間にひかり 6 本、こだま 4 本のダイヤ規格になりました。列車本数増とダイヤの複雑化に伴い、昭和 47 年の岡山開業時からは、進路制御と運転整理を併せてコンピュータを用いて自動的に行う新幹線運転管理システム COMTRAC（Computer aided Traffic Control system）を開発・導入しました。

3 東海道新幹線のあゆみ（JR 東海発足以降）[5]

国鉄改革（分割・民営化）により東海道新幹線は、東海旅客鉄道株式会社（JR 東海）が運営することになりました。当時は、いわゆるバブル景気の時代で、東海道新幹線の輸送量も増加の一途である一方、車両や設備の老朽化・陳腐化が著しく、加えて各地の空港新設などにより航空のシェアも急速に伸びてきている時代でした。

このような中、JR 東海では、抜本的な輸送サービスの変革を成し遂げるため、ターゲットとして、当時の最高速度 220 km/h を一気に 270 km/h に引き上げ、最速でも 2 時間 50 分前後かかっていた東京～新大阪間を 2 時間 30 分で運転することとしました。

速度向上に当たっての課題は、車両走行性能や集電性能、地盤振動や沿線騒音を抑制するための方策ならびに 220 km/h 運転の際には問題にならなかった曲線半径 2500m への対処などです。

これらの課題を解決するために、新しい台車の設計、車体のアルミ化による徹底した軽量化・低重心化、架線の高張力化とパンタグラフ数の削減（屋根上での特高ケーブル引き通し）、カント（曲線外側と内側のレールの高低差）補正など様々な対策とその検証を行いました。

これらの過程を経て、平成 4 年 3 月に、300 系車両を用いた新しい列車種別「のぞみ」号がデビューし、東京～新大阪間で朝夕各一往復の運転から始まり、翌平成 5 年 3 月からは、東京～博多間で上



図 2 周波数変換装置



図 3 300 系のぞみ号

下共一時間に一本の運転になりました（図3）。

のぞみ号運行開始後も東海道新幹線をプラスアップする取り組みは休むことなく、300X試験車両を製作し、350 km/hまでの高速域の基本的なデータを取得・検証し、その成果は700系車両、923形新幹線電気轨道総合試験車、N700系車両に反映されています。この過程の平成8年7月には、鉄道の国内最高速度となる443.0km/hを記録しました。

平成15年10月には、品川駅開業により首都圏3ターミナル体制を確立したと同時に、ダイヤ編成を1時間にのぞみ7本、ひかり2本、こだま3本として、現在に至るダイヤ編成の基本を確立しました。

4 JR 東海の技術開発体制強化と最近20年間の主な成果

JR各社共通の研究機関として公益財団法人鉄道総合技術研究所が存在しますが、当社では、高速性能や大量輸送、最初にできた新幹線としての路線環境など東海道新幹線ならではの課題が山積していること、また安全対策の裏付けや当社ならではの経営戦略実現の手立ては自らの手中に置くことが必要、ならびに高度な技術力を持った人材育成をも目的として、平成14年に技術部門本社体制の整備と併せて愛知県に小牧研究施設を発足させました[6]。

以下では、この20年間に取り組んできた技術開発成果について簡単に紹介します。

[大規模地震時の安全確保] [7]

南海トラフ地震の激震地域を含む東海道新幹線では地震時の安全確保は重要な課題です。その対策の柱は大きく分けて4つになります。

① 構造物及び軌道の耐震強化

コンクリート高架橋柱を鋼板で巻き立てて破壊が生じないようにする、盛土が崩れないようにするなどの耐震強度を高めることと併せて高架橋が大きく変位したり、バラストが流れたりすることで軌道が大きく変位することがないような対策を進める。

② 列車を早期に止める対策

自社で設けた沿線地震計や遠方地震計のほか、社外の機関が設けた海底地震計などのデータからより早く地震を検知し、地震動の到達以前に架線を停電させ列車を停止あるいは極力減速させるしくみ（テラス）を導入。

また、上記の場合にできるだけ短い距離で止めるためのブレーキ（地震ブレーキ）を実現するため、ブレーキディスクやブレーキライニングの改良に取り組み、引き続き寒冷・降雨・降雪時など悪条件の際にも強いブレーキをかけることができるよう研究を進めている。

③ 脱線そのものを防止する対策

平成16年の新潟県中越地震で発生した上越新幹線での脱線事象をきっかけに、地震動を受けた鉄道車両の挙動（ロッキング）に着目して脱線防止効果の高い「脱線防止ガード」を開発、現在全線敷設に向けて工事中（図4）。

④ 脱線後の逸脱を防止する対策

万一脱線に至った場合にも、車両床下に設けた逸脱防止ストップと呼ばれる突起を設けて、脱線防止ガードに作用させることで、車両の逸脱を防止（全車装備済み）（図5）。

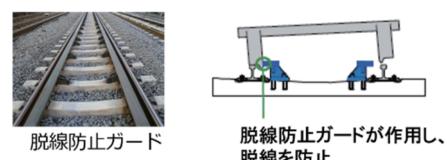


図4 脱線防止対策

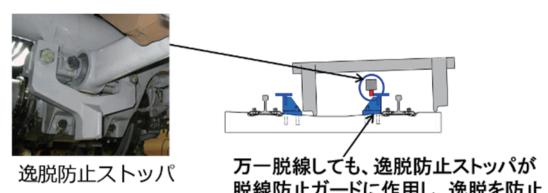


図5 逸脱防止対策

[降積雪対策]

東海道新幹線は、関ヶ原・米原地区という多量の雪が降る地域を通過します。線路に降り積もった雪が、列車の走行風で舞い上がり、車体に付着した雪が落ちることによってバラストを跳ね上げ、車両や地上設備を損傷することを防止するため、降積雪状況により徐行運転をしていますが、徐行を最小限とするために、これまで様々な対策を実施してきました。

モーターカーなどによる除雪に加え、線路上に散水して濡れ雪化することで、舞い上がりを抑制しているほか、最近では、以下のような取り組みを行っています。

- ・線路上の降積雪状態や車両床下の着雪状態を撮影して指令へ伝送し、適切な徐行速度を設定
 - ・車両床下カバーにヒータを設置して融雪する
 - ・降雪区間を通過してきた列車を停車駅で係員により行っている雪落とし作業を自動化する（開発中）
- [8]

[バッテリ自走システム] [9]

自然災害などで架線から列車への電力供給が絶たれた際にも、車両に搭載したバッテリにより、最寄り駅あるいはお客様が容易に避難できる箇所まで自走させられるシステムを最新のN700Sに装備しています。

[車体傾斜による曲線通過速度向上]

東海道新幹線では、原則として最少曲線半径が2,500mとなっていますが、このような曲線では、速度を250 km/hに落とす必要がありました。N700系以降の車両（現在の営業車全編成）の台車の左右空気ばねの圧力を調節することで最大1deg車体を傾斜させ、超過遠心力を相殺して速い速度で曲線を通過することが可能になりました。その結果効率的なダイヤ編成が可能になるとともに、減速回数が減るために省エネ性能が向上しました。

[1段ブレーキデジタルATC] [10]

開業時からのアナログ方式では、限られた刻みの速度段の信号を伝送するほかありませんでしたが、現在のATCは、先行列車との間隔などに応じた情報をデジタル符号で伝送し、車上側で停止パターンを生成する一段ブレーキ方式となり、スムーズな減速とともに、前後列車の間隔を短くすることが可能になっています（図6）。

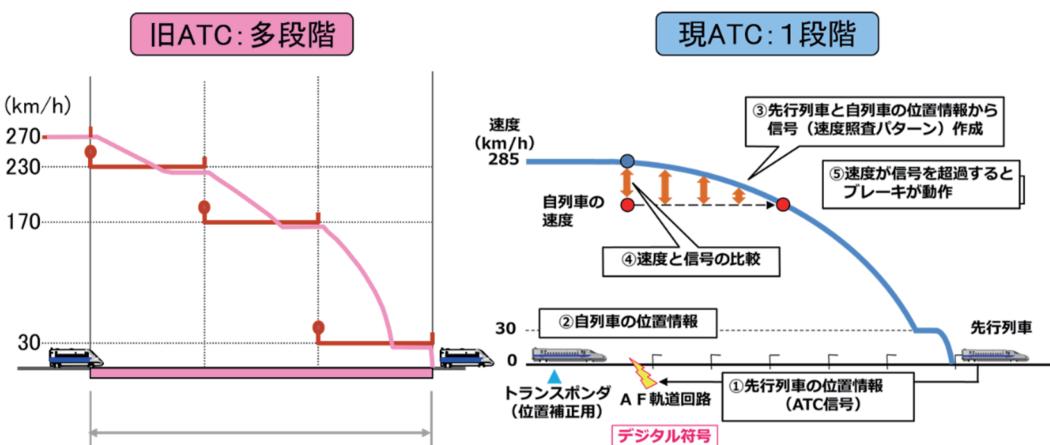


図6 新旧ATCの比較

[フルアクティブ制振装置] [11]

トンネル内走行時や上下列車のすれ違い時など左右動揺が発生することがあります。前後の先頭車や

パンタグラフを搭載した号車で発生することが多いほか、列車本数の増加により、それ違う列車本数も増えています。以前からオイルダンパで左右動搖を緩和する装置（セミアクティブダンパ）を使用していましたが、この装置にモータとポンプを付加して積極的に左右動搖を打ち消すフルアクティブ制振制御装置を開発し、現在はN700Sの1,5,8,9,10,12,16の各号車に設置しています。

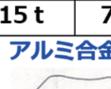
[先頭形状改良による後尾車動搖の低減] [12]

新幹線車両の先頭形状については、これまで新型車両を開発するたびに、空気抵抗低減、トンネル進入時の微気圧波軽減などを目指して、数値解析、風洞実験、試作車での試験などを通じて改良を重ねてきました。大量輸送性能が重視される東海道新幹線では、先頭車の定員確保という制約条件も満たす必要があります。N700Sで採用した「デュアルスプリームウイング形」先頭形状は、最後尾車になったときの気流の乱れによる動搖を軽減することも考慮した形状になっています。

[東海道新幹線車両の変遷] (表1)

現在東海道新幹線で運用している最新の車両は、令和2年にデビューしたN700Sですが、開業時の0系車両が鋼製で、編成重量970tであったものが、N700Sではアルミ合金製で709tまで軽量化されています。主電動機も直流電動機からVVVF制御による誘導電動機となり、N700Sでは主変換装置にSiC素子も用い、その高速スイッチング性能を生かして電動機をより軽量化しました。また加速力の大幅向上により、高密度運転を可能にしているとともに、軽量化と回生ブレーキにより省エネ性能も向上しています。285km/hで走行するN700Sの消費電力量は、270km/hで走行する初代のぞみ300系から28%の低減を果たしています。東京～大阪で一定の条件のもと比較すると、一座席当たりの新幹線の消費エネルギーは航空機の約1/8、CO₂排出量は約1/12となります。東京から800km程度の区間の旅客輸送は、新幹線の分担率を向上させることができることが、我が国全体での省エネやCO₂排出の減少につながります。

表1 東海道新幹線車両の変遷

形式	0系	100系	300系	700系	N700系	N700A	N700S		
最高速度	210km/h	220km/h	270km/h	270km/h 山陽区間 285km/h	270km/h 山陽区間 300km/h	285km/h 山陽区間 300km/h	285km/h 山陽区間 300km/h		
重量	970 t	925 t	711 t	708 t	715 t	713 t	709 t		
構体	鋼製		アルミ合金製  大型押出形材(シングルスキン)	アルミ合金製  中空押出形材(ダブルスキン)					
台車	ボルスタ付き台車		ボルスタレス台車				更なる軽量化		
主電動機	直流 11840kw/編成	直流 11040kw/編成	三相誘導 12000kw/編成	三相誘導 13200kw/編成	三相誘導 17080kw/編成	小型軽量化			
加速度	1.0 km/h/s	1.6 km/h/s	2.0 km/h/s	2.6 km/h/s					
ブレーキ制御	発電ブレーキ		電力回生ブレーキ						
パンタグラフ	菱形 8台/編成	菱形 3台/編成	シングルアーム 2台/編成				たわみ式スリ板 採用		

[コムトラックの進化] [13]

東海道・山陽新幹線で用いられている新幹線運転管理システム（COMTRAC）は、輸送品質の向上や輸送力の向上に合わせて進化を続け、現在は第10世代への置換えの最中です。

各駅の進路制御やダイヤ乱れ時の運転整理、列車・車両・乗務員の運用計画支援はもちろんのこと、

運行情報を的確にお客様に提供する役割も増大しています。現在は3,000本の列車処理能力を持つほか、ダイヤ乱れ時の遅延予測機能も持ち、お客様への案内充実や、EX予約システムを通じて、遅れにより所定発車時刻を過ぎている列車もお客様自身で予約できるようになっています。

[土木構造物の延命化] [14]

開業からまもなく60年を迎える東海道新幹線ですが、老朽劣化を見越して大規模改修工法を開発することにより、列車運行を継続したまま土木構造物の変状を抑え延命化するとともにメンテナンスコストを抑えることも可能としました。コンクリート高架橋などについては、耐震化と併せた中性化対策を、トンネルについては覆工の剥落を防止する対策を、そして鋼橋については亀裂対策を実施してきました。

[周波数変換装置(FC)の静止型化] [15]

東海道新幹線では、開業時以来車両は交流60Hz仕様として、富士川以東の50Hz地域では、地上側に当社で周波数変換装置を設け60Hzに変換して電用変電所に送電する方法をとっていました。周波数変換方式は、長らく同期電動機-同期発電機方式でしたが、近年順次これらをパワー半導体を用いた自励式変換装置に取り替える施策を進めています。静止型変換装置は機械部分を持たずメンテナンスコストが低減できるほか省エネ性能も優れていますが、負荷側の地絡や過負荷に対する耐量の問題など様々な課題を新たな技術開発で解決しながら推進しています(図7)。

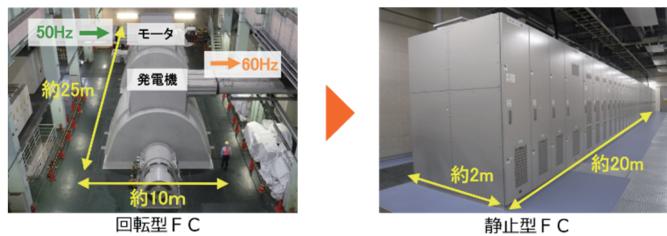


図7 回転型FCと静止型FCの比較

[輸送力増強：のぞみ12本ダイヤ] [16]

JR東海発足以降も輸送需要の伸びに応じて、順次輸送力増強に努めてきました。一部のターミナル駅の線増を除き線路容量は基本的に変更していませんので、保有車両数、乗務員の数と効率的運用はいうまでもなく、信号システムの改良と電力供給能力の増強が大きな決め手になります。また列車本数に見合った販売システムも重要です。

平成15年の品川駅開業時にのぞみ7・ひかり2・こだま3の「のぞみ中心ダイヤ」をベースに、1時間当たりののぞみ号の運転本数を増やし、令和2年3月のダイヤ改正から「のぞみ12本」のダイヤ規格としました。コロナ禍でその実力を發揮できる場面が限定される期間がありましたが、最近のお客様の増加によりその真価を發揮しています。

電力供給能力の観点では、「パワー」の供給能力だけでなく、負荷増大に伴う架線電圧の降下対策が課題になります。電圧降下の主な原因は電力会社側と当社のき電回路全体のリアクタンス分ですので、無効電力のコントロールが決め手になります。輸送力増強に際して沿線の変電所等に多数の静止型電力補償装置を設置しました。

[座席予約システムの進化] [17]

昭和時代までは、新幹線を含む座席指定列車の予約は、駅の「みどりの窓口」で行うのが常識でしたが、東海道新幹線では平成元年から電話予約システムの運用を開始し、平成13年からは携帯電話の活用も前提としたインターネット予約「EX予約システム」の運用を開始しました。乗車前であれば何度でも変更が可能、価格的にも有利な仕組みでしたが、乗車前に磁気きっぷを発券する必要がありました。

平成20年からは、自動改札機でICカードをタッチすることで乗車できる「EX-IC」を開始し、さらに平成29年からは、エクスプレス会員以外でも一般の交通系ICカードと紐づけて使用可能な「スマートEX」を開始しました。年々利便性への評価が高まり、令和4年9月末時点でのEXサービス会員数は962万人にのぼっています。

5 経営環境の変化と経営体力の再強化の必要性

日本経済の大動脈を担う東海道新幹線は、ビジネス需要に大きく依存し、また近年ではインバウンド需要の急増にも支えられて、大きく輸送量を伸ばしてきました。

ところが、令和2年から影響が表れてきたコロナ禍では、ビジネス、インバウンドを含む観光などあらゆる需要が一気に激減しました。その後一進一退を経て、現在（令和4年12月時点）では、以前の8割程度まで需要が回復していますが、ビジネスを中心に回復が遅い状況です。

コロナの影響によるテレワークやリモート会議の急速な普及が言われますが、実はそれ以前から少しつつビジネス移動の目的や形態に変化が生じていました。また観光旅行においても、目的や形態に変化が生じていると考えます。

図8に示すように、東海道新幹線は、車両・地上設備の強化、技術力の強化、人材育成という基盤整備に相当の経営資源を投入し、安全性の堅持、安定性の向上、輸送力増強、サービス向上を図るとともに経営面でも効率性の向上や低コスト化を実現、社会的にも環境性能の向上を実現してきました。これらの取組みの結果、高い競争力を維持し、多くの需要を呼び込むことで、多額のキャッシュフローを確保し、それを再度基盤整備に投入するという好循環を維持してきましたが、コロナ禍により、一時的とはいえたこのサイクルに変調が生じました。

当社では、このような経営環境の変化に適切に対応し、経営体力の再強化を図るべく、収益確保と効率化や低コスト化の両面で新たな進化を実現すべくいろいろな取り組みに着手しています。

6 新たな進化に向けて

(1) 収益拡大

ビジネスのお客様に対しては、あらためて対面でのビジネスの価値を認識していただくため、タイムリーに移動していただく環境や、移動中の価値をより高められる環境を充実します。のぞみ12本ダイヤをより有効に活用することや運行情報提供の充実、EXシステムをより多くのお客様に利用していただくことのほか、のぞみ号の7号車をビジネスがしやすい環境として整備した「S-Work車両」として提供しています。また駅待合室のビジネス環境の整備や、EXサービス会員向けワークスペースの提供などにも取り組んでいます [18]。

また、プライベートの旅行に対しても MaaS (Mobility as a Service) を提供します。特に EX サービスの利便性とセットにした EX-MaaS で旅行全体の予約・決済（一部を除く）をシームレスに提供します [19]。

(2) 状態監視と DX の推進で高い次元の安全性を効率的に

鉄道事業における最大の価値である「安全」を最優先に、かつ効率的に実現するために状態監視の充実や DX による業務改革を進めています。

台車駆動回転部の故障は、重大事故に結び付く可能性があることからその予兆段階で適切に検知し迅速な対応が必要となります。すべての車両で振動センサによる台車振動検知を常時行っています。また、地上のいくつかの地点からも各台車の温度推移を監視し、異常な上昇傾向などを速やかに検知して適切な対応を行っています。さらに台車の空気ばね圧（1両に4か所）を監視し、そのバランスを監視する

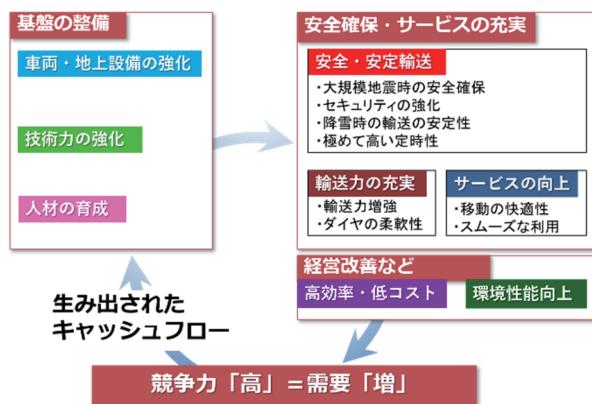


図8 東海道新幹線進化のサイクル

ことで万一の台車枠の亀裂などの異常を常時監視し、迅速に対応します [20]。

屋根上のパンタグラフについても、カメラや電流センサにより挙動や2つのパンタグラフ間での集電電流のバランスなどを常時監視し、異常の場合には速やかに対応します。

架線において、パンタグラフが摺動する「トロリ線」は常に摩耗するため、残存径の管理が大変重要で、万一断線が発生すると甚大な輸送障害を引き起こします。後述する定量的な摩耗管理のほかに、限界値に到達する手前でアラームを発するための「警報トロリ線システム」を以前から運用していますが、検知線をメタル電線から光ファイバにすることで、電車電流によるノイズを受けることなく、常時監視が可能かつ検知箇所の正確な特定が可能になります。今後順次光ファイバ方式に更新していきます（図9）[21]。

軌道状態、架線の状態、ATC信号の状態などは、現在は新幹線電気軌道総合試験車（ドクターイエロー）で定期的に監視、計測しています。この中の一部の機能を改良した上で、営業列車に搭載し、より高頻度に監視、計測することとしました。

レールの上下・左右方向の狂いや左右レールの間隔や高低差を、センサを用いて計測し、きめ細かく日々の軌道状態をとらえることでタイムリーに保守作業が可能となり、乗り心地の維持・向上にも大きく貢献しています（図10）。

また、トロリ線については、赤外線を照射した摺動面幅をカメラで撮影し、残存直径を計測し、パンタグラフの高さをレーザーで測定してトロリ線高さを計測しています。営業列車で高頻度に計測することで、前述の警報トロリ線の存在と併せて、現地での係員による手測定を省略することが可能になりました。

ATC信号についても営業列車で受信しているデータを解析することで、信号の強さやデジタル電文の良否を高頻度に確認し、軌道回路や装置の異常を予兆段階で検知する事が可能になりました [22]。

(3) 輸送力を維持したまま設備ボリュームをスリムに [23]

度重なる輸送力増強の過程で、電力供給能力の向上などのために沿線に多くの設備を新設してきました。そのうち、負荷増による架線電圧の低下を抑制するための電力補償装置の機能を車両に搭載した主変換装置で実現する技術を開発しています。

架線電圧の低下は、電源（電力会社電源）から列車に至るまでの送電線やき電回路のリアクタンスの存在と電源電圧位相を基準にすると遅れた電流により生じるので、電流の位相遅れをできるだけ少なくすることで改善できます。この位相を進ませる作用を車上の自励式変換装置のソフト改修により実現しようというものです。現在この機能をN700S車両の20編成に搭載し実証試験を行っています。この機能が大半の車両に搭載されれば、電力補償装置を中心に一部の地上設備が不要になり、



図9 光ファイバ警報トロリ線システム

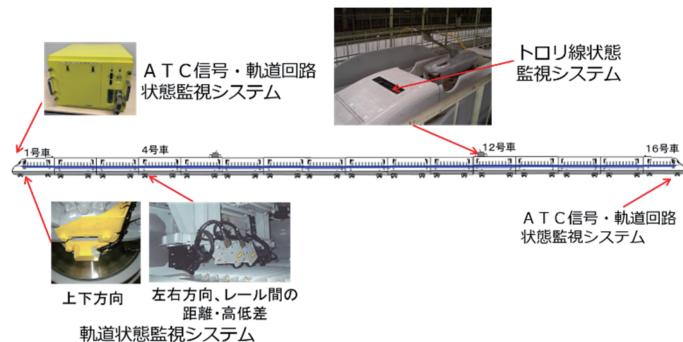


図10 営業列車による地上設備の検測

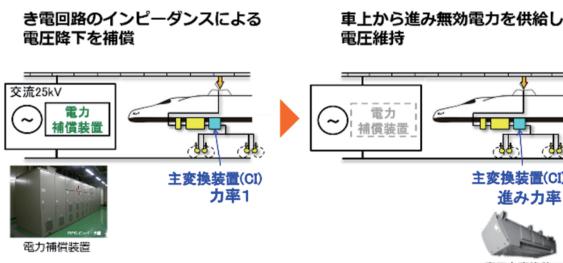


図11 新幹線車両による架線電圧維持

更新コストやメンテナンスコスト、消費電力量の削減につながります（図 11）。

(4) DX 基盤としてのミリ波列車無線 [24]

地上の指令員と車上の乗務員との間の即時通話を可能とする保安通信設備として、現在は LCX (Leaky Coaxial cable : 漏洩同軸ケーブル) を地上側アンテナとした 400MHz 帯でのデジタル方式を用いていますが、通信速度が 3Mbps と限られていることにより、保安通信及び業務用電話のほかは、一部のデータ伝送に用いられているに過ぎません。また、沿線に布設したケーブルのメンテナンスにも多大な労力をかけています。

そこで、ミリ波無線を東海道新幹線の列車無線に適用することとしました。40GHz 帯の電波を用い、通信速度は最大 1Gbps が可能です。直進性が強く、降雨による減衰の大きいミリ波の性質を克服するための困難な技術開発を経て、現在工事に着手しています（図 12）。

ミリ波無線の大容量伝送能力を活用して、車上のカメラ映像やメンテナンスデータの地上伝送などの用途も考えられ、メンテナンスの効率化やセキュリティの向上が期待できます。

(5) DX 基盤としての 5G 活用検討 [25]

現在市中でも急速に展開が進む 5G 携帯電話の高速鉄道における活用の可能性を検討するため、株式会社 NTT ドコモと共同で、N700S 確認試験車に実験用移動端末を搭載、新富士駅付近の地上に実験用基地局を設置し、283 km/h で走行する列車との間の伝送実験に成功しました。複数の基地局間のハンドオーバーについても実現しました。今後車内の通信環境整備の手段としての 5G の活用について検討を深化します。

(6) (将来) 半自動運転の導入 [26]

運転士が先頭運転台に乗務し、運転士が手動で発車した後は運転中の速度制御と停車は自動化する半自動運転 (STO : GoA2) を将来導入すべく開発を進めています。

運転操縦の支援拡充により、運転士は駅発着時のホーム上の安全確認・ドアの開閉を行うとともに、異常時においては列車の責任者として車掌、パーサー等を統轄して対処する一方、車掌は列車内でお客様のサポート業務に注力し、また、巡回強化により車内セキュリティを向上します。

7 おわりに

東海道新幹線は、在来鉄道とは一線を画した高速専用鉄道として Crash Avoidance の原則に基づく日本型高速鉄道の方式を確立し、そのメリットである極めて高い安全性と効率的な経営を両立することができました。

国鉄時代から進化を続けた東海道新幹線は、当社発足以降その歩みを速め、安全・安定輸送はもちろんのこと、速達化をはじめとした輸送サービスの充実により、競争力を高め、現在に至るまで多くのお客様にご利用いただいでいます。

安全を確実なものとした上で、安定性や輸送サービスの向上など東海道新幹線の商品価値を向上するために、当社独自の技術開発体制を整備し、自ら課題を解決し、組織としての技術力を向上し、人材育

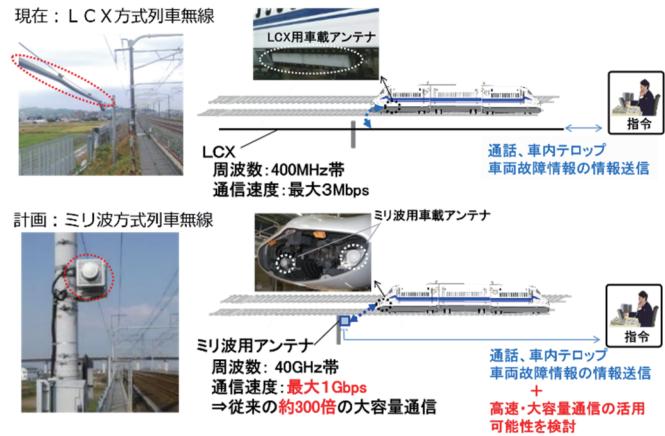


図 12 ミリ波列車無線

成をしてきました。

競争力を高め多くのお客様にご利用いただくことで獲得したキャッシュフローを更なる基盤強化に還元する好循環により、さらなる安全性向上や商品価値の向上につなげてきましたが、コロナ禍により経営に大きなダメージを受けました。これから経営体力を再強化し、この好循環を取り戻したいと思います。そのために、より高い次元で安全性を堅持するとともに、お客様に新たな移動価値を提供することや、ICTの活用を通じて、効率化、省力化を強力に推進し、東海道新幹線の新たな進化に邁進してまいります。

【参考文献】

- [1] 日本国有鉄道、日本国有鉄道百年史 第10巻 pp.52-53
- [2] 日本国有鉄道、日本国有鉄道百年史 第12巻 pp.115-123
- [3] 岡嶋達也、東海道新幹線の成長と進化、そしてリニア中央新幹線へ、電子情報通信学会誌 vol.97 No.12, pp.1067-1072, 平成26年12月
- [4] 一般社団法人国際高速鉄道協会ホームページ
<https://www.ihra-hsr.org/jp/hsr/shinkansen.html>
- [5] 青田孝、東海道新幹線「のぞみ」30年の軌跡、交通新聞社、令和4年2月
 以下は、JR東海ホームページ及びニュースリリース等
- [6] <https://company.jr-central.co.jp/company/technology/growth.html>
- [7] <https://company.jr-central.co.jp/company/esg/social/transport.html>
- [8] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000042379.pdf
- [9] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000039300.pdf
- [10] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000025139.pdf
- [11] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000035165.pdf
- [12] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000034313.pdf
- [13] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000036204.pdf
- [14] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000040105.pdf
- [15] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000041081.pdf
- [16] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000039529.pdf
- [17] <https://jr-central.co.jp/ex/>
- [18] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000041340.pdf
- [19] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000041051.pdf
- [20] https://railway.jr-central.co.jp/n700s/_pdf/n700s_pdf01.pdf
- [21] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000040779.pdf
- [22] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000039804.pdf
- [23] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000042106.pdf
- [24] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000041438.pdf
- [25] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000040020.pdf
- [26] https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000042355.pdf

新設研究室紹介

集積システム工学講座 大規模集積回路分野（新津研究室）

<https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp> <https://www.niitsulab.info> <http://id-lab.jp/>

高エネルギー効率大規模半導体集積回路を用いたエネルギー・データ地産地消型 IoT
～バイオ発電と低電力センサ集積回路を用いた単独自立動作持続血糖モニタコンタクト～

新津研究室では、高エネルギー効率大規模半導体集積回路設計技術の研究開発とその応用開拓を行っています。

半導体集積回路システムの低消費電力化に貢献し、さらにその性能を活かして新たなアプリケーションを開拓する発電センシング一体型集積センサシステムの開発を行いました。誘導結合通信と時間分解能回路の導入により世界最低電圧のバイオセンサ集積回路を実現し、世界初のバイオ発電素子を用いた電力自立バイオセンサを実現しました。バイオ発電素子の出力を電源とセンシング信号に活用する発電センシング一体型集積センサ技術を提案し、糖尿病医療への貢献につながる低負担の持続血糖モニタリングの基盤技術を確立しました。

発電センシング一体型集積センサは、“バイオ発電素子を電力供給源並びにセンシングトランステューサとして一体的に活用する”技術です。センサを駆動するために必須であったバイアス電圧供給回路が不要となり、飛躍的な低コスト化・低消費電力化が可能となりました。さらに、糖尿病医療・予防に貢献するコンタクトレンズ型持続血糖モニタリング装置の開発に世界で初めて成功しました。グーグル関連会社の従来装置は、無線電力伝送を用いていたために電力供給用メガネ端末が必要でしたが、開発した発電センシング一体型集積センサシステム技術により、単独動作可能・電力自立化が可能となりました。半導体集積回路製造プロセスで製造可能な糖発電素子 製造技術を提案し、0.6mm 角と世界最小サイズの糖発電素子の開発に成功しました。サイズ 0.385mm 角・電源電圧 0.165V・消費電力 0.27nW の 1mm 角以下のサイズとしては世

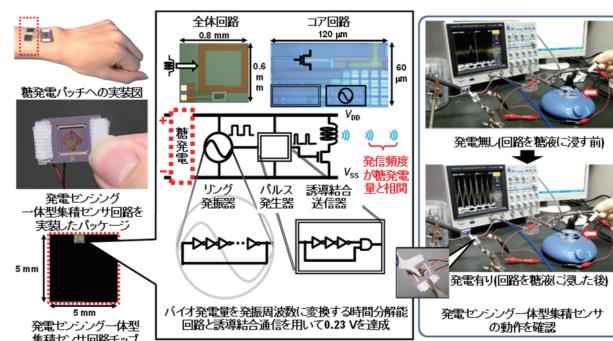


図1：開発した世界初のバイオ発電素子（糖発電素子）と融合した電力自立バイオセンサ：発電量をそのままセンシング信号としても活用する「発電センシング一体型集積センサ技術」の有効性を実証、時間分解能回路と誘導結合通信の導入により 0.23V を達成

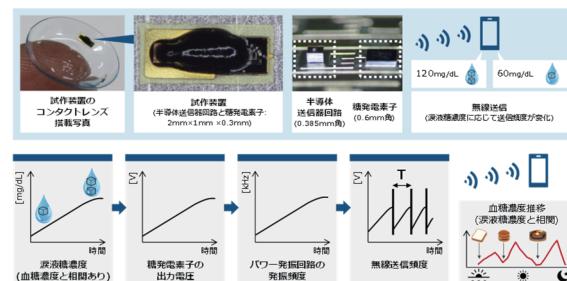


図2：開発した発電センシング一体型集積センサ技術を用いた電力自立持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

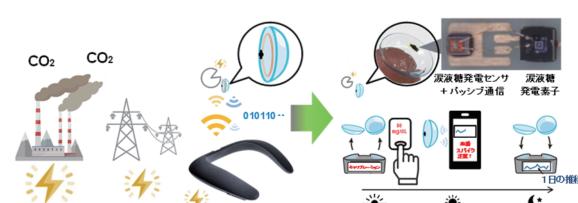


図3：エネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズコンセプト図

界最小電力の無線送信機集積回路の開発に成功しました。これらを融合し、世界で初めてメガネ型端末不要のコンタクトレンズ型持続血糖モニタリングの実証に成功しました。

半導体集積回路システム全体の高エネルギー効率化に向けたエネルギー・データ地産地消 IoT システムの開発を行いました。IoT システムにおいて、エネルギー効率を左右するのが、エネルギーとデータの伝送です。エ

ネルギーの伝送においては無線電力伝送を、データの伝送においては無線通信が活用されますが、集積回路システム内での伝送に比べると、エネルギー効率が悪いという課題があります。

そこで、エネルギー・データをその場で生成 / 活用するエネルギー・データの地産地消方式による IoT システムの開発に取り組みました。世界最小クラスの糖発電素子とサブ平方ミリサイズで超低消費電力のセンシング・LED 駆動集積回路技術、室内光で発電可能な集積回路上太陽光発電素子を開発し、それら 3つを融合した集積回路システムを搭載したコンタクトレンズを試作しました。さらに、糖尿病患者の方々の無自覚性低血糖を未然に防ぐための、機械学習を用いた低血糖警告技術を開発しました。これらにより、外部機器や電波を必要とせずコンタクトレンズ単独での持続血糖モニタリングと低血糖警告を可能としました。

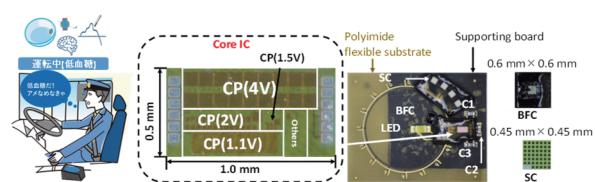


図 4：開発したエネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

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

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（阪本研）

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

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

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

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）

集積システム工学大規模集積回路分野（新津研）*

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

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（稲垣研）

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田研）

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電磁環境探査分野（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）

システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

一般的な確率的動特性をもつ離散時間システムの制御

システムの動特性を表現するモデルとして、次の離散時間状態方程式がしばしば用いられる。

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k$$

ただし、 k は離散時間を、 x_k と u_k は一般に多次元の状態ベクトルと入力ベクトルを表す。係数行列 A_k と B_k により、システムの状態がどう遷移するかが決定される。多くの場合、これらの係数行列は確定的であるとみなしてさまざまな議論が展開される。一方当研究室では、これらが行列値確率過程で与えられる状況、つまり動特性が確率的である状況を想定した制御理論の研究を、テーマの1つとして遂行している。そのような研究の成果として、ここでは主に文献[1]を紹介する。

文献[1]では、安定性（より正確には2次モーメント安定性）を定義する上で必要となる最小限の仮定を除き、係数行列 A_k , B_k に一切の仮定を置かないという最も一般的な状況下で、システムの安定性を必要十分の意味で特徴づけるリアプロフ不等式等の導出に成功している。制御理論分野では従来、有限モードマルコフ連鎖で決まるもののように、取り扱いの容易な特定のクラスの係数行列に議論を限定した研究が行われており、成果が活用できるためにはシステム（の係数行列）が適切な仮定を満たしている必要があった。これは裏を返すと、適切な仮定を満たさないシステムを扱う場合には成果を活用する術がないことを意味し、制御理論側の立場からニーズファーストでさまざまな実問題の解決に貢献することが難しいという課題があった。この課題を安定化制御に関して解決したのが文献[1]である。その文献では最も一般的な状況を想定して制御理論を構築しており、少なくとも理論上は、どのような確率的動特性をもつシステムであっても、対応する安定条件をその成果より得ることができる。既存研究と同様の仮定を係数行列に課す場合には、得られる安定条件はすでに知られた結果に一致する。また、そのような既存のものに限らず、いかなる仮定であっても扱うことが可能なため、ニーズファーストで新たなクラスの係数行列を想定して、システムの安定性を議論することも可能である。

上記成果の活用が期待される分野の1つとして、当研究室ではインターネットを用いた遠隔制御に注目している（図1）。遠隔地からインターネットを介して制御対象を制御するとき、インターネット部分で生じる通信遅延の影響が避けられない。とくにフィードバック形式の遠隔制御では、制御対象と制御器がごく短い時間間隔で互いに信号の送信を繰り返すことになるが、このとき通信遅延は送信の試行毎にランダムにばらつきてしまう。遠隔制御においてこのばらつきを考慮できるようにすることは重要な課題の1つである。文献[2]では、ある簡単なクラスの確率過程を通信遅延のモデルとして想定することで、確率制御理論によりそのよう

なばらつきの考慮を可能にしている。また、この成果はさらに、文献[3]にて自動車の遠隔型自動運転に応用されている。文献[1]の成果を活用すれば、より高度な通信遅延モデルも扱うことが可能であり、このような遠隔制御方式の発展への寄与が期待される。



図1 インターネットを介した遠隔制御

[1] Y. Hosoe and T. Hagiwara, On second-moment stability of discrete-time linear systems with general stochastic dynamics, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 67, No. 2, pp. 795–809, 2022.

[2] Y. Hosoe, Stochastic aperiodic control of networked systems with i.i.d. time-varying communication delays, Proc. 61st IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3562–3567, 2022.

[3] S. Kameoka and Y. Hosoe, Remote control of vehicles in a random communication delay environment and experimental results, Proc. 10th IFAC Symposium on Robust Control Design, pp. 214–217, 2022.

生体医工学講座 複合システム分野（土居研究室）

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

「並列スタック積み込み問題に関する研究」

港湾や貨物駅のコンテナヤードでは、コンテナを積み上げて一時保管します。また、製鋼工程における半製品であるスラブ（板状の鉄）も、スラブヤードに保管する際は何段にも積み重ねます。コンテナヤードやスラブヤードでは、荷物（コンテナ・スラブ）の垂直方向一列分をスタックと呼びます。各スタックへの積み込み・取り出しは上側からしか行えないため、一番上に積まれた荷物以外を取り出すには、その上に積まれた荷物を別の場所に積み替える必要があります。しかし、荷物をスタックに積み込む際に将来の取り出しも考慮して積み込み先を決定すれば、このような積み替えを減らすと考えられます。

並列スタック積み込み問題（parallel stack loading problem）は、荷物の積み込み・取り出しにおける積み替え作業の低減化を目的として、上述の状況を一般化した問題です。この問題の目的は、並列された複数のスタックにアイテムを到着順に積み込むものとして、取り出し時の積み替えの手間が最小になる積み込み計画を求めることです。図1に、アイテム数10、スタック数3、スタック容量4の例を示します。箱内右上の番号が到着順（アイテム番号）を、中心の番号が取り出し順を表しています。

この問題を最適化問題として扱うには、各積み込み計画に対して積み替えの手間を評価しなければなりません。積み替え専用のスペースを確保できなければ、邪魔なアイテムは他のスタックへ積み替えることになります。そうすると、そのスタックから別のアイテムを取り出す際、また積み替えが発生してしまいます。図1の例では、スタック1の3段目に積まれたアイテム9を取り出すために、その上に積まれたアイテム10をスタック3に積み替えると、アイテム8を取り出す際にアイテム10をもう一度積み替えることになります。積み替えの手間を総積み替え回数で評価するのが自然と思われますが、このように総積み替え回数は積み替え手順に依存するため、扱いが煩雑となります。実際、与えられた積み込み計画に対して最小の積み替え回数でアイテムを取り出す問題は、ブロック積み替え問題と呼ばれるNP困難な組合せ最適化問題です。このため、並列スタック積み込み問題に対する従来研究では、より簡単に計算できる評価指標を最適化していました。そのような評価指標の一つに、「必ず1回は積み替えなければならないアイテムの総数」（図1ではアイテム7とアイテム10の2つ）があります。この指標の最小化を目的としたスタック積み替え問題も、残念ながら一般にNP困難なのですが、我々は、スタックの容量に制限がなければ多項式時間で解けることを示しました[1]。具体的には、この問題を多項式時間で求解可能な別の問題—到着したアイテムの一部のみを積み替えなしに取り出せるよう積み込むものとして、積み込むアイテム数を最大化する問題—に帰着できることを示しました。また、総積み替え回数を評価指標とした問題も研究しています[2]。この問題を解くには、積み込み計画と積み替え手順の両方の最適化が必要になります。そこで、おののを別の分枝限定法で解く2段階の解法を構成して、他の評価指標を最適化した場合と比較しました。その結果、総積み替え回数を最適化した場合と、他の他の評価指標を最適化した場合とで、得られる積み込み計画に大きな隔たりがあることがわかりました。

[1] S. Tanaka and S. Boge: Polynomial-time algorithm for the parallel stack loading problem with unlimited stack capacity, スケジューリング・シンポジウム 2022, pp. 26-31 (2022)

[2] S. Tanaka, M. ElWakil, M. Gheith, and A. Eltawil, Exact minimization of the number of relocations in the parallel stack loading problem, 投稿中

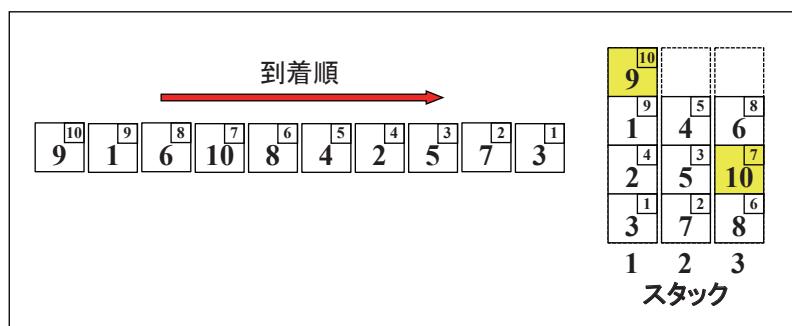


図1：並列スタック積み込み問題の例（アイテム数10、スタック数3、スタック容量4）

生体医工学講座 生体機能工学分野

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

「超高感度な小型光ポンピング磁気センサモジュールと生体磁気計測」

光ポンピング磁気センサ（Optically Pumped Magnetometer: OPM）は、液体ヘリウムなどの冷媒を必要とせず、 pT から fT 程度の極微弱な磁場を検出可能な磁気センサである。アルカリ金属原子のガスにレーザ光を照射することで、 $10 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ を切るような超高感度が実現されている。近年、ヘリウムの流通が滞っていることから、超伝導量子干渉素子（Superconducting Quantum Interference Device: SQUID）を用いた高感度な磁気センサの利用が難しくなっていることもあり、OPM は磁気計測、特に脳磁界計測（Magnetoencephalography: MEG）や心磁計測（Magnetocardiography: MCG）などの生体磁気計測の分野で非常に注目されている。

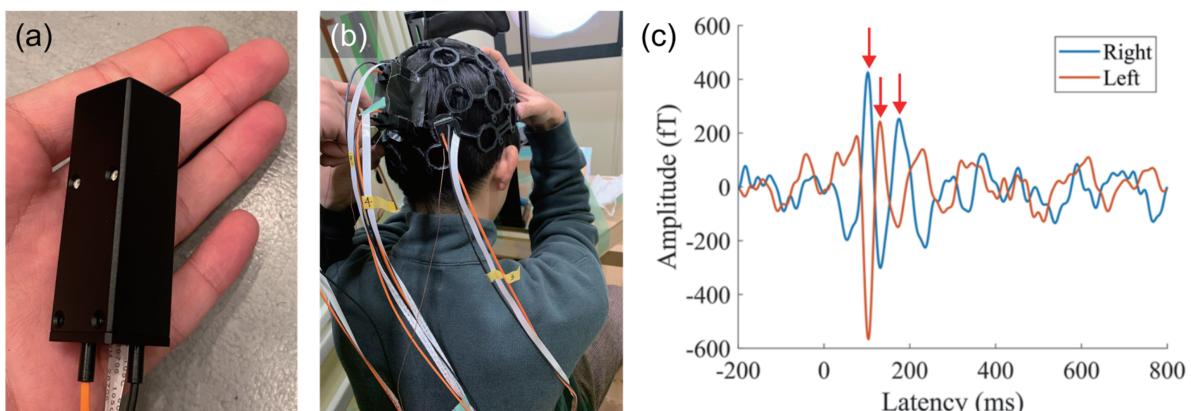
生体磁気計測では、多数のセンサにより計測を行い、そのデータから逆問題を解くことで信号源の推定が行われる。そのため、センサはなるべくコンパクトで省スペースであることが望ましい。しかし、小型化によりアルカリ金属原子がセンサセル壁面と衝突してスピン緩和時間が短くなり、またアルカリ金属をガス化するためのヒータがセンサ部に接近し、そこから生じる熱雑音や擾乱磁場により計測感度が低下するという問題がある。

当研究室では、これらの影響を極力抑え、図 (a) のような小型かつ超高感度な OPM を浜松ホトニクス株式会社との共同研究により開発した [1,2]。このセンサは、センサヘッド部分が $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}$ と小型で、 $20 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 以下のセンサノイズと、200 Hz を超える周波数帯域幅を実現している。また、静磁場を印加することで、センサの中心周波数を変化させることができるために、幅広い用途に応用が可能である。

今回は、このセンサを用いてチェックカード刺激に対する視覚誘発磁界を計測した(図 (b))。チェックカード刺激は白黒のタイルを敷き詰めたものをスクリーン上に投影したものであり、この白黒が反転したときに、呈示されている視野の対側の視覚野が賦活することが知られている。図 (c) に、各視野について後頭部に配置した OPM で計測した波形を、チェックカードパターンの反転をトリガとして 300 回ほど加算平均したものを示す。刺激呈示から約 100 ms 後に有意なピークが現れ、その極性は刺激呈示した視野で反転していることがわかる。本研究結果は、開発した OPM の有効性を示しており、生体磁気計測の普及につながるものと期待される。

[1] 加藤ほか、“生体磁気計測のための光ポンピング磁気センサモジュールアレイの開発”、生体医工学 Annual 59 卷、p.556 (2021).

[2] <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/products-and-technologies/2022/20220224000000.html>



図：(a) 開発した小型 OPM モジュール。(b) 視覚誘発磁界計測の実験風景。被験者の後頭部に OPM モジュールを配置し、被験者の前に置かれたスクリーンにチェックカード刺激が呈示される。(c) 視覚誘発磁界の計測結果。チェックカードの白黒が反転するタイミングを 0 秒としている。潜時が 100 ミリ秒程度でピークがいくつか観測されており、刺激の呈示された視野によって極性が反転して観測されている。

電磁工学講座 電磁回路工学分野 (和田研究室)

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

「微細 MOS トランジスタの統計的性質を利用した高精度な CMOS 温度センサ」

温度センシングは集積回路チップの自己診断や環境モニタリングに必須である。温度センサにおいて高い電源電圧動作が求められる一方、高い精度も必要である。従来、MOS トランジスタに存在する様々なリード電流は電源電圧や温度に関して高い依存性を持っているため、これらの同時達成は難しかった。本研究では、トランジスタ特性の統計量の温度依存性に注目し、統計処理により誤差要因を排除できることを実証した [1,2]。

MOS トランジスタのサブスレッショルド電流は次の式で表される。

$$I_{ds} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} n^2 \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \exp \left(\frac{V_{gs} - V_{th} + \lambda V_{dd}}{nkT/q} \right) \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{-V_{dd}}{kT/q} \right) \right).$$

ここで、 μ は移動度、 C_{ox} は単位面積当たりのゲート容量、 W はゲート幅、 L はゲート長、 k はボルツマン分布、 q は電荷素量、 T は絶対温度、 V_{gs} はゲート-ソース間電圧、 V_{th} はしきい値電圧、 V_{ds} はドレン-ソース間電圧、 n はサブスレッショルド係数、 λ はドレン電圧依存係数である。統計的性質により、対数をとった電流の標準偏差を求めるとき、固定の項はすべて排除され、 $T \cong \frac{q \sigma v_{th}}{nk \sigma \ln(I_{ds})}$ が得られる。

この方式によりノイズ成分や電源電圧に依存する項が排除されるため、回路工事が可能となる。図 1 に大量 MOS トランジスタの微弱なサブスレッショルド電流を測定する回路を示す。この回路を商用の 65nm プロセスにてチップ試作し、提案方式の妥当性を実証した。図 2 に設計した回路のチップ写真とレイアウトを示す。大量の微細トランジスタを自動設計により配置配線し、実用性を大幅向上した。図 3 に恒温槽を用いた測定環境を示す。図 4 に電流の対数の標準偏差を温度に対して示している。6つのチップにおける特性が高い線形性を持っている。 -20°C から 120°C の範囲において推定温度誤差は $-0.54/+0.43^{\circ}\text{C}$ であり、 100°C の壁を世界で初めて突破した（図 5）。0.8V から 1.2V の電源電圧範囲において推定誤差が 0.8°C 以内に収まり、低電圧依存性を実現した。今後は電流測定回路の低消費電力化とキャリブレーション点数を 2 から 1 に減らすこと目標に研究を進める予定である。

参考文献 : [1] S. Ota, M. Islam, T. Hisakado, and O. Wada, "Wide temperature- and voltage-range temperature sensing utilizing statistical property of sub-threshold MOSFET current," SSDM, September 2022, pp. 788-789. [2] S. Ota, M. Islam, T. Hisakado, and O. Wada, "Wide-range and low supply dependency MOSFET-based temperature sensing utilizing statistical properties of scaled MOSFETs," Japanese J. Applied Physics, accepted (DOI 10.35848/1347-4065/acb94e).

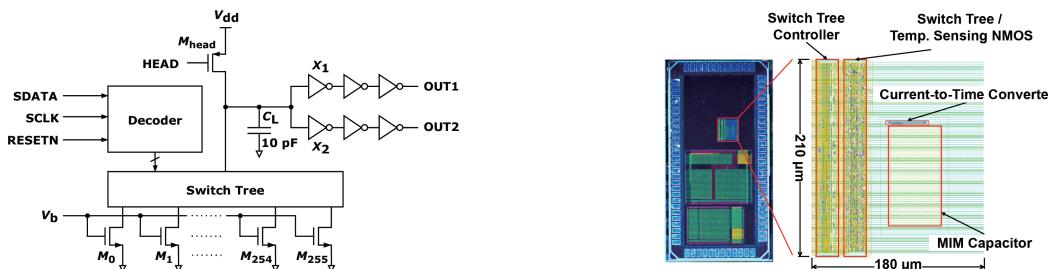


図 1: 大量 MOS トランジスタの電流を測定する回路。図 2: 65nm プロセスにて試作した回路のレイアウト。

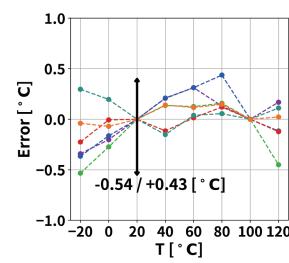
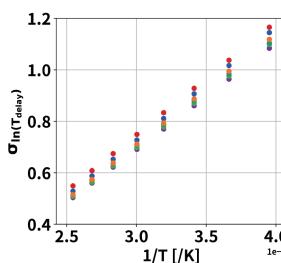


図 3: 恒温槽による測定環境。図 4: 温度に対する電流統計量の変化。図 5: 温度に対する推定誤差。

集積機能工学講座

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

「電界放出微小電子源アレイを用いた耐過酷環境能動デバイス・撮像デバイスの開発」

半導体製造技術で培われた薄膜作製や微細加工技術を利用すれば、微小な半導体電子デバイスを作製することができるだけでなく微小な真空管を作ることも可能です。従来の真空管では熱陰極を用いていたため微細化には限界がありましたが、冷陰極である電界放出陰極を用いれば微細化することはむしろ必然ということもできます。真空電子デバイスは電子の走行媒質が真空であることから、温度不感な特性や放射線環境下でも利用できる可能性を秘めています。当研究グループでは、これまで電界放出微小電子源アレイ（以下フィールドエミッタアレイ、FEA）を用いた能動デバイス（真空トランジスタ）や增幅回路、周波数混合器などの開発を行うとともに、これらのデバイスの高温や低温における特性評価を行ってきました[1]。

2011年の東日本大震災の際に、東京電力福島第一原子力発電所は外部電源喪失により原子炉のメルtdownを起こし廃炉を余儀なくされています。廃炉のためには格納容器内の様子を観察することのできるカメラが必要ですが、容器内の放射線の線量率は 100 Gy h^{-1} 近くにも及び半導体を利用した撮像デバイスでは長時間の使用には耐えられない可能性があります。他方、撮像管はその高い耐放射線性から放射線環境で現在でも使用されています。しかしながら、撮像管では受光面の電荷を、電子ビームを走査しながら読み取るためプラウン管同様長い筒状構造となり、格納容器の内部に入るロボットに搭載することは難しいのが現状です。電子銃とその走査系を、二次元に配置した FEA アレイで置き換えれば薄型化が可能です。その構造は図1に示したようなもので、このようなデバイスは撮像板と呼ばれています。

縦に並んだエミッタラインと横に並んだゲートラインそれぞれ一つを選んで電圧印加することで両者が交差する場所の FEA から電子を放出、受光面の電荷を読み出します。撮像板は当初、超高感度撮像デバイスとして研究開発が行われました[2]。当研究グループは、産業技術総合研究所、静岡大学、木更津工業高等専門学校等デバイス開発に直接関連する大学・研究機関及び大阪公立大学、学内の原子核工学専攻、複合原子力科学研究所の放射線関係の研究者と協力して撮像板を耐放射線性という観点から見直し、耐放射線性を持つ光電変換膜の選択[3]や撮像板小型化のための FEA の改良[4]、耐放射線性の評価を行ってきました。これまでに個々の構成要素の

1 MGyまでのガンマ線照射に対する耐性を確認するとともに、構成した撮像デバイスが1 MGyのガンマ線照射を受けても光検出が可能なことを示しました[5]。現在、撮像デバイスを内蔵する可搬型真空容器の試作を行い、放射線環境下における撮像動作の検証に向けて準備を進めています。

（参考文献）

- [1] Y. Gotoh, J. Vac. Soc. Jpn. **60**, 55 (2017) [in Japanese].
- [2] Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota, and N. Egami, J. Vac. Sci. Technol. B **33**, 012205 (2015).
- [3] T. Okamoto, T. Igari, Y. Gotoh, N. Sato, M. Akiyoshi, and I. Takagi, Phys. Status Solidi (c) **13**, 635 (2016).
- [4] M. Nagao, Y. Gotoh, Y. Neo, and H. Mimura, J. Vac. Sci. Technol. **34**, 02G108 (2016).
- [5] Y. Gotoh, H. Tsuji, M. Nagao, T. Masuzawa, Y. Neo, H. Mimura, T. Okamoto, T. Igari, M. Akiyoshi, N. Sato, and I. Takagi, IEEE Trans. ED **67**, 1660 (2020).

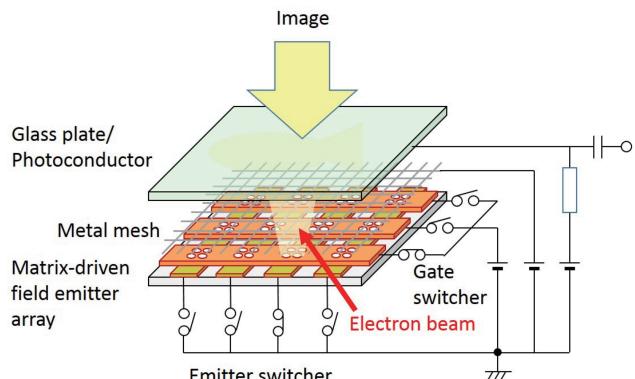


図1 FEA を用いた耐放射線撮像板の構成

電子物理工学講座 応用量子物性分野（竹内研究室）

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「可視光源と可視光検出器で実現する赤外領域の量子分光」

赤外波長域には分子構造や化学状態を反映した数多くの光吸収が存在します。このため赤外光学スペクトルを評価することで、非侵襲かつ高速に物質の鑑別同定や、不純物の定量解析などを行うことができます。現在赤外分光は基礎科学のみならず、材料、医薬などの開発研究のツールとして幅広い分野で利用されています。オンラインの環境センシングやセキュリティなどの用途には、分光装置の更なる小型化高感度化が望まれますが、従来分光技術には赤外光源や赤外光検出器に由来する技術的な制約が多く存在します。

量子赤外分光法は上述の問題を解決する新奇な赤外分光法として、近年提案された量子計測技術です。本手法は技術的に成熟し小型かつ高性能な可視光源と検出器のみを用いて赤外分光を行うことを可能とします。その測定原理は、量子相関をもつ可視光子と赤外光子のペア（可視-赤外もつれ光子対）の発生過程間の量子干渉を利用するというもので、これにより赤外波長域における光学吸収を相関する可視光子発生数の変動を通して評価することができます。しかしながら、これまでに報告されていた量子赤外分光法は大型の可視分光器を利用しておらず、システムが大型化、高コスト化するという問題がありました。

今回我々はシングルピクセル検出器を用いてコンパクトな分光系が構築可能な新奇測定手法「フーリエ変換型量子赤外分光法（量子FTIR）」を提案し、その実証実験を行いました。図は実際に量子FTIRシステムで計測される量子干渉信号を示しています。横軸は光路長差、縦軸は可視光子発生数を示しています。図(a)は測定経路上に試料を配置しない場合の参考信号(図(a)上)と測定試料である赤外波長フィルターを挿入した場合の信号(図(a)下)を示しています。これらの信号にフーリエ変換を施し、その比をとることで図(b)のように赤外域の透過スペクトルを算出することができます。今回の測定では波長810nmの光子測定を通して、波長1550nm帯の赤外透過スペクトルの計測に成功しています。測定結果は古典的な赤外分光法による結果とも定量的によく一致しています。更に量子FTIRでは試料による透過光の位相変化量の測定も可能です。図(c)は溶融石英ガラスの複素透過スペクトルの測定結果を示しており、透過率の絶対値がほぼ一定であるのに対し、波長ごとに異なる位相変化スペクトルを観測しています。この結果から図(d)に示すように、試料の複素屈折率を算出することも可能となります。算出された屈折率は実部、虚部共に既知の石英ガラス光学特性と整合することが確認できます。このように光学吸収と分散の同時取得を可能とする量子FTIRは、複雑な組成や構造をもつ物質に対する詳細な分光解析への応用が期待できます。

現在この量子赤外分光技術の高度化に向けた研究を、Q-LEAPプロジェクトの支援のもと推進しています。

参考文献：Y. Mukai, M. Arahata, T. Tashima, R. Okamoto, and S. Takeuchi, “Quantum Fourier-Transform Infrared Spectroscopy for Complex Transmittance Measurements” Physical Review Applied, 15, 034019 March (2021).

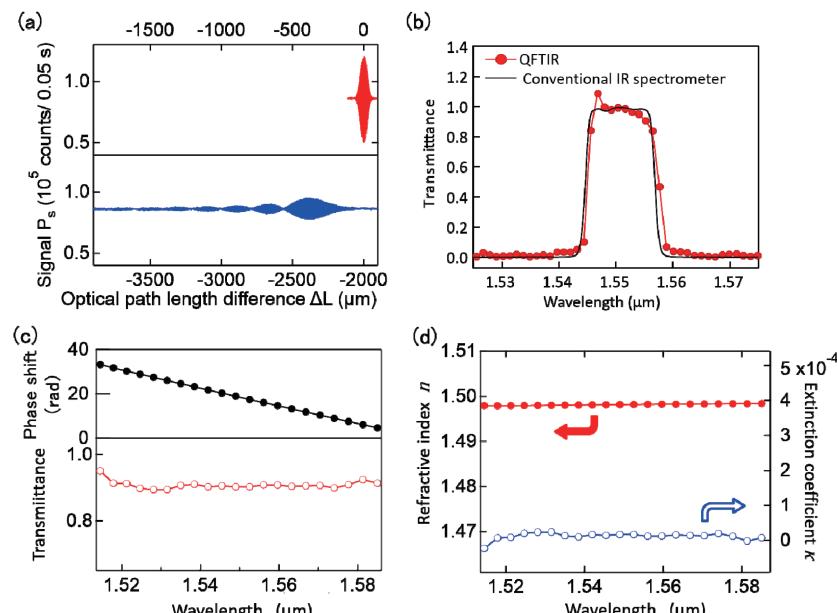


図. 実験結果

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

時間分解ケルビンプローブフォース顕微鏡によるトラップ電荷拡散過程の可視化

近年、簡便なプロセスで柔軟かつ軽量なトランジスタとして有機薄膜トランジスタ (organic thin-film transistor: OTFT) が注目を集めている。実用化へ向けた課題の1つが、金属電極一有機薄膜界面におけるチャネル注入障壁やキャリアトラップによる性能律速である。そこで、電極界面やチャネル内におけるキャリア分布をナノスケール分解能で評価でき、デバイスの律速要因を明らかにできる手法として、原子間力顕微鏡 (AFM) をベースとした表面電位分布計測手法であるケルビンプローブフォース顕微鏡 (Kelvin-probe force microscopy: KFM) が期待されている。しかしながら、通常の KFM では1枚の画像像を取得するのに通常数分から数十分もの長い時間を要するため、表面電位像を取得している途中でキャリアの脱離 (脱離) が生じてしまうと、キャリアの空間的／時間的变化の切り分けが困難となる。

そこで本研究では、動作中のOTFTのチャネル部における表面電位の過渡的な変化を評価できる時間分解KFM法を開発し、動作直後のデバイスに残ったトラップ電荷が拡散していく過程を可視化することに成功した。図1 (a) に、時間分解KFM法によるOTFT測定の概略図を示す。OTFTのドレイン電極とソース電極を接地した状態でAFMにより表面形状を取得している最中に、探針があらかじめ定めた測定点の直上に来る度に、ゲート電極へのバイアス電圧印加 (-3 V) により有機半導体層にキャリアを注入・蓄積し、直ちにバイアス印加をターンオフ、その後の表面電位変化を一定時間記録した。図1 (b) に示すように、得られたデータを各時間の表面電位像に再構成することができ、キャリア分布の時間変化を知ることができる。さらに、チャネル上の各点で取得した表面電位の時間変化を解析すると、表面電位は指数関数的に減衰していることが分かった。このゲート電極ターンオフ後の電位の減衰曲線に対して指数関数フィッティングを行い、チャネル上の各点における電位の減衰の時定数マップを作成した(図1 (c))。この時定数マップから、ソース・ドレイン電極電極の近傍の領域では、トラップ電荷は比較的速やかに電極へ拡散するため、減衰時定数が小さいこと(150 ms程度)、一方、電極から離れたチャネル中央付近における時定数は比較的大きく、キャリアが長時間トラップされている(450 ms)ことが分かった。

参考文献

- Y. Yamagishi, K. Kobayashi, T. Kimura, K. Noda, and H. Yamada, *Organic Electronics* 57, 118 (2018).

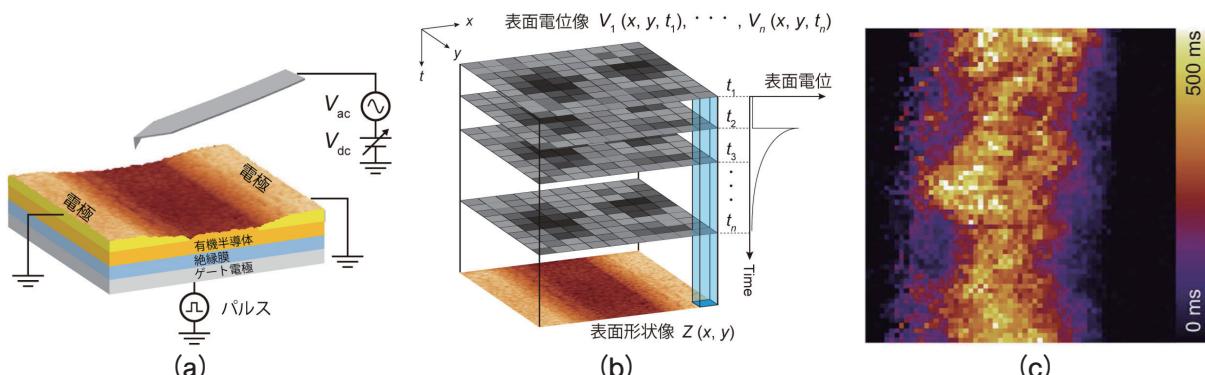


図1: (a) 時間分解KFM法による測定の概略図。(b) 集録されたデータの再構成によって電位の時間変化を可視化する概念図。(c) 表面電位の減衰時定数マップ。

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

フォトニック結晶レーザーを用いた小型 LiDAR の開発とスマートモビリティ応用

来るべき超スマート社会 Society 5.0 における、工場や倉庫におけるロボット、農機・建機、さらには自動車等の自動運転のために、光を用いた測距システムである LiDAR が極めて重要となっている。この LiDAR (Light Detection and Ranging) の心臓部であるレーザー光源には、小型・安価・高効率といった特長を有する半導体レーザーが主に用いられている。しかしながら、従来の LiDAR では、ビーム拡がりが大きくかつ非対称な従来型の半導体レーザーを用いているため、ビーム整形のための複雑な外部レンズ系や精密調整が必要となり、サイズ、コスト、性能に課題を抱えている。そこで、我々は、従来の半導体レーザーの課題を解決し、LiDAR の小型化、低コスト化、さらには性能や機能の向上を可能とする新たな半導体レーザーとして、フォトニック結晶レーザー [1] の研究・開発を行っている。

フォトニック結晶レーザーは、ナノスケールで制御された周期構造をもつフォトニック結晶を活用することで、原理的に大面積でもコヒーレント動作が可能であり、高出力かつ極めて狭い拡がり角のビームを得ることが出来る。そのため外部レンズ系を必要としない小型システムによって長距離・高分解能な測距が可能となる。実際に我々は、2020 年にこのようなフォトニック結晶レーザーを搭載した LiDAR システムの開発に世界で初めて成功している [2]。さらに今回、フォトニック結晶レーザーのレンズフリー特性を活かし、従来機ではシステム内に別々に配置されていた光源部と受光部を一体化することによって、図 1 (a) に示すように、高分解能でありながらシステムを従来の 1/3 の体積へと大幅に小型化し、名刺サイズというクラス最小の LiDAR の開発に成功した。そして、開発した小型 LiDAR を用いたスマートモビリティ応用の一例として、工場や倉庫で用いられる自動搬送ロボットへの適用を試みた。図 1 (b) に実際に LiDAR を組み込んだ様子を示すように、システムが小型であるため、限られたスペースにも設置することが可能である。図 1 (c) にデモンストレーションの様子を示す。小型 LiDAR によって周囲の人及びロボットの位置を高精度に検出しながら、自動追従が実現出来ており、スマートモビリティの実証に成功したと言える。この成果は、フォトニック結晶レーザーおよびそれを搭載した小型 LiDAR が、今後の超スマート社会 Society 5.0 に向けて極めて有望であることを示すものである。参考文献: [1] M. Imada, S. Noda, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 316 (1999). [2] M. Yoshida, S. Noda, *et al.*, *J. Phys. Photonics* **3**, 022006 (2021).

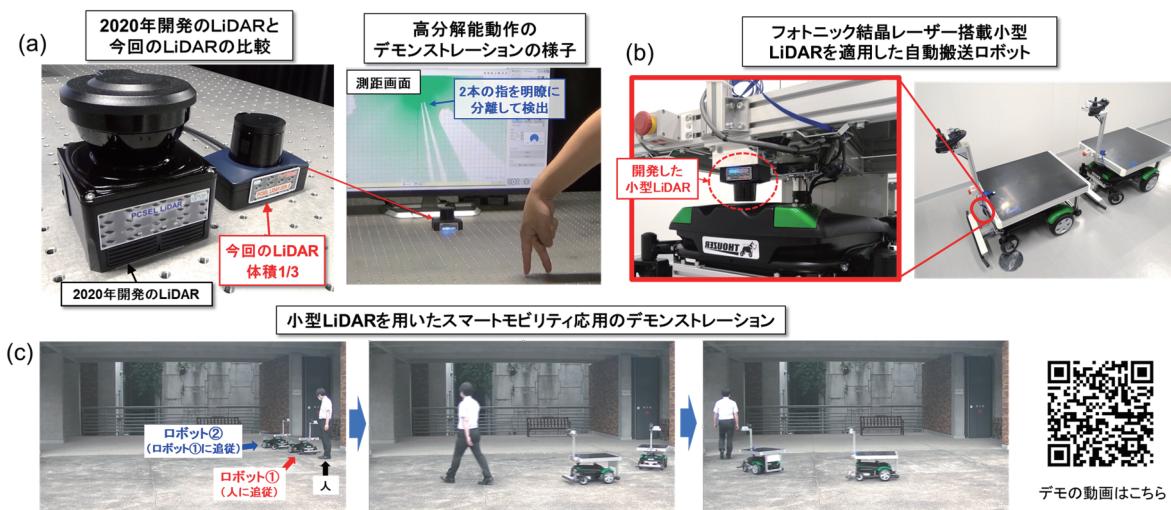


図 1. (a) 2020 年開発の LiDAR と今回開発した小型 LiDAR の比較、及び高分解能での測距動作の様子。(b) 開発した小型 LiDAR を適用した自動搬送ロボット。(c) 小型 LiDAR を用いたスマートモビリティ応用のデモンストレーション (QR コードから動画を再生可能)。

量子機能工学講座 量子電磁工学分野
<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp>
BIC 状態の変調による電磁波の保存と再生

メタマテリアルとは、電磁波の波長より小さい人工構造の集合体のことでのことで、構造の設計によってマイクロ波から光領域まであらゆる波長に対する光学 / 電磁特性を自在に制御できることから注目を集めている。現実の原子・分子がもつ光学特性を模倣することも可能である一方、負の屈折率や透明マントなどの自然界にない特性を実現することもできる。本研究室では、電磁波を保存し、任意のタイミングで再生することができるメタマテリアルについて長く研究してきた[1,2]。この研究では、原子系の光保存・再生の方法として研究されてきた電磁誘起透明化現象と呼ばれる効果をメタマテリアルで疑似的に実現することで、マイクロ波の保存と再生を実現している。そして、今回 BIC (Bound state in the continuum) 状態の変調を利用する全く異なる手法を考案した。

図 1 (a) を単位構造とする周期的メタマテリアルにおいて、水平偏光が入射された場合を考えたとき、構造が対称になる $w=0$ のとき BIC 状態と呼ばれる伝搬電磁波と結合しない状態となる。一方、非対称な状態 ($w \neq 0$) は非 BIC 状態となり、伝搬波と電磁的に結合した状態となる。初期状態を非 BIC 状態として、電磁波を入射すると、エネルギーは結合によってメタマテリアルへ蓄積される。そして、状態を BIC 状態へ変化させることで蓄積された電磁エネルギーは放出されなくなる。そして、再び非 BIC 状態に戻すことで、保存されていたエネルギーがメタマテリアルから再放射される。電磁界シミュレーションで計算した結果を図 1 (b) に示す。BIC 状態では透過波は観測されず、非 BIC 状態に戻すことで、外部に電磁波が取り出されていることが確認できる。更に詳しい解析を行った結果、保存時にはメタマテリアルに共振状態としてエネルギーが保存されているだけでなく、DC モードと呼ばれる直流電流が形成するモードにもエネルギーが保存されていることが分かった。この DC モードはこれまで電磁現象としてあまり注目されてこなかったモードで、このように状態を変えることで外部励起することができる[3]。このような、状態変化を利用する時変メタマテリアルは現在研究が盛んになってきた分野であり、更なる研究の進展が期待できる。

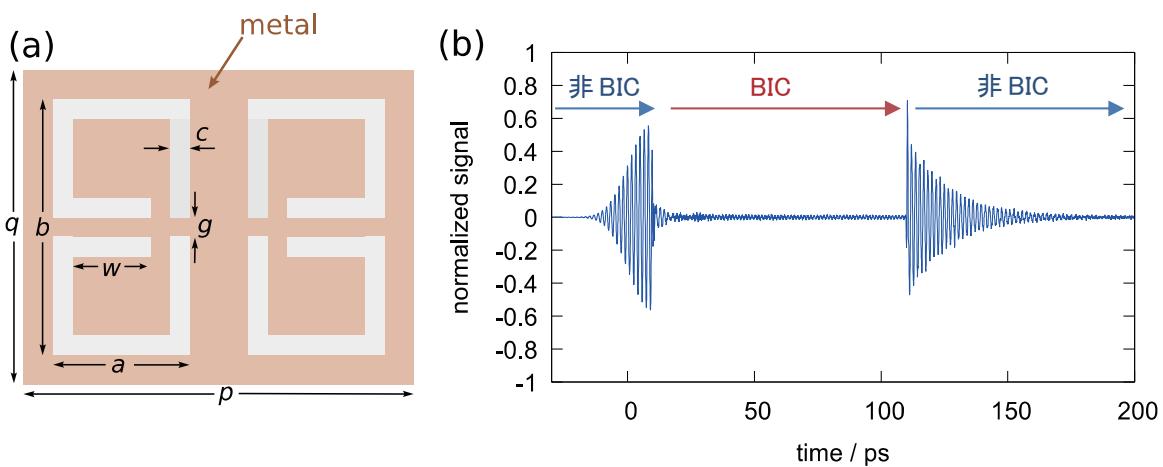


図 1 (a) 単位構造 (b) 透過波波形

参考文献

- [1] T. Nakanishi, T. Otani, Y. Tamayama, and M. Kitano, Phys. Rev. B **87**, 161110 (2013).
- [2] T. Nakanishi and M. Kitano, Appl. Phys. Lett. **112**, 201905 (2018).
- [3] F. Miyamaru, C. Mizuo, T. Nakanishi, Y. Nakata, K. Hasebe, S. Nagase, Y. Matsubara, Y. Goto, J. Pérez-Urquiza, J. Madéo, and K. M. Dani, Phys. Rev. Lett. **127**, 053902 (2021).

知能メディア講座 コンピュータビジョン分野 (西野研究室)

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

車載映像における死角道路領域推定

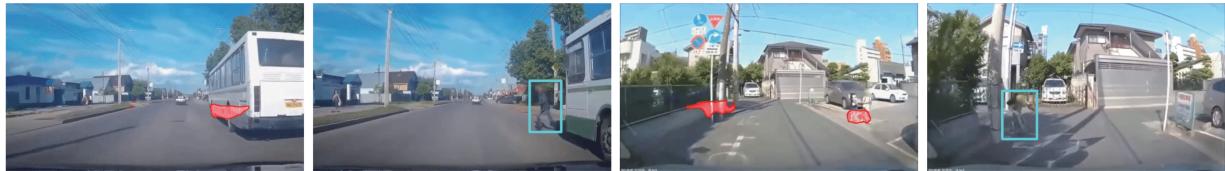


図1 歩行者の飛び出しシーンでの死角推定結果

コンピュータビジョンを用いた安全な自動運転の実現に向けて、数多くの研究が行われている。例えば、車載映像からの物体検出技術は、自動ブレーキや追従ドライブ機能に応用されている。しかし、これらの研究の多くは、見えるもののみに着目しており、映像に映っていないが潜在的に危険な状況に取り組む研究はまだ少ない。映像には映らないが安全運転にはその認識が欠かせないものの一つに見えない道路領域、すなわち死角がある。歩行者が死角から飛び出してくる場合、歩行者を検出してからではブレーキが間に合わないことが多い。自動運転のみならず、手動運転においても、このような死角からの飛び出しによる事故を避けるには、危険の潜む死角を事前に検出する技術が必須となる。

車載映像からの死角検出は非常に困難である。カメラから見えていいる景色が立体的に把握できれば死角を検出できるが、車載映像から道路シーンの精緻な3次元復元を行うのは、計算時間の観点からも現実的ではない。深層学習などを利用して学習により死角を画像から直接検出すれば、リアルタイムでの実装が現実的になるが、学習に必要な死角の教師データが現状存在しない。また、人の手で死角の教師データを作成しようにも、そもそも見えていない領域である死角をラベル付けすることは不可能に近い。

本研究では、死角の近似として、車載映像から計算可能なT-frame Blind Spotを導入し、死角の教師データを自動的に作成する手法を提案するとともに、作成した教師データを使って学習を行う死角推定ニューラルネットワークモデルを導出した[1]。T-frame Blind Spotを、「現在見えていないが、将来見えるようになる道路領域」として定義することで、本来見えない領域である死角を、将来の映像によって決定できるようになる(図2)。すなわち、動画を逆再生し、見えている道路領域を現在位置における視角に投影することで、現在のカメラに映る死角領域を得られる。既存のセマンティックセグメンテーション・単眼深度推定・自己位置推定の手法を組み合わせることで、231本の車載映像から計21,667枚の死角教師データを自動的に作成した。

さらに、この大量のオフラインで作成された死角教師データを用いて、オンラインで車載映像の視野における死角を推定する深層学習モデルを導出した。自動的に作成された大量の教師データにより訓練を行うことで、実際に歩行者が飛び出してきたものも含め、様々なシーンに対して死角を推定できることを示した(図1)。本技術は、死角が検出された領域付近では減速・迂回するような制御を行う自動運転技術や、死角領域を可視化することで運転者の注意を向ける運転者支援技術など、様々な利用法が想定される。また、運転教習教材への応用など、様々な側面から、安全運転に貢献できると考える。(修士二回生 福田太一)

[1] Fukuda, T., Hasegawa, K., Ishizaki, S., Nobuhara, S., Nishino, K.: BlindSpotNet: Seeing where we cannot see. In: Proc. of European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops - Autonomous Vehicle Vision Workshop (2022), <https://vision.ist.i.kyoto-u.ac.jp/research-bsn/>

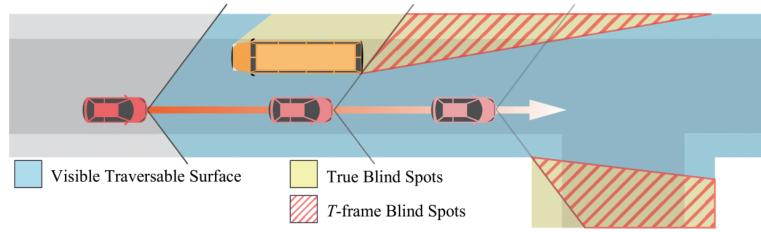


図2 本研究における死角 (T-frame Blind Spot) の定義

通信システム工学講座 知的通信網分野 (大木研究室)
<http://icn.cce.i.kyoto-u.ac.jp>
 「Software-defined network (SDN) における資源割り当て」

大木研究室は、高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えたネットワークの研究開発を行っている。理論から実装まで幅広いアプローチで取り組んでいる。本稿では、研究トピックの1つである「Software-defined network (SDN) における資源割り当て」について紹介する。

SDN はネットワーク仮想化技術の1つであり、物理ネットワーク上に様々なサービスの提供に適した論理ネットワークを柔軟に構成し運用することを実現する。SDN では、図1に示すように、従来個々のルータが備えていた、パケット転送の機能と転送経路制御の機能が分離される。パケット転送を担う SDN スイッチと、それらを集中制御する SDN コントローラが配置される。コントローラが経路を計算し、パケット転送のためのフローエントリを各スイッチに格納する。大木研究室ではこのような仮想化技術を導入したネットワークにおいて、トラヒック観測やユーザの要求に基づく制御を行い、数理最適化や機械学習等の手法を用いて、ネットワーク資源の利用効率化を図る技術を研究している。

[1] では、SDN 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経路決定モデルを検討している。各スイッチが持つメモリの容量には限りがあるため、格納するフローエントリ数をできるだけ削減しながら、各送信者～受信者間でのパケット転送を実現することが求められる。従来モデルでは単一のマルチキャスト要求のみを考慮してフローエントリを設定していた。これを複数のマルチキャスト要求が発生する状況に適用すると、フローエントリが格納されるスイッチが分散し、必要なエントリ数が増加する問題があった。提案モデルでは、図2に示すように、複数のマルチキャスト要求間におけるフローエントリの共有を促進する。数値評価により、提案モデルは従来モデルと比較して、フローエントリ数を削減しながらマルチキャストサービスの提供を実現可能であることを示している。

[2] では、SDN コントローラの故障を考慮したコントローラ配置モデルを提案している。コントローラはパケット転送経路の決定のために計算能力やメモリを消費するため、できるだけ配置数を削減することが望ましい。一方で、コントローラが故障した場合、各スイッチにおける適切なパケット転送ができなくなる可能性がある。そのため、故障を考慮した上でコントローラの配置を決定することが求められる。従来モデルでは各スイッチからの負荷が1つのコントローラにかかるため、コントローラの計算能力を効率良く利用できないという問題があった。提案モデルでは、各スイッチがコントローラにかける負荷を複数のコントローラに分散させ、故障発生時には別のコントローラが不足分の計算容量をカバーする。数値評価により、提案モデルが従来モデルと比較して、コントローラ数を削減した配置を実現可能であることを示している。

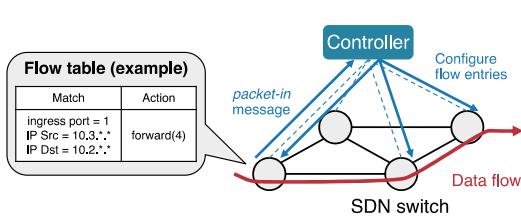


図1 SDN アーキテクチャ

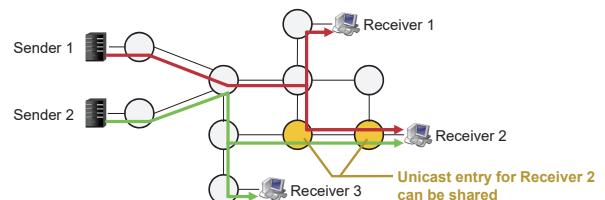


図2 SDN におけるマルチキャスト

- [1] S. Kotachi, T. Sato, R. Shinkuma, and E. Oki, "Multicast Routing Model to Minimize Number of Flow Entries in Software-Defined Network," IEICE Transactions on Communications, vol. E104-B, no. 5, pp. 507-518, May 2021. (電子情報通信学会論文賞)
- [2] S. Kotachi, T. Sato, R. Shinkuma, and E. Oki, "Fault-tolerant Controller Placement Model by Distributing Switch Load among Multiple Controllers in Software-defined Network," IEICE Transactions on Communications, vol. E105-B, no. 5, pp. 533-544, May 2022.

集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤研究室)

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「準同型暗号による情報処理：秘匿プロセッシング技術」

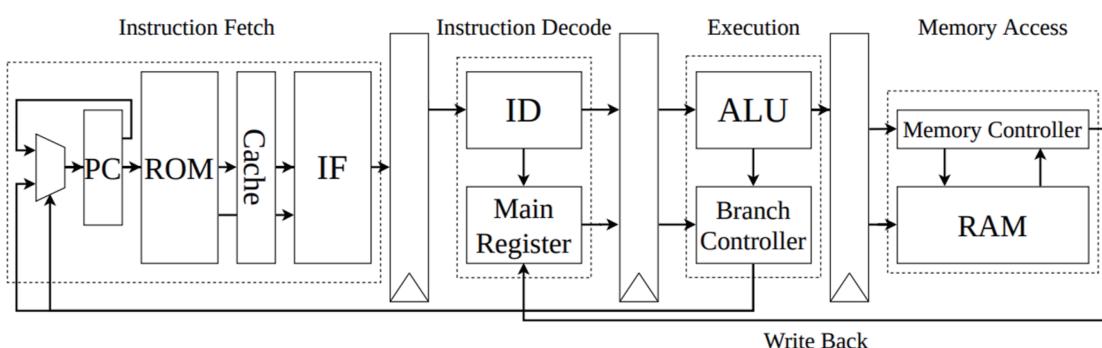
計算やデータの保管を外部サーバに委託する、クラウドサービスの利用が一般的となった。写真、文書、メール、センサにより取得されたバイタルデータ、ひいては私達の日常の行動等が、サーバに蓄積されている。こうした外部資源を用いて個人情報に関わるデータを転送し保存する際には、安全性確保の観点から暗号化による保護がなされることが一般的である。しかし、暗号化されたデータを利用するには、一度復号する必要がある。このため、攻撃者による不正アクセスやクラウドサービス内部の関係者による不正等に対して情報漏えいを防ぐことは難しい。この対策として、データを暗号化した状態のまま処理することで情報漏えいを防ぐ暗号化状態処理（準同型暗号に基づく秘匿計算）が注目されている。同処理は、暗号化されたデータ間の演算（例えば、暗号化データの加算結果は、対応する平文データの加算結果を暗号化したものと一致する）を実現できる。

我々の研究グループでは、準同型暗号を用いる汎用プロセッシング技術を開発している。これは、クラウドサーバ等の第三者に対して、データとともに実行するプログラムも秘匿した上で計算委託を行う事ができる二者間での秘匿計算技術である。本研究では、準同型暗号を用いることで効率的な処理を実現し、従来手法に対し計算コストを大幅に低減する。具体的には、暗号化状態での論理演算を実現可能なトーラス型完全準同型暗号（TFHE）と呼ばれる方式を用いて暗号化論理ゲートを実現し、暗号化論理ゲートの組み合わせによりプロセッサ回路を実現する。本技術を用いることで、プログラム、データ、およびプロセッサの動作、全てを秘匿したまま、計算を実行できる [1]。

TFHEによる暗号化論理ゲートの実装、暗号化論理関数の評価エンジン、準同型暗号を用いる汎用プロセッサ、コンパイラ等、概念実証のためのプロトタイプ Virtual Secure Platform を、GitHub にまとめて公開している [2]。暗号化論理ゲートは、プロセッサを作成する以外にも、任意の論理回路の評価に活用できる。興味を持たれた方は、是非試してみていただきたい。

[1] K. Matsuoka, R. Banno, N. Matsumoto, T. Sato, and S. Bian, "Virtual Secure Platform: A Five-Stage Pipeline Processor over TFHE," 30th USENIX Security Symposium, pp. 4007-4024, August 2021.

[2] <https://github.com/virtualsecureplatform/kvsp>



秘匿プロセッシングの概念実証のための秘匿プロセッサの構成 [1]。

全ての回路ブロックは暗号化論理ゲートで実現している。

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (中村祐司研究室)

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

「プラズマ閉じ込めにおけるヘリカルコア形成に関する研究」

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラスプラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。

今回は、トカマクプラズマにおいて、トーラスの芯の部分がらせん状にねじれた平衡状態になるヘリカルコアという現象に関する研究について紹介します。

世界7極の協力のもと建設が進められている国際熱核融合実験炉 (ITER) では、標準放電実験に加えて、より高いプラズマ閉じ込め性能を得るために先進トカマク配位であるハイブリッドシナリオ実験が予定されています。このハイブリッドシナリオで用いられるプラズマ閉じ込め磁場配位は、磁力線のねじれが強い領域がプラズマ断面全体に大きく広がることが特徴です。近年、ITERのハイブリッドシナリオを模擬したこのような磁場配位において、トーラスの芯の部分がらせん状にねじれた平衡状態が観測されており、ヘリカルコアと呼ばれています。

従来、このヘリカルコア平衡状態は、トカマクプラズマに流れる電流によって駆動される不安定性の成長が飽和して実現されると考えられていました。我々は、ヘリカルコアにはもう1種類あり、2種類あることを示しました [1]。そして、新しい種類のヘリカルコアが、トカマクプラズマの圧力勾配が駆動する不安定性によって形成

されることを明らかにしました。図は、トロイダル角 $\phi = 0, 0.44\pi, \pi$ におけるプラズマ断面上の等圧面を示します。トロイダル角が異なる断面でコア領域の変位方向が異なることは、らせん状にコア領域が変形していることを表します。上段は、コア領域が剛体的にらせん状に変形します。一方、下段は、上段の剛体的な変形と比較して中心に限られた領域が大きく変形しています。これは、上段のヘリカルコアはプラズマに流れる電流が駆動する不安定性によって形成されており、一方、下段のヘリカルコアは、プラズマの圧力勾配によって駆動された不安定性により形成されたことを示しています。そして、

下段のようなヘリカルコアは、プラズマを閉じ込める磁力線のねじれの動径方向変化が小さいほど起こりやすいことが、明かになりました。

[1] S. Kawagoe, A. Ishizawa, N. Aiba, Y. Nakamura, Plasma Physics and Controlled Fusion **64**, 105004 (2022).

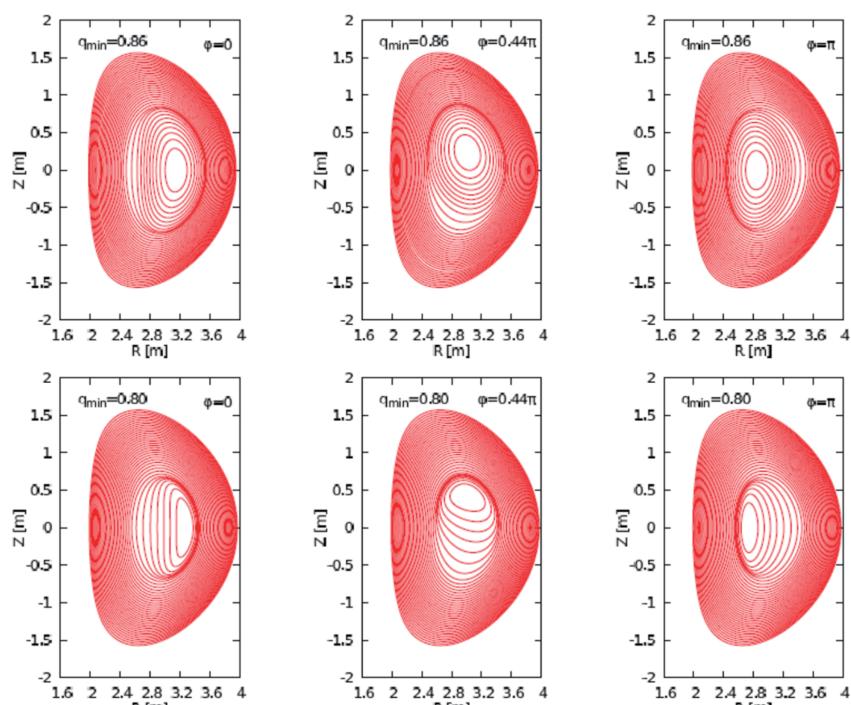


図 トカマクプラズマのトロイダル角 $\phi = 0, 0.44\pi, \pi$ における等圧面形状 (橢円度 $\kappa = 1.6$ 、三角度 $\delta = 0.344$ 、プラズマベータ $\beta = 3\%$)。上段：電流駆動型不安定性によるヘリカルコア平衡状態。下段：圧力駆動型不安定性によるヘリカルコア平衡状態。

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)
http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index_j.html
「共鳴のない電磁波を入射して電子を加速しプラズマを着火する」

私たちの研究室では、プラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いて磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究をしています。具体的には、プラズマを高温・高密度で閉じ込め、その輸送を調べることで、最適な磁場配位を探す研究を行っています。磁場閉じ込めにおけるプラズマ生成として電磁波を利用する方法があり、電子のサイクロotron周波数に相当する周波数の電磁波を入射するサイクロトロン共鳴が用いられます。この手法は、電磁波によって電子が磁力線に垂直方向に加速されることで効率良くプラズマを生成することができるため、広く用いられてきました。一方で、サイクロトロン周波数は磁場強度に比例するため、発振源の周波数が制限されると、共鳴条件を満たすために磁場強度が制限されてしまいます。もし仮に、共鳴条件に関係なくプラズマ実験ができるとどうでしょうか？広いパラメータ範囲で輸送を調べることができ、新しい知見が生まれることが期待されます。今回は、共鳴がない条件の電磁波を入射し、プラズマ着火に成功した成果について述べます。

ヘリオトロンJで非共鳴のマイクロ波(2.45GHz)を強磁場(~1T)中に入射する実験を行ったところ、以下の現象が観測されました^[1]。(1) $10^{16}\sim10^{18}\text{m}^{-3}$ 台の電子密度を持つ初期プラズマが生成される、(2) このプラズマでは炭素イオンの輝線は発光するが、酸素イオンの輝線は観測されず、酸素イオンの電離電圧(80eV)を超える電子はほとんどいない、(3) シンクロトロン放射計測から、わずかながら高速電子が存在し、そのエネルギーは2~3MeVと非常に高いと推定される(図1参照)。一方で、非共鳴の電磁波は吸収率が悪く、この実験の初期には計測用コイルを焼損するというトラブルにも見舞われ、漏洩電磁波の対策が必要になりました。ですが、このプラズマ生成法を利用して引き続き高パワーの中性粒子ビーム加熱を行うことで、磁場強度を広範囲にスキャンする高温・高密度プラズマ実験が可能になりました。

まだ非共鳴プラズマ着火の物理機構は十分に解明できていませんが、例えば、閉じ込め周辺部領域の電子が非共鳴電磁波の電界によって磁力線平行方向に加速され、ドリフトの効果でプラズマ中心まで到達し、衝突によってプラズマを生成するというモデルが考えられます(図2参照)。また、高速電子は非共鳴電磁波の電界との確率的な相互作用で生成されると考えられ、これは、超新星爆発や地磁気圈における荷電粒子の加速機構として考えられている統計加速と良く似ています。宇宙プラズマの実験室模擬という観点からも、統計加速の基礎過程を解明できるポテンシャルを持った、非常に興味深い現象です。

[1] S. Kobayashi, K. Nagasaki et al., Plasma Phys. Control. Fusion **62** (2020) 065009.

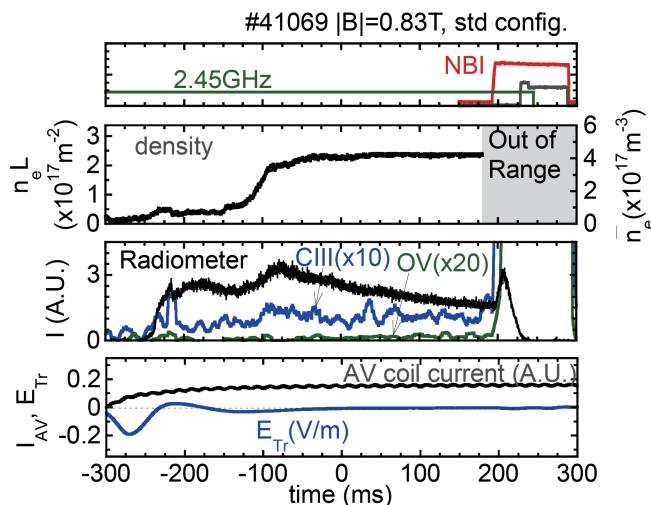


図1. 非共鳴マイクロ波を入射したプラズマ着火実験

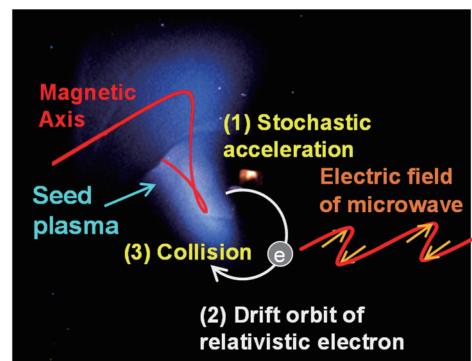


図2. 高速電子の加速とそれを介したプラズマ生成モデルの模式図

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

「観測ロケット-地上間の電離圏全電子数観測用送信機・アンテナの開発と観測結果」

観測ロケットから地上までの電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) の観測について報告する。電波はプラズマ中において真空中に比して電波の位相速度は速くなり群速度は低下する。変化の程度が周波数の二乗に反比例するため、複数の周波数を用いることで、相対的な位相変化から TEC が測定できる。今回、我々は JAXA 宇宙科学研究所の観測ロケット S-520-32 号機を用いて 150MHz と 400MHz の 2 周波ビーコン (Dual-Band Beacon; DBB) 観測を実施した。

今回の観測ロケットに搭載される送信機とアンテナを新規開発した。送信機は両方の周波数でそれぞれ 1W 出力であり、発振器として最大で 4 つの位相の揃ったタイミング信号が発生できる PLL LSI である Si5338 を用いた。アンテナは、1 台から 2 つの周波数が放射できる逆 L 型アンテナを設計した (図 1 の右図)。図 1 の左図に示すようにロケット周囲に 4 台のアンテナを均等配置することで、円偏波の DBB 波を地上に放射する。搭載機器は打上げ時の衝撃や振動に耐えるため厳しい環境条件が課せられる。特にロケット外壁に取り付けられるアンテナは、上昇時の空気摩擦によってアンテナ本体が摂氏 200 度、先端では摂氏 300 度という高温環境にさらされる。JAXA からの協力を得て素材や構造を検討しつつ、研究室内で大学院生の参加を得て設計・開発・試験を進めた。

観測ロケットは 2022 年 8 月 11 日 23 時 20 分 (日本標準時) に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から東南方向に打上げられた。図 2 にロケットの飛翔中に地上 (内之浦) で受信された電波の時間変化を示す。全飛翔時間にわたって安定な送受信が行われた。図 3 に本観測で得られた TEC 値を示す。高度約 90km 以上の区間において TEC が上昇下降する様子が求められた。観測ロケットの高度が最高でも E 層と F 層の中間までだったため、観測ロケットから地上までの間で観測されたのは、ほぼ高度 100km 付近にあるスピラディック E 層からの寄与分のみで最大 0.1 TECu 程度と非常に小さい値であったが、他の観測装置と整合的な結果が得られた。

以上、観測ロケット搭載機器を大学内で設計開発し、DBB 観測を成功させることができた。

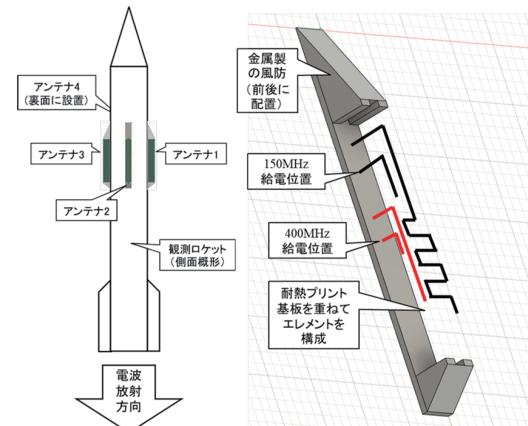


図 1 観測ロケット外壁のアンテナ設置状況 (右図)、アンテナの内部構造 (左図)。

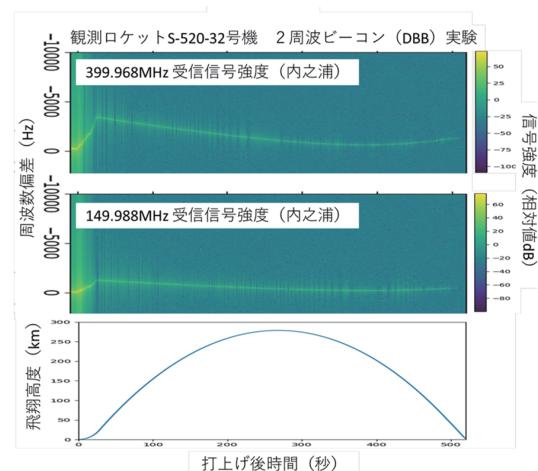


図 2 2022 年 8 月 11 日 23:20JST に打上げられた観測ロケットから地上までの電波伝搬状況。受信信号スペクトル (上図・中図)、ロケット高度 (下図)

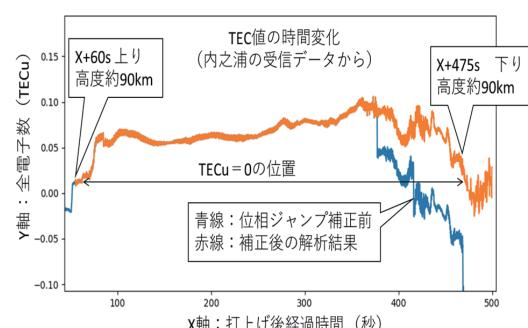


図 3 観測から得られた全電子数 (TEC)

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏電磁環境探査分野 (小嶋研究室)
<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/kojima-lab/index.php>
地球上層電離大気の宇宙流出を捉えるロケット実験

地球大気の上層部は、太陽からの紫外線等により電離してプラズマの状態になっています。この電離大気が、北極、南極上空から宇宙空間に大量に流出し続けていることがわかっています。

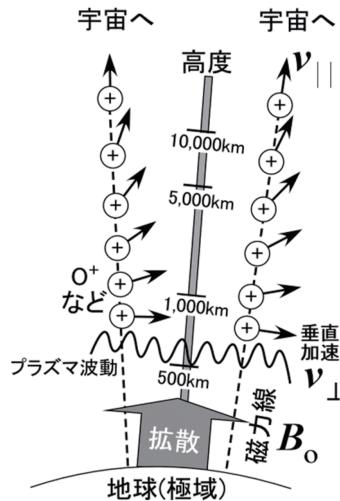


図1：電離大気が極域から流出するモデル。

流出量は一日あたり、数10トンから数100トンと見積もられており、この量は、数日で電離大気全体が入れ替わってしまう程の量といわれています。この電離大気流出は、地球に大气が生成された太古の昔より継続して発生している可能性があり、地球の大気進化に対し、重要なファクターとなっていると考えられます。流出する主な電離大気は、プロトン、酸素イオンになります。実は、この流出機構がよくわかっていないのです。プロトン、酸素イオンといえど、地球の重力から脱出するには、第二宇宙速度（約11.2km/s）を超える必要があります。そのためには、これらの粒子にエネルギーをあたえるエネルギー源が必要です。そのエネルギー源の第一候補とされているのが、プラズマ波動になります。プラズマ波動とは、プラズマ中に存在する電波のことです。通常、私達が通信などに利用している電波とは異なった様相を示します。特に重要なのは、プラズマを構成するイオンや電子と、直接、プラズマ波動はエネルギーのやりとりができる、ということです。プラズマ波動は、イオンや電子からエネルギーをもらって強度を増したり、逆に、エネルギーをわたしてイオンや電子を加速したりできます。

図1が、現在考えられているプラズマ波動による電離大気宇宙流出のモデルです。地球電離大気は、「じわじわ」と高度数100km程度まで拡散していきますが、そのままでは、宇宙空間の流出には至りません。それが、高度500km以上の空間でプラズマ波動により、地球磁場と垂直方向に加速され、そのエネルギーが高度の上昇とともに、磁場と平行方向に変換されて宇宙空間流出につながる、というものです。

このプラズマ波動によるイオンの加速現場を直接捉える目的で計画されたのが、JAXA SS-520-3号機ロケットで、私達の研究室が中心となって全国の共同研究者と開発したプラズマ波動観測器を搭載しました。このプラズマ波動観測器は、これまで開発に取り組んでいたアナログASIC化小型プラズマ波動観測器で、従来A5サイズの基板で実現していた回路を、5mm x 5mmサイズにチップ化しました。開発から10年以上を要しましたが、今回、初めて宇宙空間での利用が実現しました。ロケットは当初2017年の打上予定でしたが、延期が重なり、2021年11月4日ノルウェー・スバルバードロケット実験場から打ち上げられました（図2）。ロケットは高度約700kmに到達しプラズマ波動とイオン、磁場などの観測が行われデータを無事に取得することができました。当研究室では、小型プラズマ波動観測器で得られた電界の波形データを中心に、同時に得られたイオン観測データを相互参照しつつ解析を行っています。



図2：ノルウェー・スバルバードから打ち上げられたSS-520-3ロケット（©Gregory Tran-PIXOPHIL）
(<https://www.andoyaspace.no/articles/sounding-rocket-ss-520-3-launched-from-svalbard>)。

生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/shinohara-lab/index.php>

「電磁界結合を利用した新たなマイクロ波加熱方式の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、マイクロ波エネルギー応用の一環としてマイクロ波加熱に関する研究開発を行っている。これまで、木質バイオマス前処理用マイクロ波照射装置の研究開発（cue 27号、2012）や、マイクロ波を用いた震災瓦礫処理システムの開発と実証実験（cue33号、2015）を紹介した。今回は、電磁界結合を利用した新たなマイクロ波加熱方式の研究について紹介する。

本研究の着想は、21世紀以降に登場した電磁界結合型無線電力伝送に起因する。電磁界結合型無線電力伝送とは、同じ共振周波数を有する2つの共振器を近接配置することで電磁界結合させ、一方の共振器から他方の共振器に電磁界エネルギーを伝送する手法であり、電磁誘導型よりも送受電間距離を伸長できるとともに外部への電磁波漏洩の少ない無線電力伝送方式として期待されている。電磁界結合型無線電力伝送は主に10 MHzオーダ以下周波数帯での研究開発が活発に進んでいるが、本研究ではこの電磁界結合をGHz帯でのマイクロ波加熱に応用する。

電磁界結合型マイクロ波加熱の概要図を図1左に示す。誘電体基板上に周波数2.45 GHzで共振する共振器（本研究では方形の銅箔により作成した半波長共振器）を設置し、同一周波数で共振する2つの共振器を図1のように対向させて設置する。一方の共振器には入力端からマイクロ波を入力し、他方の共振器は出力端においてインピーダンス調整を行う。入力端から共振周波数に等しい周波数をもつマイクロ波を入力すると、共振器間ににおいて電磁界が結合し、出力端にマイクロ波が伝送されるとともに誘電体基板間から外部へはほとんどマイクロ波が漏れない状況となる。この状況下において被加熱物を共振器間に設置することで、金属筐体で囲わない開放系において低漏洩なマイクロ波加熱の実現が期待される。既存のマイクロ波加熱装置は、電磁波漏洩防止の観点から加熱エリアは金属筐体で囲われているものがほとんどであるが、図1のようなマイクロ波加熱方式が実現できれば、被加熱物の出し入れが容易となるだけでなく、多数のサンプルを連続的に搬送・循環させるようなマイクロ波加熱等も実現できる。

現在まで、図1右の写真に示すマイクロ波加熱装置を試作した。試験管に純水4.3mlを入れた試料に対して、周波数2.45GHz、出力10W（標準的な電子レンジの1/50～1/150の出力）のマイクロ波を照射したところ、300秒で室温から80°Cまで純水を加熱できることを確認した。また、誘電体基板上に共振器を複数設置することにより、2つの試料を同時にマイクロ波加熱することにも成功した[1]。今後は、電磁界結合を利用したマイクロ波加熱方式を2次元および3次元に拡張し、さらに多数の試料を同時にマイクロ波加熱することを目指す。

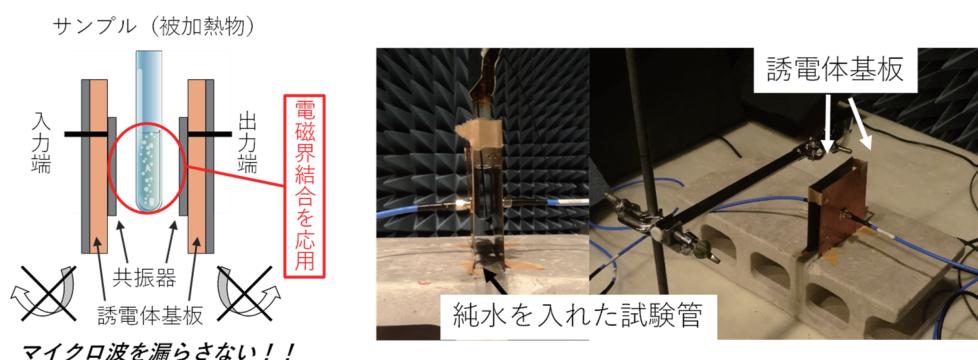


図1 電磁界結合型マイクロ波加熱の概要図（左）および原理検証実験写真（右）

[1] T. Mitani, D. Nishio and N. Shinohara, "Feasibility Study on a Microwave Heating Applicator Using Electromagnetic Coupling", Proc. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018), Nov.6-9, 2018.

博士論文概要

[課程博士一覧]

片 山 慎 治	「A Feasible Design of Power Packet Dispatching System」 (電力パケット伝送システムの実現可能な設計)	令和4年3月22日授与
Luo Xijie	「Conditions of Protection against Quench and Thermal Runaway of Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnets」 (伝導冷却高温超伝導マグネットのクエンチおよび熱暴走に対する保護可能な条件についての研究)	令和4年3月23日授与
松 島 真 之	「Study on spin-charge conversion in Bi-based systems」 (Bi を基軸とする材料系におけるスピニ変換現象の研究)	令和4年3月24日授与
杉 浦 健 太	「Investigation of spectral properties of broadband photon-pairs generated by four-wave mixing in an on-chip ring resonator」 (リング共振器内で四光波混合により発生する広帯域光子対のスペクトルに関する研究)	令和4年3月23日授与
立 木 騒 大	「Short Channel Effects and Mobility Improvement in SiC MOSFETs」 (SiC MOSFET における短チャネル効果と移動度向上に関する研究)	令和4年3月23日授与
張 開 鋒	「プラズモン薄膜導波路プローブを用いた低バックグラウンド探針増強ラマン分光法に関する研究」	令和4年3月23日授与
森 田 遼 平	「フォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化に関する研究」	令和4年3月23日授与
Arseny Tolmachev	「Enhancing Morphological Analysis and Example Sentence Extraction for Japanese Language Learning」 (日本語学習のための形態素解析と例文抽出の高度化)	令和4年3月23日授与
清 丸 寛 一	「Studies on Fundamental Problems in Event-Level Language Analysis」 (イベントレベルの言語解析における基礎的課題に関する研究)	令和4年3月23日授与
中 村 道 春	「メモリ多項式モデルを用いた電力增幅器の非線形歪み補償に関する研究」	令和4年3月23日授与
鍋 谷 寿 久	「サイバーフィジカルシステム実現に向けた無線 LAN システムの高度化に関する研究」	令和4年9月26日授与
原 園 友 規	「A Study on Field Work Support in Nuclear Power Plants Utilizing 3D Reconstruction Model and Tagging」 (3次元再構成モデルとタギングを活用した原子力発電プラントの現場作業支援に関する研究)	令和4年5月23日授与
的 池 遼 太	「ヘリオトロン J 3次元磁場における周辺プラズマ輸送およびダイバータ熱負荷に関する研究」	令和4年3月23日授与

- 高林伸幸 「Power Beaming and Receiving Systems for
Microwave Power Transmission to Fly Drone」
(ドローン飛行のためのマイクロ波電力伝送のパワー
ビーミング及び受電システムに関する研究) 令和4年7月25日授与
- 田中勇氣 「IoT デバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送シス
テムの開発」 令和4年9月26日授与

片 山 慎 治 (引原隆士 教授)
「A Feasible Design of Power Packet Dispatching System」
(電力パケット伝送システムの実現可能な設計)
令和4年3月22日授与

再生可能エネルギーの導入拡大をうけ、直流配電システムの利用が拡大している。本論文は、電力パケット伝送システムという、直流配電システムにおけるエネルギー・マネジメント手法の一つについて、実験的事実に基づいて、実現可能なシステム設計の提案を行うものである。

電力パケットは、伝送する直流電力に対して、その電源や宛先の負荷といった情報を付与した伝送単位である。電力と情報を同時に伝送できる点は、エネルギー・マネジメントにおいて、制御に同期した実際の系の運用を実現する上でメリットが大きい。

先行研究では、ハードウェアの開発やネットワークの解析などが行われてきたが、設計は実験系に基づいて議論されてこなかった。本研究はこの点に着目し、ハードウェアからネットワークといった各レイヤーについてシステムの達成しうる性能を検討し、得られた結果をもとに設計を検討した。検討内容は主に以下の4点である。

1. ハードウェアによる性能制約に関する検討

電力パケットの伝送を行うルータと呼ばれる機器について、伝送に与える制約を検討し、その制約を緩和できる構造を提案、動作を実証した。本検討により、機器そのものがシステムに与える性能制約を明らかにし、その決定要因を指摘した。

2. 機器間伝送に必要な情報量の検討

ルータ間における電力パケットの伝送に着目し、ショートを回避して伝送するために必要な情報量を算出した。検討に際しては、実際にショートが懸念される設定において情報通信で用いられるプロトコルを適用することで、ショートを回避しながら電力パケットを伝送できることを実証した。

3. 電源—負荷感伝送の特性

電源負荷間において電力を伝送する場合、電力パケット伝送システムでは、ルータ同士の接続関係と電力の伝送時間が出力に影響を与える。実験とシミュレーションによってその特性を明らかにし、設計に応用可能な接続と時間幅の条件を明らかにした。

4. 1. から3. に基づくシステム設計の提案

1. から3. の内容より、電源や負荷の特性と求める性能、システムにおける機器の配置から、シミュレーションによってシステムが設計できることを示した。

以上より、本検討によって、システムの一定性能での動作を保証する設計法を示した。この結果により、先行研究において取られてきたハードウェアとネットワークそれぞれに基づくアプローチの統合を図り、システムの実用化を果たすことが期待される。

Luo Xijie (雨宮尚之 教授)

「Conditions of Protection against Quench and Thermal Runaway of Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnets」

(伝導冷却高温超伝導マグネットのクエンチおよび熱暴走に対する保護可能な条件についての研究)

令和4年3月23日授与

The REBCO coated conductor is expected to be the suitable conductor for high-temperature superconducting magnets because its critical current density is considerably higher than those of common LTSs (e.g., Nb-Ti and Nb₃Sn) at the same operating temperature and external magnetic field. However, quench/thermal runaway detection and protection can be more difficult in superconducting magnets wound with REBCO coated conductors than those wound with LTSs because of the slow NZPV. Some novel quench/thermal runaway detection methods (such as Rayleigh-backscattering interrogated optical fibers) or protection methods (such as non-insulation winding coils) are proposed. However, these methods are complex or only applicable to certain types of superconducting magnets wound with REBCO coated conductors. The conventional quench/thermal runaway detection and protection method, *i.e.*, detecting quench using VTs and dumping the stored energy in an external dump resistor, is an attractive option because it is simple, and its hardware is well-established. However, the applicability of the conventional quench/thermal runaway detection and protection method to the superconducting magnet wound with REBCO coated conductor was not clarified well. To apply the conventional quench/thermal runaway detection and protection method to a superconducting magnet wound with REBCO coated conductor, the protectable conditions (*i.e.*, conditions under which no degradation appears after quench/thermal runaway), which are necessary to design the quench/thermal runaway detection and protection system in a superconducting magnet, are studied.

In this study, short-sample experiments were conducted to study the quench/thermal runaway detection and protection instead of burning expensive superconducting coil. To simulate the quench/thermal runaway detection and protection processes in superconducting magnets, an FPGA module was used to monitor the voltage in short samples and control the power supply. In this case, quench is detected by voltage, and protection is provided by decreasing the operating current exponentially (simulating the current decay using an external resistor). The hot-spot temperature during the protection process, which directly affects protection, is calculated based on voltage and the temperature–resistivity relationship of copper and current-sharing model. The fast-turnaround short-sample experiments enabled the collation of data on hot-spot temperatures under various conditions in addition to the conditions for successful/failed quench detection and protection.

The results of this study indicate that the conventional quench/thermal runaway detection and protection method is applicable to a superconducting magnet wound with REBCO coated conductors. The conditions for providing successful protection could be estimated using short samples in experiments instead of burning expensive coils. These experiments provide guides to solve the problem of designing the protection system of a superconducting magnet wound with REBCO coated conductors. Although this study focused on the conditions for providing protection against quench/thermal runaway using the conventional detection and protection method, other detection and protection methods can be evaluated using a similar setup. Moreover, short-sample experiments can be conducted not only to study the protection of magnets wound with REBCO coated conductors but also to investigate the characteristics of various conduction-cooled superconductors.

松 島 真 之 (白石誠司 教授)
「Study on spin-charge conversion in Bi-based systems」
(Bi を基軸とする材料系におけるスピン変換現象の研究)
令和 4 年 3 月 24 日授与

スピントロニクス分野では、情報担体としての電子のスピン角運動量が非保存量であることから、スピン角運動量と保存量である物理量との間の変換（スピン変換）の実現とその背景学理の理解が主要な研究対象である。スピン角運動量の流れをスピン流と呼ぶが、スピン流と電流との相互変換は、固体中のスピン軌道相互作用（SOI）が重要な役割を果たす。SOI の大きさは変換効率を決定する主要な因子の 1 つであり、その大きさは大凡原子番号の 4 乗に比例することから、重元素が主な研究対象となる。中でもビスマス（Bi）は、非放射性元素の中で最も元素番号が大きく、スピン変換の文脈の中で重要な材料と位置づけられている。実際に、Bi を不純物や Bi を用いたヘテロ構造界面において SOI の増大が報告されており、大きなスピン変換も観測されている。一方で、Bi 単体については 10 年前から研究されているが、未だその大きな SOI を反映した巨大なスピン変換現象は観測されておらず、スピン物性物理における未解決問題の一つとなっている。本研究では、Bi を基軸とした材料系におけるスピン変換物性物理について研究した。得られた成果を以下に示す。

1. Bi は、Ag と接合することで界面での対称性の破れに起因する有効磁場（Rashba 場）による大きなスピン変換を示すことが報告されている。本研究では、Bi/Ag のスタック順序の置換（Rashba 場の極性反転）によるスピン変換の変化、ならびに各層でのスピン緩和・スピン変換を考慮した新たな理論モデル構築による系統的な実験とその解析により、Bi/Ag 界面におけるスpin変換物性をより詳細に研究した。その結果、従来方向してきた Bi/Ag 界面でのスpin変換は変換効率が過大評価されている可能性を指摘し、より厳密な評価モデルで得られた変換効率を得た。
2. Bi は、その大きな SOI から巨大なスpin変換が期待されているが、実験的には非常に小さな変換効率（高々 0.01 程度）が報告されている。また、その膜厚により変換の極性が変化するなどといった報告もある。本研究では、近年発展したスpin変換評価手法であるスピントルク強磁性共鳴（ST-FMR）法と呼ばれる手法を用いて Bi におけるスpin変換を評価した。その結果、スpin変換効率が Bi 膜厚に対し 0.03-0.06 の範囲で変化するという結果を得た。これは従来研究の中で最も大きな値の 1 つであり、膜厚に依存した極性変化も観測されなかった。
3. 従来の Bi スpin変換研究では、Bi の融点が低いことなどの理由から、基板上に良質な Bi 単結晶成長が困難であり、スpin変換物性の理解を阻んでいる 1 つの理由となっていた。本研究では、MgO (001) 基板上に Fe (001) 単結晶を成長する技術を基盤とし、その Fe 上に基板冷却の下成長した高配向 Bi (110) 結晶を用いてスpin変換を評価した。測定手法では、上記と同様に ST-FMR 法を採用した。その結果、最大で 0.36 もの巨大なスpin変換効率を実現した。この値は他の単一元素材料でのスpin変換効率と比較しても最大級であり、Bi の結晶性や方位がスpin変換において大きな役割を示すことを示唆する結果を得た。

以上のように、本研究は、Bi を基軸とした材料系として、Bi/Ag の 2 層膜や高配向 Bi (110) 結晶を用いたスpin変換現象について研究し、Bi におけるスpin変換物性を理解する指針を得た。特に、Bi についてはその結晶性が大きな役割を果たすことを示唆する結果を得た。

杉 浦 健 太 (竹内繁樹 教授)

「Investigation of spectral properties of broadband photon-pairs generated by four-wave mixing in an on-chip ring resonator」

(リング共振器内で四光波混合により発生する広帯域光子対のスペクトルに関する研究)

令和4年3月23日授与

古典論では説明できない相関を持つ量子もつれは量子情報技術の根幹をなす。中でも、周波数でもつれている光子対は、周波数の自由度を用いた量子計算や量子計測の光源として着目されている。そのような周波数もつれ光子対をより広帯域で生成することができれば、大規模な量子計算や高分解能な量子計測が可能になる。これまで、広帯域な光子対の生成に j は擬似位相整合素子などのバルク素子用いられてきた。しかし、そのような素子は集積化が困難であり、系の大規模化や技術の実用化などにおいて問題となる。

そこで、既存の CMOS 互換技術で作製されるオンチップ光子源に着目した。光導波路の材料として、二光子吸収の影響がなく透過帯域が広い高屈折率コントラストドープガラスと窒化シリコンを用いた。また、光子対生成に重要な非線形性を増強するために、導波路構造としてリング共振器を採用した。これらの材料のリング共振器を用いて以下の成果が得られた。

1. 高屈折率コントラストドープガラスは、二光子吸収がないとされていたが、パルス光励起での検証はされていたものの、連続光励起における検証はされていなかった。連続光励起は量子計測技術で一般に使用されるため、連続光励起時の光子対生成における二光子吸収の影響の確認は重要である。そこで、100 mWまでの連続光を用い、発生光子数の入力光強度依存性を測定した。その結果、発生光子数が二次的に増加し飽和が見られないことを確認した。これより、100 mWまでの連続光で二光子吸収の影響は無視できるほど小さいことが分かった。
2. これまでリング共振器を用いた光子対生成の研究は報告してきたが、どの程度の帯域で発生するのかについては実験的に検証されていなかった。そこで、高屈折率コントラストドープガラスリング共振器と窒化シリコンリング共振器から発生する光子対の joint spectral intensity を測定することにより発生帯域を測定した。加えて、デバイスの分散等のパラメータから理論的に発生帯域を計算し、実験結果の妥当性を確認した。窒化シリコンリング共振器の測定では、51.25 nm の帯域で光子対の発生を確認した。この結果は、現在リング共振器を用いた光子対生成において世界最大の値である。
3. 近年、リング共振器を用いた光子対生成の理論的な研究がいくつか報告されている。中でも、[Phys. Rev. A. 91, 033820 (2016)] では、発生する光子のスペクトルと、入力レーザ周波数やリング共振器の線幅や分散、非線形性などのパラメータとの関係が報告された。この論文によると、上記パラメータによって光子のスペクトルは周波数モードごとに形状が変化し、条件によっては 10 GHz 程度の分裂したピークをもつ。これは、周波数領域での量子干渉において問題が生じる可能性があることを示唆している。そこで、高 Q 値なリング共振器の温度を精密にコントロールすることによって可変な 1 GHz 程度の狭帯域フィルタを実現することで、発生する光子のスペクトルを測定した。その結果、理論論文通りのスペクトルの変化を確認した。加えて、理論論文の中では議論されていなかった、光子対の joint spectral intensity と実験パラメータの関係に関しても理論と実験の両面から検証を行った。
4. 一般的に、光子対の発生帯域の測定には、光子対の joint spectral intensity 測定が用いられる。しかしこの方法では、光子対の帯域が広くなるほど測定時間は長くなることに加え、帯域に応じて狭帯域かつ広帯域で動作可能な周波数フィルタが必要となる。そこで、新たな測定方法として、マイケルソン干渉計を用いた方法を考案した。2つの異なる周波数の干渉信号の積の内、2つの周波数の差で変化する成分に着目した。周波数相関を持つ光子の干渉信号の周期は、周波数相関を持たない光子の干渉信号周期の半分になる。この方法を実験的に検証した結果周波数相関に起因する信号を測定することに成功した。

立木馨大（木本恒暢 教授）

「Short Channel Effects and Mobility Improvement in SiC MOSFETs」

（SiC MOSFETにおける短チャネル効果と移動度向上に関する研究）

令和4年3月23日授与

電力の高効率利用には、電力変換を担う半導体トランジスタの高性能化（通電損失の低減）が重要である。現在パワー用トランジスタの材料としてシリコン（Si）が広く用いられているが、その性能はSiの物性値から決まる理論限界に達しつつある。そこで、Siトランジスタの限界を打破し、飛躍的な低損失化を実現するトランジスタ材料として炭化ケイ素（SiC）に注目が集まっている。SiC金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ（MOS型トランジスタ）は同耐圧のSiトランジスタに対し、理論上、通電損失を約1/500に低減できる。したがって、SiトランジスタをSiCに置換することができれば、電力の大幅な削減が実現される。

SiC MOS型トランジスタは、市販も始まっているものの、現状、通電損失はSiの場合の約1/10程度であり、SiCの物性から期待される性能からは程遠い。その高い通電損失の起源は、SiC/酸化膜（ SiO_2 ）界面に存在する高密度界面欠陥に由来した高いチャネル抵抗である。したがってSiC MOS型トランジスタのさらなる性能向上を図るには、チャネル抵抗の低減が必須である。チャネル抵抗低減の有効なアプローチとして、チャネル長の短縮や高密度界面欠陥の低減によるチャネル移動度の向上が存在する。この目的を達成するため本研究では、1. デバイス特性を劣化させないチャネル長の下限（臨界チャネル長）決定 2. 高密度界面欠陥低減によるチャネル移動度向上の二つの研究課題に取り組んだ。

臨界チャネル長決定の研究では、まず、短チャネル化したときのSiC MOS型トランジスタに特有のしきい値電圧（トランジスタをオンオフする電圧）の変化の解明を行った。SiC/ SiO_2 界面に特有な高密度界面準位のエネルギー分布と、そこからの電子放出を考慮し、しきい値電圧の低下を精度よく予測するモデルを確立した。また、ドレイン電流の飽和特性に着目し、界面準位の影響を受けにくい臨界チャネル長の決定手法を提案した。本手法を用いて決定した臨界チャネル長は、界面準位の影響で、SiCの物性値から予測される臨界チャネル長からわずかに長くなるという結果が得られた。

界面欠陥低減手法の研究では、酸化膜形成後の高温(>1400°C)窒化処理や酸化膜形成前の水素処理が、界面欠陥の低減に効果的であることを示した。特に、 SiO_2 堆積前のH₂エッチングが高密度界面準位の低減に効果的であることを示し、同時にSiCの熱酸化が、界面欠陥を増加させることを示した。さらに、H₂エッチングを用いて作製したSiC MOS型トランジスタは、従来業界で用いられている界面欠陥低減手法と比較して、チャネル移動度が最大100倍向上されることを示した。

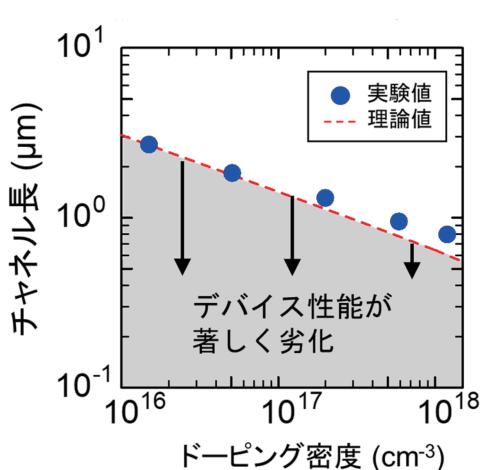


図1 実験および計算から求めた臨界チャネル長のドーピング密度依存性。

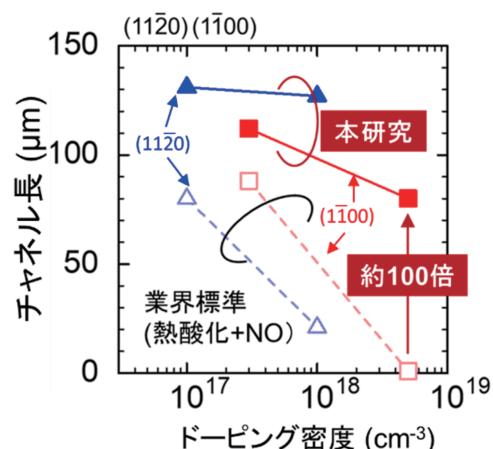


図2 作製したSiC (11-20) および (1-100) MOSFETのチャネル移動度のアクセプタ密度依存性。

張 開 鋒 (山田啓文 教授)

「プラズモン薄膜導波路プローブを用いた低バックグラウンド探針増強ラマン分光法に関する研究」

令和4年3月23日授与

探針増強ラマン分光法 (Tip-enhanced Raman Spectroscopy: TERS) は、材料の化学情報をナノメートルの空間分解能で抽出できる走査型プローブ顕微鏡をベースとした光学的なアプローチであり、有機分子の相互作用や幾何配置の解明、機能性材料の物理・化学特性の分析、生体システムの研究などに広く利用されている。しかし、これまで多く採用されている直射照射型 TERSにおいては、励起光に照射された部分から強い蛍光や目標測定位置周辺からラマン信号 (Far-field 信号) がバックグラウンドとして励起されることがある。これらの信号は目標測定位置のラマン信号 (近接場信号)、つまり TERS 信号を圧倒し、TERS スペクトルの信号コントラスト (近接場信号 / Far-field 信号) を劇的に低下させる可能性がある。そのため、これまで蛍光体の表面や、基板上に置くことができないバルク試料を TERS で測定することは極めて困難であった。

本研究では、上記の課題を解決するために、間接照射型 TERS 用のプローブを開発した。表面プラズモン共鳴ができる薄膜導波路を利用し、入射レーザ光を平坦な入射面に入射させることで、高効率に表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polaritons: SPPs) が導波路上で安定的に励起され、探針 (プローブ) の先端に伝搬する。よって、励起光のエネルギーは SPPs を介して、プローブ先端に伝搬・蓄積することで、プローブ先端で局所電解集中が発生し、励起光の入射箇所と空間的に離れた強い近接場スポットが形成される。この近接場スポットを照射エネルギー源として試料に照射すると、低バックグラウンドの安定的な TERS 測定が可能となる (図 1)。このプローブを用いて、ダイヤモンドプレートからの近距離場と遠距離場の信号のコントラストが明らかな TERS スペクトルを取得することができた。また、シンプルな製造プロセス、安定したコーティング材料、独自の 2 次元 SPPs 励起法により、金基板上の有機单分子フィルムを用いた TERS の研究では、製作したプローブが優れた信号安定性と再現性を示し、10 nm 以下の空間分解能を実現し、探針先端集中電場の実効サイズと相関を確認できた (図 2)。

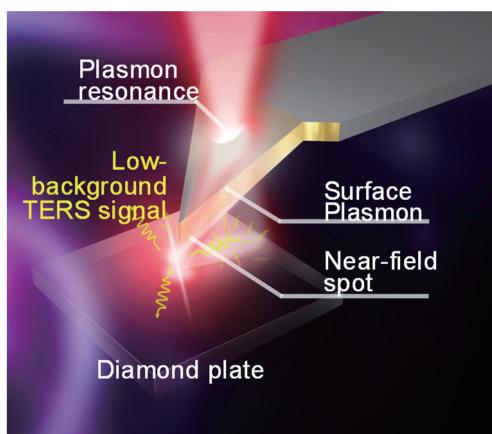


図 1 プラズモン薄膜導波路付プローブ

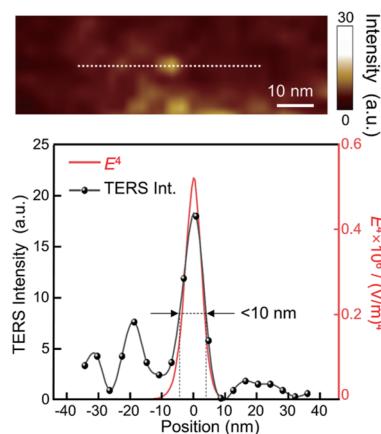


図 2 TERS マッピング結果と分解能評価

森 田 遼 平 (野田進 教授)

「フォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化に関する研究」

令和4年3月23日授与

パルス幅ピコ秒オーダーの短パルス・高ピーク出力なレーザーは、自動車の自動運転等で需要の高まる光距離計測や、金属材料などのレーザー微細加工、二光子吸収を用いたバイオイメージングなど、多岐にわたる技術への応用が期待されている。特に、小型・安価・高効率な特長を有する半導体レーザー素子単体で、上記応用を可能とするレーザー光源の実現が可能となれば、上記計測システムや加工システムなどの大幅な小型化・低コスト化が期待される。しかし、端面出射型などの従来型半導体レーザー素子単体における短パルス動作は、ピーク出力が10 W程度に留まっており、上記応用を可能とする100 Wを超えるピーク出力は未だに実現されていなかった。そこで、本論文では、高出力と高ビーム品質の両立が可能な特徴を有するフォトニック結晶レーザーにおいて、短パルス・高ピーク出力動作を可能とする新たなデバイス構造を提案し、実証を行った。

フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶のフォトニックバンド端における大面積共振効果を利用した面発光型の半導体レーザーである。本論文では、このフォトニック結晶レーザーにおける短パルス動作を実現するために、共振器損失を動的に変化させるQスイッチングの原理を利用したデバイス構造を提案した。本構造には以下の2つの特徴がある。

(i) 電流注入領域の一部に水素イオンを注入し、絶縁化およびキャリア寿命低減を行うことで、可飽和吸収領域を導入する。その際に、図1(a)に示すような円環型の形状とすることで、ビーム品質の劣化に繋がる高次モード発振を抑制しつつ、基本モードの吸収損失を増加させることが可能となる。この領域によって、レーザー発振開始直後に可飽和吸収効果によって吸収損失が減少する。

(ii) フォトニック結晶共振器の格子定数に、図1(b)に示すような放物面分布を導入する。これにより、バンド端周波数に大域的な分布が生じるため、モードギャップによってデバイス中央部に光が閉じ込められ、放射損失の高い状態(図1(c))となる。レーザー発振直後、光密度の高い中央部において誘導放出が過剰に生じることで空間的ホールバーニングが生じる。その際、図1(d)に示すように、キャリアアラズマ効果によって中央部の屈折率が大きく変化するため、バンド端周波数分布が平坦化し放射損失が減少する。

上記2つの効果により、レーザー発振直後に共振器損失の大きな変化が生じ、ピークの高い短パルス動作が期待される。この原理に基づいてデバイスを作製した結果、ビーム拡がり角0.15度程度の高いビーム品質を維持しつつ、図2に示すように、パルス幅30ピコ秒程度・ピーク出力200 W級の短パルス・高ピーク出力動作の実現に成功した。

以上のように、本論文で実現した高ビーム品質かつ短パルス・高ピーク出力動作を可能とする短パルスフォトニック結晶レーザーは、半導体レーザー素子単体ではこれまで実現が困難であった、高いビーム品質と高いピーク出力(先行研究の数十倍)の両立を実現し、半導体レーザーの応用分野を広げる大きな成果といえる。

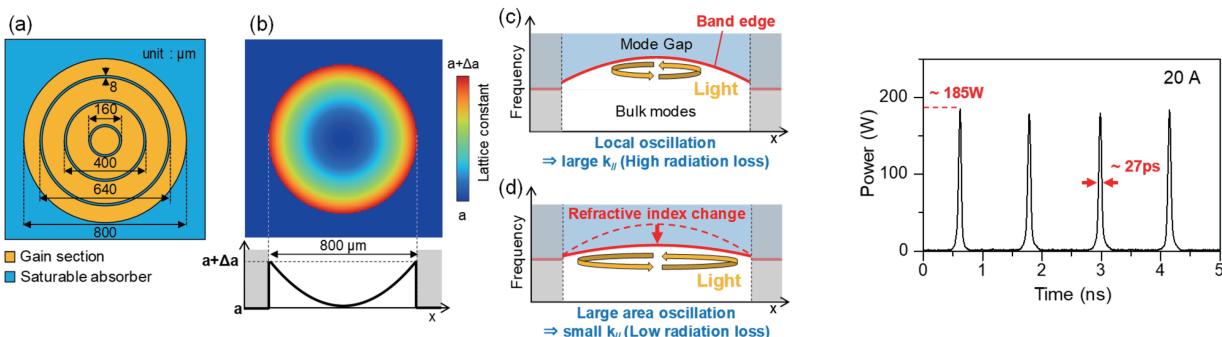


図1. (a) 可飽和吸収領域分布の模式図。(b) 格子定数分布。(c) バンド端周波数分布(発振直前)。(d) バンド端周波数分布(発振直後)。

図2. 時間波形の測定結果。電流20A注入時。

Arseny Tolmachev (黒橋禎夫 教授)

「Enhancing Morphological Analysis and Example Sentence Extraction for Japanese Language Learning」

(日本語学習のための形態素解析と例文抽出の高度化)

令和4年3月23日授与

グローバル化した現代社会において、言語学習の重要性はますます高まっている。また、言語学習の方法や教材も変化している。言語学習の教材作成などを自動化するための手段として、自然言語処理のツールや手法は有用である。本論文では日本語学習に着目し、日本語の単語分割と品詞タグ付けの基盤と、質の高い日本語例文の自動抽出手法を提案した。

日本語は分かち書きを行わないため、文を単語に分割することさえも自明ではない。単語分割は日本語の自然処理パイプラインにとって重要であり、品詞タグ付けと同時に行われることが多く、合わせて形態素解析と呼ばれる。解析の精度、特に文法の品詞タグ付けの精度は教育応用において極めて重要である。加えて、形態素解析は実用上、高速であることとコンパクトであることも必要である。

本論文では形態素解析器 Juman++ の改良を考案した。改良版は、従来の解析器と同程度の速度でありながら、新聞ドメインにおける分割 F1 スコア 99.5 以上という非常に高い解析精度を達成した。高速化は、現代のアウトオブオーダー CPU を効率的に利用する等のアルゴリズム上・実装上の工夫により実現した。また、部分的にアノテーションされたデータでの学習をサポートし、アノテーションのないコーパスから曖昧性のある文を選別するための能動学習ツールも提供した。

次に、辞書データを明示的にモデルに含まない形態素解析のニューラルモデルを提案した。提案モデルは、辞書を用いるのではなく、従来の解析器による大規模な解析結果を学習データとすることにより、その解析器が参照する辞書データを暗黙的に学習する。提案モデルは、従来の解析器と比較すると同等以上の精度を達成しながら、辞書データを明示的にモデルに含めないことでモデルサイズを 20 分の 1 に削減した。

最後に、日本語学習のための高品質な例文の自動抽出システム（図 1）を提案した。本システムは、目的語周辺の構文構造が多様な例文候補を大量に選択する分散検索エンジンと、互いに非類似かつ独立に「良い」例文を選択するフィルタリングのステップから構成される。日本語学習者と日本語教師を対象にブラインド実験を行ったところ、提案システムが 2 つのベースラインシステムよりも選好された。

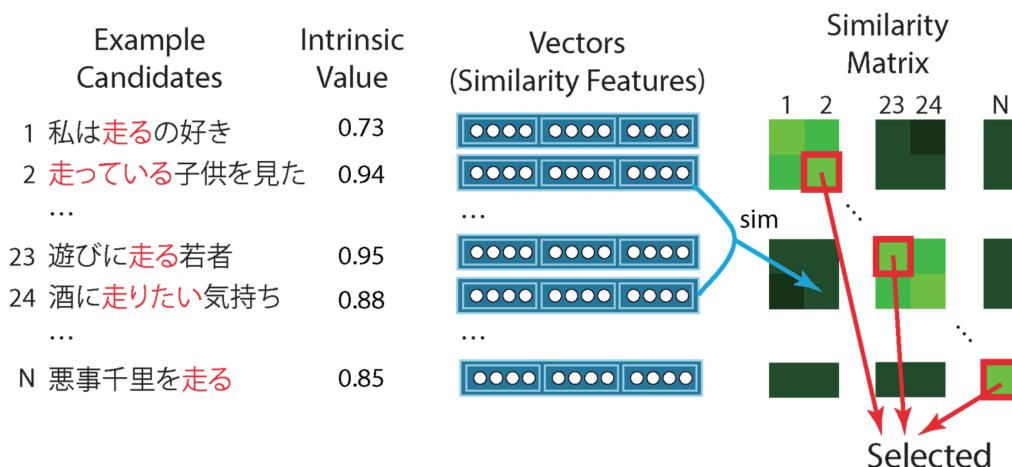


図 1 例文抽出の概要

清 丸 寛 一 (黒橋禎夫 教授)

「Studies on Fundamental Problems in Event-Level Language Analysis」

(イベントレベルの言語解析における基礎的課題に関する研究)

令和4年3月23日授与

テキスト情報を整理することはさまざまな価値を生み出す。商品・サービスのレビューを整理すれば、それは消費の判断基準となる。社会問題の因果関係に関する記述を整理すれば、それは解決の糸口となる知見や気付きに繋がる。アクセス可能なテキスト情報は日々増え続けており、テキスト情報を整理することはますます多くの場面で有用となっている。

テキスト情報を整理する上で重要な役割を果たすのが言語解析である。言語解析は、テキストを人が理解可能な意味単位——語や句、文など——の集まりとして捉え、それらの意味と関係を解析するものである。

本研究では、状態や行為を表す意味単位、イベントを処理単位とする言語解析に取り組んでいる。イベントはおよそ言語学でいうところの節に対応する。例えば「感染症が心配なのでマスクを購入した」という文は「感染症が心配だ」と「マスクを購入した」の2つのイベントからなる。イベントは実世界のできごとや人々の意見を整理するのに丁度良い意味単位であり、冒頭で述べた顧客フィードバックの分析や因果関係の整理といった応用はイベントレベルの言語解析によって実現できる。

イベントの意味を捉えるには、イベントを構成する語句の意味とそれらの関係を理解する必要がある。これは長らく難しい問題で、イベントレベルの言語解析は単純化されたイベント表現（例えば述語と目的語だけを取り出したタプル等）のもとで行われてきた。しかしここ数年でニューラルネットワークに基づく言語処理技術が進展し、イベントの意味がかなり柔軟に捉えられるようになったことで、イベントレベルの言語解析に本格的に取り組む下地が整った。

イベントレベルの言語解析はイベント分類、イベント間関係解析、イベント予測の3クラスに大別でき、本論文では、各クラスの基礎的課題である意志性分類、談話関係解析、後続イベント予測に取り組んでいる（図参照）。意志性分類はイベントが意志的な行為かどうかを認識するタスク、談話関係解析はイベント間の意味的関係（因果関係など）を認識するタスク、後続イベント予測はあるイベントの次に起こるイベントを予測するタスクである。

基礎的な言語解析は組み合わせによって真価を発揮する。例えば、意志性分類がそれ単体で実現できる魅力的な応用はあまりない。しかし、感情極性分類と談話関係解析を組み合わせれば、冒頭の例文において「マスクを購入した」のは「感染症が心配だ」というネガティブな状況を理由に取った意志的な行為だと分かり、これらの情報から両者が問題と解決策の関係にあると推測できる。このように基礎的な言語解析はその組み合わせによってテキスト情報を整理する軸を無数に生み出しができる。その意味で、本研究はイベントレベルの言語解析に基づくテキスト分析に広く資するものと考える。

イベント分類



イベント間関係認識



イベント予測



図1 イベント分類（イベント意志性分類）、イベント間関係認識（談話関係解析）、イベント予測（後続イベント予測）の例

中 村 道 春 (原田博司 教授)
「メモリ多項式モデルを用いた電力増幅器の非線形歪み補償に関する研究」
令和4年3月23日授与

ワイヤレス移動通信システムは、携帯電話やスマホからあらゆるモノへと適用範囲を広げ、生活・産業を支える基幹インフラとして今後も発展し続けていくことは間違いない。その際、消費するエネルギーを増大させないことが、地球環境保護の観点から重要な課題である。本研究では、ワイヤレス移動通信システムの中でも多くのエネルギーを消費する電力増幅器の高効率化に資する信号処理に関する検討を行った。

無線信号を通信に必要な電力レベルに増幅する電力増幅器は、比較的高効率で動作できる非線形領域を含めて動作させると、信号の品質が劣化し、かつ、周波数スペクトルの広がりが隣接する周波数を使用するシステムに妨害を与える。このため、プリディストータを用いた非線形歪み補償を行うことが通常である（図1）。プリディストータは、電力増幅器の入出力特性の逆特性を学習したビヘイビオラルモデルを用いた信号処理を行う。適用するビヘイビオラルモデルは、プリディストータ実行時の処理負荷軽減のため構成の簡単なものであり、かつ、学習に要する信号処理についても負荷の軽いものであることが望まれる。

本研究では、プリディストータに適用するビヘイビオラルモデルとして比較的簡単な構成でリーズナブルな非線形歪み補償特性が得られるメモリ多項式モデルを取り上げ、周波数ドメインで演算を行う学習方法について提案し、その有効性を検証した。

まず始めに、周波数ドメインで演算を行うメモリ多項式モデルの学習方法を確立した。確立した学習方法は、時間ドメインでの畳み込み演算が周波数ごとの演算にできること、および、信号の周波数スペクトルが存在する周波数のみで演算を行えば良いことから、学習に要する信号処理負荷が軽減され、かつ、数値安定性にも優れたものである。

次に、構成が複雑ではあるが非線形特性を詳細に表すビヘイビオラルモデルを、構成の簡単なメモリ多項式モデルに変換してプリディストータに適用するシナリオを想定した場合、確立した周波数ドメインの演算を展開することにより、プリディストータに適用するメモリ多項式モデルは、構成が複雑な元のビヘイビオラルモデルの入出力データを用意して学習する必要はなく、そのパラメータおよび送信する信号の統計的情報から決定論的に導くことができることを導出した。これにより、最も厳しい動作条件に対応するビヘイビオラルモデルを準備しておけば、電力増幅器の使用時の要求条件応じ、適切なメモリ多項式に適宜変換してプリディストータに適用することが可能になる。

一方、実測した電力増幅器の入出力データから逆特性を学習しプリディストータに適用するシナリオにおいては、非線形次数ごとに分離した学習の目標値が得られない。そのため、メモリ多項式モデルの非線形ベース関数を直交する多項式とすること、および、学習を低い非線形次数から順に行い、学習済みの低次の非線形成分を目標値から減算して高次の学習を行う段階的な学習とすることを実施した。これらにより、時間ドメインで最小二乗法を用いる従来の学習方法に比して約半分の信号処理量で電力増幅器の逆特性の学習が可能となる。また、学習したメモリ多項式モデルによるプリディストータにより十分な非線形歪み補償特性が得られることを確認した。

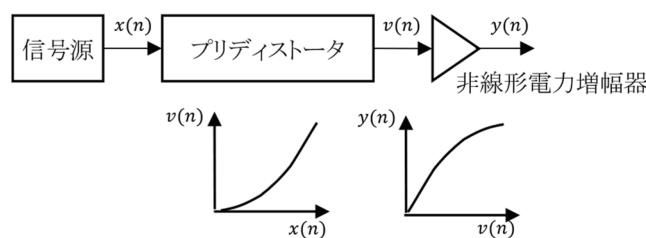


図1 プリディストータによる電力増幅器の非線形歪み補償

鍋 谷 寿 久 (原田博司 教授)

「サイバーフィジカルシステム実現に向けた無線 LAN システムの高度化に関する研究」

令和 4 年 9 月 26 日授与

近年、様々な社会課題の解決に向けて、コンピュータで構成されるサイバー空間とフィジカル空間と呼ばれる実世界を高度に融合させたサイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical Systems）に関心が高まっている。CPS 実現のためには、サイバー空間とフィジカル空間を繋ぐ通信が必要不可欠となるが、有線通信に比べて多くのメリットが見込める無線通信への期待が高く、中でも無線 LAN (Local Area Network) は高速・大容量通信が免許不要な自営網ネットワークとして低コストに導入可能な無線システムであることから特に期待を集めている。しかしながら、CPS を想定した場合、無線 LAN には解決すべき幾つかの課題があり、無線 LAN の更なる高度化を図ることが重要となる。

本論文では、このような問題に対し CPS に無線 LAN を適用した場合の主要課題として、多数端末収容に伴うスループット低下の改善、通信の高信頼化、更なるシステム容量の増大および低遅延化の 3つを挙げ、それら課題の意義を明確化した上で各課題に対して検討を行った。

多数端末収容に伴うスループット低下の改善に関しては、DL-MU-MIMO (Down-Link Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) 伝送向けサウンディング方式を提案した。従来の無線 LAN 規格である IEEE 802.11ac で規定されているサウンディング方式と比較し、提案方式は端末台数が増加するほど無線伝搬路情報の取得に要する所要時間の短縮効果が得られ、その結果サウンディングオーバーヘッド削減によりシステムスループットを改善できるため、課題に対して有効な方式であることを定量的に明らかにした。本手法は、IEEE 802.11ac の次世代規格として規格化された IEEE 802.11ax のサウンディング方式として正式採用されている。

高信頼化に関しては、各端末が複数の AP (Access Point) と同時に通信を行う新たなマルチ AP ダイバーシチ方式を提案し、計算機シミュレーションにより、本手法を用いない従来無線 LAN と比較して通信信頼性が向上できること、また従来のマルチ AP ダイバーシチ方式と比較して MAC (Medium Access Control) プロトコル効率の観点で高い優位性を有していることを明らかにした。加えて、試作機を開発し、提案方式の動作実現性を実証するとともに、実工場環境下における無線性能評価により提案方式の有効性を実験的にも明らかにした。また、高信頼化に向けては、通信自身の高信頼化手法の必要性も当然ながら、実運用を見据えると実際にターゲット環境での無線伝搬特性の把握も非常に重要なとなる。そこで、CPS 導入の期待が高い現場の 1 つである火力発電プラント内の無線伝搬路特性評価を実施し、発電プラント環境特有の無線伝搬特性を有することを明らかにした。

更なるシステム容量の増大および低遅延化に関しては、Full Duplex 技術に着目し、無線 LAN への Full Duplex 技術適用に向けた検討を行った。IEEE 802.11 無線 LAN 標準化における Full Duplex 適用に向けた方向性を明らかにした上で、想定される Full Duplex 適用による低遅延効果を明らかにすべく定量的な遅延性能評価を行い、無線 LAN Full Duplex の有効性を示すとともに実用化に向けて更なる検討課題を明らかにした。

以上に述べたように、本研究成果は無線 LAN を適用した CPS 実現に向けて必要となる無線 LAN の各課題解決に大きく寄与できるものと考えられる。無線 LAN の更なる高度化により、無線 LAN システムを適用した CPS を実現することが可能となり、これまで様々な理由で CPS 化ができなかった現場や用途での CPS の普及拡大を見込むことが期待できる。

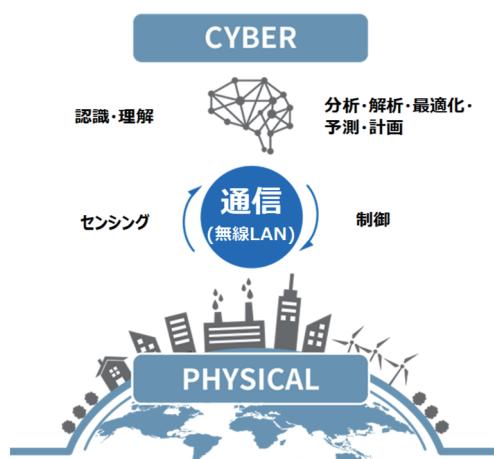


図 1：無線 LAN を適用した CPS

原 園 友 規 (下田宏 教授)

「A Study on Field Work Support in Nuclear Power Plants Utilizing 3D Reconstruction Model and Tagging」

(3次元再構成モデルとタギングを活用した原子力発電プラントの現場作業支援に関する研究)

令和4年5月23日授与

国内外の原子力発電所では、継続的な運転に必要な設備の耐久性を維持・向上させるための保全作業や、廃炉となる原子炉の解体作業に関して大きな需要がある。これらの保守・解体作業では重大な事故を起こさないよう細心の注意を払い、安全に実施する必要がある。これらを実現するために、原子力分野では、情報通信技術（ICT）を活用した作業改善や作業支援に関する多くの研究開発が行われている。特に近年では、LiDAR等の計測機器の普及や画像・点群処理技術の進歩によって、環境の3次元センシングや3次元モデルを活用した作業改善や研究開発に注目が集まっている。

本論文では、3次元センシングによって得られる、環境の状態を忠実に反映した3次元再構成モデルを活用した作業ミスや事故を低減させる支援手法として、物体や箇所と情報を紐づける、「タギング」を活用した支援方法を提案した。タギングによる実世界指向かつオブジェクト指向な情報の入出力によって、従来用いられてきた紙媒体等での記録とは異なる、より直観的な情報の入出力の実現を狙う。

本論文では、原子力発電所における保守・解体作業での作業計画検討及び作業時の情報共有と、原子力関連施設での緊急時対策訓練における訓練環境構築の2点の状況に関してタギングを用いた支援を適用し、タギングを適用した際の支援の有用性を検証した。加えて、容易なタギングの実現を目的として、原子力関連施設の作業員のような、画像処理やセンシングの専門的知識を持たないユーザでも容易にタギング可能な3次元再構成モデルが作成できる、拡張現実感（Augmented Reality; AR）を用いたスキャン支援システムを提案・開発し、その有効性を検証した。

原子力発電所における保守・解体作業での作業計画検討及び作業時の情報共有における支援では、作業現場をスキャンして得られた3次元再構成モデルを活用することで、ユーザは現場に赴くことなく現場の状況を確認できる。また、3次元再構成モデルに対して作業情報をタギングすることによって、作業者は作業実施時に各箇所に対応する情報を、ARデバイスを通じて参照できる。これらを実現する作業支援システムを開発し、解体作業中の実際の原子力発電所にて作業者を対象とした評価者実験を実施した。その結果、作業計画検討での現場滞在時間の短縮と作業時の現場での作業ミスの低減に有効であることが示された。

原子力関連施設における訓練環境構築における支援では、原子力関連施設の実空間内の様々な箇所に訓練シナリオを構成する情報を表すブロックを直接配置することで、ARで体験可能な様々な内容の非常時対策訓練をプログラミングスキルの無いユーザでも容易に作成できるAR訓練環境構築支援システムを開発し、実際の原子力関連施設の職員を対象とした評価者実験を実施した。その結果、従来のテキストベースのプログラミング経験のないユーザでも数十分程度で実空間で体験可能なAR訓練を作成できることが示された。

的 池 遼 太 (長崎百伸 教授)

「ヘリオトロン J 3次元磁場における周辺プラズマ輸送およびダイバータ熱負荷に関する研究」

令和4年3月23日授与

核融合炉の実現に向けた課題として、ダイバータ機器の受ける熱負荷があり、ダイバータ機器設計のためには3次元磁場中における熱・粒子輸送の理解が不可欠である。トーラスプラズマのうち、ヘリカル型装置は生来3次元構造を持ち、また、トカマク型装置は本来軸対称であるが、共鳴摂動磁場による3次元構造が導入されている。そのため、トーラスプラズマ共通の課題として3次元磁場下におけるSOL輸送の物理現象の理解が必要である。磁場構造の制御性に優れた先進ヘリカル装置であるヘリオトロンJにおいて、3次元周辺輸送コード EMC3-EIRENE を適用し、モデル計算を行うことで、ダイバタレグや磁気島といった周辺磁場構造や電子密度や輸送係数といったパラメータが周辺輸送に与える影響を評価した。

ヘリオトロンJにおける典型的な3種類の磁場配位を対象として、周辺プラズマ分布および真空容器上の熱負荷分布について磁力線長分布との比較および電子密度依存性を評価したところ、コアプラズマの電子密度上昇に伴って、ダイバータ熱負荷における分布が平坦化し、また、ピーク位置がシフトする結果が得られた(図1) [1]。プラズマ対向壁全体のグローバルな熱の分配を評価するために、新たな熱流束分布関数を導入し解析した結果、高密度化によって熱流束ピークが減少すること、低熱流束の増加すること、また、低い熱流束も無視できない量の熱を壁に伝えていることが明らかとなった(図2)。この熱流束分布関数の導入により、熱の分配において磁場配位制御が高熱流束の低減につながることが期待される。

ポロイダル断面における流束や圧力の分布において、小半径方向に SOL 領域を内側と外側の2領域に分割するような境界構造が見られた。この構造は SOL 中の磁力線長分布を反映しており、磁力線に沿った熱流束である平行熱流束においても見られている。内側領域にあたるダイバタレグの根元側と外側にあたるダイバタレグの先端側に2つのピークが存在し、コアプラズマ密度の変化に応じて位置や強度が変化する。このような分布の変化は壁の受ける熱負荷の密度依存性に対しても矛盾ない結果である。

プラズマ実験において静電プローブ計測を用いて周辺プラズマのフロー構造を計測したところ、X-point の両側で反対方向のプラズマフローが観測され、モデリング計算と一致する結果が得られた。また、ダイバータ構造制御のため、回転変換制御によるダイバータ磁場配位の数値計算を行い、回転変換が低次の有理面となったとき周辺領域における磁気島構造を評価した。プラズマ実験では電子密度・温度分布が回転変換に依存することが観測されており、周辺磁気島構造がプラズマ閉じ込め・輸送に重要な役割を果たしている。

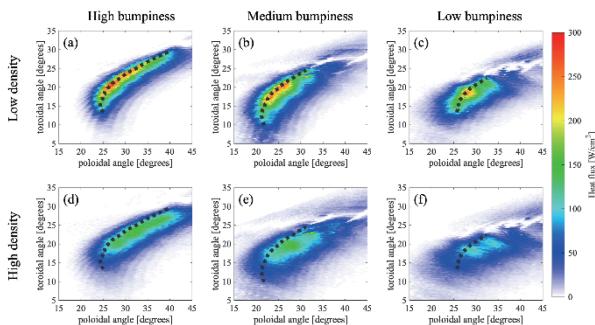


図1 Heliotron J 装置における周辺プラズマ分布
および真空容器上の熱負荷分布 [1]

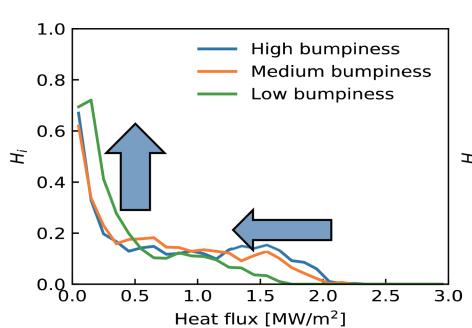


図2 熱流束分布関数の磁場配位依存性 [1]

高林伸幸 (篠原真毅 教授)

「Power Beaming and Receiving Systems for Microwave Power Transmission to Fly Drone」
(ドローン飛行のためのマイクロ波電力伝送のパワービーミング及び受電システムに関する研究)

令和4年7月25日授与

本論文はマイクロドローンへのマイクロ波電力伝送 (MPT) 用パワービーミング / 受電システムに関する技術・開発に関してまとめたものである (図 1)。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 通信分野で主に利用され、MPT 技術における有効性も示唆されてきたフラットトップビーム (FB) が、受電デバイスであるレクテナアレイの直流変換効率および出力 DC 電力の向上に大きく寄与することを、解析、シミュレーション、実測の 3 手法により示した。

2. MPT に適した FB を放射するアレイアンテナは、ビーム効率を向上させるためアレイ素子数を増やして指向性を高めなければならない。また軸比改善の観点からシーケンシャルアレイ化が必須である。シーケンシャルアレイを考慮した大規模アレイの分配回路設計は非常に煩雑となり、新たに簡略かつ有効な FB のアレイウェイトの給電手法が必要であった。本論文ではブロック型シーケンシャルアレイと分岐点での電力分配比を最小化するマイクロストリップラインでの給電手法を導入し、受電電力の変動係数 (CV) が 0.2 程度で受電面内の軸比が 3dB 以下のフラットトップビームを 0.8m の伝送距離で形成することに成功した (図 2)。

3. マイクロドローンに搭載するレクテナアレイの要件として出力電力 20W 以上、電力質量比 334mW/g 以上を満たすレクテナアレイは先行研究では見られない。本論文では、レクテアレイのアンテナ層はアラミドハニカム基板、整流回路は 0.127mm の誘電体基板と GaAs ショットキーバリアダイオードで形成されている。開発したレクテナアレイの実測出力電力、電力質量比はそれぞれ 27W、720mW/g を示し、マイクロドローンへの搭載要件を満たすレクテナアレイの開発に成功した。

4. 受電面内で均一電力密度分布、低軸比分布を持つ FB と最大 27W 出力可能な軽量レクテナアレイを用いてマイクロドローンに 80cm 先から無線給電を行った。バッテリーレスのマイクロドローンがマイクロ波による無線電力のみで 7 分間連続飛行できることを実証した (図 3)。

5. 画像認識機能を持つアクティブフェイズドアレイの開発を行った。画像認識は送電エリア内への人体の侵入検知、受電アンテナ位置の座標検知の 2 つの役割を担う。画像認識により取得された座標を基に 2 素子の同期したシンセサイザ IC の出力位相をコントロールしアンテナでの受電電力を 3dB 以上向上させることに成功した。

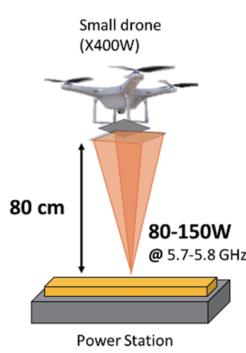


図 1: 提案する MPT マイクロドローン

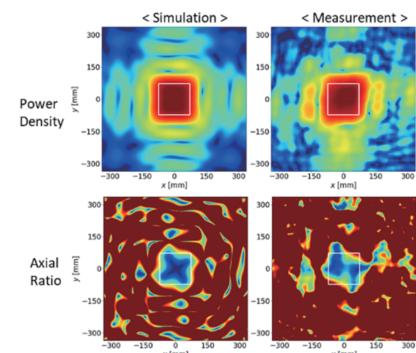


図 2: FB のシミュレーション結果と実測値

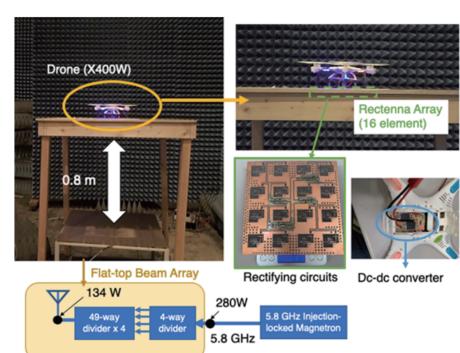


図 3: MPT マイクロドローンの実証実験結果

田 中 勇 気 (篠原真毅 教授)
「IoT デバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送システムの開発」
令和 4 年 9 月 26 日授与

本論文は IoT デバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送システムに関する要素技術・システム開発に関してまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 金属や人体の近傍で動作が可能な小型高効率アンテナの構成を提案し、試作・評価を通して有効性を確認した。設計したアンテナは同一寸法の板状逆 F アンテナ (PIFA) と比較して良好な放射指向性特性を有しながら 12.1% の小型化を実現した。
2. バッテリレスで動作可能な WPT 受電端末には無電源で動作するアンテナ用 RF スイッチが必要である。本論文で提案するバラクタダイオードを用いた RF スイッチは無電源で動作し、1 台のアンテナを電力と通信の両用とすることができる。試作されたスイッチは挿入損失が -0.38 dB と良好な特性を有することを確認した。
3. IoT 用の受電デバイスには広い指向性特性が要求される。本論文では複数のアンテナを近接して配置しハイブリッドカプラを介して複数の整流回路と接続することにより広い指向性と高い受電電力を両立可能であることが述べられている。試作したレクテナは実測の結果ハイブリッドカプラを用いない場合と比較して 1.3 倍の平均受電電力を得られることを確認した。
4. 整流回路の効率を高めるためには入力電力に応じた負荷インピーダンスを接続する必要がある。本論文で提案するリアルタイム MPPT 回路はアナログ回路のみで構成され、従来の MPPT 回路と比較して高速かつ広範囲な追従性能を有する。
5. 提案アンテナ、スイッチと従来 MPPT 制御を採用したバッテリレスセンサ端末の設計と試作を行った。センサ端末の設計方法について述べているとともに、動作実験においては既存の RFID リーダを送電器として 12 m の動作距離を確認した。
6. N 台の送電アンテナを配置し、周波数を同期した上で位相を最適値に制御する DWPT システムについて提案した(図 1)。位相最適化により受電電力が最大 N 倍となることを示し、従来のビームフォーミングと比較した場合の優位性をシミュレーションにより示した。
7. DWPT システムを実証するために、バックスキッタ信号を用いて位相を最適化する手法について提案した。バックスキッタ信号を受信し位相制御を行うための台形位相変調アルゴリズムを提案し、SDR デバイスと GNU Radio を用いてシステムの実証を行った(図 2)。実験では 16 台の送電アンテナから 300 mW を送電し、6.5 mW の電力を受電するとともに、シミュレーション結果と良好に一致する結果を得た(図 3)。
8. スケーラブルな DWPT システムを実現するために、周波数同期構成として Cascaded 構成を提案した。Cascaded 構成を実現する送電器の開発を行い、低コストな構成でありながら位相変調誤差 ± 1.5 度の性能を確認した。本構成で実証実験を行い、理論値と良好に一致する受電電力を確認し、提案構成の有用性を示した。

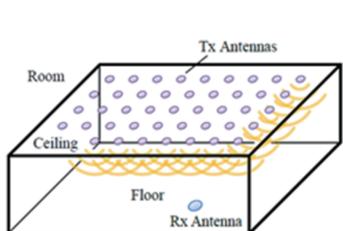


図 1 : DWPT のアンテナ配置



図 2 : DWPT の実験写真

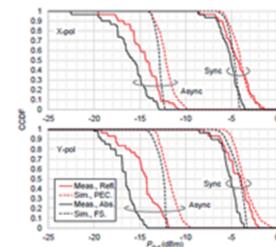


図 3 : 受電電力の CCDF の実験値

高校生のページ

人工知能技術に基づく人間（脳）の情報処理の解明

情報学研究科 システム科学専攻 論理生命学分野
石井信

1. はじめに

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

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

2. 人工知能技術を用いた視覚注意機構の解明（文献 [1]）

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

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

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

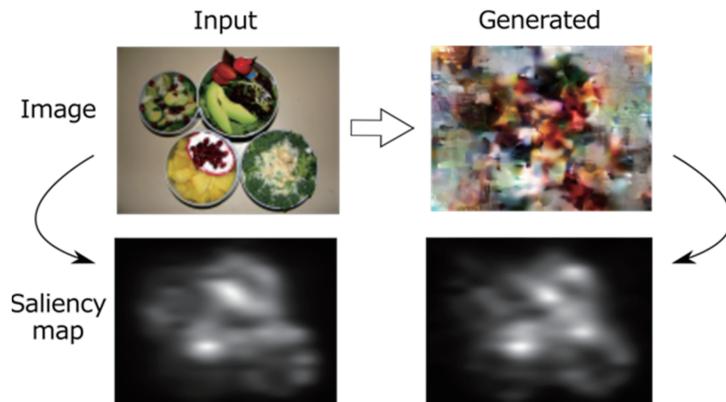


図1. 本研究で生成した画像ペアの一例
左上が自然画像で、右上が非自然画像、
それぞれの下にある画像がそれぞれの
顕著性マップ。顕著性マップは、白色
に対応する位置に目が惹かれやすいこ
とを示す。それぞれの顕著性マップは
類似しているが、自然画像と非自然
画像は全く異なる画像となっており、
非自然画像では文脈情報が少ない。

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

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

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

(a) Natural image > Generated image



(b) Generated image > Natural image



図 2. 脳活動解析の結果

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

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

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

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

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

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

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

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

4.まとめ

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

研究室の活動については以下のHPをご参照ください。

<https://ishiilab.jp/>

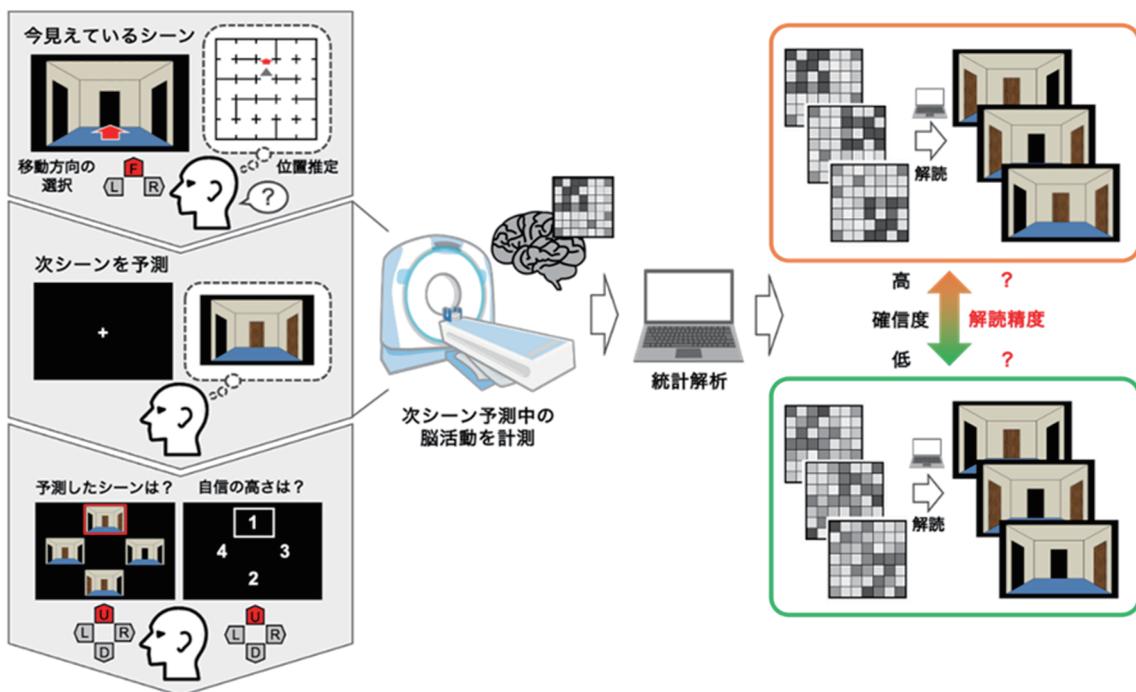


図3. シーン予測課題と解析手法の概念図

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

参考文献

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

学生の声

Thinking time on the commute

情報学研究科 通信情報システム専攻 山本研究室 博士後期課程3年 Weizheng Fu

There is a 20-minute bike ride from my home to school. Usually, I will take a longer detour to take a less crowded path. This is the time I set aside each day for self-communication. On the way to school in the morning, I make a list in my head of what I must accomplish today. On the way home at night, I summarize my work for this day. This simple self-reflection helps self-monitoring, as time would otherwise fly by without leaving any trace.

Of course, this self-reflection only takes a short time, and I still have a lot of time for free thinking. In this process, thinking can be very wild and unpredictable, and I don't have to use a pen to record and worry about making mistakes. The advantage of this kind of thinking is that I can think outside the confines of textbooks and papers. I remember that shortly after I became a PhD student, there was a problem in my research kept bothering me for a whole month. The thinking time in my daily commute gave me a lot of ideas. Although most of these ideas didn't work, my abilities have also improved rapidly in the process of validation. One night on the way home, I suddenly had an inspiration, and my intuition told me that this time it would work. Subsequently, I visualized the idea with logical thinking and verified that the approach was indeed feasible. This idea later helped me to complete my research project and made me the first person in this field to confirm a physical model with observational data.

I really treasure this time alone with myself. When looking back on these days after graduation, I will definitely recall the ocean rippling in my mind and the stars shining in the sky when I was riding on this path.

研究との向き合い方を考える

情報学研究科 通信情報システム専攻 佐藤研究室 博士後期課程2年 大島國弘

修士1回生の後半当時、私はそれなりに悩んで博士後期課程への進学を決定した。博士後期課程への進学は少数派であるし、進学して研究が上手くいかず卒業できなかつたらどうしようといった不安があった。そこで、研究に悩みを持つ学生の一助となることを期して、私が進学を選んだ経緯と振り返ってみて重要な感じる研究との向き合い方に関する簡単な考察を記す。

先に触れた通り進学を検討する上で私が最も悩んだ点は、無事に修了できる研究遂行能力が自身にあるのかである。博士後期課程の学生に求められるのは自分で研究課題を設定し成果をあげる（論文誌に採択される）ことと言われるが、その適性を修士1回生後半時点までの短い研究生活から判断するのである。不安にならないはずがない。私の経験談としては、当時私は研究への理解が深まると共にもっと面白い研究課題に取り組みたいと考え、自分で周辺知識を集め新しい研究課題の構想を練り、この研究課題で修了できそうと考え進学を決めた。この経験と進学後の研究生活を通して、面白いと思える研究課題への渴望こそが博士後期課程進学への最初の一歩だったのではないかと感じている。そして、面白いと思える研究課題に辿り着こうと研究に真摯に向き合い続けるうちに、研究分野に対する広く深い理解が身に付き一人前になれるのではないだろうか。

悩める学生の皆さんも、もし現在目の前の課題解決に終始して、研究目標や研究課題解決の意義への理解が疎かになっているようならば、まずはそこから抜け出す一歩を踏み出し面白いと感じる研究に挑戦してみてほしい。

教室通信

電気電子工学科の入試について

教務委員長 佐 藤 高 史

本稿では、電気電子工学科に関する入試について近況をご報告させていただきます。大学の入試制度の多様化がしばしば話題となっています。京都大学でも、大きな可能性をもつ様々な学生たちが授業や課外活動などを通じて互いに切磋琢磨しながら成長できるよう、複数の入試が実施されています。

電気電子工学科に関する入試としては、現在、一般選抜の他に、高専編入学試験、私費外国人留学生特別選考、特色入試制度、Kyoto iUP があります。この中から今回は、制度として比較的新しい特色入試（電気電子工学科は平成 28 年度入学者から）と Kyoto iUP（電気電子工学科は令和 2 年度入学者から）について、概要をご紹介いたします。

特色入試は現在、京都大学のすべての学部で実施されています。学生募集要項にも書かれている通り、能力、学ぶ意欲、志を多面的・総合的に評価する京都大学独自の選抜方式となっており、志願者のこれまでの学びの活動等における努力のプロセスや、京都大学で学ぼうとする意欲を積極的に評価しています。本学科では、求める人物像を「自然現象や科学技術、特に電気電子工学関連の学術分野に対する強い興味と旺盛な探究心をもつとともに、専門教育を受けるのに十分な高い基礎学力と論理的思考力を有しており、かつ科学技術に関する特筆すべき能力やリーダーシップを備えた創造性豊かな人材を求めます。」としており、提出書類（調査書、推薦書、学びの設計書、顕著な活動実績の概要）と大学入学共通テストの成績を総合的に審査しています。また、書類審査では特に、科学に関する課外活動や、授業科目の一環として実施した課題研究における顕著な実績を重視しています。

Kyoto iUP (Kyoto University International Undergraduate Program) は、今後、日本の 18 歳人口が継続的に減少する状況にあることを踏まえ、京都大学がこれまで主に受け入れてきた国内の最優秀層の学生にとどまらず、広く海外の最優秀層の学生の積極的な受け入れを目指すために実施されているプログラムです。企業や大学における先端的研究・開発が英語以外の言語で行われている世界でも稀な国であるという日本の特性に対応し、日本語で学部卒業レベル（あるいは修士課程や博士後期課程修了レベル）の専門知識を獲得した留学生を育成し、それにより、グローバル展開を図る日本企業及び日本経済そのものを牽引する極めて高度な外国人材の輩出と日本社会への定着に貢献することを目指しています。優秀な留学生の志願に繋がるよう、世界各国のトップ高校を中心に広報・リクルート活動を展開しています。これらの高校から優秀な学生が毎年入学するよう、リクルートや選抜の仕組みが整えられてきています。従来の留学生の選考では、入学後すぐに日本語で実施される講義を履修する必要があることから日本語の習熟度も選考の観点となっていましたが、このプログラムでは、入学段階での日本語能力は必要条件とせず、学生のポテンシャルを最重要視した選抜を行っています。このため、入学後は半年間の予備教育期間を設けて日本語教育を行うと同時に、国ごとに異なるカリキュラムやその進度の相違を吸収し学部課程の履修をスムーズに進められるよう配慮しています。学科の専門科目教育では、正規の日本人学生と交流しながら同じカリキュラムをこなします。

今後、これまで以上に様々なバックグラウンドを持つ学生が電気電子工学科を卒業し、社会で活躍していくものと思います。皆様のご支援を引き続きどうぞよろしくお願ひいたします。

賛助会員の声

カーボンニュートラルの時代に向けた 次世代自動車開発へ貢献する鉄鋼製造

日本製鉄（株）名古屋製鉄所 生産技術部 設備計画室（2007年院卒）服 部 光 高

1. はじめに

2020年10月、政府が「2050年カーボンニュートラル宣言」を行い、カーボンニュートラルという言葉が注目を集めようになりました。当社は「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050～ゼロカーボンスチールへの挑戦～」を掲げ、鉄づくりの過程で排出されるCO₂を2030年に30%（対2013年比）削減し、2050年に実質ゼロとする決意を示しました。

当社のビジョンでは大きく分けて2つの価値を提供します。1つ目の価値は鉄鋼製造プロセスの脱炭素化です。鉄鉱石と石炭（カーボン）の還元反応によって銑鉄を生み出す従来のプロセスを、超革新技術の開発により水素で還元する方式に移行します（図1）。また並行して国内の一部高炉を電炉に置き換え、大型電炉でスクラップを溶解して生産する方式を拡充していきます。2つ目の価値は社会全体のCO₂排出量削減に寄与する高機能鋼材とソリューションの提供です。本紙では一例として、次世代自動車に貢献する高機能鋼材について紹介し、その安定製造のため名古屋製鉄所に新設する次世代熱間圧延ライン（以降、熱延ライン）と最新の電気・計測制御技術について述べます。



図1：水素還元方式の高炉
(君津製鉄所 試験高炉, 出典①)

2. カーボンニュートラルに向けた自動車軽量化ニーズと当社の貢献

自動車から排出されるCO₂は国全体の排出量の16.0%を占めており（図2）、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、次世代自動車（電気自動車、ハイブリッド車）の普及や燃費改善が求められています。次世代自動車の課題となるのが車両の軽量化です。一度の充電で長距離を走行するためにバッテリー搭載量を増やすと、車両の重量が増します。それによって燃費も悪化し、結果として消費電力が増え、CO₂排出量も増えてしまいます。したがって車両の強度を維持しつつ重量を軽くできれば、飛躍的な燃費向上を見込め、CO₂排出量を抑えるこ

とができます。このニーズに応えるべく当社では高機能鋼材としてハイテン（High Tensile Strength Steel）を製造しています。ハイテンとは製造過程で添加する合金の成分や熱処理方法などを工夫することで、一般的な鋼材よりも強度を向上させた鋼材です。ひとくちにハイテンといってもキャビン・骨格部材の1470MPa級ハイテン、バンパー補強材の2.0GPa級ホッ

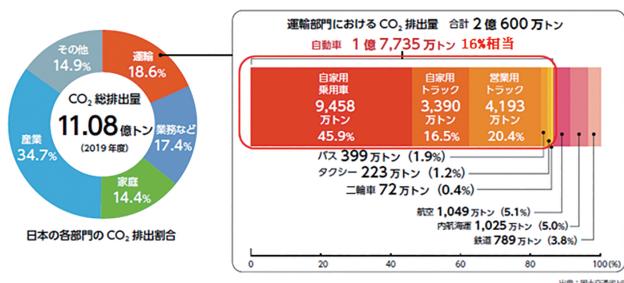


図2：日本の各部門のCO₂排出割合（出典②）

トスタンプ材、衝撃吸収骨格部材の980MPa級ハイテンなど車体の使用部位によって求める特性が異なります。これらは単に強度を追求したものではなく、成形性、衝突変形能とのバランスを考慮し品質設計をしています（図3）。

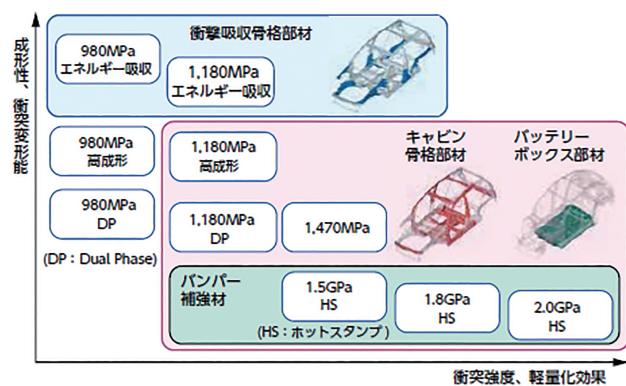


図3：車体骨格向けハイテンの進化（出典②）

3. 次世代熱延ラインと最新鋭の電気・計測技術

3.1 次世代熱延ラインについて

大手自動車メーカーが近隣にある名古屋製鉄所は、当社の中でも自動車用鋼板製造の中核拠点です。次世代自動車向けの強度と加工性を両立する高機能鋼材のニーズ拡大に応えるべく、当社は中長期経営計画において、名古屋製鉄所への新しい熱延ラインの建設を発表しました（図4）。新しい熱延ラインは、鉄鋼材料の可能性を徹底的に追求した当社の技術開発部門の長年にわたる研究成果の集大成であり、世界最大の耐荷重の圧延機を備え、圧延制御性と温度制御性を飛躍的に向上させたものです。

[新設熱延ラインの概要]

能力：約600万トン／年

稼働時期：2026年度予定

投資額：約2,700億円

現在、この熱延ラインは設計の段階であり、電気・制御の主担当として京都大学電気工学専攻の卒業生がメーカーと日々議論しながら設計を進めています。

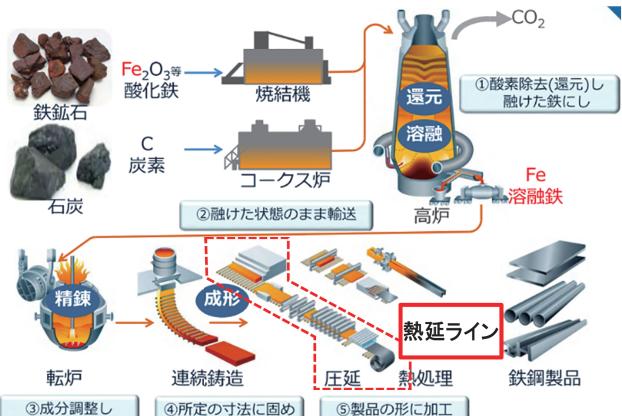


図4：製鉄工程（出典③）

3.2 熱延仕上圧延における蛇行制御

熱延ラインには板厚を作りこむために「粗圧延」「仕上圧延」と呼ばれる二つの工程があります（図5）。仕上圧延では厚み50mm程度の鋼板を最小1.2mmの厚みまで薄く圧延するため、板を安定して通板するのに高い技術が必要です。とりわけ板の尾端は圧延機を通過する際の挙動が大きく、この尾端をまっすぐ通板することは安定製造において非常に重要です。板の尾端の

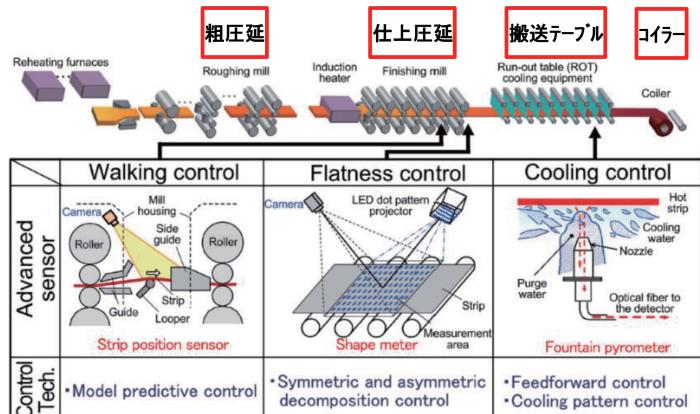


図5：熱延ラインにおける電気・計測技術（出典④）

横ブレ挙動は蛇行（Walking）と言い、従来は板の幅方向の両端にかかる荷重の偏差から蛇行量を推測し、圧延機の圧下圧力を調整してその蛇行を矯正する手法を用いてきました。しかしながら板の荷重の偏差と蛇行量は必ずしも一致せず、ゲインを容易に上げられないため、蛇行を完全に抑制することは困難でした。近年、計算機の処理能力と画像処理技術の目覚ましい発展により、板の蛇行をステレオカメラの画像から直接測定する技術を開発しました。蛇行量を直接測定することにより、その蛇行量、操作量（圧延ロールの傾き）からオブザーバを介して、内部状態変数となる板の蛇行の速度までも演算し、板の蛇行を予測し制御するモデル予測制御を開発しました。

3.3 搬送テーブル（冷却ゾーン）における温度制御

仕上圧延後の搬送テーブルでは水で鋼板を冷却します。このプロセスは単に冷やせばよいというのではなく、コイラで巻き取る際に何℃まで冷却するかで鋼板の品質が大きく変化します。そのため冷却途中の鋼板温度を精度よく測定し、冷却水量を調整せねばなりません。高速で移動する鋼板の温度を測るには、非接触式の放射温度計（パイロメーター）を用います。この温度計は鋼板から熱放射される光エネルギーを検出して温度を算出しますが、搬送テーブルのように大量の水を使用するエリアでは、水によって光エネルギーが散乱・吸収され著しく減衰するので測定が安定しません。そこでノズルから水を鋼板に向かって噴水（ファウンテン）のように吹き出し、この水柱を光エネルギーの光路とするという、水環境を逆に利用する発想で安定的に測温する技術を開発しました。

冷却途中の鋼板の温度を精度よく測定することで、サンプリング点（制御点）の巻取温度^{*1}を予測し、予測巻取温度が目標巻取温度と一致するように冷却水量をフィードフォワードする制御が発展しました。

これら二つの技術は鉄鋼業の技術進歩に大きく貢献したことから、第68回大河内記念生産賞を受賞しました。

^{*1} 巷取温度：熱延ラインの最終工程において、鋼板をロール状に巻き取る際の鋼板温度

4. おわりに

鉄鋼業では材料、機械、化学分野の印象が強いですが、製造プロセスにおいて電気・計測技術は非常に重要で、研究・開発・設計・製造・生産・管理のあらゆるフィールドで電気系技術者が活躍しています。ぜひ工場見学、インターンシップなどを通じて、その活躍ぶりを目の当たりにしてください。

（日本製鉄株式会社 NIPPON STEEL CORPORATION <https://www.nipponsteel.com/index.html>）

出典：

- ① 「季刊 ニッポンスチール Vol.10 ゼロカーボン・スチールへの挑戦（2021年10月）」日本製鉄
- ② 「季刊 ニッポンスチール Vol.12 未来の車に貢献する日本製鉄グループ（2022年12月）」日本製鉄
- ③ 日本製鉄 カーボンニュートラルビジョン 2050（2021年）
- ④ 新日鐵住金技報 第411号 製鉄設備におけるシステム・計測制御技術の進歩と展望（2018年）

編集後記

情報誌 cue No.49をお届けします。ご多忙中にもかかわらず、ご寄稿いただきました皆様に感謝いたします。

3年越しの世界的パンデミック COVID-19 もなんとか出口が見えてまいりました。京都大学では令和4年度の後期授業は基本的に対面で実施しました。また、卒業式・入学式も対面開催です。さらに、令和5年度からの授業も特別な理由がない限り対面とするようになっており、COVID-19 前の授業の体制に戻っています。室内でのマスクの着用義務についても議論されているようです（令和5年2月現在）。

今号では、パナソニックインダストリー株式会社の上田哲三様に「ワイドギャップ半導体の進化を振り返って」というタイトルで巻頭言をご寄稿いただきました。内容については巻頭言を読んでいただければと思いますが、私は最後の「私自身も人生100年時代に向け、まだまだ若い皆さんと競いながら頑張っていこうと考えている」という一文に目が留まりハッとしたしました。実は、私は上田さんと大学の同級生でそろそろ定年を意識する年齢で、この一文が「お前もまだ頑張れ」という私に向けられたメッセージのような気がしました。

[H.S. 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5年3月

編集：電気系cue編集委員会
川上 養一、山本 衛、下田 宏、
橋本 昌宜、田中 俊二、山本 高至、
デゾイサ メーナカ、北野 正雄（洛友会）
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発行：京都大学電気関連教室
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

