



京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.51

MARCH 2024

[第51号]

..... 巻頭言

森 望

..... 大学の研究・動向

全地球航法衛星システム (GNSS) データか
らの電離圏トモグラフィ
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

..... 産業界の技術動向

AI スタートアップ挑戦の軌跡・展望
株式会社ジールス 遠藤 竜太

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 51 号 目次

巻頭言

電気事業の現状と関西電力の取組み

……………関西電力株式会社 森 望…………… 1

大学の研究・動向

全地球航法衛星システム (GNSS) データからの電離圏トモグラフィー

……………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…………… 4

産業界の技術動向

AIスタートアップ挑戦の軌跡・展望

……………株式会社ジールス 遠藤 竜太…………… 10

新設研究室紹介…………… 14

研究室紹介…………… 16

博士論文概要…………… 34

高校生のページ

低電力・小型・高速半導体集積回路の設計・開発とそのバイオ・医療IoT応用

～バイオ発電と低電力センサ集積回路を用いた単独自立動作持続血糖モニタコンタクト、
非侵襲・早期がん診断を行う半導体集積回路の開発～

……………大学院情報学研究科 情報学専攻 通信情報システムコース
集積システム工学講座 大規模集積回路分野
新津 葵一…………… 51

学生の声

かぎ針編みにおける裏編み

……………エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻中村研究室 博士後期課程 2 年
山下 湧志朗…………… 56

The Road

……………工学研究科 電気工学専攻 海老原研究室 博士後期課程 3 年 張 天…………… 56

教室通信

情報学研究科および通信情報システム専攻の改組について

……………情報学研究科 通信情報システムコース コース長 原田 博司…………… 57

賛助会員の声

ロームの研究開発と産学連携の取り組みについて

……………ローム株式会社 研究開発センター 基幹技術研究開発部 中村 洋平…………… 58

編集後記…………… 60

巻頭言

電気事業の現状と関西電力の取組み

関西電力株式会社 取締役代表執行役社長 森 望



昨今、目覚ましい勢いで世の中の IT 化・デジタル化が進み、スマホやタブレット、パソコンがない生活などは、想像し難いものになっています。思い返すと、私の学生時代は、大型計算機の時代からパソコンの時代へとやっと変化し始めた頃でした。個人でパソコンを所有している友人も、さほど多くなかったと記憶しています。

大学院に進み、研究室が電力系であったことから、就職は当初重電メーカーを中心に考えていましたが、メーカーで研究者としての道を極める程の自信がなかったこともあり、電力会社に就職することにしました。

1988 年、関西電力に入社、地下に埋設した送電設備の保守・点検等が私の最初の仕事でした。毎日作業で現場に出て、先輩方に電気事業のイロハを叩きこまれ、電気事業の根幹を体感することができました。その後も、様々な送電線工事等に携わったほか、電力会社で組織している電気事業連合会への出向も経験しました。

2009 年には京都電力所の所長となり、ここ京都大学も含めた京都全体、そして若狭地方に所在する送電線や変電所等を統括していました。東日本大震災発生時は、ちょうど京都電力所内の会議中で、会議室も相当な揺れを感じました。急いで、給電制御所や有人電気所等と連携をとり、被害状況の確認に奔走したことを昨日のここのように思い出します。

その後は、太陽光や風力等の再生可能エネルギーの開発や、次世代のエネルギーとして期待される水素事業、電力のトレーディング等、電力会社が近年重点を置くようになった分野にも数多く携わってきました。これら多方面にわたる業務の経験は全て、私の貴重な糧となっています。

2022 年に社長就任以降、グループ全体の発展に力を尽くす日々ですが、昨年 11 月、ご縁があって、電気系教室懇話会にて講演させていただく機会に恵まれました。当日は、学生の皆さんや OB の方々を前に、「電気事業の現状と当社の取組み」と題してお話をさせていただきました。

電力の供給にあたっては、「安全性 (Safety)」を大前提として、「エネルギーの安定供給 (Energy Security)」、「経済効率性の向上 (Economic Efficiency)」、「環境への適合 (Environment)」を同時に実現する、すなわち「S+3E」を同時達成することが大変重要になります。

特に、我が国はエネルギー資源が乏しく、エネルギー自給率は原子力発電を含めても約 13% (2022 年度) と、食料の自給率約 38% (2022 年度) よりもさらに低い数値です。そのため、電力各社は、これまで、多様なエネルギー源をバランスよく組み合わせて活用する、「ベストミックス」の追求に力を尽くしてきました。

こうした中、私ども事業の大きな転機となったのが東日本大震災です。震災後、社会的不安の高まり等を受け、全ての原子力発電所が停止、発電量の減少を火力発電で補ったことにより、CO₂ 排出量が著しく増加することになりました。また、海外から化石燃料を大量に調達したことにより、2011 年度から

5年間で、累計約14兆円もの国富が流出したと言われています。

現在は、福島第一原子力発電所事故の教訓等を踏まえ、2013年に策定された新たな規制基準の下、同基準を満たした原子力発電所が順次再稼動を果たしているところです。再生可能エネルギーの普及拡大も進みましたが、依然として、我が国発電電力量の約7割（2022年度）が火力発電によって賄われている状態が続いています。

また、以前は、一般家庭のお客さま等は電力を購入する会社を自ら選ぶことはできませんでしたが、震災を契機に、電力の購入先を自ら選びたいという声が全国で高まりました。そうした声を受け、2016年、全てのお客さまが電力会社を自由に選択できる「小売全面自由化」がスタートしました。電力市場には、今や新たに数多くの電力会社（新電力）が参入しており、私どももこれら事業者の皆さまと切磋琢磨しながら、お客さまにより良いサービスをお届けできるよう努めているところです。

震災から10余年が経過、私どもは今また大きな事業環境の変化に直面しています。昨今、地球温暖化による環境問題が各地で深刻化することに伴い、脱炭素社会の実現に向けた動きが世界的に加速しています。加えて、ウクライナ情勢の緊迫化等を受け、資源価格が高騰するなど、エネルギー市場は先行き不透明な状態が続いています。

こうした中、GX（グリーン・トランスフォーメーション）とエネルギー安全保障とを両立させながら、エネルギーの安定供給の使命を全うすることは容易なことではありませんが、責任ある事業者として、何としても成し遂げていかなければなりません。

関西電力としても、今、この挑戦に向け、グループを挙げて大きな一歩を踏み出そうとしているところです。

2021年には、「関西電力グループ ゼロカーボンビジョン 2050」を公表、事業活動に伴うCO₂排出を2050年までに全体としてゼロとすることを宣言しました。

その実現に向け、私どもは現在、国内外において、太陽光や風力等の再生可能エネルギーの開発を加速させながら、原子力についても、安全・安定運転の継続に努めるとともに、安全性・経済性に優れた次世代炉の検討を進めているところです。火力発電についても、出力が不安定な再エネの調整力として重要な役割を担っており、アンモニアや水素等の活用などを通じ、ゼロカーボン化を推進してまいります。

水素については、発電用燃料としての利用のみならず、運輸・産業等、様々な分野における利活用が期待されています。当社グループとしては、水素の製造からお客さまへの販売までをつなぐサプライチェーンの構築を目指して、姫路地域において実証事業を開始しているところです。

こうしたエネルギーの供給側の取組みにとどまらず、ご家庭や産業分野のお客さまに、再エネ・蓄電池等の機器類や制御システムをパッケージでご提案することなどで、省エネや電化などを促進し、社会全体のCO₂排出量の削減にも貢献したいと考えています。

このように脱炭素の取組みを進めながら、エネルギーの安全・安定供給の使命を全うするため、電源の多様化を進めるとともに、日頃から、十分な燃料調達や設備保全等に努めることで、人々の大切な暮らしや経済を支え続けていく考えです。

また、エネルギー以外の領域でも、お客さまの多様なニーズにお応えし、データセンター事業や農業・食料などをはじめとする幅広い分野において、新たな価値・サービスの創出にも積極的に取り組んでまいります。

世界は今、激動の時代を迎えていると言われていますが、私ども関西電力グループはこれからも様々な社会課題の解決に挑み、お客さまや社会の皆さまからのご期待にしっかりとお応えしながら、持続可能な社会の実現に貢献していく決意です。

懇話会では、こうしたお話をさせていただきましたが、久しぶりに学び舎を訪れ、大学や周辺の街の様々な景色、11月祭の賑わいをとても懐かしく感じました。講義後には、学生の皆さんと直接お話させていただく機会もあり、大変楽しい時を過ごさせていただきました。活気あふれる学生の皆さんの若い力に、頼もしさとまぶしさを感じた次第です。

人類社会が今日のように豊かな発展を遂げたのも、科学技術の大きな進歩があったからに他なりません。来たるべき新たな時代において、その担い手になるのは皆さんです。

皆さん一人ひとりが、時代時代の新たな課題に向き合い、革新的な研究開発・技術開発によって、明るい未来を力強く切り拓いて頂きたいと思います。そして、将来、皆さんと仕事をする機会に恵まれれば、これほど嬉しいことはありません。

大学の研究・動向

全地球航法衛星システム（GNSS）データからの 電離圏トモグラフィ

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
教授 山 本 衛

1. はじめに

全地球航法衛星システム（Global Navigation Satellite System; 略称 GNSS）は数十機の衛星群を用いる測位システムであって、もっとも有名なものは米国による全地球測位システム（Global Positioning System; 略称 GPS）である。GPS の他に欧州、ロシア、中国が、それぞれ独自の衛星群を打上げて運用している。日本も準天頂衛星システムから GPS を補完する電波を送信することで、我が国における測位精度の向上を図っている。現在では、複数の衛星群の電波を同時受信できる機能をもつ GNSS 受信機が多くなっており、上空に 20 機以上の GNSS 衛星が見える状況も生まれている。GNSS が提供する測位・時刻の情報は社会の標準インフラとして多方面で利用されている。ここでは、GNSS を用いた電離圏電子密度の 3 次元分布の観測について紹介したい。

GNSS 衛星は正確な時刻と軌道情報を地上に向けて送信している。地上の GNSS 受信機が上空にある 4 機以上の衛星からの信号を受信することで、受信機の 3 次元位置と時刻の 4 つの未知数を決定することで測位が行われる。正確な測定のためには、衛星から受信機までの電波の伝搬経路が一直線でなければならない。しかし実際には、1) 電離層プラズマによる伝搬遅延、2) 対流圏の中性大気密度と水蒸気による伝搬遅延、3) 受信機周辺で発生する電波のマルチパス、等の問題によって誤差が発生してしまう。このうち 1) に対しては、GNSS が 2 周波数の電波を用いることで回避の手段が取られている。逆にいうと、GNSS 衛星からの 2 周波数の電波の伝搬位相差の計測から電離圏中の全電子数（Total Electron Consistent; TEC）が推定できる [1]。

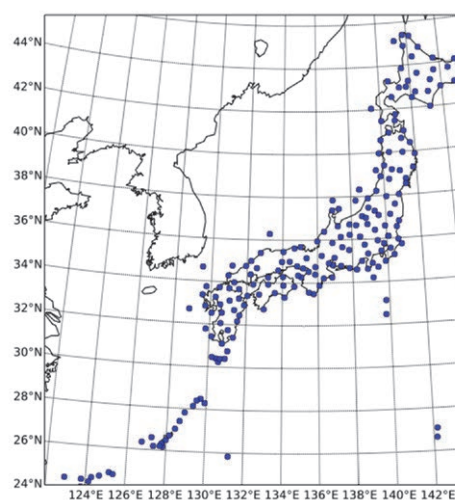


図1 リアルタイムデータが得られる約 200 の GEONET 観測点の分布。観測点の総数は 1300 以上に達している。

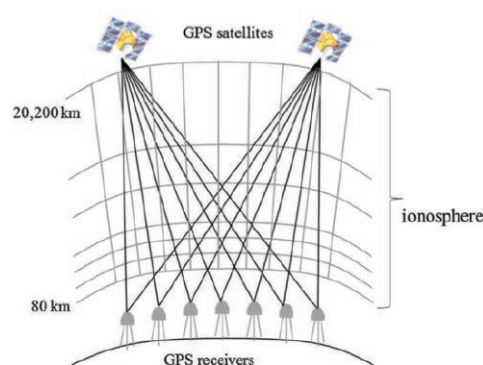


図2 GNSS トモグラフィの概念図。

2. 電離圏 3 次元トモグラフィー

我が国では、国土地理院が全国に 1300 点を超える電子基準点のネットワーク GEONET を運用中である（図 1）[2]。我々は GEONET からの TEC 観測データのトモグラフィー解析を開発し、日本上空の電離圏電子密度の 3 次元分布を得てきた [3]。

GNSS 観測に基づくトモグラフィーでは、図 1 に示すように観測方向が上下方向に強く縛られるため全方向にわたるデータが得られず解析は困難である。そこで我々は、拘束条件付き最小二乗法を用いている。この手法では、誤差を最小化する項（最小二乗項）とデータの平滑化を目指す項（拘束項）の 2 つを含むコスト関数を最小化する解を求める。拘束項は「ある格子点と上下前後左右の隣り合う格子点（6 点）の電子密度の勾配が大きくならないように拘束する」とし、最小二乗項とハイパーパラメタと呼ばれる係数でつなぎ合わせる。この手法は初期値を用いない点に大きな特徴があるが、拘束項とハイパーパラメタという人工的な係数の決め方が難しい。試行錯誤の結果、拘束項等の決定手法を固めるとともに、データ取得からトモグラフィー解析までをひとつのソフトウェアにまとめた。また計算の高速化にも取り組み、一般的な PC を用いてデータ取得から解析終了までを 5 分以下とすることに成功した。2016 年 4 月からは、全国 200 点からの GEONET リアルタイムデータを用いたトモグラフィー解析を始め、観測から数分遅れの自動解析結果を 15 分毎に公開している (<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/>) [3]。

3. GNSS-TEC にイオノゾンデ観測を加えた解析手法の改良

前項に示した電離圏の 3 次元トモグラフィーは電離圏の電子密度分布をかなり良く再現するものであるが、電離圏の高度分布の再現の点では課題が残った。特に問題となるのは、通常は高度 300km 程度である電子密度のピーク高度が下がってくる際の挙動であった。高度方向の電子密度勾配を制限する拘束をかけているうえ、トモグラフィー解析をうまく収束させるために最低高度（高度約 90km）の電子密度をゼロと仮定していることから、ピーク高度が十分に下がらない傾向が残ってしまう。また、推定された電子密度に、本来はあってはならない負の値が現れるという問題も存在していた。

これらの問題への対処として、我々は GNSS からの TEC 観測にイオノゾンデによる観測データを加えた新しい解析手法を開発している。イオノゾンデは数 MHz から数十 MHz 帯の電波を上空に発射し、電離圏からの反射波を用いて電子密度を観測する装置であって、電離圏のピーク電子密度と高度を計測できる。我が国では、情報通信研究機構が全国 4 か所（稚内（北海道）、国分寺（東京）、山川（鹿児島）、沖縄）に設置して 15 分毎の定常観測を行っていることから、GNSS 観測データと共に用いやすい。

イオノゾンデ観測データを加えた新しいトモグラフィー解析手法の開発は簡単ではなかった。開発目標は単純で、イオノゾンデの観測パラメータ NmF2（最大電子密度）と hmF2（電子密度が最大となる高度）を電子密度分布の推定に反映させることである。しかしながら、これらのパラメータを観測方程式の中に単純に取り込んだ場合、TEC 観測からのデータ数に対してイオノゾンデからのデータ数が非常に少ないため、トモグラフィー解析結果にはほとんど影響を与えることができない。結果として開発された解析手法は、アッシミレーションで利用される 3 次元変分法を用いる、以下のような特徴を持つユニークな手法となった [4]。

1. 初めに GNSS からの TEC 観測に基づく拘束付き最小二乗法のトモグラフィー解析を実施する。
2. TEC 観測データとイオノゾンデ観測を組み合わせた新しい観測方程式を構築する。
3. 負の電子密度を避けるために、電子密度の対数を用いる。
4. 電子密度分布の改善のために 3 次元変分法を用いる。

通常のアッシミレーションは、計算機シミュレーションの結果と実データを合成して、シミュレーション結果を現実に近いものに改善するために使用される。これに対して我々は、シミュレーションの代わりに初めのトモグラフィー解析結果を用いた。加えて、TEC 観測とイオノゾンデ観測を含む新たな観

測方程式を生成し、両者を使った3次元変分法によって電子密度分布を改善した。イオノゾンのパラメータを観測方程式に反映する方式についても、イオノゾン観測地点だけのデータとして組み込むことは避けた。つまり、電離層のピーク高度を挟む上下2層を選び、イオノゾン観測点の周囲にある複数のグリッド点について、イオノゾン観測点からの距離の逆数に比例する重みをつけて観測方程式に取り込んでいる。さらに、TEC観測とイオノゾン観測のデータの重みづけもバランスを取るようになっている。

図3に従来のトモグラフィー解析とイオノゾン観測を活用した改良後の解析結果の比較を示す[5]。各図の緑線は従来のトモグラフィー解析からの電子密度の高度分布、青線は改良後の高度分布である。赤線は各地のイオノゾン観測から推定される電離層ピーク高度以下の電子密度分布であり、点線は電子密度のピーク高度を示す。いずれの地点においても、従来のトモグラフィー解析では電子密度のピーク高度が点線より上側に位置しているが、改良後は電子密度分布を下げることに成功している。改良後の分布は、赤線で示されるピーク高度以下の電子密度分布と非常によく一致しており、アッシミレーションの手法を活用してイオノゾン観測パラメータを含めた改良型の解析手法が有効であることが明確である。

図4に、この改良型のトモグラフィー解析を、巨大な磁気嵐 St Patrick's Day イベントの解析に応用した例を示す[5]。沖縄（最上部）から稚内（最下部）まで、異なる緯度における高度600 kmまでの電子密度の時間・高度分布を等高線表示している。時間・高度変化は、磁気嵐が始まる前まで2日間にわたって通常の日変化を示すが、磁気嵐の日にはDstインデックス（図中の実線）の低下と共に電子密度が減少し、電離圏の高度が上下に激しく変動し、徐々に回復していく。他の観測と非常に良い一致性を示しており、改良型のトモグラフィー解析の威力を示す結果が得られた。

改良型の解析においても、デスクトップPCを用いてデータ取得から解析までを数分間で実施することが可能であることから、リアルタイム性も十分に確保されている。現在は改良型のトモグラフィー解

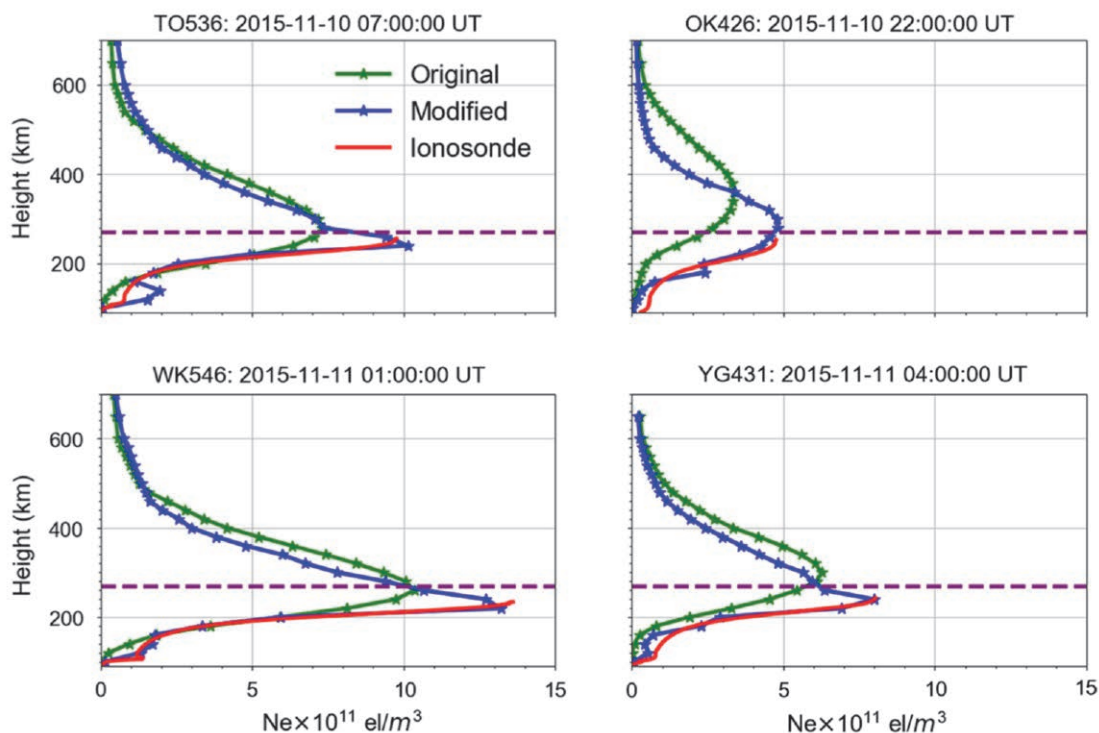


図3 2015年3月17日に発生した巨大な磁気嵐 St Patrick's Day イベントの解析例 [5]。

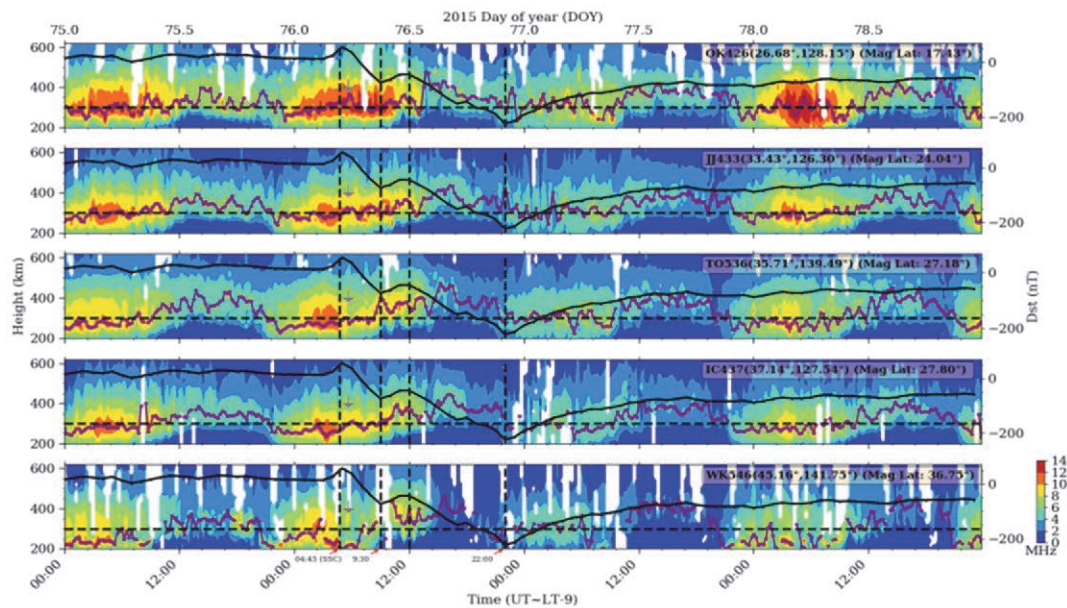


図4 2015年3月17日に発生した巨大な磁気嵐 St Patrick's Day イベントの解析例 [5]。

析の性能を統計的に明らかにしようとしている。これと並行して、現在のリアルタイムサービスも改良型の解析に移行する予定である。

4. トモグラフィー解析のもう一つ別の応用例

電離圏の電子密度には波が見えることが多い。GEONET 観測から非常に有名になった例としては、東日本大震災の直後から、震源の真上を中心として様々な波長の波動が四方に伝搬する様子が観測された。地震よりはるかに弱い台風や大規模な雷雲の直上においても、同心円状の波動が見られることがある。このような特性を解明するために考案されたトモグラフィー解析の別の応用例について紹介する。

電離層は高度 300km 付近を中心とする F 層と高度 100km 付近の E 層に大別される。TEC 観測でトモグラフィー解析を行わない場合には、プラズマが F 層の中心高度だけに存在するとモデル化して、電離層の水平構造を調べることが多かった。前節までに説明したトモグラフィー解析では、電離層高度の正しい推定を含むプラズマ密度の 3 次元構造の解明に主眼があるため、波動の解析は困難である。そのため、図 5 に示すように、電離圏を F 層と E 層の 2 層の薄い球殻モデルとモデル化して、2 つの領域における波動構造を分離して解析する試みが行われた [6]。これは高度分解能を大胆に省略したトモグラフィー解析に他ならない。

図 6 にその解析例を示す。電離圏を 1 層として単純化する場合の解析例（下図）に比べると水平分解能が少し劣るものの、F 層と E 層に現れる波動構造の分布・伝搬方向・波長などがうまく分離されることが明らかになっ

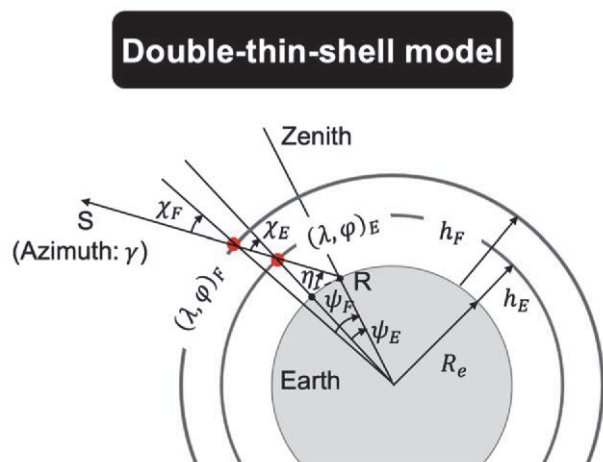


図5 二重の球殻モデルの概念図。電離層を E 層（高度 100km）と F 層（高度 300km）の 2 層構造に単純化する [6]。

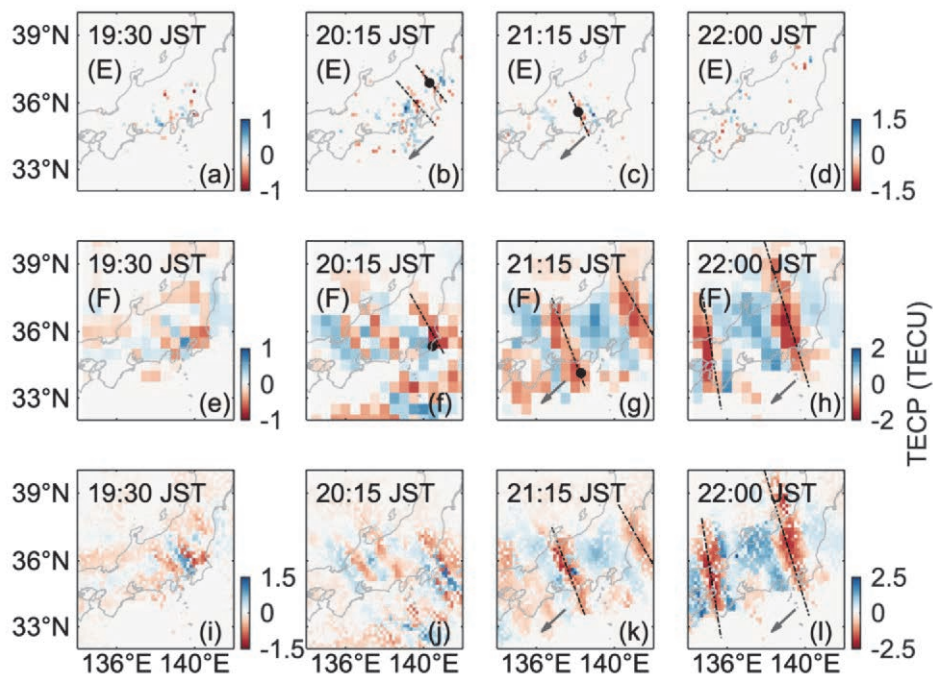


図6 二重薄隔モデルの解析例。上図:E層の電子密度水平構造、中図:F層の電子密度水平構造、下図:単層モデルによる解析結果 [6]。

た。電離圏では地球磁力線に沿ってプラズマがほぼ等電位となることから、F層とE層のプラズマの運動が電界を通じて相互作用を起こすことが多い。このような解析は電離圏プラズマの運動を解明する際に特に有効である。

5. おわりに

GNSS観測は世界中で実施されており、地震や地殻変動の研究に役立てられている。電離圏TEC観測はそこからの派生物であるが、観測領域の広さと常時観測可能な点から、電離圏研究の有力手段となってきた。本稿では、さらにトモグラフィー解析を取り入れることによって、電離圏の3次元構造の解明に役立てられることを紹介した。アッシミレーションの技術に応用した解析手法の改良は、さらに他の観測データの取り込みの端緒になりうると考えている。今後は、GNSSを活用した電離圏の3次元モニタリングが更に一般的になっていくだろう。

参考文献

- [1] Otsuka Y, Ogawa T, Saito A, Tsugawa T, Fukao S, Miyazaki S (2002) A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, *Earth Planets Space*, **54** (1):63–70. <https://doi.org/10.1186/BF03352422>
- [2] GEONET (GNSS連続観測システム), 国土地理院, https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_38136.html
- [3] Saito S, Suzuki S, Yamamoto M, Saito A, Chen CH (2017) Real-time ionosphere monitoring by three-dimensional tomography over Japan, *Navig J Inst Navig*, **64** (4):495–504. <https://doi.org/10.1002/navi.213>
- [4] Ssessanga N, Yamamoto M, Saito S, Saito A, Nishioka M (2021) Complementing regional ground

- GNSS-STECh computerized ionospheric tomography (CIT) with ionosonde data assimilation, *GPS Solution*, **25**:93. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01133-y>
- [5] Ssessanga N., M. Yamamoto¹ and S. Saito (2021) Assessing the performance of a Northeast Asia Japan-centered 3-D ionosphere specification technique during the 2015 St. Patrick's day geomagnetic storm, *Earth Planets Space*, **73**:124, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01447-8>
- [6] Fu Weizheng, T. Yokoyama, N. Ssessanga, M. Yamamoto and P. Liu (2022) On using a double-thin-shell approach and TEC perturbation component to sound night-time mid-latitude E-F coupling, *Earth Planets Space*, **74**:83 <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01639-w>

産業界の技術動向**AI スタートアップ挑戦の軌跡・展望**

株式会社ジールス

遠 藤 竜 太

1. はじめに

私はジールスという AI スタートアップを経営しています。本稿では、AI スタートアップの挑戦について赤裸々にお話しさせていただきます。スタートアップとは新しいテクノロジーやアイデアで短期的な時間軸で急成長することを目指す企業のことです。OpenAI や Tesla などまだ市場が確立されていない段階からリスクを取った挑戦をし、既存の市場を再定義する破壊的イノベーションをもたらす存在です。スタートアップにはシード期、グロース期、レイター期と呼ばれているフェーズ毎に挑戦があります。一般的にスタートアップの成功率は高くないので、次のフェーズに上がれるかは会社の生存をかけた勝負になります。各フェーズでスタートアップに求められることを私が経験してきたことも踏まえながら執筆します。

2. シード期

スタートアップの初期段階は、まだ市場がないところへ挑戦しているので、ビジネスとしてお金を稼ぐモデルが成立していません。あるのは社会を良くしたいという信念と、この技術をこう使ったら売れるはずだという仮説だけです。しかし、まだ世の中に存在しない仮説を打ち立てて挑戦するので、最初の仮説があっていることはほとんどなく、失敗を繰り返しながら少しずつ正解に近付けていくプロセスが必要です。私は若くから始めたこともあり、最初は若者らしく根拠のない自信を持っていたのですが、悉く自分の仮説が外れまくったことで自信をなくした時期もあったくらいです。

LinkedIn という世界的に有名なビジネス SNS の創業者が「起業とは崖から飛び降りて、落ちるまでに飛行機を組み立てるようなものだ」という言葉を残しているのですが、シード期のスタートアップはお金を稼ぐ力がないので、毎日キャッシュをすり減らしていきながら、仮説を一つ一つ確かめて、倒産する前に成功へのフライトをするといった意味合いで言い得て妙だと思います。

重要なのはこの技術なら世界を変えられると思えるくらい大きい仮説を持つことです。そもそも成功率の低い勝負なので、成功した時のインパクトが大きい仮説に挑むべきです。勝率 10% の勝負をするならリターンが 10 倍ではなく、リターンが 1 万倍の勝負を仕掛けるのを私はお勧めしています。

ジールスの場合は、チャットボットという人間のように機械がコミュニケーションできる技術を使ってマーケティングを変える挑戦をしています。最近は ChatGPT が話題ですので、あのような技術をイメージしてください。

店舗などで商品を購入するときは店員の接客を受けて物を買うのに、オンラインの世界では、接客が存在しない。これをインターネットの普及した現代でも EC 化率がいまだに一桁パーセントしかない理由だと捉えて、AI チャットボットを使ってオンラインの世界に接客体験を実現することで EC 化率を向上できると仮説を立てました。

実際にビジネスとして成立するまでには苦労しましたが、何度も方針転換を繰り返して、なんとか今のビジネスに辿り着いています。



図 1. チャットコマース Zeals サービス概要

2. グロース期

成功するモデルを見つけ出したとしても、ビジネスの世界では、発案者が必ずしも勝者になるわけではありません。スタートアップが仮説検証を繰り返してやっと見つけた成功モデルも資本力のある大企業が真似をして、最も普及した勝者は後発サービスだった、なんてことはよくある話です。大企業はお金も人材もスタートアップより多く持っているので、スタートアップのアドバンテージは本質的には時間です。

ユニークな技術を作り出したとしても、スタートアップが作れたものは大企業も時間さえあれば作れてしまうので、大企業が参入してくるより先に、リスクを取って成長投資をしていく必要があります。技術を磨いていくのは当然のことながら、このフェーズでは顧客の獲得や組織の拡大といったビジネス的な側面も重要になります。

私たちはモデルが成立してすぐにテレビCMを実施し、いち早くサービスを購入してくれる顧客への販売を促進しました。タレントの加藤浩次さんを起用し、印象的なCMを制作することで、業界での認知率を一気に向上させました。

さらに、会社の社員数も年々倍にして組織の規模も成長させてきました。急速に組織が大きくなるといろいろな問題が発生します。徐々に人が増えていくな、変化率も少ないので、きちんと準備をして対応できますが、年々倍になると言うことは、常に半分の人が1年未満の社員となり、誰に何を聞けばいいのかわからないといった初歩的なところから様々な課題が発生します。

本当は時間をかけて徐々に変化していく方が堅実な組織成長ができるのですが、ゆっくりしていると競合に市場を取られてしまうので、痛みを我慢しながら急拡大・急成長していくことが求められます。

近年はスタートアップの高年収化がニュースなどでも取り上げられています。これはスタートアップへの注目度が年々高まり、投資家からのお金が集まりやすい側面もありますが、一般的にスタートアップの退職率は大企業よりも高く、それほど大変な仕事だとも言えます。

その分、スタートアップに入社する人たちは、自分自身の力の発揮や成長がしやすい環境でもありま



図 2. ジールスのテレビ CM

す。解決すべきことがたくさんあっても、やる人が不足している状況なので、優秀な人が問題をどんどん解決していった、整った環境なら不可能だったスピードで成長して短期間で幹部になる人材が現れるのもスタートアップの魅力の一つです。

3. レイター期

グロース期を経て大きくなっても一安心とはなりません。むしろ、ここからがスタートアップの醍醐味のフェーズです。グロース期を市場のリーディングカンパニーとして乗り越えることができた会社は資本市場から高く評価されます。その時点で稼げている売上以上に、未来に稼ぐお金に対する期待値が大きく高まるからです。

日系大手に多い事象として”PBR（株価純資産倍率）1倍割れ”と言われるものがあります。PBRが1倍を割れているということは企業の純資産よりも評価額が低い状態であり、会社を解散して株主で資産を分けた方が分配される資産が大きいとみなされている状態です。今持っている資産より未来の資産の方が少ないと市場から思われている状態なので、今後の成長性が期待されていないことになります。

レイター期のスタートアップは真逆の状態、まだ持っている純資産は少ないが、この企業が将来、莫大の資産を持つ会社になると期待されているために評価額が高くなります。

私たちの場合、未来、AIとの対話によって物が売り買いされる時代になる、そこで求められる対話AIを最もつくりことができる会社がジールスであると考えられています。また、私たちは日本での市場のリーダーになるだけでなく、グローバル市場のリーダーになっていくことを示しているため、世界市場でのシェアを期待されています。

この期待に応えていくために、事業の多角化やグローバル展開が求められます。従前はスマートフォンの上で動く対話AIの開発を中心に行っていたところから、最近はサイネージの上で動く対話AIの開発なども行っています。手元のスマートフォンの上だけではなく、実際の店舗にサイネージを置いて、店舗への来店者にもジールスの提供する対話AIが体験できる拡張をしています。

AIの進化の速度は目覚ましく、近い未来で人の接客よりAIの接客の方が優れている時代になると考えています。この技術をここまで拡張できると、世界中で何億人という接客員の仕事をAIで代替していくことが可能になります。

現在、ジールスはこの挑戦をしている最中ですが、一つのビジネスをスケールさせた後には、その技術資産を使って更に大きい挑戦をしていくことが可能になります。

3. 終わりに

今、日本のスタートアップにはとても多くのチャンスがあります。国が産業競争力を強化していく上で、スタートアップが重要だと位置付けています。「経済財政運営と改革の基本方針2022」では、「スタートアップ」が「人への投資」「科学技術・イノベーション」「炭素・デジタル化」と並ぶ、重点投資分野とされており、政府は今後5年でスタートアップへの投資額を10倍に増やすとの目標を掲げ、スタートアップへ支援を網羅的に強化して行く方針を打ち出しています。

更に、今後AIがあらゆる産業へ入り込んでいきます。世の中の変化率が大きいほどスタートアップが勝てるチャンスが生まれるので、ここからの10年はスタートアップにとって千載一遇の時間になると思います。

日本ではまだAIスタートアップは多くないですが、アメリカでの事業展開をしている中で、AIへの熱狂を感じています。次々に新しいAIカンパニーが生まれています。アメリカの学生は最も優秀な学生が起業をし、その次にスタートアップへの就職を検討し、最後に大企業への就職を検討します。

個人的な意見になりますが、京都大学の校風とスタートアップは非常に相性が良いと感じています。事実、弊社の新卒採用も京都大学生の比率が高いです。

日本のスタートアップには理系学生よりも文系学生が多いのですが、AIの時代になり、京都大学の理系学生がAIスタートアップへ興味を持つ意義はますます高まっていると思います。

大変な仕事ではありますが、どんな仕事よりもやり甲斐や意義を感じることでできる仕事でもあるので、ご興味を持ってくださった方は是非これを機会にスタートアップについて調べてみてください。

新設研究室紹介

集積機能工学講座（米澤研究室）

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

「集積」が創り出す新たな可能性

集積機能工学研究室は、これまで掛谷准教授・後藤准教授の下で、超伝導・テラヘルツ光・真空電子工学の研究を行っていました。2023年春に米澤が教授として加わりましたので、「新設研究室」の枠で改めて研究室の紹介をさせていただこうと思います。

「集積機能工学」というと集積回路を想像される方も多いと思いますが、我々はこの「集積」を電子やイオンという身の回りの世界を形成する粒子を集積することと捉えています（図1）。これらの粒子の個々の性質は非常によく理解されていますが、これらの粒子を多数集積すると、個々の粒子の性質だけでは演繹できないような新奇な性質・機能性・複雑性が生じます。当研究室ではこのような性質について基礎と応用の両面から研究しています。

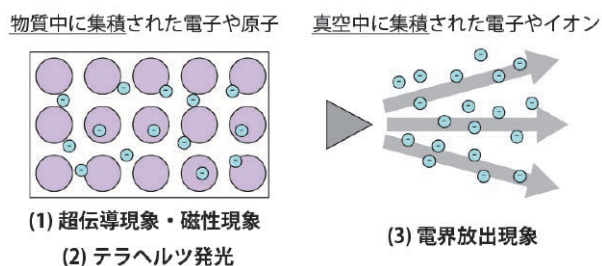


図1：集積機能工学研究室で扱う研究対象。

超伝導・磁性の新奇機能性

当研究室を代表する研究テーマの一つが、超伝導です。この超伝導は、電子が「電子対」を形成し、その量子的な性質が物質全体にわたって顕れることによって電気抵抗がゼロになるという、驚くべき現象です。これは、まさに電子一つの性質だけでは全く想像がつかないような現象です。また、超伝導にも多様な種類があることが明らかになってきており、例えば超伝導になることによって電子が磁気的な性質を自ら獲得するという「カイラル超伝導」などの珍種が見つっています。米澤らは最近、超伝導電子対が特定の方向

性を持つようになる「ネマティック超伝導」（図2）を発見し、超伝導の新種として注目を集めています。また、磁性現象も、物質中の電子やイオンが形成する微小な磁石（磁気モーメント）が複雑な相互作用をすることによって生じる創発現象です。強磁性などは紀元前から知られていますが、現在でも様々な磁性現象が発見されており、新規材料研究のフロンティアであるといえます。

我々は、このような超伝導現象・磁性現象の基礎的性質や応用可能性を、超高感度の磁気光学測定技術やベクトル磁場印加といった独自性の高い実験技術を武器に研究し、世界をリードする成果を上げることを目指しています。

高温超伝導体からのテラヘルツ発光

「ミルフィーユ」のような層状構造を持っている銅酸化物の高温超伝導体がありますが、この物質に

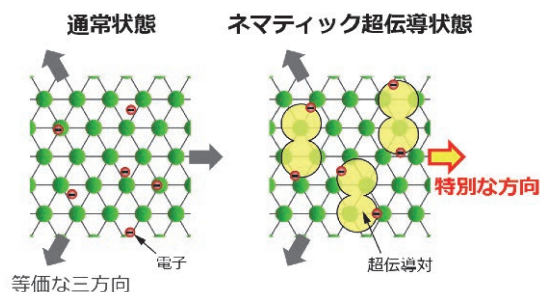


図2：超伝導電子対が特定の方向性を持つようになるネマティック超伝導の模式図。

電圧を印加すると、それだけでテラヘルツ光が発生することが近年明らかになりました（図3）。掛谷はその研究分野のフロンランナーとして世界的に活躍しています。このテラヘルツ発光も超伝導と電磁気の複雑な協奏によって成り立つ極めて興味深い現象であるとともに、広帯域のテラヘルツ光源として期待される次世代技術でもあります。現在、その強度や周波数特性を向上させたり、逆にテラヘルツ光を使って超伝導の新奇な性質を明らかにしたりする研究などを進めています。

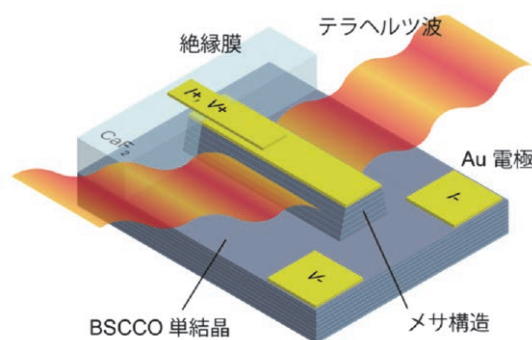


図3：高温超伝導体 BSCCO からテラヘルツ光の発生メカニズムの模式図。

真空電子工学

一方、真空中に集積された電子やイオンも興味深い研究・応用の対象であり、後藤はこのような真空中の荷電粒子を利用するという真空電子工学の第一人者です。例えば、図4のようなフィールドエミッタアレイは、ミクロンサイズの「現代版の真空管」と考えることができます。この技術の大きな特徴は、高強度の放射線の下でも動作することが期待され、福島原子炉廃炉作業や、加速器、宇宙環境など、非常に過酷な環境で動作させるための電子デバイスとして用いることを目指しています。

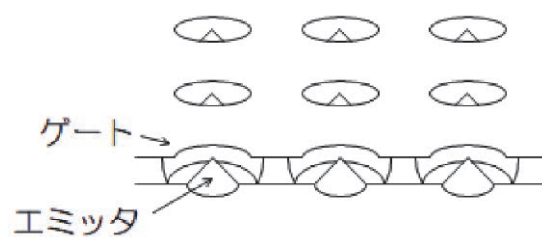


図4：真空電子デバイスの一つであるフィールドエミッタアレイの模式図。

終わりに

当研究室では、このように異なった研究分野の研究者が互いに刺激し合いながら研究を進めています。専門分野と違う研究内容に身近に触れることで新たな気づきが得られることは少なくありません。そのような分野間の刺激から、他に例のない研究展開を行える研究室になっていければと思っています。

教員が増えたことによって今年度から配属される学生の数も増え、研究室はまさに活性化の最中です。さらに、2024年1月に助教の池田氏が着任し、人材の「集積」がさらに進んで研究アクティビティーが向上しています。研究面だけでなく、電気電子工学科の野球大会にチームを出せるようになったり、新たな研究室のスポーツイベントを行ったりするなど、研究室の新たな章の幕開けをメンバー全員で楽しんでいます。集積機能工学研究室の今後の発展に是非ご期待ください。

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

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 (米澤研) *

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)

知能情報学コース

知能メディア講座言語メディア分野

知能メディア講座コンピュータビジョン分野 (西野研)

通信情報システムコース

通信システム工学講座ディジタル通信分野 (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)

システム科学コース

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

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 (海老原研)

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/>

入力むだ時間系に対する補正型状態予測制御によるロバスト性の向上

1. 入力むだ時間系と状態予測制御

入力がその影響を及ぼし始める前に通信遅延や輸送遅延を伴う系は枚挙に暇がないが、加熱冷却や薬物投与あるいは政策といった入力が入力作用部位に浸透するまでに要する時間を入力むだ時間ととらえることもでき、そのような制御対象は全体として図1における G のようにとらえることができる。ここで D は $v(t) = u(t - L)$ となる要素であり、これを（入力）むだ時間要素、 L の値はむだ時間と呼んでいる。一方、 P は D を仮想的に取り払って得られる集中定数部分である。このような入力むだ時間系に対するフィードバック制御系は図1全体のようになり、むだ時間要素が閉ループ内に存在する。このことから、入力むだ時間が長くなるとそれを無視したフィードバック制御では所望の動作が期待できなくなる。この問題を回避した有用な制御方策として、制御器 C の構成をむだ時間要素 D の存在にあわせて工夫し、図1の制御系を等価的には D が閉ループの外に取り出された形とする考え方が古くから知られている。例えばスミス制御系と呼ばれるものが一例であるが、不安定な制御対象に対しても適用可能な方策としてさらに発展させた考え方として、状態予測制御が知られている。

状態予測制御の考え方は概ね以下のように説明できる。制御入力 $u(t)$ は、現在時刻 t において制御器 C が生成したものであるが、それが入力むだ時間要素 D の中に蓄積されつつ、時間 L だけ経過後に制御対象の集中定数部分に伝わって $v(t)$ となる。このことは、 $v(t)$ に関する限り、現在時刻 t よりも時間 L だけ未来までの振る舞いを事前に知っていることを意味する。よって制御器 C は、現在時刻 t よりも時間 L の分だけ先回った P の振る舞いを考慮でき、 P にとって未来の時刻 $t+L$ において好ましいはずの入力を現在時刻 t において $u(t)$ として定め得る、というものである。

2. 補正型状態予測制御とロバスト性の向上

上述の状態予測制御の考え方は単純であるが、 P の完全に正確なモデルが得られていて未来を完璧に予知できる、とする考え方に立っている。しかし P のモデルが正確に得られることは現実的にはあり得ないため、「 P のモデルを利用すれば未来を完璧に予知できるとしても、あえてそうはせずに“なまらせた形での控え目な未来予測”に留めておく」方が、現実には必ず存在するモデルの誤差のもとでの制御性能の劣化を抑えられる（ロバスト性に寄与できる）のではないかと考えられる。これが本稿で紹介している補正型状態予測制御の考え方で、大ざっぱには以下のように説明できる。

まず、モデルを利用することで時間 L 分だけ先を予知することを通して得られる（従来の）状態予測制御における制御入力を $u(t) = u_L^*(t)$ と表すことにするとき、（補正項がひとつの場合なら）例えば以下の式に沿って、実際の制御入力をあえて $u(t) \neq u_L^*(t)$ とするということである。

$$u(t) = u_L^*(t) + M_1[u(t - L_1) - u_L^*(t - L_1)]$$

現在時刻 t よりも L_1 だけ前の時点であえて u_L^* からずらして利用した制御入力の分だけ適当な係数 M_1 を利用して現在時刻での $u(t)$ をやはり $u_L^*(t)$ からあえてずらしている。このような補正の考え方によりモデルが持つ誤差の影響を大きく改善することができる様子を、最後に図2に示す。

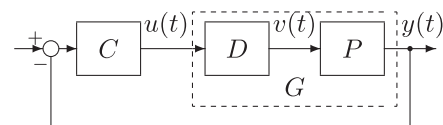


図1 入力むだ時間系の制御

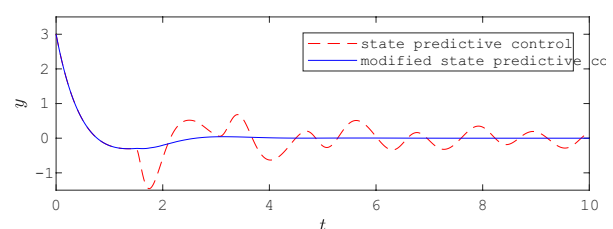


図2 補正型状態予測制御によるロバスト性向上

生体医工学講座 複合システム論分野 (土居研究室)

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

「細胞分化比率調整を表す大域結合細胞集団モデルの非線形ダイナミクス」

生物は、その発生過程において細胞分裂を繰り返しながら細胞数を増やしていくが、途中で均質な細胞集団から細胞の性質が異なる細胞に分化する。細胞性粘菌 (cellular slime mold *Dictyostelium discoideum*) は生物発生と細胞分化を調べるための代表的な生物であり、その生活環の中で複数の細胞が集合しナメクジ状の塊 (移動体) を形成する。この移動体の後部の細胞は将来胞子になる予定胞子細胞に分化し、前部の細胞は、胞子を支える柄になる予定柄細胞に分化する。また、これら2種類の細胞間の比率が一定の範囲内に調節されていることも知られている。従来、この分化比率の調節は、細胞が移動体のどこに位置しているか (前部か後部か)、すなわち細胞の位置情報によって行われていると考えられてきた。ところが、分化する前の細胞集団を試験管内で振盪培養する (したがって、前も後ろもない状態で) 実験を行っても、分化比率が調節されることが示された。この位置情報によらない細胞分化比率調節を説明するために提案されたのが、以下の大域結合細胞集団モデルである：

$$\frac{dx_k}{dt} = \rho - \mu x_k + \frac{x_k^2}{y_k}, \quad \frac{dy_k}{dt} = x_k^2 - y_k + D(z - y_k), \quad \frac{dz}{dt} = -\frac{D'}{n} \sum_{k=1}^n (z - y_k)$$

ここで、 x は細胞内における活性化物質の濃度を表し、 y は不活性化 (抑制性) 物質の濃度を表す。添字 k は n 個の細胞集団中の k 番目の細胞に関する変数であることを示す。抑制性物質のみが、細胞が置かれた環境と細胞内とを (拡散により) 出入りし、 z は環境における抑制性物質の濃度を表す。 D と D' はこれらの拡散に関わる係数である。 z に関する式から分かるように、各細胞は環境を通して大域的に (位置関係によらずに) 相互作用している。

図1に上記微分方程式で $n = 20$ としたときの数値シミュレーション結果を示した。初期値は (均一ではなく)、細胞集団が6個と14個の部分集団に分かれるように設定した。 $y_1(t), \dots, y_6(t)$ を赤い線で、 $y_7(t), \dots, y_{20}(t)$ を黒い線で表し、重ねて表示した。興味深いことに、細胞集団は $t = 50$ 頃まで (2つの部分集団ではなく1つの均一な集団になって) 同一の振動状態を示している。その後、 $t = 250$ 頃までに細胞集団は (初期値で設定したのと同様の) 6 : 14 (それぞれ赤と黒の線) の比で2つの部分集団に分かれた平衡点に落ち着くように見える。しかし、その後、6個の部分集団のうち2個がさらに14個の部分集団の方に合流し、最終的な分化比率は (初期状態とは異なる) 4 : 16 に落ち着く。現在、当研究室では、このようなシミュレーション結果がどのような非線形ダイナミクスによって生じたかを明らかにするために、細胞集団の次元を低減した「縮約モデル」や、その分岐解析を用いて研究を行っている。現時点では、ダイナミクスの全貌は明らかにはなっていないが、少しだけコメントすると： $t = 50$ 頃までに見られる細胞集団全体の同期振動は、サドル型の不安定周期解の存在によるものと考えられる。このように、非線形系においては不安定な解がシミュレーションの過渡状態において見られることはしばしばであり、不安定な解を見つけられる分岐解析は極めて有効である。

図1に上記微分方程式で $n = 20$ としたときの数値シミュレーション結果を示した。初期値は (均一ではなく)、細胞集団が6個と14個の部分集団に分かれるように設定した。 $y_1(t), \dots, y_6(t)$ を赤い線で、 $y_7(t), \dots, y_{20}(t)$ を黒い線で表し、重ねて表示した。興味深いことに、細胞集団は $t = 50$ 頃まで (2つの部分集団ではなく1つの均一な集団になって) 同一の振動状態を示している。その後、 $t = 250$ 頃までに細胞集団は (初期値で設定したのと同様の) 6 : 14 (それぞれ赤と黒の線) の比で2つの部分集団に分かれた平衡点に落ち着くように見える。しかし、その後、6個の部分集団のうち2個がさらに14個の部分集団の方に合流し、最終的な分化比率は (初期状態とは異なる) 4 : 16 に落ち着く。現在、当研究室では、このようなシミュレーション結果がどのような非線形ダイナミクスによって生じたかを明らかにするために、細胞集団の次元を低減した「縮約モデル」や、その分岐解析を用いて研究を行っている。現時点では、ダイナミクスの全貌は明らかにはなっていないが、少しだけコメントすると： $t = 50$ 頃までに見られる細胞集団全体の同期振動は、サドル型の不安定周期解の存在によるものと考えられる。このように、非線形系においては不安定な解がシミュレーションの過渡状態において見られることはしばしばであり、不安定な解を見つけられる分岐解析は極めて有効である。

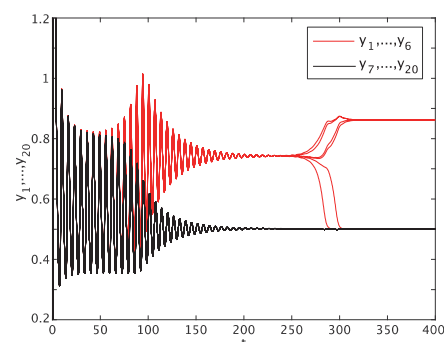


図1：細胞集団の「分化」

参考文献

- [1] 川衛, 土居: 大域結合細胞集団の分化比率調節モデルに対する縮約モデルを用いた解析, 電子情報通信学会技術研究報告, NLP2023-79, pp.79-84 (2023).
- [2] S. Kawae, S. Doi: Comparison between a population model of cells interacting through a common pool and its reduced model, Proc. of NOLTA2023, pp.88-91 (2023).
- [3] R. Tsuneki, S. Doi, J. Inoue: Generation of slow phase-locked oscillation and variability of the interspike intervals in globally coupled neuronal oscillators, Math. Biosci. Engg. 11, pp.125-138 (2014).

生体医工学講座 生体機能工学分野

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

「低磁場 MRI 装置を用いた脳機能計測の試み」

脳機能計測法には脳波・脳磁図をはじめ様々な手法が存在するが、その中でも機能的 MRI (fMRI) は MR 画像のコントラストを脳の活動に応じて変化させる手法である。現在、fMRI は血行動態に基づいてコントラストを変化させる BOLD (Blood oxygenation level dependent) 法が主流であり、高磁場 MRI にて脳機能の画像が取得されている。しかし、BOLD-fMRI は (1) 血行動態応答が実際の神経活動の賦活から数秒遅れて表出する (2) 高磁場 MRI (3 T 以上) のみでしか運用できないという課題を有している。前者は計測上の大きな制約であり、fMRI へのアクセシビリティを制約している。そこで当研究室では、低磁場・超低磁場 MRI においても fMRI が実現できないか模索している。これを実現することで、低コスト・省スペースな装置においても脳機能計測が可能となり、fMRI の更なる臨床応用が期待される。しかし、低磁場環境下では BOLD 効果を観測できないため、スピンロックシーケンスと呼ばれる神経磁場を磁気共鳴現象により画像コントラストに変換するシーケンスに注目した。図 2 に示すように、静磁場により体内に生じたプロトン磁化を 90° パルスで倒し、同相方向にスピンロックパルスを照射する。この時静磁場方向 (z') に計測対象である振動磁場が存在するとき、磁気共鳴が生じプロトン磁化が歳差運動する。これを画像化することで、計測対象磁場を画像コントラストとしてとらえることが可能となる。この手法は静磁場強度に依存しないことから低磁場・超低磁場 MRI での運用が可能であり、加えて BOLD 効果の混信を避けるためにも低磁場・超低磁場 MR 装置での運用が好まれる。

当研究室では、ファントムと呼ばれる生理食塩水で満たされたボトルを対象に、共用装置である 0.3-T 低磁場 MRI 装置を用いて有効性を検証してきた。Spin-locked M_z と呼ばれるシーケンスを用いて 1.50 nT の磁場を検出し、脳機能計測の可能性を明らかにした [1]。しかし、様々な脳活動を捉えるためには感度の改善を行う必要があり、畳み込みニューラルネットワークを用いた画像のノイズ低減を試みている。今後は、MR の輝度分布は Rice 分布に従うことから事前分布として与え、ベイズ推定を用いたアプローチを取り入れるなどして更なる検出限界の改善を試みるとともに、ヒトを対象として世界初の低磁場 MRI による脳機能計測を実現する予定である。

- [1] H. Ueda, Y. Ito, T. Oida, Y. Taniguchi, and T. Kobayashi, "Detection of tiny oscillatory magnetic fields using low-field MRI: A combined phantom and simulation study", *J. Magn. Reson.*, Vol. 319, 106828, 2020.

High-field

- High signal-to-noise ratio
- Available to the BOLD-fMRI



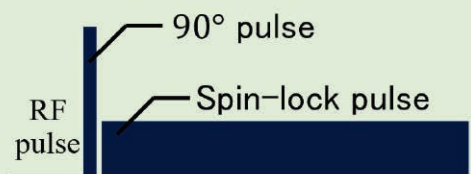
Low-field, Ultra-low-field

- Lower cost
 - Permanent magnet
 - Electromagnet
- Suppression of the BOLD effect



図 1 高磁場 MRI と低磁場・超低磁場 MRI の特徴

Pulse sequence diagram



Magnetization dynamics

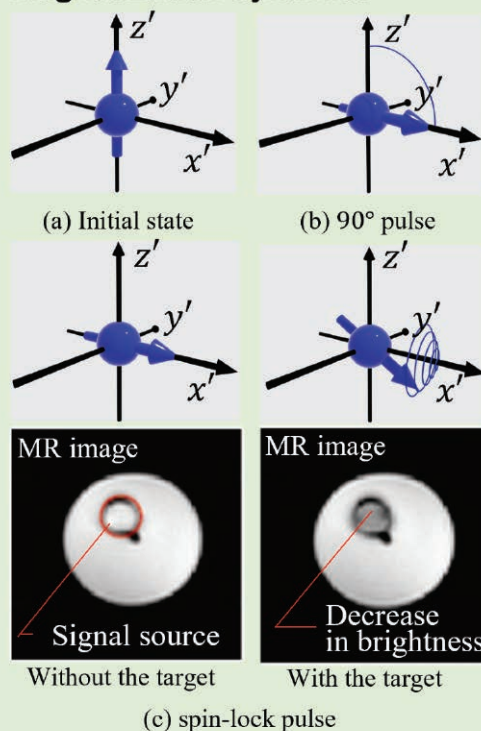


図 2 スピンロックシーケンスのシーケンス図とプロトン磁化の挙動

電磁工学講座 電磁回路工学分野

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

「コンバータの大域的な特性に基づく安定な P2P エネルギー伝送」

図1左端図のような双方向のDC-DCコンバータは、PWM変調(Pulse Width Modulation)に基づいて2個のスイッチを相補的に高速に入り切りすることで、直流電圧の昇圧、降圧などを実現する。PWM変調のデューティ比 a をPWM周期より十分長い離散時刻 k によって変化させると、2ポート間の理想的な特性は次式で表現される。

$$\begin{bmatrix} v_1(k) \\ i_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\alpha(k) & 0 \\ 0 & \alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2(k) \\ i_2(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

これは、交流の理想変成器と同じ特性を示しており、時刻 k に応じて巻き線比を変化させる時変変圧器を表している。最近のSiCやGaNなどの高速デバイスの発展に伴い、PWM周波数が上がり、時変変圧器としての特性も高速化してきている。

このように、エネルギー伝送の自由度を飛躍的に上げるコンバータであるが、安定なエネルギー伝送には注意が必要である。例えば、図1中央図のようにポート1にテブナン等価電源をつなぎ、ポート2の動作点を1個定めた場合、ポート1の動作点は図1右端図のように2個存在する。つまり、式(1)は一見、理想変成器のように見えるが、実際に動作点を定めるデューティ比 a は2個存在し、安定に動作させるためには、両 a の大域的な振舞いを考慮する必要がある。

P2P(Peer-to-Peer)エネルギー伝送は送り手と受け手がミリ秒のスケールで同期しながらエネルギーの授受を行う方法であるが、この場合も送り手と受け手それぞれの大域的な特性を考えなければならない。図2は離散ダイナミクスを表現する写像の縮小率 μ に基づき大域安定を実現し、実験によりその妥当性を確認したものである[1]。このようなDC-DCコンバータの非線形2ポート回路としての大域的な特性は一見複雑に見えるが、相反性に注目することでその構造が見えてきており、より一般の非線形2ポート特性の設計手法の確立を目指している。

参考文献 [1] K. Yamamoto, T. Hisakado, M. Islam, and O. Wada “Global stabilization for nonlinear two-port characteristics of bidirectional DC/DC converter and its application to peer-to-peer energy transfer,” NOLTA IEICE, vol. 14, no. 3, pp.292-307, 2023.

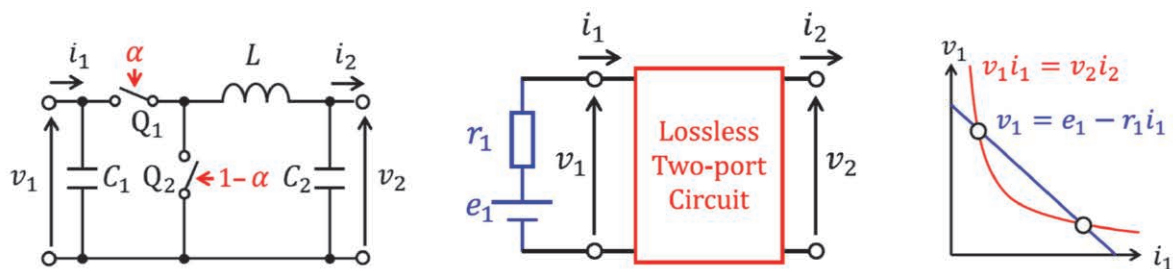


図1 双方向DC-DCコンバータと大域的な特性。1個の2次側動作点に対応する2個の1次側動作点。

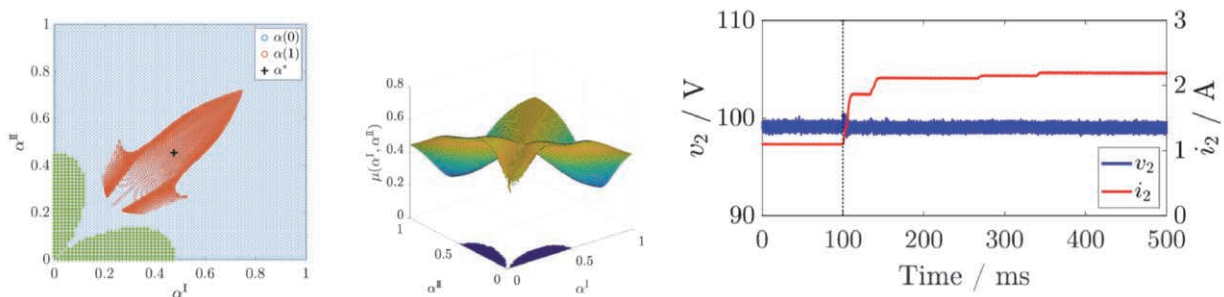


図2 写像の縮小率 μ に基づく大域安定の構成例とP2Pエネルギー伝送の実験例

電子物理工学講座 応用量子物性工学分野（竹内研究室）

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

「世界最高深さ分解能での量子光干渉断層撮像に成功」

光干渉断層撮像（OCT）は、光で対象の断層構造をイメージングすることができる技術で、産業から医療まで幅広く用いられています。具体的には、網膜などさまざまな組織の診断技術として急速に普及しています。また、肺や消化管の表層組織への応用も進められており、早期がんの診断などへの検討も進められています。OCTの深さ分解能は、用いる光源の帯域の逆数に比例します。したがって、より広帯域な光源を用いれば、深さ分解能を向上させることができます。しかし、OCTには、分散の影響により深さ分解能が低下するという問題があります。そのため、測定対象に分散がある場合、帯域を拡げすぎると分解能が劣化し始めるため、測定対象の分散の大きさで到達可能な分解能が決まってしまう。この理由により一般的なOCTでは、深さ分解能が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ に制限されてきました。

量子光干渉断層撮像（量子OCT）は、OCTの量子版といえる技術ですが、群速度分散の影響を受けないという大きな特長があります。量子OCTは、周波数でもつれ合った光子対の2光子量子干渉現象を利用することで、群速度分散（厳密には偶数時の分散）の影響が物理的にキャンセルされるため、帯域を拡げればそれだけ深さ分解能を高めることができます。しかし、これまで量子OCTでイメージングを実現した研究では、深さ分解能の最高値は、 $6 \mu\text{m}$ 程度でした。

今回、私たちは、もつれ光子対生成部を最適化することで、広い帯域を持つ周波数もつれ光源を開発、世界記録となる、 $2.2 \mu\text{m}$ の分解能での量子OCTイメージングに成功しました。そして、このイメージング結果が、分散媒質（ZnSe）によってほぼ影響を受けないことを実証しました。

図1(a)に本実験で用いたサンプルを示します。サンプルには、ステップ状に加工したシリカ基板にアルミを蒸着したものを我们用いました。図1(b)-(e)がイメージング結果になります。図1(b)と(c)は、通常のOCTで測定した結果です。図1(b)は、分散媒質がない場合で、ステップ構造がはっきりと見て取れます。一方で、図1(c)は、 1mm 厚のZnSeを分散媒質としてサンプル前に設置した場合です。分散の影響により、分解能が著しく低下していることが分かります。図1(d)と(e)は、量子OCTで測定した結果です。図1(d)は分散媒質がない場合、図1(e)は分散媒質がある場合ですが、どちらの場合もステップ構造がはっきりと確認できます。実際に、量子OCTの深さ分解能を評価した結果、分散媒質がない場合で、 $2.2 \mu\text{m}$ 、ある場合で $3.1 \mu\text{m}$ とほぼ変化していないことが分かりました。

本研究は、文科省Q-LEAPのご支援を受けて行われました。

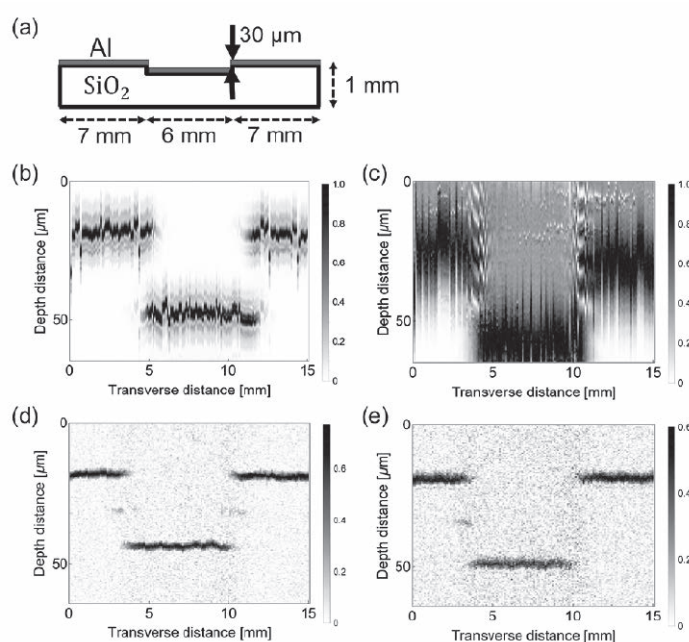


図1. 光干渉断層像

参考文献：K. Hayama, B. Cao, R. Okamoto, S. Suezawa, M. Okano and S. Takeuchi, “High-depth-resolution imaging of dispersive samples using quantum optical coherence tomography” *Optics Letters*, **47**, 4949 (2022).

電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

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

「酸化抑制プロセスによる SiC MOSFET の特性向上」

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、同耐電圧の Si パワーデバイスと比較すると通電時のオン抵抗（損失に直結）を約 1/500 に低減可能です。SiC パワー MOSFET の量産が開始され、様々な電気機器で省エネ効果が実証されていますが、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）と比べると著しく劣っています。特に、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 チャンネル部分の抵抗が全オン抵抗の半分以上を占めています。したがって、SiC MOS 界面特性の向上は、SiC パワー MOSFET の高性能化、低コスト化、高信頼化を進める上で大変重要な課題となっています [1]。

SiC MOSFET を作製する際、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。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 [2,3]。図 1 に提案するプロセス（ H_2 -CVD-NO）で作製した酸化膜 / SiC 界面の欠陥密度と n チャンネル MOSFET 特性から得たチャンネル移動度の p 型ボディ領域のアクセプタ密度依存性を示します [4]。従来プロセス（Ox-NO）と比べて界面欠陥密度を顕著に低減でき、チャン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 で反転チャンネルが形成される $(1\bar{1}20)$ (A 面)、 $(1\bar{1}00)$ (M 面) 上では高濃度ドーピングされた 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フィン型 MOSFET において約 $270 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 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 1080 V、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成功しています [5]。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 は電気自動車のモータ駆動用インバータや急速充電器に搭載されて市場が急速に拡大しており、上記の成果は、SiC の車載応用と省エネ化を加速するものと期待されています。

- [1] T. Kimoto et al., *Appl. Phys. Express*, **13**, 120101 (2020). [2] T. Kobayashi et al., *Appl. Phys. Express*, **13**, 091003 (2020).
 [3] K. Tachiki et al., *Appl. Phys. Express*, **14**, 031001 (2021). [4] K. Tachiki et al., *Appl. Phys. Express*, **15**, 071001 (2022).
 [5] F. Udrea et al., *Proc. IEEE 34th Int. Symp. on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD 2022)* (Vancouver, 2022), 2-1.

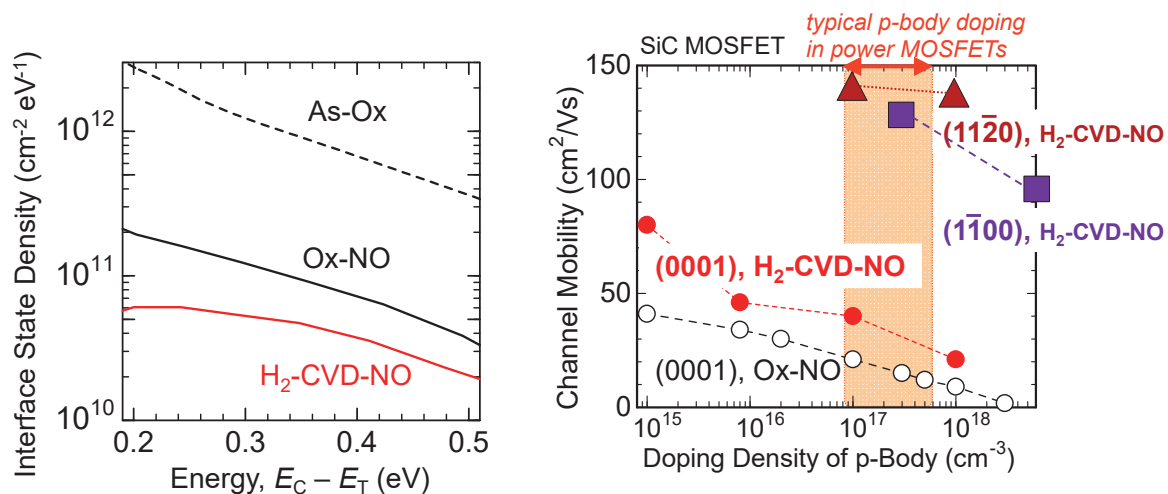


図 1 提案プロセス（ H_2 -CVD-NO）で作製した酸化膜 / SiC 界面の欠陥密度と n チャンネル MOSFET 特性から得たチャンネル移動度の p 型ボディ領域アクセプタ密度依存性

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

プロトンポンプタンパク質分子の表面に局在化した水分子分布の可視化

タンパク質分子の表面に局在する水、いわゆる水和殻は、タンパク質の内部に存在する水分子と同様に、タンパク質分子の高次構造の維持とそれらの生物学的活動に重要な役割を果たしている。われわれが開発した周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) は、生体内と同様の生理環境下におけるタンパク質の構造を高分解能でイメージングすることができ、さらにタンパク質表面近傍の3次元空間の力分布を計測することで水和構造をも可視化できる。今回、塩泥地に繁殖する高度好塩菌が紫膜と呼ばれる細胞膜中に含む膜タンパク質、バクテリオロドプシン (bR) を対象とし、その表面近傍の水和構造計測を行った。高度好塩菌は膜内外のプロトン濃度と電位差とを用いて、エネルギー源となるアデノシン3リン酸 (ATP) を合成することで生命を維持しており、bR はプロトンを細胞膜の内側から外側へと汲み出して濃度勾配を形成するプロトンポンプの機能を担っている。bR はプロトンポンプ機能発現時に表面の水和構造を変化させて、プロトンの輸送経路を確立していると考えられており、プロトンポンプ近傍の水分子の局所分布は、プロトンポンプ機能と密接に関連しているといえる。

図1 (a) はFM-AFM による3次元空間力分布計測 (3D フォースマッピング) の概略図である。FM-AFM では、探針と試料との相互作用力を、カンチレバーの共振周波数シフト (Δf) として計測する。3D フォースマッピングでは、探針を試料に対して鉛直方向 (z 方向) に接近・離反させ、 Δf の距離依存性を $x-y$ 面内の各走査ピクセルで繰り返す。このとき、探針が試料に衝突しないよう、 Δf があらかじめ設定した閾値を超えると、探針を試料から直ちに離反させる。図1 (b) および図1 (c) は、bR を含む紫膜上で取得した3次元データから抽出した、紫膜表面からおよそ0.8 nm および1.5 nm の高さの $x-y$ 平面内における Δf 像である。bR はAヘリックス～Gヘリックスまでの7本の α ヘリックスで構成されているタンパク質であり、bR が3つ集まって一つの集合体を形成している (3量体)。この3量体は格子定数約6.2 nm で六方格子状に配列した2次元結晶を形成することが知られているため、 Δf 像は単位格子で平均化した。図1 (b) および図1 (c) において、bR 三量体に対応する3つの輝点を確認できるが、模式図に示したように、図1 (a) の輝点の位置はEヘリックスとFヘリックスの間をつなぐ部分 (E-F ループ) に対応していることから、E-F ループの変形に伴う斥力的相互作用による Δf の変化によるものと考えられる。一方、図1 (c) の輝点は、C-D ループ上かつタンパク質の最表面よりさらに遠方に位置していることから、この部分に局所的に多く存在する水分子による水和構造力によるものであることが示唆される。

参考文献

- 1) S. Ido, K. Kobayashi, N. Oyabu, Y. Hirata, K. Matsushige, and H. Yamada, Nano Lett. 22, 2391–2397 (2022).

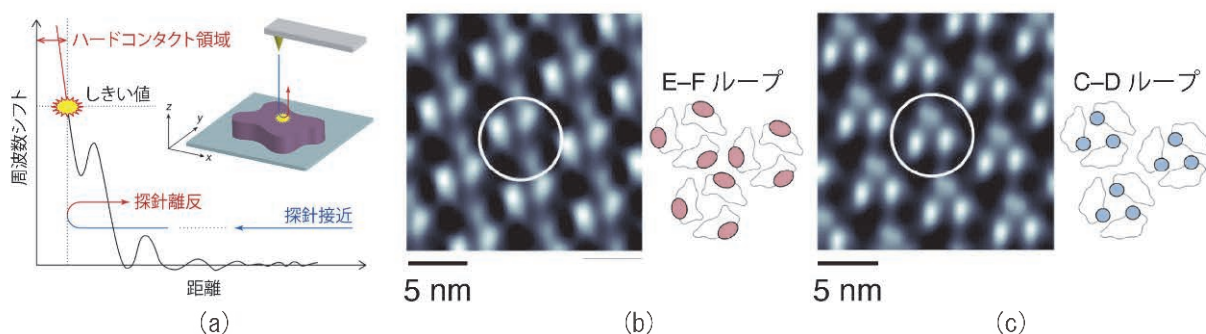


図1: (a) 3次元フォースマッピングの概略図. (b) および (c) はバクテリオロドプシンを含む紫膜の表面から約0.8 nm および1.5 nm の高さにおける周波数シフト像と輝点の対応する位置を示す模式図である.

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/>

「スマート製造におけるゲームチェンジに向けた高輝度フォトニック結晶レーザー」

近年、スマートモビリティやスマート製造に代表される超スマート社会 Society 5.0 の実現に向けて、デジタルツインや機械学習などのデジタル技術とともに、レーザー技術の活用への関心が高まっている。なかでも、半導体レーザーは、小型・低コスト・高効率という特長を持ち、これらの新しい応用のための最も有望なレーザー技術の1つと考えられている。しかしながら、従来の半導体レーザーでは、光出力増大のためにデバイス面積を拡大すると、共振モード（電磁界分布）に複数の腹をもつ多数の高次モードが発生し、ビーム品質が劣化するという課題がある。その結果、輝度（単位面積、単位立体角当りの光出力と定義され、出射ビームが如何に広がらずに伝搬出来るか、また、如何に強く集光可能かを表す指標）の増大に限界（ $100 \text{ MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 程度以下）が生じ、上記の応用におけるボトルネックとなっていた。我々は、このような課題を解決し、スマートモビリティやスマート製造を始めとして、通信、医療・生命科学、さらには宇宙応用に至るまで、様々な展開を可能とする新たな半導体レーザーとして、光の波長程度の周期構造をもつフォトニック結晶を活用したフォトニック結晶レーザー [1] の研究・開発を行っている。ここでは、そのなかでも、スマート製造応用に向けた高輝度フォトニック結晶レーザーについて紹介する。

スマート製造の核となるレーザー加工においては、上述の課題から半導体レーザーを直接活用することは出来ず、現状、 CO_2 レーザーやファイバーレーザーなどの、高輝度（ $\geq 1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）ではあるものの、大型・高コストで低効率のレーザー（図1左）が用いられている。フォトニック結晶レーザーにおいて、これらの大型レーザーに匹敵する高出力・高輝度動作を実現出来れば、スマート製造分野にゲームチェンジ（＝大型レーザーの一新）を起こせるものと期待出来る（図1右）。さらに、これは昨今のDX化や、カーボンニュートラル等にも資するものであると言える。このような目標に向けて、フォトニック結晶レーザーの高輝度動作実現のために、最近では、図2に示す2重格子フォトニック結晶を用いて、その結晶内部での面内及び面垂直方向の光回折効果（より専門的には、エルミート / 非エルミート性に基づく光結合）の高度な制御によって、従来の半導体レーザーの出射面積（数 μm 程度）と比べて、極めて大面積である直径3mm 以上においても単一の共振モードでの動作を可能とした。その結果、連続駆動において光出力50W 級の高ビーム品質動作により、大型レーザーに匹敵する輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を実現し [2]、さらに図3に示すように、金属板の切断加工までもが可能となった [3]。以上の結果は、スマート製造分野における大型レーザーの一新、すなわち、ゲームチェンジが開始可能な段階に達しつつあることを示唆するものである。

参考文献：[1] S. Noda, *et al.*, *Adv. Opt. Phon.* **15**, 977 (2023). [2] M. Yoshida, S. Noda, *et al.*, *Nature*. **618**, 727 (2023). [3] 勝野, 野田他, 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 22a-A308-9 (2022).

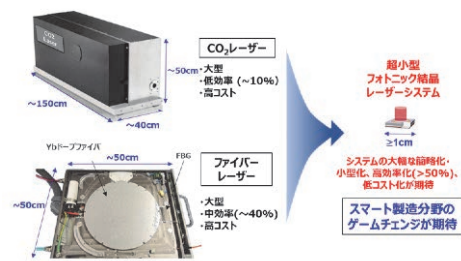


図1. フォトニック結晶レーザーによるスマート製造分野のゲームチェンジ（＝大型レーザーの一新）

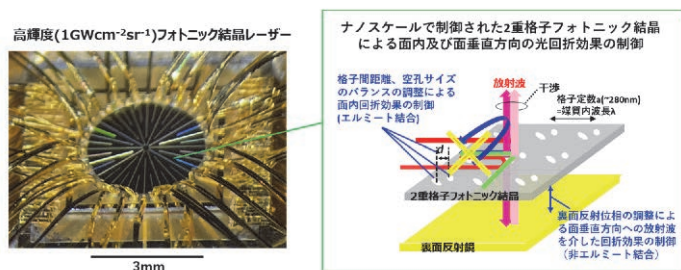


図2. 2重格子フォトニック結晶による面内及び面垂直方向の光回折効果の制御を活用した高輝度フォトニック結晶レーザー

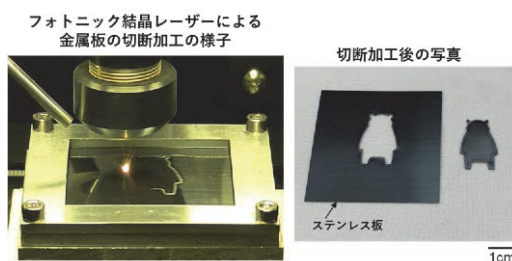


図3. フォトニック結晶レーザーによる金属板切断の実証（熊本で開催された学会にちなんだ形状に加工し、本研究室の博士課程の学生が発表して注目を集めた）

量子機能工学講座 量子電磁工学分野

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

イッテルビウム・単一イオントラップ装置の長時間連続運転にむけて

イオンを電磁場によって超高真空中の狭い空間に閉じ込める装置のことをイオントラップという。閉じ込めたイオンの運動エネルギーは、レーザー冷却を適応すると大幅に低下させることができ、イオンの運動範囲を光の波長よりも狭くして、光に対してもドップラーシフトを除去することができる。この冷却イオンは周りの影響をきわめて受けにくい、きわめて小さな不確かさの光領域の原子時計（光時計）や、量子計算機のプラットフォームとして利用されている。我々も光領域でのラム・ディッケ領域閉じ込めをほぼ達成している。ここで、イオンはトラップポテンシャル中で振動しているので、振動によってスペクトルに生じるサイドバンドの大きさから、運動エネルギーを評価できる。イオンは1個で信号が小さいため、サイドバンド全体を取得するには数時間必要となることがわかってきた。もちろん、光時計や量子計算機の実用機まで見すれば、メンテナンスフリーで長時間連続運転可能な装置が必要不可欠である。しかし、現状でも1回の測定に数時間を要するということは、この先へ研究を進めるためには、装置を長時間連続運転することが必要なことを意味する。このような背景のもとに、長時間連続運転化を図りながら、イオントラップの研究を進めていくこととした。

本研究では、イオンを生成するための2台を除いても6台ほどのレーザーを、周波数安定化のフィードバック制御をかけた状態で使用している。1時間程度の暖機運転後、各レーザーは制御がかかった状態で1～2時間の連続運転は可能である。しかし、レーザーは複数台同時に必要となるため、制御が外れたレーザーの再安定化を次々手動で行いながら実験を続けるのが実情であった。

対策としてまず必要なことは、レーザーを長時間モードホップさせないことである。我々は、半導体レーザーの外部に回折格子を設置し、その1次回折光をレーザーに戻して発振させる、外部共振器型半導体レーザーを使用している。モードホップの原因は、半導体レーザーの発振モードと、外部共振器のモードのずれによる。これまで、外部共振器の温度を安定化することによって、長いものでは数年間、一度も回折格子の角度を再調整することなく利用できている（波長合わせにピエゾ素子による微調は必要）。また、外部共振器の温度安定化がないレーザーでも、半日ほど実験を続けると連続運転時間が伸びていくこともわかってきた。外部共振器の温度安定化をおこなったうえで制御をかければ、短い暖機運転で長時間連続運転が期待できる。次の問題点は、長時間制御を保つための積分制御にある。積分制御を継続させるには、積分が制御範囲を超えないようにする必要があるが、その前に、可能な限り制御ループを減らせるとよい。この方針で分光に用いるレーザー（時計レーザー）システムを改良した。線幅狭窄化レーザー、これに位相同期させた周波数掃引用レーザー、ともに外部共振器の温度安定化を施した。分光は時計レーザーの第2高調波を発生させておこなうが、光強度を大きくするために光共振器内に非線形光学結晶を入れて変換効率を上げていた。分光に必要な光パワーがそれほど大きくないことが分かってきたこともあり、高効率の非線形光学結晶を導入して光共振器を不要とし、光共振器の共鳴を保つための制御ループを除いた。このシステムで12時間を超える連続動作を確認したとともに、図のように、これまでと比べて遜色のない、単一イッテルビウムイオン（ Yb^+ ）のサイドバンドスペクトルを検出した[1]。今後は積分制御の自動再起動の導入など、ほかのレーザーシステムも含めて、メンテナンスフリーの装置へさらに改良を進めながら、研究を進めていく。

[1] 片桐ほか、2023年第70回応用物理学会春季学術講演会、18a-D209-7.

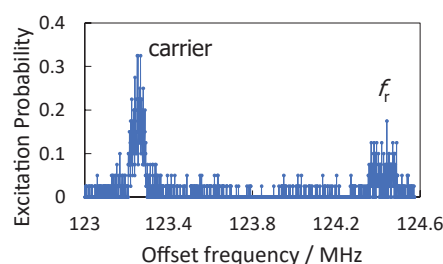


図 改良した時計レーザーシステムで観測した $^{174}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移スペクトル。左：キャリア、右：径方向 +1 次サイドバンド。

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>

単眼動画像からの指差し検出と三次元方向推定

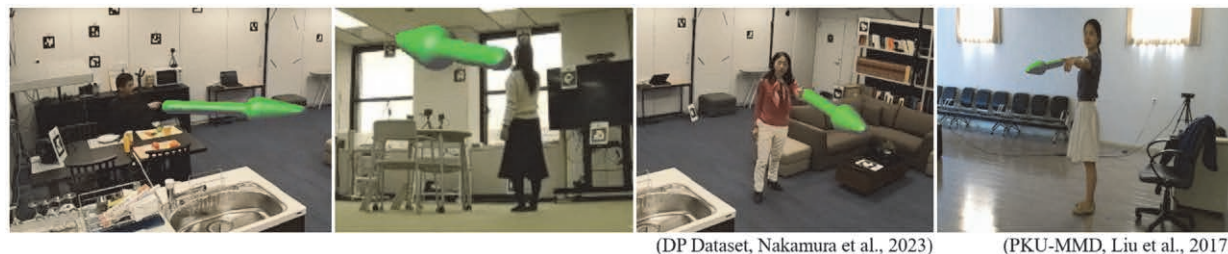


図 1 様々な指差しシーンでの方向推定結果

ものに向かって人差し指を伸ばし、注意している方向や物体を示す指差しというジェスチャは、日常生活で広く用いられている。さらに、指差しは片手で行うことができ、言葉による指示とも併用できるため、VRやHuman Computer Interactionの分野での利用も広がっている。もし、私たちが普段行っているように指示者の様子を見るだけで指差しを認識できるようになると、応用の幅が大きく広がるだろう。

しかし、指示者を映したカメラ映像から指差しを認識する研究は十分にはなされてこなかった。既存研究の多くは、腕に装着する慣性計測装置 (IMU) や、深度カメラ、複数台のカメラといった特殊なデバイスを使用しており、日常生活に応用するのが難しい。通常のカメラを用いるものでも、指示者の姿勢や位置、指示方向に制約を課しているものが多く、一般的な状況に適用できるものが存在しなかった。

本分野の発展を妨げていた大きな要因は、様々な指示者の指差しを撮影し、そのタイミングと三次元方向の真値をアノテートした大規模なデータセットが存在しなかったことである。タイミングと三次元方向を測定する最も簡単な方法は、指示者の体に測定機器を装着することである。しかし、この方法で作成されたデータセットで訓練されたモデルは、測定機器の外見に過学習してしまう可能性が高く、一般的な状況に用いることはできない。

そこで本研究 [1] では、指差し対象のマーカーを多数設置した撮影環境を 15 台のカメラで同期撮影し、多視点幾何により三次元指差し方向のアノテーションを測定機器なしに行う手法を提案した (図 2)。指差しのタイミングは、指示者がもう一方の手に持った小型のボタンで記録する。この手法を用いて、2つの室内環境で撮影された指差し映像に、そのタイミングと三次元方向をアノテートしたデータセット (DP データセット) を作成した。DP データセットは 33 名の参加者の約 6700 回の指差しを撮影したもので、計 51 時間分の動画からなり、指差し動作の三次元方向を記録した公開のデータセットとしては初めての規模である。

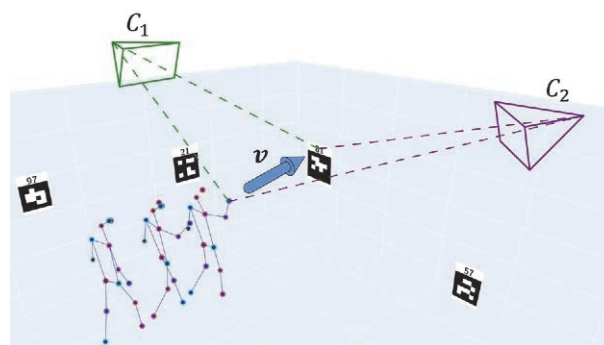


図 2 多視点幾何による指差し方向の計測

さらに本研究では、指差しを行っている手のみならず、全身の骨格キーポイントの位置と周囲の画像特徴、それらの時系列変化を活用することで頑健な指差し認識を行う手法である DeePoint を提案し、DP データセットを用いて訓練を行った。提案手法は、訓練を行った DP データセット内に存在しないものを含め、様々な動画に対して頑健な指差し推定を行うことができる (図 1)。このため、スクリーン上の仮想物体を操作したり、ロボットに移動場所を指示して物を取ってきてもらったりなど、様々な活用先が考えられる。今後スマートホームや家庭内ロボットの実用化が加速する中で、その発展に大きく貢献すると期待できる。(修士二回生 中村周)

- [1] Shu Nakamura, Yasutomo Kawanishi, Shohei Nobuhara, Ko Nishino: DeePoint: Visual Pointing Recognition and Direction Estimation. In Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV), 2023.

集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤研究室)

<https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

人型ロボットによる柔軟物操作のための不確実性を考慮したハプティックシェアード制御

少子高齢化に伴う労働力不足への解決策として、ロボットの積極的活用が模索されています。例えば、物流センター等ではロボットによるピッキング（指示書や伝票に基づいて必要な物品を取り出す作業）の自動化が進んでいます。また、形状が大きく変わる衣類等の柔軟物をロボットで取り扱うことは困難な課題でしたが、模倣学習と呼ばれる、人の行動を深層ニューラルネットワーク（DNN）等のAIに模倣させる技術が発達し、柔軟物の取り扱いも可能となりつつあります。この様にAIの発展によって、ロボットで自動化できるタスクは飛躍的に増えてきました。しかしAIは推論を誤ってしまう危険性を孕んでおり、間違った推論結果に従ってロボットを動作させた結果、周りの物体を破壊してしまうことや人に危害を加えてしまう可能性が指摘されています。そこで、人とAIが協調してロボットを操作するシェアードコントロールが注目され、我が国においてもNEDO等を中心として研究が活性化しています。シェアードコントロールとは、AIから力触覚フィードバック等を介して操作ガイダンスを受けながら人がロボットを操作する形態のことで、人が単独で操作するよりも安全性が高く、タスク達成時間の短縮も可能となるという利点があります。しかし、従来のシェアードコントロールではAIが誤った推論結果に基づいてガイダンスを生成した場合に、人の操作を阻害してしまい、却って作業効率を悪化させてしまうことがありました。

そこで、本研究では、AIの推論結果に対する“自信”に応じて人に提示するガイダンスの強度を動的に変化させることで、人の操作を阻害しない自然なガイダンス提示を可能とするシステムを開発しました（図1）。開発システムは、上半身人型ロボット、力触覚デバイス、人の操作を模倣できるように学習されたニューラルネットワークから構成されます。力触覚デバイスとロボットのグリッパ位置は連動しており、人は力触覚デバイスを介してロボットを操作できます。ニューラルネットワークは時々刻々変化するロボット頭部カメラ画像を入力として、次時刻にロボットが取るであろう姿勢を予測し、その姿勢へと近づくようなガイダンスを力触覚デバイスに提示することで人の操作を補助します。この際、力触覚ガイダンスを、不確実性を伴ったガウス分布として予測することで、推論に対する不確実性を加味したガイダンス提示（つまり、AIが自らの推論結果に自信があるときは強いガイダンスを提示し、自信がないときは弱いガイダンスを提示する）を実現しています（図2）。実験の結果、不確実性を加味しない場合と比較して、タオル折り畳みに要する時間を、16.2%削減できることを示しました^[1]。

参考文献

- [1] T. Hara, T. Sato, T. Ogata, H. Awano: “Uncertainty-aware Haptic Shared Control with Humanoid Robots for Flexible Object Manipulation,” IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), Vol.8, pp.6435-6442, Oct. 2023.

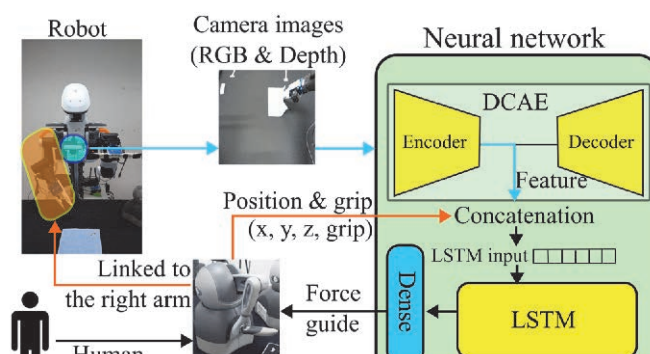


図2：開発システム

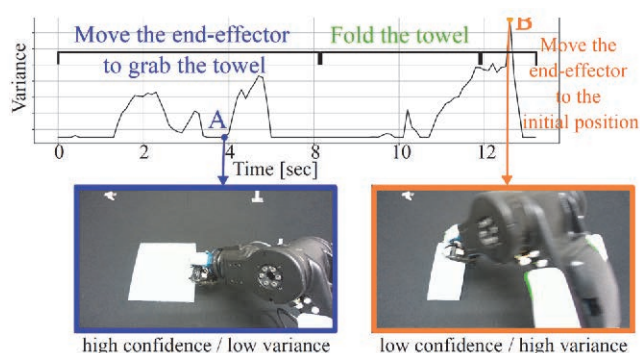


図1：推論不確実性の変化（グリッパでタオルが隠れると不確実性が増加する）

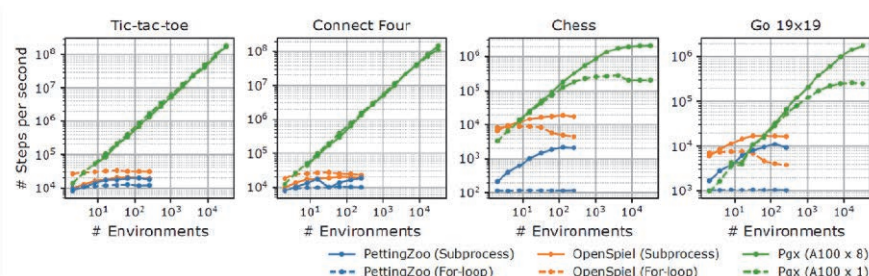
情報学研究科 システム情報論講座 論理生命学分野

URL: <http://ishiilab.jp/kyoto/>

ゲームの並列シミュレーション環境とそれを用いたトランプゲームの深層強化学習

人工知能（AI）に関する技術はしばしばゲーム環境を用いて開発・評価されてきた。現在の AI 技術の中核をなす「強化学習」、すなわち環境との相互作用に基づき自律的に適応する学習方式もまた、バックギャモンやポーカーなどのゲームを用いて発展してきた。中でも、Google DeepMind 社が開発した AlphaGo（深層強化学習をベースとする）が囲碁の世界チャンピオンを負かしたことは、AI 技術の大きな進展として世界中の人々にとって記憶に新しい。

強化学習は、環境自体（例えばゲームの場合、ルールや相手のプレイ）を明に、あるいは暗に同定する要請から多数回のゲームプレイが必要となるため、しばしば長時間の学習に基づく。例えば、AlphaGo の後継となる AlphaZero ではセルフプレイ型の深層強化学習が用いられたが、その学習には第一世代 TPU マシンを 5000 台用いて、総計 34 時間を必要とした。そこでは、ゲームシミュレーションも律速段階となっていた。従前のゲームの深層強化学習研究では、深層学習の推論は GPU/TPU アクセラレータで行われるもののゲームシミュレーションは CPU を用いるため、両者の間でのデータ通信の負荷の問題もあり、シミュレーション並列の恩恵が少なかった。そこで当研究室の小山田創哲（教務補佐員、主たる所属は ATR）らは、Pgx（Parallel Game simulators in JAX）を開発、深層学習による推論と同様にゲームシミュレーションも GPU/TPU 上で行うことで、数千から数万オーダーまでの並列化スケール性能を達成した。Nvidia DGX-A100 システムを用いた実験で、DeepMind 社製の OpenSpiel を含む他のゲームシミュレーション環境よりも 10 倍から 100 倍高速なことを確認した（下図）。また、AlphaZero を用いた 9 路盤囲碁のセルフプレイ強化学習も、GPU アクセラレータにより高速に実行でき、また、GPU 台数に対してスケールすることを確認した。この成果は AI 分野で世界最高峰とされる NeurIPS 2023 に採択された。



また、喜多悠（修士課程 2 回生）は、この Pgx 上に 4 人で行うカードゲームの一種であるコントラクトブリッジのシミュレータを実装、教師あり（見まね）学習とセルフプレイ強化学習を組み合わせた手法で、数年前までコンピュータブリッジの大会で優勝していた Wbridge5 に対して優越する AI の構築に成功（Wbridge5 に対して +0.65 IMPs/board）した。コントラクトブリッジには、ビディングとプレイとの二つのフェーズがあるが、ここで扱うのはマルチエージェント問題としてより複雑度の高いビディングフェーズである。このビディングでは、未だ人間のエキスパートを凌駕する AI が実現されていない。当研究室の複数のメンバーは、以前この課題に深層強化学習の手法で取り組んでいたが、学習が安定しないこともあり、Wbridge5 を上回る性能を得ることができないでいた。喜多の成功は、安定性の高い強化学習アルゴリズムである Proximal Policy Optimization（PPO）の投入に加えて、Pgx 上でのシミュレーション高速化により、セルフプレイ強化学習におけるゲーム数を増加させることができた点も、重要な要因であると考えている。すなわち、AI 技術の進展には機械学習手法の進展に加えて、計算機の性能およびそれを利用する環境整備の向上が重要であることを示している。

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>

「繰り返し法に基づく 3 次元 MHD 平衡コード KUIQ3D の開発」

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。

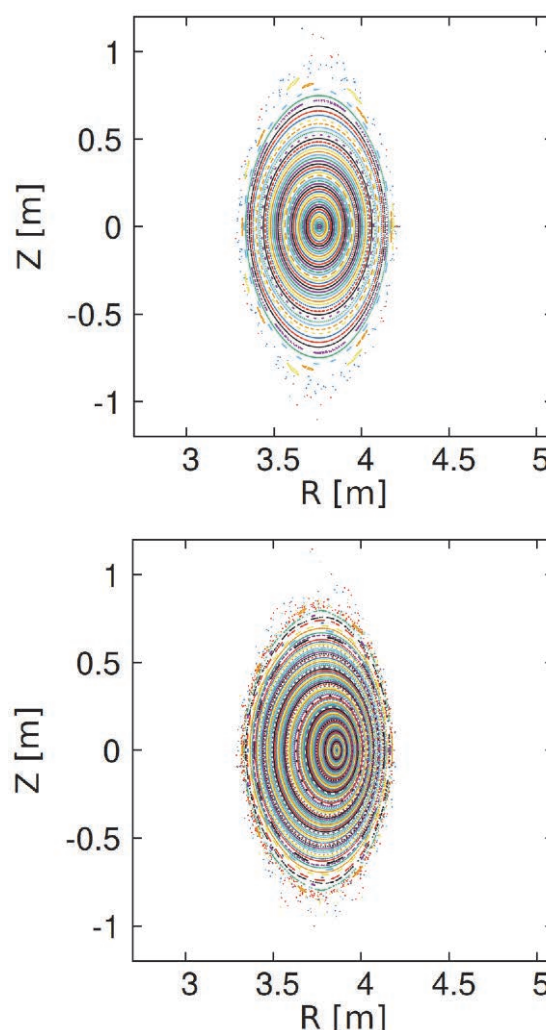
今回は、非軸対称トラスプラズマにおいて、磁気流体力学 (MHD) 平衡を計算する新しいコードの開発について紹介します。

MHD 平衡はプラズマ圧力勾配による力と電磁力が釣り合った力学的平衡状態であり、磁場によるプラズマ閉じ込めの前提となる状態ですが、軸対称性のない 3 次元配位における解析は容易ではありません。特に、円環面状の磁気面 (1 本の磁力線の織り成す面) が入れ子状に存在すると仮定しない場合、MHD 平衡計算には少なくない計算機資源が必要となり、そのような計算コードは世界的にも数えるほどしかありません。現在、よく用いられているのは核融合科学研究所 (NIFS) と当研究室が共同開発した緩和法に基づく HINT コードですが、利用するには多少工夫が必要であるとともに、ベンチマークも容易ではありません。

そこで、HINT コードと相補的役割を持つ、異なったアルゴリズムを用いた新たな 3 次元 MHD 平衡コード KUIQ3D を開発しています。このコードも HINT と同様に入れ子状の磁気面の存在を仮定していませんが、HINT が (平衡計算のために簡略化された) 散逸性 MHD 方程式の時間発展から、定常解として MHD 平衡を求めているのに対して、MHD 平衡状態を繰り返し法に基づき求めているのが特徴です。

右図に示すのは、非軸対称プラズマの典型的な例である NIFS のヘリカル型装置 LHD に対して MHD 平衡計算を行った例です。図は磁力線が円柱座標 (R, ϕ, Z) における $\phi=0$ 面を横切る度にその位置に点をプロットしたもので、点列がきれいに並び、線に見えるとき、磁気面が形成されており、プラズマが閉じ込められることを示します。図からはプラズマの圧力が上昇すると周辺領域の磁気面構造が若干乱れることが分かります。実験ではこの領域でもプラズマが閉じ込められていることが分かっており、どの程度乱れると閉じ込めが劣化するかなど、今後の詳細な解析が必要となります。

このような物理過程と実験との比較は、通常軸対称であるとして解析が行われているトカマクプラズマにおいても重要であり、本コードの適用が期待されます。



LHD プラズマのトロイダル角 $\phi = 0$ における磁力線のポアンカレ図。上段：ゼロプラズマ圧力時 (コイル電流による磁場のみ)。下段：有限プラズマ圧力時 (プラズマ中を流れる平衡電流が作る磁場が加わる)。

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
 「帯状流同定に向けたデュアルマイクロ波ドップラー反射計の開発」

私たちの研究室では、エネルギー理工学研究所の保有するプラズマ実験装置「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。核融合プラズマ中の輸送は、乱流によって引き起こされる「異常輸送」が支配的であると考えられており、この異常輸送を抑制する事が、核融合プラズマの高性能化、すなわち、核融合発電の実現において重要な課題となっています。本研究室では、「マイクロ波ドップラー反射計」と呼ばれる装置を用いて、異常輸送を抑制するファクターとして知られるプラズマ中のポロイダル方向の流れであるポロイダルフローを計測し、異常輸送の抑制メカニズムを調べています。

マイクロ波ドップラー反射計は、プラズマ中に入射したマイクロ波が反射されるカットオフ現象と、密度揺動による後方散乱現象の二つを利用した計測装置です。図1にマイクロ波ドップラー反射計の計測原理図を示します。プラズマ中でマイクロ波が反射されるカットオフ面では、電子密度の径方向揺らぎ（電子密度揺動）があり、この電子密度揺動はポロイダル方向に速度 $v_{\perp}$ で伝搬しています。通常のマイクロ波反射計では、周波数 f のマイクロ波をカットオフ面に対して垂直に入射します（ $\theta \equiv 0$ ）が、マイクロ波ドップラー反射計はカットオフ面に対して角度をつけてマイクロ波を入射します（ $\theta \neq 0$ ）。こうする事によって、入射したマイクロ波の進行方向に対して電子密度揺動が速度 $v_{\perp} \sin \theta$ を持つため、反射されたマイクロ波はドップラーシフト $f_D = 2v_{\perp} \sin \theta / c \times f$ を受けます。反射されたマイクロ波の周波数解析を行うと、このドップラーシフトは周波数スペクトル中に $f = 0$ 以外のピークとして現れます[1]。実際のヘリオトロンJでのプラズマ実験で得られた周波数スペクトルを図2に示します。

ヘリオトロンJでのマイクロ波ドップラー反射計を用いたこれまでの研究では、高強度ガスパフ（HIGP）と呼ばれる、短時間で高強度の燃料ガス供給を行った高温・高密度プラズマ生成の際、プラズマ周辺部で大きなポロイダルフローシアが形成される事や、磁気島と呼ばれる特異な磁力線構造がプラズマ周辺部に存在する場合、ポロイダルフローシアの位置が磁気島周辺部にシフトする事などを明らかにしてきました。

異常輸送の抑制に寄与するものとしては、ポロイダル・トロイダル方向に一樣で大きなポロイダルフローシアを持つ「帯状流」と呼ばれるフロー構造があります。現在、ヘリオトロンJでは、この帯状流を計測するため、同一磁気面上で異なる位置の計測が可能なデュアルドップラー反射計システムを開発しています。図3は現在のヘリオトロンJのドップラー反射計システムの概要図で、プラズマの上下に位置しているシステムがデュアルドップラー反射計システムです。このシステムを用いて同じ径方向位置のポロイダルフローや電子密度揺動を計測し、相関解析を通じて帯状流の同定を行う予定です。

- [1] 徳沢季彦, 他, 「電磁波を用いたプラズマ診断の基礎と最前線」、プラズマ・核融合学会誌 87 (2011) 345

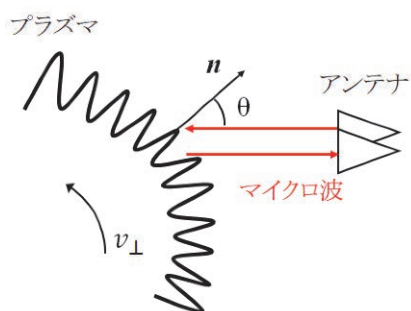


図1 ドップラー反射計計測原理

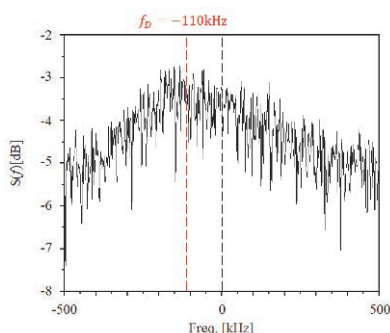


図2 ドップラー反射計計測スペクトルの例

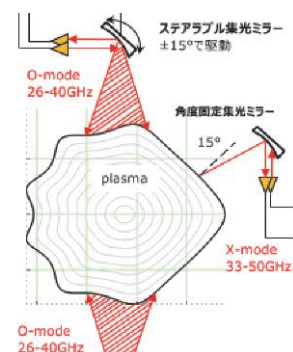


図3 デュアルドップラー反射計システム概要図

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)

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

ASIC による宇宙空間イオン質量分析器プリアンプ部の超小型化

地球周辺の宇宙空間には、電離した気体である「プラズマ」が存在しており、電子と陽イオンから構成されています。プラズマの主たる起源は太陽に由来し、陽子が約 95%、2 価のヘリウムイオンが約 2-4%、その他の微量成分として酸素イオンなどが含まれていることがわかっています。また、地球の高層大気は、太陽紫外線の影響により電離しており、その一部が宇宙空間へ向かって流出していることが知られています。流出していくイオンとして、酸素イオンや窒素イオン、窒素酸化物イオンの存在が明らかになってきています。

質量が異なるイオンが複数存在すると、イオン種ごとに働く力が異なり、宇宙空間の中では異なる運動をすることが想像されます。また、質量の違いは、それぞれのイオン種が及ぼす圧力といった、巨視的パラメータに影響を与えます。電子に比べて 2000 倍近い質量を有するイオンは、宇宙空間における圧力分布において支配的な役割を持っているため、イオン種ごとにどれだけの量が存在しているかを正確に理解することは、宇宙空間の圧力バランスを考える上で非常に重要です。

さまざまなイオンが宇宙空間に存在していることは、飛行体に搭載されたイオン質量分析器によって明らかにされてきました。イオンの質量を分別するには、同じエネルギーであれば、質量が大きいイオンほど速さが小さい特性を利用して、飛行時間分析という手法を用いており、その概要を図 1 に示します。イオンが分析器に入射する部分にはカーボン薄膜、底面には Micro Channel Plate (MCP) と呼ばれる、粒子を検出した際に電子雲を生成する検出器が置かれています。まず、エネルギーを分別する機器によってイオンのエネルギーの範囲を限定した後、イオンが分析器内に入射したとき、カーボン薄膜を通過することによって電子が放出されます。この電子はイオンに比べて十分に早く MCP に到達し、イオンが入射したことを知らせます (START 信号)。その後、イオンが分析器の底面まで到達したことを知らせる STOP 信号が MCP より発せられます。この 2 つの信号の時間差とイオンのエネルギー・飛行距離が分かれば、イオンの質量を推定できます。START・STOP 信号は、MCP から発せられる微弱な電気信号であるために、後段の回路での取り扱いが容易となるよう、信号を増幅する必要があります。また、時間差は非常に短いため、ns オーダーの高速応答が回路には求められます。従来では、この増幅回路の規模は約 60mm 角となっており、イオン質量分析器の小型化を図る際の課題の一つとなっていました。本研究においては、この増幅回路部分を特定用途向け集積回路 (ASIC) の技術によって 5mm 角のチップ内部に収め、回路の超小型化を目指しました (図 2)。開発された ASIC チップは飛行時間分析を行うのに十分な能力を持つことが実験により確認され、増幅回路部の超小型に向けた一歩を進めることができました。現在は回路の多チャンネル化や消費電力の最適化を行い、科学衛星への搭載に向けたチューニングを行なっています。

Kikukawa, M., Asamura, K., Zushi, T. *et al.* Development of miniaturized pick-up amplification circuit for plasma particle detectors on board satellites. *Earth Planets Space* **74**, 188 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01746-8>

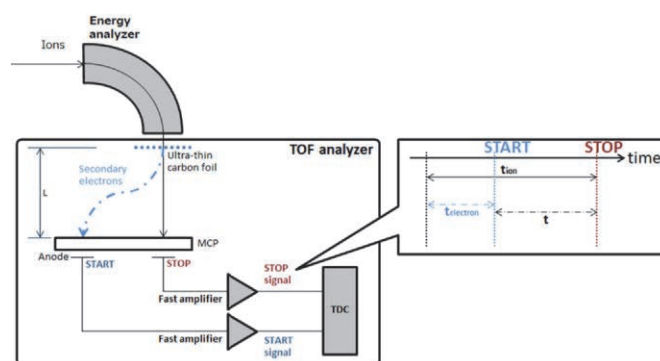


図 1 イオン質量分析器の概要 (Kikukawa et al., 2022)

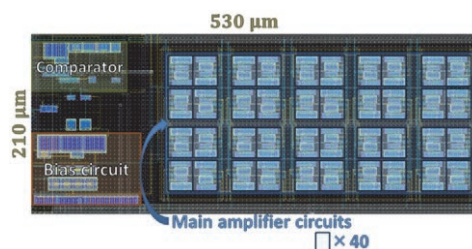


図 2 開発した ASIC のレイアウト図 (Kikukawa et al., 2022)

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>

「完全ワイヤレス社会実現を目指したワイヤレス電力伝送の高周波化および通信との融合技術」

Society5.0 社会の到来により、2035 年に全世界の IoT デバイス数は 1 兆個を突破すると予測されており、一人 100 台以上の IoT デバイスを扱うような世界が到来する。あらゆるものがインターネットに接続されると同時に、あらゆるものが電力を要求する時代が到来する。今後 IoT デバイス数の増加につれて通信トラフィックの増加とバッテリー数の肥大が問題となる。近年では、5G の整備により膨大なトラフィックを処理できる通信インフラが構築されつつあるが、デバイスに対するバッテリー交換コストの増大や給電方法に関して大きな課題が残されている。そこで B5G への転換に際し、情報のみではなく電力に対してもワイヤレス化を行うことで完全ワイヤレス社会の実現を目指した研究開発が必要である。生存圏研究所篠原研究室では、長年の空間伝送型ワイヤレス給電 WPT の研究成果を生かし、2021 年度から NICT 革新的情報通信技術研究開発委託研究研究開発にソフトバンク、金沢工大とともに参加し、ミリ波周波数の効率的な利用や共同利用の促進、ミリ波帯への移行を促進することを目的として、ワイヤレス電力伝送のミリ波通信との融合技術に関する研究開発を行っている。篠原研では超多素子送電アンテナシステム（フェーズドアレーアンテナ）の放射近傍界距離での簡易制御手法の適応検討を行っている。具体的には低コストで新型移相器を使用する 9×9 の簡易制御型 28GHz フェイズドアレーと 2 段ロッドマンレンズと RF スイッチ使用する簡易制御型の 2 種類のフェイズドアレーの開発 [1]、および数種類アンテナ給電方式の検討（スロット給電、ビア給電、垂直給電）、間引き給電アレーアンテナ、焦点ビームアンテナ等の開発等 [2] を行っている。2022 年度には、総合実験としてミリ波通信 /WPT の時空間分離システムの実証試験に成功した [3]。ミリ波通信用アンテナに対して WPT フレームの挿入とアンテナ連携により、同一周波数帯での TDD での時間分離およびビームフォーミングによる空間分離の両機能を実現・実証し、また WPT フレームにおいてミリ波レクテナからの DC 出力を確認に成功した。

- [1] W. Shao, et al., "Aperture-Coupled Beam-Scanning Patch Array with Parasitic Elements Using a Reconfigurable Series-Fed Phase-Shifting Structure", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.22, No.7, pp.1617-1621, 2023.
- [2] H. Kamada, et al., "Application of Partially Driven Array Antenna to 28 GHz Near-Field WPT", Proc. 2022 APMC, TH1-F5-5, 2022
- [3] N. Shinohara, et al., "Novel Energy Harvesting and SWIPT System at 28 GHz with a Simple Phased Array", Proc. IEEE RFID-TA2023, pp.209-pp.212, 2023

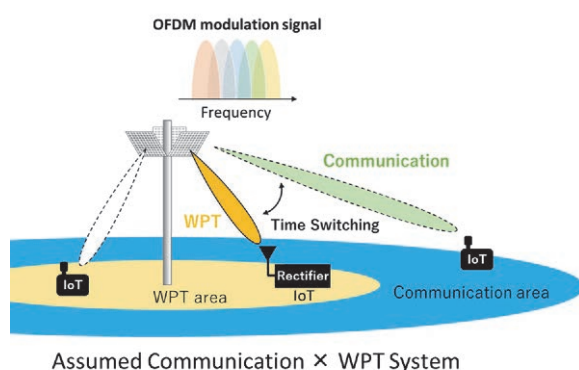


図 1 提案するワイヤレス電力伝送のミリ波通信との融合

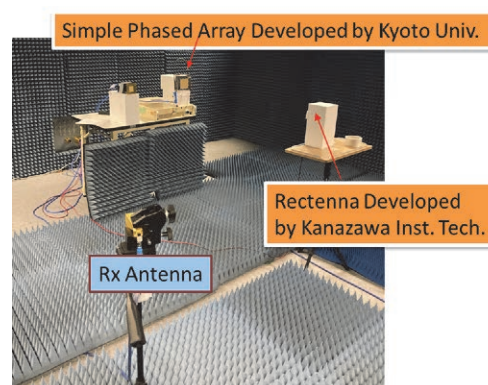


図 2 実証実験の様子

博士論文概要

[課程博士一覧]

村 川 悠 磨	Application of Passivity-Based Control to Series-Parallel Connected DC-DC Converters and their Circuit Characteristics 直並列接続された電力変換器に対する受動性に基づく制御の適用とその回路特性	令和5年3月23日授与
Weizheng Fu	Three-Dimensional Imaging of Ionospheric Irregularities at Midlatitudes Using Global Navigation Satellite System 衛星測位システムによる中緯度電離圈イレギュラリティの3次元イメージング	令和5年3月23日授与
青 木 基	Study on Spin-orbit Torque Effects in Metallic Bi-layer and Single-layer Systems 金属二層及び単層構造におけるスピン軌道トルク効果に関する研究	令和5年9月25日授与
荒 畑 雅 也	Study on Broadband Quantum Infrared Spectroscopy using Visible-infrared Photon Pair Sources in the Mid-infrared Region 可視 - 赤外域光子対源を用いた中赤外域における広帯域量子赤外分光に関する研究	令和5年3月26日授与
伊 藤 滉 二	Study on Electron Trapping and Transport in SiC MOSFETs SiC MOSFET における電子捕獲および輸送に関する研究	令和5年3月23日授与
宮 谷 俊 輝	Study on Forming and Resistive Switching Phenomena in Tantalum Oxide for Analog Memory Devices アナログメモリ素子応用に向けたタンタル酸化物におけるフォーミングおよび抵抗変化現象に関する研究	令和5年3月23日授与
赤池 良太	MOVPE of Semipolar r-plane AlGaIn-based Semiconductors toward Highly Efficient Solid-state UVC Emitters 高効率固体 UVC 光源開発に向けた半極性 r 面 AlGaIn 系半導体の MOVPE 成長に関する研究	令和5年3月23日授与
Qianying Liu	Numerical Reasoning in NLP: Challenges, Innovations, and Strategies for Handling Mathematical Equivalency 自然言語処理における数値推論：数学的同値性の課題、革新、対処戦略	令和5年9月25日授与
Tareq Yaser Samih Alkhaldi	Studies on Question Answering in Open-Book and Closed-Book Settings オープンブックおよびクローズドブック設定における質問応答に関する研究	令和5年9月25日授与

西 村 真 衣	View Birdification: On-Ground Pedestrian Movement Estimation and Prediction from Ego-centric In-Crowd Views 混雑環境下における自己位置及び周辺歩行者の軌跡復元・予測	令和5年3月24日授与
Qin Zhaoxing	Robust design of low-voltage OTFT circuits for flexible electronic systems フレキシブル電子システムに向けた低電圧有機薄膜トランジスタ回路のロバスト設計	令和5年3月23日授与
中 村 洋 平	電力変換回路におけるパワーモジュールの熱設計に向けた特性測定とモデリング	令和5年3月23日授与
岩 中 拓 夢	MgB ₂ 超伝導薄膜の線材化に関する基礎的研究	令和5年3月24日授与
Qiu Dechuan	Development of Multi-pass Thomson Scattering System with Delay Mechanism of Laser Pulses for Measuring Anisotropy of Electron Velocity Distribution Function on Heliotron J ヘリオトロンJにおける電子速度分布関数の非等方性を観測するためのレーザーパルスの遅延機構を有するマルチパストムソン散乱システムの開発	令和5年9月25日授与
望 月 諒	Study on Beltrami Fields with Parallel Electric and Magnetic Fields at Microwave Frequencies マイクロ波帯における電場と磁場が平行なベルトラミ場の研究	令和5年3月23日授与

村 川 悠 磨 (引原隆士 教授)

「Application of Passivity-Based Control to Series-Parallel Connected DC-DC Converters and their Circuit Characteristics」

(直並列接続された電力変換器に対する受動性に基づく制御の適用とその回路特性)

令和5年3月23日授与

複数の電力変換器を直並列に接続し利用することは、単一の電力変換器と比べ、変換器間での電力の分散が可能である上に、冗長性や保守性の確保、各部品への負荷低減、熱設計の改善など様々な利点がある。このことから、電力変換器の直並列接続は、電源回路の性能向上や電力システムの分散化など、パワーエレクトロニクスに関連する分野で実際に活用され、技術の発展に寄与している。

電力変換器を直並列接続する際の課題の一つに、拡張性がある。先行研究では、電力変換器の種類や直並列接続構造がしばしば限定される。この時、変換器の個数、種類、接続構造を変更した場合に同様の制御手法で安定性や過渡性能が担保されるかは定かではない。すなわち、多様な電力変換器同士の複雑な直並列接続を許容できる制御手法の確立が不可欠となっている。

これらの背景から、本研究では、直並列接続された電力変換器に対する受動性に基づく制御の適用について検討している。受動性とは、システムのエネルギーに関する概念である。受動的なシステムは、エネルギーの散逸または保存のみが可能であり、自らエネルギーを生成することはない。受動性に基づく制御は、非線形制御手法の一種であり、受動的なシステムの蓄積関数を整形し、散逸を加えることにより目標状態での漸近安定性を達成する。電力変換器は一般に受動的なシステムであり、受動的なサブシステムから構成されるシステムは受動的である。したがって、直並列接続された複数の電力変換器は受動的なシステムを構成し、受動性に基づく制御を各変換器に適用することにより、システムは漸近安定となることが期待される。結果として、本研究では以下の成果が得られた。

1. 受動性に基づく制御を適用した複数の DC-DC コンバータの直並列接続が漸近安定となることを一般的に示した。この理論的結論は以下の手順によって得られる。まず DC-DC コンバータを表すポートハミルトン系に対し新たな外部入力項を導入する。次に、この外部入力項に対し、直並列接続を意味する回路制約を与えることで、複数の電力変換器を直並列に接続したシステムは一般にポートハミルトン系で表現できることが示される。結果として、このシステムは各電力変換器に対する受動性に基づく制御の適用により漸近安定となることが導かれる。
2. 上記の理論的結論を数値計算および実験によって確認した。受動性に基づく制御を適用したブーストコンバータとバックコンバータの並列回路に関して、数値計算および実験を行った。数値計算では、変換器間で回路特性が独立しており、各変換器に対して制御パラメータを個別に決定できることを示した。また、システムの漸近安定性の他、定常誤差、リップル、整定時間等の定常特性および過渡特性が数値計算と実験で一致していることを確認した。
3. 直並列接続された DC-DC コンバータの受動性に基づく制御による協調的な運用手法に関する提案を行った。まず、受動性に基づく適応制御および非干渉制御の導入を行った。これらの制御手法は直並列接続を行った場合でも個別に制御性能を維持することができる。数値計算では、受動性に基づく制御がシステムを漸近安定にする他、変換器間での電力の融通や双方向の電力伝送を可能にすることを示した。また、これらを実証するための実験系の構築を行った。

以上のように、本研究は、受動性に基づく制御を適用した電力変換器の直並列接続が漸近安定となることを理論的に説明し、それを実験的に実証した上で、その活用方法について述べた。本研究では、電力変換器の内、特に非絶縁型 DC-DC コンバータの出力側における直並列接続を扱っている。したがって、これらの条件を取り除き、より一般化された理論を構築し、それを実証することが本研究の展望として挙げられる。

Weizheng Fu (山本衛 教授)

「Three-Dimensional Imaging of Ionospheric Irregularities at Midlatitudes Using Global Navigation Satellite System」

(衛星測位システムによる中緯度電離圏イレギュラリティの3次元イメージング)

令和5年3月23日授与

The ionosphere is a dynamic interface where neutral particles and plasma intermingle, leading to intricate phenomena such as irregularities. Nowadays, the drastic increase and ubiquitous day-to-day dependence of complex inter-connected technological networks on precise space-borne communications or trans-ionospheric signals have elevated the demand to understand and characterize ionospheric irregularities. At mid-latitudes, medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs) and sporadic E (Es) are two primary classes of irregularities at different altitudes that frequently disrupt the ionosphere. Existing theories still fall short in fully explaining the observations. Grasping the 3-D dynamics and morphology of Es and MSTIDs during their evolution is fundamental for elucidating the underlying physical principles. Yet, the challenge remains that no existing methods allow for the continuous and broad plasma density distribution measurement on both Es and MSTIDs simultaneously. The advancements in the Global Navigation Satellite System (GNSS) present a promising approach to overcoming these limitations. In Japan, the dense GNSS receiver array consisting of ~1300 stations, GEONET (GNSS Earth Observation Network System), is ideal for monitoring and analyzing ionospheric disturbances in detail. However, GNSS-derived ionospheric parameters, total electron content (TEC), provide only 2-D horizontal information on ionospheric dynamics. Thus, there is a pressing need for the development of new techniques. This study attempted to utilize dense GNSS TEC observations to simultaneously provide information in both Es and MSTIDs. The key findings obtained are summarized below:

1. A novel double-thin-shell model was conceived and successfully applied to the study of ionospheric irregularities, which effectively differentiates disturbances at different altitudes. For the first time, this innovative approach allowed for simultaneous observation of the morphology and dynamics of ionospheric perturbations in both Es and MSTIDs, marking a significant advancement in the field.
2. Further exploration focused on MSTID events in the Japan-Australia sector. The results shed light on the intriguing interplay between different ionospheric regions and hemispheres in the context of MSTID phenomena. It was revealed that the MSTID is produced in the F region above the Es layer in summer, corresponding with the development of the Es layer structure, and the MSTID is further generated in the F region of the opposite hemisphere through the Earth's magnetic field coupling process. This insight, derived from state-of-the-art TEC data analysis using the GNSS receiver network, significantly enhances our understanding of the generation and propagation of MSTIDs.
3. Given the thin thickness of Es and representation errors typically encountered in tomography, the 3-D reconstruction of Es has always been fraught with difficulties. An innovative tomography technique to image the 3-D structure of daytime mid-latitude Es was developed by using GNSS and ionosondes. For the first time, this novel tomography technique effectively tracked the height variation of Es over time. Subsequently, a similar method was employed for the concurrent reconstruction of both Es and MSTIDs.

This pioneering work not only offers a technological advancement but also provides vital insights into the dynamic behavior of Es and MSTIDs, marking a significant step forward in our understanding of ionospheric irregularities.

青 木 基（白石誠司 教授）

「Study on spin-orbit torque effects in metallic bi-layer and single-layer systems」

（金属二層及び単層構造におけるスピン軌道トルク効果に関する研究）

令和5年9月25日授与

情報化社会の発展により、情報の書き込み・維持に必要な電力需要が年々増大しており、メモリデバイスの省電力化が喫緊の課題となっている。この問題を打破する技術として、電子のスピン自由度を利用する「スピントロニクス」が注目を集めている。電子スピンの流れである「スピン流」は、磁性体へと注入されることで磁化の制御を可能にする（スピン軌道トルク、SOT）。この性質を利用し、磁化方向を不揮発情報とし、スピン流を用いて情報書き込みを行う「磁気抵抗メモリ」が考案されている（図参照）。本素子は電力消費、耐久性、集積化のいずれの観点からも従来型デバイスの限界を打破する可能性を秘めているため積極的に研究が為されているが、十分なスピン流を生成するための電流量に未だ課題が残っている、加えてスピン流による磁化書き込みの実証には複雑なデバイス作製プロセスを要するため、多くの場合、書き込み効率の評価には磁化反転を伴わない間接手法が用いられている。間接手法で推定された書き込み効率が実際の磁化反転に当てはまらない場合が多々あるため、簡便に磁化反転を実証できる手法を開発し、幅広い材料・構造に対し、直接磁化反転効率を求める必要がある。

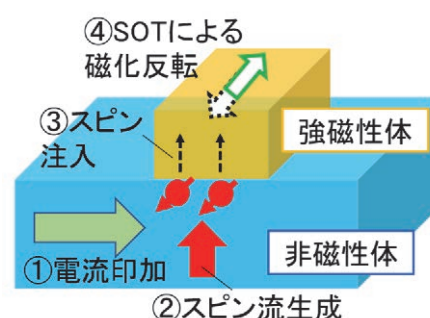


図. 磁気抵抗メモリの動作原理。

本研究では第一に強磁性体 / 非磁性体 2 層構造において、マイクロ波周波数を固定し磁場を掃引した際、ゼロ磁場付近の信号には、エルステッド場が引き起こす磁化の振動によるヒステリシスが生じることを見出し、このヒステリシスがおおよそ磁化曲線に対応することを利用して、磁化反転検出のデモンストレーションを行った。本手法は従来の磁化反転検出手法と比較しデバイス構造が遥かに簡易であるため、SOT 磁化反転の機動的な調査に貢献できると考えている。同時に本手法で用いる整流信号が一方方向スピンホール磁気抵抗効果に由来していることを突き止め、書き込み効率の新たな間接評価手法も提案した。

続いて磁化反転高効率化の研究に着手した。以下に成果を示す。

1. 十字型の非磁性体電極上に強磁性体電極を配置し、非磁性体への電流を縦方向と横方向の両方から注入することで、生成されるスピン流のスピン偏極ベクトルを制御した。その結果、注入スピンの方向が磁化方向に対して 45° 傾いている場合、磁化反転速度が 30 倍向上し、必要電流量も大幅に削減されることを見出した。
2. NiFe 合金で構成された強磁性電極を、面内の空間反転対称性が破れた構造で作製することで、面直方向に磁化を傾けるトルクの生成に成功した。シミュレーションを用い、面直方向へのトルクを適切に利用することで、集積化に適している面直磁気異方性を有する磁性体のアシスト磁場無し磁化反転が可能であることを示した。
3. 通常は強磁性体へのスピン注入を仮定するのにに対し、強磁性体からのスピン流出による自己誘起スピン軌道トルクを考案し、その観測に成功した。本研究は、強磁性体と非磁性体の組み合わせを適切に選択することで SOT を増大できる可能性を示している。
4. 国外の研究機関と協力し、ワイル強磁性体である Co_2MnGa の調査を行った。その結果、単一材料にも関わらず重金属 / 強磁性体構造に匹敵する磁化反転効率を有していること、及びその印加電流方向に対する大きな異方性を発見した。理論計算と実験結果の比較から、これらの起源は波数空間のワイル点の分布と、その歪依存性であることを明らかにした。

荒 畑 雅 也 (竹内繁樹 教授)

「Study on broadband quantum infrared spectroscopy using visible-infrared photon pair sources in the mid-infrared region」

(可視 - 赤外域光子対源を用いた中赤外域における広帯域量子赤外分光に関する研究)

令和 5 年 3 月 26 日授与

近年、古典的に説明不可能な相関をもつ量子もつれ光を用いた量子技術が非常に注目されている。これまで、可視域において量子通信や量子センシングの研究が行われてきたが、赤外域の光子と可視域の光子がペアとなった量子もつれ光子対を用いた量子赤外分光が新たな量子計測技術として注目されている。量子赤外分光とは、量子もつれ光子対発生の干渉効果を利用することで、可視域の光源と検出器を用いた赤外分光測定が可能となる技術である。これにより、医療や工業分野で広く用いられている赤外吸収分光装置のボトルネックである大型でコストの高く感度の悪い赤外域の光源と検出器を用いずに、装置の小型化や高感度化が期待される。

これまで、量子赤外分光測定の原理検証実験では、量子もつれ光子対の発生帯域が狭いため、測定帯域が中赤外域（波長 5 μm まで）において 1 μm 以下に限られていた。そのため、広帯域な量子赤外分光測定のためには、中赤外域で広帯域に動作する可視 - 赤外域量子もつれ光子対源が求められる。また、生体計測などの応用に向けた測定感度の向上のためには、光子対の発生効率の向上が必要である。

そこで本論文では、広帯域量子赤外分光の実現を目指し、波長可変可視 - 赤外域量子もつれ光子対源の実現と、それを用いた中赤外域における広帯域量子赤外分光の実証に取り組んだ。また、可視 - 赤外域量子もつれ光子対源の高効率化と広帯域化に取り組んだ。その結果、以下の成果が得られた。

1. 従来の可視 - 赤外域量子もつれ光子対源では、可視光子と赤外光子の発生波長が固定されており、広帯域において可変に調節できるものは無かった。そこで本研究では、光子対を生成する結晶と入射光の間の角度を変化させることで位相整合条件を制御し、赤外光子の波長 1.1 μm から 4.7 μm に対応する可視光子の発生を観測した。また、波長 2 μm までの近赤外域で、超伝導単一光子検出器を用いた同時計数計測を行い、波長 5 μm までの中赤外域で、InSb 赤外光検出器を用いて発生した赤外光子の直接観測に成功し、光子対の発生効率が入射光強度 1 mW あたり毎秒 10^6 程度であることを確認した。
2. 1 で実証した波長可変可視 - 赤外域量子もつれ光子対源を実装した量子干渉系を構築し、中赤外域における広帯域量子赤外分光測定を行った。まず、中赤外全域において光子対の波長を掃引しながら、十分な明瞭度を有する可視光子の量子干渉信号を取得した。次に、波長 1.9 μm から 5.2 μm の広帯域において、シリカガラスの赤外吸収スペクトルの取得と OH 振動による吸収ディップの観測に成功した。従来報告されていた最大の測定帯域は 0.9 μm であり、これを大きく超える結果である。また、本研究で提案した高速スキャン法により、中赤外域で 240 秒という短時間で吸収スペクトルが測定可能であることを実証した。さらに、特定の波長領域において、フーリエ変換型量子赤外分光法 (QFTIR) を組み合わせることで、8.33 cm^{-1} の高分解能でのスペクトル取得に成功した。
3. 量子赤外分光のさらなる信号雑音比向上や測定時間短縮のためには、量子もつれ光子対の高効率生成が重要である。そこで本研究では、リッジ導波路型擬似位相整合素子を用いて、高効率で広帯域な可視 - 赤外域量子もつれ光子対の生成と評価を行った。まず、ノンチャープ擬似位相整合素子を用いて、同時計数計測を行い、生成効率が入射光強度 1 μW あたり毎秒 10^6 程度であり、バルク擬似位相整合素子の生成効率の 600 倍であることを確認した。さらに、チャープリッジ導波路型擬似位相整合素子を用いて、赤外光子の波長 2 μm から 5 μm に対応する可視光子の超広帯域生成を観測した。また InSb 赤外検出器を用いた広帯域赤外光子の直接観測に成功した。

以上のように、本論文では、波長可変可視 - 赤外域量子もつれ光子対源を実現し、またそれを用いた中赤外域における既報告値最大の帯域での量子赤外分光測定に成功、さらにリッジ導波路型擬似位相素子を用いた高効率かつ広帯域可視 - 赤外域量子もつれ光子対源を実現した。

伊 藤 滉 二 (木本恒暢 教授)

「Study on Electron Trapping and Transport in SiC MOSFETs」

(SiC MOSFET における電子捕獲および輸送に関する研究)

令和 5 年 3 月 23 日授与

カーボンニュートラルの実現に向けて、パワーエレクトロニクス技術の向上は重要な課題である。これまで、パワートランジスタにはシリコン (Si) が用いられてきたが、素子性能は材料物性で決まる理論限界に漸近しつつある。そこで、ワイドギャップ半導体であるシリコンカーバイド (SiC) が近年注目されている。SiC は Si と比べて約 10 倍の絶縁破壊電界というパワーデバイス応用に適した物性値を有している。そのため、SiC 金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) は、現在主流の Si デバイスと比べて高耐圧・低損失・高速動作可能である。

SiC MOSFET は実用化が始まりつつあるが、ドレイン電流制限要因が解明されておらず、設計通りの素子を作製することができないという重大な課題に直面している。SiC/酸化膜 (SiO₂) 界面には欠陥準位が高密度に存在しており、この界面準位に電子が捕獲されることでチャネル内の電子密度が低下する。これに加えて、チャネル内に残った可動電子の散乱によって移動度が決まるため、従来の Si MOSFET と比べて物理モデルが複雑となっている。ドレイン電流を定式化するためには、界面準位への電子捕獲効果と散乱で決まる可動電子移動度を分けて議論する必要がある。SiC MOSFET におけるドレイン電流を決定する特に重要なパラメータは、界面準位密度とボディ層の不純物濃度である。しかし、ボディ層濃度が界面準位密度に与える影響は明らかにされておらず、チャネル内電子散乱機構も未解明である。そこで、本論文では、界面準位密度のボディ層濃度依存性およびチャネル内電子散乱機構の解明に取り組んだ。

まず、界面準位密度のボディ層濃度依存性に関して研究を行った。SiC MOSFET における界面準位密度は強いエネルギー依存性を有している。界面準位密度のエネルギー分布を考えると、従来のエネルギーの基準は伝導帯下端である。しかし、本研究においては、量子閉じ込め効果によって離散化する第一サブバンド下端を基準とする必要があることを提案した。その結果、界面準位密度のエネルギー分布が、界面処理法 (酸化のみ、酸化+窒化処理) に強く依存するのに対して、ボディ層濃度には依存せず一意に定まることを明らかにした (図 1)。

次に、チャネル内電子散乱機構に関して実験と解析を行った。界面処理 (酸化のみ、酸化+窒化処理、酸化+リン処理)・ボディ層濃度 (3×10^{14} – 3×10^{18} cm⁻³)・面方位 ((0001), (110), (100)) を変化させて作製した SiC MOSFET に対して Hall 効果測定を行い、可動電子・捕獲電子を切り分け、可動電子移動度を定量した。その結果、いずれの素子も 77 K で移動度が室温と比べて約 19–40% 低下することから、クーロン散乱が支配的であることを明らかにした (図 2)。さらに、複数の電子散乱過程を考慮して移動度の理論計算を行い、実験結果を説明できる散乱機構を提案し、クーロン散乱源として界面の固定電荷と捕獲電荷の可能性を指摘した。また、結晶成長のため表面にステップを有する (0001) 面においては、ラフネス散乱の影響も無視できないことを明らかにした。

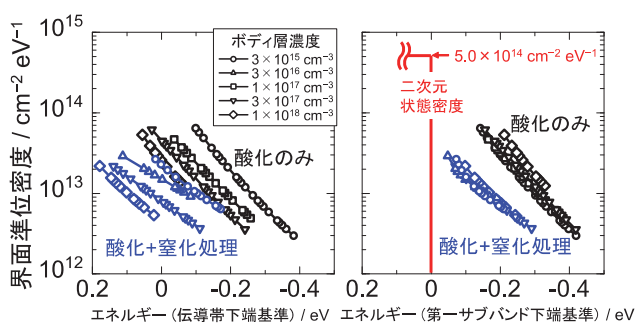


図 1: ボディ層濃度を変化させて作製した SiC MOSFET から定量した、界面準位密度のエネルギー分布。

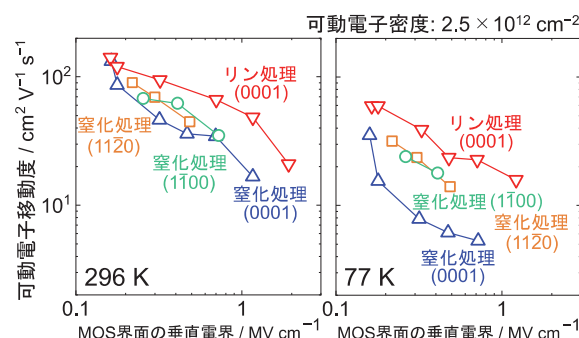


図 2: 界面処理・面方位を変化させて作製した SiC MOSFET における可動電子移動度の垂直電界依存性。

宮 谷 俊 輝 (木本恒暢 教授)

「Study on Forming and Resistive Switching Phenomena in Tantalum Oxide for Analog Memory Devices」

(アナログメモリ素子応用に向けたタンタル酸化物におけるフォーミングおよび抵抗変化現象に関する研究)

令和 5 年 3 月 23 日授与

低消費電力かつ高速動作可能な次世代不揮発性メモリの1つとして注目されている抵抗変化型メモリは、金属酸化物薄膜を電極で挟んだ単純な構造で作製され、酸化物の電気抵抗によって情報を記憶する。酸化物の抵抗状態は電圧印加によって制御され、これは、酸素空孔 (V_O) で構成される導電性パス (フィラメント) が、酸化物中で形成および断裂を繰り返す現象として理解されているが、そのメカニズムに関する理解は未だ不十分である。以上の課題を踏まえて本論文では、実用上も有望とされるタンタル (Ta) 酸化物を用いて、抵抗変化動作時のフィラメント形成 / 断裂のメカニズム解明を目的として、実験と理論の両面から研究に取り組んだ。

まず、Pt/TaO_x ($x < 2.5$)/Ta₂O₅ (10 nm)/Pt 素子において見られる特殊なフォーミング現象 (セミフォーミング)、およびその後の抵抗変化特性に関して調べた。図 1 に、3 種の酸素組成 x に対する、Pt/TaO_x/Ta₂O₅/Pt 素子の初期抵抗 R_{ini} およびセミフォーミングの発現頻度 F_{semi} の TaO_x 膜厚依存性を示す。これら 3 種類の素子において、初期抵抗の温度依存性から Ta₂O₅ 層中の V_O 密度を概算し、酸素組成の減少とともに V_O 密度は指数関数的に増加することを定量的に明らかにした。また、この V_O 密度の増加によってセミフォーミングが発現しやすくなることを示した。図 2 (a) に、セミフォーミング後に得られる典型的な電流電圧特性を示す。0 V から -3 V への電圧掃引によって、素子の抵抗値が増加するヒステリシス特性が得られる。この素子に対して、赤外線発熱解析装置を用いて、高抵抗化時の素子表面の温度分布マッピングを行い、局所的なジュール熱を観測した結果を図 2 (a) 中に示している。局所最高温度は、本素子においては約 80 °C であった。

次に、高抵抗化時の温度分布、電位分布、 V_O 濃度分布およびその時間発展を、適切な初期条件を用いて 3 つの偏微分方程式から計算した。図 2 (b) に、得られた電流電圧特性および -0.45 V 印加時の素子温度分布を Side view で示す。本シミュレーションで得られた電流電圧特性は高抵抗化時のヒステリシス特性を再現できており、素子表面の最大温度は、およそ半径 100 nm の範囲で約 70 °C に達し、実験値と整合する結果となった。さらに、シミュレーションの結果から得られる V_O 濃度分布を解析することで、高抵抗化時の V_O 輸送過程を明らかにし、電界に起因したフィラメント断裂のモデルを提案した。

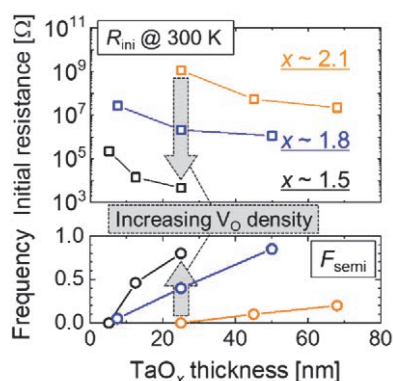


図 1：酸素組成 x を変化させた時の初期抵抗および Semi-forming 発現頻度の TaO_x 膜厚依存性。

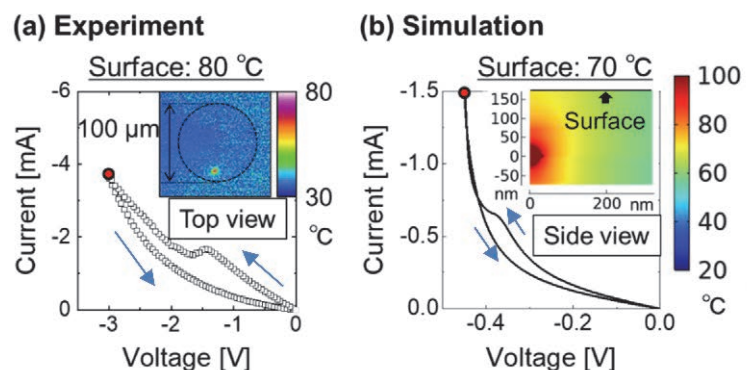


図 2：(a) 実験から得られた高抵抗化時の I - V 特性および素子表面の温度分布 (上面図). 最高局所温度は 80 °C を示した。(b) シミュレーションから得られた高抵抗化時の I - V 特性および素子温度分布 (側面図). 素子表面の最大温度は約 70 °C に達した。

赤 池 良 太 (川上養一 教授)

「MOVPE of Semipolar *r*-plane AlGaIn-based Semiconductors toward Highly Efficient Solid-state UVC Emitters」

(高効率固体 UVC 光源開発に向けた半極性 *r* 面 AlGaIn 系半導体の MOVPE 成長に関する研究)

令和 5 年 3 月 23 日授与

UVC (Ultraviolet C) 光は波長が 100 nm から 280 nm の光であり、特に波長 265 nm 程度の UVC 光は細菌・ウイルスの不活性化作用があり、浄水などへの応用が期待されている。また、波長 230 nm 以下の far-UVC 光にも細菌・ウイルスの不活性化作用があり、かつ人体に無害であることが近年知られてきた。現在の UVC 光源は水銀ランプ、エキシマランプ、エキシマレーザなどだが、それらの光源は大型・有毒元素を含む・短寿命であるなどの課題を有する。これらの光源を LED に置き換えれば上記課題が解決可能だと考えられる。現在、UVC LED は AlGaIn 系材料で作製されるが、AlGaIn 系 UVC LED の効率は 20 % 以下(特に波長 230 nm 以下の far-UVC 領域だと 1 % 以下)と、効率が低いことが問題となっている。その要因として、発光層である量子井戸層の効率(内部量子効率)が低いことが挙げられる。結晶成長の簡便さから現在は *c* 面 ((0001) 面) 上に AlGaIn 系 LED は作製されるが、AlGaIn は *c* 軸方向 ([0001] 方向) に分極を持つ材料であり、その結果量子井戸内部に電界が生じる。その電界は、逆符号の電荷を持つ電子・正孔を分離させるため、内部量子効率低下の要因の 1 つとなる。*c* 面から傾けた面である半極性面を用いれば量子井戸内部の電界を小さくできるが、表面平坦性の良好な半極性面 AlGaIn を得ることはこれまで困難であり、そのため半極性面 AlGaIn 系 UVC LED の報告は皆無であった。

本研究ではまず、様々な Al 組成の半極性 *r* 面 ((10-12) 面、*c* 面とのなす角 42.75°) AlGaIn において成長条件を精査した。特に、窒素源であるアンモニア流量を変化させることで表面に形成されるピット密度を低減でき、表面粗さの二乗平均値が 1 nm 以下の平坦な半極性 *r* 面 AlGaIn を得ることに成功した。次に、*c* 面および半極性 *r* 面上の量子井戸をフォトルミネッセンス (PL) 法により評価した。そのときの発光積分強度を量子井戸幅で割ったものを図 1 に示す。まず、*r* 面上の量子井戸は、*c* 面の量子井戸に比べて概して発光強度が高いことが分かる。加えて、*c* 面も *r* 面も、発光ピーク波長が短波長になるにつれて発光強度が減衰しているが、*c* 面では波長 230 nm 半ば付近より短波長になると発光強度が急激に低下するのに対し、*r* 面ではその落ち方がより穏やかになっており、特に波長 230 nm 以下の far-UVC 領域における *r* 面の優位性がうかがえる。時間分解 PL 法による解析の結果、その理由は *r* 面特有の速い輻射再結合速度、および非輻射再結合中心密度の低減のためだと分かった。また、波長 ~270 nm 程度で発光する世界初の半極性面 AlGaIn 系 UVC LED の作製に成功した (図 2)。これらの成果は UVC 領域の LED の高効率化に寄与するものである。

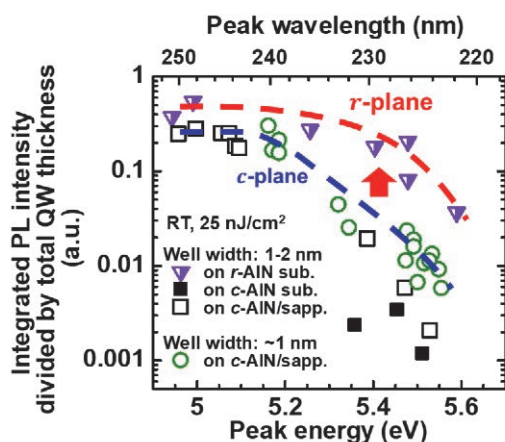


図 1 フォトルミネッセンス法により得られた発光強度の発光ピークエネルギー依存性。

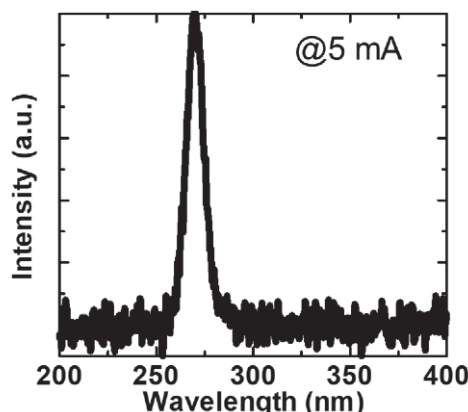


図 2 作製した半極性 *r* 面 AlGaIn 系 UVC LED の EL スペクトル。

Qianying Liu (黒橋禎夫 教授)

「Numerical Reasoning in NLP: Challenges, Innovations, and Strategies for Handling Mathematical Equivalency」

(自然言語処理における数値推論：数学的同値性の課題、革新、対処戦略)

令和5年9月25日授与

Numerical reasoning is a fundamental aspect of Natural Language Processing (NLP) research and its practical applications, playing a critical role in the development of Artificial General Intelligence (AGI). This thesis delves into the significance and complexities of numerical reasoning within NLP, offering insights into its applications across various domains such as science, finance, and news analysis. The research primarily focuses on a key challenge in numerical reasoning tasks – the presence of answers with mathematical equivalency, presenting a unique set of obstacles in model reasoning.

The thesis begins with a thorough overview of numerical reasoning's role in NLP, tracing its historical trajectory and highlighting research gaps. It then examines specific tasks and datasets, establishing the groundwork for understanding the intricacies involved. A significant focus is placed on the concept of mathematical equivalency in numerical reasoning tasks, addressing how one problem can have multiple equivalent expressions.

Key challenges explored include the Costly Expert Annotation Dilemma, emphasizing the need for scalable annotation methods; the Mismatch of Supervised Training Objective, tackling training noise and enhancing model robustness; and the Enormous Search Space and False-Matching in Weak Supervision, proposing novel strategies to navigate these issues. These challenges are met with innovative solutions such as a novel data augmentation method, a Textual Enhanced Contrastive Learning framework, and a controlled equation generation solver, all aimed at improving system performance.

The thesis contributes significantly to the advancement of numerical reasoning in NLP, proposing methods to address mathematical equivalency and enhance system accuracy. The final chapters summarize the findings and suggest future directions for research in this evolving field.

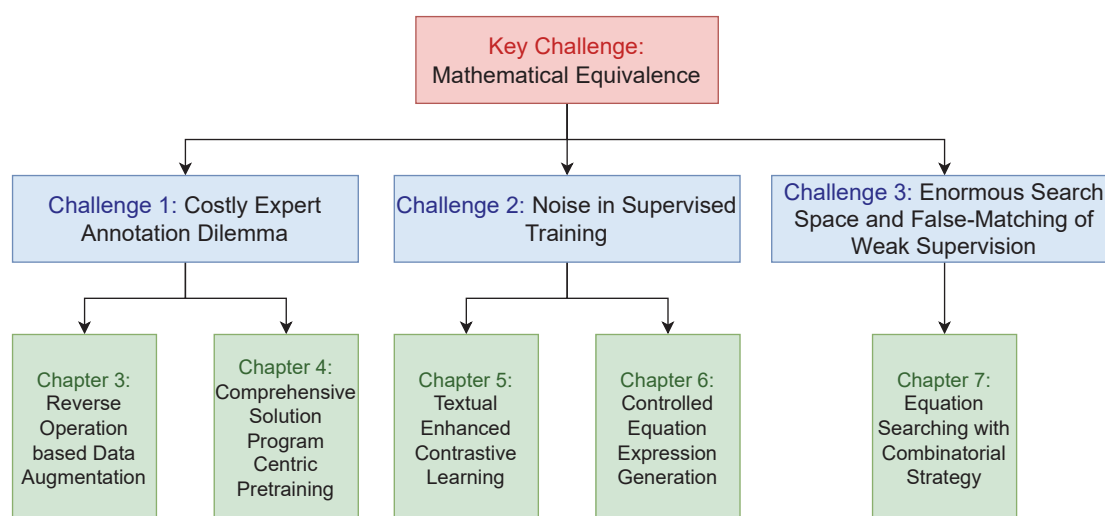


Figure 1: An overview of the topics included in this thesis.

Tareq Yaser Samih Alkhaldi (黒橋禎夫 教授)

「Studies on Question Answering in Open-Book and Closed-Book Settings」
(オーブンブックおよびクロズドブック設定における質問応答に関する研究)

令和 5 年 9 月 25 日授与

Natural language is the medium through which humans mainly communicate and store their knowledge to pass it on. Manual analysis and handling of such massive quantities of natural language is beyond human capabilities, therefore, automatically processing such information through natural language processing (NLP) has been an active field. Searching for information is typically done by asking questions in search engines and going through the returned results to find a specific piece of information in mind, which can be tiresome and time-consuming. A question answering (QA) system can automatically read those documents and return the exact answer immediately, making our lives easier. This thesis focuses on the study of the QA task in different settings.

We start this thesis by introducing the background of the QA task and explain how considering the complexity of the question, the task is divided into single-hop and multi-hop QA while considering whether the context is provided to the model alongside the question, the QA task is categorized into open-book and closed-book settings. Then we review the recent advancements in NLP, along with explaining related model architectures.

We then proceed to study improving multi-hop QA in an open-book setting. Models for handling multi-hop questions are required to identify and collect important pieces of information from the provided context documents to achieve the answer. Models that utilize the identified supporting sentences have been developed; however, they utilize such sentences ineffectively. They either only focus on the sentences to find the answer and ignore the remaining context or do not use the supporting sentences at all. We proposed a method to focus on the supporting sentences more effectively by tagging the sentences while keeping the remaining context and then using the tagged sentences for answer prediction. Additionally, the new method focuses on beneficial signals from context documents by tagging the bridging entities between the documents.

Then, we investigate the setting of closed-book QA. While the existence and the amount of factual knowledge that models memorize during pre-training have been studied, the mechanism and inner workings are not investigated. Therefore, we investigate how models memorize factual knowledge and their inner workings. Through gradient analysis and corrupting attention components with noise while observing the outcome, the query component (Q) in the attention mechanism is found to be the most responsible for finding the answer. Moreover, after pruning parts of the encoder and decoder in turns and monitoring the differences, the encoder is found to be responsible for finding the broad entity embedding, while the decoder finds the exact entity. Furthermore, using different head-scoring techniques, it is demonstrated that certain areas in the model retain more information about factual knowledge than others. Also, it is shown that related entity types are generally clustered in similar areas in the model.

We then investigate multi-hop QA in a closed-book setting and its improvement. We propose showing reasoning steps that are obtained through explicit and implicit question decomposition to the answering model to improve the performance. Several possible points for further improving the multi-hop baseline are also identified. This thesis concludes the study of QA models with varying settings and discusses possible trajectories for future research.

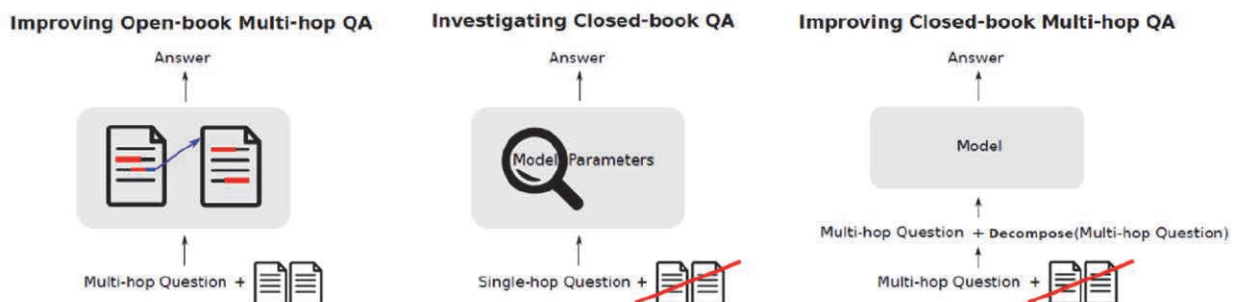


Figure 1: An overview of the topics included in this thesis.

西 村 真 衣 (西野恒 教授)

「View Birdification: On-Ground Pedestrian Movement Estimation and Prediction from Ego-centric In-Crowd Views」

(混雑環境下における自己位置及び周辺歩行者の軌跡復元・予測)

令和 5 年 3 月 24 日授与

私たちの日常様々な場所へロボットの導入が進むにつれ、人が介在する環境における自律移動技術はますます重要さを増している。本研究課題は実世界における自律移動のための基盤技術創出を目的とし、混雑環境における自己位置推定及び周辺環境の変化予測から構成される空間認識手法の確立を目指している。

混雑した環境における空間認識は、まずその空間表現である環境地図の構築と、地図上での自己位置及び歩行者の位置認識、そしてその将来変化の予測から構成される。従来の視覚情報に基づく自己位置推定では静止した特徴点を複数視点から観測し、幾何拘束を用いてキーポイントにより記述される環境地図と観測カメラの位置を同時復元するアプローチ (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) が広く用いられているが、歩行者によってキーポイントが高頻度に遮蔽される混雑環境下での自己位置推定は未だ困難であることが知られている。これに対し本研究では静的なキーポイントに一切依存せず、歩行者を動的なキーポイントとして用いるアプローチを新たに提案し、その基礎理論及び評価基盤の構築を行った。

本博士論文は一人称視点で観測された歩行者の動きのみから俯瞰視点における自己 (観測カメラ) 及び周辺歩行者の移動軌跡を復元する View Birdification という問題を定義し、その解法及び予測モデルへの拡張についてまとめたものである (図 1)。画像上で観測される 2 次元の動き特徴のみから実世界における 3 次元の動きを復元することは不良設定問題である。我々はまず動的世界の記述を 2 次元平面へ限定し、動的な特徴点が共通の運動モデルとスケール分布に従う歩行者であるという仮定を拘束として用いることで、View Birdification が幾何学的再構成の問題に帰着可能であることを示した。更に、画像上の動的な特徴点を雑踏環境の抽象表現として捉えることにより、世界モデルと呼ばれる、観測者の動きに条件付けられた周辺環境の予測モデルとして拡張し得ることを示す。本論文の貢献は以下の通りである。

(1) View Birdification をベイズ推定の枠組みで定式化し、歩行者の身長分布に基づく観測モデル、及び俯瞰視点上での群衆の動きのモデルを同時に満たすカメラ位置及び歩行者位置を事後分布最大化によって求める最適化アルゴリズムを導出した。

(2) View Birdification における視点変換、観測カメラ軌跡の推定、群衆の動きモデルの学習を交差注意機構 (Cross-Attention) 及び自己注意機構 (Self-Attention) を用いてモデル化し、データ駆動のアプローチによって俯瞰視点におけるカメラ位置及び周辺歩行者位置を同時復元する Transformer アーキテクチャを考案した。

(3) 一人称の雑踏映像から俯瞰視点における歩行者位置の復元及び予測を行う歩行者世界モデルを定義し、観測カメラの動きに条件付けて歩行者の将来位置を出力する Transformer ベースの世界モデルを構築した。また一人称視点観測から俯瞰視点の歩行者位置への変換を Conditional VAE (CVAE) を用いて生成モデルとして表現し、歩行者位置の不確かさをガウス分布として出力することで俯瞰視点における確率的な将来位置マップを得ることが可能となった。

以上本論文は、従来困難であった密に混雑した環境における自己位置推定及びその周辺歩行者位置の変化予測を初めて可能とし、実際の群衆軌跡データを用いて構築されたデータセットにおいてその有効性を実証したものである。

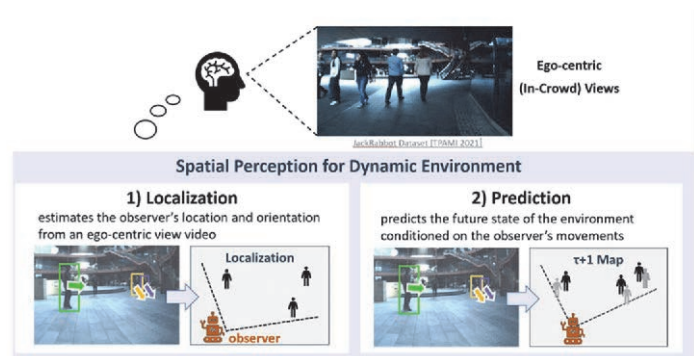


図1：一人称視点観測に基づく歩行者の軌跡復元・予測

Qin Zhaoxing (佐藤高史 教授)

「Robust design of low-voltage OTFT circuits for flexible electronic systems」

(フレキシブル電子システムに向けた低電圧有機薄膜トランジスタ回路のロバスト設計)

令和5年3月23日授与

有機トランジスタは柔軟な基板上に低温・低コストの印刷プロセス等により製造できることから、新たな情報収集への応用が期待されているが、現在の研究は、信号取得を行うセンサーの材料と構造が中心となっており、信号処理や制御回路は、従来のシリコン回路に依存している。このため、有機トランジスタの最大の特長である低製造コストを活かせない。有機システムの実用化には、取得した信号をできるだけローカルに処理する回路が必要である。また、有機トランジスタの特性は、従来のシリコントランジスタとは異なる。このため、有機トランジスタに適する回路設計が求められる。本論文では、有機システムにおけるセンサ近傍でのデータ処理の実現を目的とし、データのセキュリティ、保存、演算の三つの観点から回路構成の検討を行っている。得られた成果は以下のとおりである。

1. 有機システムにおけるデータのセキュリティ保護のために、有機トランジスタを用いる物理的複製困難関数 (PUF) 回路を提案した。提案回路はスマートラベル等として、商品の真贋判定や有機センサーで得られる情報の保護に使用できる。提案 PUF 回路は、有機トランジスタでは避け難く発生するデバイス劣化を自己補正するために、カレントミラー構造を用いる。テストチップの作製、測定を通じて、提案回路が経時劣化に対して高い耐性を持つことを示している。
2. システムデータのローカル保存に用いるスタティックメモリ (SRAM) 回路を提案した。提案 SRAM セルは、省面積化と安定性の向上のために、p 型アクセストランジスタを用いる CMOS 構造としている。また、データ保持時間を延長するために、p 型トランジスタのみを用いる Pseudo-CMOS 構成に基づく劣化緩和回路を提案した。これにより、回路が劣化を自己検知し、必要なタイミングで自動的にトランジスタの電圧ストレス劣化を緩和する。テストチップの測定により、提案 SRAM セルは従来の SRAM セルに対し面積を 50% 削減し、安定性を 2.5 倍向上できることを示した。さらに、劣化緩和回路の有効性を評価し、データ保持時間を少なくとも 3 倍延長できることを示した。
3. パストランジスタロジック (PTL) に基づく演算回路を提案した。トランジスタ数を減らし、劣化に強い p 型トランジスタを主に使う PTL を活用し、動作安定性の向上と回路面積の削減を両立させる。本論文では、最も重要な演算器の一つである加算器を例として、PTL 回路による設計を行った。有機 PTL 加算器は、従来の加算器に対しトランジスタ数を 50% 削減した。さらに、柔軟なデータ処理のために、PTL に基づく軽量な one instruction set computer (OISC) プロセッサの設計を示した。OISC プロセッサの構成は簡易であるが、チューリング完全であり、理論上は任意の演算を実行できる。PTL 全加算器を含む OISC プロセッサの要素回路の動作をテストチップの測定により確認し、有機トランジスタのみによるプロセッサ構成の可能性を示した。

以上の提案を通じ、提案回路設計手法により、有機トランジスタの性能制限の下で安定な回路動作が実現でき、フレキシブルな有機システムのみによるローカルデータ処理の実現が期待できる。

中 村 洋 平 (佐藤高史 教授)

「電力変換回路におけるパワーモジュールの熱設計に向けた特性測定とモデリング」

令和5年3月23日授与

SiC MOSFET (炭化ケイ素製 金属 - 酸化膜 - 半導体電界効果トランジスタ) は、パワーエレクトロニクスにおける有望なデバイスとして注目されている。SiC MOSFET は従来の Si 製デバイスと比べ、高耐圧、低オン抵抗、高速スイッチング、耐高温動作といった優れた特性を有している。これらの特性から、SiC MOSFET を用いた高電圧・大電流・高周波スイッチング動作による電力変換回路の小型・高効率化が期待されている。

電気自動車の主機インバータといった大電力応用 (数百 kW) に対応するため、複数の SiC MOSFET を一つのパッケージに実装したパワーモジュールが開発されている。パワーモジュールはその小型のパッケージで大電力を扱うため、デバイス単体時と比べて回路動作中の熱負荷が深刻であり、信頼性低下やデバイス破壊のおそれがある。デバイス性能を最大限に引き出し、回路全体の小型化を実現する観点からも、パワーモジュールの熱設計が重要となる。実験的アプローチでは、モジュールの試作&テストを何度も繰り返す必要があり、膨大な開発時間と金銭コストを要する。上記を解決するため、シミュレーションに基づく熱設計が望ましい。

本論文では、シミュレーションによるパワーモジュールの熱設計の実現を目的として、特性測定およびモデリングに基づいた熱推定手法を提案した。検討内容は以下の4つである：

1. 高精度な発熱推定：SiC MOSFET の高精度モデルの開発

SiC MOSFET のスイッチング動作を再現可能なモデルおよび特性測定法を開発することで、実際の高電圧・大電流条件におけるデバイス発熱の高精度推定を可能にした。

2. 高精度な温度推定：デバイス間の熱干渉を考慮したパッケージのモデリング手法の開発

パッケージ内におけるデバイス間の熱干渉 (互いの発熱により温度が上昇する現象) が測定可能な測定システムを開発した。得られた特性に基づくパッケージのモデリング手法により、高精度な温度推定を実現した。

3. 高速な発熱 & 温度推定：電気 - 熱回路連成シミュレーション手法

1. で開発した SiC MOSFET モデルを用いた事前の回路シミュレーションによる発熱 - 温度間のルックアップテーブルと、2. で開発したパッケージモデルを組み合わせることで、電力変換回路における発熱 & 温度を高精度かつ高速に推定可能であることを示した。

4. デバイス特性ばらつきの考慮：回路動作への影響が支配的なパラメータの決定手法

デバイス特性ばらつきの回路動作 (特に発熱) に対する影響が支配的なパラメータを効率的に決定する手法を提案した。複数デバイスを扱うパワーモジュールで問題となるデバイス特性ばらつきの影響を、従来手法よりも遥かに短時間で見積もることを可能にした。

以上より、シミュレーションによるパワーモジュールの熱設計の具体的な実現方法を示した。本論文の提案技術は、今後の高信頼かつ低コストなパワーモジュールの開発の一助になると考えられる。

岩 中 拓 夢 (土井俊哉 教授)

「MgB₂ 超伝導薄膜の線材化に関する基礎的研究」

令和 5 年 3 月 24 日授与

本論文は、低コストと優れた超伝導特性を両立可能と期待される MgB₂ 薄膜の線材化に向け、優れた超伝導特性を実現する成膜条件の確立、線材の曲げによる超伝導特性の劣化の検証、長尺線材の作製に向けたプロセスの開発について研究を行った。

超伝導線材に求められる最も重要な性能は、高い超伝導臨界電流密度 J_c (超伝導体の断面積あたりに電気抵抗0で流せる電流の最大値) である。本研究では、優れた磁場中 J_c が報告されている EB (Electron Beam) 蒸着法をベースに、実験計画法を用いて成膜条件を探索し、基材温度と、ホウ素とマグネシウムの成膜レート比の増加が、 J_c の向上に有効であることを明らかにした。適切な条件で作製した 1 μm 厚の MgB₂ 薄膜の J_c は、磁場を薄膜に対し垂直に印加した場合、5、10、15、20 K かつ 5 T においてそれぞれ 159,000、98,500、43,200、8,000 A/mm² であった。また、磁場を薄膜に対し平行に印加した場合、同温度、磁場における J_c はそれぞれ 167,000、85,200、38,600、5,300 A/mm² であり、いずれも実用レベルの J_c を大きく上回る非常に高い値を得ることに成功した。これらの J_c は、MgB₂ を用いた従来線材であるパウダーインチューブ (PIT) 線材の J_c に比べて、15 K、20 K においては数十倍高く、5 K、10 K においては約百倍高い値である。

次に、実用上重要である工学的臨界電流密度 J_e (超伝導線材全体の断面積あたりに電気抵抗0で流せる電流の最大値) の向上を目的に、MgB₂ 薄膜の厚膜化を実現するための検討を行った。10 μm と従来の MgB₂ 薄膜の10倍の厚さの試料を作製し、評価することで、薄膜に対し垂直に磁場を印加した際の J_c は若干低下するものの、低下後も実用レベルの数倍から数十倍の非常に高い J_c を維持できることを示し、 J_e 向上のために厚膜化が非常に有効な手段であることを示した。

続いて、MgB₂ 薄膜線材の主な用途である超伝導磁石の設計に不可欠な、曲げによる J_c の劣化について検討した。膜厚 1 μm の短尺 MgB₂ 薄膜線材を作製し、異なる曲率半径で曲げ、 J_c を測定した。曲げ半径 25.0 mm 以上の場合には MgB₂ 薄膜線材の J_c は劣化しないこと、曲げ半径 20.0 mm 以下では J_c の劣化が見られ、曲げ半径 15.0 mm で J_c が 0 になることから、MgB₂ 薄膜線材の許容曲げ半径が 25.0 mm であることを明らかにした。MgB₂ 薄膜線材の許容曲げ半径は一般的な超伝導コイルの半径より十分小さく、コイル化において障壁にならないことを明らかにした。

更に、長尺 MgB₂ 薄膜線材の作製に向け、EB 蒸着法の課題を明確にし、その課題を解決する新製法として、スパッタ法によるホウ素の供給と、加熱蒸着法によるマグネシウムの供給により MgB₂ 薄膜を形成する新製法を開発した。

以上のように、本論文で得られた知見は、低コストと優れた超伝導特性を両立可能と期待される MgB₂ 薄膜線材の実用化に大きく貢献する成果であるといえる。

QIU DECHUAN (南 貴司 准教授)

「Development of Multi-pass Thomson Scattering System with Delay Mechanism of Laser Pulses for Measuring Anisotropy of Electron Velocity Distribution Function on Heliotron J」

(ヘリオトロン J における電子速度分布関数の非等方性を観測するためのレーザーパルスの遅延機構を有するマルチパストムソン散乱システムの開発)

令和 5 年 9 月 25 日授与

磁場閉じ込め核融合装置による核融合エネルギー生成の実現のためには、高温磁化プラズマの輸送物理を解明し、プラズマ閉じこめ性能を向上させる手法を見いだすことが必要である。プラズマ輸送にはプラズマの非等方速度分布が重要な役割を果たしている可能性が考えられ速度分布関数を計測する装置を研究開発することが課題となっている。

本論文は核融合高温磁化プラズマの電子の非等方速度分布関数を計測するためにレーザーパルス遅延機構により信号分離を行うマルチパストムソン散乱計測を開発し、Heliotron J 実験に適用し電子速度分布関数の非等方性を評価した結果をまとめている。高温磁化プラズマにおいて、速度分布関数の非等方性は流体モデルでは現れない輸送の駆動や不安定性の励起などを通じプラズマに影響を与えるため、多様なダイナミクスを持つ高温磁化プラズマ現象の隠された要素と考えられており、速度分布関数の非等方性の計測が課題となっている。

本研究ではトムソン散乱計測では、レーザービームの入射方向と散乱光の検出方向で決まる散乱波数ベクトルの方向の速度分布関数が得られることを用いて、レーザービームを往復させるマルチパストムソン計測を構築し、往路と復路によりほぼ90度異なる2方向の速度分布関数を計測することで速度分布関数の非等方性を評価している。そのためにレーザーパルス遅延機構により信号分離を行うマルチパストムソン散乱計測を開発し、Heliotron J 実験に適用し電子速度分布関数の非等方性を評価している。本論文において得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 往路復路のレーザーパルスによる散乱信号を精度良く弁別するため、偏光制御システムを2つ用いる世界初の方式であるダブル偏光制御システムを開発した。ダブル偏光制御システムの実現のためダブルイメージリレー型ビーム伝送システムを考案し、ガウシアンビームモデルを用いて最適化し必要な性能を得ている。往路復路では散乱スペクトルが大きく異なるため散乱スペクトル計測に用いる干渉フィルターの通過帯域を最適化し誤差10%以下で散乱スペクトルを測定可能とした。
- (2) 本システムをHeliotron J装置に取り付け性能評価を行い、ミラーからの漏れ光の観測により18回以上の往復、ラマン散乱光の計測からレーザーパルスのプラズマ通過時間に従来の4倍の遅延を生じさせるとともに10回以上のビーム往復ができることを示した。
- (3) 電子サイクロトロン加熱で生成したプラズマに適用し、往路復路で散乱スペクトルが大きく異なる事を観測した。ここから速度分布関数の非等方性を評価し、非等方性は小さいという初期的な結果を明らかにした。

以上、本研究はトムソン散乱計測によって高温磁化プラズマの電子速度分布関数の非等方性を評価する手法を示した。本研究を契機とし、プラズマの速度分布関数の非等方性の理解が進展することで、これまでの流体的描像では解けなかった謎が解決されることが期待できる。そのことを通じて磁場閉じ込め核融合装置による核融合エネルギー生成実現に貢献する成果と考えられる。

望 月 諒 (篠原真毅 教授)

「Study on Beltrami Fields with Parallel Electric and Magnetic Fields at Microwave Frequencies」

(マイクロ波帯における電場と磁場が平行なベルトラミ場の研究)

令和5年3月23日授与

本論文はマイクロ波帯における電場と磁場が平行($E \parallel H$)な電磁ベルトラミ場の実現に向けた理論および数値的研究についてまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 従来未導出であった単一周波数で正弦波振動する $E \parallel H$ 場の一般解を数学的に導出した。単一周波数 $E \parallel H$ 場は E と H の比例係数関数の時間依存性によって2つのクラスに分類されることを示し、各クラスにおいて適切な手法で $E \parallel H$ 場の一般解を導出した(図1)。1つ目のクラス(Case I)の $E \parallel H$ 場はベルトラミ場である。Case I $E \parallel H$ 場ではヘルムホルツ方程式解の積分表示を利用することで積分表示の $E \parallel H$ 場の一般解を得た。この一般解を利用することで、未発見の $E \parallel H$ 場の一例を得た。2つ目のクラス(Case II)の $E \parallel H$ 場はベルトラミ場ではない。Case II $E \parallel H$ 場では正則関数の性質を利用することで $E \parallel H$ 場の一般解を得た。
2. 軸対称な $E \parallel H$ 場を閉じ込める半波長円筒空洞共振器を提案した。 $E \parallel H$ ベルトラミ場は通常の導体壁境界条件とは矛盾することが過去に指摘されており、閉空間では $E \parallel H$ 場は存在不可能であると考えられていた。しかし、本論文では共振器側面と端部において $E \parallel H$ ベルトラミ場と両立する特殊な境界条件としてlongitudinal electromagnetic conductor(LEMC)およびcircumferential electromagnetic conductor(CEMC)をそれぞれ提案した。LEMCは電場と磁場の縦断面方向成分を共にゼロにする特殊な境界条件で、CEMCは電場と磁場の周方向成分を共にゼロにする特殊な境界条件である。LEMCとCEMCは周方向に配置されたコルゲーションを備えた円筒導波管と同心円的に配置された円形フィンによってそれぞれ実装可能であることを示した。そして、LEMCおよびCEMCを備えた半波長円筒空洞共振器を設計し(図2)、設計した空洞共振器内に $E \parallel H$ 場が発生することを数値シミュレーションで証明した。さらに、従来の共振器にはない電気および磁気エネルギー密度の空間分布の一致およびポインティングベクトルゼロの特異性質を確認した。
3. $E \parallel H$ 場を閉じ込める円筒空洞共振器の現実的な実装方法を提示した。上述の円筒空洞共振器は外部系からの孤立を仮定したが、実際の利用には外部回路との結合による共振器の励振機構が不可欠である。本章では特殊な端部境界条件としてradial electromagnetic conductor(REMC)を新たに提案した。REMCは径方向の電場と磁場を共にゼロにする境界条件であり軸対称に配置された放射状フィンによって実装される。外部回路との結合スロットを備えたCEMCおよびREMC端部によって励振機構を実現した。そして $E \parallel H$ 場を発生させるための結合係数に関する条件を回路理論的に導いた。 $E \parallel H$ 場発生条件を満たすLEMC、CEMCおよびREMCを備えた円筒空洞共振器を複数設計し、いずれの共振器内にも $E \parallel H$ 場が発生することを数値シミュレーションで証明した。

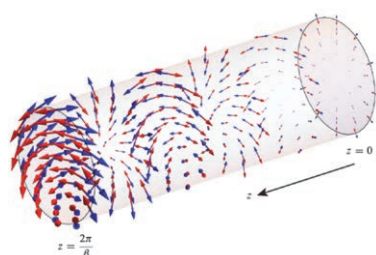


図1：導かれた左手系ベルトラミ場 (赤：電界, 青：磁界)

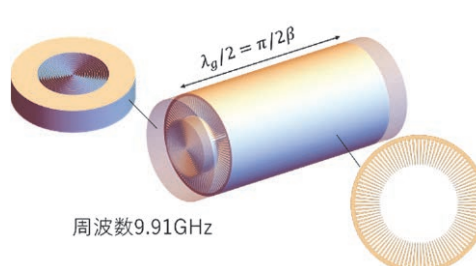


図2：LEMC導波管とCEMC端部から成る半波長空洞共振器

高校生のページ

低電力・小型・高速半導体集積回路の設計・開発と そのバイオ・医療 IoT 応用 ～バイオ発電と低電力センサ集積回路を用いた単独自立動作 持続血糖モニタコンタクト、非侵襲・早期がん診断を行う 半導体集積回路の開発～

大学院情報学研究科 情報学専攻 通信情報システムコース
集積システム工学講座 大規模集積回路分野
(兼任) 工学部 電気電子工学科
新 津 葵 一

1. はじめに

私たちの日々の情報社会を下支えしている技術の一つが、半導体集積回路です。半導体集積回路は、あらゆる分野において活用され、無くてはならない戦略物資となっています。半導体集積回路が発明された当初は、半導体を設計・開発できるのは、大規模な半導体製造工場を有するごく一部の企業のみでしたが、現在は水平分業がすすみ、工場を持たなくても設計・開発が可能となっています。

例えば、米アップル社が販売する iPhone や iPad、Macbook に使われている半導体集積回路の中で、演算（コンピューティング）や画像処理、AI 機能を担うアプリケーションプロセッサ（iPhone では A シリーズプロセッサ、Macbook では M シリーズプロセッサなど）は、米アップル社自身が設計を行い、製造は台湾 TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) 社が行っています。このような、設計と製造を水平分業するビジネスモデルは、ファウンドリ・ファブレスモデルと呼ばれ、昨今の半導体集積回路産業において主流となっています。

ファウンドリ・ファブレスモデルにおいては、代表的なファウンドリ企業・ファブレス企業があります。ファウンドリについては台湾 TSMC 社、米 Globalfoundries 社、中国 SMIC 社、台湾 UMC 社などがあり、日本国内においても、Rapidus 社などにおいて研究開発が行われています。一方、ファブレス企業については、先述の米アップル社、GPU で有名な米 NVIDIA 社、Android 搭載スマートフォンで有名な米 Qualcomm 社などが挙げられます。1 社のみでファウンドリ機能（製造）もファブレス機能（設計）も両方有する企業、いわゆる垂直統合型の半導体企業は、PC 向けプロセッサで有名な米 Intel 社、韓国 Samsung 社、NAND フラッシュメモリを開発する日本・キオクシア社などが挙げられます。

このようなファウンドリ・ファブレスモデルが普及した中で、半導体集積回路設計研究において大学に大きなチャンスが巡ってきました。大学の 1 研究室ですと人数も研究開発費でも限られておりますが、小規模な試作であれば実施が可能となっています。

私どもの研究室では、目指す社会像を想定し自らアプリケーションを開拓し、それを可能にする低電力・小型・高速動作半導体集積回路設計技術を確立して、実集積回路システムまでを開発することを目指して研究開発を行っています。

2. 低電力・小型半導体集積回路の設計・開発とそのバイオ・医療 IoT 応用

半導体集積回路の低電力・小型という特長を活かして、高エネルギー効率大規模半導体集積回路設計技術の研究開発とその応用開拓を行っています。

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

発電センシング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デューサとして一体的に活用する”技術です。センサを駆動するために必須であったバイアス電圧供給回路が不要となり、飛躍的な低コスト化・低消費電力化が可能となりました。さらに、糖尿病医療・予防に貢献するコンタクトレンズ型持続血糖モニタリング装置の開発に世界で初めて成功しました。グーグル関連会社の従来装置は、無線電力伝送を用いていたために電力供給用メガネ端末が必須でしたが、開発した発電センシング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界最小電力の無線送信機集積回路の開発に成功しました。これらを融合し、世界で初めてメガネ型端末不要のコンタクトレンズ型持続血糖モニタリングの実証に成功しました。

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

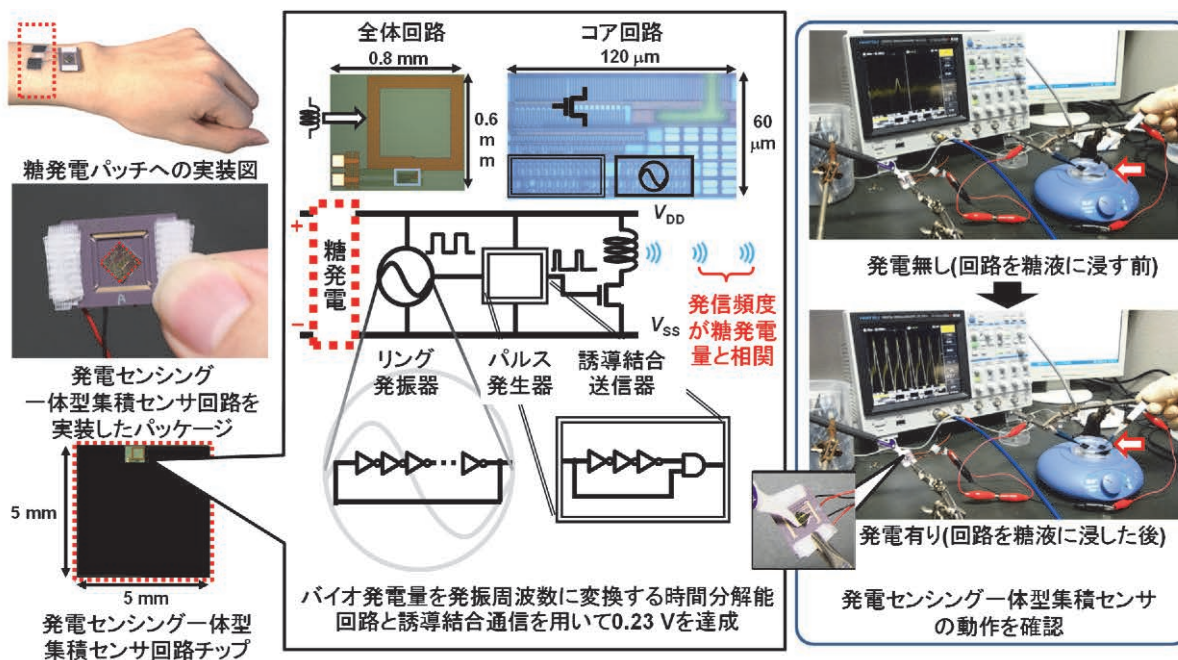


図 1：開発した世界初のバイオ発電素子（糖発電素子）と融合した電力自立バイオセンサ：発電量をそのままセンシング信号としても活用する「発電センシング一体型集積センサ技術」の有効性を実証、時間分解能回路と誘導結合通信の導入により 0.23V を達成

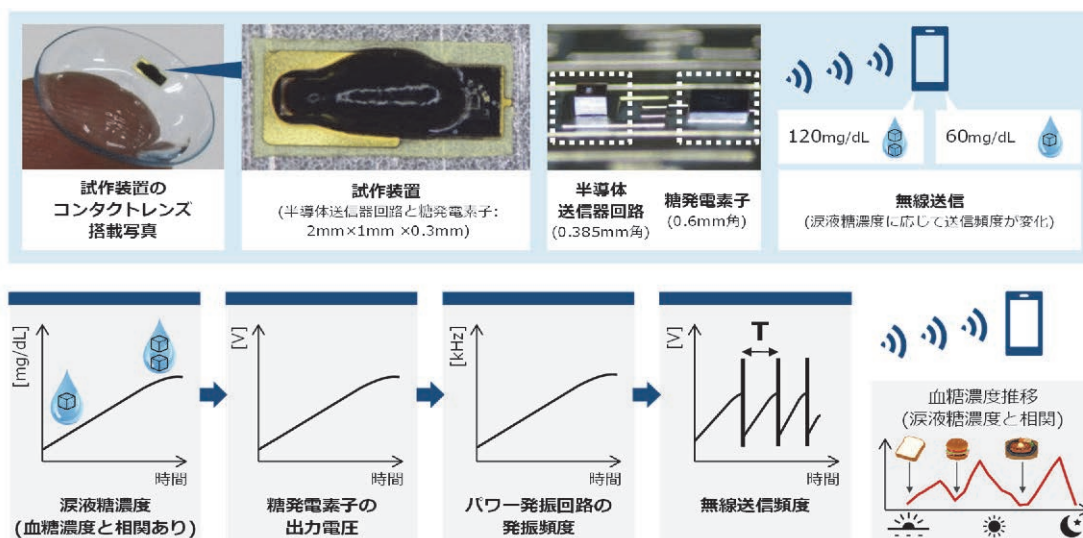


図2：開発した発電センシング一体型集積センサ技術を用いた電力自立持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

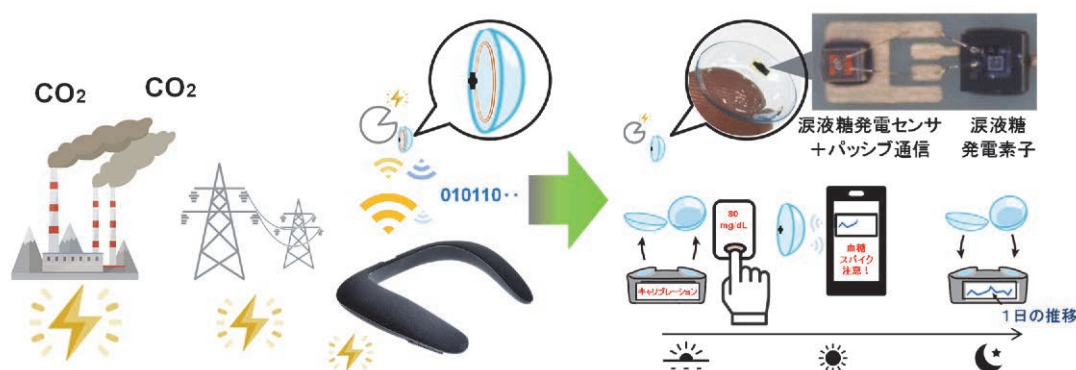


図3：エネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズのコンセプト図

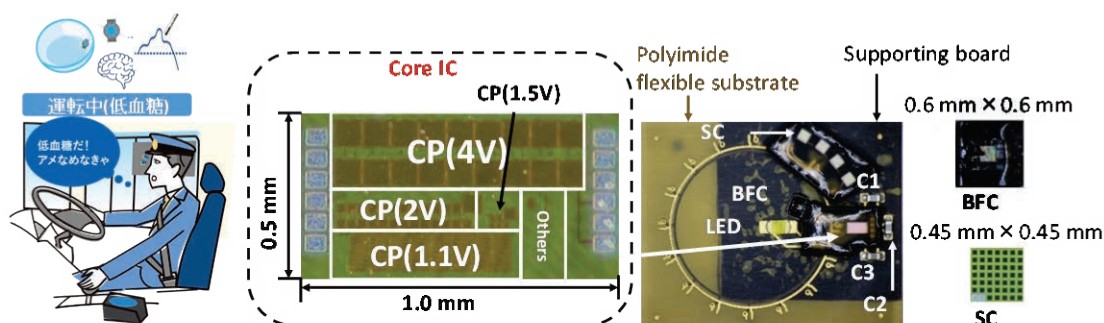
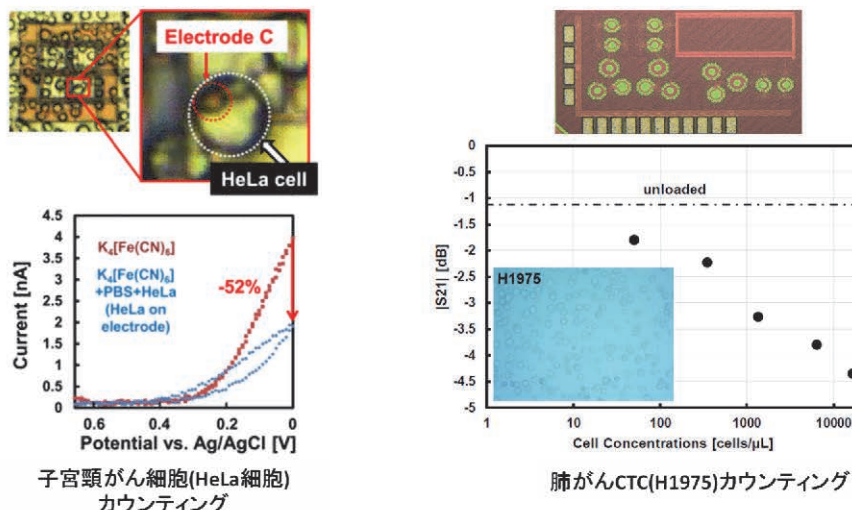


図4：開発したエネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

の伝送です。エネルギーの伝送においては無線電力伝送を、データの伝送においては無線通信が活用されますが、集積回路システム内での伝送に比べると、エネルギー効率が悪いという課題があります。そこで、エネルギー・データをその場で生成／活用するエネルギー・データの地産地消方式によるIoT

- 低侵襲がん治療に向けた半導体集積回路システムを提案
- 世界最高密度のバイオセンサ回路を実現し、がん細胞(子宮頸がん細胞)のカウンティングに成功



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

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

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

3. 高速動作を活かした非侵襲・早期がん診断を行う半導体集積回路の開発

低侵襲がん治療向け半導体集積回路システムを提案しました。1024 × 1024 画素・3.6 μ m × 4.45 μ m ピッチと世界最高密度のバイオセンサ回路を実現し、がん細胞（子宮頸がん細胞）のカウンティングに成功しました。従来用いられていなかった無電解金メッキ技術を集積回路上の電極形成に活用し、1.2 μ m × 2.05 μ m と世界最小サイズの集積回路上金電極形成に成功しました。電極形成技術と電流検出回路技術と融合することで集積回路上でのがん細胞検出技術を実現している。さらに本技術を発展させ、集積回路上ミリ波帯ネットワークアナライザと伝送線路を用いて低消費電力に CTC（抹消血浮遊がん細胞）ならびにエクソソームを検出する集積回路技術の開発に世界で初めて成功しました。グルコースのミリ波帯における伝搬特性の濃度依存性を用いた非侵襲血糖モニタリングについても開発を行い、世界で初めて耳装着型非侵襲血糖モニタリング集積回路の実証に成功しました。

参考文献

集積システム工学講座 WEB ページ：<https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

新津研究室 WEB ページ：<http://id-lab.jp/>

個人 WEB ページ：<https://www.niitsulab.info/>

- G. Chen, Y. Wang, T. M. Quan, N. Matsuyama, T. Tsujimura and K. Niitsu, "A 0.5 mm² Solar Cell-Powered Biofuel Cell-Input Biosensing System with LED Driving for Stand-Alone RF-Less Continuous Glucose Monitoring Contact Lens", *IEEE Solid-State Circuits Letters (SSC-L)*, vol. 5, pp. 41–44, Feb. 2022.
- A. Tanaka, G. Chen, and K. Niitsu, "A 4.5-mW 22-nm CMOS Label-Free Frequency-Shift $3 \times 3 \times 2$ 3D Biosensor Array Using Vertically-Stacked 60-GHz LC Oscillators", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs (TCAS-II)*, vol. 69, no. 10, pp. 4078-4082, Oct. 2022.
- K. Niitsu, T. Nakanishi, S. Murakami, M. Matsunaga, A. Kobayashi, N. M. Karim, J. Ito, N. Ozawa, T. Hase, H. Tanaka, M. Sato, H. Kondo, K. Ishikawa, H. Odaka, Y. Hasegawa, M. Hori, and K. Nakazato, "A 65-nm CMOS Fully Integrated Analysis Platform Using an On-Chip Vector Network Analyzer and a Transmission-Line-Based Detection Window for Analyzing Circulating Tumor Cell and Exosome", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS)*, vol. 13, no. 2 pp.470-479, Apr. 2019.
- K. Hayashi, S. Arata, S. Murakami, Y. Nishio, A. Kobayashi, and K. Niitsu, "A 6.1nA Fully-Integrated CMOS Supply-Modulated OOK Transmitter in 55nm DDC CMOS for Glass-Free, Self-Powered, and Fuel-Cell-Embedded Continuous Glucose Monitoring Contact Lens", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II (TCAS-II)*, vol.65, no.10, pp.1360-1364, Oct. 2018.
- K. Niitsu, A. Kobayashi, K. Hayashi, Y. Nishio, K. Ikeda, T. Ando, Y. Ogawa, H. Kai, M. Nishizawa, and K. Nakazato, "A Self-Powered Supply-Sensing Biosensor Platform Using Bio Fuel Cell and Low-Voltage, Low-Cost CMOS Supply-Controlled Ring Oscillator with Inductive-Coupling Transmitter for Healthcare IoT", *IEEE Transactions on Circuits and Systems I (TCAS-I)*, vol.65, no.9, pp.2784-2796, Sep. 2018.
- A. Kobayashi, K. Ikeda, Y. Ogawa, H. Kai, M. Nishizawa, K. Nakazato, and K. Niitsu, "Design and Experimental Verification of 0.19 V 53 μ W 65 nm CMOS Integrated Supply-Sensing Sensor with a Supply-Insensitive Temperature Sensor and Inductive-Coupling Transmitter for a Self-Powered Bio-Sensing Using a Biofuel Cell", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS)*, vol.11, no.6, pp.1313-1323, Dec. 2017.
- K. Niitsu, S. Ota, K. Gamo, H. Kondo, M. Hori, and K. Nakazato, "Development of Microelectrode Arrays Using Electroless Plating for CMOS-Based Direct Counting of Bacterial and HeLa Cells", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS)*, vol.9, no.5, pp.607-619, Nov. 2015.
- K. Niitsu, M. Sakurai, N. Harigai, T. J. Yamaguchi, and H. Kobayashi, "CMOS Circuits to Measure Timing Jitter Using a Self-Referenced Clock and a Cascaded Time Difference Amplifier with Duty-Cycle Compensation", *IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC)*, vol.47, no.11, pp.2701-2710, Nov. 2012.
- K. Niitsu, N. Harigai, D. Hirabayashi, D. Oki, M. Sakurai, O. Kobayashi, T. J. Yamaguchi, and H. Kobayashi, "A Clock Jitter Reduction Circuit Using Gated Phase Blending Between Self-Delayed Clock Edges", in *Proc. IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSIC 2012)*, Jun. 2012, pp.142-143.
- K. Niitsu, Y. Shimazaki, Y. Sugimori, Y. Kohama, K. Kasuga, I. Nonomura, M. Saen, S. Komatsu, K. Osada, N. Irie, T. Hattori, A. Hasegawa, and T. Kuroda, "An Inductive-Coupling Link for 3D Integration of a 90nm CMOS Processor and a 65nm CMOS SRAM", in *Proc. IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2009)*, Feb. 2009, pp.480-481.

学生の声

かぎ針編みにおける裏編み

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻
中村研究室 博士後期課程2年 山下 湧志朗

私が最近悔しかったことを紹介します。それは、「かぎ針編みにおける裏編み」の存在に自分で気づけなかったことです。

私は趣味としてジャグリングと編み物をしています。ジャグリングでは新しい技を作るのが好きで、今まで多くの技を作ってきました。特に好きなのは技の部品となる新たな動きを思いついたときで、既存の動きとの組み合わせで派生技のバリエーションが大きく広がることに喜びを感じます。その一方で編み物においては、自分で編み図を書くことはあっても、技法を開発することはありませんでした。編み物の歴史の長さや関わってきた人数を考えれば、基本的な編み方はとっくの昔に開拓され尽くしていると思い込んでいたからです。

ところが最近、かぎ針編みにおける裏編みを新たに開発したという話をSNSで見かけたのです。かぎ針編みは1本の先が曲がった針を使って編む手法で、編地の表裏をあまり区別せず同じ編み方で往復しながら編み進めます。裏編みというのはまっすぐな棒を使った棒針編みの技法です。棒針編みでは編地の表裏を明確に区別するため「表から通常の編み方をしたときと同じ構造になる、裏から編むときの編み方」が存在し、それが裏編みと呼ばれています。言われてみればかぎ針の編み目にも表裏の違いはあるわけで、理屈上は裏編みが存在するべきなのですが、そこには今まで全く思い至りませんでした。かぎ針編みにおける裏編みは、素朴な発想で誰にでも思いつくチャンスがあり、かつ大きな発展性を持つ発明なので、自分で思いつけなかったことが悔しくてなりません。

悔しいだけで終わるわけにはいけないので、この経験を研究生活にも活かそうと思います。今回得た学びは、どんなに探求され尽くしていそうな領域でも、ごく基礎的で発展性のあるアイデアがまだ残されているかもしれないということです。ジャグリングでは自然にできていた「他の道具での動きを参考に新しい動きを作る」という考えを編み物に適用できていなかったのは、これ以上新しいものは存在しないはずだという思い込みによる部分が大きかったように感じます。研究においても誰かが既にやり尽くしただろうという思い込みは捨て、一度は自分の頭で幅広く考えてみることで、良い発見があるかもしれないと期待しています。

The Road

工学研究科 電気工学専攻 海老原研究室 博士後期課程3年 張 天

Roads are usually perceived as physical objects. For example, national highways, provincial roads, county roads, etc. That is to say, the road has become a means of transportation or a carrier for people to walk. But I think the road has a deeper meaning. The road could be a bridge of communication between the mankind, that is, the road of mind. It is a conversation between friends, a communication between parents and children, a discussion between teachers and students. Especially for our international students, it is of great prominence to find the "road" to undergo the culture shock, understand the culture difference and undertake the adjustment.

To a beginner in research, the road of mind becomes the ideas of how to make a study. Choice of the topic, usage of the method, analysis of the data and so on, all play roles in the road to a good study. **There are not any roads on the ground until people walk upon them**, once remarked Lu Xun (鲁迅). While, in science since the solid theories/facts obtained by former scientists become the road, young researchers tend to walk on these roads, learning naturally the latest, and perhaps the most popular theory, and believe that it is the only useful one. No students would love to explore the non-existent road anymore. That is why innovation is encouraged all the time.

Life is like a road you travel on. We may never know the best one to the future, but when standing at the crossroads, once the decision is made, **better to run than curse the road**.

教室通信

情報学研究科および通信情報システム専攻の改組について

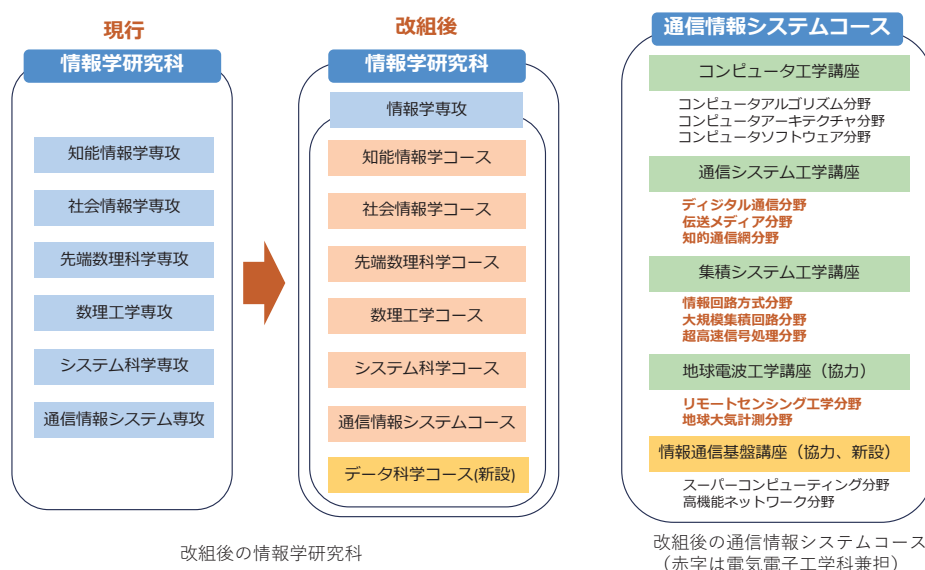
情報学研究科 通信情報システムコース コース長 原 田 博 司

情報学研究科では従来6専攻で構成されていた組織が令和5年4月より新たに情報学専攻として1専攻化されました。

改組の背景として、自然および人工システムにおける情報に関する学問領域である情報学がさまざまな学問分野に浸透し、基盤になりつつある現状があります。それに伴い情報学外の他の学問分野との融合による新たな分野が文理を問わず創出され、研究科創設時の専攻や講座の構成ではこの新しい分野にカバーできない状況が増え始めています。今回の改組の主な目的は、このような状況に柔軟にかつ機動的に対応するための体制を構築することにあります。

1専攻にはなりましたが、既存の6専攻は教育コースとして従前どおり運営され、さらにデータ科学コースが新設されました。これにより、既存の教育に加え、新たに近年その需要が高まっている数理・データサイエンス・AI教育に関して大学院レベルの教育を専攻横断で行うことができ、学生は自身の専門分野の教育だけでなく専門分野を拡張、深化させる他の専門領域の教育を柔軟に受けることが可能になります。また、改組、新設に伴い修士課程の入学定員が増員され、学生定員は一体的に管理されます。

電気系教室に直結する専攻の一つである通信情報システム専攻は、通信情報システムコースとして新たにスタートすることになりました。このコース化に伴い新たな改組があり、従来4講座、11分野（研究室）で構成されていた講座、分野が、学術情報メディアセンターより1講座、2分野が新たに加わり、5講座、13分野で構成されることになりました。改組により研究分野のより近い研究室がコースとして集結することにより、コンピュータ、通信システム、集積システム、センシングシステムの分野に関してより専門性が高く、広範囲の教育を行うことが可能になります。今後この改組に伴い学科、大学院のより強固な連携および強固な連携をもとにした通信情報に関する一貫した教育環境、体制の構築が必要になります。引き続きより一層のご支援をお願いいたします。



賛助会員の声

ロームの研究開発と産学連携の取り組みについて

ローム株式会社 研究開発センター 基幹技術研究開発部 中 村 洋 平

1. はじめに

私は京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程を修了後、2016年にローム株式会社に入社しました。入社以来、パワー半導体素子に関する研究開発に携わっています。入社後は社会人博士として京都大学に再入学し、2023年に同大学院情報学研究科通信システム専攻博士後期課程を修了しました。本稿では、ローム株式会社における研究開発と産学連携について、自身の経験や取り組みを交えて紹介させていただきます。

2. ローム株式会社について

ローム株式会社（以下、ローム）は京都に本社を置く半導体メーカーです。ローム（ROHM）の社名は、創業当時から手掛けている抵抗器（Resistor）の頭文字「R」に抵抗値の単位 Ω （ohm）を組み合わせたものです。「R」は信頼性（Reliability）にも通じており、品質を第一とするロームのポリシーを表しています。抵抗器から手を広げ、現在はパワー・アナログ分野を中心に、LSI、ディスクリート半導体素子（トランジスタやダイオード）、モジュールまで、幅広い製品を提供する、国内有数の半導体メーカーです。半導体部品は家電や情報機器、自動車といった身の回りの製品には必ず使われていますが、直接目にするのは殆ど無いと思います。製品にロームのロゴが貼ってあるわけでもないため、一般の消費者の方にはあまり馴染みのない企業かもしれません。関西、特に京都在住の方には、ラジオCM（FM802）のサウンドロゴ「ローム〜♪」や京都会館コンサートホールの命名権取得「ロームシアター京都」など、半導体以外での知名度のほうが高いのではないのでしょうか。

私がロームを知ったきっかけは、学生時代から取り組んでいた半導体に関する研究でした。研究に楽しさを見出してきた時期にOBリクルーター訪問が重なったこともあり、自然とロームに興味を持ちました。ロームでは人財育成の一環として社会人博士を認めていることを知り、経済的事情で博士課程をほぼ諦めていた当時の私には、これが入社決定打となりました。幸いにも希望していた研究開発部門に配属され、現在に至ります。

3. 研究開発と産学連携の取り組み

ロームの研究開発では、新規性よりも「誰の役に立つのか」「何の課題を解決するのか」を重視しています。研究テーマは、「面白い」「新規性が高い」といった観点で立案しがちですが、それでは技術の追求が目的化し、商品開発につながりにくくなります。企業の研究開発の目的は、あくまで市場の課題解決に貢献することであると考えています。そのため、新しい技術を「創る」とことと、それを事業のために現実化する「作る」の均衡を忘れないよう、研究開発を進めています。

産学連携は、新しい技術を「創る」の役割を担うと考えています。企業の研究は最終的には商品化が不可欠である以上、商品になるまでの知識を幅広く把握しないとはいけません。「何かを知りたい」という純粋な思いで、技術の本質を追求している大学の研究と比べるとやや深みが足りず、企業だけでは新

しい技術の芽は出にくいと言えます。ロームでは、上記を補うために共同研究や研究公募といった産学連携に積極的に取り組んでおり、京都大学とも20年以上前からいくつもの共同研究を実施しております。京都大学との共同研究で得られた成果の中でも顕著なのがSiCパワー半導体素子（SBD^{*1}およびMOSFET^{*2}）の開発であり、現在ロームが全社的に注力している主力製品となるまでに至っています。以下では、私が従事している京都大学との共同研究について説明します。

*1：Schottky Barrier Diode（ショットキーバリアダイオード）

*2：Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor（金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ）

4. 京都大学との共同研究：SiC MOSFETの回路シミュレーション技術開発

現在、私は情報学研究科集積システム工学佐藤教授と共同でSiC MOSFETの回路シミュレーション技術の開発に取り組んでいます。SiC MOSFETは、従来のSiパワー半導体と比較して高耐圧、低オン抵抗、高速スイッチング、耐高温動作といった優れた特性を持っており、これらを活かすことで高電圧・大電流・高周波スイッチングが可能となります。SiC MOSFETを用いることで、EV用インバータ、データセンター用電源、再生可能エネルギー用パワーコンディショナーといった電力変換回路の劇的な小型化・高効率化が実現でき、省エネルギー化に大きく貢献します。ただし、上記を実現するには、SiC MOSFETを「使いこなす」技術が重要になります。高電圧・大電流動作は発熱、高周波スイッチング動作はノイズという望ましくないものを回路で生じさせ、これらを設計・試作の繰り返しで解決するのは時間・コストの浪費につながります。この課題を解決するのが、デバイスモデルを用いた回路シミュレーションです。SiC MOSFETの回路動作をシミュレーション上で予測することで、試作レスの設計が可能となります。本研究で開発したデバイスモデルによって、SiC MOSFETの回路動作の高精度な再現を実現しました（図1）。

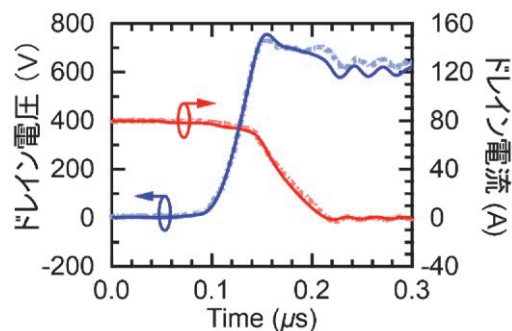


図1：開発モデルの実測精度の検証結果
（実測：点線、モデル：実線）

より実用的な回路設計を実現するためには、デバイスモデル以外にパッケージの熱モデルや、デバイスの特性ばらつき推定といった技術も重要であり、本研究で進めてきました。詳しい情報に関しては、以下の文献に記載しています。こちらもぜひご覧ください。

（中村 洋平, 電力変換回路におけるパワーモジュールの熱設計に向けた特性測定とモデリング, 2023, URL：<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/283866>）

5. 学生や教員の皆様へ

半導体の市場は、従来はデジタル情報機器を軸に発展してきましたが、最近は自動車の電動化、IoTに代表されるあらゆる産業のスマート化など、今までになかった分野での需要が急拡大しています。こうした従来の延長線上には解を見いだせない時こそ、ロームの研究開発が成果を出す最大のチャンスです。ロームでは、これまでに無い市場価値・技術の創出や、それらに積極的に取り組むことができる人材を求めています。今後も産学連携を通じ、皆様と一緒に世界に先駆けた商品を創造することで社会に貢献していきたいと考えております。

編集後記

2024年元日に発生しました能登半島地震で被災された皆様に心よりお見舞い申し上げます。被害を受けられた皆様の安全と1日でも早く平穏な生活に戻られますことを心よりお祈り申し上げます。関西電力(株)社長の森様にご寄稿頂きました今号の「巻頭言」では2011年の東日本大震災当時やそれ以降の取り組みについてご紹介いただきましたが、電力および情報通信が現代社会のライフラインであることを改めて感じています。「産業界の技術動向」については、前号に引き続いて自ら起業をされた方々からのお声として、2014年に(株)ZEALS(ジールス)を立ち上げられました遠藤竜太様からAIスタートアップ挑戦の軌跡と展望についてご紹介いただきました。遠藤様ご自身の貴重な経験に基づく内容で、今後スタートアップを目指される方々への参考になろうかと思います。また今号では賛助会員様からのお声として、ローム(株)中村洋平様より研究開発と産学連携の取り組みについて、特に京都大学との共同研究成果をもとにご紹介頂きました。京都発祥企業の一つとして今後の更なる産学連携強化を期待するとともに、人材育成の面では高等教育を通じた大学の貢献も重要です。辰年は、昇り龍に例えられますように飛躍の年とも呼ばれます。皆様の益々のご健勝とご多幸をお祈り申し上げます。

[T.M.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
ローム株式会社

発行日：令和6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、三谷 友彦、
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

