ISSN　2433- 605X

cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.45　　MARCH 2021

[第45号]

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。

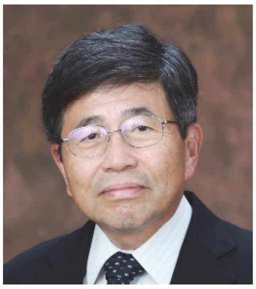
cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環として京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員やその他の企業の協力により発行されています。

cue 45 号 目次

巻頭言

企業における研究開発の醍醐味

日立製作所　研究開発グループ　技術顧問　平　本　和　夫



筆者は電気系教室の学部を1976年に卒業、1978年に修士課程を修了し、当初、博士課程に進むことを考えたが迷いながら民間企業に就職、およそ40年間いろいろな分野の研究開発に携わり“世の中を変える面白い技術を創り出す”夢を追い求めてきた。この間、数々の失敗や苦労を経験したが、一方、いくつかワクワクする楽しさを経験し、醍醐味を味わった。今回、技術情報誌「cue」の巻頭言を記す機会を頂き、何を記せばお役にたてるか大いに悩んだが、これから研究開発に進もうとする学生さん方に向け、“世の中を変える面白い技術を作り出す”楽しさを何とかお伝えできればと思い、長年の筆者の経験を紹介させて頂くことにした。

筆者は、1978年に就職する時、研究所で核融合実験装置の研究開発を行うことを希望した。その結果、希望どおりに研究所に配属になったが、希望からはずれた原子炉炉心の設計研究に従事することを命じられ、大いに落胆した。筆者は、原子炉炉心についてまったくの素人で、なかなか戦力になれなかった。しかし、上司や先輩から細やかな指導を受け、教わった研究開発に取組む姿勢、論文や特許の執筆方法等は筆者が研究者として成長するための貴重な礎になった。

原子炉研究に携わって8年が過ぎたころ、LSIリソグラフィーにシンクロトロン放射光を使う工業用加速器の開発プロジェクトがスタートした。大学在学中にプラズマ波動や荷電粒子の振る舞いなどを学んだ筆者にとって興味をそそる開発テーマであり、だめだろうと思いつつ、新規プロジェクトに加わりたいと異動を強く希望した結果、上司は聞き入れてくれた。この時以来、研究開発業務に関して希望、主張をぶつけていけば大いにかなえられると思うようになった。原子炉研究の時と同様、筆者に加速器そのものに関する知識は無かったが、異動を希望した手前、何とか早く戦力になりたいと思い、懸命に勉強した。目標であった工業用加速器は、技術的にハードルが非常に高いものであったが、加速器開発そのものは成功し、加速器の分野では社外から高い評価をいただけた。しかし、LSIリソグラフィーへの適用という面では、従来から有力な技術であったレーザ他を使う技術に比べて飛躍的な性能を得ることができず、製品・実用化は失敗に終わった。

1990年近くになり、1946年に物理学者Wilson博士が提案した陽子線がん治療が米国の大学病院で始まった。Wilson博士の提案は、高エネルギーに加速した粒子線をがんに向けて照射すると損傷をがんに集中させることができる治療で、体にやさしく、高い治療効果が期待できる魅力的な技術である。国内では、米国に数年遅れたが、炭素線を使うがん治療装置開発の国家プロジェクトが始まり、国内電機メーカもこのプロジェクトに参画し、筆者は加速器の基本設計を担当した。筆者は、体に優しい治療が必要な高齢者や子供の患者さんから、粒子線がん治療への期待が高まっていくと考え、治療装置の製品化を社内で繰り返し提案し、漸くそのための開発をスタートさせることができた。

粒子線がん治療装置では、加速した粒子線を加速器から取り出して治療室へ輸送し、治療室の照射装置から治療台に固定された患者さんのがんに向けて照射する。開発を始めた当初は、加速器に物理研究用の技術をそのまま使うことを考えたが、出射する粒子線の位置安定性や再現性、出射、停止の高速切

り替えに課題があり、粒子線の持つ物理的特長を活かしきれないと考え、解決策を模索した。繰り返し考えて1年以上すぎて漸く高周波を使う粒子線出射方法を着想し、多数の課題を解決できた。ほかにもいくつか解決すべき課題があり、製品化におよそ6年を要し、陽子線治療装置の製品1号機の稼働は2000年になった。特に、初めての患者さんの治療が行われた日、安全に治療照射が終わった知らせを聞いた時に開発チームで分かち合った嬉しさは忘れられない。また、開発した前述の高周波を使う粒子線出射技術は、その後、粒子線治療用シンクロトロン加速器のほぼ全てで用いられるようになった。

粒子線を患者さんに照射する方法については、基礎研究の時代からスキャニング照射法が理想に近いと考えられていたが、粒子線制御の面で実現困難と考えられ、1990年の米国での治療開始以後、散乱体照射法と呼ばれる方法が用いられていた。2000年になり、米国の著名ながんセンターがスキャニング照射法を用いる陽子線治療装置の開発を計画し、計画への応募を呼びかけて来た。筆者らは、開発した前述の粒子線の出射技術を用いれば、スキャニング照射法を実現できると考えて計画に応募すると、ベルギーの競合メーカも応募し、激しい競争の結果、筆者らの提案が採用された。スキャニング照射法の実現までさまざまな苦労を経験したが、結局、2008年にスキャニング照射法による陽子線治療が始まり、それ以後、開発された世界の粒子線がん治療装置は、ほぼすべてスキャニング照射法を用いるようになった。

スキャニング照射法は実現したが、呼吸で動く臓器の治療では、所望の照射量分布を得ることが困難になる課題が残っていた。その解決に向け、2009年に始まった最先端研究開発支援プログラムFIRSTで北海道大学で開発された動く臓器の位置を追跡する動体追跡技術とスキャニング照射法を組み合わせる動体追跡スキャニング照射技術の開発が採択された。この開発では、動体追跡技術とスキャニング照射を単に組み合わせただけでは、治療時間が大幅に増えてしまう課題があったが、北海道大学と緊密に連携して解決策を見出し、呼吸で動くがんについてもスキャニング照射を用いることができるようになった。このように治療技術を向上させてきた結果、開発した技術は、世界の先端がんセンター28施設（うち国内17施設）の治療装置で全部で50000人を超える患者さんの治療に適用されてきた。

以上のように、筆者は、原子炉、工業用加速器そして粒子線がん治療装置などさまざまな分野の研究開発に携わり、“世の中を変える面白い技術を創り出す” 夢を追い求め、失敗、苦労を経験する中で研究開発の醍醐味を満喫できた。そのうえ、令和元年には、技術者冥利につきる紫綬褒章を頂き、望外の喜びを感じることができた。

本稿が、これから研究開発に進もうと考えている学生の皆さんの参考になり、“世の中を変える面白い技術を創り出す” きっかけ（cue）となることを願う次第である。

大学の研究・動向

光子を用いた量子技術

工学研究科　電子工学専攻
教授　竹　内　繁　樹
准教授　岡　本　　　亮
助教　高　島　秀　聡

1. はじめに

光子や電子などの「量子」は、古典的な粒子とは全く異なる振る舞いをします。それらの「量子状態」を完全に制御し、従来のコンピュータでは時間がかかりすぎ解くことのできない問題を解く「量子コンピュータ」や、観測出来なかった現象を観察する「量子計測」などの実現が期待されています。竹内研究室では、光子を用いた量子技術に関する研究を推進しています。本稿では、その中で、量子的な光を用いることで、分散による分解能劣化を克服することができる量子光断層撮影の研究、および、ナノテクノロジーを駆使した単一光子状態生成に向けた研究について紹介します。

2. 量子光断層撮影の研究

光干渉断層撮影（Optical Coherence Tomography、OCT）は、低コヒーレンス光干渉に基づく距離計測法を応用したものであり、MIT の Huang、Fujimoto らによって断層撮影技術として開発されました[1]。OCT は、その基本構成がマイケルソン干渉計と類似しています（図 1（a））。マイケルソン干渉計では、光源の光をビームスプリッタで 2 つの経路に分岐し、再び合波して干渉させた後、出力光の強度を光検出器で測定します。このとき、一方の経路長を掃引すると、2 つの経路の光路長が一致する近傍で干渉信号が得られます。OCT では、一方の光路にサンプルを設置し、もう一方の光路に設置された遅延ミラーを走査することで、サンプル内での光の反射位置を測定します。つまりサンプルの深さ方向に対する測定対象物の構造を知ることができます。分解能は干渉信号幅に対応するが、信号幅と光源の帯域は反比例するため、高分解能を得るためには、広帯域光源が必要となります。一方で、光が広帯域になるほど、分散の影響が大きくなり分解能が低下するというトレードオフの関係があり、これが現在、OCT の分解能が 5 μm から 10 μm 程度に制限されている主な理由です。

それを解決する方法として、周波数でもつれ合った光子対を利用する量子光干渉断層撮影（Quantum

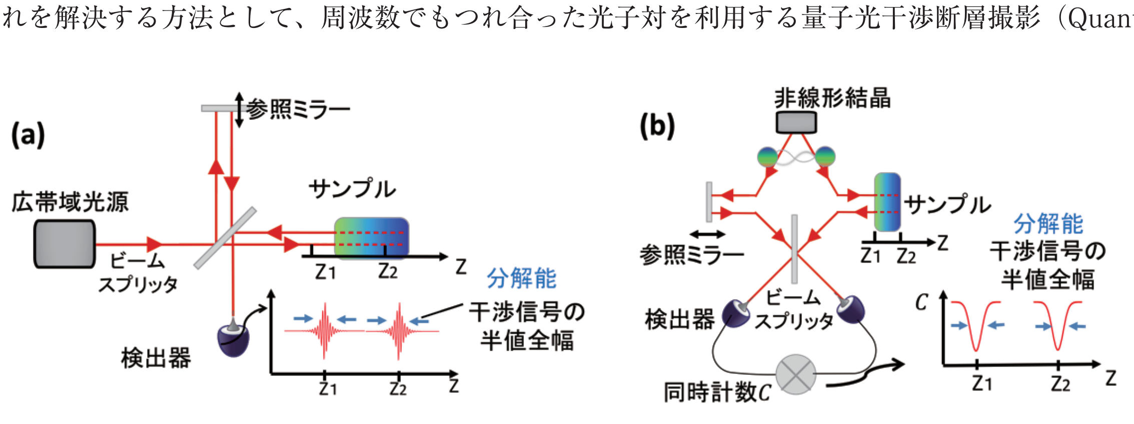


図 1:（a）OCT 測定系の概念図；（b）QOCT 測定系の概念図。

optical coherence tomography、以下では量子 OCT と呼ぶ)が 2002 年に提案された [2]。量子 OCT では、2 光子間の周波数もつれを巧みに利用することで、群速度分散の影響を物理的に打ち消すことが可能であり、分散環境下でも高い分解能を維持することが可能です。図 1（b）は量子 OCT の概念図を示しています。非線形光学結晶にポンプレーザー光を入射すると、パラメトリック下方変換過程を介して、光子が対で発生します。この時、エネルギー保存則が満たされるため、ポンプレーザー光の周波数と、光子対に含まれる個々の光子の周波数の和は等しくなります。その結果、光子対に含まれる個々の光子の周波数の間に相関が生まれ、それら様々な相関状態が、重ね合わせ状態としてコヒーレントに生成されるため、「周波数もつれ状態」となります。発生した光子対の一方は、参照ミラーへ、もう一方はサンプルに導かれた後、ビームスプリッタに入射される。光子をビームスプリッタの両側のポートから同時に入射すると、2 光子量子干渉と呼ばれる現象 [3] が起き、二つの光子がビームスプリッタのどちらかのポートに偏って出力されます。従って、この時、ビームスプリッタの出力部で二つの光子検出器を用いて同時計数を行うと、同時計数が観測されません。そのため図 1（b）のように参照ミラーを掃引すると、2 つの経路の光路長が一致する場合にのみ 2 光子量子干渉が起き、ディップ形状が観測される（図 1（b）右下）。このようにして、サンプルの断層構造を可視化することができます。量子 OCT の分解能は、2 光子量子干渉によるディップの幅で決まりますが、上で述べた通り群速度分散耐性があるため、群速度分散下でもこの幅が変化せず、分解能が低下しません。さらに、同程度の帯域の光源を用いた場合、OCT よりも $\sqrt{2}$ ～ 2 倍程度高い分解能が実現できます [4]。これらの特徴から量子 OCT は、従来の OCT が直面している分解能の限界を超えることが期待できます。

これまで、量子 OCT に関する様々な研究が報告されてきました。2003 年、Boston 大学の Teich らにより、量子 OCT の分散耐性が初めて実証されました [4]。また、2009 年には同グループにより生体サンプル（玉ねぎの表皮）の量子 OCT による撮像が報告されました [5]。しかし、これらの研究では、分散耐性の実証は、20 μm 程度の分解能に限られていました。その様な中、我々は、パラメトリック下方変換の位相整合条件の最適化、及び光子検出システムの広帯域化により、3 μm という高分解能域での量子 OCT の分散耐性の検証に成功しています [5]。その後、周波数もつれ光源のさらなる広帯域化を実現するために、物質材料研究機構の栗村グループとの共同で、分極反転周期をチャープさせた特殊な擬似位相整合素子を開発、帯域 380 nm の超広帯域周波数もつれ光子対を生成しました [6]。図 2（a）は、この超広帯域周波数もつれ光源により取得された 2 光子干渉信号です [6]。図から、2 光子量子干渉信号のディップ幅（半値全幅）は 0.54 μm でありこれが、量子 OCT の分解能に対応します。超広帯域光源

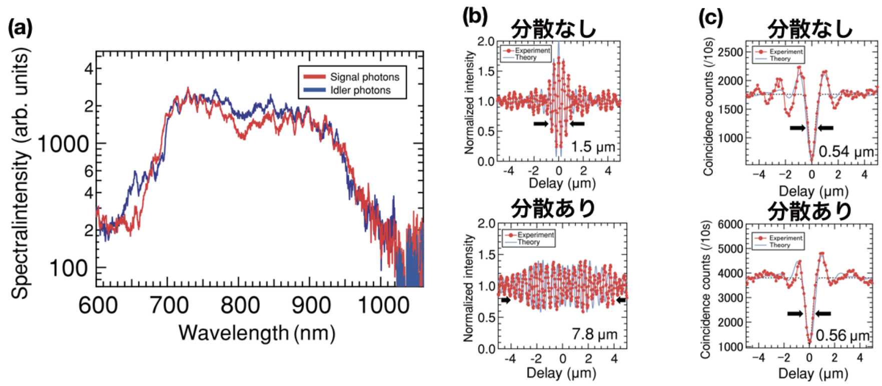


図 2:（a）166 THz（λ = 660–1040 nm）の超高帯域周波数もつれ光子対スペクトル；（b）OCT の測定信号、分散がない時に 1.5 μm の分解能を観測したことに対して、1 mm の水の分散に分解能は 78 μm まで劣化した；（c）QOCT の測定信号は分散の影響をほぼ受けずに、0.54 μm（0.56 μm）程度の分解能を確認した。

を用いることで、従来の量子 OCT の光源由来の限界を超える分解能を実現しました。次に、分散の影響を検証するために、1 mm 厚の水サンプルを挿入しました。この場合の実験結果を図 2（b）に示します。図から、2 光子量子干渉のディップ幅がほぼ変化していないことが分かります。一方、同じ帯域を持った古典光による OCT の干渉信号は、水の群速度分散の影響で、干渉縞の幅が著しく拡がり、その半値全幅は 1.5 μm から 7.8 μm へと大きく劣化しました（図 2（c）、（d））。今回実現した 0.54 μm という分解能は、我々の知る限りにおける従来の OCT の分解能記録である 0.75 μm[7] を超える値です。そしてこのような超高分解能域においても、量子 OCT の分散耐性が保持されることを明らかにしました。

以上のように我々は、超高分解能量子 OCT を実現するための基盤技術を開発してきました。現在我々は、周波数もつれ光源の高輝度化に取り組んでおり、既に顕著な成果を得ています [8]。高輝度化により、量子 OCT のボトルネックであった測定スピードの問題が解決され、超高分解能・高速量子 OCT システムの実現が視野に入ります。これにより、将来的には眼底や皮膚深部のような分散の影響が顕著な状況でのリアルタイム超高分解能イメージングへの路が拓かれます。

3. ナノフォトニクスを用いた単一光子状態生成に向けた研究

光子を用いた量子技術を実現する上で重要なデバイスの一つが、単一の光子を効率良く発生させる「高効率単一光子源」です。我々は、この実現を目指し、単一の光子を発生させる単一発光体と、ナノスケールの構造体（ナノ光デバイス）とを結合させたハイブリッドデバイスの開発を行ってきました。次に、これらの研究に関し、新規単一発光体として注目されている欠陥中心を導入した六方晶窒化ホウ素（hBN）を用いた研究、ならびに、ナノ光ファイバブラッグ共振器（NFBC）の高 Q 値化に関する研究を紹介します。

hBN とは、窒素とホウ素が六角形の格子状に交互に並んだ層状物質です。熱処理などにより hBN 中に欠陥中心を導入すると、バンドギャップ内にサブバンドが形成され、光子が発生するようになります。この発光は極めて明るく、また、スペクトル幅も狭く単色性に優れます。このため、単一欠陥中心含有 hBN は、近年、室温動作単一光子源を実現する物質として注目されています。

まず、hBN 中の欠陥中心に作られる電気双極子の方向推定について紹介します。欠陥中心から発生した光子がナノ光デバイスへ結合する効率は、電気双極子の向きに大きく依存します。しかし、これまで、

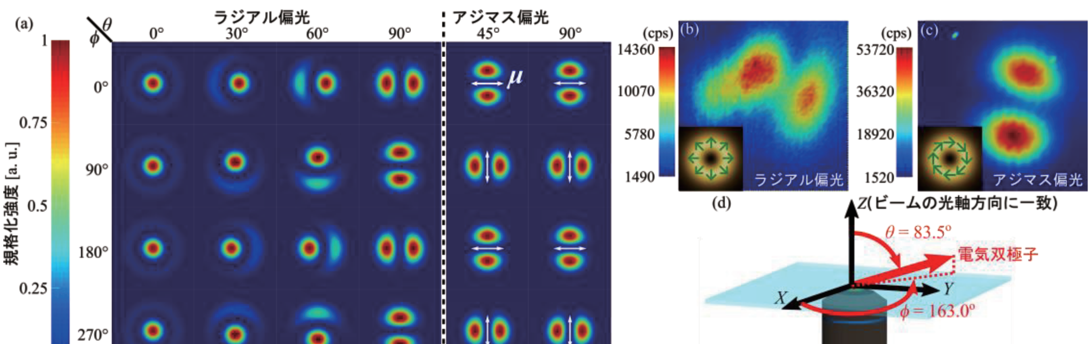


図 3 （a）蛍光イメージの計算結果。左側はラジアル偏光ビーム、右側はアジマス偏光ビームの場合。図中の矢印は電気双極子（μ）の向きを表します。（b）および（c）は、ラジアル偏光およびアジマス偏光ビームを用いた場合の蛍光イメージ（実験）。（c）推定された電気双極子の向き。

hBN 中の欠陥中心に作られる電気双極子の向きは、十分に明らかにされていませんでした。

そこで、我々は、ビームの中心から動径方向に電場が振動するラジアル偏光ビームと、ビームの円周方向に電場が振動するアジマス偏光ビームを用い、電気双極子の方向推定を行いました [9]。これらの偏光ビームを倍率が高い対物レンズを用いて集光すると、通常の直線偏光とは異なり、蛍光イメージが電気双極子の向きにより変化します（図 3（a））。そのため、得られた蛍光イメージを、パターン解析することで電気双極子の向きを明らかにすることが可能になります。

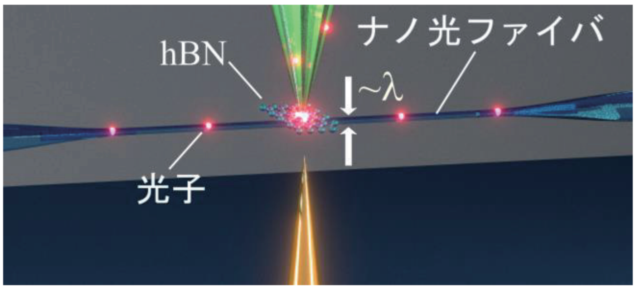


図 4　hBN ナノ微粒子とナノ光ファイバとの結合のイメージ図

我々は、半波長板の向きを連続的に変化させた特殊な偏光光学素子を用い、直線偏光のビームから、ラジアル偏光ビームおよびアジマス偏光ビームを作り出しました。そして、それぞれの偏光ビームを、開口数（NA）が大きい対物レンズを用いて集光し、蛍光イメージを測定（図 3（a）および（b））、理論結果との比較を行いました。その結果、電気双極子の向きが、ビームの光軸から 83.5 度、垂直な面内で 163 度傾いていることが明らかになりました（図 3（c））。さらに、複数の試料についても調査した結果、電気双極子がビームの光軸から平均で約 80 度傾いていることもわかりました。

次に、欠陥中心含有 hBN ナノ微粒子と、ナノ光ファイバとの結合に関する研究を紹介します [10]。ナノ光ファイバとは、単一モード光ファイバを加熱延伸することで、一部を光の波長以下まで細くした光ファイバのことです。通常の単一モード光ファイバは、屈折率がわずかに高いコアと、その外側にシリカガラスからできたクラッドからなる二重構造をしているため、光はコア中を伝搬します。一方、ナノ光ファイバでは、ファイバの直径が細くなるにつれ、コアから光が漏れ出し、ファイバ全体をコア周囲の媒質をクラッドとして伝搬します。この時、ファイバの直径を断熱的に変化させることで、ほぼ 100% に迫る高い透過率を実現できます。また、ファイバの直径が細い部分では、電場がファイバ外部に大きくしみ出していることから、単一発光体から発生した光子を、高い効率（最大約 30%）で光ファイバに結合させることも可能です [11]。

我々は、光ファイバをセラミックヒーターで加熱延伸することでナノ光ファイバを作製しました。そして、ナノマニピュレーション技術を用いて、作製したナノ光ファイバの表面に、単一欠陥中心含有 hBN ナノ微粒子を結合させせました。その結果、hBN ナノ微粒子から発生した光子を、約 10% の効率で光ファイバへ結合させることに成功しました（図 4）[10]。この効率は、通常の対物レンズを用いて得られる 2~3% よりも大きい値です。ただし、この研究では hBN 中の電気双極子の向き最適化されていません。この向きを最適化することで、理論限界に迫る（30%程度）結合効率も可能になると考えられます [11]。

最後にナノ光ファイバブラッグ共振器（NFBC）の高 Q 値化に関する研究を紹介します。NFBC とは、ナノ微細加工技術によって、ナノ光ファイバの一部に微小光共振器を書き込んだものです。共振器によって光ファイバ方向への発光が増強されるため、ナノ光ファイバよりの結合効率を著しく向上させることが可能となります。

これまで我々は、Ga イオンを用いた集束イオンビーム（FIB）装置を用いて NFBC の開発を行ってきました [12]。しかし、作製された NFBC の光閉じ込め効率（Q 値）は 250 程度に限られていました。そこで、NFBC の高 Q 値化を目指し、1 nm 以下の高い分解能と残留イオンの影響がないヘリウム（He）

イオンを用いたFIB装置を用い、NFBCの作製を行いました[13]。

図5（a）に、片側80周期のグレーティングを作製したNFBCの走査イオン顕微鏡像を示しました。320 nm周期のグレーティングが間隔をあけて二組加工されていることがわかります。図5(b)は、作製したNFBCの透過スペクトルです。Gaイオン FIB装置を用いた場合に比べ、Q値は450に向上しました。また、我々は、片側320周期のグレーティングからなるNFBCを作製、4000以上のQ値をもつNFBCの作製にも成功しました。これにより、単一発光体から発生する光子を80%以上の効率で単一モード光ファイバへ結合できるようになります[14]。

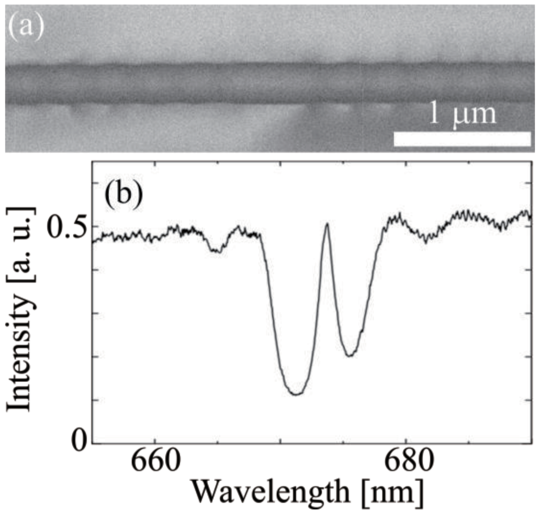


図5　(a) Heイオン FIB装置を用いて作製したNFBCの走査イオン顕微鏡像。(b) 作製したNFBCの透過スペクトル。

4. まとめ

本稿では、まず、量子光断層撮影について紹介しました。上記でも述べましたが、現在我々は、周波数もつれ光源の高輝度化に取り組んでおり、既に顕著な成果を得ています[8]。高輝度化により、量子OCTのボトルネックであった測定スピードの問題が解決され、超高分解能・高速量子OCTシステムの実現が視野に入ります。これにより、生命科学分野への貢献が十分期待できます。たとえば、群速度分散耐性をもつ量子OCTにより、サブミクロンの垂直・水平分解能で、表面から数十から数百μ十下にある細胞形状の3次元立体像を得ることも可能となるかもしれません。

次に、単一欠陥中心を導入したhBNを用いた研究として、電気双極子の方向推定、ならびに、ナノ光ファイバとの結合を紹介しました。また、Heイオン FIB装置を用いたNFBCの高Q値化に関する研究を紹介しました。本編でも述べたように、hBN中の電気双極子の方向推定を、発光体の位置を制御するナノマニピュレーション技術と融合させると､理論限界に迫る高い効率（約30%）で光子を光ファイバへ結合させることが可能となります[3]。また、NFBCとの結合により、結合効率のさらなる向上も可能となります。それにより、量子技術の不可欠な高効率単一光子源の実現も期待できます。

また、今回は紙面の都合で述べなかったが、最近、周波数量子もつれ状態を、集積化可能なチップ上にて、同種の素子において世界最大の波長域とモード数で実現しています [15]。他にも、時間的に変化する量子状態を推定できる「連続適応量子状態推定」を提案、シミュレーションおよび実験で、物理学の限界の精度で推定できることを実証しています [16]。また、光子の量子もつれ状態を、従来に比べて著しく高い効率で検証する方法の実証に、構築した6つの光子間量子ゲートを含む光量子回路を用いて成功しています[17]。

参考文献

[1] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, Science, **254** (1991) 1178.

[2] A. F. Abouraddy, M. B. Nasr, B. E. A. Saleh, A. V. Sergienko, and M. C. Teich, Phys. Rev. A, **65** (2002) 053817.

[3] C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett., **59** (1987) 2044.

[4] M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa, and S. Takeuchi, Phys. Rev. A, **88** (2013) 043845.

[5] M. B. Nasr, D. P. Goode, N. Nguyen, G. Rong, L. Yang, B. M. Reinhard, B. E. A. Saleh, and M. C. Teich, Opt. Commun., **282** (2009) 1154.

[6] M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura, and S. Takeuchi, Sci. Rep., **5** (2015) 18042.

[7] B. Povazay, *et al.*, Opt. Lett., **27** (2002) 1800.

[8] B. Cao, R. Okamoto, M. Hisamitsu, K. Tokuda, and S. Takeuchi, 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America), paper eb_p_25 (Munich, 2019).

[9] Hideaki Takashima, Hironaga Maruya, Keita Ishihara, Toshiyuki Tashima, Konosuke Shimazaki, Andreas W. Schell, Toan Trong Tran, Igor Aharonovich, and Shigeki Takeuchi , ACS Photonics, **7**, 2056-2063 (2020).

[10] Andreas W. Schell, Hideaki Takashima, Toan Trong Tran, Igor Aharonovich, and Shigeki Takeuchi, ACS Photonics, 2017, **4** (4), pp 761-767.

[11] Mohamed Almokhtar, Masazumi Fujiwara, Hideaki Takashima, and Shigeki Takeuchi, Optics Express, **22**, 20045-20059 (2014).

[12] Andreas W. Schell, Hideaki Takashima, Shunya Kamioka, Yasuko Oe, Masazumi Fujiwara, Oliver Benson and Shigeki Takeuchi, Scientific Reports **5**, 9619 (2015).

[13] Hideaki Takashima, Atsushi Fukuda, Hironaga Maruya, Toshiyuki Tashima, Andreas W. Schell, and Shigeki Takeuchi, Optics Express, **27**, 6792-6800 (2019).

[14] Hideaki Takashima, Masazumi Fujiwara, Andreas W. Schell, and Shigeki Takeuchi, Optics Express, **24**, 15050 (2016).

[15] K. Sugiura, Z. Yin, R. Okamoto, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, S. T. Chu, B. E. Little, and S. Takeuchi, Applied Physics Letters, **116**, 224001 (2020).

[16] S. Nohara, R. Okamoto, A. Fujiwara, and S. Takeuchi, Physical Review A, **102**, 030401 (2020).

[17] T. Kiyohara, N. Yamashiro, R. Okamoto, H. Araki, J.-Y. Wu, H. F. Hofmann, and S. Takeuchi, Optica, **7**, 1517-1523 (2020).

産業界の技術動向

第５世代無線通信普及に向けた課題と取組み

所属　ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社　アナログ LSI 事業部
谷　口　　　理

1. はじめに

第５世代無線通信（5G）に対応した携帯端末が各通信キャリアから発売され、国内でもいよいよ 5G サービスが始まった。国内キャリアによる 5G サービスエリアの例では、2020 年 12 月時点で、4G サービスが地図上全領域で展開されているのに対し、5G サービスエリアは非常に限定的となっている。今後、徐々にエリアを拡大し 2021 年５月時で都心部に広く展開し、2023 年度に展開率 97% を目指す計画となっている [1、2]。4G 同等の通信サービス環境が構築されるのは 2024 年頃になり、構築に伴って様々なサービスが提供されると考えられ、大変楽しみなところである。データトラフィックの爆発的な増加、Internet of Things と呼ばれる多数のセンシング・通信デバイスの接続といった無線通信動向予測を背景に 5G 通信に関する議論が凡そ 10 年前から始まり [3、4]、2016 年頃から携帯電話システムの国際標準仕様を策定する 3rd Generation Partnership Project[5] にて本格化した。図１に示すように最高伝送速度 20Gbps、接続端末密度 10^6 台 /km^2、遅延 1msec 等と、4G 性能を大きく上回る意欲的な性能指標がユースケースに応じて設定されている [6]。2020 年時点での商用サービスは、昨年策定された enhance mobile broadband の仕様の一部に基づくものであり、残る技術仕様、課題整理が 3GPP にて継続されている。

5G では 4G の利用周波数（最大 3.6GHz）を、FR1（Frequency Range1, 0.45GHz-6GHz、サブ６とも呼ばれる）や FR2（24.25GHz-52.6GHz、ミリ波）にまで拡張し、更なる伝送速度・通信容量向上を図っている。図２に主な地域において使用が想定されている周波数帯を示す [7]。各国の事情により利用周波数帯にずれがあるものの FR1 および２を用いる想定となっている。また、既に FR3（6-24GHz）やさらに FR2 よりも高い 52.6-71GHz 利用の議論も 3GPP にて始まっている。この利用周波数の拡張は、基地局だけでなく携帯端末に対して様々な技術的課題解決を要請しており、以下に詳しく述べる。

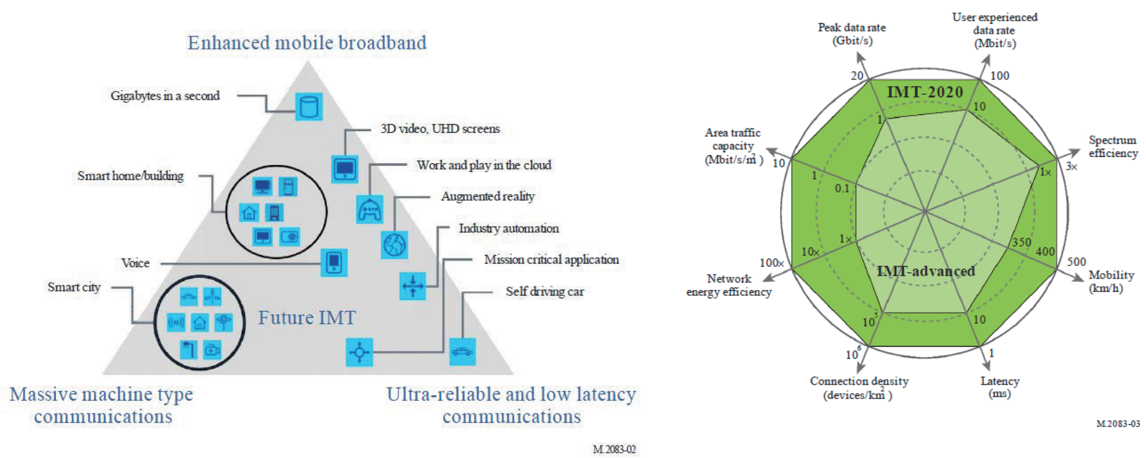


図１　5G の主なユースケースと性能指標 [6]
（IMT-Advanced が LTE-Advanced の、IMT-2020 が 5G の目標仕様を表す）

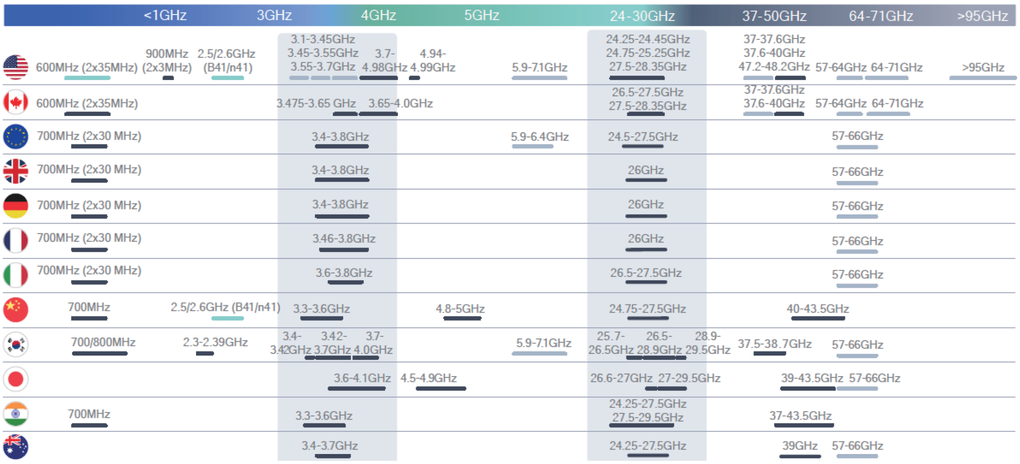


図 2　各地域で 5G 通信周波数割り当て [7]
（━ Licensed、━ Unlicensed、━ Existing band）

2. 5G 携帯端末における課題

サブ 6

端末の機能は、音声通話、テキスト配信、静止画視聴･撮影、動画視聴･撮影と通信環境の向上に伴って高度化し、ディスプレイサイズの大型化により利便性向上に繋がっている。最新のハイエンドスマートフォンでは、ディスプレイサイズは 6~7 インチに達しており、このサイズ拡大はイメージセンサーの大型化や多数化による撮像機能向上や大型バッテリーによる使用時間の確保に充てられている。通信機能に着目すると、4G では通信容量拡大のため、MIMO やキャリアアグリゲーション等、複数のアンテナを用いる技術が導入された。加えて Wi-Fi や Bluetooth、GPS 等、様々な通信機能に対応するため、端末筐体内に設置されるアンテナや通信用 IC の数が急増した。図 3-a に端末に用いられる典型的な通信回路構成を示す。信号処理を行う Base Band 部、デジタル信号とアナログ信号変換と周波数変換を行う RF IC 部、そして高周波アナログ信号の増幅を行う RF Front End 部（図の破線部内）から成っている。図 3-b は 4G 端末の典型的な通信ブロックを示しており、異なる周波数帯や通信方式に対応するため、多数のアンテナや IC が用いられている様子が見て取れる [8]。アンテナの周波数で決まる物理的なサイズのため、員数増加に伴い筐体内でのスペース確保が課題となったことから、対策としてアンテナをレーザー描画により筐体の一部に形成する Laser Direct Structuring 技術が導入された（図 4）[9]。5G サブ 6 の導入により、端末のサイズ制約の中、更なるアンテナ数増加と周波数帯域拡大のためアンテナ特性の劣化が避けられず、通信品質の低下を招く要因になっており、その対策が急務となっている。

ミリ波

ミリ波は 1GHz と広い帯域（サブ 6 最大 100MHz）利用により高速データ伝送が可能である一方、大気や遮蔽物による伝搬損失が増加する [10]。その対策として図 5 に示すアレーアンテナを用いて電波放射特性に指向性を持たせ、所望の方向にのみ高い放射特性を得るビームフォーミング技術と位相器を利用して放射方向を最適化するビームステアリング技術が、5G ミリ波向けに導入されている [11]。更に、周波数 30GHz 以上では波長が 10mm 以下となりアンテナと IC 間の伝送線路損失も無視できず、線路長を短縮し損失を抑えるためにアレーアンテナ基板の裏面に IC を実装する構造が提案されている。図 6-a に基地局用アレーアンテナの例を示す。アレーアンテナ基板のサイズ制約が小さい基地局では、32~128 本の多数のアンテナを同時に利用し、端末との通信を行っている。

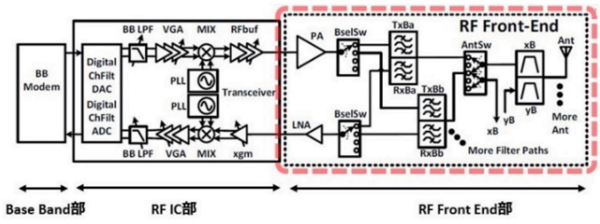


図 3-a　端末用通信回路構成 [8]

PA: Power Amplifier
LNA: Low Noise Amplifier
SW: Switch, Ant: Antenna
Tx: Transmitter, Rx: Receiver
LB: Low Band, MB: Middle Band,
HB: High Band
PAID: Power Amp. integrated Duplexer
PAM: Power Amp. Module
DRx: Discontinuous Reception
GPS: Global Positioning System
LAA: licensed Assisted Access

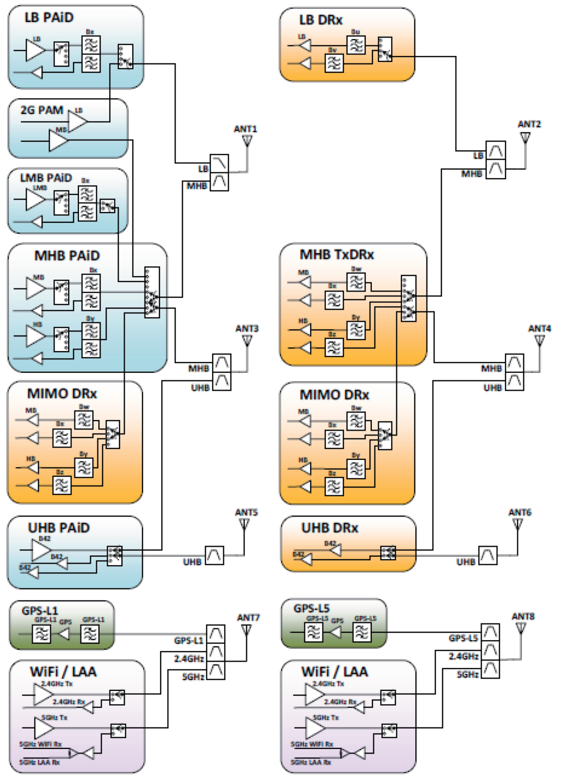


図 3-b　典型的な 4G 端末 RF Front End ブロック [8]

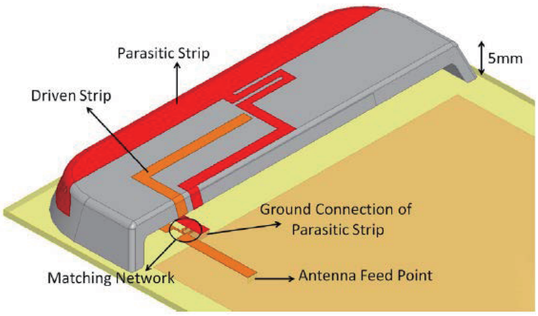


図 4　レーザー描画アンテナ例 [9]

一方、筐体内スペースが限られる端末ではアンテナ基板サイズへの制約が非常に厳しく、多数のアンテナを同時に用いて高いアンテナ利得を得ることが難しい。一例として商用化された 5G 端末に広く導入されているミリ波アンテナモジュールを図 6-b に示す [12]。1x4 アレーアンテナを有する約 4mmx23mm サイズのモジュールとなっており、端末の筐体側面に沿うように置かれている。ミリ波伝搬に大きな影響を与える顔や手を避けつつ最適な伝搬状態を維持しながら基地局との通信を行うため、2 から 4 の複数モジュールを筐体内に配置する必要があり、アンテナモジュールの小型化要求に拍車をかけている。電源制御 IC と高周波 IC はアレーアンテナと基板を挟んで逆側に実装されており、スイッチやパワーアンプを含む高周波 IC には 40nm プロセスによる Si 基板上 Metal Oxide Semiconductor（MOS）Transistor が用いられている [13]。アンテナ数が限られ良好なアンテナ利得を得ることが難しい端末では、高周波信号増幅を担うパワーアンプの性能が基地局との通信エリアやバッテリーの持ちを確保する上で非常に重要となっている。

文献 13 によれば、MOS Transistor パワーアンプの出力は 5mW 程度と低く、同時に複数のパワーア

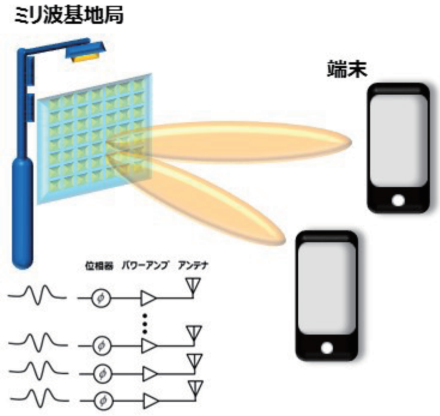


図 5　アレーアンテナによるビームフォーミング技術
（文献 [11] を参考に筆者が作成、多数アンテナ狭ビームを形成、位相器により放射方向を制御）

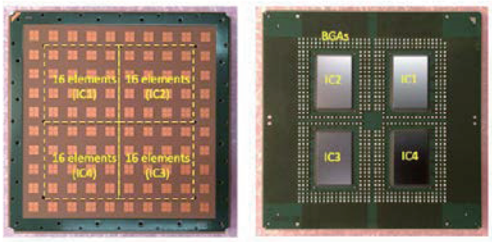


図 6-a　基地局向けアンテナモジュールの例 [11]
（図左側がパッチアレーアンテナ、右側は裏側の IC）

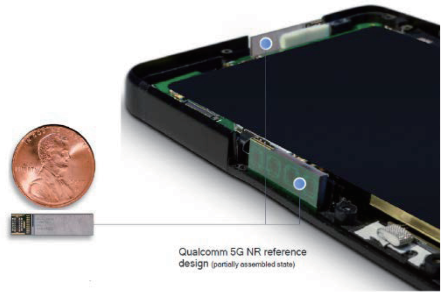


図 6-b　端末用ミリ波アンテナモジュールの例 [12]
（筐体外側に向けて 1x4 アレーアンテナが見える）

ンプを用いて出力を得ているが、十分とは言えずミリ波通信普及に向け広い通信エリアを確保できないことが心配される。エリア確保のために多数のミリ波基地局を設置することは通信キャリアの経済合理性を損ない、延いては限定エリアのみのミリ波サービスに繋がる恐れがある。更に、パワーアンプの効率はバッテリーの持ちや発熱に大きな影響を与えるため、出力と効率の両立も課題となっている。

以上、サブ 6 では増加の一途であるアンテナ数と周波数帯に対応する高性能アンテナが、ミリ波では通信エリアやバッテリーの持ち確保のための高性能パワーアンプが課題となっている。以下では、課題克服に向け、アンテナチューニング技術とパワーアンプ技術への取組みを前者に対するソニーの取組みとともに紹介したい。

3. アンテナチューニング技術とソニーの取組み

4G やサブ 6 向けアンテナに対し、単一アンテナで複数の周波数帯を賄う手法としてアンテナチューニング技術が提案されている。チューニング技術には、図 7 に示すインピーダンスチューニングとアパーチャーチューニングと呼ばれる手法がある。前者は例えば複数から成るキャパシタバンクをスイッチで切り替え、アンテナと高周波回路の整合を取る手法である。一方、後者はインダクタなどを切り替え、電気的にアンテナ長を変化させる手法である [14]。いずれも周波数や外乱に対してアンテナインピーダンスを適切に保ち、良好なアンテナ特性を得る為、受動素子等を切り替える多ポートスイッチが用いられている。この受動素子と多ポートスイッチから成るチューニング技術により 1 アンテナで複数の周波数帯に対応することを可能とし、アンテナの省スペース化と高効率化に寄与する。多ポートスイッチには、高周波スイッチとして高い性能が求められ、オン時の抵抗、オフ時の容量や、オンまたはオフ時の歪特性が課題となる。要求性能を満たすため半導体スイッチや Micro Electro Mechanical Systems ス

イッチが用いられており、半導体スイッチ用デバイスとしてGaAs High Electron Mobility Transistor（HEMT）やSi on Insulator（SOI）基板上MOS Transistorが用いられている。

ソニーは高周波スイッチ技術に90年代初頭から取組んできた。先ず、GaAs基板に対してp型ドーパントであるZnの拡散によってトランジスタゲート領域にpn接合を形成するGaAs Junction Field Effect Transistor（JFET）技術を立ち上げ、携帯端末用高周波スイッチビジネスに参入した（図8）[15]。当初は、使用周波数帯が限られておりアンテナチューニング向けスイッチは不要であったが、アンテナの送受信切り替え用スイッチとしての高い性能が市場で評価を得た。その後、端末通信性能の進展により高周波スイッチの損失、歪特性の継続的向上が求められる中、JFETよりも電子輸送特性に優れるPseudomorphic HEMT（PHEMT）にZn拡散pn接合形成技術を展開し（JPHEMT）、2000年代から3G通信、更に4G通信と、端末通信向け高周波スイッチとして広く用いられてきた[16]。このJPHEMTは、良好な電子輸送特性によるオン電流特性とpn接合ゲートによる低いリーク電流特性から高周波スイッチだけでなく高周波パワーアンプとしても高い性能を示した[17]。

2010年代初頭からデジタル、IC向けに導入が進んでいたSilicon On Insulator（SOI）基板を用いて高周波スイッチの商用化に取り組んだ。SOI 基板はスイッチ特性低下につながるSi基板の寄生成分を回避でき、微細プロセスによるスイッチ小型化やJPHEMTスイッチでは困難なスイッチと駆動回路のオンチップ化を実現できること、更に200mm大口径基板によるコストメリットから、GaAsスイッチからの置き換えが進むとともにパワーアンプなどの他の高周波IC応用が進んでいる[18]。徒に微細化することはスイッチ小型化に寄与する反面、耐圧、ハンドルパワーやプロセスコストで課題となる。先に紹介したアンテナチューニング技術では、回路構成によっては100V以上の耐圧がスイッチに求められる。そこでソニーでは、130nm世代のプロセスを用いてデバイス構造の最適化を行い、優れた高周波特性と高耐圧特性とを両立し、高性能アンテナチューニング用スイッチを実現した[19]。

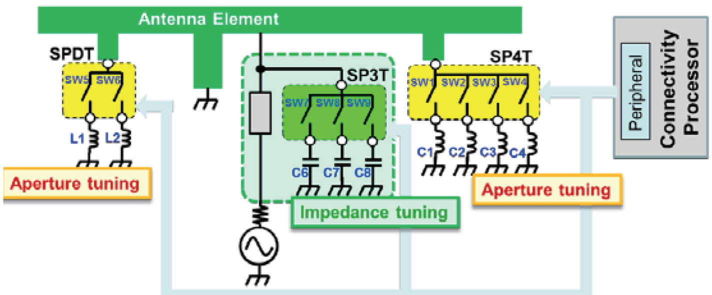


図7　アンテナチューニング構成例 [19]
（SPDT: Single Pole Dual Throw）

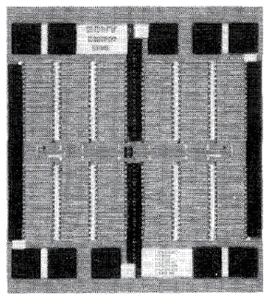


図8　ソニー JFET SW 例 [15]
（サイズ 1.13mmx1.15mm）

ミリ波パワーアンプ

図4でみた4G向けパワーアンプでは、周波数、出力において要求性能が厳しい箇所にSi MOS Transistorに代えて高出力、高効率なGaAs HBTによるパワーアンプが用いられている。

ミリ波パワーアンプにおいても、Si MOSパワーアンプの性能向上に加えて、SiGe やGaAs、InP、GaN等の化合物半導体を用いたパワーアンプが検討されている[20]。GaAs等のIII-V族化合物半導体は、高い電子輸送特性とワイドギャップによる高いハンドルパワーからミリ波パワーアンプとしても良好な特性を示すことが報告されている[21]。図9に各材料によるパワーアンプの飽和出力と動作周波数の関係を示す。パワーアンプを実現するデバイス構造としては、MOS、HBT、HEMT等様々な選択肢があるが、この図では材料や構造に依存する動作電圧やデバイスサイズを区別していない点に注意されたい。5Gミリ波パワーアンプ向けに検討が進む代表的なデバイスの特徴比較をtable Iに示す。

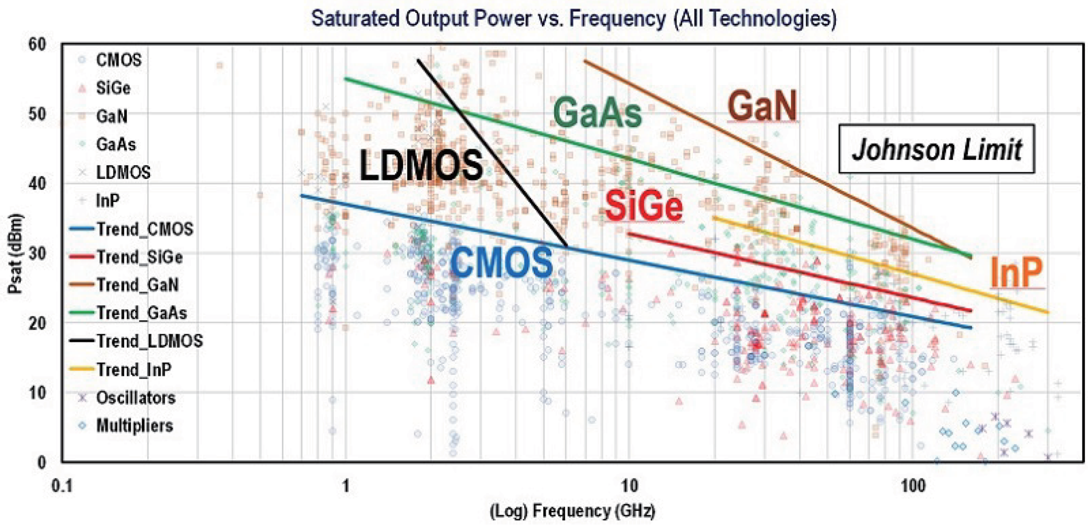


図 9　各材料を用いて作製されたパワーアンプ IC の飽和出力と動作周波数のトレンド [21]

Table I　ミリ波パワーアンプ向けデバイス比較

	Si	SiGe	GaAs	InP	GaN
基板	300mm Si	300mm Si	150mm GaAs	100-150mm InP	150mm SiC or 150-200mm Si
基板コスト	Cheap	Cheap	Expensive	Very expensive	Very expensive Cheap
デバイス構造	MOS	Bipolar	PHEMT	HBT	HEMT
動作電圧 [V]	≦ 4	≦ 6	≦ 6	≦ 5	~30
ハンドルパワー	Low	Low	Medium	Medium	High
効率	Low	Good	Very good	Excellent	Excellent
デバイスサイズ	Small	Small	Medium-large	Medium	Medium

InP HBT は基板の価格やプロセス中に割れ易く収量を上げにくいという課題があり、これまで少量専用品としての実績のみとなっている。コストに厳しく大量生産を前提とする端末向けパワーアンプでは、このハードルをクリアできるかが課題となっている。端末向け高周波スイッチ、パワーアンプ IC としての実績と性能の両立視点から GaAs パワーアンプへの期待が大きく、ゲート長 150nm プロセスによる GaAs PHEMT を用いた検討が進められている [22]。文献 22 では、高出力、高効率な GaAs PHEMT パワーアンプを Si MOS パワーアンプの代わりに用いることで、アンテナ数を 4 から 2 に減らしながらも同等のアンテナ放射特性を維持しつつアンテナモジュールの小型化と低消費電力化を両立できたことを報告している。GaN HEMT は放熱性のよい SiC 基板上に成膜したウエハを用いて高出力と高効率を両立し、従来 Si LDMOS（Laterally Diffused MOS）が用いられてきた 4G 基地局向けパワーアンプの置き換えが進んでおり [23]、この流れは 5G 基地局においても同様と思われる。一方、端末用パワーアンプ向けには、SiC 基板の価格が課題となって導入が難しい。基板に関しては安価な Si 基板が選択肢となるが、いずれの基板上に形成した GaN HEMT も 30V 程度の動作電圧を前提としており、バッテリー駆動のため 5V 以下の動作電圧を前提とする端末向けパワーアンプでは良好な特性実現が難しく検討が進んでいない。

以上、図 6-b で見た端末用小型ミリ波アンテナモジュールでは、パワーアンプ回路だけでなく AD/DA 変換等も取り込んだ多機能・小型 1 チップ実現が可能であるという特徴を背景に、Si MOS Transistor に

よるIC導入が先行したと考えられる。一方で、MOSパワーアンプの性能には課題があり、より高性能なパワーアンプとしてGaAs PEHMTやこの特性を凌駕する新しいデバイスの登場が期待されている。

5. 結び

今年度より商用化が開始された5Gでは、4Gを大きく凌駕する性能仕様を実現するため、新たにFR1（サブ6)、2（ミリ波）周波数帯が導入された。導入に伴い追加されるアンテナやモジュールを設置するスペースを端末筐体内に確保することが課題となっており、対策としてサブ6と4Gアンテナとの共用化とミリ波パワーアンプ高性能化によるモジュール小型化が検討されている。受動素子と多ポートスイッチを組み合わせるアンテナチューニング技術によるアンテナ共用化検討では、我々もSOIスイッチを用いた取り組みを開始している。高出力、高効率ミリ波パワーアンプ実現に向け、Si CMOS パワーアンプの性能向上に加えてGaAs PHEMTなどのIII-V族化合物半導体デバイスの検討が進められている。本格的な5G普及には今暫く時間が掛かると思われるが、そこに向けた技術開発は既に活況を呈しており、我々も様々な取り組みを進めている。

6. 参考文献

1. NTT Docomo HP, https://www.nttdocomo.co.jp/area/servicearea/?rgcd=03&cmcd=5G&scale=2048000&lat =35.690767&lot=139.756853.
2. NTT Docomo, https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/binary/pdf/library/presentation/200825/200825_qa.pdf.
3. Cisco, Visual Networking Index Global Mobile Data Traffic Forecast for 2013 to 2018.
4. NTT Docomo white paper, https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g /DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf.
5. 3rd Generation Partnership HP, https://www.3gpp.org/.
6. Recommendation ITU-R M.2083-0 IMT Vision, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0- 201509-I!!PDF-E.pdf.
7. Qualcomm-tech, https://www.qualcomm.com/media/documents/files/spectrum-for-4g-and-5g.pdf.
8. D. R. Pehlke *et al.* IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 5G Summit, 2020.
9. A. Cihangir *et al.*, RADIOENGINEERING, vol. 25, No. 3, pp. 419-428, 2016.
10. T. S. Rappaport *et al.*, IEEE Access, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
11. A. V. Garcia, http://www.5gsummit.org/reston/slides/IEEE5GSummitRestonDrGarcia.pdf.
12. Qualcomm-tech, https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-nr-mmwave-deployment-strategy- presentation.pdf.
13. S. Shakib *et al.*, IEEE Trans. Micro. Theory Techn., vol. 67, no. 7, pp. 2946-2963, 2019.
14. A. Kuchikulla, https://www.qorvo.com/design-hub/blog/4-things-to-know-about-antenna-tuning-in-4g-5g- Smartphones.
15. K. Kohama *et al.*, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 31, No. 10, pp. 1406-1411, 1996.
16. K. Kohama *et al.*, IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Sympo., pp. 509-512, 2005.
17. J. C. Clifton *et al.*, European Microwave IC Conference, pp. 524-527, 2013.
18. J. Costa, IEEE MTT-S International Microwave Sympo., pp. 445-448, 2007.
19. H. Kawasaki, International RF-SOI Workshop, 2017.
20. D. Y. C. Lie *et al.*, Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2018, pp.1-16, 2018.
21. Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab, https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html.

22. N. Cho *et al*. IEEE MTT-S International Microwave Sympo., We2F-1, 2020.
23. S. Nakajima *et al*., Int. Elect. Dev. Lett., 14.2, 2018.

研究室紹介

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

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

電気関係研究室一覧

工学研究科（大学院）

電気工学専攻

先端電気システム論講座（引原研）

システム基礎論講座自動制御工学分野（萩原研）

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野（土居研）

生体医工学講座生体機能工学分野（小林研）

電磁工学講座超伝導工学分野（雨宮研）

電磁工学講座電磁回路工学分野（和田研）

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野（松尾研）

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研）

電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野（白石研）

電子物理工学講座応用量子物性工学分野（竹内研）☆

電子物性工学講座半導体物性工学分野（木本研）

電子物性工学講座電子材料物性工学分野（山田研）

量子機能工学講座光材料物性工学分野（川上研）

量子機能工学講座光量子電子工学分野（野田研）

量子機能工学講座量子電磁工学分野

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創生部門先端電子材料分野（藤田研）

情報学研究科（大学院）

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野（黒橋研）

知能メディア講座コンピュータビジョン分野（西野研）＃

通信情報システム専攻

通信システム工学講座ディジタル通信分野（原田研）

通信システム工学講座伝送メディア分野（守倉研）

通信システム工学講座知的通信網分野（大木研）

集積システム工学講座情報回路方式分野（佐藤研）

集積システム工学講座大規模集積回路分野（小野寺研）

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野（石井研）

システム情報論講座医用工学分野（松田哲研）

エネルギー科学研究科（大学院）

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野（下田研）

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野（中村祐研）

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野（土井研）

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野（白井研）

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野（長崎研）

エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田一研）

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野（山本研）

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野（橋口研）

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野（小嶋研）

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野（大村研）

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野（篠原研）

学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアライゼーション研究分野（小山田研）

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野（中村裕研）

システム基礎論講座 自動制御工学分野 （萩原研究室）

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

確率制御理論とネットワーク制御系

不確実な現象の評価や予測に、しばしば「確率」が用いられる。身近なところでは天気予報の降水確率や、宝くじの当選確率などがあげられる。初期不良が発生する確率や、入試に合格する確率などもある。これらの確率はいずれも、関連する特定の事象が起きるかどうかが事前にわかれば、考える必要はないものである。しかし現実には、特定の事象が起きるかどうかを事前に知ることはできないため、上記のような確率を日常的に参考にすることになる（例えば降水確率が高いから傘を持って外出する等）。自動制御においても、制御する対象の振る舞いが不確実である場合には、確率論および統計学の知見を活用することが重要と考えられる。そのような背景から、当研究室ではテーマの１つとして、動特性が確率的であるような対象を制御するための理論整備に取り組んでいる。以下ではその活用例として、通信遅延が確率分布を用いて表されるネットワーク制御系の安定化制御について紹介する。

図１のネットワーク制御系を考える。ただし、P_c は連続時間制御対象、Ψ は離散時間制御器、S はサンプラ、H は０次ホールドである。この系は制御対象と制御器が点線で描かれたディジタル通信路を介してつながっており、その通信路に離散時間 k の１ステップ毎に τ_k^{up}, τ_k^{dw} だけ信号を実時間で遅らせる要素 D^{up}, D^{dw} が想定されている。サンプラとホールドは同期しており、ホールドに信号が届き次第サンプラが動作する状況を想定すると、$\tau_{\mathrm{k}}^{\mathrm{up}}$, $\tau_{\mathrm{k}}^{\mathrm{dw}}$ が確率分布に従うとき、このネットワーク制御系全体の動特性は確率的になる。そのような系を安定化する制御器 Ψ は、文献 [1] の成果を活用することで設計できる。

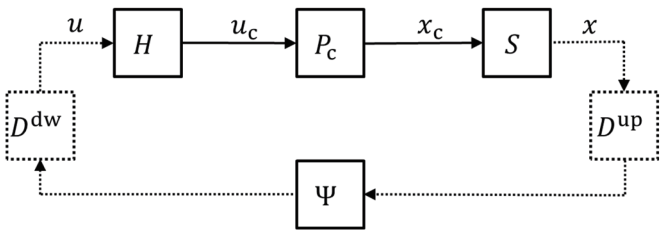


図１：ネットワーク制御系

制御対象 P_c として、質量の無視できる棒の先に質点がある図２の倒立振子の、鉛直上方での線形近似モデルを考える。ただし、質量 $M=1$、重力加速度 $g=9.8$、棒の長さ $r=0.2$ であり、τ は入力トルク、θ は鉛直上方からの振子の角度である。また通信遅延は指数分布 Exp を用いて $\tau_k^{\mathrm{up}}=\xi_k^{\mathrm{up}}+0.01$、$\tau_k^{\mathrm{dw}}=\xi_k^{\mathrm{dw}}+0.01$、$\xi_k^{\mathrm{up}}\sim\mathrm{Exp}\,(0.01)$、$\xi_k^{\mathrm{dw}}\sim\mathrm{Exp}\,(0.02)$ と表されるとする（指数分布は待ち行列理論で用いられており、パケットの到着間隔等を表現する典型的な分布の一種である）。このような設定のもと、振子を遠隔で倒立させる制御器 Ψ を文献 [1] の成果に基づいて設計すると、ネットワーク制御系の応答は図３のようになった。時間の経過とともに θ が０に収束しており、鉛直上方での倒立が達成できていることがわかる。本例題のように P_c が不安定であり、かつ通信遅延の範囲が非有界であっても安定性を保証した制御系設計が可能であることは、確率論的なアプローチの強みの１つである。

[1] Y. Hosoe and T. Hagiwara, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 64, No. 11, pp. 4764–4771, 2019.

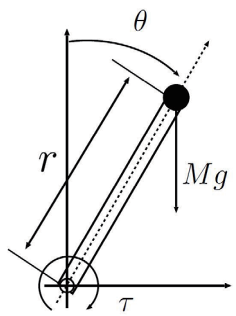


図２：倒立振子

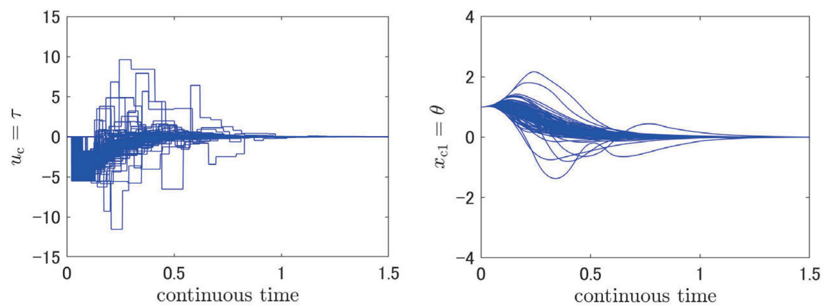


図３：ネットワーク制御系の応答（標本数 100）

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/
「膵臓ランゲルハンス島における細胞群による血糖値制御」

胃の奥（背中側）にある膵臓は、生命維持のために（全く働きの異なる二つの機能である）外分泌機能と内分泌機能を担っている。膵管を通して十二指腸に種々の消化酵素を含む膵液を分泌するのが外分泌であり（消化管内部は、身体の外部なのである）、インスリンやグルカゴンなどの血糖値調節に関わるホルモンを身体の内部に分泌するのが内分泌である。外分泌を行う細胞は人では膵臓の98%程度を占めており、内分泌細胞は極めて少数である。また、（血糖値を上昇させる）グルカゴンを分泌するα細胞や（血糖値を下降させる）インスリンを分泌するβ細胞などの内分泌細胞からなる細胞群は、膵臓内で局所に集まって存在しランゲルハンス島（膵島）を形成し、これら膵島が膵臓内に散らばって点在している。膵臓の中では極少数の膵島細胞群が、生体における血糖値制御という重要な役割を担っている。この血糖値制御機能に問題が生じる糖尿病は、現時点では完治させる方法はなく、（膵島の移植手術などを除けば）対症療法的治療や生活習慣の改善に頼るしかない。

当研究室では数理的・システム論的アプローチにより電気生理現象に関する研究を行っているが、脳・神経系や心臓・筋肉細胞だけではなく、膵島におけるホルモン分泌においても電気生理現象が本質的な役割を担っている。例えば膵臓β細胞では、図1に示したような（バースト振動と呼ばれる）特徴的な電気信号（活動電位）が生成され、それによってインスリンが分泌される（膵島における他の細胞も、それぞれに特徴的な活動電位を生成する）。糖尿病で用いられる薬剤として代表的なスルホニル尿素薬は、膵β細胞の K^+ イオンチャネルを阻害することで、このようなバースト振動を（無理やり）促し、インスリンの分泌を促進させようとする（なお、K^+ チャネルを阻害することが活動電位を促すことは、当学科における授業「生体工学の基礎」を受講すれば、理解できるようになる）。

ところが、このような個別攻撃的・局所的戦術では糖尿病の根治には至らない。なぜなら、糖尿病は、ホルモン分泌細胞の個別的機能不全による疾患ではなく「システム」の機能不全による疾患だからである。健常者の血糖値は実に精緻に制御されているが、それは膵島内の種々の細胞が互いに情報をやり取りしながら、膵島細胞群全体がシステムとして血糖値制御を行っていることによると考えられている。図2に示した概念図は、膵島内のα、β、δ細胞が互いにそれらが分泌するホルモンを介して行う相互作用（傍分泌作用）を表している。しかし、本研究では、これらの内分泌細胞が互いに近接して存在しているのは、細胞間で（ホルモンだけではなく）電気信号を用いて情報のやり取りを行いながら精緻な血糖値制御を行っているのではと考え、（傍分泌作用だけではなく）電気生理現象をも考慮した数理モデルを用いて、膵島の細胞群全体がシステムとしてどのような制御を行っているかを明らかにする研究を進めている。

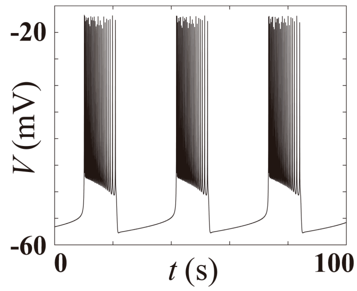


図1：膵β細胞の膜電位波形

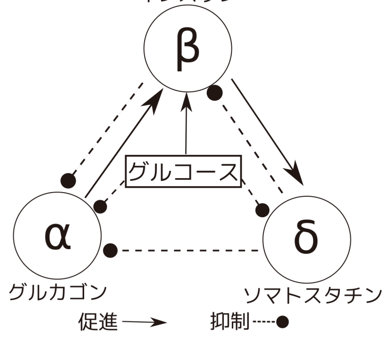


図2：膵島細胞間の傍分泌作用

参考文献
[1] 伊藤・土居：膵α，βおよびδ細胞の傍分泌メカニズム解明のための膵島細胞の電気生理に関する研究，信学技報 NLP2017-111, pp.51–56 (2018).

[2] 杉浦・土居：解糖系を含む膵β細胞モデルのベクトル場の遅速分解と分岐解析に基づく解析 ～外部入力と血糖値の影響に注目して～，信学技報 NLP2019-117, pp.25–30 (2020).

[2] Y. Nishide, S. Doi: Influence of the electrical activity of pancreatic beta cells on the electrical activity of alpha cells through the insulin secretion, Proc. of NOLTA2020, pp.476–479 (2020).

生体医工学講座　生体機能工学分野　（小林研究室）

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

「脳内の機能的結合の直接計測に向けたMRIスピンロック撮像の検討」

我々の知覚、認知、思考、動作などのプロセスを司る脳機能は、様々な計測法により明らかにされてきたが、未だ解明されていない多くの謎が残されており、ヒトの脳機能計測に関する研究の進展が望まれている。中でも、脳機能ネットワークという観点から、脳内の異なる領域がどのような機能的な関連性を持ち、如何に協調的活動をしているのかについて関心が持たれるようになった。これを機能的結合というが、この機能的結合を直接検出できる計測手法は未だ開発されていない。

数多くの計測手法の中でも機能的磁気共鳴画像法（fMRI）は、脳活動部位をミリメートル単位の空間分解能で非侵襲に計測できることから、非常に有望な手法である。しかしながら、従来のfMRIは脳神経細胞が賦活する際に生じる血行動態の変化（BOLD効果）に基づいており、神経活動から数秒遅延することや、活動部位より広範な領域で反応が見られることなど、機能的結合を観測する際に問題となる欠点も指摘されている。

我々はこれに対して、スピンロック撮像法を用いることにより機能的結合の直接的な計測を目指している。スピンロック撮像法は、脳神経活動にともなって生じる振動磁場により、生体内に存在する水分子中のプロトンの磁化の歳差運動に二次的な磁気共鳴を引き起こす手法である。通常のスピンロック撮像法では、信号の位相情報を取得することはできないが、磁化のフリップアングルを調整することで、位相情報を取得することが可能になる（図1）[1]。複数の脳領域間で得られる脳神経磁場の相関関係を調べることで、離れた脳領域間の機能的結合を解明することができる。図2に、本手法をダイポールファントムに適用した結果を示す。ダイポール電極に印加される磁場の初期位相の変化が観測されていることがわかる。本手法では数百pTの磁場が検出できるため、0.1～1 nT程度の極微弱な脳磁場の検出や機能的結合の計測への応用が期待できる。

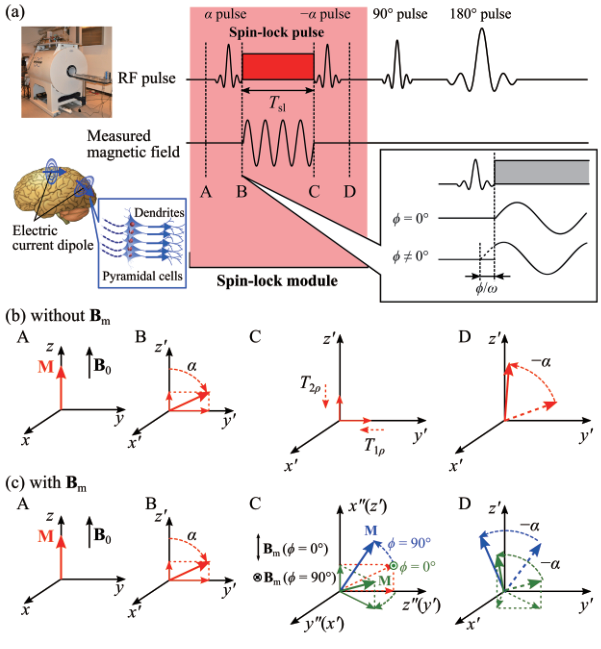


図1　改良したスピンロック撮像法

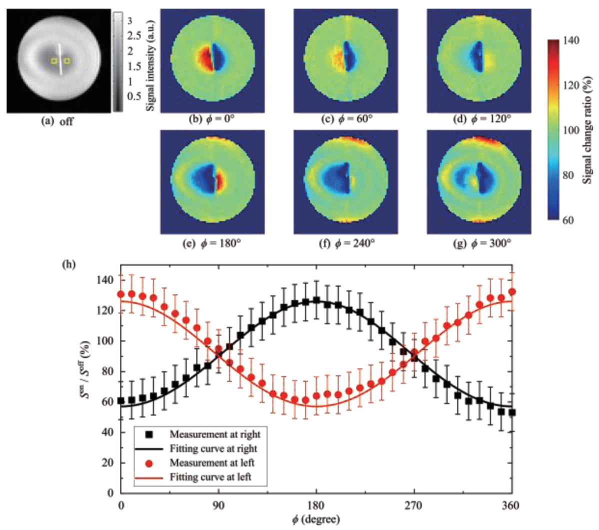


図2　ダイポールファントムによる検証実験。生理食塩水内のダイポール電極に印加する磁場の初期位相を変化させると、MR画像のダイポール電極近傍の信号強度の増減として捉えられる。

本手法は、BOLD効果の表れにくい低磁場MRIにも適用できるため[2]、大きな波及効果が期待できる。今後は実際にヒトの脳活動の計測を行い、本研究の有用性を検証して行く予定である。

[1] Y. Ito, M. Ueno and T. Kobayashi, Scientific Reports **10**, 5463 (2020).
[2] H. Ueda, Y. Ito, T. Oida, Y. Taniguchi and T. Kobayashi, J. Magn. Res. **319**, 106828 (2020).

電磁工学講座　電磁回路工学分野　（和田研究室）

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

「放射の反作用を含む単導体の伝送線路モデル」

伝送線路モデルは高い周波数で動作する回路の設計において不可欠のモデルであるが、本研究室ではその拡張として、明示的な帰路線をもたない単導体伝送線路の回路モデル化を行っている。このような明示的な帰路線を持たない伝送線路は、テラヘルツ波などの高周波で実際に使われる一方、線状のアンテナやコモンモードによる放射とも密接に関係し、その放射の仕組みを適切な形で回路モデルに取入れることが重要になっている。

放射による損失を回路モデルに取込むとき、遠方界として出ていくエネルギーを回路の損失として表現する放射抵抗モデルがよく用いられるが、これはエネルギーの関係のみを用いるため、実際の回路上で生じる損失の位置や時間も含めた表現は難しい。そこで、単導体線路上の電流が作る電磁界が自身にフィードバックする形で放射の反作用を表現するモデルを提案した [1]。光速 c として、導体上の線電荷密度 Q と電流 I の波動方程式（Sommerfeld の主波）において、入射電界に加えて自身が作る電界をフィードバックとして入れると次式になる。

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\begin{bmatrix} cQ \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\mathrm{j}k \\ -\mathrm{j}k & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} cQ \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_m \frac{\mathrm{j}\chi(k_m)}{Z_0}\left\{\hat{E}_{\mathrm{ex}}(k_m) + \hat{E}_{\mathrm{tr}}(k_m) - \hat{E}_{\mathrm{fin}}(k_m)\right\}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_m z} \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで、z は導体長手方向の空間座標、k は自由空間波数、右辺第二項にある３つの電界は、それぞれ入射波の z 成分（ex）、進行波の作る放射の反作用（tr）、有限長効果（fin）の電界である。このモデルにより、線路上の電流は図１のように、入射波により発生する散乱波のソース電流（I_{SC}）、線路上の進行波電流（$I_{\mathrm{f}}, I_{\mathrm{b}}$）、進行波が端点で作る放射の反作用による電流（$I_{\mathrm{re}}$）の３つの成分に分けられ、入射波に対する散乱と再放射の違いも明確になる。また、この３つの成分に分けることにより、図２に示す斜め入射で励振された一見複雑な遠方界の分布（中図）が、物理的な意味が明確な３つの成分に分けられる（右図）。このような放射に対してもコンシステントな線路モデルを用いて、屈曲や分岐などの構造も回路として設計可能にすることを進めている。

参考文献　[1] D.Tashiro, T. Hisakado, T. Matsushima, O. Wada, “Single-Conductor Transmission Line Model Incorporating Radiation Reaction,” IEEE Trans. EMC, Accepted.

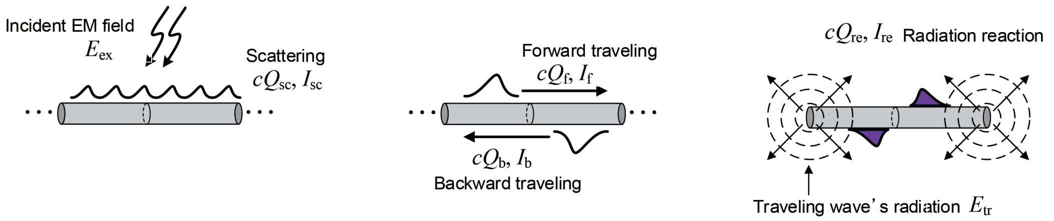


図１　単導体伝送線路の３つの電流要素（入射波の散乱のソース、進行波、端点による放射の反作用）

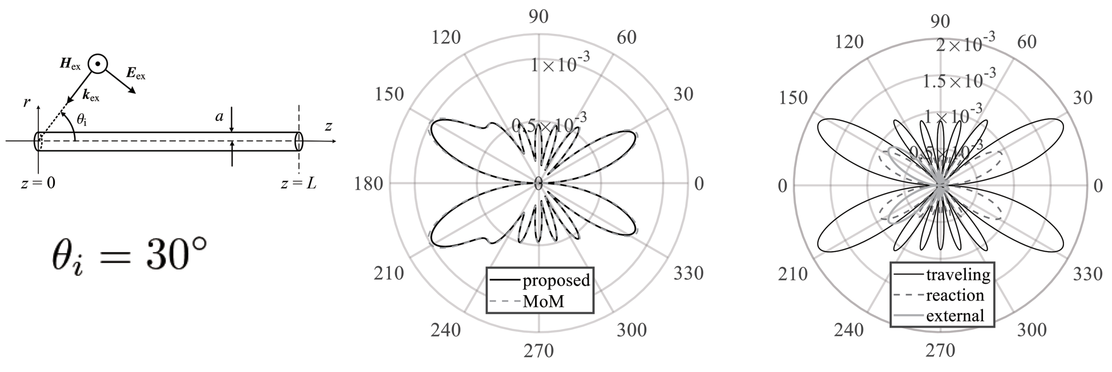
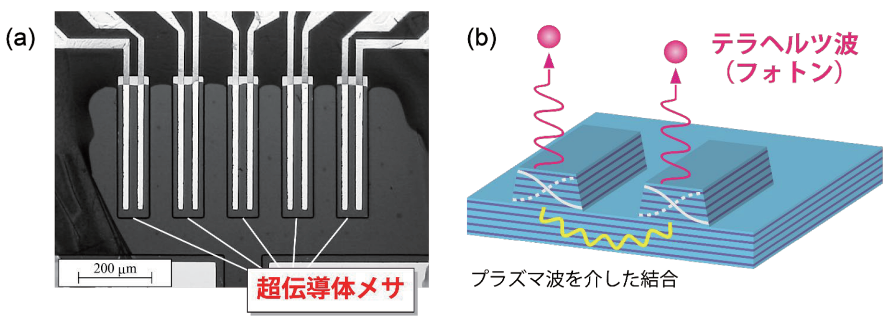


図２　斜め入射で励振された場合の遠方界とその３成分への分解（MoM はモーメント法）

集積機能工学講座
http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp
「偏光解析による高温超伝導テラヘルツ光源の同期発振現象の解明」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ（THz）領域はこれまでに1 mWを超える実用的な強度を持つ固体光源が得られていませんでした。マイクロ波領域のようにキャリアのダイナミクスを利用しようとしても半導体の移動度の上限から周波数が制約され、LEDのように量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは10ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要となるからです。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。2007年に高温超伝導体$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+d}$（Bi2212）からの結晶外へのTHz波放射が初めて観測された後の研究により、単色でありながら0.3から11 THzという広い可変周波数範囲、最大0.6 mWという高い放射効率という際立った特性が現在までに報告されています。これは、Bi2212単結晶表面に形成されたメサ構造に含まれる1000程度の「固有」ジョセフソン接合が同期して振動する結果と考えられています。高い放射強度を目指して試みられているのが、複数メサ構造素子の同期発振です。同一の超伝導体上に形成した複数のメサ構造素子を並列または直列に接続して直流電圧を印加することで、それぞれのメサ構造素子で励起される巨視的なジョセフソンプラズマ振動が同期した結果、素子数の2乗に比例して強度が増加し、放射強度0.6mWを達成したと報告されています。しかしながら、同期発振をもたらす素子間の結合の微視的な機構はほとんど理解されておらず、高強度発振器を設計することは極めて困難であった。そこで私たちは、放射されるテラヘルツ波の偏光観測から素子に励起されたジョセフソンプラズマ振動の状態を推定し、素子を結合する超伝導単結晶基板を介した結合メカニズムを解明する手法を提案した。

図のように、単結晶基板上に形成した2つのメサ構造素子から放射されるテラヘルツ波の強度、周波数、そして偏光を単独動作と並列接続同時動作の場合で観測しました。偏光観測により、電磁波の位相が推定できるので、発振状態をベクトル表現することが可能になります。その結果、同時動作の発振状態が2つの素子の単独動作を基底とする線形結合で記述できることを示しました。この成果は、パラメータを変えた測定を進めていくことにより、2つのメサ構造に励起されたジョセフソンプラズマ振動の相互作用行列を推定することを可能にし、高強度放射素子設計の道筋をつけただけでなく、テラヘルツ量子通信デバイスの可能性も提案しています。本研究成果は京都大学ホームページ2020年5月15日付「最新の研究成果」で公開されています。https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-05-15-1



図：(a) 超伝導体メサ（台地）を５つ並べたアレイ構造の顕微鏡写真。上下に伸びた電極からメサに電流を注入するとテラヘルツ波が発生する。(b) 同期する超伝導体メサの概念図。隣り合うメサが超伝導体プラズマ波を介して結合し、高強度なテラヘルツ波（フォトン）を発生する。

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/

「学理に基づいた酸化膜 /SiC 界面欠陥の大幅な低減」

耐圧 1~3 kV 級の SiC（炭化珪素）パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードは実用化が始まり、各種の電源、太陽電池用パワコン、電車、電気自動車などで顕著な省エネ効果が示されています。しかしながら、SiC パワー MOSFET の特性は SiC 固有のポテンシャルから大きく乖離し、本来の性能を発揮できていません。この最大の原因は、MOSFET の根幹を担う酸化膜と SiC の界面に非常に高密度の欠陥が存在し、ゲート電圧で誘起された反転層キャリアが界面欠陥に捕獲されてしまうからです。この酸化膜 /SiC 界面欠陥は、当該分野で過去 20 年に亘って顕著な進展がありませんでしたが、今回、界面欠陥の大幅な低減に成功しましたので紹介いたします。

従来、SiC MOSFET に用いるゲート酸化膜は、Si MOSFET と同様に熱酸化により形成されてきました。しかしながら、SiC と O_2 の反応により SiO_2 を形成する過程において、母体原子である炭素が界面近傍および酸化膜中に残留し、高密度欠陥を形成すると理論的にも推測されています。当研究室では、SiC を熱酸化すると界面近傍に高密度の炭素欠陥が不可避的に形成されることを突き止め、これを根本的に解決する手法を探索してきました。この結果、(1) SiC の熱酸化を排除した酸化膜形成プロセスの確立、(2) SiC 表面近傍に存在する欠陥を、酸化膜形成前に水素エッチングにより除去するプロセスの確立を通じて、品質の高い界面を形成することに成功しました。

図 1 に従来の酸化膜形成プロセス、および今回提案する二種類の酸化膜形成プロセスのフロー図を示します。新たに提案するプロセス A では、水素エッチング後に Si 薄膜を堆積し、これを SiC の酸化が全く進行しない温度で酸化することにより SiO_2 に変換します [1]。またプロセス B では、水素エッチング後に堆積法により SiC 表面に SiO_2 膜を形成します [2]。なお、両方のプロセス共に、酸化膜形成後に高温で窒素処理を施し、界面窒化を行うことが欠陥低減に有効であることを見出しています。

図 2 に、容量―電圧特性の解析により求めた酸化膜 /SiC 界面欠陥密度のエネルギー分布を示します。ここでは、SiC パワー MOSFET の特性に大きな影響を与える伝導帯端（E_c）近傍のエネルギー範囲における界面欠陥密度を示しています。単に熱酸化のみを行った場合には界面欠陥密度が 10^{12} cm^{-2}eV^{-1} 以上と極めて高くなります。熱酸化後に NO ガスによる界面窒化を施すと欠陥は大幅に低減しますが、その密度は伝導帯端近傍で 10^{11} cm^{-2}eV^{-1} 以上となります。両方とも伝導帯端に近づくにつれて欠陥密度が指数関数的に増大する結果となります。一方、今回、当研究室が提案するプロセス A、B では界面欠陥密度が (1~4) $\times 10^{10}$ cm^{-2}eV^{-1} であり、伝導帯端付近で比較的フラットな欠陥分布となっています。この結果、欠陥密度の積分値で比較すると、従来プロセスに比べて約 1/5~1/10 に低減できています。幸い、本成果を元に 2 回のプレス発表を行い、多くの新聞、雑誌、インターネットで取り上げていただくことができました。今後は、この高品質界面を用いたトランジスタの作製を行う予定です。

[1] T. Kobayashi et al., Appl. Phys. Express, **13**, 091003 (2020).　[2] K. Tachiki et al., Appl. Phys. Express, **13**, 121002 (2020).

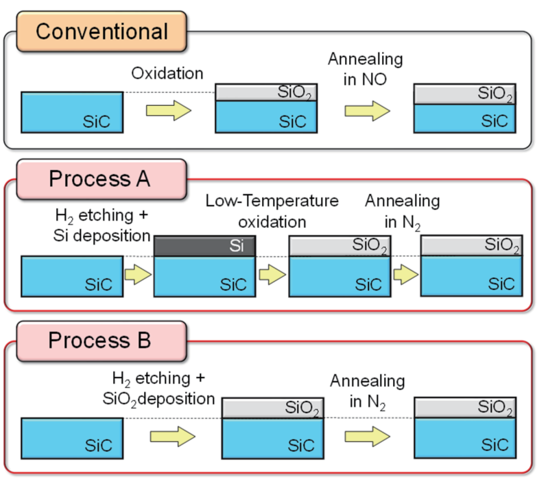


図 1　提案する酸化膜形成プロセスのフロー

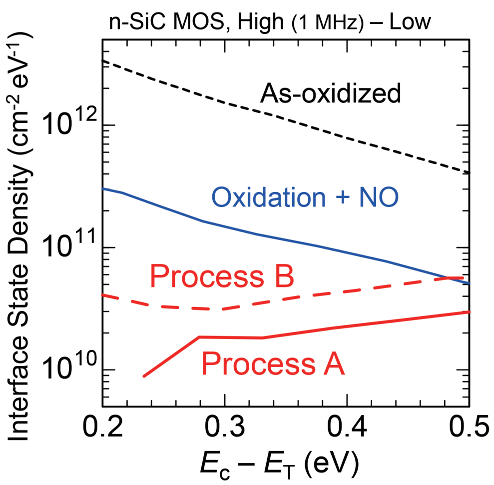


図 2　酸化膜 /SiC 界面欠陥密度の低減

電子物性工学講座　電子材料物性工学分野　(山田研究室)
http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/
液中原子間力顕微鏡による免疫反応の分子レベル可視化に関する研究

生物には、免疫系という外部からの侵入物に対する防衛機構が備わっている。特に、脊椎動物以上の生物には、侵入した病原体を特異的に認識して排除するという高度な獲得免疫機構がある。獲得免疫系では、体内で産生される抗体分子が病原体の一部（抗原性分子）と特異的に結合することで、免疫機能を発現している。この特異的結合は抗原 - 抗体反応と呼ばれるが、特定の分子間のみの結合であることから、分子認識センサや分子標的などに応用されており、生化学・医学的側面だけではなく、工学的側面においても幅広く関心を集めている。一方、原子間力顕微鏡（AFM）は、液中環境下においても分子スケールでの観察が可能な手法であり、DNA 二重らせん構造の直接観察など、生体試料の分子レベル解析などに広く用いられている。AFM による抗原 - 抗体反応の直接観察は、分子レベルでの免疫機構の解明に大きく貢献するとともに、新規バイオセンサへの応用などに発展して行くことが期待される。われわれは、これまでの研究で、抗体分子の一種であるIgG（免疫グロブリン G）分子が、生理環境下において自己組織的に 6 量体を形成し、さらにこの 6 量体が 2 次元結晶化することを AFM 観察によって初めて見出した [1]。本稿では、IgG 抗体分子 6 量体に抗原性分子が結合することを示す AFM 観察結果について紹介する [2]。

図 1（a）に IgG 抗体分子（単量体）の AFM 像を示す。抗体分子は特徴的な Y 字構造を有しており、抗原に結合する二つの Fab 領域と、細胞受容体に結合する Fc 領域とに分かれていることが明瞭に可視化された。図 1（b）は、IgG 分子が自己組織的に環状の 6 量体を形成した結果を示す。IgG 分子は Fc 領域（図中の明るい環）を中心に、Fab 領域（図中の 12 個の輝点）を外側に向けて 6 量体を形成している。さらに、これら IgG 分子 6 量体上に、抗原性分子を含む溶液を滴下した後の AFM 像を図 2 に示す。環状の 6 量体の外側に位置する Fab 領域に抗原性分子が結合し、AFM 像では輝点として観察されている。この輝点の数の変化を測定することで、抗原性分子の結合量の時間依存性を計測することが可能となり、結合速度定数を求めることに成功した。これら一連の研究によって、特異結合過程を分子レベルで理解する上で、AFM 可視化は極めて有用な手法となることが示された。今後、AFM による構造・機能可視化をさらに進めることで、分子レベルでの免疫機構の詳細が明らかになることを期待している。

参考文献

1）S. Ido, H. Kimiya, K. Kobayashi, H. Kominami, K. Matsushige, H. Yamada *Nature Materials* **13**, 264 (2014).

2）H. Kominami K. Kobayashi, H. Yamada *RSC Advances* **8**, 29378 (2018).

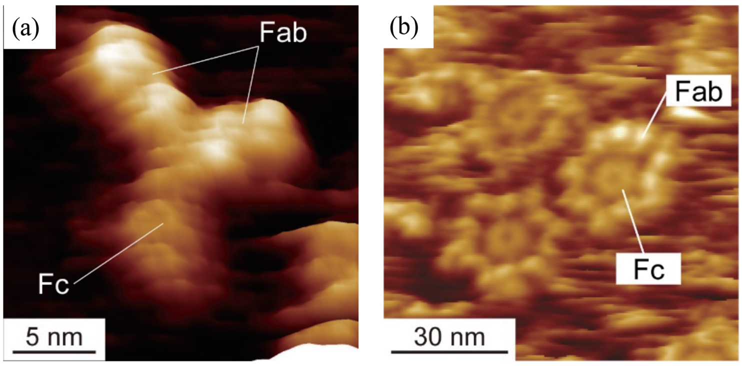


図 1:（a）IgG 分子単量体の AFM 像。（b）IgG 分子 6 量体の AFM 像。

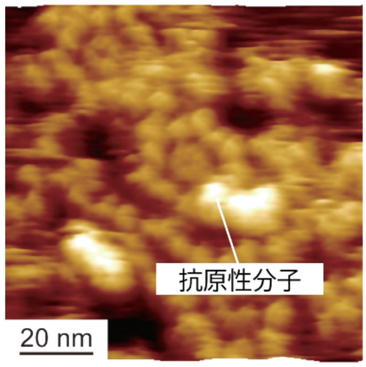


図 2: 抗原性分子が結合した IgG 抗体分子 6 量体の AFM 像。

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/

「高出力・狭ビーム発散角フォトニック結晶レーザーを用いた光測距システムの開発」

近年、自動車やロボットの自動走行に代表されるスマートモビリティを支える光センシング技術として、LiDAR（Light Detection and Ranging）と呼ばれるレーザー光を用いた光測距システムの技術開発が盛んに行われています。この LiDAR の心臓部であるレーザー光源には、小型・安価・高効率といった特徴を有する半導体レーザーが主に用いられています。しかしながら、現状の LiDAR では、ビーム品質が悪く、ビーム発散角が大きくかつ非対称な従来型の半導体レーザー（図 1 左）を用いているため、ビーム整形のための複雑な外部レンズ系や精密調整が必要となり、サイズ、コスト、性能に課題を抱えています。そこで、我々は、従来の半導体レーザーの課題を解決し、LiDAR の小型・簡素化、低コスト化、さらには性能や機能の向上を可能にする新たな半導体レーザーとして、高出力・狭ビーム発散角動作可能なフォトニック結晶レーザー [1] の研究・開発を行っています。

フォトニック結晶レーザー（図 1 右）は、ナノスケールの周期構造を持つフォトニック結晶をレーザー共振器として活用することで、原理的に大面積でもコヒーレント動作が可能です。このため、高出力（大面積発光）でも、高いビーム品質を維持できるので、極めて狭い発散角のビームを得ることが出来ます [1]。図 2 には、このような特徴を表す例として、出射されたビームを、レンズを用いることなく長距離伝播させた様子を示します。比較のために示した通常の半導体レーザーでは、短い距離を伝播しただけでビームが大きく拡がってしまうのに対して、フォトニック結晶レーザーでは、ビームがほとんど拡がることなく伝播し、30m という遠方においても僅か 5cm 程度の狭いビーム径が維持できています。これは、フォトニック結晶レーザーを用いることで、外部レンズ系を必要としない小型・簡素なシステムによって、長距離かつ高分解能な測距が実現可能なことを意味します。図 3 には、本レーザーを搭載した LiDAR を用いて、実際にリアルタイムでの測距を行った様子の一例を示します。同図より、二人の人物 A、B までの距離や、手を広げている様子などが、細かく捉えられていることが見て取れます。また、フォトニック結晶レーザーには、以上のような優れた特徴に加えて、様々な新たな機能の付加（例えば、電気的 2 次元ビーム走査 [2] や、サブナノ秒の短パルス化 [3] など）も可能なため、今後、さらなる小型化や高性能化、高機能化の実現に繋がっていくことが期待されます。

参考文献　[1] M. Yoshida, S. Noda, et al., Nat. Mater. **18**, 121 (2019). [2] R. Sakata, S. Noda, et al., Nat. Commun. **11**, 3487 (2020). [3] 森田，野田他，第 81 回応用物理学会秋季学術講演会，10p-Z18-14 (2020).

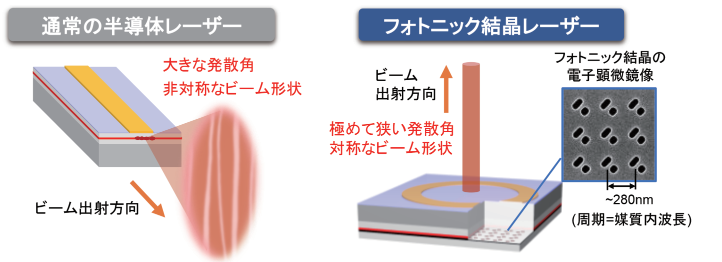


図 1: 通常の半導体レーザーとフォトニック結晶レーザーの違いの一例

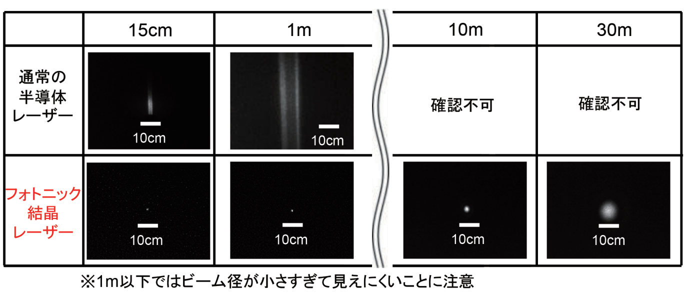


図 2: 出射ビームを、レンズ無しで長距離伝播させたときの様子

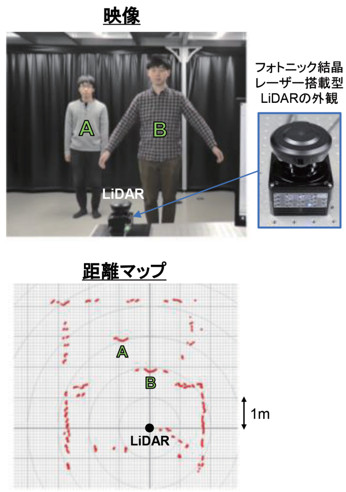


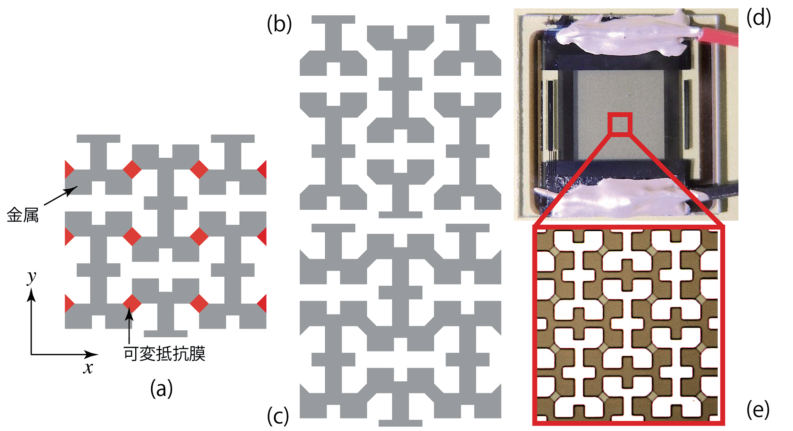
図 3: フォトニック結晶レーザーを搭載した LiDAR による測距のデモンストレーションの様子（なお、ここではリアルタイム測距時のスナップショットを図示しています。）

量子機能工学講座　量子電磁工学分野
http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp
二酸化バナジウムを導入したメタ表面による動的 1/4 波長板の実現

メタマテリアルは電磁波の波長に対して十分小さい人工構造の集合体を指し、負屈折をはじめとした自然の物質では実現できないような現象を実現するものとして注目されている。2 次元的な構造をもつメタマテリアルは特にメタ表面と呼ばれ、電磁波の波面操作や偏光操作を波長より薄い素子で実現できることからマイクロ波から光領域まで広い分野で研究が進んでいる。そして、メタ表面に可変要素を組み込むことで特性が動的に調整可能な動的メタ表面の研究も近年大きく進展している。

本研究室ではメタ表面の対称性を動的に制御することで電磁波の偏光を操作するメタ表面に着目し、テラヘルツ波に対する動的 1/4 波長板を広帯域で実現する方法について研究を行った。メタ表面の概略を図（a）に示した。この 2 次元構造は金属と可変抵抗膜から構成される。可変抵抗膜は金属状態と絶縁状態の切り替えが可能な物質で構成される。可変抵抗膜が絶縁状態の場合のメタ表面の構造を同図(b)に、金属状態の場合の構造を同図（c）に示す。これらの構造は、金属部と絶縁部を入れ替えて 90 度回転させることで重なるという対称性をもつ。このような構造に対して、各偏光（垂直偏光、水平偏光）に対する透過率には関係がある [1]。図（b）の構造が各偏光に対して透過率が等しく、位相差が 90 度である場合には、（c）の構造の透過率も各偏光で等しく、位相差は図（b）の場合と逆転する。これは、図（b）の構造も（c）の構造も 1/4 波長板のように働き、その速軸と遅軸は逆転していることを表している。つまり、図（a）のメタ表面に対して、可変抵抗膜の状態を切り替えることで、動的 1/4 波長板を実現できることを意味している。

このメタ表面をテラヘルツ領域で実現するために、可変抵抗膜として二酸化バナジウム膜を利用した。二酸化バナジウムは 65 度前後で絶縁体－金属転移を起こす物質であり、低温ではテラヘルツ波に対するよい絶縁体、高温ではよい伝導体として機能する。作成した素子の全体図を図（d）に示し、そのメタ表面の拡大図を(e)に示す。金属部はアルミニウムで構成されている。このメタ表面全体には電流を流すことが可能で、電流印加による加熱で二酸化バナジウムの相転移を引き起こすことができる。各偏光に対する透過測定をテラヘルツ時間領域分光法で行い、動的 1/4 波長板として機能していることを実証した。このメタ表面は前研究 [2] に比べ構造の最適化が行われており、4.2 倍もの広帯域動作が可能になった [3]。



図（a）メタ表面の構造（b）可変抵抗膜が絶縁されている状態（c）可変抵抗膜が金属化した状態（d）素子の全体図（e）メタ表面の拡大図

参考文献
[1] Y. Nakata, Y. Urade, K. Okimura, T. Nakanishi, F. Miyamaru, M. W. Takeda, and M. Kitano, Phys. Rev. Appl. 6, 044022 (2016).
[2] Y. Nakata, K. Fukawa, T. Nakanishi, Y. Urade, K. Okimura, and F. Miyamaru, Phys. Rev. Appl. 11, 044008 (2019).
[3] T. Nakanishi, Y. Nakata, Y. Urade, and K. Okimura, Appl. Phys. Lett. 117, 091102 (2020).

通信システム工学講座　知的通信網分野　（大木研究室）

http://icn.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

「サービスチェイニングにおける仮想ネットワーク機能配置および経路決定モデル」

大木研究室は、スマートフォンや IoT デバイス、データセンター、クラウド、および様々なアプリケーションを相互接続し、データが人々にもたらす恩恵を最大化できるような、高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えたネットワークの研究開発を行っている。本稿では、研究トピックの１つであるサービスチェイニングについて紹介する [1]-[3]。

ファイアウォールやパケットフィルタリング、動画最適化等といったネットワーク機能を、汎用サーバ上で動作する仮想ネットワーク機能（VNF: Virtual network function）として実装する技術の研究開発が活発に行われている。従来専用のハードウェアで実装されていたネットワーク機能をソフトウェアとして実現することにより、ハードウェアの設置コストの削減や、ネットワークの需要変動に応じた性能の調整、機能の容易な追加・削除等を実現する。

サービスチェイニングは、VNF の連鎖をネットワーク上で構成し、所望のネットワークサービスをユーザに提供する手法である。各ユーザ宛てのトラヒックは、ユーザが要求した VNF を所定の順序で通過するように制御される。図１にサービスチェイニングにおける VNF 配置および経路決定の例を示す。大木研究室では、各サービスの要求条件を満足しながら、伝送容量や計算能力等のネットワーク資源を効率的に使用し、かつサービスの継続的な提供を実現するためのサービスチェインの資源割り当てモデルの研究を行っている。

一部の種類の VNF は、図２のようにトラヒックが通過する順序を入れ替えても、提供されるネットワークサービスの性能に大きな影響がないことが指摘されている。また、図３のようにサービスチェインの経路制約を緩和し、折り返しやループを許容することで、複数のサービスチェイン間で VNF を共用できる可能性が高まる。[1] および [2] では、VNF の順序制約と経路制約の両方を緩和したモデルについて検討し、リンク使用および VNF 配置にかかるコストを最小化する整数線形計画問題として定式化した。また、大規模な問題でも実用的時間内に解を得るために、列生成法を利用した発見的アルゴリズムを検討した。

[3] では、ネットワーク上に配備された計算機資源の利用可能時間に基づいて、サービスチェインの連続利用可能時間を最大化する VNF 配置モデルについて検討した。遺伝的アルゴリズムをベースにした発見的手法を開発した。また、本研究の発展として、計算機資源の利用可能時間に不確定性があるシナリオや、あらかじめ VNF のバックアップを作成しておくことが可能なシナリオについても検討を行っている。

[1] N. Hyodo, T. Sato, R. Shinkuma, and E. Oki, “Virtual Network Function Placement for Service Chaining by Relaxing Visit Order and Non-Loop Constraints,” IEEE Access, vol. 7, pp. 165399-165410, Aug. 2019.

[2] T. Sato, A. Kikuchi, R. Shinkuma, and E. Oki, “Column Generation Based Algorithm for Service Chaining Relaxing Visit Order and Routing Constraints,” IEEE GLOBECOM, Dec. 2020.

[3] R. Kang, F. He, T. Sato, and E. Oki, “Virtual Network Function Allocation to Maximize Continuous Available Time of Service Function Chains with Availability Schedule,” IEEE Transactions on Network and Service Management (to be published).

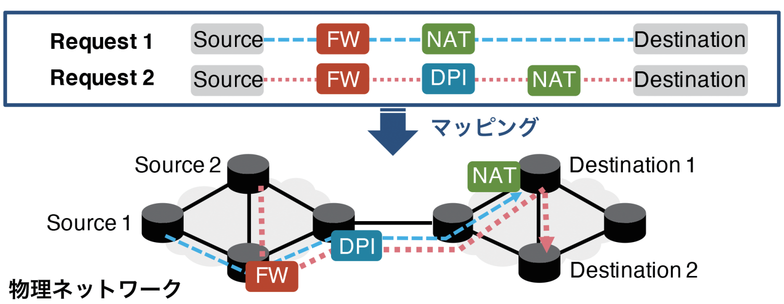


図１　サービスチェイニングの例

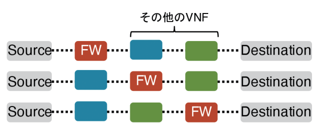


図２　順序制約の緩和

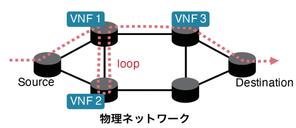


図３　経路制約の緩和

集積システム工学講座　情報回路方式分野　（佐藤研究室）

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

「（Ring-）LWE に基づく耐量子計算機鍵交換向け演算アーキテクチャの提案」

量子計算機に関する技術の発展により、素因数分解問題や離散対数問題など現在広く利用されている暗号アルゴリズムの基となっている数学的問題が現実的な時間で解けるようになりつつある。このため、現在の暗号の多くは今後 20 年程度で安全性が失われることが懸念されている。これを受けて、米国の国立標準技術研究所が耐量子計算機暗号アルゴリズムの標準化に向けた議論を進めており、その候補の一つとして Learning with Errors（LWE）問題に基づく暗号アルゴリズムが有力視されている。当研究室では、これら耐量子計算機暗号アルゴリズムのハードウェアおよびソフトウェア実装について研究を行っている。

図 1，2 は、LWE ベースの鍵交換方式である Frodo 向けに提案した乗算器アーキテクチャ Filianore である [1]。Filianore では、LWE で実行される乗算では乗数が常に小さいことに着目して、乗算器を加算器 1 個とマルチプレクサ 2 個のみで実現している。これにより、高速化と低電力化が実現できる。

また、LWE 問題の亜種である ring-LWE 問題を基礎とする鍵交換方式 NewHope[2] 向けに、図 3 に示す乗算器 R-Filianore を提案した。これは、NewHope において特に負荷の大きい処理である数論変換と多項式のモジュラー乗算および加算を 1 つのモジュールで実行可能な乗算器となっている。処理に応じて入出力のビット幅が最小限となるように専用ハードウェアとして実装することにより、メモリ帯域幅の節約を可能にしている。加えて、内部で実行される剰余演算を全て加算とビットシフトにより実現しており、演算コストの削減に貢献する。

さらに、NewHope 向けの乗算器の最適化を行い、剰余演算回路の配置を変更することで一層の省面積化を実現する図 4 に示す演算アーキテクチャを提案した [3]。このアーキテクチャでは、入出力および内部乗算器のビット幅の増加と引き換えに、剰余演算回路の数と演算ステップ数を削減できる。

これらの演算アーキテクチャを用いることで、一連の鍵交換処理において演算器が消費するエネルギーの削減と、その回路面積の縮小を同時に実現している。

参考文献

[1] S. Bian, M. Hiromoto and T. Sato, “Filianore: Better multiplier architectures for LWE-based post-quantum key exchange,” in *Proc. Design Automation Conference,* June 2019.

[2] E. Alkim, Leo Ducas, T. Poppelmann, and P. Schwabe, “Post-quantum key exchange – a new hope,” in *Proc. Usenix Security symposium*, 2016.

[3] T. Ono, S. Bian and T.Sato, “Improved multiplier architecture on ASIC for RLWE-based key exchange,” in *Proc. Workshop on Synthesis and System Integration of Mixed Information Technologies*, Oct. 2019.

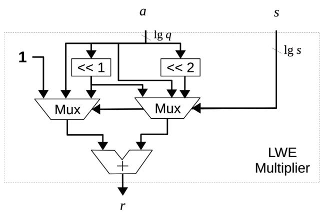


図 1　Filianore 内部の乗算回路

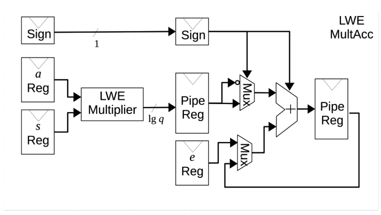


図 2　Filianore のブロック図

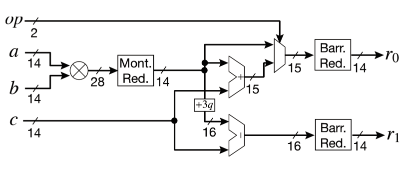


図 3　R-Filianore

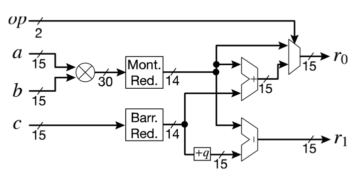


図 4　R-Filianore の省面積版

システム情報論講座 論理生命学分野 （石井研）
URL: http://ishiilab.jp/kyoto/
モジュール型予測コードに基づくオンライン動作生成

人物（キャラクタ）による自然な動作生成は映画・ビデオゲームの作成やバーチャルリアリティサービスなどで多くの応用がある。これまでの手法では、デモンストレータの動きをモーションキャプチャ計測し、それに基づきアニメーションが作成されることが多かった。しかしその計測データはデモンストレータの動作特性（キネマティクス）に依存しているため、単純にデモンストレータの運動をキャラクタに模倣させるだけでは、自然な動作の生成はできても、キャラクタ側での環境の変化に追随できないものとなっていた。

この問題に対応するため、キャラクタの運動モデルとデモンストレータの動作（モーションキャプチャ計測）データを統合することで、自然な動作を生成しつつ、キャラクタ側の環境変化にロバストになるオンライン動作生成法を開発した。その際に、脳の学習モデルとして長年研究されてきた予測コード（階層ベイズ学習）を実行するモジュール型アーキテクチャを開発した。これによると、キャラクタの内部状態からキャラクタの動作特性に応じた予測が外界からの観察（デモンストレータの運動）に一致するように、内部状態およびモデルパラメータがオンラインで更新される（図 1）。

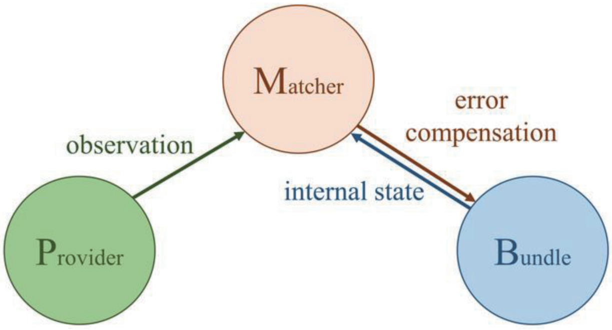


図１：提案手法はデモンストレータの動きを観察する Provider、キャラクタの内部状態を管理する Bundle とそれらの違いを吸収する Matcher からなる

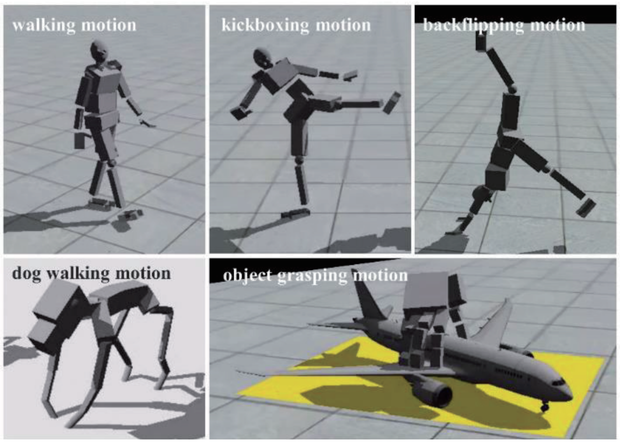


図２：提案手法により生成された運動の例

提案手法を、スケルトンモデルとして定式化されたキャラクタの動作生成に応用した(図 2)。多くのキャラクタは多自由度であり、またキャラクタ独自の動作制約を有する。例えば図 2(左上）では、人間の歩行運動を模倣する動作生成ができているが、このキャラクタが外部から衝撃を受ける場合、デモンストレータは経験していないことで模倣のためのデータには含まれないにも関わらず、キャラクタ側での最適化問題を解くことで、自然な復帰動作が生成できる。また、モジュール型のアーキテクチャとすることで関節など運動単位ごとの並列的最適化が可能となり、効率良いオンライン動作生成ができる。現在、この手法を発展させ、デモンストレータである動物の動作を人工物（ロボット）の運動に転移するための研究を実施中である。その他の動作生成(例)については youtube に掲載しているので参照されたい。
https://www.youtube.com/watch?v=Ytd1dPMg94o&t=201s

当分野では、自然な知能（脳）と人工の知能（AI）とを融合することで、脳の計算メカニズムを解明しつつ、実社会において役に立つ知的システムの開発を進めている。

エネルギー物理学講座　電磁エネルギー学分野　（中村祐司研究室）

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

「プラズマ閉じ込めにおける乱流輸送の圧力依存性に関する研究」

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

今回は、スーパーコンピュータを用いて行われている高温プラズマ閉じ込めにおける乱流現象に関する研究について紹介します。

強い磁場により閉じ込められた高温プラズマにおいては、以下の機構により対流が発生します。磁場閉じ込め核融合炉ではトーラスプラズマの中心部（芯）が高温になり、一方プラズマ表面は低温となるので、強い温度勾配があります。そして、磁場により閉じ込められたプラズマは芯に向かって重力が働いているような状態にあるので、対流が起こります。この対流は大小さまざまな渦を駆動し、プラズマは乱流状態になります。図１は、スーパーコンピュータを用いた乱流の計算結果を図示したもので、大小さまざまな渦が現れていることを示します。この乱流により、中心部の熱が拡散し（乱流輸送と呼ばれます）、プラズマ閉じ込めの悪化が起こります。一方、磁場に閉じ込められたプラズマは磁場に関連した構造を自発的に形成します。図１でトーラス断面において同心状の模様が現れていることは、この自発的な構造形成を意味します。この構造を制御することにより、乱流または対流の発生を妨げて、自発的に芯の部分の熱を逃がさないようにし、プラズマの閉じ込めを良くすることが期待されてます。

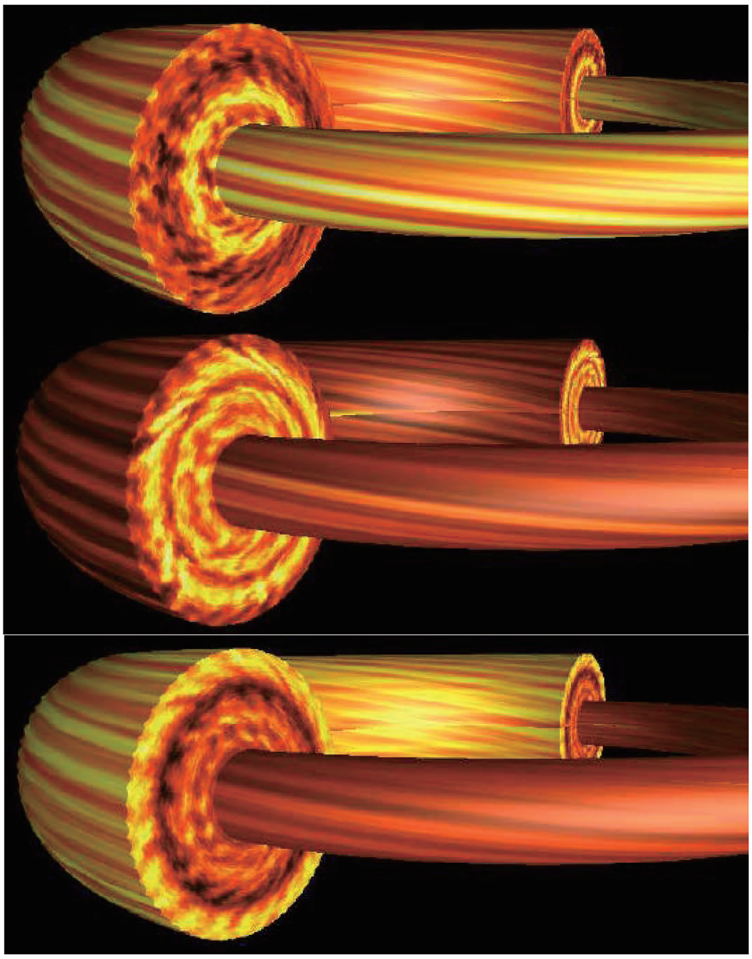


図１　磁場閉じ込めプラズマにおける乱流（静電ポテンシャル揺動）。上段：規格化圧力（閉じ込め磁場で規格化した圧力）0.4%。中段：規格化圧力 0.8%。下段：規格化圧力 1.2%。

このような乱流による熱輸送のプラズマ圧力依存性は、重要な研究テーマとなっています。なぜなら、核融合を起こすためにはプラズマの圧力を上昇させる必要があるからです。従来は、プラズマ圧力の上昇とともに磁場揺動が強くなり、対流を起こす不安定性が安定化され、その結果、乱流輸送も抑えられると考えられていました。我々は、プラズマ圧力の上昇とともに閉じ込め磁場の構造が変化することに着目し、この効果を取り入れて、スーパーコンピュータを用いて、乱流の計算を行いました。その結果、磁場構造変化により磁場揺動が変質し、乱流輸送は抑えられないことを明らかにしました [1]。これは、プラズマ圧力の上昇とともに磁場揺動が変質し、対流を起こす不安定性の安定化効果が抑制されるとともに乱流を抑える自発的構造形成も抑制されることが原因であることを突き止めました。

[1] A. Ishizawa, D. Urano, Y. Nakamura, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, Physical Review Letters, 025003 (2019).

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
「マイクロ波を利用した核融合プラズマでの MHD 不安定性の抑制」

本研究室では、荷電粒子と電磁界の相互作用を高度・高精緻に制御することにより、21 世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす磁場閉じ込めプラズマ核融合の基礎研究を進めています。特に、マイクロ波を用いた電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動（ECH/ECCD）による高温プラズマの生成・加熱・電流駆動、電磁流体力学的（MHD）不安定性の抑制に加え、大型イオン源を用いた中性粒子ビーム入射による高密度プラズマの生成・制御、および閉じ込め改善に関する研究を進めています。

核燃焼プラズマでは、自己点火プラズマ保持の観点から重水素 - 三重水素核融合反応により生成されたアルファ粒子の良好な閉じ込めが必要とされています。3.52MeV のエネルギーを有するアルファ粒子は電子との衝突による減速過程でアルヴェン速度と同程度となり、図 1 に示すように、シアアルヴェン波などの MHD 不安定性と共鳴的相互作用を起こします。この共鳴的相互作用は熱化前にアルファ粒子の異常輸送を引き起こすため、自己点火プラズマ保持が困難になったり、高エネルギー粒子損失によりプラズマ対向機器が損傷してしまったりする恐れがあります。そのため、共鳴的相互作用の物理機構解明、ならびに高エネルギー粒子の異常輸送・損失の低減が求められています。MHD 不安定性の特性・安定性は磁場のフーリエスペクトルや回転変換の分布といった磁場配位に依存するため、Heliotron J 装置において MHD 不安定性の安定化と物理機構の解明を目指した研究を進めています [1]。70 GHz ECCD によって NBI プラズマに 3kA 程度のトロイダル電流を駆動した結果、MHD 不安定性を安定化できる結果が得られました。Heliotron J は低磁気シア配位であり、電流駆動によって磁気シアが変わることから、シアアルヴェンスペクトルでの連続減衰が大きくなることが大きな要因です。一方、ECH を中性粒子ビーム加熱プラズマに印加した場合では、図 2 に示すようにモードの揺動強度が変化する結果が得られました。一般的に ECH による電子温度上昇で高速イオン圧力は増加するため揺動強度は増加すると考えられますが、実験では、安定化の傾向が見られています。現在、CIEMAT（スペイン）、マックスプランクプラズマ物理研究所（ドイツ）、核融合科学研究所（日本）との国際共同研究を行い、装置間比較によってその物理機構を明らかにする研究を進めています。

[1] 長崎百伸，他，「プロジェクトレビュー　Heliotron J 実験」、プラズマ・核融合学会誌 96 (2020) 475

[2] S. Yamamoto, et al., “Effect of ECH/ECCD on energetic-particle-driven MHD modes in helical plasmas”, Nucl. Fusion 60 (2020) 066018

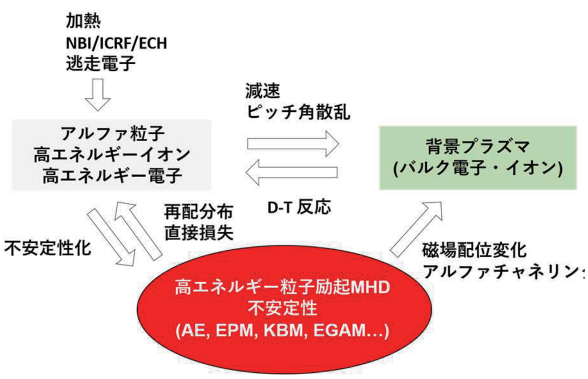


図 1. 高エネルギー励起 MHD 不安定性の励起機

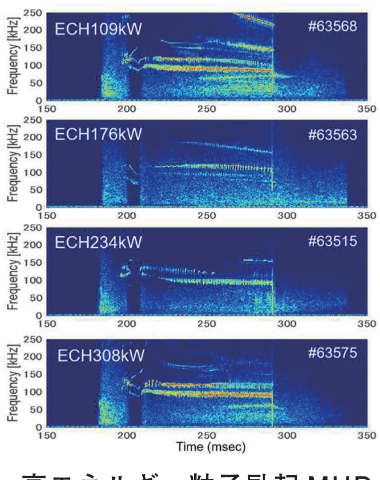


図 2. 高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の ECH パワー依存性

診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野　（山本研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab/
「衛星＝地上間の電離圏全電子数観測の開発」

衛星から地上までの電波伝搬を用いた電離圏全電子数（Total Electron Content; TEC）の観測手法の開発状況について概観する。電波はプラズマ中において真空中に比して電波の位相速度は速くなり、一方で群速度は低下する。その変化の程度は周波数の二乗に反比例するため、同じ経路に複数の周波数の電波を伝搬させ、その位相変化あるいは変調波の伝搬速度を測定することによって、TEC が測定できる。

この観測手法は、人工衛星の最初期から計画されてきた古典的なものであるが、電離圏電子密度の水平構造を求める上では現在においても有効である。例えば、赤道・低緯度の電離圏に発生する赤道プラズマバブル（Equatorial Plasma Bubble、EPB と略記）は最も強い電離圏擾乱のひとつであるが、その研究に活用されている。EPB は。磁気赤道付近の日没後の電離圏下部に生じた密度低下域が、レイリー・テーラー不安定によって拡大しながら高度千 km 以上まで急速に拡大する現象であり、太陽活動度の活発期に増大する。長年にわたって研究されてきたが、EPB を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。

我々が開発してきた観測手法を 2 つ紹介する。まずひとつ目は、衛星から地上までの 2 周波ビーコン観測である。従来からは、150MHz と 400MHz で周波数比が正確に 3 対 8 の電波が利用されてきた。我々は、2007 年ごろから、衛星からの電波を受信するディジタル受信機 GNU Radio Beacon Receiver（GRBR）を開発してきた。GRBR の観測網をアジア・アフリカに展開することで、赤道付近の電離圏に東西の波長数百 km の大規模構造が発達するときに、EPB の発声比率が増大する等の結果を得ている。

2019 年には新しい衛星 FORMOSAT-7/COSMIC-2（6 機編隊）が打ち上げられ、新たに 401MHz/966MHz の電波を用いた 2 周波ビーコン観測が開始された。我々はこれに対応して、新しいディジタル受信機 GRBR-2 を開発している。観測は、2019 年 9 月から始まっており、図 1 に示すように、これまでタイ 2 か所・ベトナム 1 か所、インドネシア 1 か所への設置を済ませ、すでに 1 年間以上にわたって観測データを蓄積している。図 2 には、2019 年 12 月 26 日に東南アジアを中心に発生した日食時の電子密度の減少の観測結果を示す。日食の前後で、前日に比して 10 パーセント程度の電子密度の低下があることがわかった。

最後に、GNSS（Global Navigation Satellite System、衛星測位つまり GPS とその類似システムの総称）を用いた TEC 観測（以下では、GNSS-TEC 観測）について紹介する。GNSS-TEC 観測は世界中で広く実施されている。さらに米国・中国・ロシア・EU によって異なる GNSS 衛星群の配備が進んでおり、今では地球上のどこでも常に上空に 20 機程度の GNSS 衛星が存在するような状況が現出している。一方、受信機の価格が劇的に下がっており、数年前にはついに 2-3 万円の 2 周波受信機が現れた。アンテナまで含めたセット価格で 1/10 を超えるような価格破壊に至っている。この流れに沿って、現在、Ublox 社が開発した 2 周波 GNSS 受信 LSI である F9P を用いた GNSS-TEC 観測システムを開発中である。非常に簡便に電離圏 TEC の多点観測が容易化することで、更なる研究の進展が期待される。

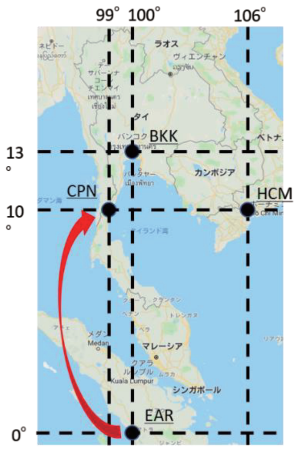


図 1　GRBR2 の配置図

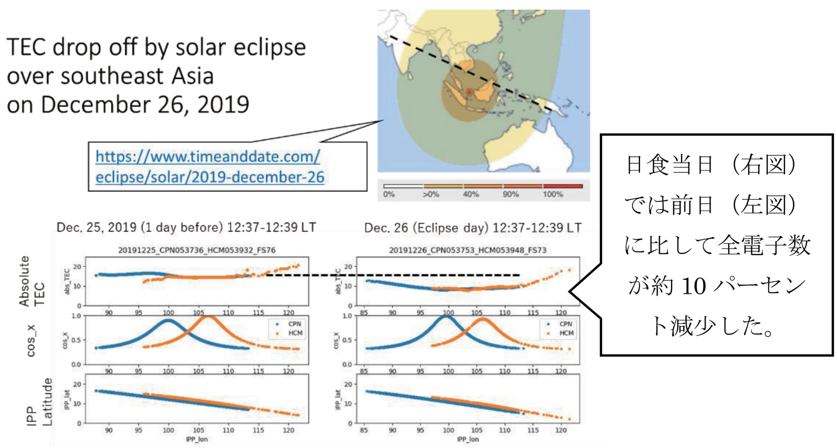


図 2　2019 年 12 月 26 日の日食に伴う電離圏電子密度の減少

生存圏開発創成研究系　宇宙圏電磁環境探査分野　（小嶋研究室）

http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/kojima-lab/

「あらせ衛星によるホイッスラーモード波動による急速な電子加速過程の実証」

地球大気の外側の宇宙空間には、現代社会の生活に欠かせない気象衛星や通信衛星・GPS 衛星が周回しています。この衛星が飛翔する領域は、地球大気とは異なって何もない、静かな世界と思われている方が多いかもしれません。実際には、非常に希薄ながら、電離した気体である「プラズマ」で満たされ、その中を色々な特徴をもつ電磁波である「プラズマ波動」が飛び交っています。この宇宙空間のプラズマの興味深い点は、密度が薄いために衝突を介してのエネルギー交換が一般的には起こらない点にあり、プラズマ波動が、衝突の代わりにエネルギー交換を担っています。プラズマとプラズマ波動とのエネルギー交換の過程を波動粒子相互作用と呼び、宇宙空間のプラズマにダイナミックな変化を引き起こしていることが知られています。

地球周辺のプラズマは、太陽から吹き出しているものが主な起源と考えられています。太陽から吹き出すプラズマを構成する電子・イオンのエネルギーは、数十から数百電子ボルトであるのにも関わらず、地球の周辺には、十キロ電子ボルトを越えて、メガエレクトロンボルトに達するような高いエネルギーを持つ電子が存在しています。このような、非常に高いエネルギーの電子は、人工衛星の機器に障害を引き起こす可能性があり、人間の活動に影響を及ぼしうる驚異と考えることができます。このような高エネルギーの電子が生まれる要因として、プラズマ波動との波動粒子相互作用が考えられており、当研究室では、宇宙空間の電磁環境を理解するための研究を進めています。具体的には、科学衛星に搭載するプラズマ波動を観測する機器開発、衛星搭載に向けた試験に加え、打ち上げ後のデータ解析と、すべてのことを行っています。

2016 年 12 月、当研究室が中核を担ったプラズマ波動観測器を搭載した、「あらせ」衛星が打ち上げられました。あらせ衛星の科学目的は、地球周辺の宇宙電磁環境を探査し、高エネルギー電子の数が変化する過程を理解することです。高エネルギー電子加速過程のの理論・モデル研究として、波動粒子相互作用を拡散過程とみなすアプローチが長い間行われてきました。このアプローチに基づけば、電子が加速される時定数は、数十キロ電子ボルトで数時間程度と見積もられてきました。一方で、近年の理論研究から、拡散では記述できない電子の加速過程が起こりうることが提案されてきており、時定数は拡散過程に比べ遥かに短いことが指摘されています。あらせ衛星に搭載された最新鋭の電子計測器・プラズマ波動観測器を組み合わせたデータ解析から、この「急速な電子加速」が実際に起きていることが示されています [Kurita et al., 2018]。このような急速な電子加速のメカニズムは、これまで構築されてきたモデルでは考慮されてこなかったため、地球周辺の宇宙空間における高エネルギー電子の成因の再検討の必要性を迫る成果が、あらせ衛星の観測により得られています。当研究室では、あらせ衛星のデータ解析を継続して行っており、宇宙の電磁環境の理解に向けたさらなる研究を推進しています。

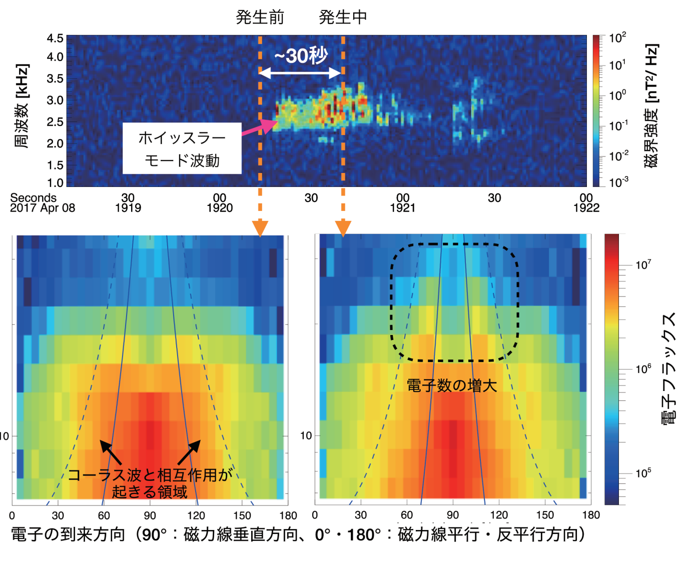


図 1.　あらせ衛星が捉えたホイッスラーモード波動による急速な電子加速の例。波動の出現後 30 秒程度で、高エネルギー電子数が増大している［Kurita et al., 2018 より改訂］

参考文献 : Kurita et al., 2018, *GRL*,
https://doi.org/10.1029/2018GL079104

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
「位相制御マグネトロンによる電力・情報同時ワイヤレス伝送の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、マイクロ波帯の電波をエネルギー伝送媒体として利用した空間伝送型ワイヤレス電力伝送に関する研究を行っている。空間伝送型ワイヤレス電力伝送は、送受電アンテナを介して電波を空間中に放射してワイヤレス給電する方式であり、電磁誘導や電磁界結合に類される近接結合型ワイヤレス電力伝送と比較して長距離のワイヤレス給電が可能である。今回は、マグネトロン（電子レンジのマイクロ波源として普及している電子管）をワイヤレス給電および無線通信に応用し、電力と情報を同時にワイヤレス伝送する研究の取り組みについて紹介する。

マグネトロンは自励発振する電子管デバイスであり、その発振周波数は駆動電圧や印加磁界、温度、個体差等の要因で変化する。したがって、マグネトロンの発振周波数を安定化させるためには、基準となるマイクロ波（例えば信号発生器からの出力）の周波数にマグネトロンの発振周波数を同期させる必要がある。具体的には、基準周波数を与えるマイクロ波をマグネトロンのアンテナ側から注入する「注入同期法」により、マグネトロンの発振周波数を基準周波数に同期させる。加えて、マグネトロンの出力位相制御を実現するためのフィードバック回路を構築する。このような手法により、発振周波数や出力位相が制御可能となったマグネトロンのことを「位相制御マグネトロン」と呼ぶ。位相制御マグネトロンの周波数および位相は、基準となる周波数および位相に追随する。よって、基準周波数や基準位相に変調をかければ、マグネトロン出力にも同様に変調がかかる。この原理を利用して、周波数変調機能や位相変調機能を有するマグネトロン送信機が実現できる。

本研究室では。これまで2.45GHz帯電子レンジ用マグネトロンおよび5.8GHz帯マグネトロンを用いた周波数変調および位相変調の研究を実施し、FSK変調およびPSK変調において10Mbpsの伝送レートを達成した[1]。また、図1に示すように2.45GHz帯位相制御マグネトロンをFM送信機、兼ワイヤレス電力送電機として用い、受電側にレクテナ（アンテナ＋整流回路）とFM復調機を備えたモニタを設置することで、モニタへの電力をワイヤレス給電するとともに映像情報を送受信することにも成功した。5.8GHz帯位相制御マグネトロンに関しては、スロットアンテナを有する位相制御マグネトロン4台を2×2素子の2次元アレー状に配置し、各々の出力位相を制御することによるアクティブフェーズドアレーの実証に成功した[2]。これらの研究は、将来的には遠くに離れた移動体への電力・情報同時伝送やワイヤレスセンサネットワークのセンサ端末への電力・情報同時伝送等への応用が期待される。

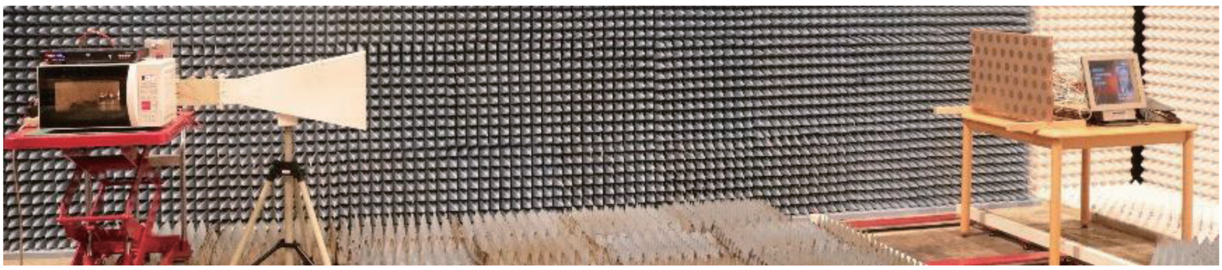


図1　2.45GHz帯位相制御マグネトロンを用いた電力・情報同時ワイヤレス伝送の実験写真

[1] B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, “Evaluation of the Modulation Performance of Injection-Locked Continuous-Wave Magnetrons”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol.66, no.1 pp. 709-715, Jan. 2019.
[2] B. Yang, X. Chen, J. Chu, T. Mitani, and N. Shinohara, “A 5.8-GHz Phased Array System Using Power-Variable Phase-Controlled Magnetrons for Wireless Power Transfer”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.68, no.11 pp. 4951-4959, Nov. 2020.

博士論文概要

［課程博士一覧］

三　瀧　雅　俊	「モード同期 Yb:KYW レーザーを用いた光周波数コム」	令和元年７月23日授与
Fengjiu Yang	「Architecture design for high efficient perovskite solar cells」 （高効率ペロブスカイト太陽電池のための構造デザインに関する研究）	令和元年９月24日授与
重　松　　英	「Study on transport and conversion of ac and dc spin current generated by magnetization dynamics」 （磁化ダイナミクスにより誘起される交流・直流スピン流の輸送・変換に関する研究）	令和２年１月23日授与
吉　田　昌　宏	「高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザに関する研究」	令和２年１月23日授与
柳　楽　勇　士	「離散時間確率系の解析と制御ならびにスモールゲイン定理とその周辺」	令和２年３月23日授与
清　原　孝　行	「Generation of heralded multi-photon parallel state for realizing a large-scale photonic quantum circuit」 （大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究）	令和２年３月23日授与
前　田　拓　也	「Study on Avalanche Breakdown in GaN」 （窒化ガリウムにおけるアバランシェ破壊に関する研究）	令和２年３月23日授与
松　田　祥　伸	「Polar-Plane-Free Faceted InGaN-LEDs toward Highly Radiative Polychromatic Emitters」 （高効率多色発光素子に向けた極性面フリーなマルチファセット InGaN-LED に関する研究）	令和２年３月23日授与
神　矢　翔太郎	「Modeling and Analysis of Interactions in Wireless Resource Allocation」 （無線リソース割当における相互作用のモデル化及び解析）	令和２年３月23日授与
Nor Azlan bin Mohd Aris	「Development of Software-Defined Multichannel Receiver for Equatorial Atmosphere Radar（EAR）」 （ソフトウェア無線機を用いた赤道大気レーダー（EAR）用多チャンネル受信機の開発）	令和２年３月23日授与
今　井　康　貴	「Single-Ion Spectroscopy of Two Electric Quadrupole Transitions in Ytterbium Ion and Excess Micromotion Minimization」 （Yb イオンの２つの電気四重極子遷移の単一イオン分光および過剰マイクロ運動の最小化）	令和２年５月25日授与
王　　　　策	「Study on Novel Rectifiers for Microwave Wireless Power Transfer System」 （マイクロ波無線電力伝送システム用整流回路に関する研究）	令和２年７月27日授与

Sha Wu	「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism and Model Predictive Glycemic Control for Critically Ill Patients Considering Time Variability of Insulin Sensitivity」 （インスリン感度の時変性を考慮に入れた重症患者のグルコース・インスリン代謝の数理モデルおよび血糖値のモデル予測制御）	令和2年9月23日授与
Fujun He	「Reliable Resource Allocation Models in Network Virtualization」 （ネットワーク仮想化における信頼性のある資源割り当てモデル）	令和2年9月23日授与
Longfei Chen	「Analysis and Modeling of Machine Operation Tasks using Egocentric Vision」 （エゴセントリックビジョンを用いた機械操作タスクのユーザー行動分析とモデリング）	令和2年9月23日授与

三　瀧　雅　俊（竹内繁樹教授）
「モード同期 Yb:KYW レーザーを用いた光周波数コム」
令和元年 7 月 23 日授与

モード同期レーザーから出力される周期的な光パルス列を周波数軸でみると、等間隔で離れた多数の単一周波数レーザー光の集まりとなっている。この形状から、この光は光周波数コム（光コム）とよばれる。光コムを用いた光周波数の測定は 2000 年に実現された。その後、マイクロ波領域よりも安定な光領域の周波数標準、すなわち周波数安定化されたレーザー光に、光コムを位相同期させる技術が開発されたことから、波長の離れた光周波数の比較なども可能となった。これをはじめ、多くの応用で長時間連続運転が期待されている。初期の光コムでは超短パルス光を出力するチタニウム・サファイアレーザーが、その後は連続運転に適したファイバーレーザーが、よく用いられてきた。前者は低雑音だが連続運転が難しく、後者は連続運転には適しているが低雑音化には専用の技術を必要とする。本研究では固体レーザーであり、出力 1 W 未満の半導体レーザーによる励起で発振する Yb:KYW レーザーに着目し、両者の長所をあわせもつ光コムを開発することを目的とした。モード同期の実現からレーザーへの位相同期技術の確立まで、独自の方法を数々開発し、以下に示す研究成果を上げた。

(1) レーザー共振器の安定領域中央近くでわずかに出力パワーが減少する、横モード縮退点でカーレンズモード同期を実現した。励起パワーに対しモード同期出力パワー 48 % と、高い変換効率を得た。低雑音の光コム実現には、凹面鏡の間隔と結晶位置を 10 μm 程度の範囲に調整する必要が明らかになった。レーザー共振器の温度安定化と密閉構造により、1 ヶ月以上の連続モード同期を達成するなど、これを解決した。

(2) 光コムの各モード周波数は、パルス繰り返し周波数にモード番号をかけた値に、光コム全体の周波数軸上の位置を示すオフセット周波数をたしたものになっている。したがって、オフセット周波数の安定化が光コムの応用には必要になる。通常、これは励起レーザーのパワーを制御して行われる。Yb:KYW レーザーではその制御帯域幅が 45 kHz とやや狭い。オフセット周波数のゆらぎの周波数成分、すなわちスペクトル幅を、非制御時で 45 kHz 以下に抑える必要がある。本研究では、レーザー共振器の群遅延分散、Yb:KYW 結晶の位置、および励起レーザーパワーに、オフセット周波数のスペクトル幅が依存することを見出した。それらをスペクトル幅 45 kHz 以下、最狭で 15 kHz になる状態に最適化し、位相同期を実現した。

(3) 光コムをレーザーに対して位相同期させるには、モード周波数を高速で制御する必要がある。鉛を充填したマウントを用いてピエゾ素子制御ミラーの機械的共振を減衰させ、制御帯域幅 200 kHz を実現した。これを用いて位相同期を実現し、このレーザーの光コムとしては世界最小の残留位相雑音、0.47 rad を実現した。同時に、オフセット周波数の位相同期の継続時間拡大を図った。オフセット周波数のドリフトの補償にともなって、そのスペクトル幅が 45 kHz を超えると位相同期ができなくなる。結晶位置の制御によって、スペクトル幅が狭い状態で広い周波数範囲を補償できることを見出し、ピエゾ素子を用いた結晶位置の制御を追加し組み合わせた。

(4) GPS 時計にパルス繰り返し周波数を位相同期させ、GPS 時計の不確かさでの光周波数測定を実証した。さらに、光共振器の共鳴に安定化したレーザーへモード周波数を、オフセット周波数を位相同期させた状態で位相同期させることに成功した（図）。位相同期と同時に、同じ光共振器の別の共鳴に安定化した波長の離れたレーザーを用意してビート周波数を測定し、光周波数比計測を実現した。連続測定 3 時間はレーザー側による限界で、光コムはさらに長時間の連続位相同期が可能であったことが確かめられている。

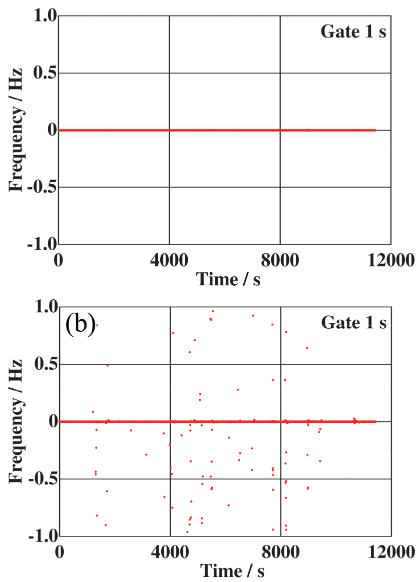


図　レーザーへの光コムの位相同期。(a) モード周波数とレーザーとのビート、(b) オフセット周波数。

Fengjiu Yang（松田一成教授）
「Architecture design for high efficient perovskite solar cells」
（高効率ペロブスカイト太陽電池のための構造デザインに関する研究）
令和元年 9 月 24 日授与

Hybrid organic/inorganic metal halide perovskite solar cells (PSCs) have emerged widespread attentions and interesting because of the unprecedented progress of power conversion efficiency (PCE), which has been regarded as a most-promising for next-generation photovoltaics. Although the rapid development on PCE, the stability of PSCs is still far behind the industrial application requirement and the single-time utilization of metal electrode also increase the fabrication cost of perovskite-photovoltaics, induce environmental pollution and resource waste. Hence, the SnO_2 and Cs-perovskite have been employed into planar PSCs as transport materials (ETM) and light harvester to replace TiO_2 and $MAPbI_3$ perovskite. The stability and PCE have been significantly enhanced on SnO_2 based PSCs compared with that of the typical TiO_2 based PSCs. The low temperature fabrication process of SnO_2 has been also introduced into flexible PSCs (fPSCs). The fPSCs using SnO_2 as ETM could achieve a high PCE of 17.1% with an ignorable hysteresis, sustaining an excellent bending durability of 76.5% even after 2000 bending cycles at bending radius of 4 mm (Fig. 1 (a)). The improvement of bending durability should mainly come from superior bending resistance of nanoparticle component of SnO_2 ETM film, because the SnO_2 nanoparticle can release the bending stress.

The excessive PbI_2 of Cs-perovskite precursor has severely limited the PCE and stability of PSCs, even though the excessive PbI_2 contribute to form large crystal size perovskite. Thus, the second solution growth process (SSGP) has been employed into the perovskite crystal growth to eliminate the excessive PbI_2 and maintain the large crystal size. The PCE of SSGP PSCs has promoted to 21.6% with a negligible hysteresis, and kept a much better stability at continuous light soaking and thermal treatment conditions. The SSGP PSCs have also realized a high PCE of 20.1% on large active area of 1.0 cm^2 with comparable high fill factor of records.

The single-time utilization of metal electrode fabricated by complicated deposition process of high vacuum thermal evaporation, which increases the fabrication cost of PSCs and wastes resource, and also causes ecological environmental pollution and hinders commercial application at the same time. Thus, the nanoporous Au film fabricated by simple and directly transfer process has been introduced into the PSCs. The nanoprous Au-PSCs achieve a high PCE of 19.0% with a small hysteresis. Moreover, the nanoporous Au film can realize more than 12 times reusing for the PSCs with a little reduction of PCE (Fig. 1 (b)). The nanoporous Au film has also employed into fPSCs and obtained a high PCE of 17.3% with an excellent bending durability of 98.5% even after 1000 bending cycles at a bending radius of 5 mm.

Improving the photovoltaic performance of PSCs by an approach of architecture design by varying the stacking configuration, passivation, and material innovation paves a potential way toward its commercial application.

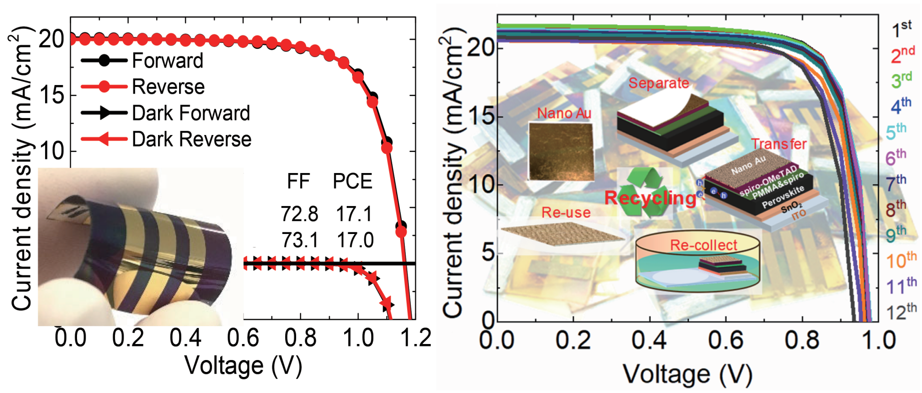


Fig. 1(a) Performance of developed flexible PSCs (fPSCs), (b) Demonstration of concept of recycle-utilization of metal electrode for PSCs.

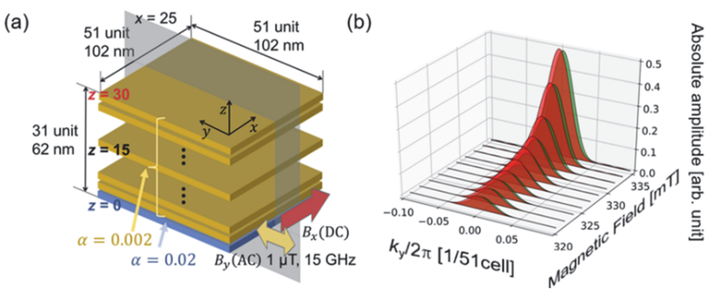
重　松　　　英（白石誠司教授）
「Study on transport and conversion of ac and dc spin current generated by magnetization dynamics」
（磁化ダイナミクスにより誘起される交流・直流スピン流の輸送・変換に関する研究）
令和２年１月23日授与

スピン角運動量の流れであるスピン流については、MRAM（Magnetic Random Access Memory）をはじめとした磁性体デバイスの制御やスピン流自体を情報伝達の担体としたスピントランジスタの実用化を目指し精力的な探求がなされている。固体物質中のスピン流物性は学理上も重要な研究対象であり、近年実験的な検証が進められてきた。スピン流を生成する手法として重要なのが磁性体／固体物質界面において磁化ダイナミクスを誘起する方法であり、スピンポンピングと呼ばれる現象により直流・交流スピン流を固体物質中に誘起することができる。

この研究では従来の研究で中心的に探索されてきた金属中のスピン流物性に加えて半導体もその対象とすべく、強磁性体／固体物質界面における磁化ダイナミクス物性の探求や、スピン流伝搬効率・スピン流電流変換効率の両特性を実測するための手法の検証を行った。その結果、以下の成果が得られた。

1. イットリウム・鉄・ガーネット（YIG）／白金（Pt）からなる系では直流スピンポンピングによるPtにおけるスピン流電流変換を観測できるが、この研究ではその温度依存性について詳細に調べた結果、低温域において強磁性共鳴の共鳴線幅の増大に従ってPtへのスピン流注入量が低減していることがわかった。共鳴周波数を変化させた実験により、YIG中の希土類不純物が磁化ダンピングを増大させる効果による寄与が示唆され、YIGをスピン注入源として用いる際の指標を得られた。
2. YIGの磁化ダイナミクスにより、マグノン・フォノン相互作用に起因する熱勾配が生成される現象が知られていた。この研究では、ESRキャビティ中の一様交流磁場でYIG上に熱電対構造を設置して熱輸送効果を観測した。さらに、一様な交流磁場においても構造的な対称性の破れに起因して非相反的な磁化ダイナミクスが誘起されることをマイクロマグネッティク計算に基づき示した。（図を参照）
3. スピンポンピングでは直流スピン流に加えて交流スピン流も生成されている。交流スピン流電流変換を効果的に観測する手法が近年他グループから提案された。この研究では、この手法を半導体Siに適用した。強磁性共鳴に伴う複素インダクタンスの変化を近接させた導波路で観測した。ドープ元素とドープ濃度を変化させたSiと磁性体からなる２層構造試料を用いて、そのスピン流電流変換効率を体系的に測定した。
4. スピンポンピングによる直流スピン流生成を利用したスピン流輸送を半導体3C-SiCに適用した。3C-SiCは研究が先行しているSiと同族の軽元素で構成されている一方で、閃亜鉛鉱型の結晶構造を持ちスピン流輸送物性の研究対象として興味深い。実験ではn型3C-SiCをチャネルとした試料と実験系において、室温でのスピン流輸送を示す信号が得られた。

以上、それぞれの実験系において磁化ダイナミクスを詳細に検討し、交流・直流スピン流の検出手法を用いることでスピン流輸送・変換等のスピン流物性を明らかにした。



(a) マイクロマグネッティク計算における磁性体モデルの構造
(b) 計算により得られた磁性体表裏それぞれの磁化ダイナミクス振幅の外部静磁場・波数依存性

吉　田　昌　宏（野田進教授）
「高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザに関する研究」
令和２年１月23日授与

本論文は、二重格子フォトニック結晶という新たな共振器構造を考案し、大面積単一モード発振可能なフォトニック結晶レーザを開発することにより、従来の半導体レーザでは困難であった、高出力・高ビーム品質動作を実証した成果をまとめたものである。

半導体レーザは、小型・安価・高効率・高制御性といった優れた特徴を有する一方で、出力増大のために発振面積を拡大すると、多モード発振となりビーム品質が劣化するため、高出力・高ビーム品質動作（すなわち、高輝度動作）の実現が、原理的に困難であるという課題を抱えていた。このため、従来の半導体レーザの輝度は、炭酸ガスレーザや固体 / ファイバレーザなどの輝度 >1 GWcm^{-2}sr^{-1} に比べて、一桁以上低い値に留まっており、次世代のスマート製造やスマートモビリティにおいて重要となる、レーザ加工や様々な光センシング（light detection and ranging: LiDAR 等）への応用が阻害されていた。

本論文では、フォトニック結晶のバンド端共振効果を利用したフォトニック結晶レーザに着目し、大面積単一モード発振を可能とする新たなフォトニック結晶共振器として、図１に示す「二重格子フォトニック結晶」を導入したレーザデバイスを開発した。本構造では、x、y 方向に格子定数 a の 1/4（＝媒質内波長 λ の 1/4）ずつシフトさせた２つのフォトニック結晶格子を重ね合わせることで、面内 180 度方向の光波の回折に消失性干渉を生じさせ、光閉じ込め効果を適切に弱めることが可能となる。これにより、ビーム品質の劣化を招く高次モードの損失を増大させ、大面積においても基本モード単一での発振が期待される。この新たな構造を導入することで、従来構造と比較して、5 倍の発振面積をもつ直径 500 μm の大面積レーザデバイスにおいて、10 W 級の高出力・高ビーム品質動作を実証し、半導体レーザとして世界最高レベルの輝度（~300 MWcm^{-2}sr^{-1}）を達成した（図 2）。さらに、上記の 180 度方向に加えて、90 度方向の回折効果との相互作用についても検討し、二重格子構造の深化・最適化を行うことで、直径 1 mm を超える大面積での高ビーム品質動作を可能とする設計にも成功した。またこの際、フォトニックバンド構造の観点からも議論を行い、Γ点バンド端におけるモードの縮退という物理的に興味深い現象との関連についても見出した。設計に続いて、直径 1 mm のフォトニック結晶レーザを作製し、パルス駆動において、70 W の高出力･高ビーム品質動作（輝度 ~650 MWcm^{-2}sr^{-1}）に成功するとともに、このような高輝度レーザの重要な応用の一例として、開発したフォトニック結晶レーザを用いたレンズフリーの LiDAR システムを構築し、長距離・高空間分解能での測距動作の実証にも成功した。

以上のように、本論文で実現された二重格子フォトニック結晶レーザは、従来の半導体レーザの高出力・高ビーム品質化における課題を克服し、半導体レーザの応用分野を大きく拡張する飛躍的進展であると言え、学術および産業的に重要な成果であると位置づけられる。

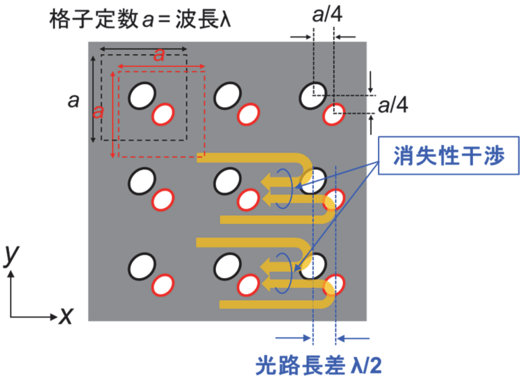


図 1.　二重格子フォトニック結晶共振器。

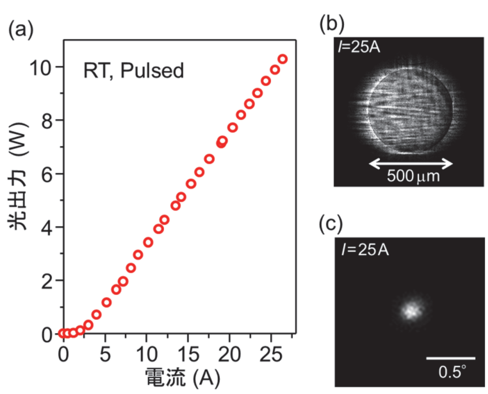


図 2.　二重格子フォトニック結晶レーザの発振特性（直径 500 μm デバイス）。(a) 光出力特性、(b) 近視野像、(c) 遠視野像。

柳　楽　勇　士（萩原朋道教授）
「離散時間確率系の解析と制御ならびにスモールゲイン定理とその周辺」
令和２年３月 23 日授与

実制御対象に対して何らかの制御理論を適用するためには、その対象を伝達関数や状態方程式などの数理モデルを用いて表現する必要がある。本論文では、とくに確率的な挙動を考慮に入れた数理モデルである離散時間確率系を扱う。確率系を扱うことが有用な状況として、太陽熱発電システムやネットワーク制御システム、サンプル値制御系などの数理モデル化を挙げることができ、この系の解析および制御に関する理論整備は今後益々重要になると考えられる。本論文における主要な研究目的は、通常の確定系の議論において知られる解析および設計手法を確率系に対して適用できるようにするための理論的枠組みの一部を構築することであり、本論文ではそれに関する種々の問題に取り組んだ。以下では、その中でも本論文の中心的議題である確率系のスモールゲイン定理とその定理に基づく解析および設計に関する３つの研究事項を取り上げる。

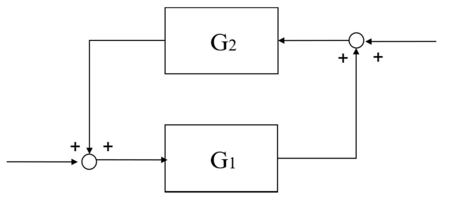


図１　閉ループ系

【研究事項 1. 確率系のスモールゲイン定理】　通常の確定系の議論において、スモールゲイン定理はロバスト制御の基礎をなす重要な定理である。この定理は図１に示す２つの（入出力）安定なサブシステム G_1 と G_2 からなる閉ループ系の安定判別に用いられる（外部入力に対する、G_1 と G_2 の入出力部分をこの閉ループ系の出力とみなす）。より正確には、スモールゲイン定理は、２つの安定な G_1 と G_2 のゲインを誘導ノルムにより評価し、それらの誘導ノルムの積が１未満であれば、閉ループ系が安定であることを主張している。本研究事項の目的は、これらのサブシステムが確率系として与えられる場合の閉ループ系を考え、その系に対するスモールゲイン定理を導出することである。Wan ら（2013）は、このような定理の導出を試みたが、

① 確定系スモールゲイン定理導出の鍵となる lp 空間の拡張空間（その詳細は割愛）の確率系版を導入しておらず、その証明に不備があった。
② また、スモールゲイン定理が扱うことのできる確率系のクラスが限定的であった。
③ さらに、その工学的意義を論じることなく、閉ループ系の入力が確率的であることを前提とした。

これら３つの点に注目して、上記証明の不備や議論の不十分性を是正し、より広いクラスの確率系に対するスモールゲイン定理の導出を行った。

【研究事項 2. 確率系の有界実補題】　上記研究事項で導出した確率系のスモールゲイン定理は、２つのサブシステムの誘導ノルムを用いた安定条件を与えている。本研究事項の目的は、工学的応用に向けて、サブシステムのクラスを線形系に限定し、それらの誘導ノルムを求める手法を導出することである。通常の確定系の議論において、有界実補題は線形時不変系の誘導ノルムを求める上で重要な役割を果たすことが知られている。確率系の誘導ノルムを求める上でも対応する補題が必要になると考えられ、そのことに着目した Bouhtouri ら（1999）は（線形）確率系に対する有界実補題を導出した。しかし、その際扱われた系のクラスが限定的であった。そこで、より一般的なクラスの系に対して適用できるような有界実補題の導出を行った。また、その補題が工学的応用に向けた道具として重要なものであることを状態フィードバック設計およびスモールゲイン定理に関する例題を通して示した。

【研究事項 3. 確率的 D スケーリング】　確定系の議論において一般にスモールゲイン定理の単純な適用に基づく安定解析は保守的であり、その保守性を低減する一手法として（確定的な）スケーリング要素を用いた D スケーリングが知られている。確率系のスモールゲイン定理の単純な適用も同様に保守的な解析をもたらす。そこで本研究事項では、確定系の議論を参考にして、考察対象とする閉ループ（確率）系に対して、そのランダム性を表現する確率過程を用いて構成される確率的なスケーリング要素を導入し、その要素を用いた確率的 D スケーリングと呼ぶ手法を提案した。この手法により解析の保守性が低減されることを、数値例を用いて確認した。

清　原　孝　行（竹内繁樹教授）
「Generation of heralded multi-photon parallel state for realizing a large-scale photonic quantum circuit」
（大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究）
令和２年３月23日授与

本論文は、光子を用いた量子回路の大規模化に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究をまとめたものである。多光子並列状態とは、同一性の極めて高い単一光子を複数個並列に配置された状態を指しており、光量子回路の入力状態として用いられている。今後、その光子数を向上させることは、量子計算において用いることのできるヒルベルト空間の次元数が光子数に対して指数関数的に増加するため、量子情報通信処理にとって重要となっている。

第一章では、光子を用いた量子技術の研究についての背景や、当該分野における本研究の位置づけと目的を明らかにしている。

第二章では、本論文において重要な基礎事項となる、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源の出力光子数分布に関する理論や、複数の光子間における量子干渉現象（多光子量子干渉）について述べている。

第三章では、伝令付き単一光子源において問題となっている複数光子が同時に出力する状態確率の抑制の実現について述べている。その方法として、複数台の光子対源を構築し、そのうちの少なくとも一台の光子対源から光子対が発生した場合、その一方の光子を光子数識別検出器による検出、その検出信号（伝令信号）は光子対のもう一方の存在を示唆するものであるために、伝令信号に基づいて対応する光子を高速光スイッチにより出力させる。本手法を用いた場合の出力光子数分布を理論的に検討し、その後、非線形光学結晶を用いた光子対源と電気光学変調器により実装することで実証している。

第四章では、伝令付き単一光子源から出力された光子列の効率的なシリアルパラレル変換について述べている。初めに、光子の存在を示す伝令信号を用いることで、伝令信号を用いない従来法と比較して変換効率が向上することを示している。次に、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源と、伝令信号により制御された光スイッチによって実装し、従来法の光子列の理論的最大変換効率を超える効率を達成している。

第五章では、複数台の伝令付き単一光子源からランダムで出力した複数光子を効率的に多光子並列状態に変換する研究について述べている。$N \times N$の空間的動的ネットワークと固定時間遅延系を用いることで、余剰光子を抑制しつつ多光子並列状態を効率的な生成する方法を提案し、２光子において原理検証している。

第六章では、２組の多光子システム間量子もつれ状態の新しい評価方法の実証実験について述べている。初めに、線形光学素子を用いたモード間フーリエ変換量子回路を２組用いることにより、多次元量子もつれ状態を効率的に評価できる新しい方法を説明している。次に、それを実現するために必要な量子回路の安定化する方法を述べている。最後に、３光子を用いた量子もつれ状態に対しての原理検証実験が報告されている。

第七章では、本論文の成果をまとめ、将来展望について述べている。

以上の研究により、光量子回路の大規模化に向けて必要となる、効率的な多光子並列状態の生成と、多光子を用いた量子もつれ状態の効率的な検証方法を実現した。ごく最近、本研究の実証で用いたものよりも高い効率での伝令付き単一光子発生も報告されている。このような光子源と組み合わせることで、より多くの光子を含んだ、決定論的な多光子並列状態の実現が期待される。

前　田　拓　也（木本恒教授）
「Study on Avalanche Breakdown in GaN」
（窒化ガリウムにおけるアバランシェ破壊に関する研究）
令和２年３月 23 日授与

　持続可能な社会の実現に向けて電力変換の高効率化が強く求められている。現在、電力変換を担う半導体パワーデバイスの材料としてシリコン（Si）が主流だが、長年の研究によってその性能は材料物性から決まる物理限界に到達しつつあり、今後飛躍的な性能向上は難しい。そこで、ワイドギャップ半導体である窒化ガリウム（GaN）が次世代パワーデバイス材料として期待されている。GaN は高い絶縁破壊電界（~3 MV/cm）および高い電子移動度（~1200 cm²/Vs）を有するため、Si に比べて耐圧維持層のオン抵抗を 1/1000 程度に低減できると考えられる。
　パワーデバイスの耐圧・安全動作領域を設計・予測するには、正確な物性値を用いたデバイスシミュレーションが必要不可欠である。パワーデバイスにおける絶縁破壊（アバランシェ破壊）を決定するのは「衝突イオン化係数（電子 / 成功が単位距離進む間に衝突電離を起こす回数）」という材料固有の物性値である。GaN の絶縁破壊現象の理解、および、GaN パワーデバイスの実現に向けて、GaN の衝突イオン化係数の精密決定が必要である。しかし、衝突イオン化係数の測定は極めて難しく、GaN の衝突イオン化係数の研究は未開拓であった。
　衝突イオン化係数は直接測定することができず、光照射などによって空乏層へキャリアを注入して高電界下のキャリアのアバランシェ増倍を測定・解析することで実験的に求めることができる。その際、p-n 接合の空乏層へ電子・正孔を注入し、それぞれのキャリア増倍を測定する必要がある。例えば他材料では、裏面基板を極薄加工して表面と裏面から光照射することで電子・正孔のキャリア増倍を測定した報告があるが、GaN はキャリアの拡散長や光の侵入長が 1 μm 以下と極めて短く、同様の手法を適用することはできない。
　本研究では、GaN におけるアバランシェ破壊現象の解明を目的とし、アバランシェ破壊に関する課題に包括的に取り組み、衝突イオン化係数の新規測定手法を提案・確立し、電子・正孔の衝突イオン化係数を実験的に求めることに成功した。図 1 に光電流増倍測定に用いた素子構造を示す。通常、GaN デバイスを作製する際は、移動度が高く不純物制御も容易な n 層を耐圧維持層に用いるが、本研究では低濃度 p 層を耐圧維持層とする p-n 接合ダイオードを作製した。この素子においては、高電界部となる p-n 接合界面が基板側に位置する。この素子にバンドギャップよりも短波長の光を照射すると、p 層表面近傍で光吸収が生じて少数キャリアである電子の注入が生じる。一方、バンドギャップよりも長波長の光を照射すると、光は GaN に吸収されずに結晶内部へ侵入するが、高電界部である p-n 接合界面近傍において、禁制帯中への波動関数の浸み出しに起因する光吸収（Franz-Keldysh 効果）が局所的に生じて正孔の注入が生じる（図 2 にその概略図を用いて示している）。光電流を詳細に解析することで電子・正孔注入時のアバランシェ増倍係数を抽出し、それらを解析することで衝突イオン化係数を求めた。図 3 に GaN の衝突イオン化係数を示す。得られた結果について経験式を用いてモデル化し、様々なドーピング密度の GaN デバイスの絶縁破壊電圧をシミュレーションしたところ、多数の先行研究を含むこれまでのデータをよく再現した。これは、得られた衝突イオン化係数の値が高精度であり有用であることを支持している。

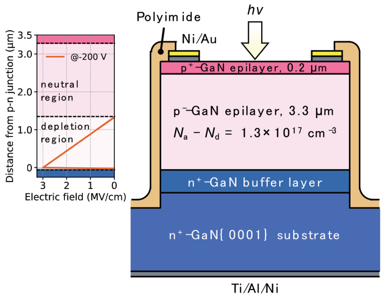


図 1.　測定に用いた GaN p-n 接合ダイオードの構造図。

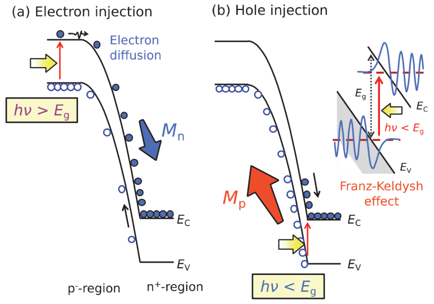


図 2.　光電流測定の概略図。光の波長により光吸収位置を制御できる。

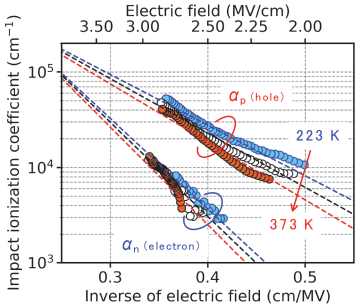


図 3.　本研究で得られた GaN の電子・正孔の衝突イオン化係数。

松　田　祥　伸（川上養一教授）
「Polar-Plane-Free Faceted InGaN-LEDs toward Highly Radiative Polychromatic Emitters」
（高効率多色発光素子に向けた極性面フリーなマルチファセット InGaN-LED に関する研究）
令和２年３月 23 日授与

マルチファセット InGaN-LED は、単一の半導体素子による蛍光体フリーな多色発光デバイスとして注目されている。本構造では、複数の結晶ファセット面から成るマイクロ構造上に発光層を形成することで、ファセット面間で発光層の構造特性分布が生じ、多色発光が実現される。実際、電流注入動作による多色発光特性や白色合成が、本研究室の初期の研究を皮切りとして複数の研究グループから報告されてきた。しかし、これまで提案されてきたマルチファセット構造は、その長波長発光成分が（0001）極性面に由来し、この面方位特有の大きな分極誘起電界のために高効率発光を妨げられていた。本研究では、この問題を回避するため、分極誘起電界の抑制される半極性面および無極性面から成る極性面フリーなマルチファセット構造を提案し、その多色発光 LED としてのデバイス動作実証を行った。以下に概要をまとめる。

本研究では、有機金属気相成長法における選択成長法を用い、半極性 $\{11\bar{2}\bar{2}\}$ 面 GaN 基板上に形成される極性面フリーなマルチファセット LED 構造を提案した（図１（a））。本構造の獲得にあたって次のような検討を行った。はじめに、基板の面方位（$(11\bar{2}\bar{2})$ 面または $(\bar{1}\bar{1}22)$ 面），選択成長におけるマスク材のストライプ方向、およびマスクパターンに着目して様々な作製条件を探索し、特定の条件下において $(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})$ 面上に（0001）極性面フリーなマルチファセット構造が得られることを見出した。次いで、そのマルチファセット構造上に形成した発光層は、光励起下において輻射再結合確率の高い多色発光特性を示すことを明らかにした。また、発光ダイナミクスに加えて、マルチファセット構造上の発光層の構造特性分布を詳細に評価し、拡散方程式と独自の結晶成長モデルを適用することにより、多色発光特性を示す結晶成長メカニズムを明らかにした。続いて、$(\bar{1}\bar{1}22)$ 面上の極性面フリーなマルチファセット構造の LED デバイス化に向けて、n 型層および p 型層のドーピング条件を検討した。マルチファセット構造に先立ち、$(\bar{1}\bar{1}22)$ 面上の通常の平坦 LED 構造においてドーピング条件を確立し、その後、極性面フリーなマルチファセット構造へのドーピングを試み、構造全面に pn 接合を形成することに成功した。最終的に、マルチファセット LED 構造に対する電極形成プロセスを最適化し、電流注入動作における多色発光特性の実証に至った（図１（b））。その発光スペクトルは、500 nm を中心波長として 400 ～ 600 nm という広範囲の可視光域をカバーしている。

以上のように、本研究は、新しい InGaN 系多色発光構造として、半極性 GaN 基板上への極性面フリーなマルチファセット構造の作製に成功するとともに、同構造をベースとした多色発光 LED の動作実証も行ったものである。また、マルチファセット GaN 構造および InGaN 発光層の結晶成長ダイナミクスについても論じており、可視域の多色発光素子の応用上のみならず物性解明と制御において大きく寄与するものである。

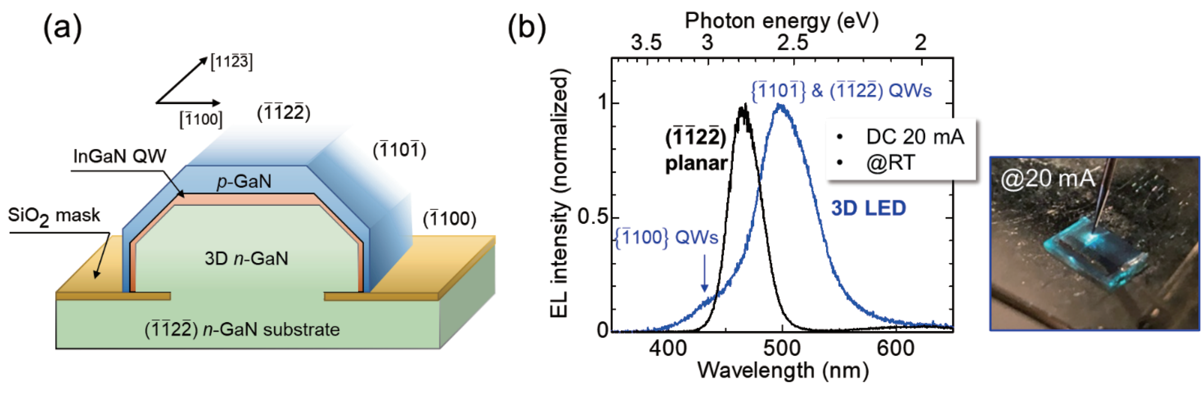


図１.（a）極性面フリーなマルチファセット LED 構造の概要図と、（b）室温発光スペクトルおよび駆動時のサンプル写真。参考に、同様の成長条件で作製した（$\bar{1}\bar{1}22$）面平坦膜 LED の発光スペクトルを示す。

神　矢　翔太郎（守倉正博教授）
「Modeling and Analysis of Interactions in Wireless Resource Allocation」
（無線リソース割当における相互作用のモデル化及び解析）
令和 2 年 3 月 23 日授与

本論文では、無線通信におけるリソース制御に焦点を当て、システムに応じた適切なリソース制御の提案並びに制御対象の振る舞いや通信性能の解析を行っている。無線通信におけるリソース制御は、本質的に相互作用を含んでおり、同一周波数で同時に複数の通信を行う場合には、干渉の発生や、送信の時分割を考慮する必要がある。本論文ではこれに着目し、検討するシステムに応じた数理モデルの仮定のもと、リソース制御の提案並びに解析を行っている。検討対象の無線システムは、無線 LAN とセルラシステムに大別され、それぞれ送信電力・周波数チャネルの制御、上り回線のユーザスケジューリングについて議論している。

無線 LAN のリソース制御に関する議論の要点は次のとおりである。高密度な無線 LAN 環境においては、しばしば複数の AP によるカバーエリアが過度に重複している。このような状況では、無線 LAN 機器の送信機会が抑制され、スループットが低減する。本論文では、この問題に対し送信電力制御による適応的なカバーエリアの調節法を提案している。この際、任意の端末が無線サービスを受けられるために、AP との接続性は担保される必要がある。提案手法においては、端末や AP をカバレッジのセンサーとして利用し、それらのカバレッジが保証されるようにすることで、カバレッジホールの発生を抑制しつつ、カバレッジの重複を低減する電力制御を行っている。

上記に加え、本論文では、分散的チャネル制御も提案している。無線 LAN では複数の周波数が利用可能であり、異なるチャネルであれば複数の通信が同時に行える。そのため、適当なチャネル制御は、カバレッジの重複削減に対して有効な手段となる。ただし、周波数チャネルの分散的な制御は、上に述べたように相互作用を含む。すなわち、他の AP がいずれのチャネルを選択するかに応じて、自身にとってカバレッジ重複削減の意味で最適なチャネルは異なるため。分散制御は不安定になりうる。本論文では、相互作用をゲーム理論を用いて定式化し、各 AP に対する利得関数を適切に設計することで、分散的な最適チャネル選択の収束性を獲得している。

セルラシステムにおける上り回線のユーザスケジューリングに関する要点は次のとおりである。本論文では、確率幾何学と呼ばれる無線通信品質定量化の枠組みを用いて、システムにユーザスケジューリングが適用される場合における通信品質の解析を行っている。確率幾何学は、適当な確率モデルの仮定のもと、干渉局の配置に起因する所望信号帯干渉電力比の変動を、解析的な分布の形で得ることを可能にする。本論文では、従来の確率幾何学による性能解析では度外視されていたユーザスケジューリングに焦点を当て、その適用下での通信品質を解析している。この際、スケジューリングの効果は基地局あたりのユーザの数に依存することに注意し、ユーザ数ごとに通信品質の解析を行い、それらをユーザ数の分布で平均化することで、所望の解析結果を得ている。

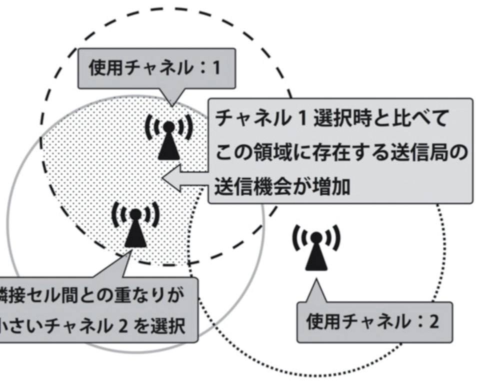


図 1. 無線 LAN におけるカバレッジ重複を削減するチャネル選択

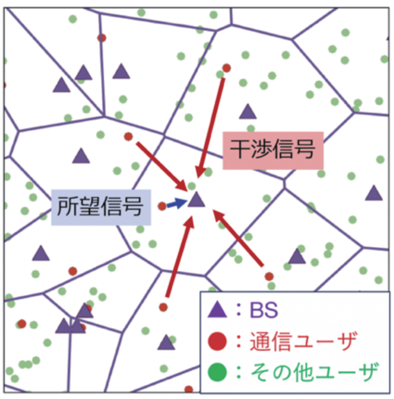


図 2. セルラネットワークにおける干渉

Nor Azlan bin Mohd Aris（橋口浩之教授）
「Development of Software-Defined Multichannel Receiver for Equatorial Atmosphere Radar（EAR）」
（ソフトウェア無線機を用いた赤道大気レーダー（EAR）用多チャンネル受信機の開発）
令和２年３月23日授与

Equatorial Atmosphere Radar (EAR) is a very high frequency (VHF) Doppler radar operated with an active phased-array antenna system, approximately 110 m in diameter which consists of 560 three-element Yagi antennas, located at the equator in Kototabang, West Sumatra, Indonesia (0.20°S, 100.32°E). The array antenna is divided into 24 groups where each group consists of 24 antennas except for eight groups along the periphery which contain one to three fewer antennas. These design is purposely constructed to produce a quasi-circular array pattern. The EAR had originally been equipped with a single receiving channel system. This research presents development of a multichannel receiver system for the EAR using a combination of the Universal Software Radio Peripheral X300 (USRP X300) and GNU Radio software. There are a number of advantages to have multichannel receiver system such as to enable spaced-antenna (SA) method and spatial domain interferometry.

First test observation was conducted on November 2017 to analyze the system reliability, followed with subsequent tests in March and July 2018. The configuration of the test observation is shown in Figure 1. Two USRP X300 devices, corresponding to four receiving channels, were synchronized using 10 MHz reference clocks and a pulse per second (1 PPS) signal. The standard observation system of the EAR is retained by splitting the received echo signals through directional coupler which enabled simultaneous observation of the two different techniques, SA and Doppler beam swinging (DBS). Each receiving antennas for the EAR SA method formed by a combination of two antenna array groups (aperture size is approximately one twelfth of the whole EAR). The signal for SA application is fed to the USRP X300s for digital conversion, and then stored on a Hard Disk Drive (HDD). The ranging of the data is carried out by taking advantage of the leaked transmitted pulse, before demodulated and coherently integrated. The initial results show the existence of noticeable fluctuations in the estimated horizontal wind.

Further, performance analysis using multiple receiving antennas orientation for the application of SA method on the EAR has been carried out through multiple experiments over the duration between April 2019 and September 2019. Phase correction is applied to all channels for a single spectrum in the real time signal processing for improving the phase synchronization. Then, a comparison of the EAR SA performance using five different orientations taking into consideration the aperture size of receiving antenna and its separation distance has been presented, where the horizontal wind profiles using Full Correlation Analysis (FCA) were estimated and compared with the EAR standard observation data. Based on the results, the configuration with the largest aperture shows slight advantage over the other four configurations but with limited improvement.

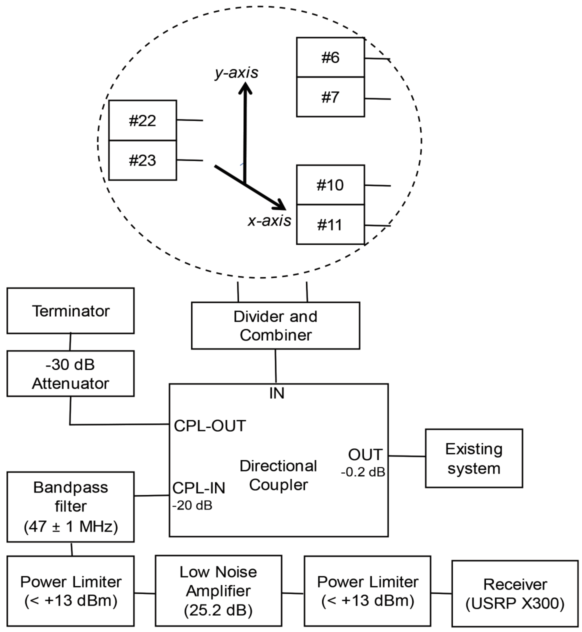


Figure 1. The configuration of the EAR multichannel receiver for test observation.

今　井　康　貴（山田啓文教授）

「Single-Ion Spectroscopy of Two Electric Quadrupole Transitions in Ytterbium Ion and Excess Micromotion Minimization」
（Yb イオンの２つの電気四重極子遷移の単一イオン分光および過剰マイクロ運動の最小化）
令和２年５月 25 日授与

光領域の遷移を基準としてレーザー光の周波数を安定化した光周波数標準、すなわち、光時計は、極めて不確かさが小さい。基準スペクトルを超高真空中のイオントラップに捕捉した単一イオンから得る方法では、10^{-18} よりも小さい不確かさが報告されている。この小さな不確かさから、単位“秒”の再定義や、基礎物理学の検証実験への応用が注目されている。検証実験の例として、複数の光時計間の周波数比を長期にわたって比較することにより、物理の基本定数の一つである微細構造定数 α の時間変化を探索することが可能である。また、同位体シフトの精密測定による、未知の粒子の探索が提案されている。

本研究ではイッテルビウムイオン（Yb^+）の遷移を基準とした光時計の実現を目標に、(1) 単一イオンのレーザー冷却法、および、(2) ２つの電気四重子極遷移 $^2S_{1/2}$ − $^2D_{3/2}$ と $^2S_{1/2}$ − $^2D_{5/2}$ の単一イオン分光法を確立した。また、(3) 単一イオン分光で観測されるイオンの運動によるサイドバンドと過剰マイクロ運動との関係を解析した。以下にその概要を記す。

(1) レーザー冷却光源の周波数安定度を改善し、超微細構造をもたない $^{174}Yb^+$ を用いてイオントラップへの導入個数の制御法を確立した。また、冷却の阻害となるイオンの過剰マイクロ運動を、RF 光子相互相関法により検出し、静電場印加により最小化した。続いて、磁場による周波数変動が小さい遷移をもつが、超微細構造によりレーザー冷却が難しい、$^{171}Yb^+$ のレーザー冷却法を確立した。

(2) FPGA 含む分光システムを開発し $^{174}Yb^+$ の $^2S_{1/2}$ − $^2D_{5/2}$ 遷移、および、$^{171}Yb^+$ の $^2S_{1/2}$ − $^2D_{3/2}$ 遷移を単一イオンで分光した。とくに $^{171}Yb^+$ の $^2S_{1/2}$ − $^2D_{3/2}$ 遷移は分光手順が複雑であるが、駆動する必要がある遷移すべてに独立なレーザーを用意し分光条件を詳細に調べ、分光を行った。最終的に、幅 380Hz で基準スペクトルの観測に成功した（図 1）。

(3) 単一イオン分光で観測されるサイドバンドとトラップポテンシャルとの関係性を調べることで、サイドバンドスペクトルの構造は永年周波数の混変調が原因で発生することを突き止めた。混変調の発生はイオンの永年運動が十分に冷却されていないことを示している。RF 光子相互相関法およびトラップポテンシャル変調による検出法を併用し、過剰マイクロ運動の最小化を３次元で行った。その結果、永年運動をドップラー冷却限界近くまで冷却することに成功した。同時に、サイドバンドスペクトルの構造が大幅に減少した（図 2）。

以上のように、単一 Yb イオン分光システムを完成させ、分光手順を確立した。また、サイドバンドスペクトルの構造と過剰マイクロ運動の関係を明らかにし、理論限界近い温度まで Yb イオンを冷却することに成功した。これは光時計の不確かさの要因の一つ、２次のドップラーシフトを十分に低減するうえで非常に重要な結果である。

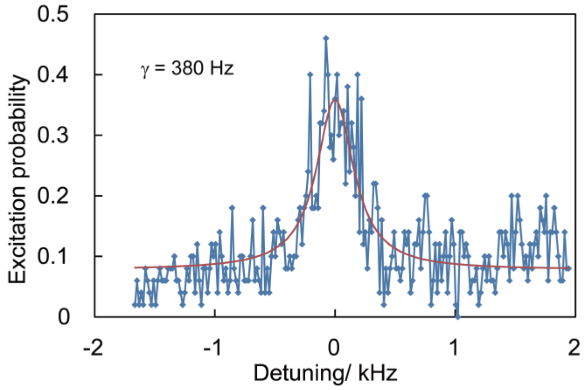


図 1：単一 $^{171}Yb^+$ の $^2S_{1/2}$ − $^2D_{3/2}$ 遷移スペクトル

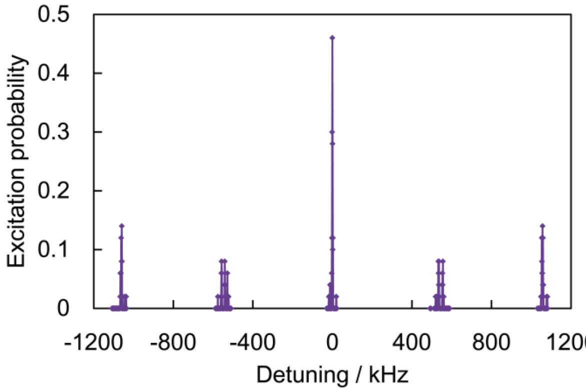


図 2：単一 $^{174}Yb^+$ の $^2S_{1/2}$ − $^2D_{5/2}$ 遷移スペクトル

王　　　　策（篠原真毅教授）

「Study on Novel Rectifiers for Microwave Wireless Power Transfer System」（マイクロ波無線電力伝送システム用整流回路に関する研究）

2020 年 7 月 27 日授与

本論文では、様々な応用が考えられるマイクロ波無線電力伝送システムのうち、特にマイクロ波を整流し電力に変換する整流回路に注目し、マイクロ波電力レベルに応じた整流回路の高効率化について研究を行った。

まず弱電力応用のための F 級負荷 Charge Pump 整流回路を開発した（図 1）。本研究では、高効率化を図るため、Charge Pump 整流回路に、中 - 大電力のマイクロ波無線電力伝送で用いられるシングルシャント型整流回路の重要構成要素であり、高調波処理回路である F 級負荷を導入し、市販ショットキーバリアダイオードを用いて、シングルシャント型整流回路と同程度となる整流効率約 72% を実現した。

次に中電力応用のための多段 Dickson 整流回路のトポロジーを用いた多段 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路の開発を行った。多段 Dickson 整流回路は電力分配線路と F 級負荷 Charge Pump 整流回路の二つ部分で構成される。。開発した 2 段、4 段の各 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路において、整流効率及び出力電圧はそれぞれ約 70%、9V 以上、および約 60%、15V 以上となり、情報処理ユニット等のディジタル回路等を駆動することも可能とした。

さらに大電力応用のための新型 GaAs ショットキーダイオードを用いたシングルシャント型整流回路を開発した。高効率を実現するために、SPICE パラメータの存在しない新型 GaAs ショットキーバリアダイオードのパラメータ推定を行い、測定結果をもとにモデリングした高周波ダイオードパラメータを用いて、整流回路の設計開発を行った（図 2）。その結果、2.45GHz 帯では世界最高効率となる 91% の整流効率（@5W マイクロ波入力）を達成した（図 3）。さらに今回測定した新型 GaAs ショットキーバリアダイオードの SPICE パラメータをもとに、変換効率への影響について検討し、より高効率の整流回路を実現するために必要なダイオードへの要求事項を示した。

最後に最適負荷抵抗が調整可能な整流回路設計手法についてまとめた。マイクロ波無線電力伝送システムの受信側におけるレクテナ変換効率は負荷抵抗に強く依存することが知られている。実際応用する時、負荷抵抗とレクテナ設計最適負荷抵抗とが不整合となる場合は多々あり、これによって、整流効率の低下が考えられる。また、一般的に入力電力と最適負荷抵抗は互いに依存する。本課題では、整流回路上のダイオードとグラウンド点間の線路長を利用し、ダイオードの特性インピーダンスを調整することにより、同じ入力電力において、負荷抵抗を調整する整流回路の設計手法を新しく提案した。F 級負荷 Charge Pump 整流回路とシングルシャント型整流回路において、ダイオードと負荷抵抗は線形関係であるため、負荷抵抗調整する設計法は適用できる。

図 1：弱電力用 F 級負荷 Charge Pump 整流回路

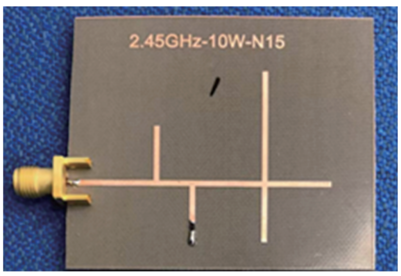


図 2：大電力用シングルシャント整流回路（GaAs ダイオード）

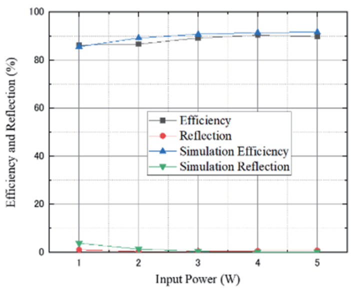


図 3：開発した大電力用整流回路の RF-DC 変換効率（最高 91% の整流効率 @5W）

Sha Wu（土居伸二教授）
「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism and Model Predictive Glycemic Control for Critically Ill Patients Considering Time Variability of Insulin Sensitivity」
（インスリン感度の時変性を考慮に入れた重症患者のグルコース・インスリン代謝の数理モデルおよび血糖値のモデル予測制御）
令和２年９月 23 日授与

集中治療室（Intensive Care Unit; ICU）に滞在する患者あるいは重症患者は、病気や外傷・手術などの侵襲によるストレスホルモン分泌の促進およびインスリン抵抗性の上昇によって血糖値が高くなりやすい。さらに栄養補給のためのグルコース投与を行う必要があるため、多数の患者が高血糖になることが知られている。しかし、高血糖は敗血症などの合併症や高死亡率の原因となるため、重症患者にとって深刻な問題である。そこで，患者にインスリンを投与して血糖値を低下させる処置が行われるが、その際に患者の血糖値を 80―110 mg/dL（4.4―6.1 mmol/L）の範囲に維持できれば罹病率と死亡率を低下させられる［Van den Berghe et al., N Engl J Med（2001)］ため、目標血糖値範囲を 80―110 mg/dL とする厳格な血糖値管理を行うことが望ましいとされている。しかし、ICU 滞在患者はインスリン感度の変動が大きく、血糖値を常に目標範囲に維持するようなインスリン投与速度の調節は困難である。特に術後患者の場合、患者の回復に従ってインスリン感度が増加して血糖値が低下しやすくなり、低血糖で死に至るリスクが増大するため、厳格な血糖値管理はほとんど行われていないのが現状である。本論文は以上の問題点を解決することを目的として、術後患者のインスリン感度の変動を考慮に入れた ICU 滞在患者の血糖値変化をより正確に表せる糖代謝の数理モデルを構築するとともに、構築したモデルに基づく非線形モデル予測制御と範囲モデル予測制御を用いた重症患者の血糖値制御法の検討を行った。

まず、既存の ICU 患者糖代謝数理モデルにインスリン感度を表すパラメータを導入するとともに、より正確に糖代謝を表すためインスリン依存性と非依存性のグルコース代謝の非線形特性、細胞間インスリンの飽和特性および経腸グルコース投与入力を追加して改良を行った（図 1）。また、改良モデルのパラメータを香川大学医学部附属病院 ICU に滞在した患者の臨床データに基づいて同定した。このモデルにおいてインスリン感度パラメータのみ変動させることで臨床データの血糖値変化をほぼ表せることを確認でき、従来モデルより誤差が小さくなる傾向を確認した。

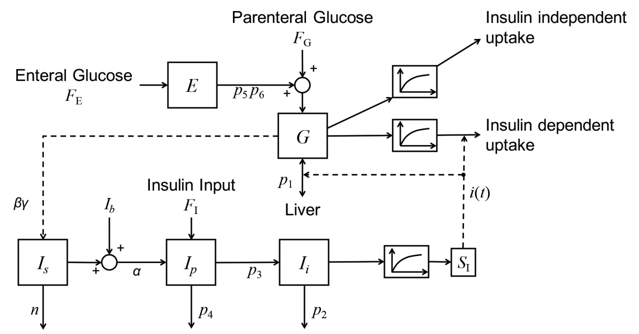


図１　改良した糖代謝数理モデル。G は血糖値、I_i は細胞間インスリン、I_p は血漿インスリン、I_s は膵臓のインスリン分泌、E は腸内グルコース、S_I はインスリン感度である。

次に、患者のインスリン感度を常に把握できるよう過去の血糖値、グルコース投与速度とインスリン投与速度に基づいてインスリン感度パラメータを 30 分ごとに同定するオンライン同定アルゴリズムを構成した。

最後に、改良モデルを血糖値予測モデルとして、インスリン感度オンライン同定アルゴリズムを備えた非線形モデル予測制御および範囲モデル予測制御を用いた血糖値制御システムを構築した（図 2）。臨床データに基づいて構成した仮想患者に対する適用結果から、血糖値を 80―110 mg/dL の範囲に維持できる時間率は既存の研究と同程度で、とくに範囲モデル予測制御を用いた場合に低血糖となる時間率を低減できることが確認できた。

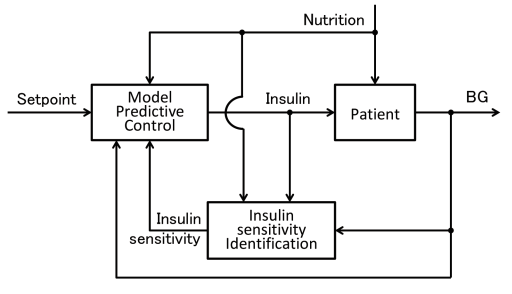


図２　血糖値制御システム。

Fujun He（大木英司教授）
「Reliable Resource Allocation Models in Network Virtualization」
（ネットワーク仮想化における信頼性のある資源割り当てモデル）
令和２年９月 23 日授与

Network virtualization has been introduced as a key role in the next-generation networking paradigm to fend off the ossification of traditional networks. By leveraging the technologies of computer virtualization, network function virtualization, and software-defined networking, a platform with network virtualization provides virtualized resources of computing, functionality, and networking to users in a dynamic manner. While network virtualization leads to a more flexible and efficient network, it brings challenges for network management, one of which is how to efficiently allocate resources with satisfying different requirements. In addition, as the adaptation of network virtualization in different application archetypes is an increasing trend, the reliability of an environment with network virtualization has become a major concern. Resource allocation with protection strategies dealing with the reliability issue is an essential requirement for network virtualization. This thesis studies five specific problems about reliable resource allocation in network virtualization, each of which focuses on a typical application scenario.

Firstly, this thesis proposes a primary and backup resource allocation model that provides a probabilistic protection guarantee for virtual machines against multiple failures of physical machines in a cloud provider to minimize the required total capacity. The probability that the protection provided by a physical machine does not succeed is guaranteed within a given number. Providing the probabilistic protection can reduce the required backup capacity by allowing backup resource sharing, but it leads to a nonlinear programing problem in a general-capacity case against multiple failures. This work applies robust optimization with extensive mathematical operations to formulate the resource allocation problem as a mixed integer linear programming problem, where capacity fragmentation is suppressed. Secondly, this thesis proposes a backup computing and transmission resource allocation model for virtual networks with the probabilistic protection against multiple facility node failures. Thirdly, this proposes a backup resource allocation model for middleboxes with considering both failure probabilities of network functions and backup servers. This work aims to find an assignment of backup servers to functions where the worst weighted unavailability is minimized. This work develops three heuristic algorithms with polynomial time complexity to solve the problem. This work analyzes the approximation performances of different heuristic algorithms with providing several lower and upper bounds. Fourthly, this thesis proposes an unavailability-aware backup allocation model with the shared protection to minimize the maximum unavailability among functions. Fifthly, this thesis proposes a master and slave controller assignment model against multiple controller failures in software-defined networks with considering propagation latency between switches and controllers. Given assigned controllers for a switch, the master controller in each failure case is automatically specified based on a low latency first policy. This work proves that the adopted policy achieves the optimal objectives for considered problems.

The five proposed models studied five typical application scenarios of network virtualization with considering the corresponding properties, respectively. This work provides different approaches with theoretical analyses in each model. A network operator or service provider can select appropriate models with suitable approaches according to the specific requirements to achieve a flexible, cost-effective, and dependable network virtualization environment.

Longfei Chen（中村裕一教授）
「Analysis and Modeling of Machine Operation Tasks using Egocentric Vision」
（エゴセントリックビジョンを用いた機械操作タスクのユーザー行動分析とモデリング）
令和２年９月23日授与

The purpose of this research is to support the operational behaviors of ordinary users, especially in daily machine operational tasks. Home or office devices commonly appear in our everyday lives, such as a printer, rice cooker, coffee maker, sewing machine, DIY tools, and automobiles. First-time users, typically elderly people, usually need a guide on how to deal with those equipments; even for the most experienced users, a good guide can help save their physical energy and reduce their mental workload.

Evolving from textbook manuals and video tutorials, intelligent guidance systems with Augmented Reality (AR) have recently been developed to efficiently support users in these tasks, aiming at providing help on both knowledge perception and skill development of operators. In order to meet various user needs in rapidly changing task conditions, an effective guidance system should (i) provide a diversity of guidance patterns that is compatible with a sufficient variety of possible users and (ii) support what is needed by situational awareness during the task execution process. For instance, novices may require step-by-step instructions and a detailed explanation; concerning intermediate level users, it may be reasonable to offer more advanced ways of instructions; while professionals may seek to customize guidance according to their own ways.

To address these issues, we aimed at learning an extensive task model from a diversity of users and analyze the characteristics of their behaviors with different skill levels. We first introduced a novel approach for unsupervised hotspot detection from egocentric RGB-D experiences. The purpose is to use hotspots as key clues for workflow detection and experience summarization. Modeling the tasks was achieved by temporal interactions using a probabilistic model (HMM). We then focused on developing a framework for integrating multiple users' experiences into a unified operation model. Beginners' operational behaviors can provide valuable insights to provide detailed information about handling difficult task situations, confirmation of results, and common errors. A novel two-step aggregation framework is proposed to align and integrate experts' and beginners' experiences into an extensive task model. At last, we use fine-grained visual features based on the user's hotspot, head, hand, and gaze (H^3G) for explicitly analyzing their operational behaviors with different skills, knowledge levels, and interpersonal differences. We observed significant behavioral changes due to continuous skill improvement. Automatically integrating different operating habits allows developing a rich, inclusive task model that could flexibly adapt to various user-specific behavior patterns.

In conclusion, we offered new insight into the field of supporting daily machine operations. We explored novel solutions of capturing experiences with machines and how these can be described, modeled, and used.

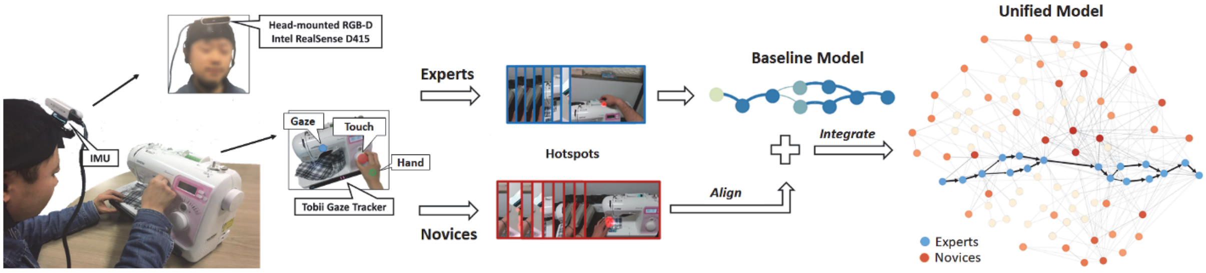


Figure 1: Recording and integration of operational experiences through egocentric vision.

高校生のページ

コンピュータで視る

コンピュータビジョン分野
西 野 恒、延 原 章 平、川 原 僚

我々の研究室ではコンピュータビジョンの研究をしています。コンピュータビジョンという研究分野を初めて聞く人も多いと思いますが、その名から想像できる通り計算機の視覚、すなわちコンピュータが物を見えるようにすることが目的になっています。もともとはいわゆる人工知能の一分野として生まれたのですが、今では独立した分野として大きく栄え、その成果を気づかぬうちにみなさんも日々の生活の中で活用しています。リアルタイムで自撮り映像の顔に仮想的にメガネや鼻をつけたり，パソコンを顔でロック解除したり、ゲームのキャラクタがスマートフォンを通して現実世界に重なって見えたり、様々な形で身近にコンピュータビジョンの技術が溢れています。自動運転や介護ロボットなど、コンピュータビジョン技術が社会基盤として実装されるようにもなってきています。これらの技術の根底には、顔認識と追跡や3次元センシングなどのコンピュータビジョンの基礎的な問題が存在しており、それらが製品レベルで実装され始めているわけです。

コンピュータビジョンは、我々の存在する3次元なり4次元の世界を2次元の画像列から理解するという、そもそも不良設定な問題を追究しているため、それらの課題の安定した解法を得るにはいろいろと根本的な仮定をおいています。例えば、ライダーと呼ばれる、パルスレーザーを打って帰ってきた時間によって3次元計測を用いる自動運転車は、世界がまばらな3次元点群でできていると思っていますし、物体認識システムにおいても元の画像ではなく、画像の勾配分布しか見ていなかったりします。すなわち、まだまだ簡素化された視覚世界にコンピュータビジョンは住んでいるわけです。

それに比べ、我々の見ている視覚世界はとても豊かです。同じコップでも様々な形、色、質感、材質の物がありますし、実物体表面は紙のような決まった拡散反射をするだけではなく、透き通ったりつやがあったり複雑な光との作用をします。さらには、我々人間自身の動きや見えが非常に複雑で豊かな視覚世界を織りなします。我々の視覚世界を、ただの3次元点群にとどまらず、よりその豊かさを見えるようにすることにより、視覚情報から物や、人や、環境を深く理解できるようにする、それがコンピュータビジョン研究の大きな目標になっているわけです。我々の研究室では、コンピュータビジョンを単純に「見る」技術から人間と同じように、あるいはそれ以上に実世界を視覚情報から知覚できるよう、すなわち「視る」ことができるようにすべく、特に「物を視る」「人を視る」、そして「よりよく見る」の3本の研究の柱を掲げ研究を進めています。

1. 物を視る

私（西野）は、アメリカに15年ほどいたのですが、フィラデルフィアというアメリカ建国の地に13年ほど住んでいました。フィラデルフィアは映画のロッキーが撮影された地として良く知られています。フィラデルフィア美術館の階段のふもとにはロッキーの銅像があって、スタローンが続編を撮影しに来るたびに訪れます。そのロッキーの銅像とスタローンを一緒に撮った写真を想像してみてください。そのような写真を見れば、我々はいともたやすく生身のロッキーとその銅像の区別がつきます。しかし、実際コンピュータビジョンで開発された物体認識のプログラムを使うと、スタローンは人間だと判断さ

図1：左の写真の中の素材を各画素単位で認識した結果が右に示されています。素材を認識することにより、例えば布でできた椅子が木でできた床にある、などとより豊かな情景理解が可能になります。

れるものの、銅像が何かは判別できません。

コンピュータは例えば人の検出をするときなどには，主に形を表す情報、例えば画素値の勾配分布などを見て認識しています。しかし、この銅像を識別するためには、人間の形をしていることがわかるだけでは不十分です。その形を作り上げているその物体の素材、例えば、髪の毛であったり、皮膚であったり服の素材がわかるからこそ、片方が本物の人間でもう一方は銅製のレプリカと判断できるわけです。コンピュータでも素材や素材にまつわる情報を画像から推定可能にできれば、物体認識だけではわからない、特に実世界の中で行動するために絶対不可欠な情報が得られます。例えば、道路が土ではなくてアスファルトで出来ていて、濡れているからすべりやすいとか、床に落ちている、形からは認識できないものが柔らかいタオルであるとか、買ったいちごがくさっているから食べられないとか、形だけでは判断できない、でも触ったり、その上を走ったり、それこそ食べたりと、現実の世界において行動を起こすために必要不可欠な情報が得られます。

素材認識は、非常に難しい問題です。なぜなら、形状を認識すれば済む物体認識とは異なり、それぞれの素材について、その見え方に非常に大きな幅があるからです。同じプラスチックでも、赤いコップにもなれば白いまな板にもなります。そこで、我々は素材をその特性、特に材質に関わる属性の集合として表現し認識することを考えました。例えば、布はふわふわしていて織られているけれど、固くて金属的ではない、というように素材の属性の集合として捉えるわけです。素材自体は大きな見えのクラス内分散があるものの、材質の方が特徴的な見えに現れるため認識しやすく、結果として素材が認識できるというのが狙いです。我々はそのような深層学習モデルを導出し、局所視覚情報から素材を認識しつつ、物体や場所も特定して、それらの大局的情報を組み合わせることによって画素ごとに精確に素材が認識できるようにしました。例えば、図１の左下の画像ですと、ソファは布で、床は木で、壁は石膏で、窓はガラスで出てきていると、正しく認識できます。そうすると、例えばコップはコップでも紙コップだからロボットが持ち上げるときには力加減をするとか、そういったことが見ただけで計画できるようになるわけです。

このように、物の見た目からその物体に関わる有益な情報を視覚からより深く探り出す、「視る」ためのコンピュータビジョンの研究を進めています。

2. 人を視る

我々の視覚世界を構成する様々な物体の中でも、人は特に大きな関心の対象です。その人が誰かを特定したり、どこに行くのかその行動を予測したり、果ては気分が落ち込んでいるのか内面状態を類推したり、我々人間は人の見た目から様々な情報をたやすく読み解きます。コンピュータにもそのような能力を備えることができれば、危険な行動を予知したり、助けの要る人にタインミング良く手を差し伸べたりと、より住みよい社会が実現できます。

図２：友人がピッチングなど繰り返し動作を行っている様子を気軽に少数の複数視点から撮像した映像から、自由な視点で見返せるような３次元モデルを構築できることを示しました。

コンピュータビジョンにおける人に関する研究は、主に監視への応用を中心に黎明期から行われてきました。近年では、特に映像から対象人物の人体形状を３次元復元する研究が盛んに行われています。このような技術はマーカーレスモーションキャプチャとも呼ばれ、復元された３次元人体形状はゲーム、映像制作、スポーツ科学、医療など様々な分野で活用できます。しかし、これまでの研究は多数のカメラを人物の周囲に配置して同時に観測して三角測量を行うことを必要としていました。そのため、非常に高価で大規模な装置を導入する必要がありました。

一方でわれわれ人間は、ある一つの方向から人を見るだけで、ボールを投げる、といった動作を３次元的に、その腕の振りの軌跡などの動作だけではなく、行動主体の人体表面形状や骨格まで把握できます。このように非常に少数の視点から人を見るだけでその人体形状を３次元復元する方法をコンピュータで実行可能なアルゴリズムとして実現できないか考えました。人間がこのようなことができるのは、「同じような運動を見たことがある」ことが主な理由だと考えられますが、まずこれを「同じような運動を別の方向からも見たことがある」と読み替えます。すると同じような動作をしている被写体を異なる視点から時間を越えて観測、つまり「同じ運動であること」を手がかりとして、過去の観測と現在の観測の間で時間的同期を取り、さらに観測視点の相対的な位置関係を推定できれば、従来手法で必要としていた「多数の相異なる視点から被写体を同時に観測して三角測量する」という条件を擬似的に満たすことができると考えました。

同じ運動、つまり繰り返し動作を別の視点から別の時刻で観測したとして、どのようにすれば時間的な同期と空間的な相対位置関係を知ることができるでしょうか。その鍵は被写体が人間であると知っていることにあります。人物を撮影しているのであれば、たとえ撮影時刻や撮影視点が異なっていたとしても、右肘同士、左膝同士など、同じ人体部位同士を任意の画像間で対応付けることができます。視点から撮影したのであれば、部位間の対応関係から三角測量によって各部位の３次元位置を得ることができます。すなわち繰り返し動作をしている人物を撮影しているということさえ仮定できれば、カメラの撮影時刻、撮影位置、そして被写体の３次元形状および運動の全てにおいて辻褄が合う解釈を同時に推定することができます。すると、図２に示すように、たったの４つの異なる視点から友人が投球動作を繰り返している様子をスマートフォンで撮像するだけで、その友人の３次元形状を復元し、自由な視点から見ることができるようになります。

このように人を視る研究例として、人を見ているという事実を利用して、簡便に撮像された映像からより人間に近い３次元的理解が実現できることを示しました。

3. より良く視る

コンピュータにとっての目は，人間の目と同じでしょうか？コンピュータの目がカメラであると考えると、その目は人間のように２つとは限りませんし、可視光だけでなく赤外線や紫外線も撮像できます。コンピュータの目は人間の体の構造などの制約は受けないので、人間とは異なる見方や人間に見えないものまでも見ることができます。さらに，単一の画像情報に限られることなく、計算処理によって多くの画像を組み合わせることでより豊かな視覚情報を得ることができます。例えばデジタルカメラはある時間だけ光を露光して写真を撮影しますが､表現できる明るさ（ダイナミックレンジ）が有限であるため、写真の暗い部分が黒くつぶれたり、またライトのような明るい部分が白く飛んでしまったりします。そこで露光時間を変化させながら複数枚撮って後から組み合わせることにより、明暗の差が大きいシーンでも広い範囲の明るさの情報を取得できるHDR撮影も実現できます。このように、人間の視覚の枠を超えた情報の取得と処理により、人間と同じように、さらには人間でさえ見えなかったものも視えるようにする研究も盛んに行われています。

人間とは異なる見方によって今まで見えなかったものが視えるようになる例は、身近なところにも存在しています。京都の金閣寺で水面に映る金閣寺の写真を撮ったこと、あるいは見たことはありませんか？水面に建物が反射されて見えるとき、人間にとっては逆さまの像が同時に見えているだけです。なぜこのように見えるかというと、水面が鏡となっているからです。ということは、みなさんも学校で学習した通り、この鏡となっている水面の下から仮想的にもう１つの視点を持ってその建物を見ていることになります。つまり、ちょうど我々が両目を使って一つの物を見たときに、各物体表面点の視差から三角測量によって３次元で見ることができるように、水面反射では上下で２視点の視差が生じる両眼視になっているわけです。さらに、水面反射はフレネル反射と呼ばれる、光の入射角によって反射強度が変化するものであり、水面反射像は実像とは異なった明るさで撮像されます。したがって、同じ明るさを異なる露光時間で撮像したのと同じことになり、HDRでその画像を復元できることになります。つまり、水面反射を含めて撮像されたたった一枚の画像からHDRで３次元復元が可能となります。図３のように、平等院のたった一枚の写真から、見栄えの良い3Dモデルができるわけです。

この例のように、我々はコンピュータにとっての視覚として，人間が直感的に視えていなかったものに着目し、見えないものを視えるようにするための研究に取り組んでいます。

4. まとめ

我々の研究室では見るだけではなく「視る」､本当に知覚として見るということにコンピュータビジョンを昇華していきたいと思っています。人を認識したり追跡したりするだけではなく、その一挙手一投足を見ることにより、その人の気分や状態、さらに考えていることややりそうなことを知る。すなわち、その人の行動をその人の内面を映す鏡として人を視る。物体を単に認識したり形状復元したりするのではなく、その素材や材質にとどまらず、重さややわらかさ、壊れやすさや使い勝手など含む様々な属性

図３：京都のお寺など、水面に反射した姿とともに撮像された建築物の一枚の画像（左）から、彩り豊かな３次元モデルを復元できる（右の２枚）ことを示しました。

を視覚として理解する、物を視る。さらには今まで見えなかったもの、人間でも見えないものを視えるようにする。それらを実現することを目指して日夜研究していますので、ご興味がある方はぜひ我々の研究室のホームページ等を見てみてください。

学生の声

オンライン化に思うこと

工学研究科　電気工学専攻　引原研究室　博士後期課程２年　片　山　慎　治

ご承知の通り、新型コロナウイルス（Covid-19）の流行に際し、テレワークやオンライン化が推進されて久しい。どこでも働けるといったメリットと、人に会えないことのデメリットを一通り多くの方が経験されたと思う。

私は人に会うことが苦手な方だ。そもそも、博士課程などという物好きな選択をしたのも、学部時代に接客業のアルバイトをする中で、人、特に面識のない人と会うことで凄まじいストレスを受けることを学び、研究開発職のようななるべく人に会わない仕事でなければ続けられないと思ったのが理由の一つだ。

そんなわけで、私は今回のオンライン化当初、自分はこれから楽に学会発表を済ませられ、就活にしろなんにしろ、人に会うストレスから開放されるものと思っていた。しかし蓋を開けてみればどうか。研究室内の発表もオンラインとなり、部屋に集まっていればもらえたであろう質問がもらえなくなった。一緒にご飯を食べていればできた情報交換がなくなった。学会にしてもそうだ。自分を含め、多くの人は自分が発表するセッションにしか参加しないため、参加人数は非常に少ない。その分得られる指摘の数も少ないし、せっかく出張したのだからと惰性で参加するセッションから得られた刺激を、わざわざ自分で取りに行かなければならなくなった。今はオンライン化の移行中で、慣れていないことによるストレスが多いこと、人に会っていた時期との比較が出来てしまうことを鑑みても、やはり、人に会わないデメリットを感じる場面は多い。もちろん、人に会わずに済むことによるストレスの軽減は少なくないし、出張にかかる時間・準備がなくなること、在宅で研究できる内容や原稿作業を自宅で誰の目も気にせずに進められることは想像以上に楽であった。

これまでの約一年を通じてメリット・デメリットを比較してみると、自分で思っていた以上に、人と会うことを必要としていたことに驚いた。しかし、あらためて流行以前の生活を振り返ると、人に会う必要性に少し納得するところもある。皆さんはオンライン化に何を思われるだろうか。

Study in WISE Program

情報学研究科　通信情報システム専攻　小野寺研究室　博士後期課程２年　徐　　　宏　傑

My name is Hongjie Xu from Onodera Laboratory and my research interest is energy-efficient memory architecture. The hardware architecture optimization is usually not enough to solve the energy issue in deep learning. Therefore, I participate in the WISE Program, Innovation of Advanced Photonic and Electronic Devices since the WISE Program emphasizes that students should have an interdisciplinary and international perspective.

Through the relevant courses of the WISE Program and the help of Shiomi Sensei, I learned a lot about the research progress of other research fields. Learning the latest progress about the emerging memory materials brought me a new research topic, which is to use different kinds of memory materials to design hybrid memory structures to make full use of the advantages of different materials. Therefore, the interdisciplinary vision has effectively promoted my research progress. Following this interdisciplinary mode of thinking, I further combined the research in the memory field with the processing requirements from deep neural network. It further produced several interesting research topics. With the help of Onodera Sensei, I have the honor to cooperate with one relevant research team abroad as Field Practice in WISE Program. By colliding with people with different research backgrounds, interesting research topics have been further produced.

New research and topics are usually produced in the collision of different disciplines and different thinking. The WISE Program provides a suitable “collision” platform. I believe that I will continue to benefit from the thinking mode I learned in the WISE Program.

教室通信

社会を駆動するプラットフォーム学卓越大学院

通信情報システム専攻　原　田　博　司

文部科学省「卓越大学院プログラム」は、「各大学が自身の強みを核に、これまでの大学院改革の成果を生かし、国内外の大学・研究機関・民間企業等と組織的な連携を行いつつ、世界最高水準の教育力・研究力を結集した5年一貫の博士課程学位プログラムを構築することで、あらゆるセクターを牽引する卓越した博士人材を育成するとともに、人材育成・交流及び新たな共同研究の創出が持続的に展開される卓越した拠点を形成する取組を推進する」事業です [1]。

京都大学では、平成30年度に電気系より「先端光・電子デバイス創成学」が採択されました。令和2年度においても公募があり、全国27大学から、工学、情報学のみならず、さまざまな理系、文系分野に関して42件の応募があり、4大学4件が採択されました。京都大学では幸いにして、通信情報系が中心となって提案した「社会を駆動するプラットフォーム学卓越大学院」1件が採択されました。

現在、農業、医療、防災等の各分野において発生する社会リスクを低減するために、社会に遍在する各種情報を通信技術により広範囲に収集し、ビッグデータと呼ばれる大規模データとして情報技術を用いて整理・分析・共有し、その結果を社会にフィードバックするという”プラットフォーム”の整備、利活用が進んでいます。

このプラットフォームは、現状、大消費電力、計算パワーをつかって大規模データを収集、処理しています。しかし、データ生成、収集に関して処理の分散性、安全性、高速性を考えると低消費電力、低コスト化は可能です。このためには情報通信技術を基軸にした情報学の知識が必要です。また深層学習、機械学習が定番化し、ブラックボックスで使用する現状もあります。これも各分野のデータが持つ意味を理解、解釈し、最適化を行うことで、処理量、コストを削減することは可能です。このためには情報学に加え、農業、医療、防災等の情報学外の理系学術の知識が必要です。また、昨今クラウド、通信ネットワークの市場構築において日本の存在感が十分だすことができていないという現状、さらに技術者のみが開発を行い、国際的な視点で標準化、ビジネスができていないという現状があります。日本がプラットフォームの分野で存在感を出すためには、オリジナルの社会的倫理観、公正性等の集団としての意思決定メカニズムをこのプラットフォームに新規実装し、グローバルに展開するために必要となる法律、倫理、政策、データ流通等の知識が必要になります。このためには、情報学＋情報学外理系学術に加え、倫理、法律、公共政策、流通といった文系学術の知識が必要になります。本プログラムでは、プラットフォームを構築する上で必要になる文理融合の学術を「プラットフォーム学」と名付け、この新学術を修める人材を博士課程学位プログラムにより育成します。

具体的には、まず、主専攻領域に関する「中核卓越専門力」を習得するため、各学生が所属する専攻のカリキュラムは尊重しつつ、加えて中核分野を深化可能な副専攻領域に関する「深化専門力」を高めるための情報学、農学、医学、防災の分野からなる講義、演習を提供します。さらにプラットフォーム構築に必要な法、倫理、流通等の文系学術を加えた文理融合力を涵養する講義、演習を提供します。そして、これらのインプットと研究成果をもとにプラットフォームを自ら構築できる「構築力」、プロジェクトを推進、管理し、成果を運用、国際展開する「推進力」、成果の標準化、社会実装等、持続的に発展させる「持続力」を育成するために、複数分野教員の指導、研究グラント、リサーチインターンシップ、研究成果マッチングイベント、国際シンポジウム等の環境を提供します。また、最新の実通信環境、各種実ビッグデータも利活用できる環境も提供します。この環境は情報学研究科、農学研究科、医学研究科、公共政策大学院、防災研究所を中心に京都大学内外41の産学官機関が連携して提供されますが、さらに多くの産学官の皆様のご参加が必要になります。本卓越大学院プログラムへのご支援、御鞭撻を賜れますようよろしくお願い申し上げます。

詳細は本卓越大学院 HP（https://www.platforms.ceppings.kyoto-u.ac.jp/）をご覧下さい。

[1] https://www.jsps.go.jp/j-takuetsu-pro/

賛助会員の声

世界最小の MEMS タイミングデバイス開発と、産学連携について

株式会社村田製作所　梅　田　圭　一

1. はじめに

私は京都大学工学研究科電子物性工学専攻の修士課程を卒業し、2002 年に村田製作所に入社しました。入社以来、村田製作所の薄膜微細加工技術を用いた様々な電子部品開発に携わっています。本稿では特に村田製作所の電子部品開発と産学連携事例のイメージをつかんでもらえるように、2019 年に量産を開始した世界最小の 32.768kHz MEMS タイミングデバイスの開発を紹介します。

2. 村田製作所について

村田製作所は、1944 年に創業し、本年で 76 周年となります。創業者の村田昭は家業である清水焼の窯業技術を基に陶磁器の新しい可能性を追求し、1949 年には京都大学の田中哲郎先生にご指導いただき、産学連携の取り組みの中で、チタン酸バリウム磁器コンデンサの量産に成功し、現在の成長につながっています。現在では総合電子部品メーカーとして、積層セラミックコンデンサ、SAW フィルタ、ショックセンサ、Wi-Fi® モジュール、セラミック発振子といった多くの世界シェア No.1 の製品があります（図 1）。

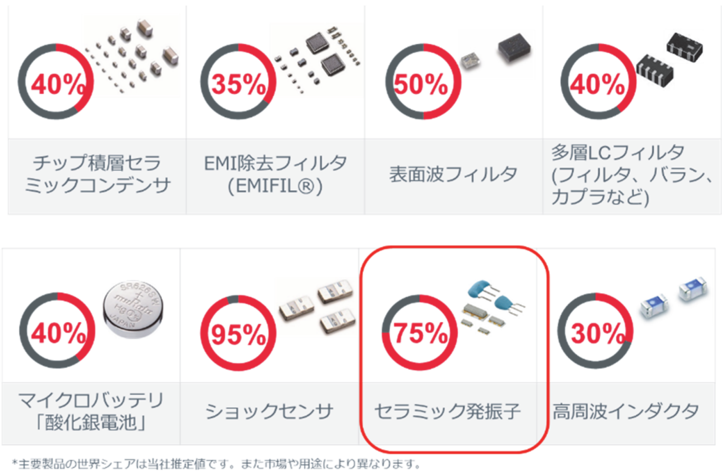


図 1：電子部品における村田製作所の世界シェア

3. タイミングデバイス

世の中にある様々な電子機器では必ずいくつもの電子回路が働いています。それらが正常に機能するには、一定間隔で安定した周期のクロック信号が必要です。電子回路は、このクロック信号を基準に作動し、この基準となるクロック信号を発生させているのがタイミングデバイスです。

村田製作所はタイミングデバイスとして、マイコン等の基準クロックとして使用するセラミック発振子（セラロック ®）を 40 年以上にわたって市場に供給しています。セラミック発振子の周波数精度を

超える高精度なクロックが必要な機器に対応するため、独自技術を生かした小型・高信頼性な水晶振動子を東京電波株式会社（現：岩手村田製作所）と共同開発しました。2009 年より民生市場に供給を開始し、2013 年には自動車市場に展開しています。詳細は当社 HP に特集記事があるのでご覧ください。（URL：https://corporate.murata.com/ja-jp/about/newsroom/techmag/metamorphosis19）

さらなる小型・高精度・高信頼性を実現するタイミングデバイスを開発するため、2012 年に M&A したフィンランドの VTI Technologies Oy（現：Murata Electronics Oy）の MEMS 技術を活用し、MEMS タイミングデバイスを開発し、2019 年に量産開始しました（図 2）。

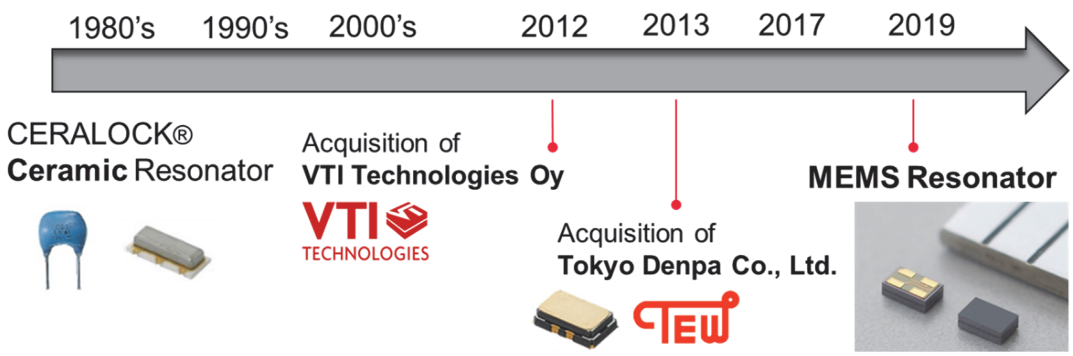


図 2：村田製作所におけるタイミングデバイスの歴史

4. MEMS タイミングデバイス

VTI 社は静電駆動型の車載向け加速度センサやジャイロセンサの技術に優れていました。静電 MEMS センサは Si からなる MEMS 素子とそれを駆動しセンサ信号を検出制御する専用の半導体回路からなる電子部品です。一方、タイミングデバイス市場で長年用いられている水晶振動子は完全にパッシブな受動部品のため、静電 MEMS 技術では水晶振動子との置き換えができず、さらに消費電力が大きくなる課題がありました。

そこで我々は完全にパッシブな MEMS 振動子を実現するため、当時は世界でも実用化例の少ない圧電薄膜と MEMS 技術を組み合わせた圧電 MEMS 技術を用いる選択をしました。図 3 に示すように、4 本の Si と圧電薄膜で構成された梁を備え、内側 2 本と外側 2 本が逆位相で共振することで振動閉じ込めが実現する面外屈曲振動を用いています。

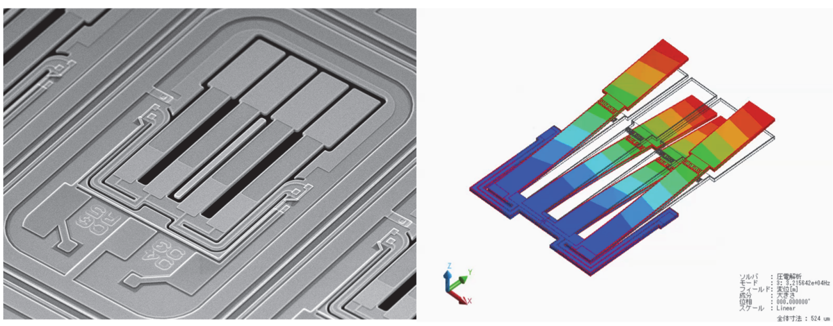


図 3：MEMS タイミングデバイスの SEM 写真と Femtet® による振動変位図
（V. Kaajakari et al., “A 32.768 kHz MEMS resonator with +/-20 ppm tolerance in 0.9 mm x 0.6 mm chip scale package”, IEEE IFCS -EFTF, pp. 1-4, 2019）

本開発でのブレークスルーとなった技術は、周波数温度特性補正技術と周波数調整技術です。Si は水晶とは異なり、-30ppm/℃という非常に大きな周波数温度係数を持つ材料で、これでは電子機器の発熱や外部環境の温度変化によってクロック信号が大きくずれてしまいます。我々は VTT フィンランド技術研究センターや京都大学との共同研究で、図 4 に示すように周波数温度特性を水晶同等以上に良好にする技術を開発しました。また、周波数調整技術は村田製作所の代表製品である SAW フィルタで蓄積してきた生産設備技術を活用し、周波数精度± 20ppm を実現する技術を開発しました。これらの技術的なブレークスルーにより、世界最小の MEMS タイミングデバイスを実現することができました。

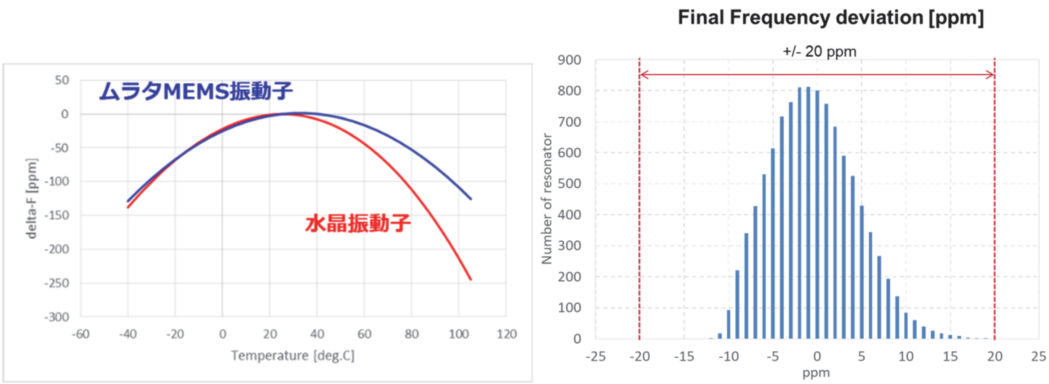


図 4：周波数温度特性（左）と周波数調整プロセスを行った後の周波数分布（右）

5. 京都大学との産学連携

MEMS タイミングデバイスの商品化までに、京都大学とは多くの産学連携を行い、大変お世話になりました。マイクロエンジニアリング専攻田畑研究室（現：ナノ・マイクロシステム工学研究室）との共同研究、京都大学ナノテクノロジーハブ拠点ではマイクロシステム　アナライザや真空プローバの利用等と多数あり、改めて御礼申し上げます。

6. 学生や教員の皆様へ

村田製作所は同業他社と差異化した独自の製品を作ることを共通の価値観として大切にしています。新規事業や新商品を作って世界を驚かしてやろうという方と一緒に仕事ができることを楽しみにしています。就職を検討される際は、インターンシップ制度を設けているので、職場の雰囲気や魅力を体験して下さい。

我々は常に新しい種となる技術を探索しています。京都大学との創業時からのイノベーションを生み出す関係を今後とも発展させ、世界が驚く製品開発を一緒に実現しましょう。

編集後記

この編集後記を執筆している時点では、海外でワクチン接種が始まっているものの、国内では、残念ながらまだコロナウィルス収束の見通しが立っていない状況です。

2020年は激動の一年でしたが、私達の生活基盤が高度に発達した情報ネットワークに深く依存していることを痛感した年でもありました。オンライン授業も在宅勤務も、高速なインターネット接続環境の普及なしでは成り立ちません。

とはいえ、私の自宅のインターネット接続はいまだにADSLということで、回線速度に不安があり、自宅からオンライン授業をする際には4Gのモバイルルータで接続していました。ADSLのサービス終了が近づいてきたため、ようやく重い腰を上げて光回線に乗り換えることにしたのですが、無線通信だけ契約しておけば十分では、と最後まで悩みました。

今号の「産業界の技術動向」では、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の谷口様に「第5世代無線通信普及に向けた課題と取組み」と題しまして、5Gの技術動向について執筆いただきました。5Gの最高伝送速度は20 Gbpsとのことで、近い将来、各家庭において無線通信が有線通信に置き換わる時代が本格的に到来するのかもしれません。

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

［S. T. 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３年３月

編　　　集：電気系 cue 編集委員会
大木　英司、白井　康之、藤田　静雄、
山本　衛、田中　俊二、デゾイサ メーナカ
村田　英一、荒木　光彦（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

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

印刷・製本：株式会社　田中プリント