



京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.41

MARCH 2019

[第41号]

..... 卷頭言

尾上 誠蔵

..... 大学の研究・動向

高速性、信頼性、柔軟性を
兼ね備えたネットワークの実現に向けて
情報学研究科 通信情報システム専攻
通信システム工学講座 知的通信網分野

..... 産業界の技術動向

経済産業研究所
岩本 晃一

新設研究室紹介

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

編集後記

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

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

Cue 41 号 目次

巻頭言

移動通信のデータ速度はどこまであがるか？（パート 4）

…………… 昭和 55 年卒 ドコモ・テクノロジー株式会社 代表取締役社長 尾上 誠蔵…………… 1

大学の研究・動向

高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えたネットワークの実現に向けて

……………情報学研究科 通信情報システム専攻 通信システム工学講座 知的通信網分野…………… 4

産業界の技術動向

人工知能（AI）等と「雇用の未来」「人材育成・働き方」

……………経済産業研究所 日本生産性本部 岩本 晃一…………… 10

新設研究室紹介…………… 21

研究室紹介…………… 23

博士論文概要…………… 40

高校生のページ

ナノの世界を可視化する ―ナノデバイスから生体分子へと展開する可視化技術―

工学研究科 電子工学専攻 電子材料物性講座 電子材料物性工学分野

……………小林 圭、山田 啓文…………… 53

学生の声

参萬円のウイスキー

……………情報学研究科 通信情報システム専攻 守倉研究室 博士後期課程 2 年 神矢 翔太郎…………… 58

なぜその研究をするのか

……………工学研究科 電気工学専攻 引原研究室 博士後期課程 1 年 萬成 遥子…………… 58

教室通信

エレクトロニクス・サマーキャンプ実施状況

……………サマーキャンプ運営委員会：松尾哲司、中西俊博、木村真之、廣本正之、奥田貴史…………… 59

編集後記…………… 60

巻頭言

移動通信のデータ速度はどこまで上がるか？（パート 4）

昭和 55 年卒 ドコモ・テクノロジー株式会社 代表取締役社長 尾 上 誠 蔵



標記タイトルの（パート 4）は、2010 年に信学会通信ソサイエティマガジン*の巻末言に同タイトル（パート 3）を書いた、その続編という意味である。

*2010 巻 14 号 https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2010/14/2010_14_14_79/_article/-char/ja

このタイトルは 2004 年のドコモテクニカルジャーナル（Vol.12, No.2）の巻頭言で始まった。2004 年当時は 3G（第 3 世代）サービス開始後 3 年で、4G（第 4 世代）に向けたアクションを始めた時期であったが、実際に提供していたデータ速度は未だ 384kbps だった。2Mbps を謳った 3G であったが 2Mbps を超えるのはピーク速度 3.6Mbps の HSDPA 導入の 2006 年を待たねばならなかった。

パート 3 を書いた 2010 年はいわゆる 4G の LTE が始まった年で 75Mbps のデータ速度が提供された。それが 2018 年にピーク速度が 988Mbps になり、2019 年には 1.288Gbps を予定という勢いで伸びてきた。5G（第 5 世代）は 20Gbps を目標としている。

2004 年の巻頭言では「1T（テラ）bps もいつかは達成される日が来るかもしれない。」と書いたが、2010 年のパート 3 で正直に「1Tbps の話は無茶な話でそんなの原理的に不可能という意見をもらってと思って書いたが今のところそういう意見はもらっていない。」と吐露した。15 年が経過し、これまでは想定通りかそれ以上にデータ速度が伸び続けてきた。このペースで進めば後 15 年程経った 2030 年代には 1Tbps に達する勢いである、が未だに確信は持てない。

ここで一旦関連の話題の 5G の話に移る。

今、5G が盛り上がっている。複雑な政治、経済問題の事案もあってテレビのニュース解説で 5G の言葉が毎日のように出てくる。実態を理解しているとかなり違和感はあるが、とにかく世間でも注目も浴びている。5G は、超高速大容量データ通信だけでなく、超高信頼低遅延や膨大な接続数の特徴があり、自動運転や遠隔医療等、世の中を一変する素晴らしい技術として描かれる。開発に携わる者、関わる者にとっては単なる夢物語でなく現実的なソリューションに仕上げるのに大きなプレッシャーになるが、その一方でこの盛り上がりは、業界を超えた協業を通じて新たなビジネス機会を産み出すと期待が広がっている。

過去の世代の観察から世代に関する法則を見つけたと、色々な講演機会に発表してきた。

第 1 法則は、次世代直前に前世代が盛り上がる法則である。

3G の W-CDMA が導入される直前には 2G の GSM の進化版である EDGE が盛り上がり、W-CDMA は普及しないというような言い方もされた。4G の LTE は 2008 年頃には注目を浴びていたが、2009 年になると W-CDMA が進化した HSPA の更に進化版の HSPA + が再浮上し、LTE は少数派になるとも言われた。このころ LTE 推進派の私としては、HSPA + の標準化を止めたかったが止められなかった。ついに 8 つの HSPA キャリアを束ねる規格まで出来てしまったが、案の定、誰も使わない標準で終わった。

この法則を 5G に適用すると、2018 年、5G は盛り上がっているが、2019 年には LTE の進化版が再浮上するはずである。しかし、5G は状況が少し違う。世界的には 2019 年は 5G 本格導入開始の年になりそう。4G が再浮上する時間的余裕はなさそうである。

第 2 法則は、偶数世代のみ大成功の法則である。

アナログ方式の 1G は各国地域バラバラで、普及も限定的だったのに対し、2G の GSM は日本と韓国以外の世界に普及した史上初の事実上のグローバル標準という意味で大成功であるし、想定以上の需要もあった。3G の普及ペースが遅かったのに対し、4G LTE の普及は極めて速く、想定以上の需要もあったという意味で大成功である。つまり偶数世代のみ大成功で、奇数世代はそうでもなかったというのが過去の世代で起きたことである。

これを適用すると 5G は大成功にはならないということになる。失敗とは言っていない、と言ってもネガティブなメッセージに受け取られたが、最近は、ポジティブなメッセージを発信している。法則に反して 5G を大成功に持ち上げる何かがあるはずである。それは業界を超えたコラボである。業界を超えたコラボを通して 5G を大成功に導こう、と言っている。実際、5G の盛り上がりにより業界を超えた協業の機会は増えており、第 2 法則を破ることもありうる状況である。

第 3 法則は、次世代サービスは次世代ローンチ後に出現する法則である。

次世代方式の標準化の初期段階ではいつも次世代の必要性に対する疑問が呈される。90 年代後半、3G 標準化の初期段階で 2Mbps が本当に必要なのか？いったい何に使うのか？というのがよくある質問で、私も何度も訊かれた。今日では 2Mbps は決して高速ではない。次世代ネットワークがローンチすると想定していなかったサービスが出現し普及する。逆に、実際に出現して人気が出るサービスは、予期していたものとはしばしば異なる。例えば、3G の時、テレビ電話は期待されたサービスであった。開発者としては初めて遠くと携帯テレビ電話で通話相手が見えた時は感動を覚えた。しかし、実際に普及したのは他の動画サービスであった。

4G LTE の時も、100Mbps は必要か？何に使うのか？という疑問で始まったが、今日、多くのユーザーがそのデータ速度の恩恵を享受している。

さて、ここで標記の命題からの議論で、1Tbps が 2030 年代に実現するかの話に戻る。

技術的にはかなり無理がある。その実現には、膨大な周波数帯域幅の利用と技術的ブレークスルー、かなりの力業を要する。何よりもその技術開発のためのリソース投入が必要である。1Tbps の必要性が明確でないとなかなかリソースを投入できない。開発リソースの投入がどこまで続くかが勝負になるであろう。リソース投入の正当性の説明は 3G、4G と今までの世代で必ずしも明確であったわけではないので方法はあるかもしれないが限界が近づくと投資効率が落ちて難易度は格段に上がると言わざるを得ない。

明確な結論ではないが、パート 4 にして初めて結論めいたことを書いたところで終わりたいが、5G の続きの話がある。

過去の世代の観測から法則を定義して、将来を予測しようとしたのであるが、5G では過去の世代にないことが起こりそうである。既に標準化の前倒しという最も起こりそうにないことが起きた。最近、第 1 法則は 5G では起きそうにない状況が見えてきた。第 2 法則は、法則を破るための方法があることを述べた。それは業界を超えたコラボであるが、その活動を通して 5G 開始前にサービス、ユースケースを開発しようという努力、つまり第 3 法則を破ろうという多くの努力が世界中で見られる。

そのヒントとして、凡俗第 3 法則 (The 3rd law of triviality) がある。これは、世代を代表するサービス・製品はその前の世代で誕生の法則である。日本では、i モードなどモバイルインターネットは 3G、スマートフォンは 4G というように理解されがちであるが、些細に見ると i モードは 2G で始まり、スマートフォンも 3G、グローバルには 2G から始まり、普及して代表的になる前の世代

に生まれ存在していた。つまり、5Gで普及するものは既に今日存在している。それを見つけ育てるだけで5Gサービスになるというヒントである。

大学の研究・動向

高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えた ネットワークの実現に向けて

情報学研究科 通信情報システム専攻 通信システム工学講座 知的通信網分野

教授 大 木 英 司
准教授 新 熊 亮 一
助教 佐 藤 丈 博

1. はじめに

昨今のIoT（Internet of Things）、ビッグデータ、AI（Artificial Intelligence, 人工知能）時代において、高度なネットワーク技術の必要性がますます高まっています。大木研究室は、データを収集する役割を担うスマートフォンやIoTデバイス（ドローンや、自動車、ウェアラブルデバイスも含む）、データを蓄積するデータセンター、そしてデータを計算処理し人々に価値をもたらすクラウドや様々なアプリケーションを相互接続するとともに、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ます。理論から実装まで幅広いアプローチで取り組んでいます。本稿では、当研究室における代表的な研究トピックについて紹介します。

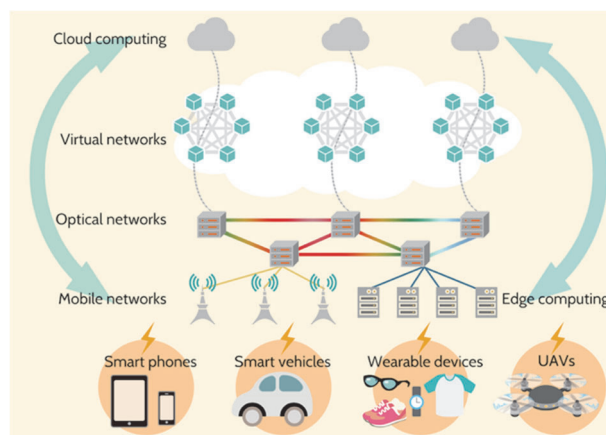


図1 大木研究室のビジョン

2. 研究トピック (1)：光ネットワーク制御技術

光ネットワークでは、光ファイバーケーブル内を流れる波長スペクトル資源を有効に利用してサービスを提供することが求められています。現在主流の波長多重ネットワークでは、実際の伝送容量に関わらず光パスに波長スペクトルを固定的に割り当てます。そのため、異なる伝送容量を要求する光パスが混在した場合、波長スペクトル資源を有効的に利用できません。波長スペクトル資源の利用効率を向上するために、伝送容量、伝送距離、及び、伝送速度に応じて適切な変調方式を選択可能な、弾力性のあるスペクトルを用いる光ネットワーク（EON: Elastic Optical Network）の研究開発が行われています[1]。

EONでは、光パスの要求伝送容量に応じて、適切な数の連続したサブキャリアスロットを割り当てます。割り当てスロット数には柔軟性がありますが、光パスの設定・解除を繰り返し行うことにより、利用可能な波長スペクトル資源が未整列・非連続な状態となる問題があります。これを波長スペクトルの断片化（フラグメンテーション）と呼びます。フラグメンテーションは、使用可能なスロット（空スロット）が光パスの経路に沿って整列されていない（未整列）状態、または、空スロットがスペクトル領域において連続していない（非連続）状態のことを意味します。フラグメンテーションにより、要求

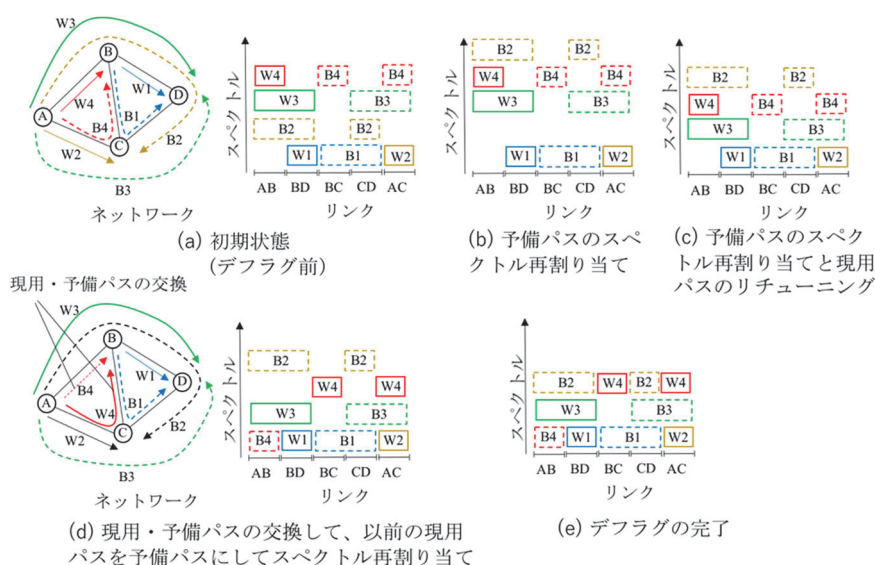


図2 光ネットワークにおけるスペクトルのデフラグメンテーション

される伝送容量の光パスを収容できなくなり、スペクトル資源を有効的に利用できないという問題が生じます。

我々は、波長スペクトルのフラグメンテーションの問題を克服し、波長スペクトル資源を有効利用する光ネットワーク制御の基盤技術の確立を目指しています。光ネットワーク上で運用中の光パスのスペクトルを変更して、フラグメンテーションを改善することをデフラグメンテーション（以下、デフラグ）と呼びます。サービスを瞬断することなく、運用中の光パスのスペクトルを連続的に移動する（リチューニング）技術を用いて、無瞬断でデフラグを進めることができます。しかし、他の光パスのスペクトルがリチューニングの進行を妨げ、無瞬断によるデフラグの性能が低下する問題があります。

我々は、1+1 プロテクションの光パスを設定する EON において、波長スペクトル資源を有効利用するための無瞬断デフラグ方式を開発しました。図2にデフラグ方式の概略を示します。現用パスと予備パスを交換し、現用パスで通信を継続しながら、予備パスのスペクトルおよび経路の不連続的な変更を許容する無瞬断デフラグ方式の基本概念を提案しました [2]。これにより、予備パスに対しては、他の光パスのスペクトルを飛び超えて所望のスペクトルに割り当てることができ、スペクトル変更の制約条件が緩和されます。現在は、このデフラグ方式の概念をさらに発展させ、光パスの経路制御も考慮したデフラグ方式の開発に取り組んでいます [3]。

3. 研究トピック (2) : IoT (Internet of Things) に関する研究

元来、携帯電話網やインターネットに代表される通信ネットワークは、通話やメールの送受信、SNS (Social Networking Service) といった人と人との間のコミュニケーションに用いられてきました。しかしながら、昨今、人と人との間に限らず、あらゆる物と物とが通信ネットワークにより相互接続され、情報提供や情報共有を行うという概念である IoT (Internet of Things) が提唱されています [4]。IoT の市場規模は 2015 年で 590 億ドルと報告されており、2020 年には 2500 億ドルに成長すると予想されています。具体的な産業応用領域は運輸、交通、医療、防犯、防災、環境など多岐にわたっており、今後の発展が期待されています。IoT のエンドノードとしては、周囲の状況をセンシングしその情報をデータとして生成するセンサデバイスが大部分を占めています。センサデバイスには、農場センサや、医療センサ、防犯カメラといった特定のアプリケーションに特化したものから、自動車やスマートフォンと

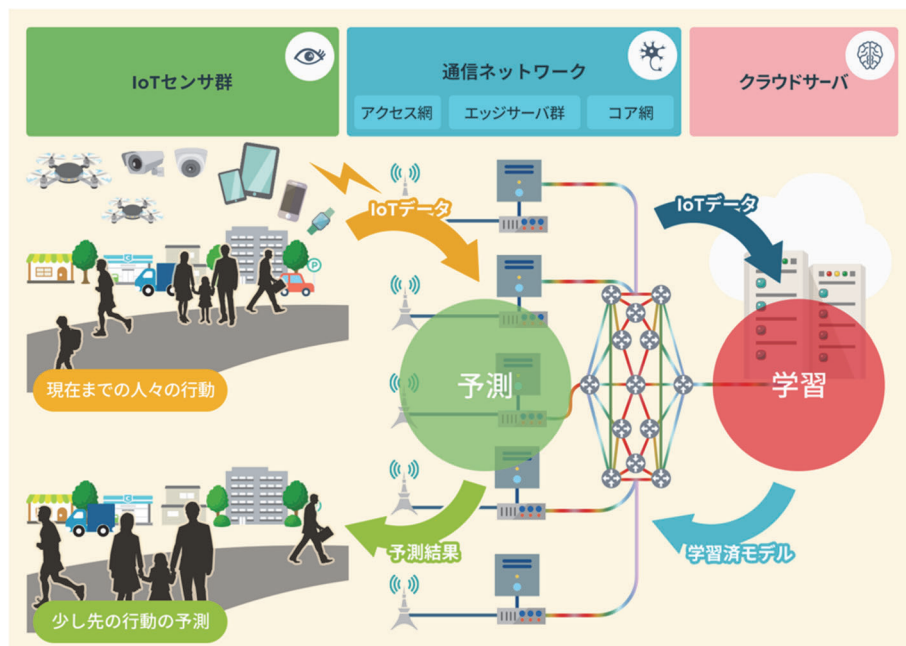


図3 ネットワーク AI システム（データを取得するIoT センサ群、流通させる通信ネットワーク、分析するクラウドサーバで構成される。クラウドサーバではIoT データを用いて学習が行われ、通信ネットワークのエッジサーバ群が学習済みモデルを用いて予測を行う。）

いった複数種のセンサを具備するものまでがあり得ます。センサデバイスによって収集されたデータは、上り通信によりクラウドやエッジといった計算サーバにアップロードされ、整形や分析が行われます。整形や分析後の情報は下り通信により提供されますが、提供先が人である場合と再びマシンやデバイスである場合があります。前者の例として交通状況に関する情報をリアルタイムに配信するサービスがあり、後者の例として交通状況に応じた信号機の自動制御や自動運転車が挙げられます。Gartner の調査によると、IoT のエンドノードは 2017 年に 84 億台に達しており、2020 年までに 204 億台に達すると予想されています。以上のように、主たるエンドノードがセンサデバイスである点やその台数の多さの点で、IoT のトラヒックは人が発生させるトラヒックと大きく異なります。

以上の IoT の潮流に鑑み、当研究室では、IoT に関わる以下の研究に取り組んでいます。

IoT トラヒックの制御：上述のような多数の IoT デバイスが接続している基地局に同時に通信要求を送信すると、互いに競合するため、通信ネットワークにおいて輻輳が生じてしまいます。そこで、当研究室は、車載センサーなど移動する IoT デバイスを対象とした通信タイミングの制御方式を提案しました [5]。移動する IoT デバイスを想定すると、通信要求を遅らせることで、そのデバイスが隣接する通信エリアに移動するため、時間的な負荷低減だけでなく空間的な負荷分散も効果として期待できます。本研究では、比較評価の結果から、提案方式により種々の IoT アプリケーションの遅延要求を達成することができることを示しました。

ネットワーク AI システム：IoT デバイスにより収集された実空間情報に関するデータから、交通量などを予測しリアルタイムに配信するサービスに対する需要が高まっています。こういった実空間に関する予測情報には、鮮度と正確さが求められますが、リアルタイム性を保証しようとする、両方を達成することは困難です。鮮度を保証しようとする、通信帯域の厳しい制限と計算処理のオーバーヘッドのため、一部のデータしか取得することができないためです。そこで、当研究室は、図 4 に示されるネットワーク AI（Artificial Intelligence）システムを提案しています [6,7,8]。本システムは、IoT デバイス群が収集するデータを「目利き」し、より重要度の高いデータほど通信ネットワークにおいてより高い

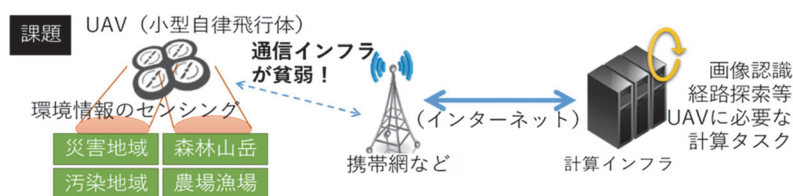


図4 UAVによる環境情報センシングシステム
(災害地域などでは利用可能な通信・計算リソースが厳しく制限される。)

優先度で転送され、エッジサーバで処理されて予測に用いられます。このシステムにより、取得するデータの量が限られていても、重要度の高いデータを用いて予測を行うことができ、高い精度を達成することができます。本研究では実データセットを用いた評価を行い、その有効性を示しました。

環境情報センシング：小型のUAV（Unmanned Aerial Vehicle: 通称ドローン）が災害地域、森林山岳、汚染地域、農場漁場といった人や車両が立ち入るのに困難な地域における様々な問題を解決する手段として注目を集めています。UAVも各種センサを装備させることができることから、移動するIoTデバイスと見なされます。しかしながら、図5に示すように、UAVの計算性能は低く、また、上記のような地域では通信インフラの使用が限定されるため、エッジサーバやクラウドサーバの計算リソースも有効に利用する必要があります。そこで、当研究室は、複数のUAVの移動と環境情報データ取得をスケジューリングし、限られた通信インフラと計算リソースを時間的に高効率に利用することで、例えば、災害発生時の被災者の搜索効率を向上することができるシステムを提案しています[9]。本研究では、計算機シミュレーションにより、ユーザ視点での複数の評価指標を用いて、その有効性を示しました。

4. 研究トピック (3)：ネットワークのソフトウェア化／仮想化

近年、計算機資源やストレージ等のハードウェア仮想化技術に加えて、ネットワーク機器およびネットワーク上で提供される機能の仮想化技術が発展しています。ルータやスイッチ等といったネットワーク機器の制御機能を共通のコントローラに集約し、統合的に制御可能とすることで、論理的なネットワークを柔軟に構成し運用することが可能となります。これをSoftware Defined Networking (SDN) と呼びます。また、ネットワーク上で提供される機能をソフトウェア化し汎用サーバ上で提供することで、迅速なサービス提供や柔軟な性能調整、専用機器の設置コストの削減等が可能となります。これをNetwork Function Virtualization (NFV) と呼びます[10]。我々は、これらのネットワーク仮想化技術に関して、ネットワーク利用効率向上、マルチサービス対応、低消費電力化、高信頼化等を実現する手法を研究しています[11][12]。

一例として、SDN およびNFVを適用したネットワーク環境におけるサービスチェイニングの研究[11]について紹介します。サービスチェイニングとは、ファイアウォール、セキュリティ、動画最適化等の仮想化されたネットワーク機能(VNF: Virtualized Network Function)を

ネットワーク上で組み合わせ、ユーザ毎にカスタマイズされたサービスを提供する技術です。図5にサービスチェイニングのイメージを示します。サービスチェイニングを提供するためには、ネットワーク上の計算機資源（汎用サーバ等）へのVNFの

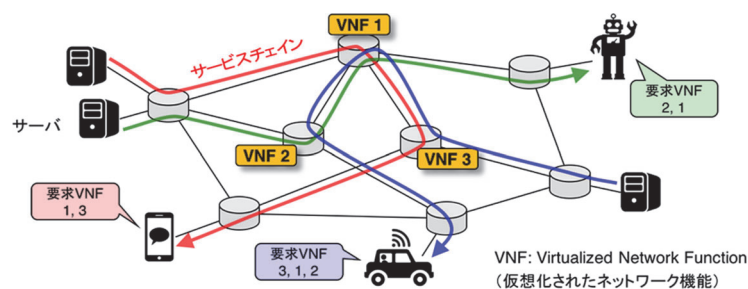


図5 サービスチェイニング

配置、および配置した VNF のうち必要なものを通過するようなデータフローの経路設定を行う必要があります。提供するサービスによって、必要な VNF の種類や伝送容量、遅延時間等の条件が異なります。したがって、これらの条件を満足しながら、計算機資源およびネットワーク資源を効率的に利用できるようなサービスチェーンの設計が求められます。

サービスチェイニングでは基本的に VNF を指定された順番に通過する必要がありますが、ファイアウォール等の一部の VNF は、通過順序を変更してもサービスの性能に大きく影響を与えないとされています。また、サービスチェーンの経路上で折り返しやループの生成を許容することにより、VNF の配置における柔軟性が増し、複数のユーザによる VNF の共有が行われやすくなります。そこで[11]では、VNF の順序制約およびサービスチェーンの経路制約の緩和を行うことにより、計算機資源やネットワーク資源の利用効率を向上させる経路および VNF 配置の計算モデルの検討を行っています。ネットワークの規模やユーザ数の増加に応じて、最適化問題を解くために要する計算時間が爆発的に大きくなるため、実用的時間内で効率的に実行可能解を探索するアルゴリズムを検討しています。本研究により、サービスチェイニングを高い資源利用効率で運用し、トラフィック制御やコンテンツ配信等といったカスタマイズされたサービスを、より多数のユーザへ提供することを目指しています。

5. むすび

本稿では、当研究室で取り組んでいる代表的な研究トピックとして、(1) 光ネットワーク制御技術、(2) IoT に関する研究、(3) ネットワークのソフトウェア化 / 仮想化について紹介しました。2020 年の東京オリンピックに向けて実用化が進められている 5G ネットワークでは、通信の高速性や多数同時接続性、超低遅延性等といった特性が要求されています。さらには、自然災害によるネットワーク機器の故障や、増え続けるネットワーク機器の消費電力等といった問題にも対処しなければなりません。このような要求を達成するためには、有線・無線通信における伝送方式、ネットワーク制御、データセンター、デバイス、アプリケーション等、様々な要素技術が高度に連携する必要があります。我々は今後も、5G やその先の通信インフラの発展を見据え、研究に取り組んでいきます。

参考文献

- [1] E. Oki and B.C. Chatterjee, "Design and Control in Elastic Optical Networks: Issues, Challenges, and Research Directions," International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) 2017, Jan. 2017.
- [2] S. Ba, B.C. Chatterjee, and E. Oki, "Defragmentation Scheme Based on Exchanging Primary and Backup Paths in 1+1 Path Protected Elastic Optical Networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 25, no. 3, pp. 1717-1731, Jun. 2017.
- [3] T. Sawa, F. He, T. Sato, B.C. Chatterjee, and E. Oki, "Defragmentation Using Reroutable Backup Paths in Toggled 1+1 Path Protected Elastic Optical Networks," 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2018), Nov. 2018.
- [4] 新熊亮一, 岩井孝法, 里田浩三, "5G 研究のための IoT トラフィックモデル," 電子情報通信学会和文論文誌 B, vol. J101-B, no. 5, pp. 310-319, May 2018.
- [5] Y. Yamada, R. Shinkuma, T. Iwai, T. Onishi, T. Nobukiyo, K. Satoda, "Temporal Traffic Smoothing for IoT Traffic in Mobile Networks," Elsevier Computer Networks, vol. 146, pp. 115-124, Dec. 2018.
- [6] Y. Yamada, R. Shinkuma, T. Sato, and E. Oki, "Feature-selection based data prioritization in mobile traffic prediction using machine learning," IEEE Global Communications Conference

- (Globecom) 2018, Dec. 2018.
- [7] R. Shinkuma, S. Kato, M. Kanbayashi, Y. Ikeda, R. Kawahara, and T. Hayashi, "System design for predictive road-traffic information delivery using edge-cloud computing," IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) 2018, Jan. 2018.
 - [8] S. Kato and R. Shinkuma, "Priority Control in Communication Networks for Accuracy-Freshness Tradeoff in Realtime Road-Traffic Information Delivery," IEEE Access, vol. 5, pp. 25226-25235, Oct. 2017.
 - [9] K. Miyano, R. Shinkuma, E. Oki, and T. Sato, "Utility Based Scheduling for Multi-UAV Search System in Disaster Scenarios," IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2018), Oct. 2018.
 - [10] M. Veeraraghavan, T. Sato, M. Buchanan, R. Rahimi, S. Okamoto, and N. Yamanaka, "Network Function Virtualization: A Survey," IEICE Transactions on Communications, vol. E100-B, no. 11, pp. 1978-1991, Nov. 2017.
 - [11] N. Hyodo, T. Sato, R. Shinkuma, and E. Oki, "Virtual Network Function Placement Model for Service Chaining to Relax Visit Order and Routing Constraints," IEEE 7th International Conference on Cloud Networking (CloudNet 2018), Oct. 2018.
 - [12] T. Sato and E. Oki, "Program file placement problem for machine-to-machine service network platform," IEICE Transactions on Communications, vol. E102-B, no. 3, pp. 418-428, Mar. 2019.

産業界の技術動向**人工知能（AI）等と「雇用の未来」「人材育成・働き方」**

経済産業研究所 日本生産性本部

岩 本 晃 一

1 はじめに

2013年9月、オックスフォード大学のフレイ&オズボーンは、米国において10～20年以内に労働人口の47%が機械に代替されるリスクが70%以上という推計結果を発表（Frey & Osborne (2013)）し、それを契機として、世界中で「雇用の未来」に関する研究ブームが発生した。研究はめざましいスピードで進み、日々、新しい研究成果が発表された。

だが、日本はそうした研究ブームとはほとんど無縁で、メディアがフレイ&オズボーンの推計結果について、「人工知能が雇用の半分を奪う」という表現を繰り返すのみで、その後の新しい研究成果を取り上げることなく、人々の不安を煽ってきた。「47%という数字は本当か?」という疑問が、筆者が本テーマに取り組み始めた動機である。

人工知能は、人間の雇用を奪うのではないかという国民の危惧は、人工知能の技術開発の足を引っ張ることにつながる。漠然と人工知能に対して不安感を持つのではなく、科学的データや客観的な根拠を示して事実に基づいた科学的で冷静な議論が必要であると考えた。

2 一連の研究結果の要点

筆者による一連の研究から得られる結論の要点を述べると以下の通りである。

- ① 将来、約半分の雇用者が機械に代替されるというフレイ&オズボーンの推計値は現在では、ほとんど誰も相手にしていない。過大な推計値が出るという、ある意味で計算ミスが指摘されたからである。職の全体量の増減についていえば、OECDが発表した、約1割が代替される、という推計値が、専門家の間での合意である。更に、人々の努力で新しい産業を生み出すことができれば、新しい雇用が創出され、その結果、雇用の総量自体は、ほとんど変わらないか、もしくは増加する、というのが世界の専門家間で合意された認識である。このように、雇用の総量の増減自体を見る限りは、さほど大した社会問題を生じないが、今後スキルベースでの労働需給ミスマッチが社会問題として顕在化してくる可能性がある。
- ② 新しく創出される職業は何かと聞かれても明確には答えられない。20年前のスマホが出現する以前、アプリを開発したり、スマホを使ってネット販売をする企業がここまで急増するとはだれも予測していなかった。それと同様である。
- ③ 雇用の総量の増減よりも、もっと重要な点は、オーター（Autor）の分析によって明らかとなった「これまでルーティン業務が機械に代替されてきたが、これからもルーティン業務が機械に代替される」という「雇用の質」「雇用の構造」が変わっていく点である。我々人類は、こうした「雇用の質」「雇用の構造」の変化に対して、早急に対応しなければならない。なぜなら、これまで人間の仕事を代替してきた機械は単純なものであったが、これから出現する機械は、「とても複雑で細かいことができるスマートな機械」「人間の脳のような人工知能」「人間の腕のような非常に細かい運動ができるロボット」だからである。我々は、そうした機械と一緒に働き、共存できるよう、そのために必要なスキルを身に付けなければならない。

- ④ 更にもっと重要な点は、「とても複雑で細かいことができるスマートな機械」「人間の脳のような人工知能」「人間の腕のような非常に細かい運動ができるロボット」が人間の高スキルな「ルーティン業務」まで代替するようになることで、社会の経済格差が拡大することである。中スキルの人々の職が失われ、低スキルの職に落ちていき、低スキルの職の総量はほとんど変わらないのに、労働者の数の方が増えて賃金が上がり雇用が不安定になるという現象が生まれてくると予想されている。筆者は、「AIと雇用」の問題を語る上では、この「経済格差」の問題こそが最も重要で深刻な課題であると認識している。既に米国で起きている社会現象がこれからも日本で起きると予想される。
- ⑤ 日本は、米国やドイツに比べて、IoT、AIなどの導入が遅れている。遅れている要因はいろいろとあるが、遅れているために、企業の競争力が低く、結果、日本企業はこれまでグローバル競争で負け続けてきた。特に電機業界がそうである。いくつかの著名な企業の動向を思い浮かべれば、理解できるだろう。だが、幸いなこと(?)にデジタル化が遅れたために、社会の経済格差は、まだ深刻化していない。
- ⑥ だがそうした日本でも、銀行業界では既に動きが現れている。来春卒業の大学生の就職活動で、メガバンク3社で一般職を合計900人の採用減、みずほフィナンシャルグループは一般職は約7割減、とのことである。またメガバンクは、今後、AI導入を進めることで各社とも数万人規模のリストラをすると発表している。銀行業界は、最近実用化された人工知能「RPA (Robot Process Automation)」を急速に導入を進めており、高スキルのルーティン業務の代替を急いでいる。
- ⑦ 日本のこの事例が示すように、高スキルのルーティン業務が機械に代替されることで、職を失う多くは、男性よりも女性、正規よりも非正規、総合職よりも一般職であるという指摘がいくつかの機関からなされている。現在、米国で生まれている「高学歴ワーキングプア」である。もしそうであるならば、日本でも彼ら彼女らの雇用対策を検討しなければならない。
- ⑧ 日本が米国の後を追って、社会の経済格差が深刻化してくるのは、これからだろう。日本は米国という貴重な前例を参考にして、そのための準備をしておかないといけない。
- ⑨ さいごに、一連の研究のなかで最も大きな貢献をしたのは、米国MITのオーターとドイツZEW研究所のアーントツである。2人の大きな功績を称賛したい。

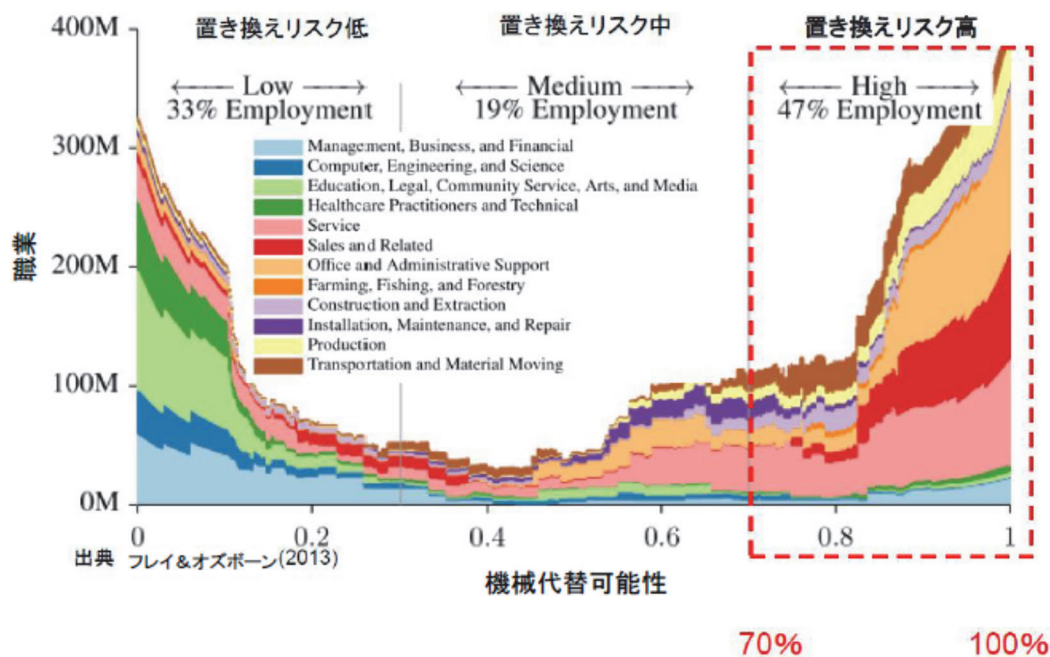
3 フレイ&オズボーンとドイツの「労働 4. 0」プロジェクト

3-1 フレイ&オズボーンの推計値

2013年9月、英国オックスフォード大学の若い2人の研究者カール・ベネディクト・フレイとマイケル・A・オズボーンの2人が共同で執筆した論文「The future of employment ; how susceptible are jobs to computerization」を発表した。論文の内容は、非常に衝撃的で、「米国において10～20年間に労働人口の47%が機械に代替されるリスクが70%以上」という推計結果であった。

「47%という数字は本当か?」と世界中の研究者が疑問を持ち、世界中で一斉に研究がスタートし、次々と論文が発表され、新しい研究結果が次々と公表された。だが、先進国のなかで、唯一といえるほど、日本では、フレイ&オズボーンが2013年に発表した47%という数字が継続的にメディアで取り上げられ、「人工知能が導入されると半分の仕事が奪われる」といった形で表現され続けた。フレイ&オズボーン以降の次々と出てくる新しい研究成果が日本のメディアで取り上げられることはなかった。

フレイ&オズボーンについては、筆者は、世界的な議論のブームの火付け役としての役割は評価しているが、彼らが発表した47%という数字は、世界中で発表された数多くの論文のなかで最も極端な部類に属する。アーントツ (Arntz) も、作業 (タスク) の全てが必ずしも代替可能ではないため、職 (ジョブ) そのものが代替可能とすることを前提に試算したフレイ&オズボーンの試算は過大であると指摘してい



(図 1) 2010 年に米国に存在する全職業の機械代替可能性の分布

注) 米国に存在する 702 の職業を左から順に、機械への代替可能性 0 から始まって、右に向かって代替可能性 100% まで並べる。その各職業ごとに、米国において従事している雇用者数を縦にプロットする。

出典) Frey & Osborne[2013]

る。メラニー・アーンツ (Melanie Arntz) は、ドイツ ZEW 研究所の「労働市場、人的資源、社会性悪政策」部門の NO2 である。

2016 年 10 月、マイケル・オズボーン准教授が来日した際、「どのような意図、いかなる前提で試算したのか」と質問したところ、「技術的な可能性を示しただけ、雇用増の部分は一切考慮していない。」との回答であった。

3-2 ドイツ政府が委託した ZEW 研究所の推計値

「雇用の未来」を、国として最も深刻に捉え、その課題に政府主導で取り組んできたのがドイツである。ドイツも私と同じ問題意識 (47% は果たして正しいのか?) を持ったようだが、調査研究の規模において、日本の比ではなかった。多くの資金を投じ、多くの人員を動員して実施した。

ドイツ連邦政府の労働社会省は、「労働 4.0 (Arbeiten 4.0、英 Work 4.0) プロジェクト」を実施してきた。ドイツ最大の労働組合 IG メタル出身のアンドレア・ナーレス大臣が、同プロジェクトを推進した。ドイツでは、「独り勝ち」の経済の源泉である製造業を支える製造現場の労働者、すなわち IG メタル会員の仕事がどうなるかが最大関心事であった。

筆者がドイツを訪問し、インダストリー 4.0 や労働 4.0 分野の専門家と意見交換して感じたことであるが、「独り勝ち」と言われるほど強力な経済力を生み出している製造業分野で、もし第 2 の「ラッダイト運動」が起きれば、経済は壊滅的になるという恐怖がドイツの人々の脳裏を横切ったのではないだろうか。ラッダイト運動とは、1811 ~ 1817 年頃、イギリス中・北部の織物工業地帯に発生した。産業革命の機械化により、失業の恐れを感じた労働者が起こした機械破壊運動のことである。今から約 200 年ほど前に英国で起きたラッダイト運動は、いまでも欧州の人々の脳裏に生々しく残り、語り継がれている。私が意見交換したドイツの専門家からもラッダイト運動という言葉は何度か聞かれた。そのドイ

ツも、2016年11月、「白書：労働 4.0」(White Paper, Work 4.0)を発表し、調査分析は一段落ついた。

フレイ & オズボーンの推計値が発表された直後、ドイツ連邦政府は、マンハイムにある ZEW 研究所 (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH) に委託調査し、フレイ & オズボーンの計算を再試算して、再び米国及びドイツに適用したところ、米国では 9%、ドイツでは 12% になったと発表した (2015 年 6 月)。その前提は、フレイ & オズボーンと同じ「技術的な可能性を示しただけ、雇用が増える部分は一切考慮せず」である。このレポートは、ドイツ語で書かれ、ドイツ国内に向けて発表されたものである。

2013 年 4 月、ドイツでは、「全自動無人化工場」をインダストリー 4.0 の構想として発表が行われ、そのわずか 5 ヶ月後の 2013 年 9 月、フレイ & オズボーンが、「米国において 10 ~ 20 年以内に 47% の労働者が機械に代替されるリスクが 70% 以上」、との推計を発表したため、あるドイツ人専門家に言わせると「ドイツ国内はパニック状態になった」とのことであった。それを鎮静化させる目的があったものと思われる。

筆者が 2016 年 3 月にドイツに出張し、インダストリー 4.0 や労働 4.0 分野の研究に従事している専門家らと議論した際、彼らは、フレイ & オズボーンの推計値のことを「根拠のないいいかげんな数字」「彼らは人間のやることは全て自動化できると信じ込んでいる」と批判していた。

米国におけるフレイ & オズボーンの推計値は 47% だが、ZEW 研究所の推計値は 9% である。一体、なぜこのような大きな違いが生まれたのか？その理由は、推計方法の違いにあった。先ほどのアーンツの発言にも表れている。

フレイ & オズボーンの推計では、職 (job) ごとに機械への代替可能性を考えた。だが、ZEW は、職 (job)、仕事 (work)、作業 (task) という 3 つの概念を導入したのである。特に大切なのは、作業 (タスク) という概念である。例えば、「売り子」という職 (ジョブ) が行う仕事 (ワーク) は、以下ののように、1 つ 1 つの作業 (タスク) に分解される、と考えるのである。

「売り子」という職 (job: ジョブ) が行う仕事 (work; ワーク) を構成する作業 (task; タスク)

客に笑顔で笑う。→ いらっしゃいませという。→ 商品を説明する。→ 価格を伝える。
→ お金をもらう。→ 商品を渡す。→ お釣りを渡す。→ お礼を言う。

フレイ & オズボーンは、1 つ 1 つの「職 (ジョブ)」ごとに、機械への代替可能性を試算したが、「作業 (タスク)」という概念を導入することで、1 つ 1 つの「作業 (タスク)」ごとに、機械への代替可能性を試算するという、より緻密な計算ができるようになった。と同時に、1 つ 1 つの「作業 (タスク)」について、過去、機械に代替されたかどうかを検証する作業も進行した。そうすると、47% であった推計値が、9% になったのである。

アーンツの発言にもあるように、現実的には、機械化が進むと、1 人の労働者全体が代替されるのではなく、その労働者が行っている様々な作業 (タスク) の一部が機械に代替される。機械化が進めば、代替されるタスクは増えるが、いまだに人間そのものを 100% 代替可能な機械は発明されていない。すなわち、テクノロジーの進歩に伴って、機械が行うタスクと人間が行うタスクの分化が進むのである。だが、フレイ & オズボーンは、そういった現実に沿わない 1 人の人間全体が代替されることを前提に試算したため、過大な数字になったものと考えられている。

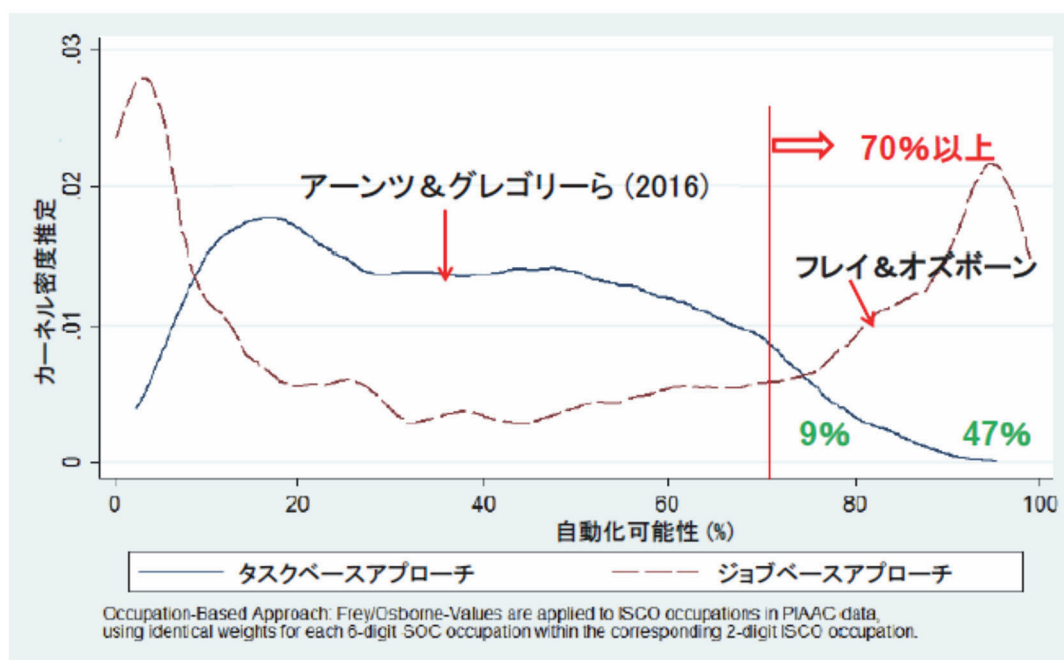
3-3 アーンツ & グレゴリーらと OECD の研究成果

次いで、アーンツ & グレゴリーらは、フレイ & オズボーンが作成した職 (ジョブ) ベースでの機械へ

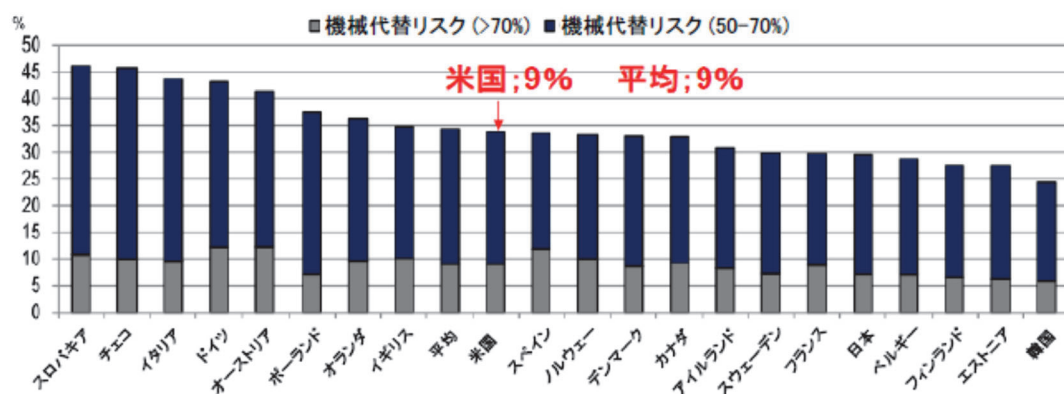
の代替可能性の（図1）を、作業（タスク）ベースで改めて作成しなおしたところ、（図2）のようになった。フレイ&オズボーンの図は、真ん中が下がり、両側が上がっている凹型の図であるが、アーンツ&グレゴリーらの図は、まったくその逆で、両端が下がり、真ん中が突出した凸型となった。アーンツ&グレゴリーらの図では、「労働者の9%が機械への代替リスクが70%以上」となった。

2016年、OECDは、加盟各国ごとの機械代替リスクを試算した結果を発表した。それは、代替リスクが70 - 100%と50 - 70%の2種類である。その結果を見ると、機械代替リスクが70 - 100%の労働者の割合は、オーストリアで12%、米国で9%、ドイツで6%、日本で7%、などとなり OECD 平均で9%となった。また、低水準の教育を受けた労働者の40%は、自動化によって消失する仕事に従事している。ほぼ全ての国で、教育水準の低い労働者は機械に代替されるリスクが最も高い

（図3）を見ると、日本は他国に比べて機械への代替可能性が小さい。そして実際に、（図5）を見る



（図2）アメリカにおける各職業の自動化可能性（PIAAC データを元に算出）
出典） Arnz, Gregory, & Zierahn (2016)



（図3）OECD 加盟諸国の機械への代替リスク
出典） the Survey of Adult Skills (PIAAC) (2012) と Arntz, M. T. Gregory and U. Zierahn (2016) をもとに OECD が作成

と機械への代替は現実的に小さくとどまっている。ではなぜ日本にはこうした特徴があるのだろうか？その答えは、実証されたわけではないが、以下のように考えられる。

日本には「非正規雇用」という労働コストが安い労働力が大量に存在する。厚生労働省によれば、昭和59年度の非正規雇用は、総雇用者数の15.3%、604万人だったが、その後急速に増え、平成29年度には、総雇用者数の37.3%、2036万人となっている。その平均賃金（平成29年6月分）は、時給ベースでみれば、一般労働者（正社員・正職員）が1937円であるのに比べ短時間労働者（正社員・正職員以外）は1081円である。

日本の会社の中に「非正規」が大量に増えた時期は、米国では、情報化投資が行われて、ルーティン業務で働く人間を機械で代替していった時期と重なる。だが、日本のように、会社のなかに賃金が「正規雇用」に比べて約半分の雇用者が4割近くもいれば、しかも、日本の経営者は、「あのような難しいことは、おれにはわからん」と公言する人が多く、複数の統計によれば情報化投資にとっても悲観的であることが明らかとなっており、そうした事情を背景にすれば、「非正規にルーティン業務をやってもらいなさい」となることは容易に想像がつく。

3-4 ドイツの「労働4.0」プロジェクト

ドイツ連邦政府労働社会省所管のIAB（ドイツ労働市場・職業研究所、The Institute for Employment Research）は、2016年12月、決定版ともいえる極めて詳細な推計を発表した。2035年、ドイツにおいて失われる雇用146万人、創出される雇用140万人とほぼ同数であることを示した。

	2020 年	2025 年	2035 年	
雇用創出	+ 72	+ 151	+ 140	万人
雇用消失	▲ 71	▲ 154	▲ 146	万人

ドイツの「労働4.0」プロジェクトの一部の重要な役割を担ってきたフラウンホーファーIAO（Arbeitswirtschaft und Organisation：労働・組織）研究所の見解は、「世の中に出ている推計値は全て間違っている。だからといって、我々が正しいと考える推計値は出さない。推計値がどうあれ、技術の進歩に対応できない人は失業の可能性が大きい。そのため、職業再訓練を充実化させ、失業を低く抑えることに我々は最も注力する。現在、職業訓練所のカリキュラムにデジタル化の内容を組み込む作業が進行中である。」となっている。

「世の中に出ている推計値は全て間違っている。」と言い切った背景には、将来のデジタル・ビジネスモデルが現時点でまだまだほとんど見通せないこと、そしてもし技術が完成したとしても、その技術を現実的に実用化できるまでの時間、費用対効果が見合うようになるまでの時間、古い機械設備と入れ替える時間など不確定要素が多すぎる。そして、今まで使い続けてきた機械設備でできるのなら、どうして入れ換ええないといけないのか、という意見も出るといった理由からである。

例えば、同研究所の研究員が、グーグル・ドイツ社長に「20年後の貴社の雇用形態はどうなっているか」とインタビューしたところ、「20年前、この世に存在していなかったグーグルが、どうして20年後を予想できるのか。」と返されたとのこと。この分野の研究の難しさを現しているエピソードとして紹介してくれた。

同研究所の研究員はまた、ドイツでは、「雇用の未来」は、「まるで水晶玉をのぞき込むようだ」と言われていることを紹介してくれた。魔女が持っている水晶玉を覗き込むと、そこには未来の景色が見えるが、それは本当の未来なの？単なる幻影ではないの？という状況を例えている。

4 オーターの傑出した研究成果；過去 40 年間減少を続けるルーティン業務の雇用者数

これまでに発表された世界中の論文のなかで、恐らく、最も世界に大きな影響を与えた重要な分析は、デイビッド・オーター（David H. Autor、1967 年生まれ）の分析である。同氏は、ハーバード大で修士・博士を得て、現在 MIT で教授をしている。労働経済学が専門で、これまで、Econometric Society（2014）、American Academy of Arts and Sciences（2012）、Society of Labor Economists（2009）などで賞を得ている著名な研究者である。

米国におけるスキル別職業の割合の 10 年毎の変化（図 4）を見ると、

第一に、中スキルの職業の労働者が過去継続的にずっと減少を続けている。

第二に、低スキルの職業の労働者が過去継続的にずっと上昇を続け、かつ、上昇スピードが加速している。

第三に、高スキルの職業の労働者が過去継続的にずっと上昇を続けているが、上昇スピードが減速している。

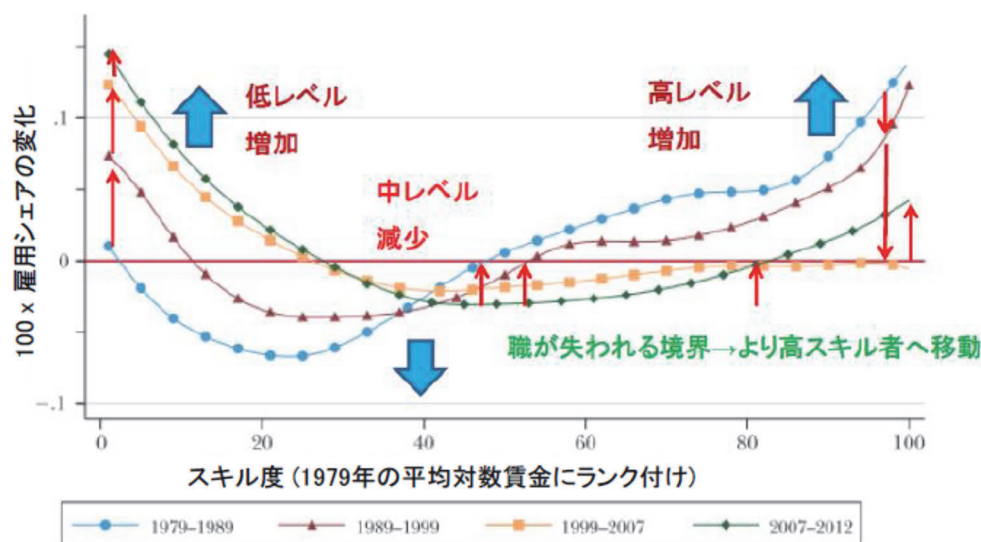
第四に、雇用が失われる境界が、より高スキルの職の方に移動している。

第五に、職を失った中スキルの労働者のうち、高スキルに移動する者はごく少数で、大部分は、低スキルに落ちていることがうかがえる。

第六に、情報通信技術の進歩が、いまの米国の経済格差を発生させている大きな要因であろうことがうかがえる。

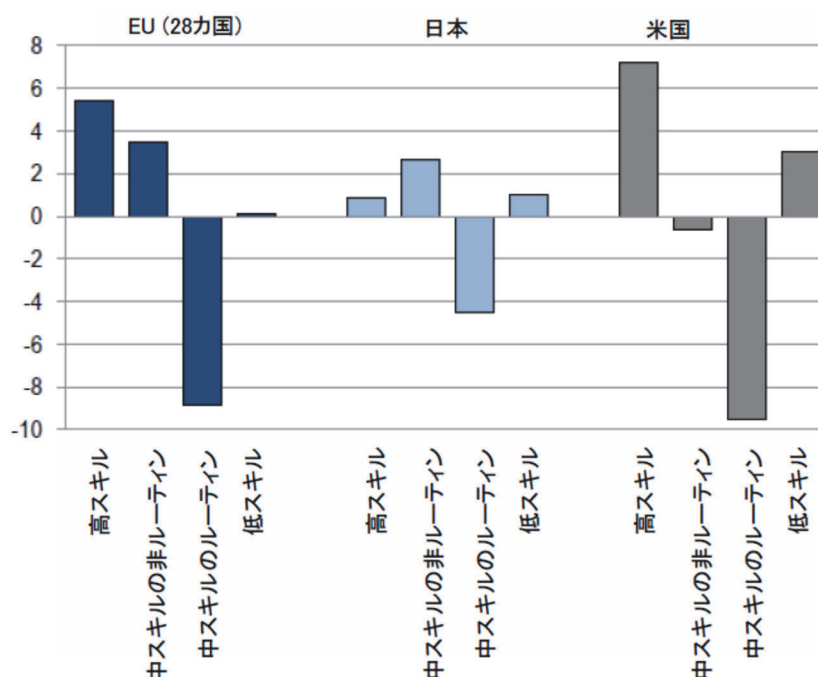
OECD では、米国、EU、日本の 3 ケ国について、2002 年から 2014 年まで、スキル別の職業ごとの労働者比率の変化について計算した（図 5）。米国は、上述のオーターの分析のとおりである。3 ケ国を比較すると、米国が最も変化が大きく、日本が最も変化が小さい。

米国は、2002 年以降、中スキルのルーティン業務の労働者を解雇してきただけでなく、中スキルの非ルーティン業務の労働者も解雇してきた国である。一方、高スキル者を自社内で養成したり新規雇用するなど、高スキル者の獲得に努めてきた。



（図 4）米国におけるスキル別職業の割合の 10 年毎の変化

出典）1980, 1990, and 2000 Census Integrated Public Use Microdata Series (IPUMS) より Autor（2015）が作成



(図 5) スキル別の職業ごとの労働者比率の変化(米国、EU、日本、2002 年から 2014 年まで)

出典) EU は EU-LFS、日本は労働力調査、米国は BLS Current Population Survey

米国と比較した日本の特徴は、本来は米国のように機械化を進めて解雇できた筈のルーティン業務の雇用者でも、ほとんど解雇していない。さらに米国との大きな違いは、高スキル者の獲得又は養成にほとんど無関心であったことである。これでは、インターネット元年以降の米国とのグローバル競争に負けてきたこともうなずける。

日本企業は、雇用の現状維持の傾向が強く、技術進歩に伴って本来であれば機械で代替できる部分で人間が働いていたり、新しい時代を牽引する高スキル人材を養成していない。技術進歩に応じた雇用状態が合っていないため、生産性低下、企業競争力低下を招いているものと思われる。順送り人事、過去と同じ業務の繰り返し、働き方の現状維持、の結果と言える。

技術進歩にもかかわらず、雇用の現状維持を続けることは、企業のイノベーションの足を引っ張り、生産性の低下、競争力低下につながり、米国企業などとのグローバル競争に負ける要因の 1 つになっている。

1 人 1 人の雇用者に注目して、その人の雇用を守るために本来であれば機械で代替できる領域で人間が働いていることが本当に雇用を守ることなのかどうか、わからない。日本の過去の実績を見れば、個々の雇用者を守るために、技術進歩にも関わらず、旧態依然とした雇用形態を存続させた結果、生産性が落ち、企業競争力が落ち、米国との競争に負け、大量リストラにつながってきたことがわかる。大規模リストラの方が、社員と家族にとってはもっと悲惨であろう。

5 日本の雇用はどう変わるか

次に日本の現場の動向をご紹介したい。雇用慣行、雇用制度、雇用政策等は各国により大きく異なっているため、日本は、新技術の導入に対応する雇用への影響が、ドイツとも米国とも異なっているのではないかと、この思いで、現場を訪問し、インタビューを重ねてきた。日本では新しい技術が現場に本格

的に導入され、かつ実績が出ている大企業製造業はまだ数社程度しかないので、1社ずつ訪問し、日本の動向を調査した。

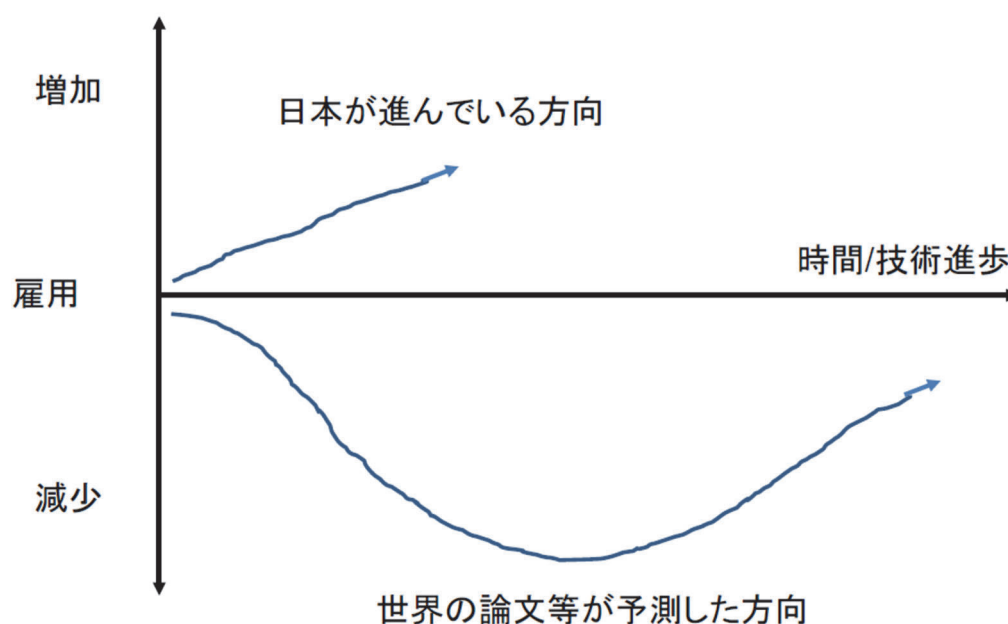
調査結果を総括すれば、今の日本では、人口減少・少子高齢化により現場の熟練作業員が不足し、その労働部分を機械が代替する、または多品種少量生産が増え、人間への負荷が増しているため、人間を「エンパワー」するために、新技術が現場に導入され、現場も歓迎するという形態で導入されている。1990年代、日本は工場の機械化、自動化、省力化投資が盛んだったが、今は、機械（人間）に得意な作業は機械（人間）に任せようとの空気があり、それは「人と機械の調和」と呼ばれている。ある会社の幹部は「当社のシステムのコンセプトは、『人が中心』である」と強調した。またある会社の幹部は「現場から急速に熟練作業員がいなくなっている。投資が回収できるかどうかの問題ではない。背に腹は代えられない」と強調した。企業の競争力の根源である熟練作業員を大切にしたいという思いが込められている。これが今、日本で進行している「日本型」と言えよう。

また、経済産業研究所では、2017年8～10月、日本企業約1万社に対して、日本の産業界におけるIoTの動向把握を行うアンケート調査（平成29年度「我が国の企業のIoTに関する調査」）を行った。その調査項目のなかに、「雇用への影響」及び「人材育成」に関する質問項目を含めた。

調査概要：実施時期 2017年8～10月、対象 日本企業 10,075社、回収 1,372社（回収率 13.62%）

新技術導入により雇用者数が「減少した」と回答した企業は、34社であり、「増えた」と回答した企業数は43社である。後者の方が9社多い。この結果から、日本の産業界では、少なくとも現時点では、新しい技術の導入により、雇用が減少した企業数より、増加した企業数のほうが多い。

これまで、世界中から発表された論文等では、新しい技術の進展により、ルーティン業務などの事務労働が機械に代替されるなど効率化・合理化されるため、まず一旦、雇用が減り、その後、新しい技術の時代に相応しいスキルを持った若者が出現し、雇用者が増えてくると予想されている。ところが、少



（図6）アンケート調査から読み取れる日本企業の動き

なくとも本アンケートから理解される範囲では、日本では、そうした論文等の予想に逆行し、日本全体からすれば、まず雇用が増えるところからスタートしている。ここには、日本型雇用が深く影響しているものと想像される。

新しいデジタル技術を導入すると、それを稼働させるための専門技術者、例えば、データサイエンティスト／データエンジニアなどが現場で必要とされる。その傾向は、製造業の現場で顕著である。一方、銀行金融業などでの事務部門では、「ルーティン業務の機械化」が過去から継続して現在でも進行しており、事務職の削減が続いている。

その増加分と減少分を現時点で合計したところ、減少分よりも増加分の方が多い、それは事務部門のデジタル化よりも製造業の現場のデジタル化の方が、日本企業は熱心に進めているからと言える。

6 日本に必要な雇用・社会政策

これまでに述べた世界の論文等、日本におけるアンケート調査・現地調査等の調査分析結果から、必然的に導出される今後取るべき対策を以下に挙げる。

- 1) 第4次産業革命という新しい時代を牽引し、世界とのグローバル競争に勝つためのリーダーの育成である。
- 2) 人間でなければできない仕事を担う人材の育成である。具体的には、過去の前例を「学習」し判断するといった過去の前例の延長線上にある判断やルーティン業務はAIに代替されていくので、①過去に前例のない事柄や新しい創造的な仕事、②デジタル機器を使いこなしてデータ分析をしたり、科学的な経営のサポートをする人材、③コミュニケーション能力・対人能力を持った人材、④常に人工知能AIを最新版としておくために常に進んだAI技術を取得しておく人材が、今後必要とされている。大きな変革の時代にあっては、過去の前例や経験だけでは将来を議論できない。そもそも過去の前例を「学習」し判断するといった過去の前例の延長線上にある判断やルーティン業務はAIに代替可能な業務なので、そこは機械に任せて、新しい未知の時代を切り開くスキルを持った人間が必要になってくる。
- 3) 日本はこれまで現場の熟練作業員を大切にしてきた歴史があり、今、現場に導入しつつある新しいシステムも、彼らを最大限活かす内容となっている。新しいシステムは、基本的には「見える化」までであり、データを見て、対策を考えるとところは依然として熟練作業員が担っている形となっている。だが、現場では、過去の前例を「学習」し、計測されたデータを見て、判断するといった過去の前例の延長線上にある作業は、早晚AIに代替されていく。現在、熟練作業員が担っている業務の多くが機械に代替される日はすぐそこまで来ている。ドイツでは、ものづくりの現場を支えてきた熟練作業員をどうするのか、深刻な課題として捉えられている。ドイツでは、新しい技術が導入された際、これまでの古い技術の下で働いていた労働者の雇用を守るため、新しい技術の下で働けるよう、再教育・再訓練する必要性の認識が高まっている。日本でも、まだ熟練作業員が働く意欲満々のところに、彼らに代替可能な人工知能が発達してきたら、一体、どうするのか、考えておかないといけない。
- 4) アンケート結果からも、銀行金融では事務部門の解雇が進んでいることが明らかとなった。銀行金融では、雇用が増えることはなく、常に雇用は削減の方向である。折しも、最近、メガバンクが大量の人員削減を発表した。世界の論文等が予想している「ルーティン業務の事務職」の削減は、雇用のなかでボリュームが大きいだけに、これから彼ら彼女らの再雇用が大きな課題となってくる。
- 5) IMFが指摘しているように、情報化投資は、経済格差を生み出す最も大きな要因だが、イノベーションは企業競争力の源泉なので、格差を防ぐためにイノベーションを止めることは本末転倒である。情報化投資を通じてイノベーションを図りながら、そこから生じる格差を縮小させるために、税による

富の再配分をどうするか、考えないといけない。各国のジニ係数の所得再配分の前後及び時間的推移を見ると、米国は、所得再配分前に大きな格差があるが、再配分機能が弱く、かつ格差が時間的に拡大している。ドイツは、再配分前は大きな格差があるが、再配分機能が強く、格差が縮まっているものの、時系列的に見れば、格差は拡大している。日本は、時間的に格差はほとんど変化しないものの、再配分がほとんど機能せず、ドイツを凌ぐ格差がそのまま残っている。

7 さいごに

最後に、パソコンを例に挙げて考えてみよう。パソコンは、私が20～30代に職場で普及した。今、電子メールにCCをつけて転送するが、パソコンがなかった時代には、全て紙にコピーし、関係者に配布して配っていた。大量の書類を抱えてビルの上から下まで何度も小走りで行った。私の仕事の約半分の時間は、コピーと資料の配布であった。パソコンが発明された陰で、タイピストが職を失った。人間らしい手書きの文字は、無味乾燥な活字の印刷文字になった。パソコンのキーボードを人差し指1本でしかたたけないおじさんは、どこかに左遷された。

では、こうした一部の人間の雇用を守るために、企業ではパソコンの全面使用禁止を打ち出すことが最良な選択なのだろうか？パソコンを使わず、電話、コピー、ファックスだけで仕事をしると職員に命令することが最良な選択なのだろうか？

そのような選択が間違っていることは誰でも直感的にわかるだろう。もしそうすれば、その企業はたちまち、国際競争力を失い、倒産し、社員とその家族は路頭に迷うことになるだろう。そのほうが悲惨である。

そうではない。企業は日々進歩するイノベーションの一步先を行き、世界のグローバル競争に打ち勝ち、売り上げを伸ばし、総雇用数を増やすのである。それこそが、企業が取るべき王道の選択肢である。

参考文献；

- 岩本編著 (2018), 「AI と日本の雇用」 日本経済新聞出版社, 2018 年 11 月
- 岩本・波多野 (2017), 「IoT/AI が雇用に与える影響と社会政策 in 第 4 次産業革命」 RIETI Policy Discussion Paper Series, 17-P-029, 岩本晃一, 波多野文, 2017 年 8 月
- 岩本・波多野 (2017), 日本経済新聞経済教室面「やさしい経済学」連載, 「AI の雇用に与える影響を考える①～⑧」, 岩本晃一, 波多野文, 2017 年 11 月 6 日～16 日
- 岩本・田上 (2018), 「人工知能 AI 等が雇用に与える影響；日本の実態」 RIETI Policy Discussion Paper Series, 18-P-009, 岩本晃一, 田上悠太, 2018 年 5 月
- Arntz, M., Gregory, T., & Zierahn, U. (2016). The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis. *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*, 2 (189), 47-54.
- Autor, D. H. (2015). Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29 (3), 3-30.
- Enzo Weber et. (2016), Economy 4.0 and its labour market and economic impacts, IAB-Forschungsbericht 13/2016, 27 December 2016
- Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2013). The future of employment: how susceptible are jobs to computerization?, 1-72.
- The annual report of the council of economic advisers (2016) Economic report of the president. (米国経済白書)
- White Paper Work 4.0. (2016). Federal Ministry of Labour and Social Affairs. November, 2016.
- Working Group [2013], Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE4.0, Final report of the Industrie4.0 Working Group, April 2013

新設研究室紹介

知能メディア講座 画像メディア分野（西野研究室）

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

「コンピュータで見る」

本研究室では、コンピュータビジョン、すなわちコンピュータに視覚知能を与えるための理論的基盤とその実装、ならびに、そこから得られる知見の人間の視覚知能の解明への応用に関する研究をおこなっています。主に機械学習や光学を道具とし、単純に画像や映像を効率的に消費するための手段にとどまらない、ただ見るだけではなく、知覚として「見る」ためのコンピュータビジョンの実現を目指し、三つの柱を中心に研究を進めています。

「人を見る」：人はその見た目や行動に、性別や身長などの外見的属性にとどまらない、その人の内面や考えを映す豊かな情報を含んでいます。例えば、我々は人の気分や意図を瞬時にその人の動きや表情から読み取ることができます。本研究室では、人を見ることによりその人の見ているものを判断したり、人混みでの動きを予測する研究をおこなってきました（図1）。人が何を見て、何を意図し、どのように体を使って動き、集団としてどのように影響を及ぼし合うか、視覚から理解するための研究を進めています。



図1 雑踏での人物追跡

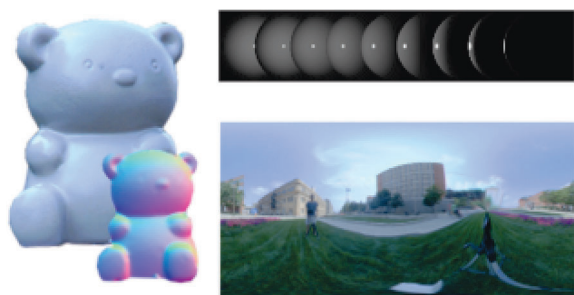


図2 反射・光源・幾何形状の推定

「物を見る」：身の回りの状況や物を見ることにより、我々は多くの情報を得ています。単純に、目の前に道路があり車が停まっている、といった物体認識にとどまらず、道路が雨上がりでぬかるんでいる、車のボディは硬いけどバンパーはより柔らかいなど、歩いたり触ったり、それらの物と実際にインタラクトするために不可欠な情報を視覚からも判断しています。本研究室では、物体の見えからの光源状況、反射特性、物体形状（図2）、ならびに素材の推定に関する研究を中心に、物体の見えや風景からのよ

り豊かな物理的及びセマンティックな情報抽出のための研究をおこなっています。

「より良く見る」：人間は二つの目を用いて、可視光範囲内でこの世界を見ていますが、コンピュータはこのような撮像系に限られる必要はありません。本研究室では、より豊かな視覚情報を得るための、情報処理が一体化された新たな撮像システム（コンピュータショナルフォトグラフィ）の開発をおこなっています。最近の研究では、近赤外光と光の散乱に着目し、泳いでいる魚などの水中の物体の実時間3次元撮像（図3）や、半透明物体の内部における光の逐次伝搬の撮像などを実現しました。

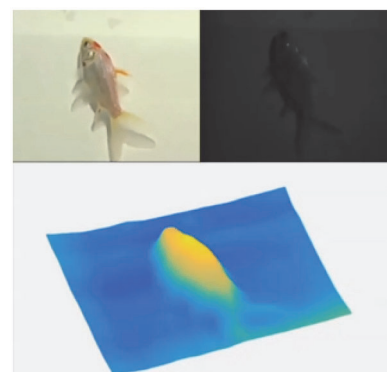


図3 水中物体の三次元撮像

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏電磁環境探査分野（小嶋研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>


図 1：日欧共同水星磁気圏探査衛星
BepiColombo/MIO (2018年10月19日打ち
上げ(イラスト:池下章裕氏、提供:JAXA))

2018年11月に新たなスタートを切りました。当研究室では、科学衛星やロケットによる宇宙環境探査を通して、主に太陽系空間を物理的に理解し、その上で利用していくことを目的とした研究と、微細気泡で活性化した水の利用に向けた基礎研究を並行して行っています。

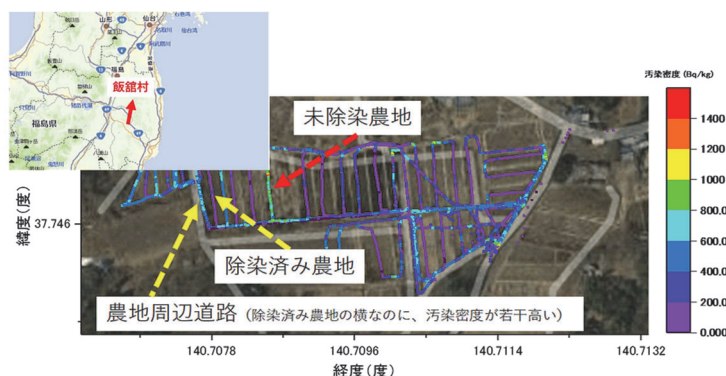
科学衛星・ロケットを用いた宇宙空間の電磁環境探査

宇宙空間は、「無」の世界ではなく、宇宙プラズマに満たされています。宇宙プラズマは、宇宙空間における環境決定の役割を担っています。地球大気は中性大気ダイナミクスに関する方程式系で記述されるわけですが、宇宙空間では電離して発生したイオンと電子の運動とそれに伴う電磁場に対する方程式系で記述されるわけです。そして、その物理系において宇宙プラズマでは、波動と粒子の相互作用が顕著に現れます。多くの領域で宇宙プラズマは無衝突であり、プラズマを構成するイオンや電子の運動エネルギーは衝突により交換されることはなく、「プラズマ波動」という電磁気現象によって交換されます。そのため宇宙プラズマ中においてプラズマ波動はいとも簡単に励起されます。このプラズマ波動を観測することで宇宙空間の電磁環境変化とそのプロセスを知ることができます。当研究室では、科学衛星に搭載するプラズマ波動観測器の開発から衛星搭載に向けた試験、および打ち上げ後のデータ解析研究までのすべてを行っています。くしくも、本年（2018年）10月19日に日欧共同水星探査衛星 BepiColombo が打ち上げられました。2機から構成される本ミッションのうち日本側が担当した衛星 MIO に当研究室が中核として関わったプラズマ波動観測器が搭載されています。MIO が水星に到着してデータがでてくるのは6年後になります。また、2016年に打ち上げられた地球放射線帯探査衛星 ARASE、1992年に打ち上げられた地球磁気圏探査衛星 GEOTAIL のデータ解析を通して宇宙環境で生起している現象の解析にも取り組んでいる他、次世代探査衛星のための超小型観測器の開発にも力を入れています。

子の相互作用が顕著に現れます。多くの領域で宇宙プラズマは無衝突であり、プラズマを構成するイオンや電子の運動エネルギーは衝突により交換されることはなく、「プラズマ波動」という電磁気現象によって交換されます。そのため宇宙プラズマ中においてプラズマ波動はいとも簡単に励起されます。このプラズマ波動を観測することで宇宙空間の電磁環境変化とそのプロセスを知ることができます。当研究室では、科学衛星に搭載するプラズマ波動観測器の開発から衛星搭載に向けた試験、および打ち上げ後のデータ解析研究までのすべてを行っています。くしくも、本年（2018年）10月19日に日欧共同水星探査衛星 BepiColombo が打ち上げられました。2機から構成される本ミッションのうち日本側が担当した衛星 MIO に当研究室が中核として関わったプラズマ波動観測器が搭載されています。MIO が水星に到着してデータがでてくるのは6年後になります。また、2016年に打ち上げられた地球放射線帯探査衛星 ARASE、1992年に打ち上げられた地球磁気圏探査衛星 GEOTAIL のデータ解析を通して宇宙環境で生起している現象の解析にも取り組んでいる他、次世代探査衛星のための超小型観測器の開発にも力を入れています。

福島県における連携研究及び、微細気泡の基礎電気特性の調査

2011年より福島県において震災復興支援のための研究を継続しており、2018年度からは京都大学福島復興支援研究連携推進ユニットにも参画し、福島県飯館村の放射線量調査と農地復興に向けた技術研究を共同で行っています。また、除染実証技術として私達が着目したサブミクロンスケールの微細気泡については、応用利用可能な技術として発展させるため、電気特性（帯電性など）についての基礎研究をタイとの国際共同研究として進めています。



福島県飯館村の農地において、農地と周辺道路におけるCs-137の汚染密度について、歩行サーベイによる調査を行った

図 2：2017 年度に行った福島県飯館村での地表面汚染量調査
(複合原子力科学研究所・東京大学との共同研究)

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

先端電機システム論講座 (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)

知能メディア講座画像メディア分野 (西野研) *

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (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 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

エネルギー科学研究科 (大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (橋口研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電磁環境探査分野 (小嶋研) *

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

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)

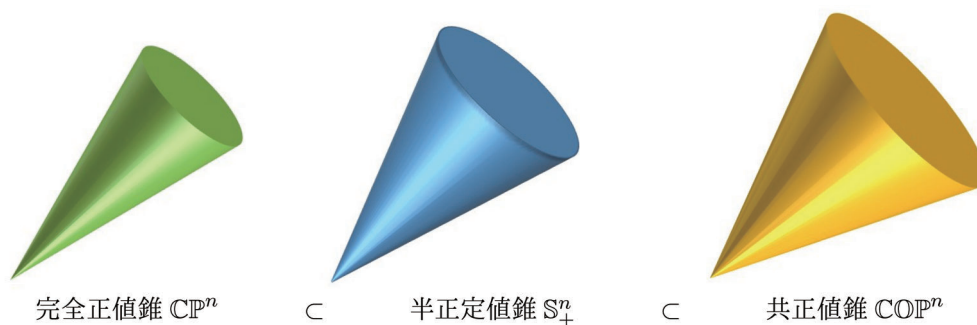
教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野
(中村裕研)

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/>

「錐計画に基づく制御系の解析と設計」

制御工学分野においては、システムの解析や設計に関する多くの問題を半正定値計画問題（Semidefinite Programming Problem; SDP）と呼ばれる凸最適化問題に帰着できることがよく知られている。ここで、サイズが n の対称行列 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ が、“任意の n 次元実ベクトル $x \in \mathbb{R}^n$ に対して $x^T P x \geq 0$ が成立する”という 2 次形式に関する非負条件を満足するとき、 P は半正定値行列と呼ばれる。上記の SDP とは、半正定値行列で構成される凸錐上の最適化問題として記述されるものである。システムの解析や設計においては、リアプノフ関数をうまく構成することで目標値追従特性や外乱抑制特性といった所望の制御性能が達成されるかを判定することが多い。とくに線形システムを対象とする場合には、正定値行列を用いた状態ベクトルの 2 次形式をリアプノフ関数として採用することが有効であり、これが制御工学分野における多くの問題を SDP に帰着できる主たる理由であると考えられる。一方、線形システムの特別なクラスである非負システムの解析や設計においては、多くの問題を共正値行列で構成される凸錐上の最適化問題である共正値計画問題（Copositive Programming Problem, COP）として定式化できることが徐々にあきらかになってきている。ここで非負システムとは、いかなる非負の入力およびいかなる非負の初期状態に対しても、出力および状態が非負の値を取る動的システムのことである。このような非負性は、資源量、エネルギー、製品生産量、化学物質の濃度といった“負の値を取り得ない物理量のやりとり”を表すダイナミクスにおいて普遍的に現れるものであり、非負システム理論は制御工学のみならず経済学や社会システム工学、生物学といった多彩な分野で研究対象となっている。非負システムの解析や設計においては、状態ベクトルの非負性より、2 次形式リアプノフ関数を構成する対称行列として（狭義の）共正値行列を採用することが極めて自然である。ここで対称行列 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ が“任意の n 次元非負ベクトル $x \in \mathbb{R}_+^n$ に対して $x^T P x \geq 0$ が成立する”という非負条件を満足するとき、 P は共正値行列と呼ばれる。システムの非負性を積極的に利用して解析や設計に関する問題を共正値計画問題として定式化することには、解析条件や設計条件にあらわれる行列に関する通常の半正定値制約を共正値制約に緩めることができるという大きな利点がある（図の錐の包含関係を参照）。しかしながら共正値計画問題には、1. 与えられた対称行列が共正値であるかどうかを判定すること自体が容易ではない、2. 半正定値計画問題の双対問題が同じ形式の半正定値計画問題として記述されるのに対し、共正値計画問題の双対問題は完全正値錐と呼ばれる（共正値錐とは異なる）凸錐上の最適化問題として記述される、といった数学的な難しさがある。本研究では、共正値計画に基づいた非負システムの解析や設計に対する新たなアプローチの構築可能性について、応用数学分野で半正定値計画や共正値計画に取り組む研究者と連携を取りながら検討を進めている。



図：完全正値錐、半正定値錐および共正値錐の包含関係

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/

「格子不純物によって生じる局在モードの研究」

非接触給電技術は古くから盛んに研究され、既に実用化されている技術である。とくに、電磁誘導を用いる手法は身の回りのデバイスでもよく見かける。一方で、電力伝送効率はコイル間の結合係数に依存するため、受電デバイスの位置が給電コイル直上のみに限定されるという不便さがあった。このため、コイルを複数用いるなどして受電デバイスの水平自由度を向上させる試みなどがなされている。

多数の振動子が相互に結合された系、すなわち結合振動子系として、

$$\ddot{u}_n(t) = -\omega_0^2 u_n(t) - C(2u_n(t) - u_{n+1}(t) - u_{n-1}(t)), \quad (1)$$

を考える。いま、解を $u_n(t) = a_1 e^{i(\kappa + \omega t)} + a_2 e^{i(\kappa - \omega t)}$ のような進行波と仮定すると、波数 κ と角周波数 ω について、以下の関係が成り立つ。

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + 2C(1 - \cos \kappa)}. \quad (2)$$

上式を分散関係と言い、結合振動子系を伝搬する波の波数と周波数の関係を与える。波数 $\kappa=0$ のとき、周波数は最小 $\omega_L = \omega_0$ となり、 $\kappa = \pi$ のとき最大 $\omega_U = \sqrt{\omega_0^2 + 4C}$ となる。したがって、なんらかの要因によって周波数が ω_L 以下、または ω_U 以上の振動が生じれば、その振動は進行波解と共鳴しないため、もとの場所で局在することになる。このような機序で生じるモードを局在モードという。式 (1) においては、例えば $n=c$ の場所で共振周波数が他と異なる場合、 $n=c$ を中心とした局在モードが生じる（図2参照）。

本研究では、結合振動子として平面コイルとコンデンサからなる共振回路のラダー構造、およびアレイ構造を対象とする。図3は、本研究で検討対象とした平面コイルを直線状に配置した共振回路アレイ（ラダー構造）である。各平面コイルにはコンデンサが挿入されており、LC共振回路を構成している。このような回路では、格子不純物は外部から近づけられたコイルによって生じる。図4に、外部コイルによって生じた局在モードの例を示す [1]。外部コイルの位置を中心として電流分布が局在していることが分かる。

上記のように、局在モードの中心は外部コイルの位置に依存する。もし、共振回路アレイを送電側、外部コイルを受電側と考えると、常に受電コイル周りに電流が局在する状態が実現でき、受電デバイスの位置検出機構の簡素化が可能になると考えられる。実際の給電装置では、送電側に交流電源を接続し、局在モードを励起する必要がある。しかしながら、受電コイルを水平方向に移動させると、局在モードの周波数が変動することが明らかとなった。そこで (1) 隣り合う送電コイル間の重なり量、(2) 受電コイルの大きさ、をパラメータとして周波数変動を数値的に検討し、ある特殊な配置で局在モードの周波数変動をほぼゼロに抑制することが可能であることを明らかにしている [2, 3]。今後、このような特殊な配置になる理由や、2次元配列への拡張、および実験的な検証を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 木村真之、松岩貴祐、谷口義治、松下泰雄, “相互誘導により結合された共振回路アレイにおける局在モードに関する一検討,” 信学技報 NLP2015-106, pp. 131-136 (2015).
- [2] T. Fujimoto, M. Kimura, S. Doi, “Localized Modes in a One-Dimensional Resonant Circuit Array Consisting of Overlapped Square Coils,” in Proceedings of the 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017), Cancun, Mexico, 2017, pp. 560-563 (2017).
- [3] 茂木大和、木村真之、土居伸二, “共振回路アレイにおける局在モードの周波数変動抑制のためのコイル配置の検討,” 信学技報 NLP2019 (in preparation) (2019).

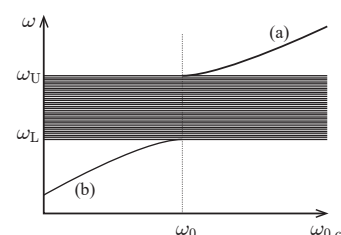


図1 不純物に対する局在モードの周波数の変化

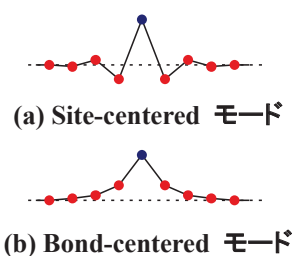


図2 局在モードの波形



図3 平面コイルを用いた1次元アレイ

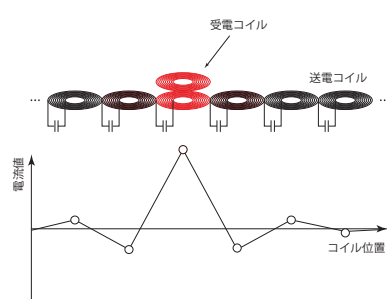


図4 受電コイルによる局在モードの発生

生体医工学講座 生体機能工学分野（小林研究室）

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

「光ポンピング原子磁気センサを用いた磁気粒子イメージング」

当研究室では、生体磁気計測を主とした脳機能計測に向けて、微弱磁気信号の計測に向けて超高感度な磁気センサである光ポンピング原子磁気センサ（optically pumped atomic magnetometer：OPAM）の研究を進めている。OPAM は、光ポンピングにより生成されたアルカリ金属原子の電子スピン偏極の磁気光学効果を用いて微弱磁気信号を計測する磁気センサで、低周波数の磁気信号にも高い感度を有するという特長がある。

一方、幹細胞追跡や血管造影、血行動態に基づく脳機能イメージングなどへの応用が期待される磁気粒子イメージング（magnetic particle imaging:MPI）が考案され、近年活発に研究が行われている [1, 2]。MPI では、超常磁性酸化鉄（superparamagnetic iron oxide:SPIO）と呼ばれる磁性ナノ粒子（magnetic nanoparticle：MNP）の生体内における空間分布イメージングを行う。MNP は非線形な磁化特性を有しており、MPI では励磁磁場によりこの磁性ナノ粒子の磁化を変化させ、その磁化の変化を磁気信号として計測する（図1 参照）。現在、動物を対象とした MPI 計測では数十 mT かつ数十 kHz の励磁磁場を印加することで高い信号対雑音比を実現しているが、生体への影響を考慮するとできる限り低い周波数かつ低磁場を用いた計測が望ましい。

そのため、当研究室では低周波数の励磁磁場による OPAM を用いた MNP 信号計測の研究を行っている。本研究では、OPAM への励磁磁場の影響を抑制するため、入出力コイルと共振用のキャパシタで構成されたフラクストランスフォーマ（FT）を用いた図2に示すような計測系を構築し、2 kHz の励磁磁場を用いた遠隔 MNP 信号計測を実施した。その結果、最小 $0.1 \mu\text{mol}$ の MNP から信号を取得することができた [3]。この研究で用いた OPAM と FT は、超低磁場 MRI 計測にも応用可能であることから、MRI により得られる解剖情報と MPI により得られる機能情報を統合するための同時計測の実現に向けて研究を進める。

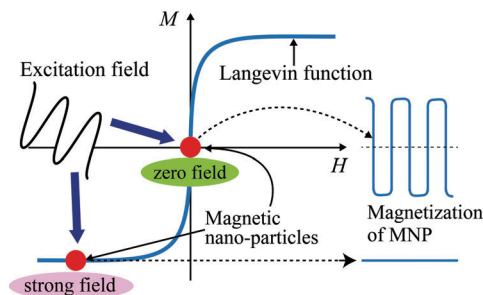


図1：励磁磁場(H)に対するMNPの磁化(M)の変動

参考文献

1. T.M. Buzug, *et al.*, Magnetic particle imaging, Springer, 2011
2. E.U. Saritas, *et al.*, Magnetic particle imaging (MPI) for NMR and MRI researchers, Journal of Magnetic Resonance, Vol. 229, pp. 116-126, 2013
3. 加藤 他、小型磁気センサモジュールを用いた遠隔磁気粒子イメージング：励磁磁場強度最適化の検討、信学技法、Vol.117, No.360, pp.61-66, 2017

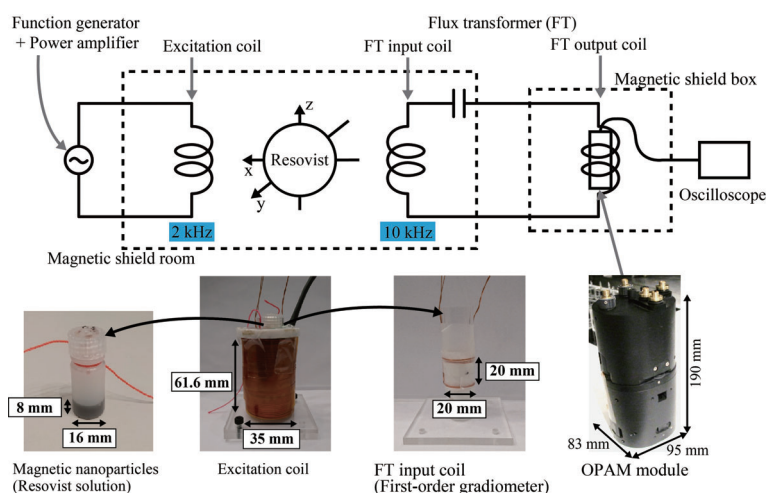


図2：OPAM を用いた MNP 信号計測系のセットアップ

電磁工学講座 電磁回路工学分野（和田研究室）

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

「微細 MOS トランジスタにおけるランダムテレグラフノイズの評価及びモデル化」

人々の生活にますます溶け込むようになっている集積回路において、低エネルギー動作と高信頼性が求められる。低エネルギー動作と高信頼性を両立するには、集積回路を構成する MOS トランジスタの I-V 特性だけでなく、トランジスタ間で発生する特性ばらつきとノイズを正確にモデル化することが鍵となる。数億個にも及ぶ大量トランジスタからなる集積回路は、自動設計ツールを用いた設計にて実現されるため、回路の性能と信頼性は設計に使うモデルに支配される。微細トランジスタが直面するノイズに電源ノイズのような外来ノイズとトランジスタ内で発生する熱雑音などがある。ナノメートル寸法の微細トランジスタにおいて、酸化膜内の欠陥にチャネルキャリアが捕獲され、捕獲されたキャリアがチャネルに放出されるといふランダムテレグラフノイズ (RTN) が問題となってきている。本研究では、この RTN の評価及びモデル化を行い、回路性能の正確な見積もり手法を検討している。

図 1 に MOS トランジスタの断面構造及びバンド構造を示す。キャリアの捕獲と放出によりオン電流が急変化し、回路動作中の遅延変動に繋がる。図 2 に、ある回路において観測された遅延変動を時間に対してプロットしている。最大で 1% の遅延変動が観測されている。温度ごとに変動のパターンが変化し、最大変動量が異なる。温度以外に、電源電圧によってもその挙動が異なる。RTN はランダムな現象であるため、その影響を統計解析により見積もることで信頼性が保証される。そのため、RTN による変動量を統計モデルとして表現する。集積回路にゲート長とゲート幅の異なるトランジスタが用いられ、トランジスタ寸法の影響を統計分布のパラメータとしてモデル化する。

図 2 のように RTN は長時間の連続測定による評価が必要で、大量サンプルの評価が困難である。本研究では、独自の評価技術の開発により、長時間に渡る連続測定を自動で行うシステムを構築している。開発したシステムにより世界初の 154,224 個という大規模サンプルのノイズ評価に成功している。集積回路の信頼性において評価サンプルの数は大変有意義なものである。次に、ゲート長とゲート幅の異なるトランジスタにおいて温度や電源電圧の異なる動作条件におけるノイズを評価し、変動量の統計モデルの構築を行っている。図 3 (a) に 154,224 個のサンプルにおける遅延変動量のヒストグラムを示す。図 3 (b) にその変動量はガウス分布ではなく、lognormal 分布に従うことを Quantile-Quantile プロットにより示している [1]。

参考文献：[1] Islam et al, "Analysis of Random Telegraph Noise (RTN) at Near-threshold Operation by Measuring 154k Ring Oscillators," in *International Reliability Physics Symposium*, April 2019.

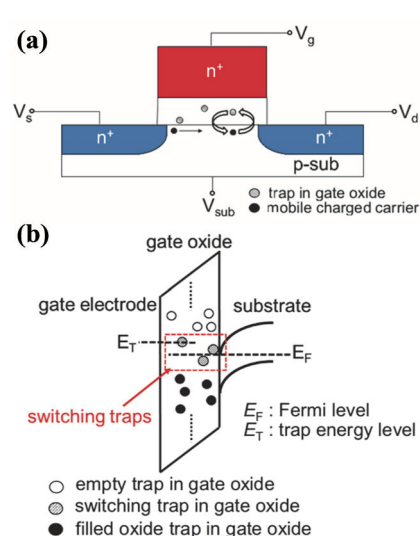


図 1：MOS トランジスタの酸化膜内の欠陥によるキャリアの捕獲・放出現象。

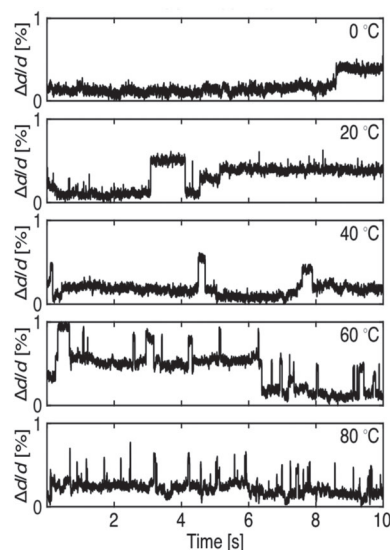


図 2：時間とともに遅延が変動する様子。この遅延変動は回路の誤動作に繋がる。

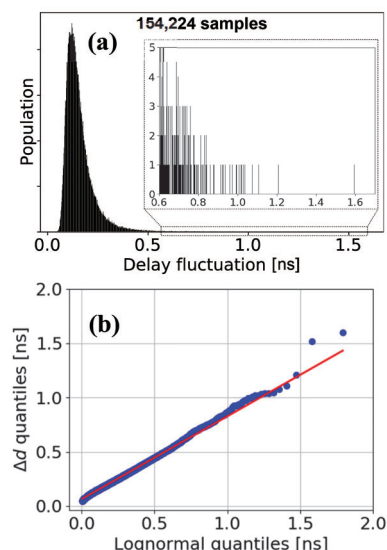


図 3：(a) 遅延のヒストグラム。(b) lognormal 分布に対する quantile-quantile プロット。

電子物理工学講座 応用量子物性工学分野（竹内研究室）

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

「光子を用いた、3 量子ビットのゲート操作実現に成功」

近年、量子力学の基本的な性質を応用し、従来不可能であった計算や通信、計測、センシングなどを実現する「量子技術」が注目されており、たとえば盗聴不可能な通信を実現する量子暗号通信や、既存のコンピュータでは解けない問題を解く量子コンピュータの実現に向けた研究が進められています。光の素粒子である「光子」は、量子状態の保存性が良く、また長距離伝送が可能であることなどから、量子情報の有力な担体として研究が進められています。

これまでに、2つの光子間のゲート操作（2入力2出力ゲート素子）は実現されていますが、現在の効率が限られており、その集積化の上で問題となっていました。それを解決すると期待されるのが、3入力3出力ゲート素子の実現です。特に、制御スワップゲートと呼ばれる素子は、量子誤り訂正や、量子指紋認証など、様々な量子プロトコルに用いることが可能です。制御スワップゲート素子は、2入力2出力素子を組み合わせることで理論上可能ですが、その場合、成功確率は10万分の1以下となり、実現は事実上不可能でした。

この問題に対し、Fiurasek（フューラセック）らは、2008年に光の干渉計を組み合わせた独自の提案で、従来の500倍以上の効率（162分の1）で、制御スワップを実現する方法を理論的に提案しました。しかし、この方法を実現するには、非常に複雑な光干渉の長時間安定化など技術的な困難が多数存在し、これまで実現していませんでした。

そこで本研究グループは、Fiurasek が理論的に提案した方法に基づき、外部からの光量子ビットが入力可能な制御スワップゲート操作の実現に初めて成功しました。実験にあたっては、複数の特殊な半透鏡が、一つの光学部品に集積されたハイブリッド光学素子を巧みに組み合わせることで、非常に複雑な光回路を、長時間安定な光干渉計として実現するなど、技術的な課題を克服しました。制御スワップゲートは、制御ビットが1の場合のみ、2つの標的ビットの状態を入れ替えます。図1に実験結果を示します。入力の数字は、左端が制御ビットの値を、その右隣2つが、標的ビットの値を示します。また、高さは、そのような入出力値が得られた確率を表します。制御ビットが0の場合には、入力された標的ビットの状態は高い確率でそのまま出力されているのに対して、制御ビットが1の場合には、01は10に、10は01に高い確率で入れ替わっています。さらに、制御ビットに重ね合わせ状態を入力した場合に、3光子がもつれ合い状態が、生成されていることも確認しました。

今回実現した制御スワップゲートにより、従来の2入力ゲートを組み合わせた光量子回路に比べて、光量子回路の効率を大きく高めることが可能です。また、量子指紋認証など、量子状態を用いたさらに高度なセキュリティー技術の実現などが期待されます。

参考文献：T. Ono, R. Okamoto, M. Tanida, H. F. Hofmann, & S. Takeuchi, "Implementation of a quantum controlled-SWAP gate with photonic circuits", Scientific Reports, 7, 45353 (2017).

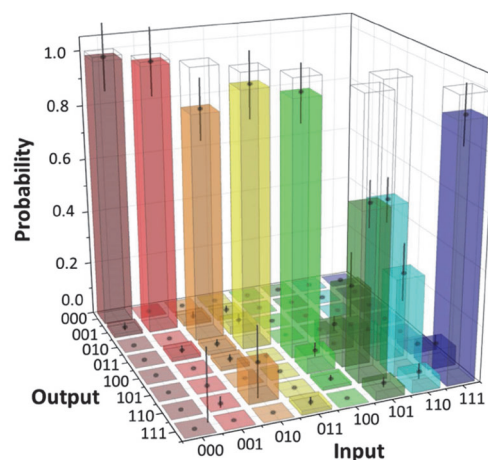


図1. 制御スワップ操作実験結果。

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/>

「SiC 電子デバイスにおける絶縁破壊現象の解析とユニポーラ限界特性」

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 固有の半導体物性、欠陥物性、キャリア輸送現象には未解明のものが多く、依然として重要な研究課題となっています。特に、パワーデバイスにおいては高電圧印加時における pn 接合の絶縁破壊現象を理解し、これを精密に解析するモデルが要求されます。今回は、SiC 半導体 pn 接合の絶縁破壊現象の解析と、この研究を通じて検討した SiC ユニポーラデバイスの限界特性について紹介いたします。

様々な構造を有する SiC pn 接合ダイオードを作製して特性を解析したところ、耐圧 50 V ~ 20 kV 級の素子では、絶縁破壊はなだれ増倍によるアバランシェ破壊であることが判明しました。高電界下におけるキャリア増倍は衝突イオン化現象によるもので、半導体物性の観点では電子および正孔の衝突イオン化係数の電界強度依存性で記述することができます。本研究では、独自の構造により電界集中を完全に緩和した様々な SiC pn 接合ダイオードを作製し、その逆方向特性の光電流の電界強度依存性を基にして電子および正孔の衝突イオン化係数を算出しました。ダイオードの温度を広い範囲で変化させることにより、衝突イオン化係数の温度依存性も求めた結果を図 1 に示します。ここで、他の半導体には見られない SiC 特有の現象を 2 つ見出しました。一つは、低電界移動度の高い電子の方が、衝突イオン化係数が小さい（高電界では加速されにくい）ことで、もう一つは、温度上昇に伴い電子の衝突イオン化係数が若干増加傾向にある（通常はフォノン散乱の影響を受けて衝突イオン化係数は高温で減少）ことです。これらは SiC の特異な伝導帯構造に起因すると考えられます [1]。なお、本研究で得られた衝突イオン化係数を用いることにより、様々な SiC デバイスの耐圧を精密に予測することができ（実験値と計算値の差は約 3% 以下）、かつ実測耐圧の温度依存性も計算結果と非常によい一致を示すことを確認しています。

一般に、パワー MOSFET 等のユニポーラデバイスでは、デバイスのオン抵抗と耐圧の間に材料物性で決定されるトレードオフ関係が存在し、与えられた耐圧において達成できる最小のオン抵抗は「ユニポーラ限界」と呼ばれます。しかしながら、従来、SiC の分野では衝突イオン化係数や c 軸方向移動度のドーピング密度依存性が確立されていなかったために、真のユニポーラ限界特性が曖昧でした。今回、衝突イオン化係数を精密に決定し、かつ並行して c 軸方向の電子移動度のドナー密度依存性も実験的に決定することができましたので、SiC のユニポーラ限界特性を計算により求めました。実用上重要なパンチスルーの最適構造を計算により求め、オン抵抗と耐圧の関係をプロットした結果を図 2 に示します。従来、曖昧なまま示されていた特性に比べて、SiC の限界特性が格段によいことが分かりました [2]。

[1] T. Kimoto et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 363001 (2018).

[2] T. Kimoto, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 018002 (2019).

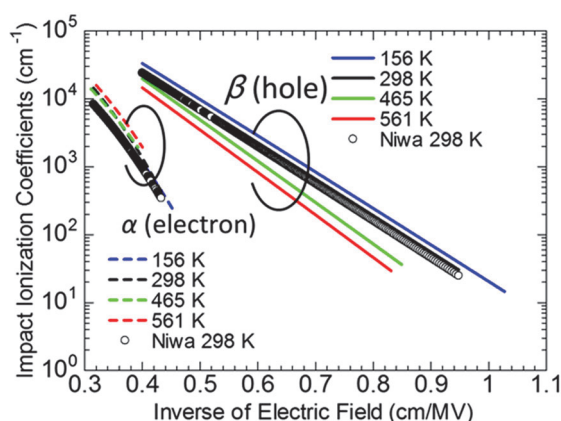


図 1 SiC における電子、正孔の衝突イオン化係数

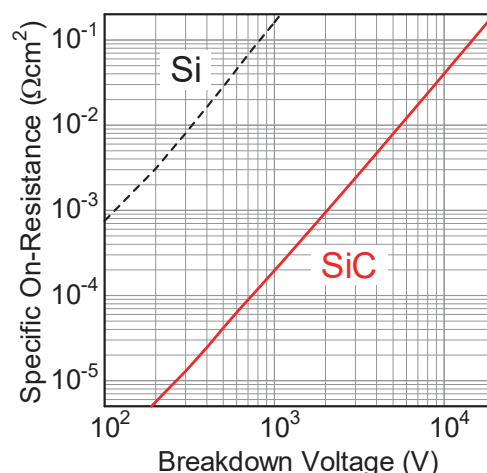


図 2 SiC デバイスのオン抵抗—耐圧の限界特性

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/>

「変調フォトニック結晶レーザーによる電子的ビーム走査」

近年、自動運転、ロボットの自動走行や、スマートフォンの高度顔認証等のセキュリティセンシングなどへの関心が、世界的に高まっています。そのために、LiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれる、レーザーパルスの空間走査による物体（障害物）の検出や、不審物（者）のセンシング技術の開発が、世界中で行われています。しかしながら、現状では、センシングに用いるレーザーパルスの走査は、機械方式に頼らざるを得ないため、動作スピードが遅い、小型化が難しい、信頼性が低いなどの大きな課題を有しています。このような課題を解決しうる光源として、我々は、小型で安価な半導体レーザーに斜め方向へのビーム出射機能を付加するとともに、それらをアレイ状に並べることでレーザービームの出射方向を電氣的に走査できる、新たなフォトニック結晶レーザーデバイスの研究・開発を行っています。

図1は、望んだ斜め方向へのビーム出射を可能とするフォトニック結晶レーザーデバイスの概念図を示しています。このレーザーでは、一見するとランダムにも見える「変調フォトニック結晶」が重要な役割を果たします。変調フォトニック結晶は、正方格子状に周期的に配置された格子点に対して、規則的に、その位置に変調を与えた構造からなり、この規則的な変調の作用によって、レーザー光を回折させ、望んだ斜め方向へと出射させることが可能となります。図2には、このような変調フォトニック結晶を、出射方向が徐々に変化するように連続的に並べ、駆動電極をスイッチングした結果を示しています。同図に示されるように、複数の駆動電極を切り替えていくことにより、L字状にビームを走査することに成功しました。現在、このような新たな概念に基づき、2次元的に広い範囲でビーム走査が可能なレーザーチップの実現に向けて、研究を行っています。また、フォトニック結晶レーザーは、素子単体でナノ秒以下の非常に短い時間幅のパルスが発生させることも可能であるため、今後、測距分解能の向上なども含めて、革新的なセンサー用光源デバイスの実現へと繋がっていくことが期待されます。

参考文献

- [1] S. Noda, K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda, and Y. Tanaka, "Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers: Review and Introduction of Modulated-Photonic Crystals," IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. **23**, 4900107 (2017).

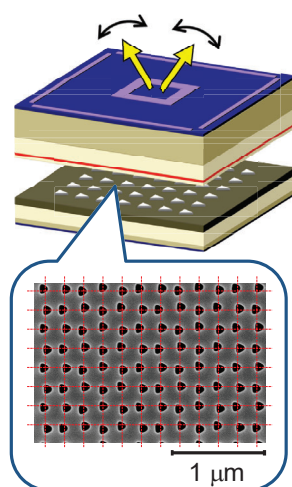


図1：斜め方向へのビーム出射を可能とする変調フォトニック結晶レーザー。

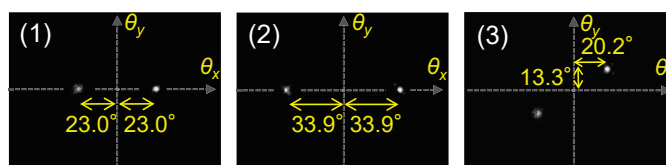
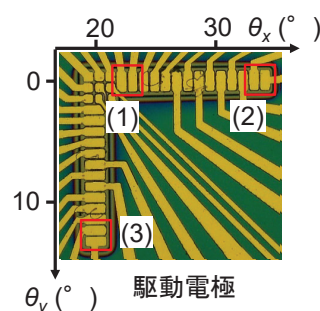


図2：アレイデバイスによるビーム走査。駆動電極のスイッチングにより、出射方向のL字状の走査を実現。

量子機能工学講座 量子電磁工学分野

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

電磁誘起透明化を実現するメタマテリアルを用いた電磁波の保存と再生

電磁誘起透明化現象 (Electromagnetically Induced Transparency の頭文字をとって EIT 現象) とは、3 準位系を基本とする原子系において盛んに研究されている非線形光学現象であり、プローブ光と呼ばれる光の吸収が、もう一つの補助的な光 (コントロール光) の入射によって消失する現象のことを指す。この透明化は極めて狭い周波数帯域で起こり、それに応じて媒質としての屈折率も大きく変化する。この屈折率の急激な変化は、媒質中のプローブ光の速度 (正確には群速度) を著しく低下させる要因となる。さらに、EIT 現象の動的な変調により、媒質中へ光を保存し、保存した光を再び取り出す (再生する) ことが可能になる。この手順を図 (a)-(c) に示す。まず、図 (a) のようにコントロール光が入射されている状態から開始する。ここにパルス状のプローブ光が入射すると、EIT 効果によりプローブ光はゆっくりと媒質中を進行する。ここで、同図 (b) のようにコントロール光を遮断することで、プローブ光の群速度は 0 になり、プローブ光は媒質中に保存される。その後、同図 (c) のようにコントロール光を再入射することで、EIT 効果によりプローブ光は低速度で媒質を再進行し、媒質外へ取り出される。

この光の保存と再生は、「光メモリ」を実現するものとして大きな注目を浴びている。しかし、動作周波数は原子種によって一意に決まるため、任意の周波数で実現できるものではない。これに対して、人工原子系ともいえるメタマテリアルによって EIT 現象を実現することにより、原理上任意の周波数で電磁波の保存と再生が可能になると考えられる。メタマテリアルとは、対象とする電磁波の波長よりも十分小さい人工構造の集合体のことを指し、設計により様々な媒質機能を実現できることから近年盛んに研究されている。EIT 現象に似た現象も様々なメタマテリアルで実現されてきたが、電磁波の入射で透明化を誘起するという本来の意味での EIT 現象は実現されていなかった。そこで、我々は非線形要素をメタマテリアル中に組み込むことで、EIT 現象を忠実に再現する方法を考案し、マイクロ波領域で電磁波の保存・再生の実験検証を行った。図 (d) がその実験結果であり、上段にプローブ波の出力信号、下段にコントロール波の出力信号を示している。コントロール波が遮断されている時間 (0ns ~ 30ns) の間、プローブ波の出力が減っていることが分かる。これは、プローブ波がメタマテリアル中に保存されていることを示している。そして、コントロール波が再入射されるとプローブ波が再生されて、出力信号として検出されていることが分かる。このように、原子系の EIT 現象による光の保存と再生と全く同じ手順で、人工原子系であるメタマテリアルで同現象を実現することに成功した。

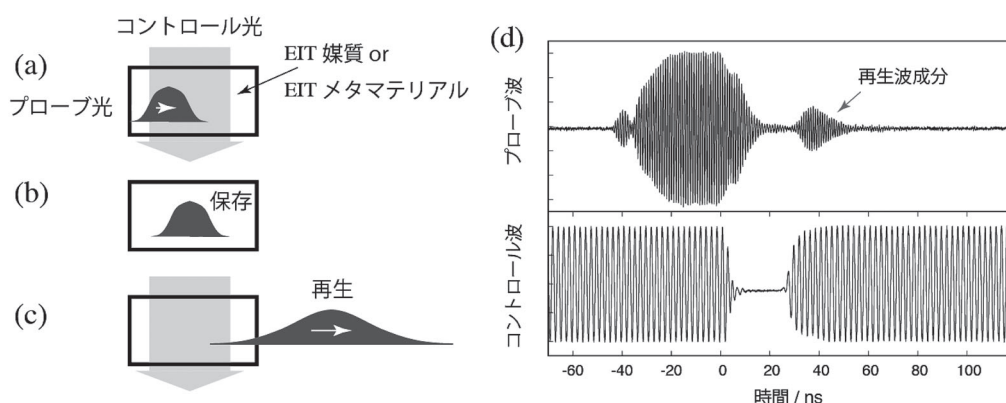


図 (a)-(c) EIT 現象を利用した電磁波の再生と再生の手順 (d) メタマテリアルを用いた電磁波の保存・再生の検証実験

参考文献 T. Nakanishi and M. Kitano, Appl. Phys. Lett. **112**, 201905 (2018).

集積システム工学講座 情報回路方式分野（佐藤高史研究室）

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

「粒子フィルタを用いた光電脈波信号からの高精度な心拍数推定手法」

本研究室では大規模集積回路（LSI）を用いた応用システムの一つとして、生体信号処理に適したアルゴリズムや計算機システムについて研究を行っている。呼吸や心拍数等の生体信号を常時計測することにより身体に関する様々な情報が得られることが知られており、医療や健康維持、スポーツ等における応用が期待されている。本研究ではその中でも心拍数の常時計測に着目し、手首装着型のセンサにより高精度に心拍数を推定できる手法を検討している。

心拍数を測定するために用いられるセンサには多くの種類があるが、本研究では光電脈波式センサを用いる。この方式では図1のように皮膚に光を照射し、その反射光の強度を測定することにより脈波を感知する。血液中に含まれるヘモグロビンが緑色の光成分を吸収するため、血流変動により血管の容積が変化すると、それに伴い反射光の強度が変化し脈動を感知することができる。このセンサをバンド等により手首に固定することで、得られた脈波信号から心拍数の常時測定が可能となる。しかし、運動等による大きな体動が加わるとセンサ位置がずれ、光電脈波信号にノイズが加わり、心拍数の推定精度に悪影響を与える。本研究ではそのような大きな体動が加わった際にも高精度に心拍数を推定できるアルゴリズムの提案を行った。

提案手法では粒子フィルタと呼ばれるアルゴリズムを採用した。粒子フィルタは図2に示すように、粒子の粗密により状態の確率分布を表現し、その確率分布を時系列で追跡するアルゴリズムである。これにより、一時的に大きな体動ノイズが加わった際にも、時系列を考慮し最も可能性の高い心拍数を追跡することが可能となり、ロバストな心拍数推定を実現できる。また、提案手法では入力となる光電脈波信号と共に、センサから得られる加速度信号を使用する。粒子フィルタの処理中に加速度センサの情報を含めることにより、体動ノイズによる誤推定を減らすことができる。

12人の被験者データを対象に提案手法による心拍数推定精度を評価した所、平均絶対誤差 1.17 BPM (Beats Per Minute) の高精度な推定を実現した。これは既存手法の誤差 1.28 BPM より優れた結果であり、計算速度についても同手法に比べ約 20 倍高速である。粒子フィルタによる心拍数追跡の例を図3に示す。粒子の粗密は背景の色と等高線で表現されている。心拍数を確率分布として正確に追跡できていることが分かる。これにより、既存手法 JOSS（赤線）が一時的な誤推定をした際にも提案手法（黒線）は正確な推定が行えていることが分かる。

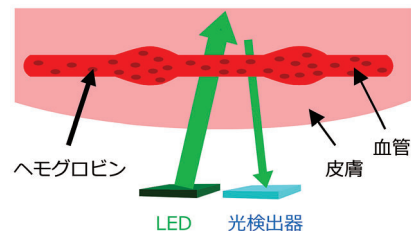


図1 光電脈波式センサによる脈波信号検出

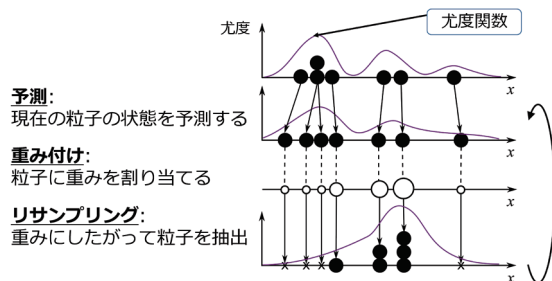


図2 粒子フィルタの概要

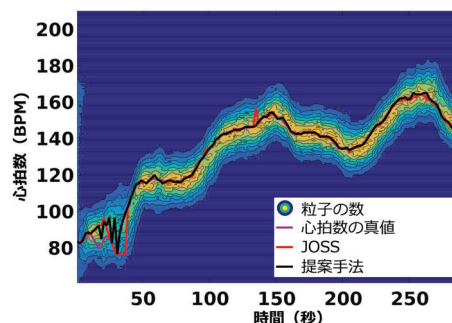


図3 提案手法による心拍数推定結果

参考文献

- [1] Yuya Fujita, Masayuki Hiromoto, and Takashi Sato: "PARHELIA: Particle Filter-Based Heart Rate Estimation from Photoplethysmographic Signals During Physical Exercise," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.65, No.1, pp.189-198, Jan. 2018.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤 亨研）

<http://pub-asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「ミリ波超広帯域レーダーによるバイタルセンシング」

1. 背景

生活習慣病の予防や日々の健康増進のために、様々な生体情報を常時モニターし、管理したいという要望が高まり、小型で高感度なセンサーをネットワーク経由でクラウド情報管理する様々なセンサーシステムが提案されています。しかし現状では、小型化されているとはいえ、多くのセンサーは身体に接触・装着する必要があるため、測定時にストレスを感じさせないカジュアルな生体情報センシングが強く求められていました。また、保育園や介護施設等では、子供や高齢者をプライバシーに配慮しつつ、ストレスなく見守ることのできる非接触の生体情報センサーシステムへの期待も高まっています。当研究室ではパナソニックと協同して、高感度なミリ波帯超広帯域レーダーをセンサーとして用い、独自の信号処理技術を組み合わせることによって、心電計と同程度の高感度な心拍／心拍間隔測定に取り組んできました。

2. 研究手法・成果

呼吸や心臓の鼓動による人体表面の僅かな動きを、高い距離分解能を持つミリ波帯超広帯域レーダーによって高感度に捉え、特徴点の時系列パターンから心拍間隔を推定する独自のアルゴリズムによって、レーダー信号から、呼吸信号、心拍信号を分離し、平均心拍数だけでなく瞬時の心拍間隔変動までリアルタイムで推定します。当初は26GHz帯、次に60GHz帯のプロトタイプ機を用いて原理検証を行いましたが、昨年以降はさらに広帯域な79GHz帯を利用し、従来30cm程度であった距離分解能を7.5cmに向上すると共に、レーダーシステムの大幅な小型化（従来比1/10）を同時に実現しました。心拍間隔の推定精度に影響を与えるノイズを高精度に分離し、1台のレーダーによる複数人の心拍間隔の同時計測を実証しました。

参考文献

- [1] 京都大学 COI 拠点プレスリリース
http://www.coi.kyoto-u.ac.jp/report_arch/201709_02
- [2] T. Sakamoto, et al. Feature-based Correlation and Topological Similarity for Interbeat Interval Estimation using Ultra-Wideband Radar, IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol.63, No.4, pp.747-757, 2016.
- [3] T. Sakamoto, et al., Measurement of instantaneous heart rate using radar echoes from the human head, Electronics Letters, Vol.54, No.14, pp.864-866, 2018.
- [4] 大石健太郎 他, 人体表面変位の高調波成分に着目した超広帯域ドップラレーダによる非接触心拍間隔測定, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J101-C, No.11, pp.412-420, 2018.



図. 保育所における実証実験風景。

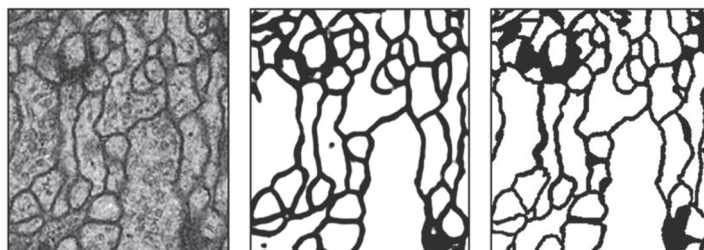
システム情報論講座 論理生命学分野（石井研究室）

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

「深層学習による三次元生体画像処理」

深層学習は、画像、音声、言語の諸分野の応用研究を一変させた。深層学習の中核をなすアーキテクチャとして畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network; CNN）がある。これは畳み込み層とプーリング層を交互に多段に積み重ねたものである。畳み込み層とプーリング層の組み合わせは、位置不変性を維持した非線形フィルターを実現でき、それを多段に重ねることで、多重解像度の処理を実現できる。一方で、CNN に代表される深層ネットワークは多数のパラメータを有し、それをデータ駆動で最適化するためには、訓練用のビッグデータのみならず、最適化を効率化するため正則化が必要である。近年の深層学習の発展は、この正則化法の進展に支えられているといっても過言ではない。近年、対抗事例学習という新しい方法論が生まれ、そのバリエーションは多くの成功を収めている。その一つである、敵対的生成ネットワーク（generative adversarial network; GAN）は、識別器と生成器の組み合わせであり、生成器は訓練データに類似した偽のデータを生成し、識別器はその入力が訓練データセットの中にある真の訓練データであるか、生成器が生成した偽のデータであるかを識別する。これら二つの学習器は全体としてマルチエージェント学習によって訓練され、結果として、生成器は識別器のための正則化として機能することになる。ここでは、上記の背景に基づき、近年われわれのグループで開発された神経系の画像処理のための深層学習法を二つ紹介する。

マルチ走査型電子顕微鏡によれば、生体などの試料切片ごとの表面を、ナノオーダーの解像度で観察することができる。神経系では、シナプス後末端であるスパインと樹状突起とをつなぐ「首」部分はしばしば数ナノメートルの直径しかないので、電子顕微鏡からの三次元再構成による構造決定は困難な課題である。切片ごとの二次元画像に対して細胞分画（セグメンテーション）を行い、計算機上で三次元再構成を行う。その際に、二次元画面上で、あるいは、三次元画像スタック上でのセグメンテーションにおいて、深層学習アーキテクチャが用いられる。われわれは、CNN の多重解像度版である U-net を生成器として、別の CNN を識別器として用いる GAN を構築した。生成器は電子顕微鏡の二次元画像を入力として、その細胞分画画像を出力とするが、その際に、訓練データにおける、人手による分画を模倣する。識別器は、二次元画像と分画画像のペアが訓練データセットに含まれるか、あるいは、生成器により模倣的に生成された偽のペアであるかを識別する。この手法により、ナイーブな data augmentation によることなく、高性能でのセグメンテーションが可能であることが分かった（右図）。



（左）電子顕微鏡画像 （中）CNN によるセグメンテーション。黒は細胞膜。（右）人手によるアノテーション。

核磁気共鳴図により脳の構造画像を取得し、組織の三次元分画（例えば、白質と灰白質とに分ける）ことは、医療応用のみならず、個体間の構造の類似性と相違性を調べる研究（マクロコネクティクス）において重要である。深層学習器（ここでは、ResNet の三次元版である VoxResNet）によれば、人手により行ったセグメンテーションを模倣するような自動セグメンテーションが可能と考えられるが、そこには問題点がある。第一に、深層学習器のパラメータが一般に多いため、訓練には大規模なデータセットが必要であるが、そのための人手のアノテーションには大きな負荷がかかる。第二に、深層学習器は、三次元の局所構造に基づくアノテーションを行うため、しばしば blob 様なアーチファクトを導入してしまう。われわれは、脳画像の三次元変形と深層学習とを組み合わせた半教師付き学習法を開発した。三次元変形は脳画像の滑らかさを利用しているため、上記のアーチファクトを軽減することができる。深層学習のアノテーションを確率的なラベル生成過程としてとらえることで、少量の訓練データからでも、VoxResNet の学習とミスアノテーション過程の同定が可能であり、結果として、少量の訓練データセットからでも、アーチファクトの少ない自動セグメンテーションを可能とする深層学習器が獲得できることが分かった。

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.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>

「トカマクのヘリカル分岐平衡に関する研究」

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。

プラズマのトラス型磁場閉じ込め装置では、磁場構造を工夫することにより性能の良い高温プラズマを閉じ込めることが可能です。トラス型の中でも特にトカマク型装置は外部コイルとプラズマに流す電流により軸対称なプラズマを閉じ込めます。この電流量を大きくするほうが閉じ込め性能がよくなりますが、一方、電流量を大きくしすぎるとプラズマ自身が不安定になってしまい閉じ込めが壊れてしまいます。このため、電流分布を制御することにより、不安定性を避けつつ高性能なプラズマを閉じ込めることが大きな課題の一つです。たとえば、電流密度分布がトラスの軸近傍で小さくなる分布は、不安定性を避けつつ高性能でありかつ長時間のプラズマ閉じ込めに有利であると考えられ、ITER（国際協力でフランスに建設中）ではハイブリッド放電と呼ばれ、JET（英国）、MAST（英国）、NSTX（米国）などでも実験研究がすすめられています。これ等の実験で最近明らかになったことは、トラスの軸近傍が軸対称でなく、ヘリカル構造を持つことです。この非軸対称構造はプラズマの閉じ込め性能に影響を与えるため、近年、重点的に研究がすすめられています。その結果、ヘリカル構造の発現は、電磁流体平衡の分岐平衡解であることが理解されてきました。これは、プラズマ表面で軸対称な境界条件を課しても、軸対称解と非軸対称解の二つの解が得られることを意味します。そして、後者が実験で実現されていると理解されています。図1の上段は軸対称解、下段は非軸対称解の磁場構造を表します。

当研究室では、この非軸対称解が現れる機構を理解する目的で、分岐平衡解が得られる条件を電磁流体平衡方程式の数値シミュレーションにより調べています。その結果、分岐平衡解の出現条件が、プラズマの断面形状に強く依存することを明らかにしました。通常、トカマクプラズマの閉じ込めは、表面近傍で現れる不安定性を避けるために、断面形状を円形より図1のような楕円および三角形に近くしますが、これらの断面形状に対して分岐平衡が現れやすいことを新たに示しました。

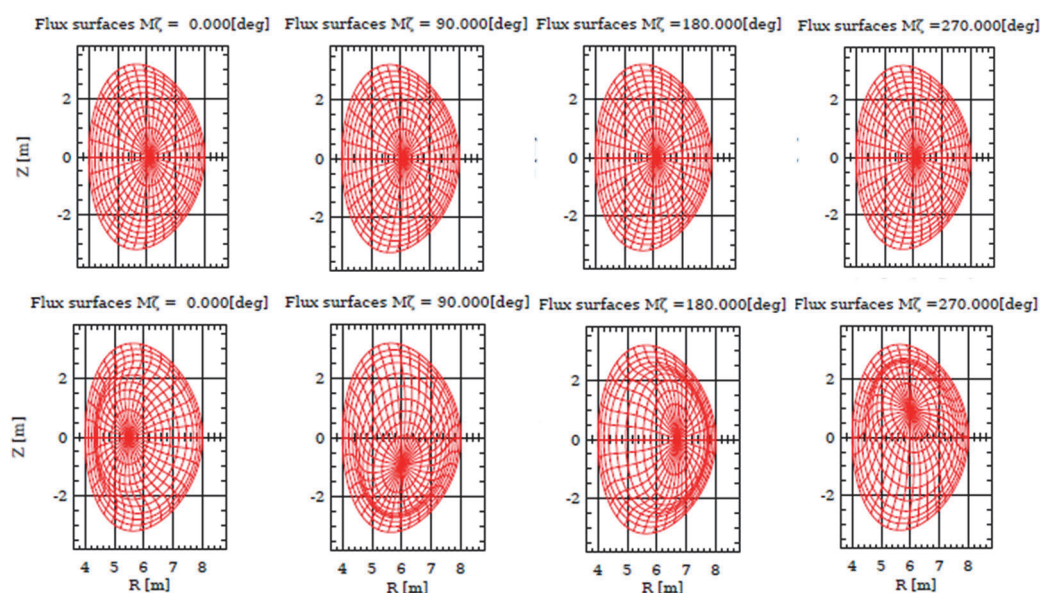


図1 電磁流体平衡方程式の数値シミュレーション結果。円柱座標 (R, θ, Z) の $\theta=0$ 度, 90 度, 180 度, 270 度それぞれの断面における磁場構造を赤線で表す。上段が軸対称解、下段が非軸対称解を表し、プラズマ表面の形状は同じである。

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

「マイクロ波の反射を利用したプラズマ電子密度計測」

本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用を高度・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先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、高パワーミリ波を用いた加熱・電流駆動システムの開発、プラズマ乱流・揺動や高速イオン励起不安定性に関連したプラズマ計測と解析、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生や、慣性静電閉じ込めと呼ばれる方式の小型のプラズマ核融合装置の開発とその中性子源としての応用の研究を行っています。

プラズマの計測手法には多くのものがありますが、ここではマイクロ波を用いた「反射計」についてご紹介します。マイクロ波・ミリ波はレーダーとして利用されてきた歴史があり、最近では例えば車の衝突防止等のためのミリ波レーダーの開発が進められています。プラズマの計測では、マイクロ波を入射し、カットオフ層と呼ばれる反射層で反射されてきたマイクロ波を受信することでプラズマの電子密度に関する情報を得ることができます。マイクロ波が利用される理由は、実験室プラズマのプラズマ周波数と電子サイクロトロン周波数がマイクロ波周波数帯にあること、また、波長がちょうどプラズマの代表的な揺動の波長に対応することによります。正常波と呼ばれる伝搬モードを用いる場合は、電子密度が $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度の場合、周波数は Ka-band (24-40 GHz) と呼ばれる周波数帯域になります。受信した波の位相やアンテナに到達するまでの時間を測定することによってカットオフまでの距離を測ることができるため、周波数に対応する密度の位置の情報を得ることができます。また、カットオフ層での位相の時間変化を測定することにより電子密度の揺動やプラズマの回転速度を得ることができます。反射計システムには単純な構成のものから、非常に複雑なシステムまで存在し、設計者の考え方でいろいろなデザインをすることができることも特徴の一つです。

我々は核融合プラズマ実験装置 Heliotron J において電子密度の分布・揺動を求めるため、マイクロ波反射計の開発を進めてきました。図 1 は設計・構築したマイクロ波反射計の一つの概要図です。搬送周波数を 26GHz から 42GHz までスキャンできるようにし、周波数変調、ヘテロダイン検波をすることで位相の大きさとともに進行方向も検出可能なものとしています。図 2 はプラズマ放電の一例です。電子密度がある程度高くなるとエネルギー閉じ込めが良くなる現象が観測されており、これを H-mode 遷移と呼んでいます。この H-mode 遷移のときにマイクロ波反射計で計測した揺動が急激に減少していることがわかりました。また、同様のシステムをもう一台製作し、異なる周波数のマイクロ波を用いることで乱流の指標のひとつである密度の径方向相関長の評価を行うことも可能となりました。今後は、この反射計システムの多チャンネル化を進め、プラズマの回転分布や揺動計測に利用する予定です。こうした計測システムの開発を通し、現在建設中の核融合実験炉 ITER や将来の炉設計に役立つ高性能プラズマの物理解明や制御手法の確立を進めてゆきます。

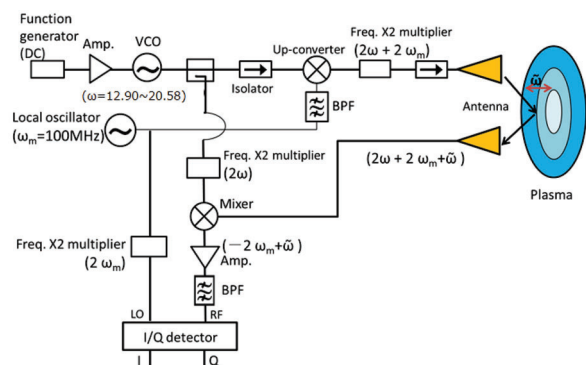


図 1. 開発したマイクロ波反射計システム概要図

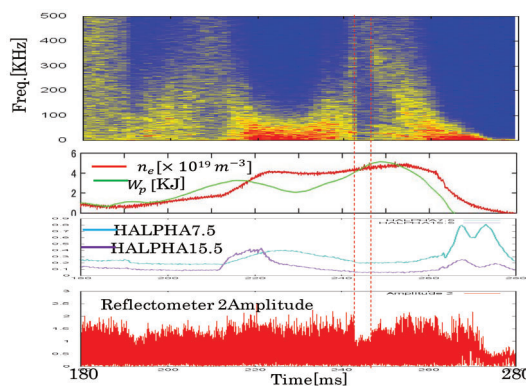


図 2. 反射計で計測した揺動の時間発展

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

「プラズマへの燃料供給を制御して高性能プラズマを生成する」

私たちの研究室ではプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いて、磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究をしています。具体的にはプラズマを高温・高密度で閉じ込める事のできる磁気容器（磁場配位）の最適化を行っています。最適かどうかを判断するためにはプラズマの輸送を調べる必要がありますが、その方法として、プラズマも固体や流体のような物質と同じく、質量・運動量・エネルギーの保存則に基づいた輸送方程式を解くことで、それぞれの輸送の性質（輸送係数等）を知る方法があります。ところで高温のプラズマに燃料ガスを注入すると、どのようなことが起こるでしょうか。第一には、燃料ガスはプラズマとの衝突することで電離し、イオン・電子密度の増加に寄与します。これは粒子輸送への影響に相当します。ですが実際には、両者の衝突は、プラズマの流れ（流速）を妨げる粘性（運動量輸送）や、電離・放射・荷電交換反応等によるエネルギー損失にも影響するため、単にプラズマ密度を上げるために多量の燃料を供給すれば良いという訳ではありません。

ヘリオトロンJで近年、高強度短パルスガスパフ法という燃料供給法を用い、高性能プラズマの生成に成功しました。この方法では短い時間（15ミリ秒）だけ、通常より数倍強い燃料供給を与え、その後燃料の供給を停止する方法です（図1参照）。燃料供給中にプラズマの電子密度は増加しますが、停止直後はプラズマの蓄積エネルギー（温度と密度の積：プラズマ圧力に相当）が若干下がります。回復し始めると初期の蓄積エネルギーを大幅に超えた高性能なプラズマが生成されました。この回復フェーズにおいて、燃料供給を停止しているにもかかわらず密度が増加するという現象も観測されています。このとき、プラズマの周辺部で、(1) 電子密度の空間勾配が急峻であること（図2参照）、(2) 磁力線と垂直方向（ポロイダル方向）のプラズマ流速の勾配も急峻になること（図3参照）がわかりました。理論的には流速の勾配が急峻になると、プラズマ中に発生する乱流による渦のサイズが小さくなり、乱流に起因した輸送を改善する役割があることが予想されています。別の計測からは燃料供給の停止後、燃料ガスの密度が数分の1になったことがわかっており、燃料供給の制御が、効率的な粒子供給による密度増加だけでなく、周辺部での粘性の低下に伴う流速の変化を生み、結果として全体的な輸送が改善したと推察されます。一方で、この手法では高い蓄積エネルギーの状態を長く維持することが課題となっており、追加の燃料供給手法の開発を進めています。

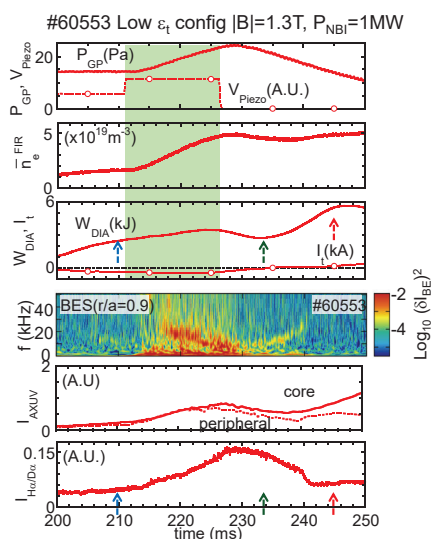


図1. 高強度短パルスガスパフ法を用いた放電波形。ここで $\bar{n}_e$ は線平均電子密度、WDIA は蓄積エネルギー。

参考文献

X. Lu, S. Kobayashi, et al., Plasma Fusion Res., **13**, 1202077 (2018).

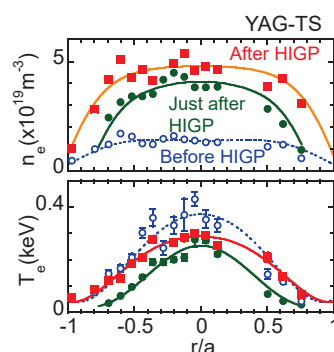


図2. 高強度ガスパフ法を用いた放電の電子密度・温度分布。

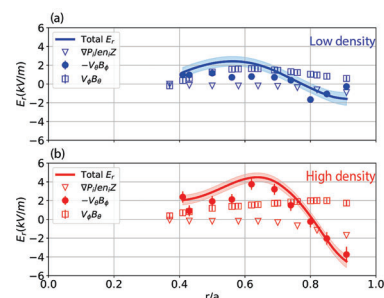


図3. (a) ガスパフ前および (b) 後におけるポロイダル方向のプラズマ流速の径方向分布。

生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

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

「赤道プラズマバブル活動度の日々変動に関する研究」

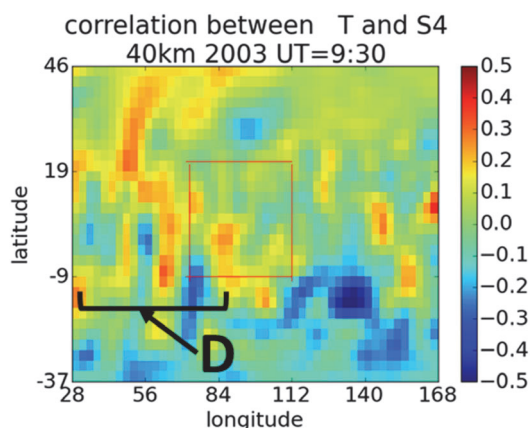
赤道プラズマバブル (Equatorial Plasma Bubble; 以後では EPB) は、低緯度および赤道電離圏で発生する強力な電離圏現象の 1 つである。EPB は、電離圏 F 領域の電離層プラズマの空乏層が不安定化し、高度 1000km まで急速に成長しつつ上昇する現象である。VHF レーダーによって、EPB に関連するプラズマの不規則性からの強いレーダエコーが測定できる。激しい EPB は、衛星から地上への電波通信に深刻なシンチレーションを引き起こし、また全地球航法衛星システム (GNSS) による測位の劣化を引き起こす。

EPB の成長メカニズムは、Rayleigh-Taylor の不安定性によって説明される。線形成長率の議論から、EPB が発生するための条件は、1) 電離層高度が高いことと、2) 東向き電場の増強である。これらの条件から、EPB の開始時間は多くの場合 F 領域高度の日没である。一方、EPB 出現の季節変化は、子午線に沿う電離圏の南北半球対称性によって説明される。つまり日没線が地磁気と平行であるとき、東向き電場の増強が日没と同時に一斉に生じ、EPB 出現頻度が高くなる。また多くの研究において、EPB 発生が大気重力波によることを示唆している。しかし、中性大気中の重力波から EPB 開始までの現実の物理プロセスの理解には、さらなる研究が必要である。本研究は、観測とシミュレーションの組み合わせによって、EPB 発生の日々変動と中性大気の挙動との関係の解明を目的とした。この論文は、Ogawa et al. [1] による先行研究の高度化でもある。

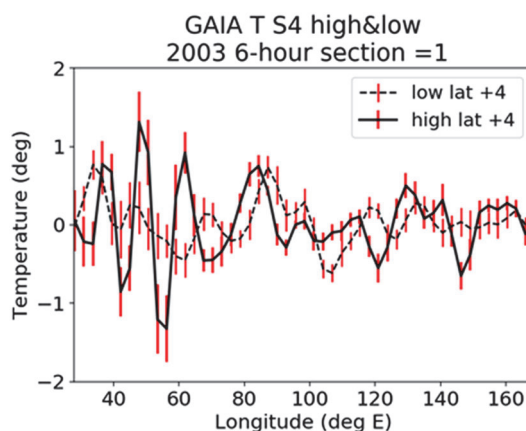
EPB 活動度の指標はインドネシアで観測された GPS 電波のシンチレーション指数 S4 とした。中性大気については、電離圏を含む全地球大気のシミュレーション GAIA の温度や風速を用いた。我々の研究から得られた新しい知見は、1) EPB 活動度と中性大気との相関関係が広い範囲で観測されること、2) EPB 活発日には気温および風速の振幅が増強されること、3) EPB 活発日に見られる大気擾乱の増大は電離圏における大規模波動の特徴と類似していること、等である。これらは、EPB と中性大気との結合をより明確に支持する結果となった [2]。

参考文献

- [1] Ogawa T, Miyoshi Y, Otsuka Y, Nakamura T, Shiokawa K (2009) Equatorial GPS ionospheric scintillations over Kototabang, Indonesia and their relation to atmospheric waves from below. *Earth Planets Space*, **61**, 397–410.
- [2] Yamamoto, M., Y. Otsuka, H. Jin, Y. Miyoshi (2018) Relationship between day-to-day variability of equatorial plasma bubble activity from GPS scintillation and atmospheric properties from GAIA assimilation, *Progress in Earth and Planetary Science*, **5**:26, doi:10.1186/s40645-018-0184-7.



GPS S4 指標の日々の変動と 2hPa（高度約 40km）の GAIA 温度との相関は、南緯が伸びた低緯度地域の高相関領域（「D」で示す）を示す構造。



EPB 活発日における GAIA 温度（実線）は、EPB 不活発日のデータと比較して、経度方向のばらつきが増大する。

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/>

「レクテナからの高調波再放射を利用したレトロディレクティブシステムの研究」

当研究室ではマイクロ波を用いた電波放射型無線電力伝送の研究開発を行っており、重要な研究課題の一つとして「受電システムの存在する方向に正確に無線電力伝送をすること」が挙げられる。この研究課題の解決策の一つとして「レトロディレクティブ」と呼ばれる手法がある。レトロディレクティブとは、受電システム側から送電システム側にパイロット信号を放射し、送電システム側でパイロット信号の到来方向を何らかの手法で推定して、パイロット信号到来方向に電波（マイクロ波無線電力伝送の場合はマイクロ波電力）を送り返す仕組みのことである。レトロディレクティブを構築するにはパイロット信号が必須となるが、当研究室ではレクテナ（受電アンテナ+整流回路）の整流回路の非線形性に着目して、整流回路で発生する高調波をパイロット信号として利用したレトロディレクティブシステムの研究開発を行った。レクテナに送電されるマイクロ波電力を利用してパイロット信号を生成するため、受電システム側にはパイロット信号用の発振器や電源は不要である。また、類似のシステムとしてRF-ID方式やバックスキッタ方式が存在するが、今回提案する手法は整流回路以降の後段回路が全く不要である点において非常に簡便なレトロディレクティブシステムを構築できる。

実際に構築した高調波再放射レトロディレクティブシステムの原理検証実験写真を図1左に示す。送電システムには周波数 2.45 GHz での 2 素子アレーアンテナを用いた。各アンテナからのマイクロ波出力は 20 W とした。送電システムから 4.6 m 離れた位置に半波長ダイポールアンテナを有するレクテナを設置し、レクテナの出力直流電力を計測した。一方で、レクテナから再放射される周波数 4.9 GHz の二次高調波の到来方向を推定した。到来方向推定システムでは、干渉計法により 2 素子の高調波受信アンテナ間の位相差を到来方向推定データとして出力し、そのデータを送電アレーアンテナの各素子の位相制御データに変換する。以上の構成により、高調波の到来方向すなわちレクテナが存在する方向にマイクロ波を自動的に送電することが可能となる。実験結果を図1右に示す。グラフの横軸および縦軸はそれぞれ送電アンテナの方向およびレクテナでの出力直流電力を示す。凡例の「ビーム制御なし」は、送電アレーアンテナの各素子を同位相で励振させたときの結果であり、送電アレーアンテナのビームパターンに相当するものである。「手動ビーム制御」は、回転台を回転させた際にレトロディレクティブシステムを用いずに、レクテナ方向へのビーム制御を手動で逐次実施した場合のパターンである。「レトロディレクティブシステム」は高調波再放射レトロディレクティブシステムを用いた場合のパターンである。実験結果より、レトロディレクティブシステムは手動ビーム制御と同等のビーム制御を自動で行えており、今回提案する高調波再放射レトロディレクティブシステムの原理実証に成功した。

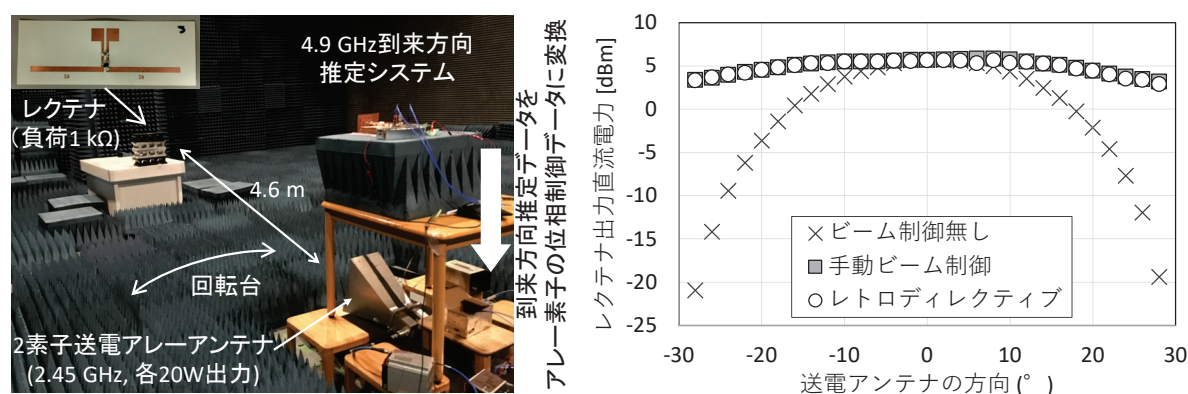


図1 高調波再放射レトロディレクティブシステムの原理検証実験写真（左）および実験結果（右）

博士論文概要

[課程博士一覧]

塩 見 準	「Performance Modeling and On-Chip Memory Structures for Minimum Energy Operation in Voltage-Scaled LSI Circuits」 (低電圧集積回路の消費エネルギー最小化のための解析的性能予測とオンチップメモリ構造)	平成 29 年 11 月 24 日
王 荀	「Entity-Centric Discourse Analysis and Its Applications」 (エンティティに注目した談話解析とその応用)	平成 29 年 11 月 24 日
大 島 諒	「Study on spin-charge conversion and spin transport in two-dimensional systems」 (二次元電子系におけるスピン電荷変換およびスピン輸送についての研究)	平成 30 年 3 月 26 日
北 野 圭 輔	「複数層一括融着による多層 3 次元フォトニック結晶形成に関する研究」	平成 30 年 3 月 26 日
釜 江 典 裕	「動作時の性能補償に用いるセルベース設計に準拠した基板電圧生成回路」	平成 30 年 3 月 26 日
Prasanna Raj Noel Dabre	「Exploiting Multilingualism and Transfer Learning for Low Resource Machine Translation」 (低リソース機械翻訳における多言語性と転移学習の活用)	平成 30 年 3 月 26 日
山 下 翔 大	「Coexistence of Wireless Communication and Non-communication Systems」 (無線通信及び非通信システムの共存)	平成 30 年 3 月 26 日
堤 卓 也	「Field Measurement and Analysis of Next-Generation Optical Access Network with Optical Amplifiers」 (光アンプを適用した次世代光アクセスネットワークのフィールド測定、及び解析)	平成 30 年 3 月 26 日
高 橋 康 輔	「Camera Calibration Based on Mirror Reflections」 (鏡面反射を利用したカメラキャリブレーション)	平成 30 年 3 月 26 日
KANG DONGYEON	「Mid-Wavelength Infrared Thermal Emitters using GaN/AlGaIn Quantum Wells and Photonic Crystals」 (GaN/AlGaIn 量子井戸とフォトニック結晶に基づく中波長赤外熱輻射光源の開発)	平成 30 年 5 月 23 日
北 村 尊 義	「人々の同調意識に着目した環境配慮行動促進のための情報通信技術の活用」	平成 30 年 7 月 25 日
Elarabi Asem S Amar	「Polarization behavior of high- T_c superconducting terahertz emitters」 (高温超伝導体テラヘルツ光源の偏光特性に関する研究)	平成 30 年 9 月 25 日

塩 見 準 (小野寺秀俊教授)

「Performance Modeling and On-Chip Memory Structures for Minimum Energy Operation in Voltage-Scaled LSI Circuits」

(低電圧集積回路の消費エネルギー最小化のための解析的性能予測とオンチップメモリ構造)

平成 29 年 11 月 24 日授与

情報通信技術の急速な発展を背景に、省エネルギーな LSI (Large Scale Integration) の実現が求められている。規定値より低い電源電圧 (例えば 400 mV) で LSI を動作させることで大幅に消費エネルギーを削減できるが、極低電圧領域では半導体加工技術に起因する LSI の性能ばらつきが顕在化して歩留まりが低下する。歩留まりを保証しながら省エネルギー動作を実現するためには、低電圧回路の性能ばらつきのモデル化が必須である。本論文では、まず以下の 2 課題に取り組み、低電圧回路の性能モデル構築および設計技術開発に取り組んだ。

課題 1. 極低電圧動作する LSI のための遅延ばらつきモデル: トランジスタの製造時特性ばらつきにより、論理ゲートの伝搬遅延が統計的にばらつく。論理ゲート単体の遅延ばらつき分布が明らかになると、SUM や MAX 等の統計演算を繰り返すことで回路全体のクリティカルパス遅延のばらつき分布を見積もることができる。本論文では、論理ゲートの遅延ばらつきが極低電圧領域で対数正規分布に従う事実に基づき、対数正規分布の統計演算を精度良く近似する閉形式関数を提案した (図 1 “Analytical Model”)。提案モデルに基づき、プロセッサのパイプライン段数や、次課題で述べるオンチップメモリの読み出し回路を例に、性能歩留まり (製造台数に対して要求動作速度を満たす回路の割合) を高める低電圧回路構造を明らかにした。

課題 2. 極低電圧動作に適したオンチップメモリ構造: 一般的な LSI に組み込まれている SRAM (Static Random Access Memory) は、アナログ素子を駆使したメモリ回路であるため、極低電圧領域で誤動作する問題を抱えている。SRAM の代替として SCM (Standard-Cell Memory) の研究を行った。スタンダードセルは、図 2 (a) のように高さが規格化された論理ゲートであり、デジタル集積回路の基本構成要素である。SCM はスタンダードセルのみで設計されるため、極低電圧領域における安定動作が保証される一方実装密度に乏しい。セルの高さを可能な限り低くした SCM 専用スタンダードセル構造 (図 2 (b)) を提案し、既存 SCM より 20% の面積効率改善を実現した。SCM を搭載したプロセッサを商用 65-nm プロセスで試作し、300 mV の電源電圧で安定動作することを実証した。

極低電圧領域では、回路動作速度が数 MHz まで低下するため応用先が限定的である。高負荷計算に対して LSI の電源電圧 (VDD) を動的にブーストすることで、高速動作と省エネルギー動作を両立できる。上記 2 課題と並行して LSI の VDD および基板電圧 (VBB) の動的制御技術の開発に取り組んだ。VBB 制御により近年の微細プロセスの問題である漏れ電流によるエネルギー消費を効果的に削減できる。「与えられた要求動作速度のもと、消費エネルギーを最小化する VDD と VBB」を MEP (Minimum Energy Point) と本論文で定義する。計算負荷やチップ温度など、様々な稼働条件に対して LSI が常に MEP で動作するための電圧制御技術基礎理論を構築した。

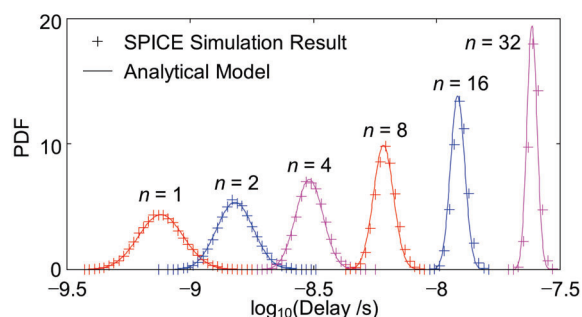


図 1: 様々な論理段数 (n) を持つバッファチェーンの遅延ばらつき分布 (PDF)。電源電圧 400 mV。

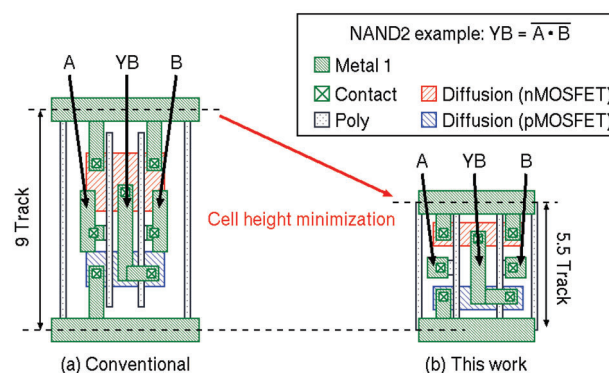


図 2: 面積効率に特化したメモリ専用スタンダードセル。

王 荀（黒橋禎夫教授）

「Entity-Centric Discourse Analysis and Its Applications」

（エンティティに注目した談話解析とその応用）

平成 29 年 11 月 24 日授与

Discourse analysis is proposed to address various problems relating to building meaning from a piece of text. It aims to extract the information carried by a piece of text and present the information in a computer-understandable way. We propose a bottom-up analysis scheme of discourse understanding based on structuralism. The basic idea is to draw meaning from discourse by identifying the components of discourse and the relationships between these components.

Discourse corresponds to scenarios in real world. Every discourse unfolds around one or several entities and describes the state of each entity and the relations between them. Thus discourse analysis equals understanding the states of entities and their relationships.

This thesis discusses the problems emerging in conducting bottom-up discourse analysis, including identifying components of discourse, analyzing relations between entities and building meaning representations using entities. To identify the elements in discourse, we firstly need to collect all the entities, both explicit and implicit ones. Recovering implicit elements from discourse is referred to as “empty category” detection. We use a neural network to encode tree-based features into a dense vector and predict and recover empty categories based on the vector. After collecting all the entities, we develop an entity-based meaning representation model. The proposed model encodes information into entity-centric representations. In contrast to most neural network models which rely on an encoder to represent text as vectors, and conduct reasoning or calculation (question answering/translation) using the vector representations, here we focus on using entities to represent meanings of text. With all the entities collected in text, we use a recurrent entity encoder to regenerate the text. The loss is used to update the states of entities so as to encode information contained in text into entities.

These entities and their states are then passed to downstream tasks. For example, In machine translation, the mapping of entities across languages are less volatile, say, mappings like “I- 私”, “apple- 林檎” always hold no matter how the context changes. External resources like dictionaries can be used to assist the mapping of entities across languages. Other information like the relationships between entities are subject to change. We use an additional relation vector to represent the volatile information. Translation is conducted from two different aspects, entity translation and relation translation. The proposed meaning representation method can also be used in other tasks like question answering as discussed in the thesis.

Our proposed entity-centric representations aim to map discourse to real world scenarios. It helps build strong and robust representations for “general-purpose”. Besides, since most knowledge bases are constructed as entity-centric, these external knowledge can be easily encoded into the proposed scheme. In the future, we will focus on improving entity-centric representations using external knowledge and the interpretability of neural models toward better discourse analysis.

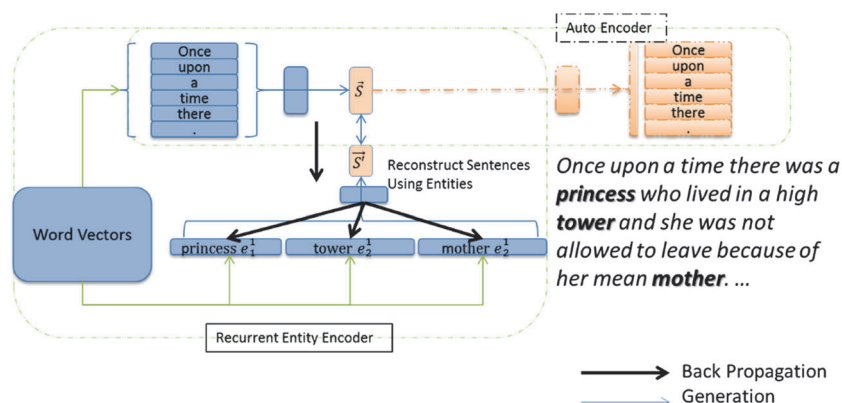


Figure 1 Recurrent Entity Encoder

大 島 諒（白石誠司教授）

「Study on spin-charge conversion and spin transport in two-dimensional systems」
 （二次元電子系におけるスピン電荷変換およびスピン輸送についての研究）

2018 年 3 月 26 日授与

電子が有する電荷とスピンを同時に制御する研究領域であるスピントロニクスは、不揮発性メモリやスピン流を用いた低消費電力化への応用が期待されると同時に、従来エレクトロニクスとは異なる新たな固体物理学を開拓する手法の一つとなるため学術的興味を引いて止まない分野である。研究における基盤材料は金属・半導体・有機材料など多岐に渡るが、近年、二次元電子系が注目を集めている。低次元であるが故の閉じ込め効果は遍歴電子へのスピン軌道相互作用として顕在化し、スピントロニクスにおいて重要な効果がいくつも報告されている。

本研究では二次元電子系におけるスピントロニクス開発として、(i) 単層グラフエンにおけるスピン-電荷変換現象（逆スピンホール効果）の観測、および (ii) $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ （以後 LAO/STO と表記する）界面における室温スピン輸送を達成した。ここでは研究 (ii) について紹介する。LAO/STO は構成材料が酸化物絶縁体でありながら、その接合界面は金属的な電気伝導を示す。内含する豊かな電子輸送物性が報告されているが、低温で強いスピン軌道相互作用が報告されたことから良好なスピンコヒーレンスは期待されておらず、スピン輸送は未達成であった。本研究では LAO/STO 界面を用いたスピン輸送の可能性について議論し、室温でのスピン輸送観測を研究目的とする。室温スピン輸送の素子構造と結果を図 1 と 2 にそれぞれ示す。LAO/STO 上に強磁性 / 非磁性体電極を非局所で作製した。強磁性体中の磁化の歳差運動により LAO/STO 界面にスピン流が生成されるが、スピン流が輸送されると非局所の非磁性電極中で、スピン流由来の起電力（逆スピンホール効果）が観測される。磁化の歳差角が最大となる共鳴条件（強磁性共鳴）において最もスピン流が生成されるが、共鳴磁場（ H_{FMR} ）周りで非磁性電極から逆スピンホール効果による起電力が観測された。これは LAO/STO 界面を介したスピン輸送を意味する。従来のスピン拡散モデルによる計算、および信号の輸送長依存性からスピン拡散長について見積もった結果、その長さが 340 nm となった。この長さは良好なスピン輸送媒体として用いられる銅などの金属材料と同程度である。さらに、従来材料では数 fs から数百 ps のスピン寿命（スピン偏極が破れるまでの時間）は LAO/STO 界面では 10 ns もの長さを持つことが明らかとなった。

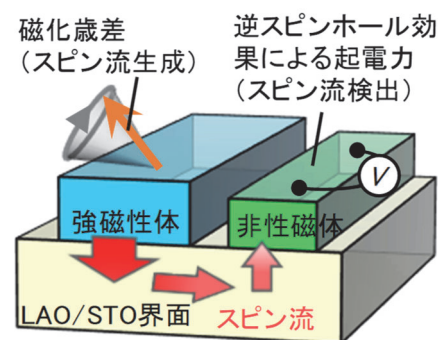


図1 スピン輸送実験の素子構造

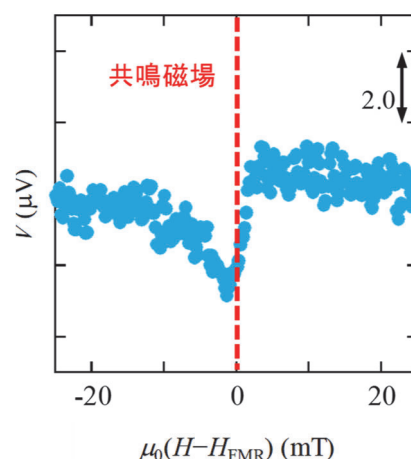


図2 非磁性電極から得られる起電力

北 野 圭 輔 (野田進教授)

「複数層一括融着による多層 3 次元フォトニック結晶形成に関する研究」

平成 30 年 3 月 26 日授与

本論文は 3 次元フォトニック結晶による低損失光制御の実証に向けた基盤技術として、3 次元フォトニック結晶を高速に作製する技術を開発し、多層 3 次元フォトニック結晶による低損失光制御の実証結果をまとめたものである。

光通信帯域の光の波長オーダの周期構造を有した、立体的な人工ナノ構造である 3 次元フォトニック結晶は、光導波や光共振器を立体的に形成・配置可能という特徴を有するものの、一般に形成が困難であるという課題を抱える。本論文では立体光制御を実現したウエハ融着による作製法を發展させ、3 次元フォトニック結晶の高速な作製法の開発と多層 3 次元フォトニック結晶における光伝搬、光共振現象を実証したものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 順次行われてきた融着工程を、複数層一括して行うことで融着回数を $1/6$ 以下とする 3 次元構造の作製手法 (図 1) を開発した。特に、基板サイズの拡大による融着の可否と融着時の位置合わせについて詳細に検討し、開発に成功した。
2. 内部に空隙を形成した 32 層の 3 次元フォトニック結晶を形成し、実験評価した。具体的には、空隙を伝搬した光を出力するための積層型斜め導波路を、3 次元フォトニック結晶内に数十 μm 離して複数配置し、空隙へ光を入力した。その結果、各出力導波路から光が出射される様子を観測し 3 次元フォトニック結晶内部の空隙を介した光伝搬の実証に成功した。
3. 32 層の 3 次元フォトニック結晶を形成し、内部に形成した光導波路と光共振器について実験評価した。形成した光導波路について、光学特性を評価した結果、透過率が導波路形成によって増大することを示し、32 層の積層導波路を介して光が導波することを示した。また、32 層のフォトニック結晶内部に形成された共振器は、従来の 16 層構造の共振器と比較して、一桁高い光閉じ込め効果を示すことを実証した。

以上の成果は高品質な多層 3 次元フォトニック結晶を高速に作製可能とするものであり、これまでの作製方法が抱えていた課題を克服するものであるといえる。さらに、多層の 3 次元フォトニック結晶における光伝搬、共振現象を実証しており、更なる層数の増加により 3 次元フォトニック結晶による物理限界が明らかになると期待される。

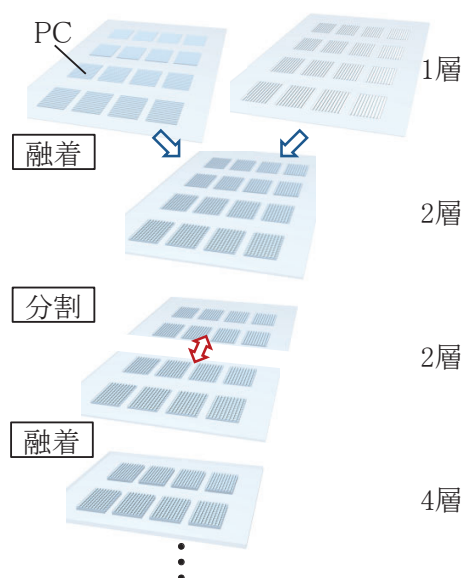


図 1 複数層一括融着による 3 次元フォトニック結晶作製法模式図。

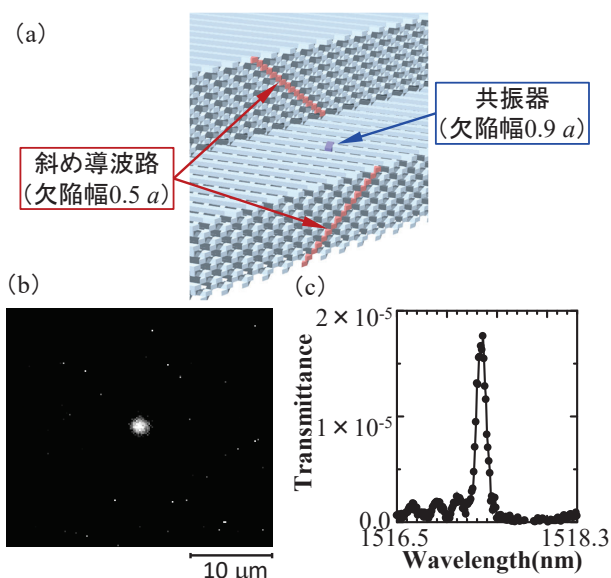


図 2 光共振器測定結果。(a) 模式図。(b) 上面顕微鏡像。(c) 透過スペクトル。

釜 江 典 裕 (小野寺秀俊教授)

「動作時の性能補償に用いるセルベース設計に準拠した基板電圧生成回路」

平成 30 年 3 月 26 日授与

本論文は、LSI のエネルギー効率を削減するために有効である細粒度基板電圧制御のための基板電圧生成回路 (BBG; Body Bias Generator) とその物理構造の設計手法を明らかにすることを目的として、面積と消費電力が小さい BBG の回路方式の提案とセルベース設計フローを適用する手法をまとめたものである。

集積回路の微細化とともに、トランジスタ特性のばらつきが顕著になりつつある。ばらつきの成分は、ロット間に発生するばらつきとトランジスタ 1 個 1 個にランダムに発生するばらつきだけでなく、チップ内の位置に依存するばらつきがあることが分かってきた。LSI 内を複数の領域に分割し、各領域で別々に基板電圧制御を行うことで、ばらつきが存在していても回路に要求される遅延時間などの性能を確保できる (図 1)。各領域に BBG が必要となるが、この回路自体の面積や消費電力を小さくし、細粒度基板電圧制御のオーバーヘッドを抑えることが難しかった。さらに、デジタル回路はセルベースの自動設計手法が取られるため、BBG はこの手法と親和性のあるものが望ましい。上記背景に基づき、面積と消費電力が小さい BBG の回路方式の提案と、デジタル回路で用いられるセルベース設計フローを適用する設計手法の提案、およびこれらの方式による回路設計を行い有効性の評価を行った。得られた主な結果は以下の通り要約される。

1. 基板電圧を印加しても流れる電流は小さいが、基板に存在する大きな寄生容量を考慮して基板電圧をフィードバックする制御系を設計する必要がある。基板電圧を変えることによる閾値電圧の変化量を考慮すると、電圧分解能は粗くても良い。電圧分解能と回路面積ならびに消費電力とのトレードオフを考慮し、適切な電圧分解能を確保しつつ回路面積と消費電力を小さくすることが可能な方式を提案した。基板電圧の制御範囲を広めるため、電源電圧を超える範囲で出力可能な BBG の方式を検討した。その中で必要となる要素回路の提案を行った。
2. BBG をデジタル回路と共に実装することで設計容易性を改善することを目指し、BBG 内のアナログ回路部分に、セルベース設計フローを適用する手法を提案した。デジタル回路ではタイミング制約によって物理設計が進められるが、アナログ回路ではマッチングや寄生成分を総合的に考慮して物理設計を行う必要がある。BBG を分割してセルへ実装し、デジタル回路と共に配置・配線を行う手法を提案した。
3. 上記の検討結果を元に、BBG を実装し、ばらつき抑制効果、動作速度や消費エネルギーの制御性、回路の特性を確認した。提案する BBG にゲート遅延時間をモニタする回路からのフィードバックを受けて基板電圧を決定する回路を付加し、ばらつきを補償する回路を構成した。複数種類の論理ゲートの遅延時間を測定し、遅延時間ばらつきを抑制することが可能であることを示した。図 2 のように、セルベース設計フローで BBG をアプリケーション回路に組み込み、提案する物理設計フローの評価とその回路の動作速度や消費エネルギーを評価した。ある動作速度において、基板電圧を印加することで動作可能な最小電源電圧を下げることができ、消費エネルギーを 17% 削減できることを確認した。提案回路により細粒度基板電圧制御を小さなオーバーヘッドかつ容易な設計で適用することが可能となり、デジタル回路のばらつき補償・消費エネルギー削減が可能であることを確認した。

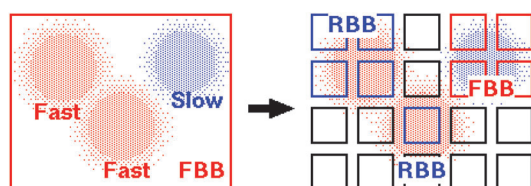


図 1：集積回路内のばらつきと細粒度基板電圧制御の概念図

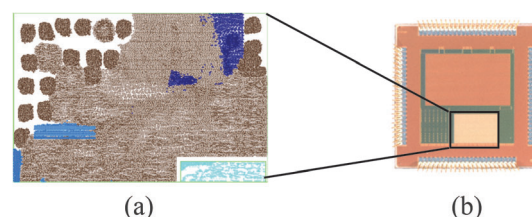


図 2：(a) BBG を組み込んだアプリケーション回路のレイアウトと (b) 試作したチップ写真

Prasanna Raj Noel Dabre (黒橋禎夫教授)

「Exploiting Multilingualism and Transfer Learning for Low Resource Machine Translation」
(低リソース機械翻訳における多言語性と転移学習の活用)

平成 30 年 3 月 26 日授与

Machine Translation (MT) is an application of Natural Language Processing (NLP) that focuses on the automatic translation between languages. Even if a language pair is resource rich, the amount of data, known as parallel corpora, for a specific domain is rather limited. One solution is to develop techniques that can leverage the data for several different language pairs or domains to improve the translation quality for a given language pair or domain by transfer learning. Another solution is to develop techniques to obtain better translation system using no additional data and instead rely on multilingualism as a form of redundancy.

While most research works claim that multilingualism is important, they do not explore more than two or three languages at a time. Although, it is important to design and develop techniques that improve upon existing models, it has been observed that black-box approaches that rely on simple pre and post processing tend to work as well as other sophisticated techniques. In this thesis, we focus on leveraging the power of multiple source and pivot languages, multiple domains, monolingual corpora and linguistic redundancy in Neural Machine Translation (NMT) and Phrase Based Statistical Machine Translation (PBSMT) settings to improve the translation quality in a resource poor scenario.

We begin the thesis with a history of MT followed by a literature survey of PBSMT and NMT. We then perform a case study of Japanese-Hindi translation and show how using multiple intermediate languages in a N-lingual corpus setting can help improve the quality of translation. We then address the problem of noise in the pivot language setting by statistical significance pruning followed by an efficient post processing technique that relies on features obtained using a deep neural network.

We proceed to first develop simple but effective transfer learning techniques to develop a single translation model for multiple domains for a particular language pair. We then attempt to leverage a resource rich language pair to improve the translation quality of a resource poor language pair. We exhaustively experiment with over 6 resource rich languages and 7 resource poor languages in a number of settings which include monolingual corpora and quantitatively show how using related languages is important. We then show that multi-source MT, a special case of multimodal NLP, can be done by simply concatenating the multiple sentences instead of modifying the NMT architecture. We also show how the multi-source model can be used for transfer learning.

Because NMT architectures are still evolving, our approaches will act as a guideline for studying the relationships between languages as well as promote the development of multilingual resources. Following a listing of the conclusions of our work, the final chapter gives an overview of the future work taking this point into consideration.

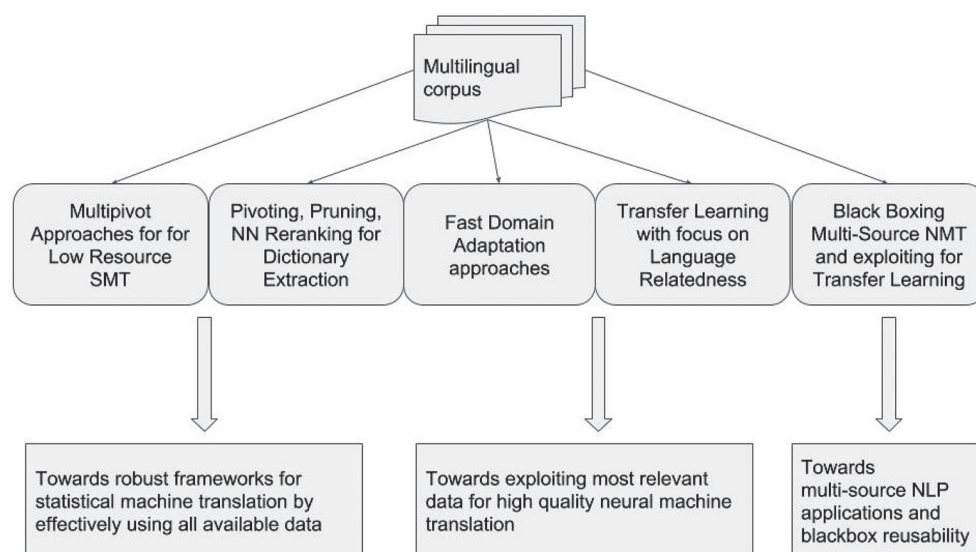


Figure 1: An overview of this thesis with its implications on the future of MT research

山下 翔 大 (守倉正博教授)

「Coexistence of Wireless Communication and Non-communication Systems」

(無線通信及び非通信システムの共存)

平成 30 年 3 月 26 日授与

本論文では、無線通信技術の高度化に伴う将来的な無線周波数帯域の枯渇を踏まえ、周波数帯域の効率利用に焦点を当てる。具体的には、無線通信及び非通信システムの双方が同じ周波数チャネルを利用する前提の下、2種類の無線通信技術における共存問題について議論する。

第一は、センサ端末のバッテリーレス化を目的とした無線 LAN 端末へのマイクロ波給電である。本課題では、マイクロ波電力伝送及び無線 LAN データ伝送を同一チャネル上で運用する場合を対象とする。本論文では、無線 LAN 端末に対して給電マイクロ波が曝されることに起因する干渉の回避を目的に、2つの方式を提案する。第一の提案は、両システムを時分割的に運用するスケジューリング法である。本方式では、無線通信側のデータフレーム及びビーコンフレームの時間情報を給電側と共有している。第二の提案は、給電波による曝され評価に基づいた適応レート制御法である。本方式では、マイクロ波給電を受信する機器に予め組み込まれたレクテナ素子を用いており、評価結果に対応したデータフレーム損失率等の履歴情報を用いて次の伝送レートを決定する。これらの提案法に関して、マイクロ波帯電波暗室にて商用の無線 LAN 機器に給電マイクロ波を放射する実験を実施し、検証を行っている (図1)。

第二は、第5世代移動通信システム向けのデータベース駆動形の周波数共用である。ここでは無線通信用途の二次利用者が、レーダ等の非通信用途の一次利用者に割り当てられた無線チャネルを共用する。本論文では、二次利用者の周波数共用を禁じ一次利用者が優先的に利用できる排他領域に着目し、一次利用者が二次利用者からの干渉を一定しきい値以下とする制約の下で、排他領域の設計及び更新に関する2つの検討を実施している。第一の検討は排他領域更新フレームワーク及び円形排他領域設計方法について提示したことであり、第二の検討は極座標または格子座標の空間グリッド導入による複雑な形状の排他領域の設計方法について提案したことである。いずれの場合についても、一次利用者を原点とする2次元座標を想定し、その周りの二次利用者の空間配置がポアソン点過程であると仮定して、一次利用者の受ける総干渉電力を確率幾何解析している。最終的には、各排他領域設計方法について数値評価を実施し (図2)、排他領域の設計に用いるデータベースの情報が詳細であるほど、排他領域を小さく設計できることを示している。

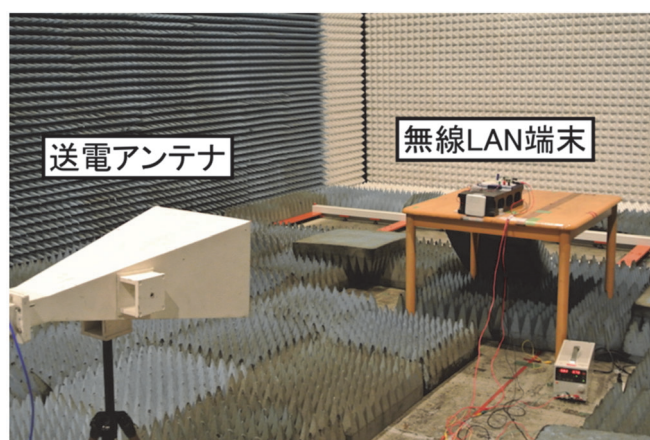


図1 無線 LAN 機器に向けたマイクロ波給電実験

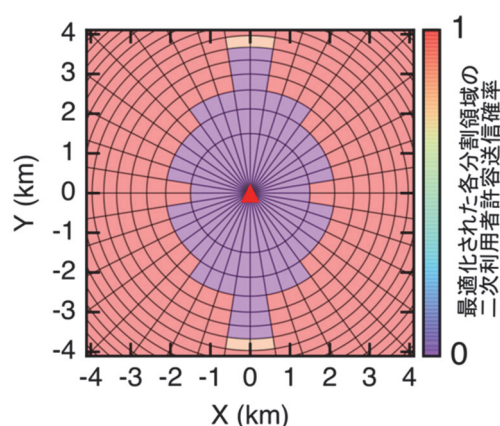


図2 極グリッドに対する排他領域設計の結果

堤 卓 也 (守倉正博教授)

「Field Measurement and Analysis of Next-Generation Optical Access Network with Optical Amplifiers」

(光アンプを適用した次世代光アクセスネットワークのフィールド測定、及び解析)

平成 30 年 3 月 26 日授与

現在主流の光アクセスネットワーク方式である EPON (Ethernet passive optical network) は 1Gb/s の伝送速度を有するものの、近年の急激なトラフィックの増加に対処するために更なる広帯域化が必要である。そこで EPON の 10 倍の伝送速度を有する 10G-EPON (10Gb/s-EPON) の商用導入が検討されているが、その導入には大きなコストが必要になる。そこで本論文では、10G-EPON に光アンプを適用した多分岐・長延化システムについて検討を行った。多分岐化は親機や光ファイバ条数を削減、長延化は通信局舎を削減することによりコスト低減を図ることができる (図 1)。本論文では多分岐・長延化 10G-EPON のフィールド実験を行うことで商用化の課題を抽出し、解決手段について詳細検討することを主眼とした。本研究で得られた主たる知見は以下の 4 点である。

1. 試作した多分岐・長延化デュアルレート 10G-EPON システムによる伝送実験を行い、商用品質に足る QoS (Quality of service) を有したシステムが構築可能であることを示した。光アンプの光学的動作や、親機側 (上り受光信号)・ユーザ側 (下り受光信号) それぞれにおける転送性能について検証した。更に N:1 冗長プロテクションによってサービス断なく冗長親機系への切り替えできることを示し、高信頼性が要求されるビジネス・モバイルサービス向けにも本多分岐化・長延化システムが適用可能である事を合わせて示した。
2. 光アンプを適用した場合の 10G-EPON の伝送距離解析手法を提案した。本解析手法では、光アンプからみた親局側とユーザ側の光分岐数をパラメータとし、伝送可能距離を 2 次的にマッピングして可視化する。また、提案解析手法が実測結果と良好に一致することを示した。
3. 光アクセスネットワークに対して光アンプを適用した場合に、光アンプ自身に対して生じる光過入力の問題と、この問題の解決に有効な AC-OA (Autonomous-Configurable Optical Amplifier) を提案した。AC-OA は、減衰した光信号を増幅再生する光増幅部と、光アンプへの光信号を最適値にするための可変光減衰器、光減衰値を制御するコントローラ、及び最適な光減衰値を計算する集中計算機、及び設備データベースからなる。また AC-OA の過入力抑制効果をシミュレーションによって示した。
4. 光アンプを適用した長延化 10G-EPON をどのようにレイアウトすればコスト削減効果が最大化されるかについて、OALP (Optical amplifier layout problem) として定式化し、局舎削減率を最大化するような光アンプの配置方法を検討した。またケーススタディとして、所与の光学特性を有する光アンプを適用した場合の最適な光アンプ配置についてモンテカルロ法により計算し、その局舎削減効果を明確化した。

上記で得られた知見を組み合わせることによって、低コストで広帯域な次世代光アクセスネットワークを商用提供できるようになり、急増するトラフィックの収容が達成されと考えられる。

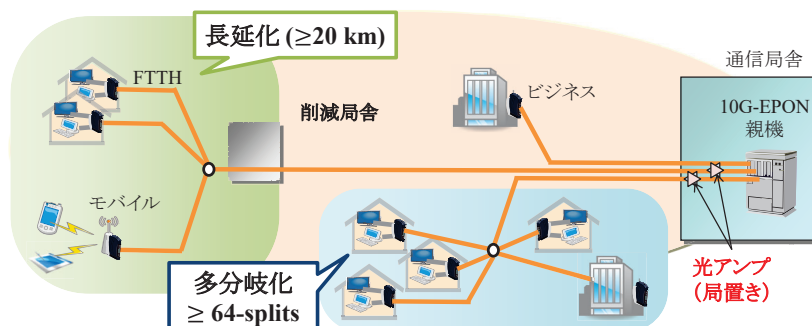


図 1. 光アンプを適用した多分岐化・長延化 10G-EPON 光アクセスシステム

高 橋 康 輔 (延原章平講師)

「Camera Calibration Based on Mirror Reflections」

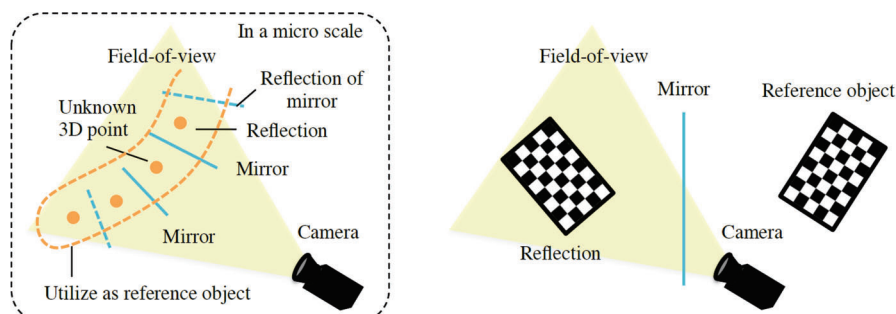
(鏡面反射を利用したカメラキャリブレーション)

平成 30 年 3 月 26 日授与

カメラキャリブレーションとは、カメラによって3次元シーンが2次元画像として撮像される過程をモデル化してそのモデルパラメータを推定するプロセスであり、レンズの焦点距離や主点、歪み係数といったカメラ内部のパラメータと、カメラの相対的な位置・姿勢といったカメラ外部のパラメータを推定する問題として、それぞれ内部キャリブレーション、外部キャリブレーションと呼ばれる。これは2次元画像を入力として3次元シーンの理解を試みるコンピュータビジョン研究において、3次元形状・運動計測、視線計測、拡張現実感など数多くの分野で最も基本となる技術である一方、従来のカメラキャリブレーションにおいては、形状が既知である参照物体を直接観測することを前提としており、このような前提が成り立たない計測環境でのキャリブレーション手法は確立されていない。

本論文は下図のように鏡を介してシーンを観測することによって、その直接像と鏡像の間に成り立つ制約条件を利用したキャリブレーションアルゴリズムをまとめたものであり、得られた成果は以下の通りである。

- (1) 複合鏡による鏡像が満たす幾何学的制約条件を導出するとともに、この制約を利用することで撮影画像中の実像・鏡像を同定するアルゴリズムを考案した。
- (2) 複合鏡による高次反射像の透視投影像を入力として、複合鏡を構成する鏡の位置・姿勢と、焦点距離・主点・レンズ歪み係数といったカメラの内部パラメータの同時推定を実現するアルゴリズムを考案した。
- (4) 複数の平面鏡の交線と、その平面鏡による鏡像との間に成り立つ直交制約を利用することによって、4通りの解の不定性があることで知られる Perspective-3-Points 問題において、一意な解を得る手法を考案した。
- (5) 複数の平面鏡を介して視野外の参照物体を撮影することによって、カメラの位置・姿勢を線形に求めるアルゴリズムを考案した。
- (6) 球面鏡を介して撮影された鏡像を入力として、視野外の参照物体に対するカメラおよび球面鏡の位置姿勢を推定するアルゴリズムを考案し、人物の眼球に写りこんだディスプレイ画像を用いた眼球位置・姿勢のキャリブレーションが可能であることを示した。



図：本研究の問題設定。左：鏡による高次反射像を利用したカメラキャリブレーション。右：視野外参照物体の鏡像を用いたカメラキャリブレーション。

KANG DONGYEON (野田進教授)

[Mid-Wavelength Infrared Thermal Emitters using GaN/AlGaIn Quantum Wells and Photonic Crystals]
(GaN/AlGaIn 量子井戸とフォトニック結晶に基づく中波長赤外熱輻射光源の開発)

平成 30 年 5 月 23 日授与

本論文は、GaN/AlGaIn 量子井戸と二次元フォトニック結晶を利用することにより、中波長赤外領域中の所望の波長で狭帯域な強い輻射を発する熱輻射光源を実現したものである。一般的に熱輻射光源は広帯域な発光スペクトルを示し、それを克服する様々な狭帯域熱輻射光源が提案されてきたが、不十分なスペクトル制御や高温耐熱性の制限による低い出力という課題を抱えていた。それに対し本論文では、高温耐熱性と物質内吸収の波長制御性に優れた GaN/AlGaIn 量子井戸に着目し、それを用いた狭帯域な吸収係数スペクトルの制御と二次元フォトニック結晶による光共振モードの制御を同時に行うことにより、高温・高出力な狭帯域な発光スペクトルとその電圧制御を実現している。本論文に示されている主な成果は以下のようにまとめられる。

1. GaN/AlGaIn 多重量子井戸において、所定の波長に狭帯域なサブバンド間吸収を生成するための設計と評価を行った。さらにフォトニック結晶を導入し、放射率ピークの最大化と面垂直方向への輻射を可能とする熱輻射光源の設計を行った (図 1)。その後、GaN/AlGaIn 狭帯域熱輻射光源の作製手法を確立した。作製した熱輻射光源を評価し、波長 4 μm 付近で極めて狭帯域 ($Q \sim 100$) な熱輻射スペクトルを 700 $^{\circ}\text{C}$ という高温において実証した。

2. GaN/AlGaIn 熱輻射光源において、大面積化による高出力化を実現するため、2 次元フォトニック結晶を支持する低屈折率基板を導入することを提案・実証した。具体的には、サファイア基板の導入により 10 mm^2 以上の大面積光源を作製することに成功し、基板を導入しない光源と比べて 10 倍以上の高出力化を実現した (図 2)。

3. 熱輻射強度が温度以外に物質の吸収係数にも依存することに着目し、GaN/AlGaIn 量子井戸の電子密度を pn 接合への印加電圧で制御することで、中波長赤外領域の熱輻射強度の電圧制御を実証した。はじめに、室温で GaN/AlGaIn 量子井戸の電子密度制御を行い、サブバンド間吸収の電圧変調動作を確認した。続いて、狭帯域熱輻射の電圧制御に適したフォトニック結晶光源の設計・作製を行い、波長 4 μm 付近で、狭帯域 ($Q > 40$) 熱輻射スペクトルの電圧変調を 500 $^{\circ}\text{C}$ という高温下において実証することに成功した (図 3)。

以上で開発された GaN/AlGaIn 狭帯域熱輻射光源は、従来の狭帯域熱輻射光源の課題を克服した重要な進展であると位置づけられ、今後、熱輻射光源の応用分野を大きく拡張することが期待される。

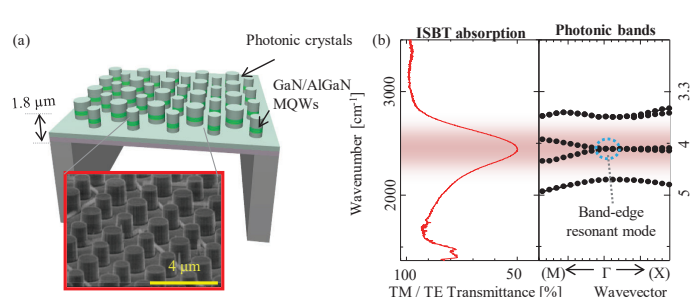


図 1. (a) GaN/AlGaIn 熱輻射光源の模式図と SEM 像 (b) サブバンド間吸収スペクトルの測定結果とフォトニックバンド構造の計算結果

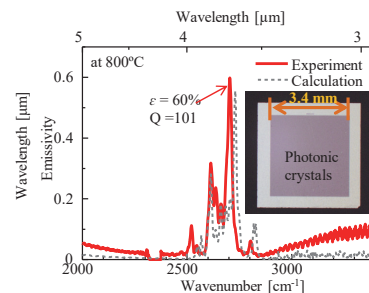


図 2. 大面積 GaN/AlGaIn 熱輻射光源の写真と熱輻射スペクトル

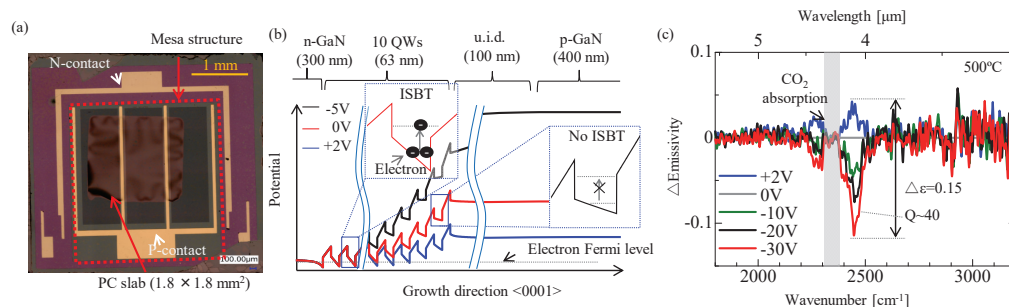


図 3. 電圧制御型 GaN/AlGaIn 熱輻射光源の (a) 顕微鏡像、(b) 電圧印加時の量子井戸ポテンシャルの計算結果、(c) 放射率変調スペクトルの測定結果

北 村 尊 義（下田宏教授）

「人々の同調意識に着目した環境配慮行動促進のための情報通信技術の活用」

2018 年 7 月 23 日授与

環境問題やエネルギー問題の解決のためには私たち一人ひとりの意識や行動の変容が必要であるとされているが、これまで当然のこととして実践してきた習慣を変えるのは難しい。また、直接的な利害関係にない問題に対して興味や理解を示す人は少ない。このような現状に対して、人々の同調意識の発生を利用する手法が考えられる。同調意識とは、人や動物が有する行動特性であり、自己の意見や行動を他者に合わせようとする意識のことである。かつて集団の団結力や集団への帰属が自己の生存や繁栄のために強く求められた時代では、政治家や教育者、マスメディアなどの強い情報発信力や権威を持つ存在の価値観に同調する人が多かったとされている。しかし、近年の価値観の多様化にともない、人の同調意識に与える影響も多様なものとなり、人は自己にとって都合の良い価値観や行動に同調しやすくなったとされている。特に、ICT の発展にともない、誰もが情報を発信できるようになり、価値観や行動においてマイノリティとされてきた人々も強い情報発信力を有するようになってきている。

本論文では、このような現状を解決する糸口として、同調意識に着目した ICT の活用方法について検討している。検討対象とした ICT は、ソーシャルネットワーク技術、ブロックチェーン技術、パーソナルアシスタント技術であり、それぞれの ICT がどのような場面で環境配慮行動（Pro-Environmental Behavior、以下 PEB）促進のための同調意識の発生を可能とするのかを実践的に調査している。この 3 つの ICT に着目した理由は、人と関連深い ICT を分類すると、「人」と人との結びつきを上げたり強化する ICT、「人が利用したり排出したりするモノ」と人との結びつきを記録したり追跡することで強化する ICT、「人にとって大量で読み解きにくい情報を管理するシステム」と人との結びつきを平易な情報伝達で強化する ICT という 3 分類が考えられ、ソーシャルネットワーク技術、ブロックチェーン技術、パーソナルアシスタント技術はこの分類にそれぞれ当てはまる代表的な ICT と考えられるためである。

この 3 つの ICT の特徴は、いずれも人の行動情報の発信量や受信量の増強を可能とする技術という点で共通している。しかし、本論文の調査結果では、単に人から情報をうまく引き出したり、人の情報を効率よく追跡したり、人の情報入手量を増やすだけでは、人の同調意識が向かないことがわかった。

例えば、ソーシャルネットワーク技術は PEB 促進対象の同調意識を PEB について話し合う人々に向けるために、PEB について話し合う人々と PEB 促進対象が交流できる場を提供できる。しかし、そのような場の提供のみではコミュニケーションが減衰し解散する事態に陥る可能性が高い。そのため、場の提供に加えて、話し合いを継続するための手法の検討が必要である。

そのため、あと少しで手が届くといった無理のない経済的インセンティブを付与したり、精神的により生き方を送りたいエウダイモニア的欲求を満たすような制度設計手法や情報提供手法の検討が必要である。そのため、経済的なインセンティブにくわえて目標を認知できたり、エウダイモニア欲求を満たせたりするような制度設計や情報提供手法を検討する必要がある。

パーソナルアシスタント技術は PEB 促進対象の同調意識を、PEB を推奨する存在に向ける方策を可能とすると考えられる。しかし、パーソナルアシスタントが PEB を推奨するだけのエージェントであれば、ユーザから無視されたり表面でのみ肯定的な態度をとられたりする可能性がある。そのため、ただ推奨するだけの存在としてだけでなく、信頼や好意のおける関係を醸成するような設計が求められる。

以上のことから本論文では、それぞれの ICT によって出現可能になる社会において、同調意識の発生する場面は考えられるが、PEB のように外部性の高い行動への同調意識を偶発的なものではなく意図的に引き出すには、実践しても良いと思える状況を構築し、そのような状況を存続させる工夫が必要であると結論づけている。

Elarabi Asem S Amar (掛谷一弘准教授)

[Polarization behavior of high- T_c superconducting terahertz emitters]

(高温超伝導体テラヘルツ光源の偏光特性に関する研究)

平成 30 年 9 月 25 日授与

The terahertz (THz) frequency range (100 GHz – 30 THz) of the electromagnetic (EM) spectrum has attracted a considerable amount of interest in the recent decades because of the numerous vibrational and rotational molecular absorption lines it contains which are used as marking regions in spectroscopy applications. Since intense terahertz radiation was achieved from a stack of intrinsic Josephson junctions (IJJs) made from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212), many studies have been performed to enhance its performance. Where the state-of-the-art Bi-2212 based THz devices are having the features of being coherent, tunable, intense ($\approx 130 \mu\text{W}$), and compact ($< 100 \mu\text{m}^2$) with an operating temperature in the cryogenic range ($\approx 77 \text{ K}$).

This thesis aims to conduct an experimental investigation of the polarization behavior of Bi-2212 based terahertz sources and to attempt to achieve polarization control over the emitted radiation. Furthermore, to explore the electrical, and spectral characteristics of the target geometries, and discuss it with regard to the measured polarization and electromagnetic simulation. Three types of mesa geometries were investigated; a truncated-edge square mesa (Fig. 1 (a)), a cylindrical mesa with notched sides (Fig. 1 (b)), and a long rectangular mesa. The design method and electromagnetic simulation were discussed for both first and second mesa geometries. All mesa geometries were fabricated and characterized in terms of their temperature dependent c -axis resistance, current-voltage curves, and detected THz emission. Simplified polarization characterization method was used to study the polarization of first and second mesa geometries resulting in a circularly polarized THz radiation with a low tunable axial ratio (AR) for both mesa types, where $\text{AR}_{\min} \approx 0.2 \text{ dB}$ (truncated-edge square mesa) (Fig. 1 (c) left), and $\text{AR}_{\min} \approx 0.8 \text{ dB}$ (cylindrical notched mesa) (Fig. 1 (c) right) tunable in frequency ranges of (0.435 – 0.457 THz) and (0.450 – 0.525 THz) respectively. A more comprehensive approach utilizing Stokes polarization parameters is used to study the rectangular mesa geometry, to unravel the effect of thermal unbalance (hotspots) influence on the emission and polarization. Contrary to the common belief, the emission of this geometry under the mentioned condition was found to be partially polarized with varying dominant polarization components (linear and circular). Possible applications for polarized terahertz sources introduced in this thesis may include circular dichroism spectroscopy, high-speed telecommunication, and polarized biomedical imaging.

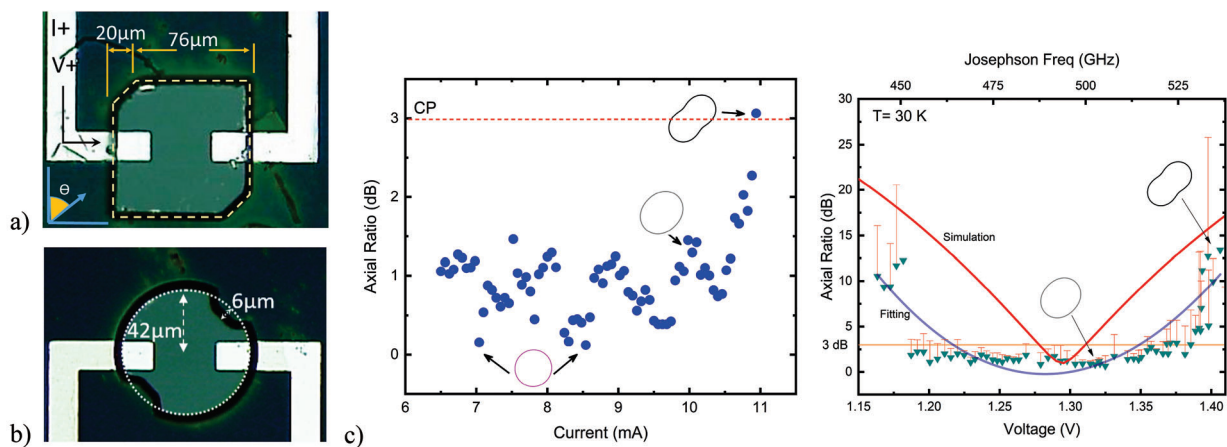


Fig. 1 Microscope image of (a) truncated edge square mesa, (b) cylindrical notched mesa. (c) Polarization properties of (left) truncated-edge square mesa in terms of axial ratio vs. applied bias current, (right) cylindrical notched mesa in terms of axial ratio vs. applied bias voltage.

高校生のページ

ナノの世界を可視化する ー ナノデバイスから生体分子へと展開する可視化技術 ー

工学研究科 電子工学専攻 電子材料物性講座 電子材料物性工学分野
小林 圭、山田 啓文

1. はじめに

一昨年、話題となったスカーレット・ヨハンソン主演のSF映画「ゴースト・イン・ザ・シェル」は、士郎正宗の作品「攻殻機動隊」が原案となっていますが、その近未来に対する独特の世界感は衝撃的であり、日本ではもとより全世界でも高く評価されています。作中では、生体器官をサイボーグ化する義体化技術や、脳の神経ネットにデバイス素子を接続する電腦化に重要な役割を果たすナノマシンが登場します。このナノマシンは、体内において細胞小器官のような機能を発現する想像上の極微なマシンですが、現実世界においても、作品中に描かれているほどの高度なレベルには到底至っていないものの、ナノトランジスタ、原子スイッチあるいは分子標的カプセルと言った、さまざまなナノデバイスやナノマシンの実用化研究が進みつつあります。

ナノというのは 10^9 を示す単位の接頭辞ですが、上述したナノマシンやナノデバイスのように、多くの場合、ナノという言葉は、ナノメートル(10^{-9}m)の大きさを示しており、原子や分子の世界における大きさに対応します。図1に示すように、例えば、水素原子の直径は0.1 nm、NaClの大きさは0.5 nmであり、また、二重らせん構造をもつDNA鎖の直径は2 nmとなります。髪の毛の直径が $100\text{ }\mu\text{m}$ (= $100,000\text{ nm}$)程度であり、私たちの体を構成する細胞の大きさでさえも $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ ($10,000\sim 30,000\text{ nm}$)であることを考えると、ナノの世界は極めて小さな世界だと改めて認識できます。このような極

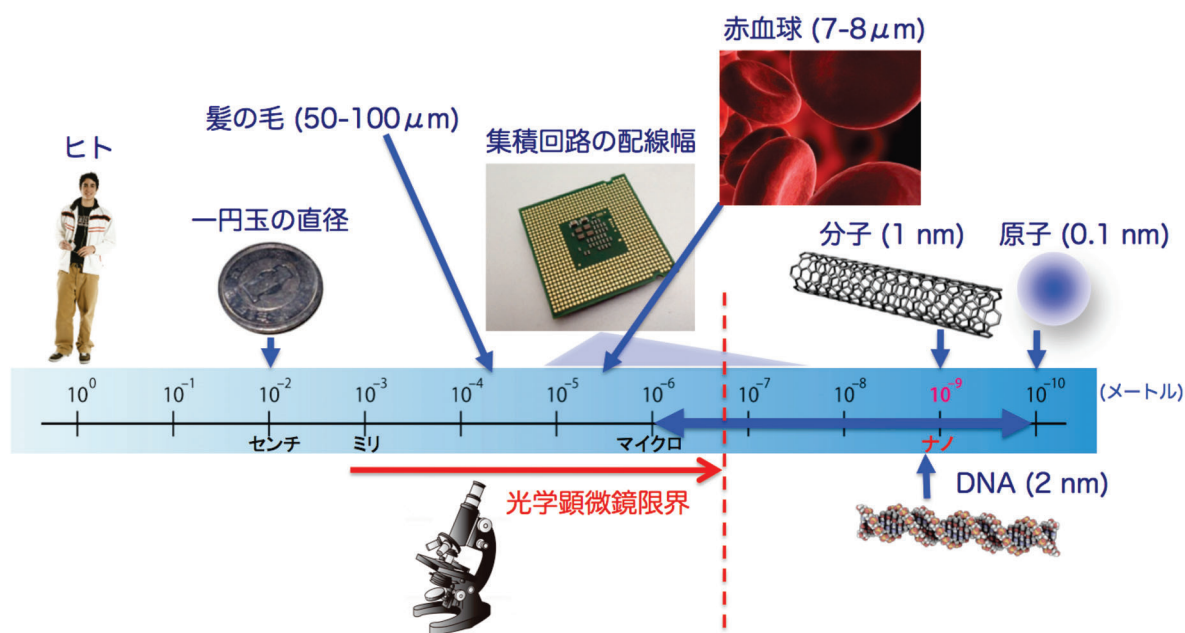


図1 ナノ世界：大きさの目安。

微の世界は、一見われわれの日常とは無縁の、隔絶した世界のように思えますが、実は思っている以上に身近な世界です。最新のスマートフォンのチップ (SoC: システムオンチップ) の電極間のサイズ (チャネル長) は既に 10 nm を切っていますし、ドラッグデリバリーシステムとして、ガン細胞の標的医療に使用されるナノカプセルは数 10 nm のサイズです。ナノの世界は、私たちの周辺にある通信や医療技術として、既に身近な存在になりつつあるのです。

2. ナノ世界を可視化するには？

微視的世界を可視化する手段としてすぐに思いつくものは光学顕微鏡です。光学顕微鏡は 17 世紀に確立されて以来、現在では広く普及していますが、その解像度には理論的限界があり、可視光の波長 λ 以下の大きさのものを捉えることはできません (レーリーの 2 点識別分解能: $0.61 \lambda / \text{開口数}$)。一方、20 世紀初頭に開発された電子顕微鏡を用いると、等価的な波長 (電子波長) が小さくなり、解像度は飛躍的に向上しますが、高エネルギーの電子線を使用することから、観察試料は電子線照射によるダメージに対して耐性のある材料に限られ、また観察環境も電子線が散乱されない真空中に限られます。しかしながら、近年、観察試料や測定動作環境にこうした制限の少ない、走査型プローブ顕微鏡と呼ばれる、全く異なるタイプの顕微鏡が開発されました。特に、走査型プローブ顕微鏡の一種である原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscopy) は、観察対象・測定環境に対する制約が原理的に存在しないという際立った特徴をもち、金属・半導体にとどまらず誘電体結晶、分子材料、生体試料などさまざまな試料のナノスケール構造・物性評価に大きく貢献しています。

ところで、現代では、ほぼ全ての記録がそうであるように、音楽記録もデジタル記録ですが、こうした中、アナログレコードが意外な人気を博しています。実は、このアナログレコードの記録・再生の方法は、AFM の仕組みと極めて似通っています。レコードの記録情報は、レコード溝に沿って作られている左右の微小な凹凸が持ち、この凹凸によって引き起こされる (溝に接触している) レコード針の左右の運動が電気的な信号として再生され、最終的に音響信号に変換されます。AFM では、原子レベルで尖った針 (探針と呼ばれます) が用いられますが、この針を観察試料の表面に沿って (接触状態で) 水平に動かします。針は試料表面の凹凸に沿って上下動しますが、この動きはレーザー光によって高感度に測定され、電気信号に変換されて、表面の凹凸情報 (= 表面微細形状) として記録されます (AFM 像: 図 2 (a) を参照ください)。実際には、針は微細な “ばね” (マイクロカンチレバーと呼ばれる板ばね) で支えられており、針の上

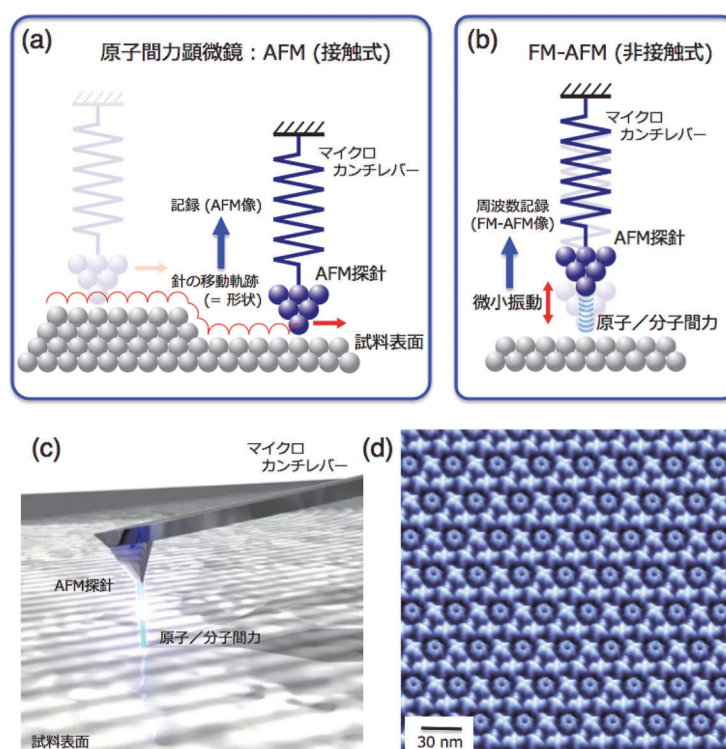


図2 原子間力顕微鏡 (AFM)。(a) AFM 動作の仕組み。(b) 周波数変調式の AFM (FM-AFM) 動作の仕組み。(c) AFM 探針およびマイクロカンチレバーが、原子間力/分子間力を検出する様子を表す CG 図。(d) 溶液中でイメージングされたたんぱく質分子結晶 (抗体分子) の FM-AFM 像。

下動はこのばねの変形量となり、針が受ける原子間力がセンシングされることになります（力学におけるフックの法則）。こんな単純な方法で、微細な構造が果たして観察できるのかと思ってしまうのですが、実際のところ、その解像度は原子レベルに及びます。現在までに AFM は飛躍的な発展を遂げ、最新の AFM では、針を試料表面から 0.1 ～ 1 nm 程離れた状態の非接触状態（あるいは疑似接触状態）で、微小振動させながら動作するようになっています。この振動周波数を AFM の針（実際には針の支持部分：マイクロカンチレバー部）がもつ機械的な共鳴周波数に設定しておくと、AFM の針と試料表面原子（あるいは分子）との間に原子間力（分子間力）がはたらいたときに、この微小振動の共鳴周波数はわずかに変化します。この周波数変化が表面微細構造として記録されます（図 2 (b), (c)）。周波数変化を記録する AFM 法であることから、周波数変調 AFM (FM-AFM) 法と呼ばれます。この FM-AFM による可視化技術は、さまざまな材料のナノスケール構造評価法として既に確立されていますが、現在では生体分子の直接観察（図 2 (d)）、さらには単一原子の原子種分析も可能となるまでに発展しています。また、次節に述べるようにナノ領域の電位や電荷を可視化することも実現しています。

3. 電位や電荷を可視化する（ナノトランジスタの可視化）

炭素 6 個がベンゼン環のように六角形に結合し、蜂の巣状の格子を組むと、グラフェンと呼ばれる 2 次元シートになります。この 2 次元シートを円筒状に丸めたものが単層カーボンナノチューブ（単層 CNT）です。単層 CNT はその直径が約 1 nm で、究極的な 1 次元材料と言えますが、一方で、CNT は極めて高い導電性、熱伝導性、耐熱性を持ち、ユニークな電気・機械特性を示す次世代のナノマテリアルとして、既にさまざまな分野でその応用開発が進められています。エレクトロニクス分野においても、CNT 内における電荷の担い手であるキャリア（電子／正孔）が高速で移動でき（高移動度）、また、散乱を受けずに移動しうる（弾道輸送）ことから、高速動作可能な電界効果トランジスタ（FET）などナノ電子素子としての実用化研究が進められています。

こうしたナノ FET デバイス開発にあたっては、その動作特性解析のために、FET の電流経路となるチャネルの電気特性を測定することが必須となります。CNT の FET の場合、チャネルは CNT そのものに相当しますが（図 3 (a) 参照）、CNT の直径は約 1 nm なので、その測定は容易ではありません。しかしながら、AFM を用いることによって、CNT の電気測定を行うことが可能になります。AFM では、AFM 探針と試料原子・分子の間にはたらく原子間力や分子間力を測定していますが、試料が電位（電荷）をもっている場合は、静電的な力を測定することで、電位（電荷）を計測・可視化することが可能となります。この可視化法は電気力顕微鏡と呼ばれます。図 3 (b)～(d) にその測定例を示します。図 3 (b) は試料として用いた CNT-FET の AFM 像で、AFM 像内の S、D はそれぞれ FET のソースおよびドレイン電極に相当します。この 2 つの電極の間には、これらをつなぐ CNT が可視化されてい

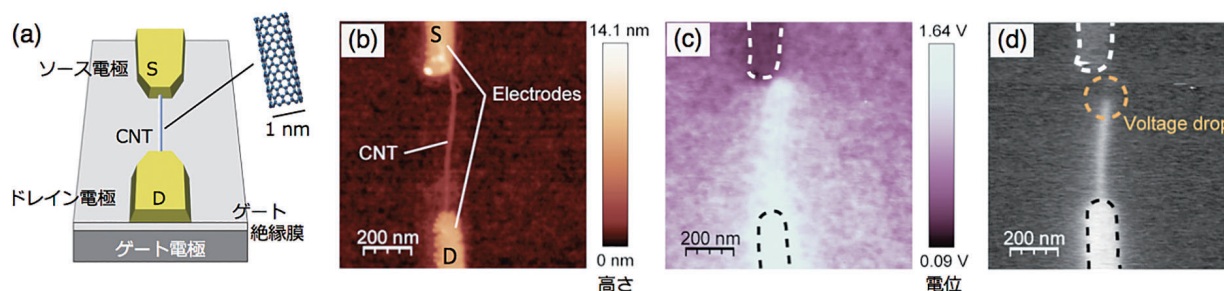


図 3 (a) カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ (CNT-FET) の模式図。(b) CNT-FET の AFM 像。(c) CNT-FET チャネル上の電位可視化像。(d) 高周波の電位変化に対する応答像（トラップ電荷は可視化されない）。

ます (= CNT チャンネル)。図 3 (c) は、同一領域の表面電位の可視化像に相当しますが、下部のソース電極が明るく、上部のドレイン電極が暗く見えるのは、それぞれの電極がその明るさに応じた電位を持っているためです。電極および CNT 以外の部分は、ゲート絶縁膜（シリコン酸化膜）の表面に相当しますが、全面にわたって中間的な明るさ（0.5 ～ 1 V に相当）を持っているのは、広範囲の絶縁部に電荷がトラップされていることを表しています（特にチャンネルに沿った絶縁部）。一方、図 3 (d) は、ドレイン電極に高い周波数で交流的に変化する電圧を加え、その周波数で応答する静電気力のみを可視化した像で、高周波で応答しないトラップ電荷は可視化されません。従って、トラップ電荷の影響を除去した電位の可視化像に相当することになります。この等価的な電位像では、チャンネルに沿って明るく見える線が、破線の円の中心付近で突然暗くなっており、電位がこの点で急激に低下していることが分かります。これは、CNT チャンネル上のこの点に、局所的な電位障壁となる欠陥があるためです。このように、AFM を利用した表面電位可視化法によって、チャンネル周辺におけるトラップ電荷や、CNT チャンネル上の欠陥位置を明確に可視化でき、新規ナノデバイス開発を行う上で、さまざまな有益な情報を取得することができます。

4. DNA 分子の可視化

インフルエンザの流行が懸念され始めると、予防接種を受けることを強く推奨されますが、これは毒性のないインフルエンザワクチンを抗原として、その抗体を私たちの体内に作り出すことによって免疫性を獲得するためです。そこには、抗体がそれに対する抗原にしか結合しないという抗原 - 抗体結合 (= 特異結合) のもつ特殊な性質が利用されています。こうした特異結合は分子認識的であり、体内にあるさまざまな生体分子（DNA、タンパク質分子など）がはたらく際に、極めて重要な役割を果たしています。冒頭で触れた作品「攻殻機動隊」におけるナノマシンは、このような生体分子を代替する人工マシンとして描かれたものだと思います。いずれにしても、生体の機能を微視的に理解するためには、DNA や各種タンパク質分子などの生体分子を直接観察することが必要不可欠となります。

DNA 分子は、デオキシリボース（5つの炭素から成る環状の糖分子）とリン酸で構成される 2 本の鎖（糖 - リン酸鎖）が、アデニン、グアニン、シトシン、チミンと呼ばれる 4 種の（核酸）塩基によって平行に結合した構造（二重鎖）をしています。これら塩基の配列順序は遺伝情報を担っており、生体維持の根源的役割を果たしています。DNA が右巻き二重らせん構造を形成していることは広く知られ

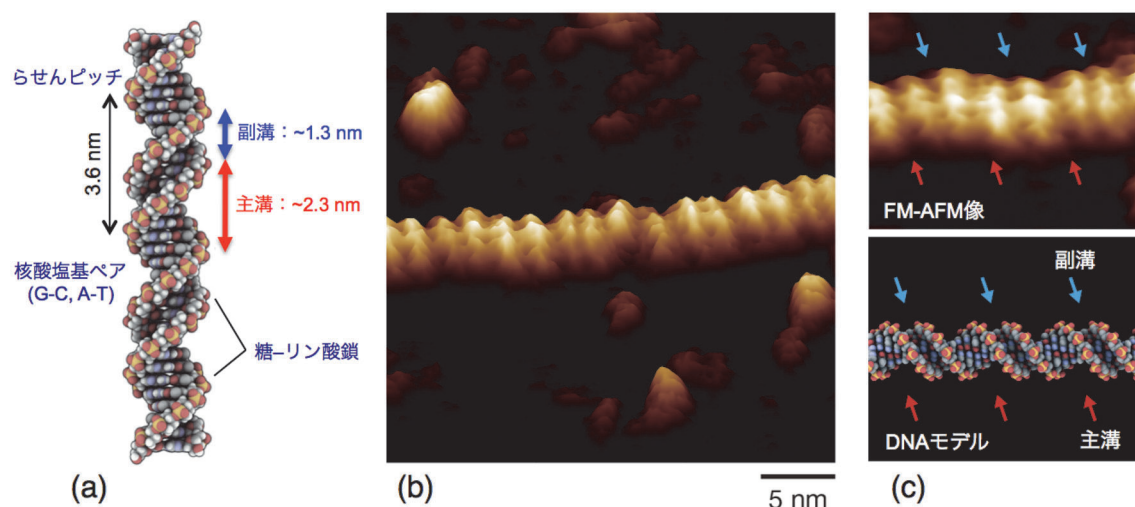


図 4 (a) DNA の二重らせん構造。(b) 生理環境下の DNA の FM-AFM 像。(c) 二重らせん部の拡大 FM-AFM 像 (上) とそのモデル (下)。

ていますが、これを解明したのはワトソンとクリックという二人の分子生物学者であり、これもまた広く知られていますが、この二重らせん構造はワトソン・クリックモデルと呼ばれています。

DNA 二重らせん構造は、結晶化した試料に対して X 線構造解析を行うことで解明されてきましたが、この手法では生理環境下での DNA の状態を観察することは難しく、また DNA-タンパク質複合体など、DNA 分子の特定位置の構造を解析することは困難でした。こうした理由から、溶液中で測定が可能な AFM による DNA 観察が試みられ、一定の成果を挙げてきたものの、二重らせんを解像できるような高分解能観察の報告は長くありませんでした。近年、FM-AFM の開発によって、基本的には AFM 探針と試料は接触することなくなり、生体分子の溶液中の自然な構造を壊すことのない、分子スケールでの観察が可能となりました。

図 4 (a) に、溶液中における DNA 分子（プラスミド DNA）の FM-AFM 像を、また、図 4 (b)、(c) にその拡大像と対応する構造モデルを示します。この AFM 像は、右巻き二重らせんモデル（ワトソン・クリックモデル）に対応し、交互に現れる幅の広い溝（主溝）とやや狭い溝（副溝）の 2 つの溝によって、二重らせん周期が形作られていることが分かります。観察された二重らせん周期は、3.7 nm であり、ワトソン・クリックモデルの 3.4 nm より明らかに長く、生理条件下ではその構造が緩和して、モデルとの違いを生み出していると考えられます。

最小の生体分子である DNA の直接観察が実現したことは、生体内に存在する多様な生体分子の構造・機能解析を大きく進展させることになり、さらには、こうした構造・機能解析によって、医薬分野で求められているナノバイオデバイス／センサー開発を加速する多くの情報がもたらされると期待されています。

5. おわりに

この 10 年の間で AFM による可視化技術は目覚ましい発展を遂げました。この解説記事では、カーボンナノチューブの電位可視化、および生理環境下の DNA 二重らせん構造観察という 2 つの話題を取り上げましたが、これ以外にも、AFM 可視化技術については、エポックメイキングな発展がいくつもありました。例えば、その一つに表面原子／分子周囲の水分子の直接可視化があります。液体状態の水分子は、当然ながら短時間でランダムに揺らぎ、拡散していますが、固体表面近傍の水分子は統計力学平均的には平衡位置に留まることから、水分子分布の可視化が実現しました。さらには、溶液中のイオンも固体表面の帯電状態を反映して、その空間分布に分子スケールの偏りがあることが見いだされました。こうした研究は、固液界面における物理・化学現象を利用した種々のデバイス開発、さらには、生体内のより複雑な高次機能の分子メカニズムの解明へとつながるため、今後の技術展開が注目されています。一方、これまでのナノ構造の顕微分析においては、主にその空間分解能の高さに焦点が当てられており、測定対象は静的であるか、比較的ゆっくりと変化する場合がほとんどでした。近年、高速 AFM 法および時間分解 AFM 技術が急速に発展し、溶液中におけるモーターたんぱく質分子の回転運動が高速 AFM によって可視化され、また、FET チャネル上のキャリアの移動・緩和過程が時間分解 AFM／電気力顕微鏡によって直接可視化されるようになりました。特に、時間分解 AFM 法は、空間マッピングという手法に基づいており、詳細には触れませんが、時間分解能と空間分解能とは相補的な関係にないため、2 つの分解能を同時に向上することが可能であり、さまざまな分野における原子・分子スケールの動的プロセスの可視化法として発展することが期待されます。

今後、ナノエレクトロニクス、ナノ材料科学・工学やナノ機械工学などさまざまな科学技術分野が多面的に融合して行く中で、ナノ可視化およびそれから派生した技術はさらに発展して行くものと考えられ、例えば、冒頭で触れた高度なナノマシンの実現につながればと密かに期待しています。

学生の声

参萬円のウイスキー

情報学研究科 通信情報システム専攻 守倉研究室 博士後期課程2年 神 矢 翔太郎

ロイヤルハウスホールド、ウイスキーが好きな人にはご存じのことかも知れません。英国でもバッキンガム宮殿内と王室御用達のホテルバーでしか味わえないウイスキーが、英国王室と日本の皇室との友好の証として、日本では特段苦勞することなく入手が可能です。日本だけが販売を許可されている、すごくないですか？とはいえ、さすがは英国王室御用達、タイトル通りの価格設定であり、博士学生にはなかなか手が出ない代物です。

とはいえ、数千円程度のウイスキーばかりを飲み続けるもなんなので、背伸びをして買ってみました。当然「こんなに高いウイスキーなのだから、さぞ美味しかろう」という期待があります。一口飲み、二口飲み、さて。……残念ながらよく分かりません。理性が「30,000円のウイスキーを美味しく感じないわけがないだろう」と味覚に訴えかけてきます。「コレは美味しいはずだから美味しいと思っておこう」そんな滑稽な感覚です。心から「これは素晴らしい風味だ!」と思うには、私は実力不足でした。

そんな私でしたが、最近では色々と飲み比べをしてみて、違いや特徴、美味しいとはいったいどんな感覚か、何が値段を高くせしめるのか、などを分かった気になっています。全く分からないよりは、一歩前進です。思い返せば、知識や経験がない段階では、物事の良さを評価することがままならなかったのです。この話は何もウイスキーだけの話ではありません。例えば、「板前のシゴト」についての知識がないと、高級寿司屋を高級たらしめる理由も分かりません。2万円のお寿司屋さんに行って初めて、不勉強に気付き猛省しました（浪費じゃないです）。物事の良し悪しを判断するには実力が必要です。何も考えず、「ウイスキーなんて高いのも安いのも変わらん」などと言ってしまうと、さて。

やったこともないものを勝手に神格化しない、やったこともないものを勝手に軽蔑しない、何にせよまず手を出して、腰を据えて経験を重ねる。何をするにも大事なことかなと思います。あ、研究についても、です。

なぜその研究をするのか

工学研究科 電気工学専攻 引原研究室 博士後期課程1年 萬 成 遥 子

表題の質問に対し、多くの研究者はどのように答えるのでしょうか。「上司からの指示」という回答を除けば、主に二通りの答え方があるかと思います。一つ目は、その研究対象の興味深い点を述べるといえるものです。もう一つは、その研究の社会的価値を説明する方法です。私が研究室に配属されてから研究を進めていくうちに、後者の方法が自分にとっては案外難しいということに気づきました。

これまで私はレドックスフロー電池を対象に動作解析などを行ってきました。この電池はポンプによる電解液の循環機構を持っています。電解液の循環にまつわる諸々の問題を興味深いと思い、研究の対象に選びました。しかし、世間を賑わせているリチウムイオン電池に比べ、レドックスフロー電池の知名度は決して高くはありません。こうした電池を扱う以上、必ず出くわす質問のうちに「リチウムイオン電池でいいじゃない。なんでわざわざそんなものを扱っているの?」といった類のものがあります。一時期、この類の質問を受ける度に神経を尖らせて反論をしていました。その回答に納得してもらえなかったこともあります。そのような事態を招いた原因の一つが自分の説明不足や力不足だ、と今では反省しております。

言うまでもなく、研究の社会的価値を相手に納得させることは重要です。工学になると、この点がよりシビアになります。ただ、自分の研究の何が興味深いのかを考える視点も大事だと個人的には思っております。興味の対象とするものと社会的価値が広く認識されているものが一致しない場合もあるでしょう。それを理由に研究をやめるような事態を避けたいというのが、私の本音です。そのためには、社会的価値を説明する努力と、説明を裏付ける実績が求められるのだらうと思います。そんな研究者になれるように今後も精進したいと思います。

教室通信

エレクトロニクス・サマーキャンプ実施状況

サマーキャンプ運営委員会：松尾哲司、中西俊博、木村真之、廣本正之、奥田貴史

学科行事「エレクトロニクス・サマーキャンプ」が2008年に開始して今年度で11回をかぞえます。電気電子工学科が主催する在学生（1～3回生）のための課外学習プログラムで、単位は付与せず学生本人の意思で自主参加する形を取っています。与えられた課題に3日間をかけてじっくりと取り組み、創意工夫や試行錯誤を積み重ねます。明確なゴールを用意しないことで、参加者の数だけアイデアが生まれることもサマーキャンプの大きな特色です。キャンプと称していますが、時間を気にせず、仲間とコミュニケーションを密にしてキャンプの気分で充実した時間を過ごそうという意味でこの名称を使っています。最終日の午後にはコンテストという形で学生達に成果を披露してもらい、優秀者には学科長名で賞を授与しています。

2008年開始時点では細々と立ち上がりましたが、学部時代に参加してくれた学生が大学院生となり、TAとしてサマーキャンプの企画・運営として活躍してくれています。今年は20研究室から35名のTA（学部4回生、大学院生）が運営に参加してくれました。学生TAが主体的になって企画・運営をおこなう姿は学部生にとっても良い影響を与えています。また、サマーキャンプの1期生、2期生の参加者からTAを経て工学研究科助教として着任する例もできました。このように学生主体のイベントとして確立しつつあり、人材育成の場として非常に良い循環ができています。

機材の老朽化もあり、今年度から2回生、3回生のテーマを変更しました。各学年の課題は以下の通りです。

1回生「LEGO Mindstorms によるロボット製作」

サマーキャンプ立ち上げ当初からのなじみ、LEGO Mindstorms NXT をもちいたロボット競技です。それぞれが作成したプログラムにしたがって完全自律動作を行います。LabVIEW をベースとしたプログラム作成ソフトを使用しながら、カラーセンサをはじめとした種々のセンサを使いわけ、所望の動作をプログラムします。楽しみながらも電気電子工学の一端にふれることができ、1回生競技として定着しています。

2回生「Arduino を用いてライントレーサをつくろう！」

2回生になれば、プログラミングや電気電子回路の基礎を履修済ですので、それらを生かせる題材としてワンチップマイクロコンピュータによる装置の設計・製作及びその制御を課題としました。今年度からはマイコン Arduino を使用し、電子工作・プログラミング両面での自由度を生かしたライントレーサの作製を行いました。電子工作・プログラミング両面での各個人の創意工夫や試行錯誤が見られ、非常に奥の深い内容となりました。

3回生「倒立振子の自動制御コンテスト」

去年まで使っていた飛行船の機材が古くなってきたこともあり、今年度から2輪型倒立振子の自動制御コンテストを行いました。この2輪型倒立振子にはジャイロセンサ、9軸加速度センサ、ロータリエンコーダが搭載されています。参加者は3回生前期までに学んだ自動制御工学などの授業の知識をうまく生かし、倒立振子の姿勢制御プログラムの構築に取り組んでももらいました。

以上のように今年度も大変な盛況のなか実施することができました。洛友会の後援や卒業生からのご寄付など多くの支援に支えられて現在の規模を維持することができています。この場をお借りしてみなさまのご支援に心から感謝いたします。サマーキャンプの様子については学科 Web ページにも掲載しておりますのでどうぞご覧ください：<https://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/summercamp>

編集後記

CUE 編集委員会に、今年度から初めて参加させていただきました。まだ2つの号の編集に参加しただけですが、CUE が大学の内外からトピックを集めて共有する場として、うまく機能していることに改めて気づかされております。今号の「産業界からの技術動向」は、普段とは違って経済産業研究所の岩本様による、人工知能 AI と雇用の関わりについての考察でした。少し前に雇用の半分が機械化 (AI 化) されるというニュースが飛び交いましたが、続く研究によると影響の度合いは約 10 パーセントと推計されているそうです。しかし全産業の 10 パーセントは巨大なインパクトであり、近い将来の社会の姿を変える力を持っていそうです。記事の後半では、将来に望まれる人材の姿が示されていますが、端的には知的な問題解決能力が重要との示唆でした。考えてみれば、京都大学の大学院はそういう人材を輩出する場であり、成功を収めてきました。しかし現状はこの示唆とは異なり、大学院博士後期課程への進学者は決して多くありません。将来の成長機会を捨てているのではないかと非常に残念に感じます。さらに、これを好機と捉えて大きく成長する企業（大学や研究機関も含めて）が身近に現れて欲しいとも感じました。岩本様、示唆に富んだ記事を投稿していただき、誠にありがとうございました。

[Y. M. 記]

協力支援企業

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

発行日：平成31年3月

編集：電気系教室 cue 編集委員会
白井 康之、藤田 静雄、山本 衛、
後藤 康仁、田中 俊二、村田 英一、
田中 良典、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

