

Cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.37

MARCH 2017

[第37号]

卷頭言

大谷 謙治

大学の研究・動向

メタマテリアル、光の量子計測、光時計の研究
—電磁気学と量子力学を基礎として—
工学研究科 電子工学専攻
量子機能工学講座 量子電磁工学分野

産業界の技術動向

KDDI 株式会社 技術企画部
松ヶ谷 篤史

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 37 号 目次

巻頭言

ガバナンスと人工知能	元・フジテック株式会社 社長・会長 大谷 謙治	1
------------	-------------------------	---

大学の研究・動向

メタマテリアル、光の量子計測、光時計の研究 —電磁気学と量子力学を基礎として—	工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 量子電磁工学分野	3
--	--------------------------------	---

産業界の技術動向

KDDIにおけるネットワークの高度化と品質向上への取り組み	KDDI 株式会社 技術企画部 松ヶ谷 篤史	11
-------------------------------	------------------------	----

研究室紹介		16
-------	--	----

博士論文概要		35
--------	--	----

高校生のページ

レーザーの光で一億度を測る	大学院エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 南 貴司、水内 亨	73
---------------	-------------------------------------	----

学生の声

研究者として留学するということ	工学研究科 電気工学専攻 大村研究室 博士後期課程2年 久保田 結子	78
博士課程の魅力 —ひとりぼっちドクター撲滅を目指して—	情報学研究科 通信情報システム専攻 小野寺研究室 博士後期課程1年 塩見 準	78

教室通信

学生の多様性	電気電子工学科長 守倉 正博	79
--------	----------------	----

編集後記		80
------	--	----

卷頭言

ガバナンスと人工知能

元・フジテック株式会社社長・会長 大谷謙治



東京都中央卸売市場の築地から豊洲への移転に関連して、有害物質による土地の汚染が大きな社会問題となりました。小池新知事は建物敷地にその対策のための盛り土がなされなかったこと、およびその事実が隠ぺいされていたことについて、「組織のガバナンス、組織の緩んだ空気」に問題があると指摘しました。

豊洲問題は、はしなくも“ガバナンス（統治）”という概念をお茶の間に広めるよいきっかけとなりました。ガバナンスは組織トップのリーダーシップの欠

如や暴走、ならびに組織の不正や非効率を監査、是正し、その適正性と有効性を担保する仕組みです。結果として、様々なステークホルダー（利害関係者）の利益を守り、ときとしてその間で発生する利害の対立をバランスよく調整し、解決します。ガバナンスはビジネスの国、米国生まれの概念ですが、我が国においても1990年代から企業不祥事が頻発するにつれて、その重要性が喚起されるようになりました。企業に限らず、国際機関、国、自治体、学校、病院、家庭など、あらゆる組織体において共通の課題です。

私も長いビジネス人生において、ガバナンスに起因する失敗を幾度も経験しました。そこから得た教訓は、ガバナンスはすべての階層の組織員が主体的に参画することによってはじめて有効・適切になるということです。とりわけ上下階層間の情報の非対称性を考慮すれば、まずトップ、およびそれに準じる上層部の倫理観とそれに則した行動、そしてそれを適切にチェックできる組織構造と仕組みが大切です。その上で、組織の構成員一人ひとりがステークホルダーに対して負っている自らの役割を理解し、その責務を担わねばなりません。両々相まって、風通しよく、かつピンと張った組織の空気が作られるのです。

もう一つは、ガバナンスのあり方を絶えず見直し続けることです。経験則によれば、ひとつの重大事故の背後には数十の軽微な事故があり、その背景には数百のヒヤリ・ハットした経験があるといいます。また、事故は往々にして、最も起こってほしくないときに起こり、忘れた頃にやってくることは皆さんも多かれ少なかれ経験されていることでしょう。普段から、ちょっととした異常や違和感をも見逃さず、迅速にPDCAサイクルを回すことでガバナンスの改善・革新を図り、重大な事故や不祥事を未然に防止していくことが肝要です。

ところで、近年、多くの電気・機械システムに人間の脳の機能を模擬した人工知能AIが搭載されるようになっていますが、その進化速度には目を見張るものがあります。ビッグデータを活用した知識力と、ディープラーニングで鍛えられた判断力で圧倒的な能力を持つようになりました。すでに、将棋や囲碁のソフトは世界のトップ棋士を擊破しています。それからあらぬか、日本将棋連盟は棋士がスマートフォンなどの電子機器を対局室に持ち込んだり、対局中に外出したりすることを禁止する規定を設けま

した。プロのカンニング予防とはちょっと情けない気もしますが、AIの知的能力の現実を前にすればやむを得ない措置なのでしょう。また、米国のクイズ番組で最高賞金を獲得して名を馳せたIBMのAIシステム「ワトソン」は、自然言語を理解、学習し、人間の意思決定を支援します。すでに防犯、医療、接客など様々なビジネスの場で応用が広がりつつあります。

当然のことですが、仕事やプロジェクトは、AIが組み入れられることによって、効率が上がり正確になります。さらに、AIは「言った／聞いていない」、「見落とした／見て見ぬふりをした」、「記憶にない／思い出したくない」といった疑義を生じさせませんので、ガバナンスの観点からも寄与するところが大きいのではないでしょうか。くだんの豊洲問題は、もしAIが適時適所で利用されていれば事前にその発生を回避できたでしょうし、事後に犯人探しで時間を取られることもなかったでしょう。

19世紀ドイツの思想家、ヘーゲルは「歴史のうちに神の摂理があるのであり、神の本質は理性であるから、歴史は理性によって支配されている」と喝破しました。しかし、これまでの歴史を振り返って、私たちはどれほど理性的にふるまい、いかほどの自由と公正と平和を勝ち得てきたのでしょうか。今、私たちは大衆民主制の下で出くわす様々な想定外に振り回され、自由主義のはき違えから生じる過度な不平等に困惑させられています。独裁者や狂信者に扇動された戦争やテロによって、多くの人々が生命を脅かされています。

今こそ、政治、経済および社会の中で、よき理性を働かせ、新しい未来を切り拓いていくときです。その基盤として、国際と国内、官と民のあらゆる組織体において、しっかりしたガバナンスを築いていくときです。高度な知的能力を備えつつあるAIの適切な活用が、それに資することになるでしょう。

次の課題は、人間の意思に反したAIの暴走や怠慢、そして人間による意図的なAIの悪用や、無知による誤用をいかにして監視・防止するかということになります。すなわち、人間とAIシステムとが共生・共進化するための、弁証法的な意味合いで、より高い次元のガバナンス体制の確立です。

それは、もうすぐ後期高齢者という私たち世代にとって、見果てぬ夢となるのでしょうか。そうであれば、次の世代、そしてその次の世代に期待するところ大です。

大学の研究・動向

メタマテリアル、光の量子計測、光時計の研究 —電磁気学と量子力学を基礎として—

工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研究室）

教授 北野正雄
准教授 杉山和彦
助教 中西俊博

1. はじめに

量子電磁工学分野（北野研）では、電磁気学と量子力学の根幹にかかる基礎的な研究から、それらの工学的応用を視野に入れた研究まで、幅広い研究を行っている。研究室が開設された約15年前を振り返ってみると、電磁気学のテーマとしてエバネセント波など、量子力学のテーマとして量子ゼノの効果やレーザー冷却などの研究を行っていた。エバネセント波は、近接場といって遠方へは伝搬しない特殊な状態の電磁波である。このような特殊な電磁波伝搬の研究は、2.4節にもあるように電磁気学の理解への興味を基盤として、研究室開設直後に研究分野が立ち上がってきメタマテリアルの研究へつながっている。メタマテリアルは波長よりも小さな大きさの構造体による媒質で、誘電率や透磁率を自由に設計することができる。光をガラスに入射するとき、偏光の向きと入射角を選ぶと表面反射がなくなるというブリュースタ現象は、通常は電磁波の電場に対するものである。透磁率も自由に設計できるメタマテリアルでは、磁場に対してもブリュースタ現象を実現できる。この研究を皮切りに研究室のメタマテリアルの研究は進展し、第2章で説明するメタ表面の研究などが進んでいる。

量子力学の研究テーマとして行っていた量子ゼノの効果とは、系の状態を観測することが系の時間発展を阻害する現象のことをいう。このような量子力学の基本概念に関する研究は、第3章で説明する時間反転対称性の研究に引き継がれている。レーザー冷却は、原子の共鳴とレーザー光の相互作用により原子の速度を低減させる技術で、量子力学的効果の応用として発展が期待されていた。たとえば、低速の原子ではドップラーシフトが低減して原子本来の共鳴周波数を観測できるので、周波数のよい基準となる。光領域にある共鳴周波数を基準とする原子時計では、単位“秒”的定義とされているマイクロ波領域の共鳴周波数を基準としたものよりも不確かさが2桁も小さく、周波数値を18桁も決められるものが世界的に実現してきた。研究室では单一イオンを用いて研究を進めている。不確かさが小さいことは、原子時計を用いて非常に小さな効果を観測できることを意味していて、最近では素粒子物理学の研究者とも交流が生まれてきた。これらの研究に関して第4章で説明する。

当分野では3人の研究者の志向（嗜好というほうが正しいかもしれない）が異なることもあり、研究テーマは発散しているように見える。しかし、第1章を執筆した筆者（杉山）が、研究室に参画した2001年ごろから今までを振り返ってみると、物理の基礎概念を大切にするところ、と同時に、今行っている研究を大切にして深化あるいは展開していくところは共通している。そこに研究室の伝統的な哲学を感じることができたことは収穫だった。以下、各研究テーマについて概要を紹介する。

2 メタマテリアル

2.1 メタマテリアルとは

通常、媒質は図1(a)のように原子や分子の集団から形成されるが、原子や分子のサイズは電磁波の波長よりも十分小さく、媒質の性質は屈折率などの媒質パラメータで記述される。それに対して、図1(b)のように金属や誘電体などで構成される人

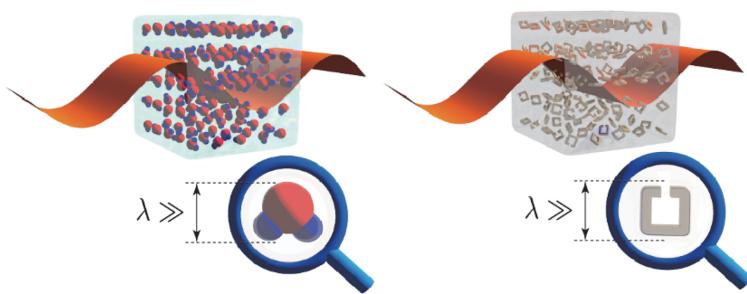


図1 (a) 通常の媒質（原子／分子系）(b) メタマテリアル

工的な構造に対しても、波長が構造よりも十分大きければ媒質パラメータを定義することができる。この「人工的な原子」はしばしばメタ原子と呼ばれ、その集合はメタマテリアルと呼ばれる。メタ原子の材質及び構造の設計によって自然の媒質では実現できないような媒質パラメータとそれに関係した物理現象を実現することができる。さらに、マクスウェル方程式のスケール不変性から、原理的には人工原子のサイズを変更するだけでマイクロ波領域から光領域まで様々な波長に対応したメタマテリアルを実現することができる。

負の屈折率は自然の媒質では実現できない媒質パラメータの典型例で、マイクロ波領域での実証実験からメタマテリアルの研究が爆発的に増加した。負の屈折率により、媒質境界で「く」の字型に電磁波が屈折する特殊な状況が実現できるだけでなく、回折限界を超えたイメージングを実現できることが知られている。また、メタマテリアルを用いることで媒質パラメータを空間依存した形で自在に変化させることができる。自然界において蜃気楼は屈折率が空間変化することで光路が曲がる現象であるが、これをより一般化するとより高い自由度で電磁波の伝搬制御をすることができる。例えば、メタマテリアルを用いることで、ある領域を迂回するように電磁波伝搬を制御することも可能になり、迂回した領域は外部から認識できないため、「透明マント」と呼ばれる。この手法は、マクスウェル方程式を座標変換することで定式化されることから座標変換媒質と呼ばれ、透明マントを含む幅広い電磁波伝搬制御手法として注目を集めている。

メタ原子を平面上に配置した場合は特にメタ表面と呼ばれる。この場合、面での反射と透過だけが問題になる。作成上の容易さから、マイクロ波領域から光領域まで幅広く数多くの研究があり、波長よりも薄い光学素子（波長板、周波数フィルタ、吸収体）を実現することや、波面の制御などに応用されている。

2.2 メタマテリアルを用いた電磁波の速度制御

電磁誘起透明化現象（EIT 現象）とは、元々原子系で研究されてきた現象で、制御光と呼ばれる補助的な光（電磁波）の入射で不透明な媒質が透明になるという非線形光学現象である。この透明化は、非常に狭帯域で起こる上、その透明化帯域において光の群速度が非常に遅くなる。さらに、制御光を動的に変調することで、媒質中に光を保存し任意のタイミングで取り出す（再生する）ことができることから、光メモリを実現するものとして注目を集めている。人工原子系ともいえるメタマテリアルで EIT 現象を模擬することも可能で、これまで様々な構造が考案され、マイクロ波領域から光領域まで広く実証されている。しかし、これまでの研究では、電磁波の保存と再生に必要な、EIT 現象の動的変調（ON/OFF）ができなかった。これに対して、当研究室では、直流電場の印加によって EIT 現象を制御するメタマテリアルの構造を提案し、マイクロ波領域で電磁波の保存と再生に初めて成功した〔Phys. Rev. B, 87, 161110, (2013)〕。さらにこの研究を進め、本来の原子系の EIT 現象である、電磁波の入射によって媒質を透明にする手法を考案し、マイクロ波領域でこの「真の EIT 現象」を実現した〔Phys. Rev.

Appl. 4, 024013 (2015)]。現在は、光領域を見据えた更なる高周波化を目指して研究を行っている。

以上に加えて、電磁波の速度制御として、金属表面に伝搬する表面電磁波（擬似表面プラズモン）の研究も行っている。通常の金属表面でもこのような表面波はあるが、金属の種類で特性は全て決まってしまう。一方、擬似表面プラズモンでは、金属構造によって様々な伝搬特性を制御すること

ができる。当研究室では特に、フラットバンドと呼ばれる、波動の分散関係が波数によらず一定になる現象に注目して研究を行っている。フラットバンド上では、表面波の群速度は全方位的に0になり、波動は広がることなく局在化する。図2 (a) に示す、カゴメ格子と呼ばれる金属周期構造に関して、擬似表面プラズモンの分散関係が平坦になることを回路モデルから定式化し、テラヘルツ領域における透過測定でフラットバンドの存在を明らかにした [Phys. Rev. B, 85, 205128 (2012)]。さらに、同図 (b) のリープ格子において、透過測定と全反射減衰分光法により、より広い波数領域で擬似表面プラズモンの分散関係が平坦になることを実証した [Phys. Rev. B, 93, 075126 (2016)]。この結果は、擬似表面プラズモンが3次元的に完全に局在化することを意味している。この特徴を利用して、電磁波と物質の相互作用を大きくすることが可能になるため、高感度センシングなどの応用へと進展することが期待される。

2.3 チェッカーボード構造を利用した電磁波応答の制御

金属を用いた平面構造はしばしば、電磁波の制御に用いられる。このような構造に関しては、金属部と空隙部を入れ替えた補対構造が存在する。補対構造間にはバビネの原理と呼ばれる関係があり、両者の反射と透過にはある関係がある。当研究室では、この関係を抵抗膜を含むメタ表面の電磁応答にまで拡張し、補対構造が元の構造と同一になる「自己補対構造」において、電磁波応答の周波数依存性がなくなることを示した。ま

た、図3 (a) に示したような構造を用いてテラヘルツ領域での実験的検証にも成功した [Phys. Rev. Lett. 114, 237401 (2015)]。加えて、このメタ表面に両側から同位相の電磁波を当てると完全吸収が起こることが予想される。コヒーレント完全吸収と呼ばれるこの現象の観測にも成功している [Opt. Lett. 41, 4472-4475 (2016)]。

さらに、補対構造を切り替えることで、透過・反射特性を切り替える方法を提案した。図3 (b) にその構造の顕微鏡写真を示す。構造には金属（アルミニウム）以外に、二酸化バナジウム（VO₂）が利用されている。二酸化バナジウムは、ある転移温度を境に、絶縁体から伝導体へと変化する性質がある。これを補対構造の切り替えに利用することで、テラヘルツ領域における実験において透過と反射が相転移温度を境に入れ替わることを実証した [Opt. Express, 24, 4405 (2016)]。

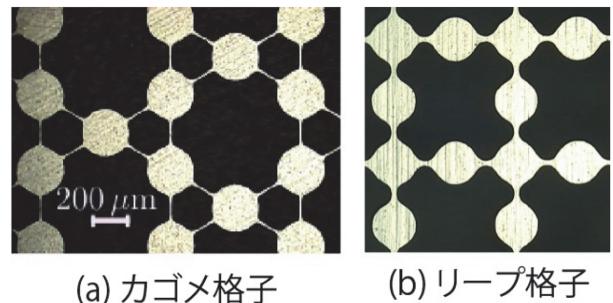


図2 フラットバンドを実現する金属格子構造

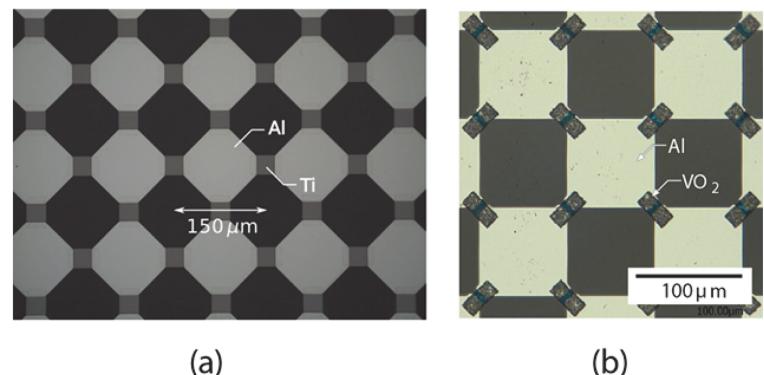


図3 (a) 自己補対構造をもつチェッカーボード型メタ表面
(b) 補対構造の切り替えを実現するメタ表面

2.4 電磁気学の基礎

メタマテリアルは媒質定数を自由に設定することで、電磁波の特異な伝搬を実現するものである。メタマテリアル研究の前提として、真空中における媒質定数、すなわち誘電率、透磁率、光速、インピーダンスの物理的意味を明らかにしておく必要がある。さらに4種類の場（電場、電束密度、磁束密度、磁場の強さ）のそれぞれの意義の確認も必要である。このような電磁気の基礎的概念に関しては今日でも誤った解釈が流布しており、教科書など物理教育の現場に混乱をもたらしていることを指摘した〔大学の物理教育 21 (2), 73 (2015)〕。また関連する教育的な実験テーマとして、LC 共振回路による真空中の光速とインピーダンスの測定を提案した〔大学の物理教育 21 (3), 126 (2015) ; 21 (3), 130 (2015)〕。

3 時間反転光学系の量子光計測への応用

光計測の技術に量子光学の手法を導入する量子光計測の分野が著しい進展を遂げており、量子相関を利用した高感度量子測定では光子対を用いた位相の超感度測定や量子光コヒーレンストモグラフィー（量子 OCT）が研究されている。しかし、光子対の生成効率の低さや検出速度の問題など実用上の問題も多い。

以上の問題を解決する1つの方法として、量子系の時間反転対称性を利用した方法が提案され、量子 OCT を古典的なチャーブ光を用いて実現する方法が実証されていた。当研究室ではこの考え方をさらに発展させ、チャーブのない古典パルス光で位相の超分解測定や量子 OCT を実現する方法を考案した。前者の位相超分解の研究は、利用する光の波長の半分の干渉縞を 100% の明瞭度で得ることができる [Phys. Rev. A, 91, 062118 (2015)]。一方、後者の量子 OCT の古典パルスでの実現は、古典 OCT で問題となる分散による分解能の低下を抑えることができる。当研究室では、図 4 (a) に示すような光学系を用いて量子 OCT を実現した。干渉計上部のミラーの位置 x を移動しながら光検出器の信号を取得することで、干渉計下部の反射位置が検出信号のディップとして観測される。測定対象の前に分散媒質がある場合、従来の OCT では同図 (b) に+印で示すように信号が広がってしまうが、提案手法では●印で示すように、分散の影響を受けない測定が可能になる [Phys. Rev. A, 91, 013846 (2015)]。

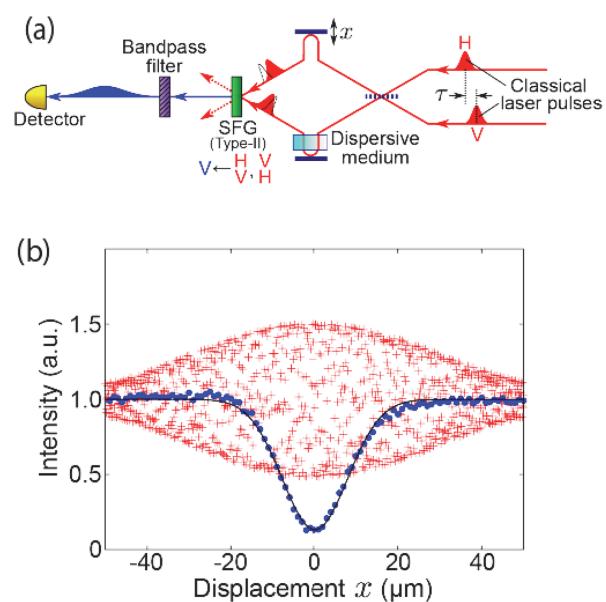


図 4 (a) 時間反転光学系を利用した量子 OCT
(b) OCT 信号。+印が従来法、●印が提案手法の信号。

4 単一イオン光時計の開発と基礎物理学への応用

4.1 光時計の原理

時間を測る装置、時計として、たとえば振り子時計では、振り子の1周期がいつでも等しいと仮定し、周期の回数を数えることで時間を計測する。いつでもどこでも1周期が同じ、という再現性が、公理として計測のよりどころとなっている。再現性の公理が成り立つ現象では、繰り返し測定して平均をとることで、測定値の不確かさを低減させることができる。

機械的な振り子のかわりに、原子が共鳴する電磁波の周期を基準とするものを原子時計という。原子

のとりうるエネルギー準位はとびとびになっていて、準位間のエネルギー差に相当する周波数の電磁波と共に鳴る。再現性の公理には、いつでもどこでも同じ周期を実現するために、動作条件を等しくする、という要請がある。機械的な寸法で決まる振り子の周期よりも、物理的に決まる原子のエネルギー準位を基準とするほうが、いつでもどこでも再現性よく1秒を決めることができる。現在の時間の単位“秒”は、この特長から原子の共鳴、具体的には、セシウム原子のマイクロ波領域、約9.2 GHzの共鳴を基準としている。そして、この共鳴を基準とする原子時計では、不確かさ 10^{-16} に達するものが実現されている。

さて、再現性の公理によれば、何周期も測定して平均をとることで不確かさが小さくなる。そうすると、1周期を観測した時の不確かさは等しいとして観測時間を固定して比べると、周期の速い現象のほうが周期の測定回数が多くなり不確かさが小さくなる。原子時計では周期が速い、すなわち周波数の高い共鳴を基準とするとよい。基準周波数をマイクロ波から光領域にすると、はるかに不確かさの小さい原子時計が実現できそうだ。一方で、不確かさが小さくなれば、動作条件を等しくするという再現性を担保するための要請が厳しくなる。実際の原子時計では、原子は磁場などの環境を設定された条件のもとにおく。したがって、共鳴には、環境が変化しても共鳴周波数の変化が小さい、あるいは動作環境やその環境下での共鳴周波数を正確に決められる、このような特性が重要になってくる。そのために、原子と共鳴の種類を選択し、共鳴周波数を観測する原子の供給方法を工夫する。現在、光領域の原子時計、光時計（図5参照）では、单一イオン光時計と光格子時計の2つの方式が研究されている。单一イオン光時計では、原子を1個だけ超高真空中に閉じ込めて静止させ、原子本来の共鳴周波数を観測する。信号を出す原子が1個なので信号対雑音比（SN比）は最悪だが不確かさは小さい。光格子時計は多数個の原子を利用するので、信号のSN比が改善される。原子はレーザー光の電場で閉じ込められるため、レーザー光の強い電磁場にさらされる。そこで、共鳴に関係する上下の準位に対する影響が等しくなるように、閉じ込めレーザーの周波数を設定して不確かさを改善する。どちらの方式でも、不確かさ 10^{-18} 台のものが報告してきた。

光時計がマイクロ波原子時計よりも優れた性能をもつことは、すでに1980年代には知られていた。しかし、それを電気的に扱うことができるマイクロ波以下の実用的な周波数に変換できなければ、基準周波数として利用できない。そのよい方法は長い間模索されてきたが、2000年に登場した光周波数コムによって解決にめどが立ち、光時計実現に向けた道が開けた。ここでいう光周波数コムは、モード同期レーザーとよばれる正確な繰り返し周期でパルス光を出力するレーザーで発生させる。これを周波数軸で見た姿は、一定の周波数間隔で発振している多数のレーザー光の集合体で、その形状からコム（comb = 櫛）とよばれる。その等間隔性は 10^{-19} 台よりもよいことが検証されている。コムは周波数軸上のマーカーで、長さを測るものさしのメモリのような役目を果たす。もしコム全体の周波数0からの位置、オフセット周波数を測定し固定できれば、コム1本との比較からレーザー周波数を決定することができる。説明は省略するが、コムのスペクトル幅が1オクターブ以上、すなわち、高周波端が低周波端の2倍以上に広がっていると、容易にオフセット周波数を測定できる。ちょうど2000年頃に、非線形光学効果によってスペクトル幅を拡大する、フォトニック結晶ファイバーという特殊な光ファイバーが開発されて、スペクトル幅1オクターブのコムは容易に実現できるようになった。これによって、光周波数と

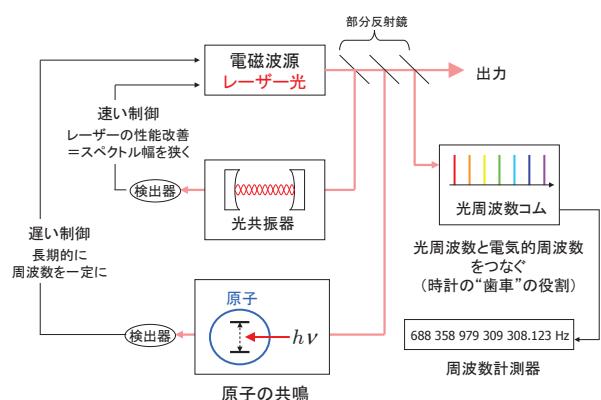


図5 光時計の構成。

RF・マイクロ波周波数との比較、あるいは光周波数同士の比較が自由に可能となった。時計の構成で言えば、任意の時間に周期を分周する歯車に相当する装置が実現したことになる。

光周波数コムの開発は、本章の筆者が前所属（旧国研）で行った最後の研究で、2001年に光周波数計測を達成した〔日本物理学会誌, 58, 175 (2003).〕。大学へ移って研究所の高精度のマイクロ波装置は使えなくなったが、光周波数の比の計測であればマイクロ波と光周波数の比 10^6 が利いて、比較的安価なGPS時計、不確かさ 10^{-12} 程度でも 10^{-18} まで測定できる。そもそも光時計の不確かさはマイクロ波周波数標準を超えてるので、光時計の再現性を確認するには光時計どうしを比較するしかない。光周波数の比の計測はその点で本質的で、それが可能なら大学で研究する価値があると考えた。また、不確かさが 10^{-18} にも及ぶ計測技術は、再現性の公理を担保している物理法則の普遍性を検証することになる。エネルギー準位は電磁気力が関係していて、その力の大きさを示す結合係数は微細構造定数 α である。もし、 α が時間変化すれば、 α の変化に対する感度が異なる共鳴周波数の比も時間変化する。標準模型とよばれる現在の素粒子物理学の枠組みでは α の時間変化は起こりえないが、重力を他の力と統一して扱う革新的な理論では α の時間変化は可能である。そのような理論は宇宙のごく初期段階を説明する可能性があるので、宇宙の遠方から届く、はるか昔の原子・分子のスペクトルを観測して、その周波数シフトから α の時間変化が議論されている。その時代での議論を現在まで外挿すると変化ははるかに小さくなるが、光時計の不確かさなら検証可能な大きさという。このような原子・分子の精密計測と素粒子物理学との接点は、近年注目されている。素粒子物理学実験といえば、大型の加速器実験が思い起こされるだろう。これまで $E=mc^2$ の関係から、質量 m の大きな未知の素粒子を検出する目的で、より大きなエネルギー E (c は光速) を得るために大型の加速器が建設してきた。加速器の大型化がそろそろその限界を迎えるつあるなか、原子・分子を用いた精密計測は、加速器実験では到達が難しい高いエネルギー領域に感度があり、相補的な実験方法となりうる。我々も科研費・新学術領域研究「原子が切り拓く極限量子の世界（平成 21～25 年度）」に参画し、以下のように研究を進展させてきた。なお、最近の研究成果は、博士課程の今井康貴、三滝雅俊、両君の努力によるところが大きいことを記す。

4.2 単一イオン分光

研究室ではイッテルビウムイオン (Yb^+) とバリウムイオン (Ba^+) を用いた単一イオン光時計の開発を進めている。 Yb^+ には磁場に鈍感な基準となる共鳴（以下、時計遷移）をもつ安定同位体 171 があり、そのような特徴をもつ他のイオンに比べて準位構造が比較的簡単なため、必要とするレーザー光の本数が少なくてすむ。 Ba^+ には、準位構造は複雑だが磁場のみならず電場に対しても鈍感な時計遷移をもつ奇数同位体があり、イオンの電荷がつくる電場による周波数シフトのためにイオン数を増やすことができない、というイオン光時計最大の弱点を克服できる可能性をもつ。

イオンは、超高真空中に設置されたイオントラップとよばれる電極（図 6）の間に高周波電場を印加し、電極で囲まれた中央の空間に捕捉する。オープンから原子をビーム状にとばし、トラップ内で光イオン化法、すなわち共鳴するレーザー光を照射してイオン化ポテンシャル以上に励起する方法でイオンを生成する [Appl. Phys. B, 105, 729 (2011)]。同位体により共鳴周波数がわずかに異なることを利用し、天然同位体混合物から特定の同位体を選んでイオン化することが可能である。我々も 7 種類ある Yb^+ の安定同位体のうち、

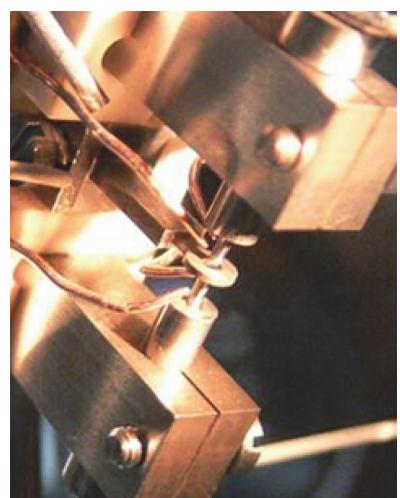


図 6 イオントラップ。中央のリング状の空間、直径 $800 \mu\text{m}$ の中央にイオンはトラップされる。

5種類で单一イオンの捕捉に成功している。トラップした单一イオンは、強い蛍光を発する共鳴を用いてレーザー光と相互作用させてレーザー冷却を行い、トラップ中心にはほぼ静止させる [Appl. Opt., 49, 5510 (2010)]. そして、時計遷移を励起するレーザーを照射し、スペクトルを取得する。時計遷移はスペクトル幅が狭いので、これを励起するレーザーの発振スペクトルを狭窄化しておく。これは、レーザーの発振周波数を光共振器の共鳴に高速でフィードバック制御して達成する。このようにして観測した单一¹⁷¹Yb⁺ の ²S_{1/2} (F=0) – ²D_{3/2} (F=2) 時計遷移のスペクトルを図7に示す [Radio Sci., 51, 1385 (2016)]. イオンは1個なので、1回の観測ではレーザーの光子を吸収した、しなかった、という情報しか分からぬ。レーザーの周波数を固定して何回も繰り返し観測して遷移確率そのものを測定し、レーザー周波数を掃引してスペクトルを得る。さらに狭いスペクトルを観測するために、レーザーの線幅狭窄化を改良していく。また、2台目の装置でも单一イオンの時計遷移スペクトル観測に成功していて、2台の比較による不確かさ評価を開始できることまで到達している。

4.3 光分周器としての長時間連続運転可能な光周波数コム

光周波数コムに関しては、モード同期チタニウムサファイア (Ti:Sa) レーザーを自作するところから研究を開始し、フォトニック結晶ファイバーを用いてスペクトル幅1オクターブを実現し、周波数測定器として完成させた。ピエゾ素子を用いて高速で制御可能なミラーマウントを導入し、レーザーに対して位相同期する技術も実現させた [日本物理学会2014年秋季大会10pAW-5.]。

Ti:Sa レーザーはパルス幅が狭く低雑音性も優れているが、大きな出力の励起レーザーが必要で、熱的な安定性とランニングコストに問題がある。一方、光周波数比の計測では、不確かさを低減させるために長い積算時間が必要になるので、長時間連続動作が必要になる。半導体レーザー直接励起で長時間連続動作する光周波数コムとして、ファイバーレーザーを用いたものが実用化されてきた。ファイバーレーザーは低雑音化するために特有の技術が必要であり、我々は Ti:Sa レーザーの経験が生かせる固体レーザーで、半導体レーザー励起可能な Yb:KYW レーザーを用いて光周波数コムを実現することを考えた。

実際開発を始めてみると、モード同期の実現、スペクトル幅1オクターブへの拡大、オフセット周波数のビート検出とその位相同期と、各段階で Ti:Sa レーザーとは異なる問題に直面したが、1歩ずつそれらを解決してきた。研究期間中に先行研究が1例現れたものの、我々のシステムは高効率でモード同期発振するため光出力が大きく、雑音源ともなるファイバーアンプを使用することなくスペクトル幅1オクターブを達成し、雑音の小さい光周波数コムを実現した。その装置全体を図8

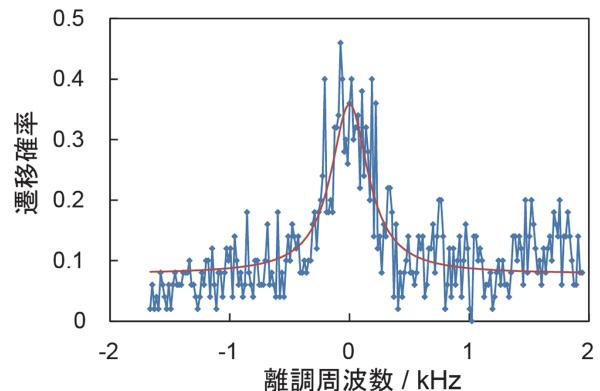


図7 単一¹⁷¹Yb⁺ イオン ²S_{1/2} – ²D_{3/2} 時計遷移のスペクトル。半値全幅 380 Hz。

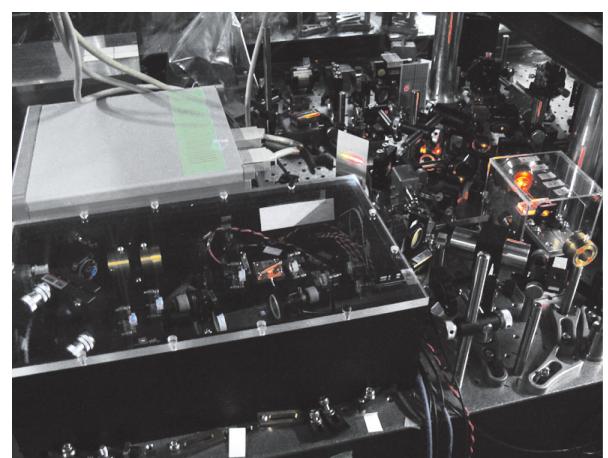


図8 Yb:KYW レーザーによる光周波数コム装置。中央は回折格子で分光したコムのスペクトル。

に示す。Ti : Sa レーザーで実現したレーザーへの位相同期の技術移転も成功し、図9に示すように、2時間は連続測定が可能なシステムを実現した [Advanced Solid State Lasers 2016, JTU2A.26 (1-3).]。今後は光周波数比計測装置としてさらに改良を加えていくとともに、長時間連続運転可能な“使える”光周波数シンセサイザとして、様々な応用に展開していきたいと考えている。

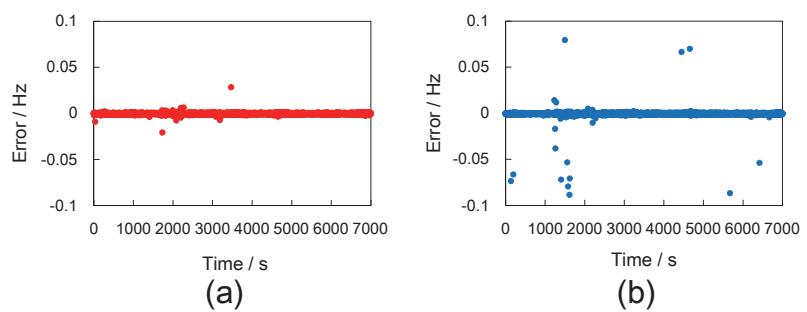


図9 Yb:KYW レーザー光周波数コムの位相同期。(a) オフセット周波数、(b) レーザーとコムのモードとのビート周波数。周波数カウンタのゲート時間1秒。Error がその逆数 1Hz よりも十分小さく位相同期が達成されている。

産業界の技術動向

KDDIにおけるネットワークの高度化と品質向上への取り組み

KDDI 株式会社 技術企画部
松ヶ谷 篤 史

1. はじめに

携帯電話の通信規格は 1G (TACS, HiCAP)、2G (PDC, cdmaOne)、3G (CDMA2000, W-CDMA) と進化し、現在の日本においては 3.9G (LTE, WiMAX, AXGP)、および 4G (LTE-Advanced, WiMAX2.1) が実用上主流の方式となっている。これらモバイルネットワークと、スマートフォンをはじめとした携帯電話端末がそれぞれ高度化することにより、携帯電話上で多様なサービスが展開されるようになった。

LINE や Facebook, Instagram に代表される各種 SNS は携帯電話機で利用するサービスとして身近なところではあるが、Youtube などの動画サービスや各種イーコマース、レストラン検索などのサービスも携帯電話で利用するシーンが増えている。他にも身近なところとしては VoLTE (Voice over LTE) の提供により、音声通話も LTE 上で行われるようになった。また、その他検針などのスマートメータ、警備・セキュリティ、物流、カーテレマティクスなどのビジネス用途にも活用されるなど、LTE の利用シーンは多岐にわたる。

本稿では LTE ネットワーク高度化、ネットワーク品質向上、将来のネットワークの 3 点について KDDI 株式会社（以降 KDDI）の取り組みを述べる。多様なサービスを技術で支える取り組みが少しでも伝われば幸いである。

2. LTE ネットワーク高度化の取り組み

サービスの多様化、高度化に伴い、ネットワークに流れるトラヒックは日々増大し続けている。無線通信において、無線容量は送信帯域幅に比例して増大するが、サービス開始当初 5, 10MHz 幅であった LTE の帯域幅を 15, 20MHz 幅に拡大し、需要増に対応してきた。さらなる需要の高まりに対応すべく、2014 年 5 月に KDDI は日本で初めてキャリアアグリゲーション (Carrier Aggregation, 以下 CA) を導入し、携帯電話機が同時に通信可能な帯域幅を増やしてきた。

LTE では複数の携帯電話機で、時間・周波数を分け合い、同時に多数の携帯電話機が接続できる仕組みをとっているが、通信可能な帯域幅が大きくなると、統計多重効果が得られ、他の携帯電話機との無線の共有効率（周波数利用効率）が向上する。CA の導入によって、カタログスペックとしてのピークスループットが向上するだけでなく、周波数利用効率向上、システム利用効率向上といっ

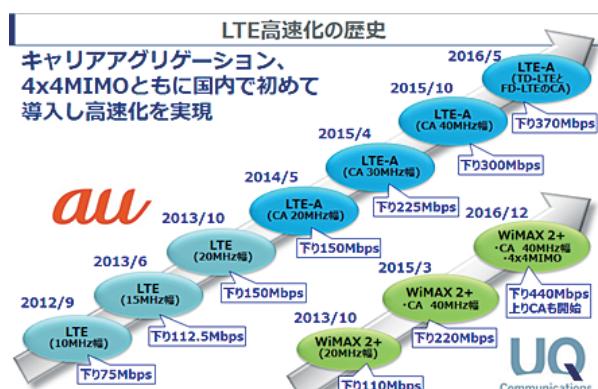


図 1：KDDI グループにおけるキャリアアグリゲーションの進化

た効果が得られる。

CA の周波数組み合わせは当初 2 周波数から開始し、10MHz+10MHz、10MHz+20MHz と合計の帯域幅を増やしてきた。LTE は規格上、一つの周波数において 20MHz がとりうる帯域幅の上限となっているため、これより大きい帯域幅をとるためには CA の技術が必須となる。

CA の技術面で難易度が高いのは、束ねる周波数でそれぞれ伝搬特性が異なる特性を理解し、異なる周波で接続している状態を安定・維持させることである。LTE 携帯電話機の通信に関する挙動は基本的にすべて基地局側から制御されるが、周波数ごとに異なる伝搬特性を考慮して携帯電話機の動作を基地局側から制御できるよう、設定をチューニングする必要がある。

余談となるが、私はこのチューニングを商用開始当時担当しており、CA の振る舞いを机上で理解するだけでなく、評価用のエリアに泊まり込んで実際の電波測定を何度も何度も重ねて細かく設定を追い込んだ。他社に先駆けてサービスインを迎えることができたのは、責任と緊張を伴う業務であり、私にとって非常に貴重な経験であった。

その後 3 つの異なる周波数を束ねることができる 3 波 CA、時分割 (Time division, TD) と周波数分割 (Frequency division, FD) の異なる通信方式を束ねる TD-FD CA、上り通信 (Uplink, UL) に CA を適用した UL-CA と、CA の実用例はますます多様化している。多様なサービス展開やトラヒックの増大を支えるために、このような技術的取組があることを知っていたければ幸いである。

3. ネットワーク品質向上の取り組み

前項では無線区間の容量を支える技術について説明したが、本項では KDDI におけるお客様体感を維持・向上し続ける取り組みについて説明する。



図 2 : 知床対策の事例



図 3 : 知床対策におけるアンテナ設置作業の様子

携帯電話が通信できるかどうかは、エリアの広さにより決まる。基地局がないところでは携帯電話は通信ができないのは当然のことではあるが、一般に国定公園など基地局の設置が難しいケースがあり、携帯事業者にとっては解決すべき課題の一つである。例として世界自然遺産である知床の例を挙げる。(図2)

知床では世界遺産に登録されて以降観光客が増えており、それに伴い携帯電話の需要が増えている。しかし世界自然遺産登録地域内には基地局を設置することが難しい。

この事例では基地局設置可能な箇所から 10km 程度の範囲をカバーする必要があった。一般的に、基地局は都市部で数 100m、ルーラルエリアで数 km 程度のエリアをカバーするが、通常の基地局構成では 10km のエリアをカバーするのは難しい。そこで特殊なアンテナを開発し、10km 先から知床五湖を狙うエリア設計を実施した。(図3) これにより、知床五湖周辺でも携帯電話が使用可能となった。知床以外のエリアにおいてもそれぞれ異なる課題はあるが、KDDI ではその他すべて

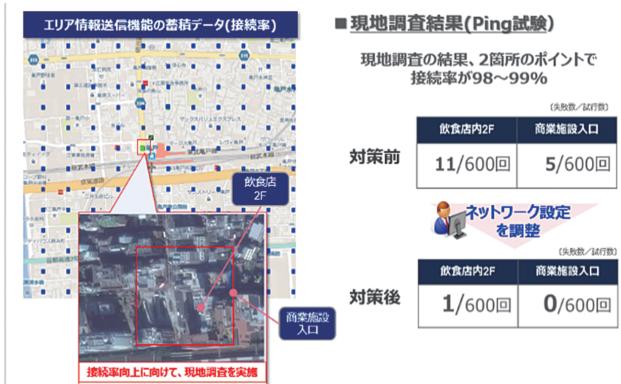


図 4：劣化箇所抽出の様子



図 5：電波サポート 24

5) お客様から頂いたご自宅の電波改善要望やエリア情報に関するお問い合わせにお答えするサービスで、お問い合わせから24時間以内に電波サポートセンターからお客様にコンタクトを取り、その後ご自宅の電波状況を測定し改善できる提案をするというものである。対策としては、周辺のエリア調整のほか、電波を增幅する装置や、小型の基地局をお客様のご自宅に設置する場合もある。このように通信環境改善に最適な方法を選択しご自宅の通信品質を改善する取り組みを行っている。

KDDIはイベント対策にも力を入れている。例えば、夏は花火大会やロックフェスティバル、コミックマーケットなど大勢が短時間で一か所に集中するイベントが目白押しとなるが、このような状況ではお客様の集中に加えてSNSなどで写真をシェアするケースが多くなり、通信逼迫が発生しやすい状況となる。常時トラヒックが多く発生している主要ターミナル駅と異なり、イベントが行われるエリアはイベントが開催されない時期はそれほどトラヒックが多くない。そのためイベント時には通信の集中に対応するべくイベントの規模に応じて特別な対策をとることがある。例えば車載型基地局を用意し、そのイベント会場周辺にもともと設置されている基地局とトラヒックを分け合うことで快適な通信環境を準備する。(図6)

2016年4月の熊本地震など、2016年は災害の多い年であった。地震等の災害が多い我が国において、通信インフラは災害からの早期復旧に対して備えておく必要がある。災害時を想定したアクションプランを準備しており、災害のケースに応じた様々な手段を準備している。例えば、通常の電線による電力供給と蓄電池による停電対策に加え、ソーラー発電装置を組み合わせて災害に備えたトライブリッド基地局という基地局を全国に100局以上配備している。ほかの手段としては、衛星回線を利用した基地局

の世界遺産地域をエリア化している。また、レジャー、観光など日常生活範囲以外のエリアにおいても快適に携帯電話をご利用いただけるよう日々エリア拡大を実施している。

次に接続維持への取り組みを紹介する。KDDIでは携帯電話機のエリア情報送信機能を用いてエリア品質データ蓄積し、課題の多い個所を特定する取り組みを行っている。

図4にある通り、地図のある距離単位間隔で区切り、その単位で品質劣化箇所がわかる仕組みを準備している。携帯電話機から送信される情報にエリア品質情報を含んでおり、その蓄積による統計情報を解析する。この時点で対策を取ることもあるが、品質劣化箇所に調査員が向かい、実際の通信の振る舞いを確認し原因を突き止め、品質改善につなげるケースも多い。図4の例においては現地確認において通信が98~99%成功するものの、わずかながら品質劣化は起こっていた。その原因を突き止めネットワーク設定を調整することにより、接続失敗をほぼなくすことができた。

また、住宅向けの取り組みとしては電波サポート24というサービスを提供している。(図



図6：イベント対策の様子。コミックマーケット時に車載局をペイントした（右上）社員がコスプレを行い（左下）、背中に WiFi 装置を背負い（右下）会場のトラヒック対策を実施

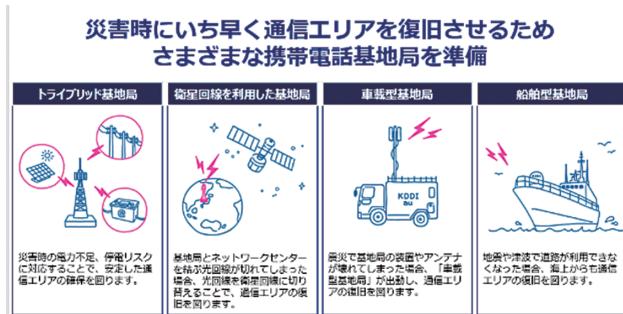


図7：災害対策時に活躍する様々な携帯電話基地局



図8：熊本の避難所で提供した無料 Wi-Fi

ている。またLTEでは基本的に時間と周波数を他の端末と同時に利用しないが、MUST (Downlink Multiuser Superposition Transmission) と呼ばれるセル内の複数のユーザへ同じ時間・周波数リソースを用いて送信する多元接続法が検討されている。アンテナ技術においても多数の素子をアンテナに搭載しアダプティブアレイの技術を適用したMassive MIMOという技術により、さらなる周波数利用効率の向上が実現される見込みである。

基地局密度・周波数帯域幅については従来のLTEよりも高い周波数が割り当てられる見込みであり、また、より広い帯域幅が割り当てられることが期待されている。

がある。回線の復旧を待たず通信サービスを早期復旧させることができることがメリットとなる。

また海が近い地域については船舶型基地局も暫定復旧に有効な手段である。これは船舶で被災地まで近づき船舶に搭載された基地局から電波発射してLTEなどの通信サービスを提供するというものである。本手法については2012年より実証実験を重ねており、2016年3月の法令改正をもって商用電波での試験が可能になった。

このように様々な復旧方法を準備しており、熊本地震の際も早期復旧に尽力した。

今回の熊本地震においては、基地局復旧の取り組みのほか、被災地で自治体と連携し、熊本県を中心に避難所へ無料Wi-Fiサービス及び携帯充電サービス提供を実施した。通信インフラ整備以外の形でも被災者支援を行っている。

4. 将来への取り組み

第5世代(5G)においては10Gbpsでの通信が目標の一つとなっている。これは第4世代のLTE-Advancedの10倍の要求となる。都心部においてはターミナル駅など特定の場所で、通勤時間帯など特定の時間にトラヒックが集中するが、その解消として5Gが期待される。

提供エリアで得られるネットワーク容量は周波数利用効率、基地局密度、および通信に利用する周波数帯域幅の3つの要素によって決定される。これらの各要素を切り口として今後の取り組みを紹介する。

周波数利用効率においては、LTEで用いられる帯域外輻射を削減する取り組みが行われ

KDDIでは4.5GHz帯、28GHz帯を用いた伝搬特性実験を行ってきた。これら従来のLTE周波数帯(700MHz~3.5GHz)と比較すると、①見通し上では、従来周波数と同じく遠くまで飛ぶ、②見通しから一本入った通りでは、大きく減衰する、③交差点を曲がり、見通し外になつた途端、大きく減衰する、といった特徴がわかつてきた。今回把握できた特性を考慮し、今後のエリア設計に反映させていく。

5Gの速度以外の要件として、多様なサービスレベル要求への対応という要素がある。たとえば遅延を一定時間以下に保つ要求が想定される。この場合、要件によっては基地局の上位装置の設置個所や、リソース確保が課題になる。この課題に対してはネットワークアーキテクチャの見直しや、上位装置を仮想化し、サービス要件に基づき十分なリソースを割り当てるなどの対策が必要となる。具体的には要求を満たせなくなった場合、新たなリソースを仮想化基盤上で払い出すなどする。(このようないソースの割り当て手法をスライスという。)利用用途ごとにスライスを作成し、ミッションクリティカルな要求に応えることが一般的になるとみられている。

また、大量のデータを低遅延で処理する必要がある場合、インターネットに抜けた先のクラウドでは遅延やデータ容量により要件が満たせない場合が出てくる。これに対してはMobile Edge Computing(MEC)と呼ばれる処理用サーバを5G網内に設置することが有効となる。

このように5Gでは基地局のみならず、その上位装置含めたアーキテクチャそのものを変える必要が出てくる可能性がある。これらについては現在標準化組織である3GPPにて協議中である。

5. あとがき

本稿ではKDDIの取り組みとして、LTE高度化の取り組み、ネットワーク品質向上の取り組み、将来への取り組みの3点について述べた。KDDIはお客様視点に立ち、日常の不快な体感(ペインポイント)を削減し、いつでも良好な通信を体験いただけるよう日々取り組んでいる。

当社以外の通信事業者においてもこのような高度化、品質向上、将来への取り組みは行われており、非常に競争の激しい環境にある。また、携帯電話を通じたサービスはますます多様になり、ネットワークへの信頼は携帯事業者としてますます重要になっている。

KDDIは今後もお客様により良い通信、サービスをご利用いただけるよう、これら取組を継続・発展させネットワーク品質を向上させていく。

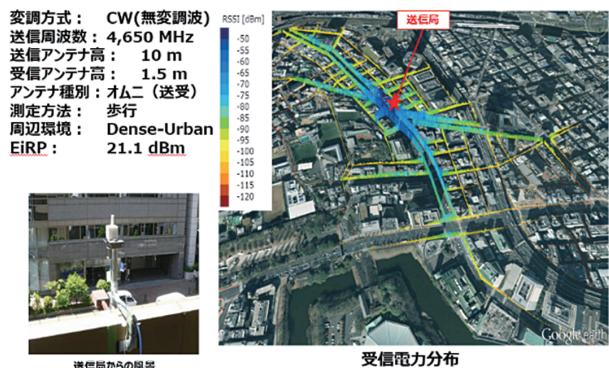


図9：都市部における4.5GHz伝搬実験の様子

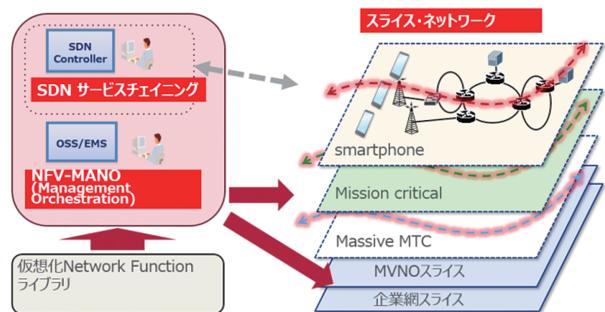


図10：5Gで想定されるネットワーク構成例

研究室紹介

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

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

電気関係研究室一覧

工学研究科（大学院）

電気工学専攻

先端電気システム論講座（引原研）

システム基礎論講座自動制御工学分野（萩原研）

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野（土居研）

生体医工学講座生体機能工学分野（小林研）

電磁工学講座超伝導工学分野（雨宮研）

電磁工学講座電磁回路工学分野（和田研）

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野（松尾研）

電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野（白石研）

電子物理工学講座応用量子物性分野（竹内研）

電子物性工学講座半導体物性工学分野（木本研）

電子物性工学講座電子材料物性工学分野（山田研）

量子機能工学講座光材料物性工学分野（川上研）

量子機能工学講座光量子電子工学分野（野田研）

量子機能工学講座量子電磁工学分野（北野研）☆

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

デバイス創成部門先進電子材料分野（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（松山研）

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

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（水内研）#

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（津田研）

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野（山川研）

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）

国際高等教育院

教養教育部（小山田研究室）

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/>
 ブーストコンバータの離散化双線形モデルに基づく同定と制御

1. ブーストコンバータおよびその制御とは

ブーストコンバータは直流電圧を昇圧するパワーエレクトロニクス機器の一種である。構成（図1）が簡単なことから広く利用されているが、スイッチング素子を有するため動作の厳密解析は厄介であり、瞬時に生じるスイッチング動作そのものを扱うかわりにそのタイミングを反映して定まる状態の平均値を通した近似的解析に基づく、平均値モデルがよく用いられている。本稿では、スイッチング動作を直接考慮した厳密なモデル化について紹介し、実験によるその同定を経て非線形制御を適用することの有効性について一端を紹介する。関連論文はシステム制御情報学会において2016年に論文賞を授与されており、このモデルに基づく制御への期待が小さくないことを示唆しているならば光榮である。

スイッチSのON, OFFを周期的に繰り返すことによって、負荷抵抗Rに関する出力電圧vは周期定常状態となり、このときの出力電圧の平均値はデューティ比 μ （スイッチング周期Tに占めるON区間の比率）により決まる。素子値を適切な範囲で選ぶとき、ブーストコンバータはスイッチのON, OFFに対応する2つの等価回路に基づいて考察でき、平均出力電圧は $V_{in}/(1 - \mu)$ となり昇圧が達成される。ブーストコンバータの制御問題は、各区間におけるデューティ比を時々刻々と適切に定めるためのフィードバック制御則を設計することにより、素子値の不確かさのもとでも適切なデューティ比（の定常値）と所望の昇圧を達成しつつ、望ましい過渡応答を得る問題であるといえる。

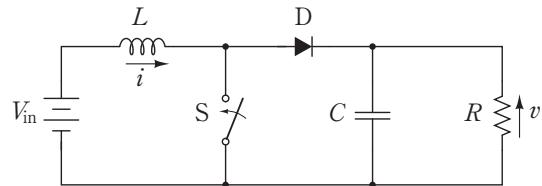


図1：ブーストコンバータ

2. ブーストコンバータの離散化双線形モデルと非線形制御

区間 $[kT, (k+1)T]$ におけるデューティ比を μ_k ($k = 0, 1, 2, \dots$) とおく。また、スイッチSがONに切り替わる時刻 kT における状態変数（キャパシタ電圧 v 、インダクタ電流 i ）を x_k 、OFFに切り替わる時刻 $(k + \mu_k)T$ における状態変数を ξ_k とおく。現実の素子に即して（各種損失抵抗に加え）ダイオードの立ち上がり電圧 E_D を考慮したもとで、2つの等価回路から、 $\xi_k = \mathcal{A}_1(\mu_k)x_k + \mathcal{B}_1(\mu_k)V_{in}$ および $x_{k+1} = \mathcal{A}_2(\mu_k)\xi_k + \mathcal{B}_2(\mu_k)V_{in} + \mathcal{B}'_2(\mu_k)E_D$ という関係が得られる。これらから ξ_k を消去し、スイッチSがONに切り替わる時刻の状態 x_k に着目した離散化された関係式 $x_{k+1} = \mathcal{A}(\mu_k)x_k + \mathcal{B}(\mu_k)V_{in} + \mathcal{B}'(\mu_k)E_D$ 導かれる（スイッチング区間での平均出力電圧についても同様の関係式が得られる）。しかし、このモデルでは制御入力にあたる μ_k が極めて複雑な数式を構成する形で現れ、その非線形性の扱いは制御系設計上、極めて厄介に見える。この点について踏み込んで考察したのが本研究の特徴といえ、 μ_k に関する非線形性は実は1次近似に十分堪える（2次近似であればほぼ正確）ことを明らかにしている。1次近似を適用しても、得られる近似モデルは線形モデルには帰着せず依然として非線形であるものの、この非線形モデルの同定法について論じ、精度の高い同定が可能であることを実験で検証している。 μ_k から w_k および x_k から z_k への簡単な変換（平行移動）を通して得られた双線形モデルを

$$z_{k+1} = \mathcal{A}z_k + B(z_k)w_k \quad (w_k \text{ に関して明らかに } 1 \text{ 次式で, } B(z_k) \text{ も } z_k \text{ の } 1 \text{ 次式: 双線形}) \quad (1)$$

と表すとき（ \mathcal{A} は安定な定数行列になる）、正定行列 Q を与えたもとでのリアプロフ方程式 $P = (\mathcal{A}^T P \mathcal{A} + Q)$ の解 P と正数 r のもとで、以下の非線形制御則の妥当性が証明されている。

$$w_k = -\frac{B(z_k)^T P \mathcal{A} z_k}{r + B(z_k)^T P B(z_k)} \rightarrow \text{これを } \mu_k \text{ に逆変換 } \rightarrow 0 \leq \mu_k \leq 1 \text{ を満たすように飽和動作} \quad (2)$$

定常偏差を消去する積分補償を含む拡張制御則に関しても、実験を通して有効性を検証している。

生体医工学講座 複合システム分野（土居研究室）

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

「ブロック積み替え問題の効率的解法」

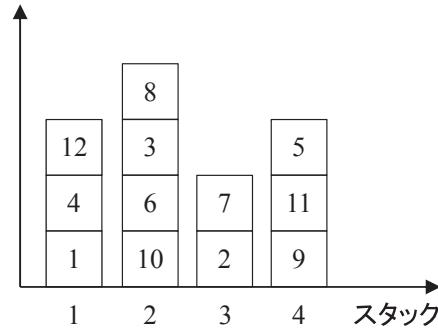
ブロック積み替え問題とは、右図のように同じ大きさのブロックが積まれているものとして、番号順にブロックをなるべく早く取り出す問題です。ただし、一番上に積まれたブロックしか動かすことができません。図において、左端の山（各山のことをスタックといいます）の下から2番目に積まれた1番のブロックを取り出す場合、あらかじめその上に積まれた12番、4番のブロックを別の山（スタック）に積み替えておく必要があります。このとき、もし12番のブロックをスタック3に積み替えたとすると、2番のブロックを取り出す

際にまた積み替えなければなりません。したがって、うまく積み替えないと、無駄な積み替えが多く発生することになります。そこで、最小の積み替え回数ですべてのブロックを順に取り出そう、というのがブロック積み替え問題の目的です。ブロック積み替え問題はコンテナ積み替え問題とも呼ばれており、港湾などのコンテナターミナルを想定した研究が多く行われています。ほかにも、鉄鋼生産工程における板状の鉄の塊（スラブと呼ばれる）や鉄道車両を想定とした研究も行われています。このように、ブロック積み替え問題は様々な応用が考えられる普遍的な問題です。

本研究室では、このブロック積み替え問題の最適解（最小の積み替え回数でブロックをすべて取り出すことのできる積み替えパターン）を求める研究を行っています。分枝限定法と呼ばれる解探索方法を適用するのですが、積み替えパターンをすべて調べるのではなく、見込みのないパターンは早い段階で調べるのをやめてしまって探索効率を向上させる点に特長があります。たとえば、図の配置について、最小の積み替え回数かどうかはまだわからないものの、6回の積み替えですべてのブロックを取り出せることができたとします。そして、12番のブロックをスタック4に積み替えると、少なくともあと6回の積み替えが必要であるとします。この場合、合計の積み替え回数は7回以上になってしまないので、どう頑張っても、今わかっている積み替え回数6回の解よりよい解は求まりません。したがって、このような積み替えは考えなくてよいことになります。このことからもわかるように、必要な残り積み替え回数をうまく見積もって、無駄な探索をいかに減らすかが分枝限定法の性能を大きく左右します。そこで、本研究室では、この見積もりの計算方法を工夫することで、従来の方法よりも大幅に計算時間を短縮できることを示しました。今後は、ブロックの積み替えに関する様々な問題を扱っていく予定です。

参考文献

- [1] S. Tanaka and K. Takii: A faster branch-and-bound algorithm for the block relocation problem, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 181-190 (2016)



図：ブロック配置の例

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/>

「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明を目指して」

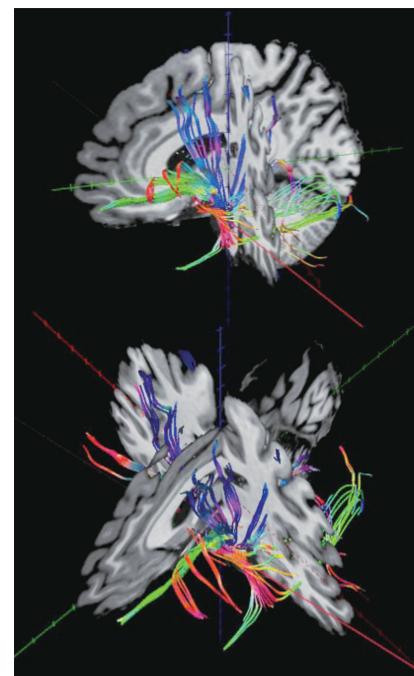
認知、記憶、創造性、意識といったヒト高次脳機能のメカニズムは人類に残された極めて難解な謎の一つであり、その解明は多くの科学者が挑み続けてきた夢である。近年、この夢を実現し、さらに精神・神経疾患の克服や新たな産業の創出に結びつけることを目指す2つのビッグプロジェクトがヨーロッパ(Human Brain Project)とアメリカ合衆国(BRAIN Initiative)で相次いで開始された。我が国でも、この高次脳機能のメカニズム解明のため、その基盤を構築することを目的として「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト(以降、革新脳プロジェクト)」が開始された。

この革新脳プロジェクトは、精神疾患、神経変性疾患、脳血管障害・脳回路回復の三領域における患者脳画像、生理や認知行動データの計測のプロトコルを共通化し、データベース化することを通じて、疾患横断的・疾患特異的な病態神経回路の同定を目指している。そのため革新的な計測・解析技術を開発し、それらを用いて健常者の詳細な脳画像・生理指標を取得し、患者データとマーモセット脳回路マップの対応づけを行うことを目的として進められている。

近年、これらの脳ビッグプロジェクトが主要先進国で相次いで始められるに至った背景には、各国において高齢化社会の到来に伴い、アルツハイマー病などの認知症に代表される神経・精神疾患患者が今後益々増加することが予想され、疾患の早期発見や新薬の開発などにより医療費を抑えたいという財政上の事情がある。一方、科学技術という側面からは、非侵襲的にヒトの脳神経活動を計測・解析・可視化するニューロイメージング手法、中でもMRIを用いた脳機能と白質神経線維の計測・解析技術が、近年急速な進展を遂げたことがプロジェクトの大きな原動力となっている。

当研究室は、これまでこのニューロイメージングの先進的な技術開発を長年にわたって進めてきた[1-3]。上記の革新脳プロジェクトにおいては、臨床研究総括チームの一員として参加し、東京大学附属病院、大阪大学附属病院、広島大学附属病院などと連携して統合失調症を含む複数の精神疾患患者の拡散MRIの臨床画像データを対象とし神経線維束の解析などを実施し、疾患横断的・疾患特異的な病態神経回路を同定することを目指して研究を進めている。右図は大脳基底核近傍からトラッキングして得られた神経線維解析の一例である。この様な解析から白質病変の定量評価が可能となる。

ヒト脳機能ネットワークの全容を解明するには、MRIだけでは不十分であり、時空間的に変動する高次脳機能の複雑な仕組みを解明することにはまだ多くの解決すべき技術的課題が残されている。今後、時間分解能と空間分解能の共に優れたイノベーティブなニューロイメージング手法の創成を進め健康社会の実現に貢献したい。



- [1] 小林哲生，“超高感度な光学的磁気センサを用いた新たなニューロイメージングに向けて”，Vision, Vol.27, No.2, pp.73-79 (2015)
- [2] 小林哲生，“脳神経磁場イメージングの新たな試み”，シミュレーション, Vol.33, No.2, pp.18-23 (2014)
- [3] Natsukawa and Kobayashi, “Cortical activations associated with determination of depth order in motion transparency depth rivalry: A normalized integrative fMRI-MEG study”, Human Brain Mapping, Vol.36, pp.3922-3934 (2015)

電磁工学講座 電磁回路工学分野（和田研究室）

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

「電力変換機器などから生じる伝導性妨害波の ICT 装置を介した通信ネットワークへの伝達特性評価」

家庭内 LAN など有線ネットワークで使用されるルータやスイッチングハブなどの情報通信（ICT）機器は、通信速度の向上や大容量化と同時に、ネットワークのスマート化・高機能化を目指して信頼性の向上が要求されている。通信機器自身が発する電気的雑音（妨害波）や外部から伝導してくる妨害波が通信ネットワークに侵入すると、機器の誤動作が起こるだけでなく、通信ネットワーク全体の性能を低下させる。特に、昨今オフィスや家庭内にも広く設置されるようになったパワーエレクトロニクス機器は、電子回路のスイッチングにより電力を制御する際に電気的雑音を発生し、有線無線を問わず ICT 機器の近傍に大きな妨害波源が存在する状況が発生している。たとえば図 1 に示すように、パワーエレクトロニクス機器が発生する妨害波が電源ネットワークに侵入し（以下、電源系妨害波）、同じ電源供給系に接続された ICT 機器を介して妨害波が通信ネットワークに到達すると、通信性能が悪化する。そのため、ICT 機器は、直接通信ポートに混入する妨害波だけでなく、電源ネットワークから侵入する妨害波からも悪影響を受けない、高い免疫性（イミュニティ）が求められる。

電子機器の連続伝導性妨害波に対するイミュニティの評価法としては、国際規格である CISPR 24 やその測定法 IEC61000-4-6 がある。これらの規格は、周波数範囲が 150 kHz ~ 80 MHz の伝導性妨害波を対象にしたものであるが、機器の高効率化に伴い妨害波源が広帯域化しているため、適応する周波数範囲の拡張が必要である。

本研究では、電源系妨害波の通信ネットワークへの伝達を高周波帯で観測するため、ネットワークアナライザを用いて、電源系のコモンモード妨害波やディファレンシャルモード妨害波が、通信ネットワークの信号系ディファレンシャルモードとして伝達する割合を測定した。通信機器の代表例として 2 種類のスイッチングハブを測定した結果、図 2 に示すようにイーサーネット通信帯域内の 200 MHz 付近で -40dB 程度の伝達があった [1]。これは、振幅が数十 V の妨害波が電源ネットワークに発生した場合、通信が阻害される可能性があることを示唆している。また、回路基板のインピーダンスバランスに着目し、妨害波のモード変換を抑制する回路設計法 [2] を検討している。

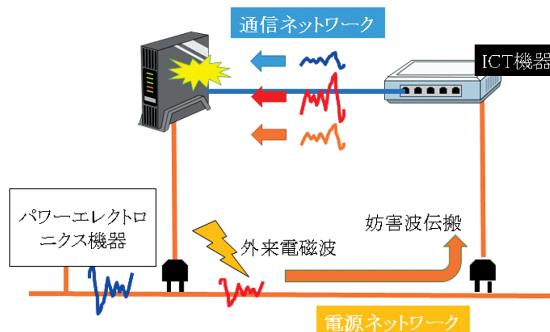


図 1 通信ネットワークへの妨害波の伝達経路

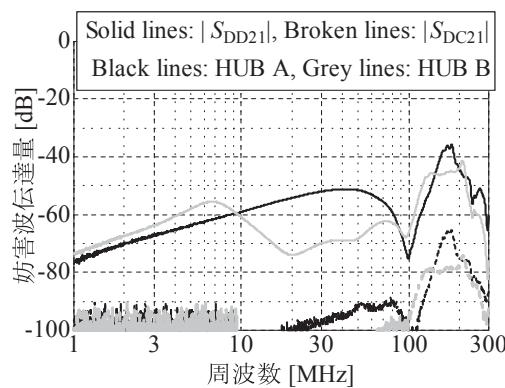


図 2 電源系妨害波の通信ネットワーク伝達量

[1] T. Matsushima, *et al.*, "Mode Conversion and Transfer Characteristics of Conducted Disturbance to Ethernet Device from Power Supply Cable," 2015 IEEE International conference on EMC, pp. 378-381, Dresden, Germany, Aug. 2015.

[2] 豊田他, “通信機器の電源系から混入する妨害波のモード変換抑制回路,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-4-6, Sept. 2016.

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>

「一つの量子的なシャッターで二つのスリットを同時に閉じる」

量子力学では、1つの粒子が複数の場所に同時に存在する量子重ね合わせ状態をとることができる。光の波の性質を確認した、「ヤングの2重スリット実験」を、光子を1個ずつ用いて行った場合も、実験を繰り返すと、光子の検出位置の分布は、干渉縞を形成することが知られている。この光子の2重スリット実験は、1個の光子が重ね合わせ状態になり、同時に2つのスリットを通ったと考えないと説明がつかず、量子力学の重ね合わせ状態をもともと端的に示す実験である。また、通常のシャッター1個で一方のスリットを遮断すると、この干渉が失われることもよく知られている。

では、もし2つのスリットの位置に同時に存在する、すなわち「重ね合わせ状態」をとりうるシャッター（量子シャッター）を用いて、このスリットを制御すると、どのようなことが起こるだろうか。2003年に米国とイスラエルの物理学者らは、重ねあわせ状態にある量子シャッターを用いると、その量子シャッターが光子と相互作用したあと別の重ね合わせ状態に変化したばあい、入射した光子はまったくスリットを透過できず、重ね合わせ状態をたもったまま跳ね返されることを理論的に予言した（図1）。これは、たった1つの「量子シャッター」を用いて、複数のスリットを同時に遮断することができるという奇妙な、また驚くべき予言である。しかし、必要な性質を満たす量子シャッターの実現が困難だったため、実験的に実証されていなかった。

我々は光量子回路を用いて2003年の理論提案を初めて実験的に実証した。重ね合わせ状態をとり得る量子シャッターは、光子で実現した。これにより、半透鏡を用いて、高い精度で重ね合わせ状態を作ることができる。しかし、このままでは、シャッターで光子をはじき返すという相互作用を実現することができない。そこで、各スリットに光子で光子を制御することができる光量子スイッチを用いることを考案した。実験ではまず、1個のシャッターで、古典的な限界を超えて、2つのスリットを同時に遮断することが可能なことを確認した。測定の結果、古典的な限界を超えて、光子が遮断できていることを確認した。次に、同時に2つのスリットがシャッターで閉じられていることを確認するために、シャッターで弾き返された光子が干渉することを確認した（図2）。もし、シャッターが片方のスリットしか閉じていなかった場合、決してこのような干渉縞を得ることはできない。我々は、このようにして、2003年の理論提案をはじめて実験的に実証した。本研究は、量子物理学のより深い理解に役立つだけでなく、重ね合わせ状態で、重ね合わせ状態を制御することが可能なことを示すもので、将来の量子コンピュータの実現につながるものであると期待している。

参考文献：Ryo Okamoto and Shigeki Takeuchi, “Experimental demonstration of a quantum shutter closing two slits simultaneously,” *Scientific Reports* **6**, 35161 (2016).

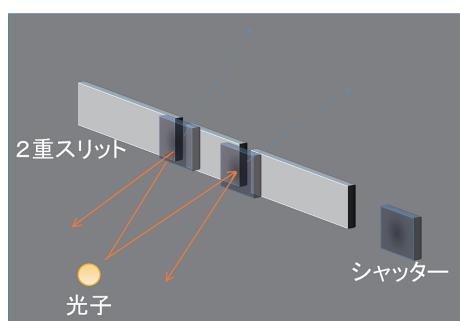


図1. 一つのシャッターが重ね合わせ状態で複数の場所に存在し、光子をはじき返している様子の概念図。

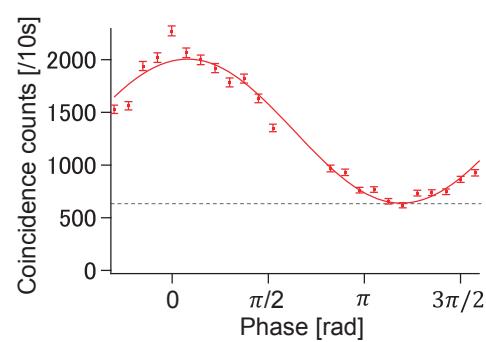


図2. 干渉縞測定結果。

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>

「遷移金属酸化物を用いた抵抗変化型不揮発性メモリ構造の作製と評価」

半導体不揮発性メモリの代表格であるフラッシュメモリは、各種メモリカードやパソコンの記憶装置（SSD）に応用されていますが、書き換え耐性や動作速度には動作原理に基づく限界があります。本研究室では、究極的な小型・高速の不揮発性メモリ候補として、遷移金属酸化物を用いた抵抗変化型不揮発性メモリ（ReRAM）に注目しています。抵抗変化とは、酸化物を特定の金属で挟みこんだ積層構造への電圧印加を繰り返すだけで、高い抵抗と低い抵抗の状態を繰り返す現象で、電圧を印加しなくとも各抵抗状態を保持する特性を有しております。ただし、抵抗変化が発現する金属と酸化物の組み合わせが多岐に亘ることもあり、この抵抗変化の普遍的メカニズムには謎が多いのが現状です。

抵抗変化特性の基礎研究として、我々は遷移金属酸化物の一つである酸化ニッケル（NiO）薄膜を白金（Pt）電極で挟み込んだ積層構造（Pt/NiO/Ptと表します）を作製しています。この構造は多くの研究機関から報告されているのですが、今回、NiO薄膜の作製を工夫することにより、作製直後の積層構造への電圧印加過程において興味深い量子効果が発現することを見出したので、紹介したいと思います。

従来のPt/NiO/Pt積層構造では、電圧印加により1つの急激な低抵抗化（フォーミング）が起こりますが、特定の酸素組成を有するNiO薄膜を用いると、図1(a)に示す2段階の低抵抗化（セミフォーミングとセカンドフォーミング）が見られます。着目すべきは、図1(b)のような2種類のフォーミング間（セカンドモード）に量子化コンダクタンス $G_0 (=2e^2/h=77.5\mu S)$ に基づく離散的なコンダクタンスの変動が見られることであり、NiO薄膜内に量子ポイントコンタクトをなす導電パスが形成されていることを示唆しています。

そこで、この積層構造を原子レベルの顕微鏡を用いて分析したところ、NiO薄膜内の柱状結晶間の境界（粒界）において、酸素組成が明らかに小さくなっていることがわかりました。従来の積層構造では粒内と粒界で組成に顕著な違いが認められないことから、粒界部での酸素空孔（Vo）が導電パスになっているものと考えられます[1]。セカンドモードにおける同一極性の電圧印加によって、コンダクタンスが増加したり減少したりする点に独創性がありますが、これを制御する物理現象を把握することができれば、抵抗変化のメカニズム解明に大きく前進することが期待されます。

また、柱状および粒状と結晶構造が異なるNiO薄膜を用いると、Pt/NiO/Pt積層構造の初期抵抗やフォーミングの特性ばらつき指標が両者で明確な差があることを見出しました[2]。紙面の都合上詳細は割愛しますが、この結果は、図2に示すような酸素空孔と導電パスを示唆するものであり、導電パスが粒界に存在しうることを強く支持するものと考えることができます。

[1] H. Sasakura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 233510 (2015).

[2] Y. Nishi *et al.*, J. Appl. Phys. **120**, 115308 (2016).

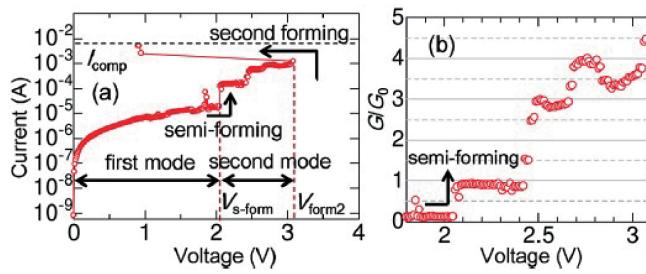


図1 Pt/NiO/Pt積層構造の2つのフォーミング特性縦軸を(a)対数電流 および (b)コンダクタンスで表示

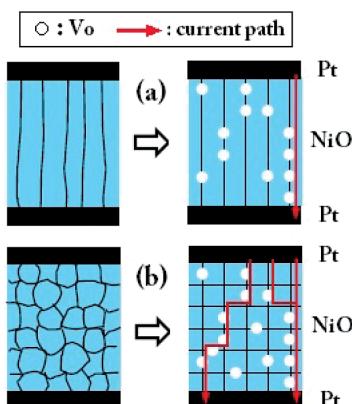


図2 (a)柱状および(b)粒状のNiO薄膜を有するPt/NiO/Pt積層構造の模式断面

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（山田研究室）
<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
有機薄膜トランジスタのナノスケールトラップ評価に関する研究

有機半導体をチャネルとする電界効果トランジスタ（OFET）は、フレキシブルディスプレイの駆動回路などへの応用が期待されている。OFET のデバイス性能の改善に当たっては、そのチャネル領域となる有機薄膜の構造・材料物性、電極／有機接合界面における構造揺らぎやキャリア注入障壁など、さまざまな阻害要因が存在する。原子間力顕微鏡（AFM）をベースとするケルビンプローブフォース顕微鏡（KFM）は、試料表面の電位分布をナノスケールで測定する手法であり、上記性能向上の阻害要因を分離して評価する上で極めて有効な測定法となる。本稿では、KFM を用いて、OFET チャネル部の局所トラップ挙動の可視化に成功した測定例を紹介する。

本測定で使用した OFET のチャネルには、有機溶媒に可溶で、キャスト法により結晶性の高い有機薄膜の作製が可能なジオクチルベンゾチエノベンゾチオフェン (C_8 -BTBT) という分子を使用した。図 1 に、チャネル部となる C_8 -BTBT 薄膜の表面電位像を示す。 C_8 -BTBT 薄膜は、分子 1 層に相当する高さ約 3 nm のステップ構造から構成されるが、実際に、表面電位像に見られる、何本もの明るい（電位が高い）折れ線は、分子ステップ端に対応する。ステップ端が明るく見えるのは、残留溶媒の影響により、ステップ端に電荷がトラップされているためである。一方、図 1 (b) はデバイス動作後の表面電位像であるが、図 1 (a) と比べると、ステップ端の電位は著しく高くなっている。測定された電位から、ステップ端のトラップ電荷密度（ホール電荷密度）を推定すると、 $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ となった。この例では、デバイスの動作後のトラップ電荷が過剰に残留したため、静的な KFM 測定によってもトラップ電荷密度を測定できたが、トラップの緩和が測定時間（通常は数分から數十分）より速い場合は、測定中にトラップ電荷が減少していくため、トラップ電荷密度の正確な測定は困難になる。このような場合には、ゲート電圧をスイープし、トラップに電荷を出し入れしながらトラップ電荷を可視化する動的な評価法を用いる。図 2 (a) はジナフトチエノチオフェン (DNTT) の薄膜をチャネルとする OFET の表面形状像である。チャネル上でゲート電圧 (V_G) を掃引し、表面電位 (V_{SP}) の変化を記録すると、 V_G の掃引方向によって V_{SP} にヒステリシスが現れることが分かった。この電位シフト (ΔV_G) は掃引後に残ったトラップ電荷によって生じたものであるため、走査範囲の各画素点 (64×64) においてゲート電圧掃引（往復で 740 ms）を行い、 ΔV_G からトラップ電荷密度を計算した結果、図 2 (b) のようなトラップ電荷密度像が得られた。電極近傍ではトラップ電荷が少ないと分かるが、これは電極近傍のトラップ電荷は電極に近いため速やかに排出されるのに対し、電極から遠い部分にトラップされている電荷は、電極近傍での導電率低下により、排出されにくくなるためである。

今後、本手法における測定の時間分解能を改善し、より緩和の速いトラップについても評価するとともに、OFET におけるデバイスのトラップを低減し、より移動度を高める研究を推進していきたい。

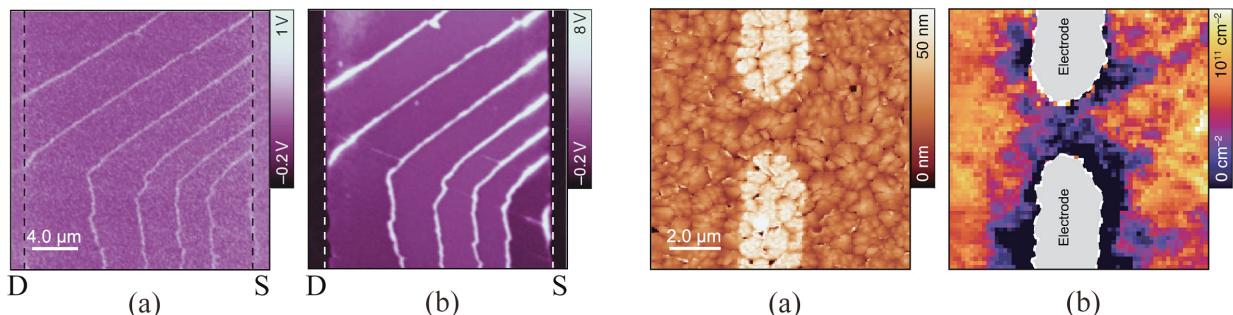


図 1：(a) FET 動作前および (b) 動作後における C_8 -BTBT 薄膜をチャネルとする OFET の表面電位像

図 2：DNTT 薄膜をチャネルとする OFET の (a) 表面形状像および (b) トラップ電荷密度像

量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）

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

チップ上の微小点に保存した光の瞬時転送

将来の量子情報等の高度な情報処理を可能とする光チップを実現するためには、光を微小点に保存するためのナノ共振器の開発、ナノ共振器に保存した光と電子系の相互作用等に基づく光量子演算ユニット等の形成、およびそれらを集積し、複数の演算ユニット間での情報転送の実現など、様々な課題が存在します。これまで、我々は、これらの課題を念頭に、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ独自のフォトニック結晶を用いて、1) 光を微小点に長く保存することの出来る高 Q 値ナノ共振器の実現、2) ナノ共振器への光の出し入れや光メモリー動作の実現、3) ナノ共振器の集積と強結合状態の形成、等の研究を進めてきました。

今回は、上記、1)-3) に続く展開として、高 Q 値ナノ共振器に保存した光を、制御光の照射により、別の離れたナノ共振器に、“任意のタイミングで”、“高効率に” 転送することに成功した結果について紹介します。この成果は、光量子演算ユニット間の情報転送等を可能するもので、上記の全体目標達成に向けた一歩と言えます。また、これらを複数個集積することで、他の様々な機能の実現も期待されます。

得られた現象は、図 1 に示すように、ナノ共振器 A (= 共振周波数 ω_A) に蓄積した光 (= 周波数 ω_A) を、別のナノ共振器 B (= 共振周波数 ω_B) へと転送させるものです。転送の際には、共振器 A と B の中間に位置する第 3 のナノ共振器 C (= 共振周波数 ω_C) へ制御光の照射を行い、その共振周波数 ω_C を $\omega_C \ll \omega_A$ の状態から $\omega_B \ll \omega_C$ へと断熱的に変化させます。これにより、図 2 に示すように光を共振器 A から共振器 B へと一方向に、高効率 ($> 90\%$) に、瞬時に (<100ps) 転送することに成功しました。これは、光の断熱転送という観点から物理的にも興味深く、かつ上記のような応用にも繋がる成果です。

参考文献

- [1] R. Konoike, H. Nakagawa, M. Nakadai, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda: "On-demand transfer of trapped photons on a chip ", Science Advances, Vol. 2, no. 5, e1501690, 2016.

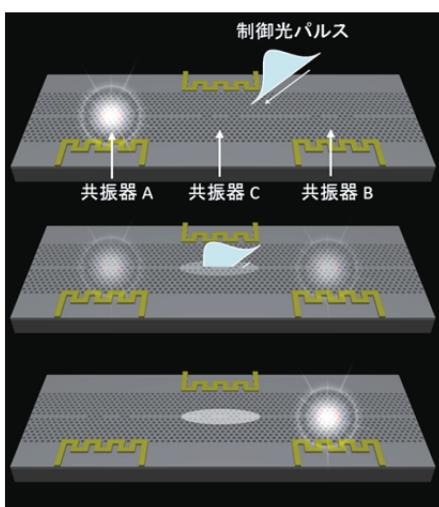


図 1：チップ上の微小点に保存した光の瞬時転送の模式図

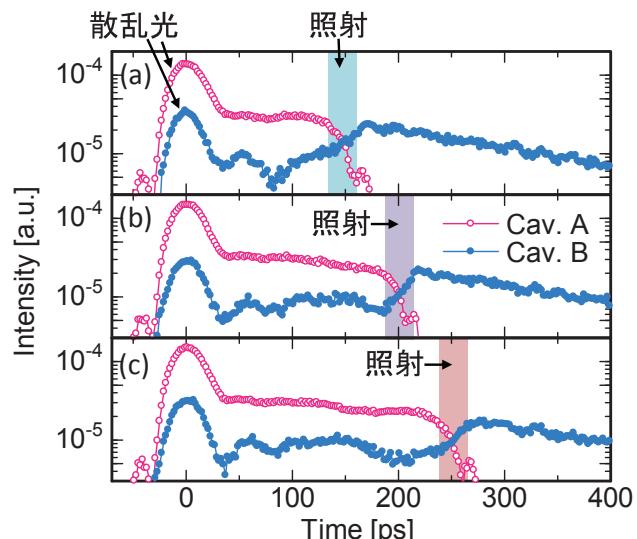


図 2：光転送実験の測定結果。それぞれ制御光パルスの共振器 C への照射タイミングが (a) 150 ピコ秒、(b) 200 ピコ秒、(c) 250 ピコ秒程度に設定してある。

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

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

「アクアビジョン：水中カメラ・プロジェクタ群による生物の3次元形状・運動計測」

画像メディア分野では「アクアビジョン」と呼ぶ多視点映像を用いた水中生物の3次元形状・運動計測の実現を目指した研究を進めている。これは従来空気中にある人物・建造物を対象として3次元形状・運動計測を行って来たコンピュータビジョンを、より複雑な光学現象が生じる水中世界においても機能するように拡張する技術であり、例えば受精卵の3次元計測による卵割過程の可視化・分析による医学・薬学・生物学への貢献、遊泳する魚の3次元計測による漁業、特に養殖業の情報化など、数多くの応用が期待されている。以下ではその一例として水中カメラ・プロジェクタ群を用いた水中生物の3次元形状・運動計測について紹介する。

まず図1左に示すように、水槽中の生物（金魚）に対して水槽の周囲に置かれたプロジェクタ群でパターン光を照射し、カメラ群で撮影する状況を考える。ここで各プロジェクタはカメラと逆向きに光を入出力する逆カメラとしてモデル化することが可能であり、従来の人物・建造物を対象とした研究では特に被写体に表面テクスチャが乏しい場合に有効であることが示されてきた。そこでこれを水中環境に拡張するために、平行平面屈折層を伴う水中プロジェクタの投影過程のモデル化とそのキャリブレーション手法を確立した。

またこれを受精卵など半透明な被写体の3次元計測へと拡張することを目指して、制御可能な光源としての平面ディスプレイと多視点カメラを備えた撮影環境（図2左）を用いた水中半透明物体の3次元形状計測に取り組んでいる。この研究では光源としてのディスプレイを能動的に制御することで半透明物体の形状とその透過率・散乱係数を高精度に推定することを目指しており、これまでに透過率分布の推定が実現している（図2右）。今後は異方性散乱のモデル化などによる形状計測の高精度化と、顕微鏡環境下での計測環境の構築によって受精卵のようなミクロスケールにおける半透明物体の3次元計測実現を目指す。

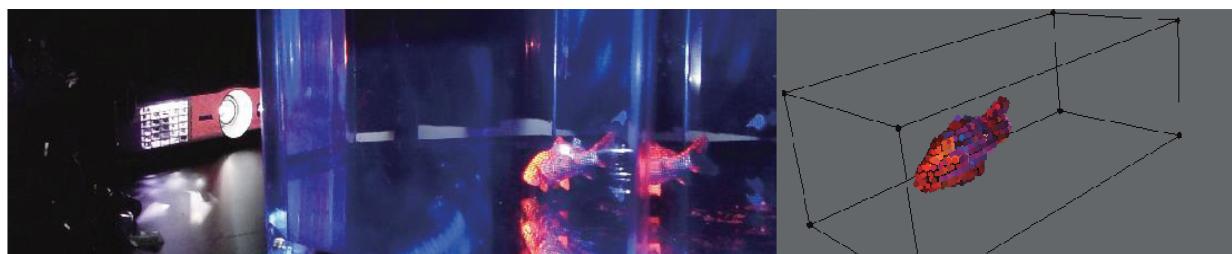


図1：水中生物の実時間3次元形状計測と自由視点映像生成。左：撮影環境。右：計測された3次元形状



図2：水中半透明物体の3次元形状推定。左：計測環境。右：推定された透過率分布

通信システム工学講座 知的通信網分野

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

ネットワークグラフ表現を用いた通信機会のモデル化

近年、通信端末の普及や記憶装置の低コスト化に伴い、PC (Personal Computer) や、携帯電話、スマートフォン等の通信端末を用い、インターネット接続あるいはアドホック接続により行われる通話や、メールの送受信、SNS (Social Networking Service) 上のメッセージ交換・写真共有といった通信機会を観測したログデータが蓄積されるようになってきている。それらの通信機会のログデータを、人をノード、通信機会をリンクで表現することで、ネットワークグラフでモデル化する取り組みが行なわれている。ネットワークグラフを扱うためには昨今台頭してきている GDB (Graph Database) を用いることが有用だが、登録可能なリンク数に制限がある場合や、分析を高速に行なうために対象とするリンクを間引く必要がある場合などに、どのリンクをより品質が高いと見なすべきかについては十分に検討がなされていない。そこで、本研究 [文献] では、時間的特徴を有するリンクは品質が高いという仮説に基づき、時間的特徴に基づいたリンク形成手法を提案した。さらに、提案手法の有効性を示すために、実データを用いて評価を行った。

提案システムの構成を図 1 に示す。提案システムは、人をノード、通信機会をリンクとしてネットワークグラフ表現でモデル化する。ノードペア抽出部は、通信機会データ DB を参照することにより、通信機会を生じたノードペアと時刻を時系列で表したデータ系列を生成する。例えば、PC や、携帯電話、スマートフォン等の通信端末を用い、インターネット接続あるいはアドホック接続により行われる通話や、メールの送受信、SNS 上のメッセージ交換・写真共有といった通信機会を扱う。時間領域信号生成部は、前段で生成されたデータ系列に従って時間領域信号を生成する。周波数領域解析部は前段で生成された時間領域信号に対し、フーリエ変換によりエネルギースペクトル密度関数に変換し、リンク品質の評価値を算出する。リンクデータ登録部は、前段で算出された各ノード間の評価スコアを付加してリンクを GDB に登録する。

図 2 に評価結果を示す。ここでは 10% のリンクをマスクし、品質が高いと評価されたリンクを用いてマスクしたリンクの推定を行なう。これは、品質が高いリンクほど全体の構造にとって重要であるという仮説に基づいた評価である。データセットとしてエンロン社の E メールデータセットを用いた。図の横軸は使用しないリンクの割合、縦軸は推定の精度を表す。図から、提案方式 (Spectrum peak) の推定精度が 3 つの比較方式と比べて最も高かった。本結果から、時間的特徴を有するリンクは品質が高いという仮説ならびに提案方式の有効性が示された。

[文献] 杉本, 新熊, "ユーザ間の通信機会の時間特性の評価手法," 信学技報, MoNA, 2016 年 11 月.

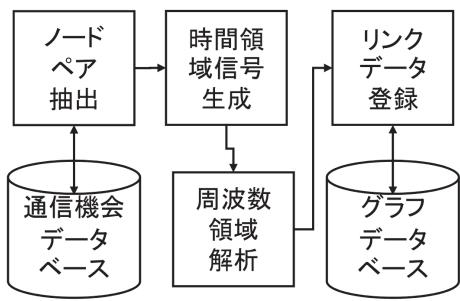


図 1 : システム構成

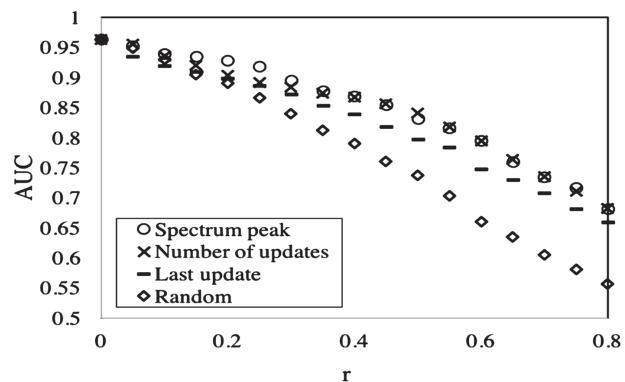


図 2 : 評価結果 copyright©2016 IEICE

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/>

「近似演算を活用した画像認識向けニューラルネットワークハードウェア」

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、画像認識向けハードウェアに関する研究に取り組んでいる。画像認識技術は、車載やロボティクス、医療、セキュリティ用途など、様々な分野において今や欠かすことのできない主要な情報処理技術である。特に近年、これらの画像認識を組込み機器上で実現することが求められており、限られた電力制約の中で認識精度と処理性能を両立させることができることが大きな課題となっている。これらを解決すべく、我々はソフト・ハード両面からの検討を行い、ハードウェア実装に適した画像認識アルゴリズムを開発し、電力効率に優れた高性能な組込み向け画像認識システムの実現を行っている。

高精度な画像認識が行える手法として、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network; CNN）の利用が近年広まっている。CNNは図1に示すように、画像に対して複数のフィルタを用いた畳み込み演算（Convolution: Conv）と、画素値の間引き処理であるプーリング（Pooling: Pool）を繰り返し適用することで、複雑な画像の特徴を効率良く学習することができる手法である。しかしこの中で行われる畳み込み演算には多大な計算量を要し、ハードウェア化を行う際には消費電力の増大が問題となる。そこで我々は、ハードウェア化に適した近似演算を適用することで、CNNの畳み込み演算にかかるコストを低減させる手法 [1] を提案した。提案手法では畳み込み演算とプーリングの組合せに着目し、出力への影響の少ない中間演算に対し近似および省略を行う。図2に示すようにCNNにおいては畳み込み演算とプーリングは順番に行われるが、プーリングでは複数の畳み込み演算結果のうち、最終的に1つの結果のみが出力される。従ってプーリングで選択されない畳み込み演算結果は、出力に直接の影響を与えないこととなる。そこで提案手法では図3のように、まず演算コストの小さい近似演算（AppConv）によりプーリングの出力を予測し、予測結果に基づいて必要な畳み込み演算のみを実行する二段階の計算手法を提案した。これにより、必要な畳み込み演算数をプーリング領域のサイズに応じて（図中の例では1/4に）低減することが可能となる。提案手法のソフトウェア・ハードウェア実装を行った結果、認識精度をほとんど損なうことなく、CNNハードウェアの消費電力を約20%低減できることが示された。

参考文献

- [1] T. Ujiie, et al, "Approximated prediction strategy for reducing power consumption of convolutional neural network processor," in Proc. IEEE CVPRW, pp.870-876, 2016.

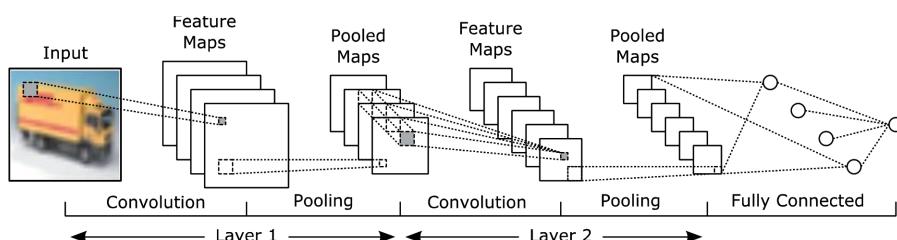


図1 畳み込みニューラルネットワークの例（畳み込み演算とプーリングの繰り返し構造を持つ）

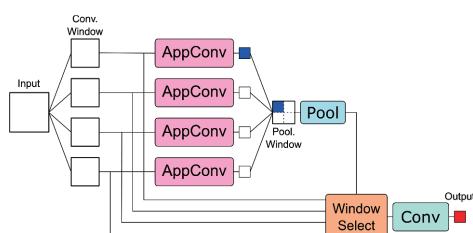


図2 提案手法における畳み込み演算とプーリング（Conv が 1/4 に低減）

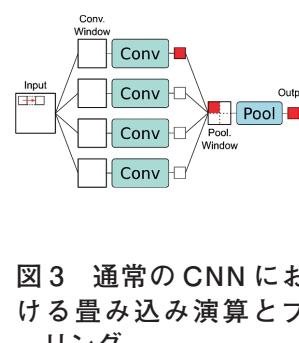


図3 通常のCNNにおける畳み込み演算とプーリング

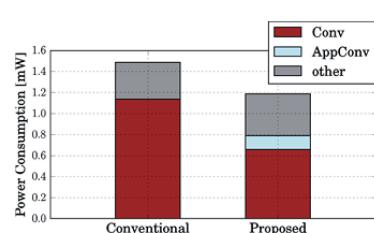


図4 提案手法による電力削減効果（65nm ASIC）

情報学研究科（通信情報システム専攻）超高速信号処理分野（佐藤 亨研）

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

「適応型信号処理を用いた低計算量高分解能医用超音波イメージング」

超音波診断装置を用いた医用イメージングは、放射線を使用するX線CTや高価な診断装置を必要とするMRIなどと比較し、非侵襲かつ低成本な診断方法として、医療現場で幅広く用いられています。しかし、その解像度はCTやMRIに劣るため、高分解能なイメージング方法の確立が求められています。超音波イメージングにおける分解能を向上させる方法は、深さ方向の分解能を向上させる方法と横方向の分解能を向上させる方法の大きく2つに分けられます。当研究室では、深さ方向に高分解能な画像をリアルタイムに表示可能な方法を開発しました[1]。一方で、横方向の分解能を向上するする高分解能なイメージング方法として、多数の超音波素子に適応型信号処理を適用したイメージング方法が提案されてきましたが、計算量が多く、実際の超音波診断装置に適用できないという課題がありました。

当研究室では、電波を用いた高速な高分解能イメージング方法を確立してきました[2]。電波によるイメージングと超音波イメージングでは、伝搬速度はもちろんのこと、使用する信号の周波数、比帶域などが異なり、電波で使用されている方法を適用するには様々なハードルがあります。電波で用いられている方法は、狭帯域信号を仮定し、高速イメージングを実現していますが、医用超音波では一般的に広帯域信号を使用します。この違いを補償するため、全イメージング点に焦点形成を行うなどの信号処理が必要になるため、従来の方法では計算量が膨大になっていました。しかし、医用超音波でも焦点付近のある程度の範囲内では狭帯域信号を仮定しても良いことを発見し、レーダーで用いられている手法を超音波イメージングに応用することで従来の適応型信号処理を用いた方法に比べて、1/8程度の計算量で高分解能なイメージングが可能となる方法を開発しました[3]。図に商用装置にも用いられている適応型信号処理を用いない方法と提案法を用いて実験によって得られた画像を示します。深さ20, 30, 40, 50mm付近にはそれぞれ横方向に近接して置かれた2つの点ターゲットが存在します。従来の方法である図(a)では2ターゲットを分離できていませんが、提案法である図(b)では分離できていることがわかります。今後は、今回提案した方法を実際の医用イメージング環境下で評価し、さらなる精度向上と計算量の低減に取り組みます。

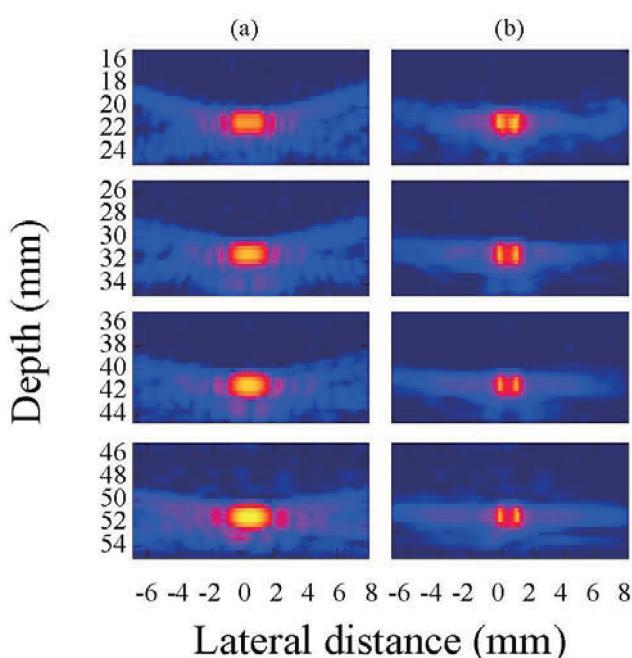


図. 超音波イメージングの実験結果。(a) 適応型信号処理を用いない場合。(b) 低計算量な適応型信号処理を用いた場合。

参考文献

- [1] H. Taki, K. Taki, T. Sakamoto, M. Yamakawa, T. Shiina, M. Kudo, and T. Sato, "High range resolution ultrasonographic vascular imaging using frequency domain interferometry with the Capon method," IEEE Trans. Med. Imag., vol. 31, pp. 417-429, 2012.
- [2] T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Tsutsumi, and T. Sato, "Meteor Trail Echo Rejection in Atmospheric Phased Array Radars Using Adaptive Side lobe Cancellation", J. Atmos. Oceanic Technol., vol.31, pp.2749-2757, 2014.
- [3] S. Okumura, H. Taki, and T. Sato, "Computational complexity reduction techniques for real-time and high-resolution medical ultrasound imaging using the beam-space Capon method", Jpn. J. Appl. Phys., vol.55, No.07KF07, 2016.

論理生命学分野（石井研）

<http://ishiilab.jp>

思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用（脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ）

論理生命学分野では、「学習するシステム」としての「生命」や「知性」の本質を明らかにすることを目的として多岐にわたる研究を進めています。本稿では、当研究室が 2016 年度の後半から参加している「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用（脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ）」と題するプロジェクトについてご紹介します。

本プロジェクトは、日本の誇るスーパーコンピューターである「京」および、その後継として数年後に建設が計画されているポスト「京」（仮称）の膨大な計算パワーを用いる応用課題として脳型人工知能の構築を目指しており、最終的には人間や動物の脳内で生じている認識・思考・意思決定の過程を理解し、柔軟で汎用的な人工知能の実現を狙っています。

我々が知りたいことは脳を構成する大脳・小脳・基底核等の各種主要部品の動作原理です。人間の脳は 1000 億を超える膨大な数の神経細胞と、それらの間にさらに多数（大脳において神経細胞一個あたり平均して一万個程度）の接続関係を持った複雑な構造から成立していることが知られています。しかし残念ながら脳の構造がどれだけ詳細に解ったとしても、それだけで動作原理が解ったとは言えません。これはコンピューターの配線構造が分かっても、応用ソフトが分かるわけではないのと同様です。そこで我々は様々な仮説のもとで全脳の働きをシミュレーションして比較することが動作原理解明のために必須だと考えています。シミュレータ開発を工夫して膨大な計算パワーを効率的に用いることで、脳の動作原理解明に必要な大スケールシミュレーションを可能にするのが我々の第一のチャレンジです。

構造決定だけでは足りないと書きましたが、しかし、シミュレーション条件のリアリティを増すために、実は構造決定も大事であり、そのためのデータ解析にも計算パワーを用いています。これが第二のチャレンジです。脳科学では、脳の複雑な構造を知るために各種スケールの顕微鏡画像データや、拡散 MRI 法などによる大量のセンシングデータの集積を進めています。データに基づく局所的な構造決定だけでも大変ですが、局所的に決まった構造モデルを矛盾なく統合する大域的モデルを作ることもまた大変です。我々はとくに後者のために「京」の膨大な計算パワーが役立つと考えています。

一方で、皆様が日々のニュースなどでご存知のとおり、深層ニューラルネットを用いた人工知能技術によって画像・音声・言語などの処理が近年急速に高性能化しており、社会現象を引き起こしつつあります。我々の脳が持つ柔軟で汎用的な特徴をそのまま再現するような人工知能は、こうした近年の技術的発展の延長上にあり得るでしょうか？近年の人工知能の成功は主に巨大データに依存していますが、人間の知能は、必ずしも巨大データに依存せずに高い認識性能に至っています。我々は、人間の知能の柔軟さや汎用性といった特徴を実現するためには、近年までに成功した巨大データを用いるアプローチに加えて、少量の経験に基づいて多様な組み合わせを思考・思索するアーキテクチャが必要と考えています。これが第三のチャレンジです。「京」およびポスト「京」計算機の特色は多数のノードを 3 次元的なトポロジーで接続するアーキテクチャにあります。こうしたアーキテクチャは多数ノード間で同期通信しながら計算する古典的な並列計算には向きなのですが、計算開始と終了の時点がはっきりしないような、思考し続ける非同期型の脳型人工知能アーキテクチャにはとても向いていると考えられるのです。我々は、脳の構造に学び、シミュレーションの知見を用い、「京」計算機のパワーで人間らしい知能の秘密を解き明かしてゆきます。

このプロジェクトは沖縄科学技術大学院大学、東大、理研、電気通信大学との共同研究です。今後プロジェクトの進捗等の情報をまとめてゆきますので、ご興味をお持ちのかたはぜひこちらもご覧ください。<https://brain-hpc.jp/>

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野（中村祐研究室）

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

「ヘリカルプラズマにおける乱流拡散の第一原理シミュレーション」

核融合を目指した磁場閉じ込めトーラスプラズマ実験は、トーラス全体に電流を流すトカマク型と電流を流さないヘリカル型に大別される。ヘリカルプラズマは外部コイルが作る磁場のみで閉じ込めることが可能であり、高温プラズマの長時間保持に有利である。そして、ヘリカルプラズマは軸対称性を持たない三次元磁場閉じ込めトーラスプラズマであり、その閉じ込めに対して、この三次元性に関する自由度を用いて流体不安定性の低減およびプラズマの衝突性拡散の改善を実現する磁場配位を探求する研究がなされてきた。京都大学のヘリオトロンJ (HJ、図1) は磁気井戸を形成することにより流体安定性に対して最適化され、W7-X (ドイツの装置) は衝突性拡散に対して最適化されている。また、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) では磁場のねじりである磁気シアを利用して流体安定性を防いでいる。

近年、プラズマの非線形ダイナミクスである乱流によって生じる熱および粒子拡散の改善を目的として、さらなる三次元性の最適化を探求するために磁化プラズマの第一原理シミュレーションがなされ始めている [1, 2]。そして LHD に対して、衝突性拡散の最適化がゾーナル流と呼ばれる構造を効率的に形成することが示された。一方、LHD プラズマ中の乱流に生じる新たな構造形成も示された [3]。

本研究では、磁化プラズマの第一原理シミュレーションコード [4, 5] を用いてヘリオトロンJ (HJ) プラズマにおける不安定性および乱流の第一原理数値シミュレーションを行い、3次元磁場配位の最適化によるプラズマの乱流拡散の低減およびその低減機構の理解を目指す。特に、磁気シアと磁場バンピネス (トーラス方向の磁場強度変化) に着目して、HJ における乱流拡散と LHD における乱流拡散を比較した。その結果、HJ プラズマは LHD と同様にイオン温度勾配 (ITG) モードに対して不安定であることを明らかにした。図1ように HJ の磁気面は上から見てほぼ四角形となる。このトーラスの角かつトーラス外側で ITG 不安定性の振幅が大きい。また、ITG 不安定性の揺動は磁力線方向に非常に伸びたモード構造を持つ (図2)。計算の結果、HJ のような弱磁気シア装置が線形不安定性の観点からは不利であっても大きな乱流拡散を生じるわけではないことを明らかにした [6]。その原因是乱流の非線形性であるゾーナル流生成が強いことである (図3)。これはゾーナル流生成を利用したヘリカルプラズマの最適化も有用であることを示唆する。一方、磁場配位の三次元性についてバンピネスが強い配位は通常配位と比較して ITG 不安定性が抑制され乱流拡散が低くなることも明らかにした [6]。

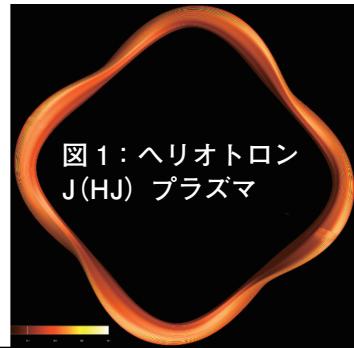


図1：ヘリオトロンJ(HJ) プラズマ

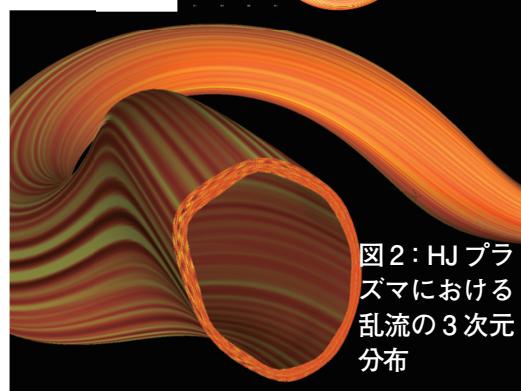


図2：HJ プラズマにおける乱流の3次元分布

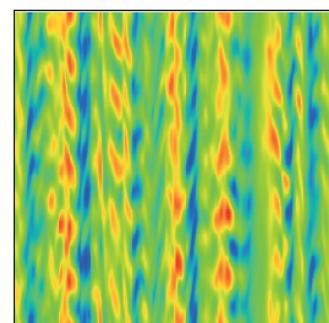


図3：HJ プラズマにおける乱流の断面図

[1] P. Helander, et.al., Nuclear Fusion, 053030, (2015).

[2] A. Ishizawa, et.al., Nuclear Fusion, 043024 (2015).

[3] A. Ishizawa, et.al., Phys. Plasmas, 055905, (2014).

[4] A. Ishizawa, et.al., Nuclear Fusion, 053007 (2013).

[5] A. Ishizawa, et.al., J. Plasma Physics, 435810203 (2015).

[6] A. Ishizawa, et.al., IAEA-FEC, TH/6-2, (2016).

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

「プラズマを測るため、プラズマでレーザを作る？」

本研究室では、荷電粒子と電磁場を精緻に制御することにより、磁場閉じ込め核融合、自由電子レーザ、小型核融合装置による高エネルギー粒子の発生・利用、等について研究を進めています。本小文では、磁場で閉じ込められた超高温プラズマ中の計測器開発について紹介します。

磁場閉じ込め核融合は、数々の優れた利点を有することから理想的なエネルギー源として長年研究されてきました。現在、国際協力下、フランス建設中の国際熱核融合実験炉ITERの運転開始が迫っており、核燃焼プラズマの実現が近づいています。さて、核融合反応の安定的維持の為には、一億度ものプラズマを計測する必要があります。我々の研究室で実験しているヘリオトロンJ装置においても、数千万度のプラズマが生成されています。このような熱いプラズマを、どのように計測するのでしょうか？

他分野同様、計測手法としては、受動的計測と能動的計測があります。前者はその名の通り高温プラズマ自身が発する電磁波や粒子を、受動的に（“受けて”）計測する手法です。これは、例えば星の観測と同じで、星が発する光を望遠鏡なりカメラで“受けて”観測する手法と同じ系統に属します。

一方、能動的計測手法は、こちらから能動的（“わざと”）高温プラズマに“何か”、プラズマ自身に影響を与えない程度に導入し、プラズマと相互作用し外に出てくる“何か”を計測する手法です。イルカやコウモリが超音波を放射し、その反射波から対象物の位置を同定することも能動的計測に属すると言えます。プラズマに入射するものとしては、当然計測量によって異なり、様々な波長の電磁波や、様々な種類、エネルギーの荷電粒子などがあります。

古くから使われているプラズマの能動的計測手法の一つが「干渉計」です。電磁波の光路を2つ準備します。片方はプラズマに入射されプラズマを通過し、他方はプラズマを通過しません。プラズマの存在によって生じる屈折率の違いから、両者の電磁波にはずれ（位相差）が生じ、それを計測することで密度を計測できます。干渉計といえば、エーテルの流れを計測しようとしたマイケルソン・モーリーの実験が有名ですが、昨今話題となった重力波の検出器も巨大な干渉計によって空間の歪みを検出するものです。多様な分野で使われています。

さて、ここで問題は、プラズマが高密度であればあるほど、屈折率が大きく変化することで電磁波が曲がって想定通りの光路から逸れたり、さらに高密度になるとプラズマ伝搬が不可能になることです。高密度プラズマでは、屈折を抑える為、より高い周波数の電磁波が必要になります。

最近、ヘリオトロンJでは中型装置でありながら、ITERプラズマにも迫るような超高密度プラズマの生成に成功しています。この高密度領域では、これまでのGHz以上、THz領域の電磁波が必要とされます。ここで発振器のスイッチON！でTHz波が必要なパワーだけ得られたら苦労は無いのですが、干渉計に利用できるレベルの出力を発する市販品の光源は存在しません。どうするか？自分たちで作るしかありません。そこで所謂ガスレーザーの一種である、およそ1THzの電磁波を発するHCN（シアノ化水素）レーザを組み立てることになりました。つまり、プラズマを計測するため、プラズマを使ってレーザを作る、という、説明をし辛いことをやるわけです。幸い、30年前に、HCNレーザは先人たちによって研究されており、色々な論文もありました。しかし実際にものを作るとなると論文は書かれていないノウハウがあり、四苦八苦しながら組み立てることになりました。予想外のところで放電して焦げたり、熱で水漏れしたり、設計を変更したり、、、と、泥臭い失敗を繰り返しながら、ようやくヘリオトロンJ装置におけるテラヘルツ波の干渉計を構築し（図1）高密度プラズマ計測に成功した時には感慨深いものがありました。その過程で、ある博士課程の学生O君が大変頑張ってくれました。

勿論、我々にとって、プラズマの計測器開発はただの過程・手段でしかありませんが、この計測器が稼働したことによって、これまで計測できなかったヘリオトロンJの超高密度領域のプラズマの時間応答がわかるようになりました。これは小さな一歩ではありますが、大きな飛躍でもあります。今後は、この干渉計システムの高性能化・多視線化をすすめ、プラズマの密度分布やプラズマ中の揺らぎ計測に利用する予定です。これによって、現在建設中のITERや将来の炉設計に役立つ超高密度プラズマの物理解明や制御手法の確立が期待されます。

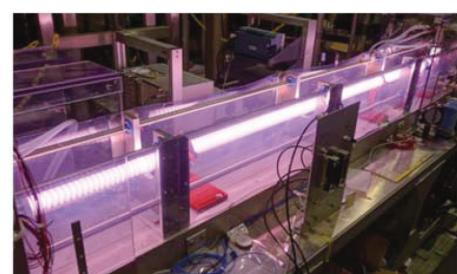


図1. 開発した HCN レーザーの写真

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

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

「日本全国の GPS 受信機網を用いた電離圏電子数の 3 次元トモグラフィー解析」

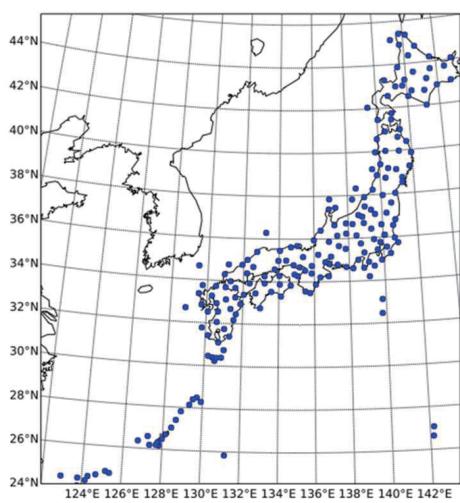
全地球測位システム（Global Positioning System: GPS）は高度約 20200km にある GPS 衛星からの電波を用いる測位システムである。GPS は航空機ナビゲーションの利用が始まっており、現在開発中の自動車の自動運転の重要な技術でもある。GPS は、2 周波数を利用することで電離圏中の電波伝搬に伴う測位のずれを補正する。即ち、周波の電波遅延の差から伝搬路の全電子数（Total Electron Consistent: TEC）が観測できる。GPS 衛星を用いた TEC 観測（以後では GPS-TEC 観測）は、電離圏の研究に広く用いられている。特に我が国においては、国土地理院が電子基準点の稠密観測ネットワークシステム GEONET を運用中である。これを用いて 1300 点を超える地点からの GPS-TEC 観測データが蓄積され、電子密度の水平分布のために用いられてきた。これに対して当研究室では、理学研究科および電子航法研究所と共同して、電子密度の 3 次元分布を明らかにするトモグラフィー解析を開発してきた。この技術は、医療分野で CT スキャンとして大きな成功を収めている。しかし GPS-TEC では観測方向が上下に強く縛られるため全方向にわたる透過データが得られず解析は困難である。

我々の解析では、領域を 3 次元化した上で拘束条件付き最小二乗法を用いている。この手法では、 $J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|^2 + \lambda \|\mathbf{Wx}\|^2$ で定義されるコスト関数を最小化することで電子密度分布ベクトル \mathbf{x} を求める。測定値ベクトル \mathbf{b} 、観測条件を表す行列 \mathbf{A} である。コスト関数のうち、 $\|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|^2$ は最小二乗誤差を表し、 $\|\mathbf{Wx}\|^2$ は拘束項であって、両者は係数 λ （ハイパーパラメタと呼ばれる）でつなぎ合される。拘束項は問題に即して選択され、我々は「ある格子点と上下前後左右の隣り合う格子点（6 点）の電子密度の差が広がらないように拘束する」とした。この手法は初期値を用いない点に大きな特徴があるが、拘束項とハイパーパラメタという人工的な係数の決め方が難しい。我々も数年にわたり試行錯誤をしてきた。本研究では昨年度までに大きな進歩があり、拘束項と λ の決定手法が固まるとともに、データ取得からトモグラフィー解析までがひとつのシステムにまとめられた。計算の高速化にも取り組んで、いわゆる PC LINUX を用いてデータ取得から解析終了までを 5 分以下とすることに成功した。

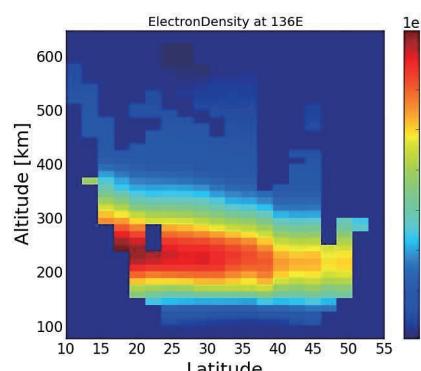
現在は 3 次元トモグラフィー解析を利用するための研究を進めている。ひとつは、電子航法研究所が全国 200 点から得ているリアルタイムデータを用いたトモグラフィー解析である。2016 年 4 月から 15

分毎の自動解析を始め、<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/> から結果を公開している。一方、GEONET が 1996 年から現在までに蓄積したデータ全体のトモグラ

フィー解析を大型計算機で一氣に行う予定である。今後は、解析結果の妥当性のチェックを進める一方、実利用を模索していくたいと考えている。



リアルタイムデータが得られる GEONET 観測点の分布。



トモグラフィー解析による電子密度の緯度高度分布の例(2012 年 5 月 23 日 7UT)。

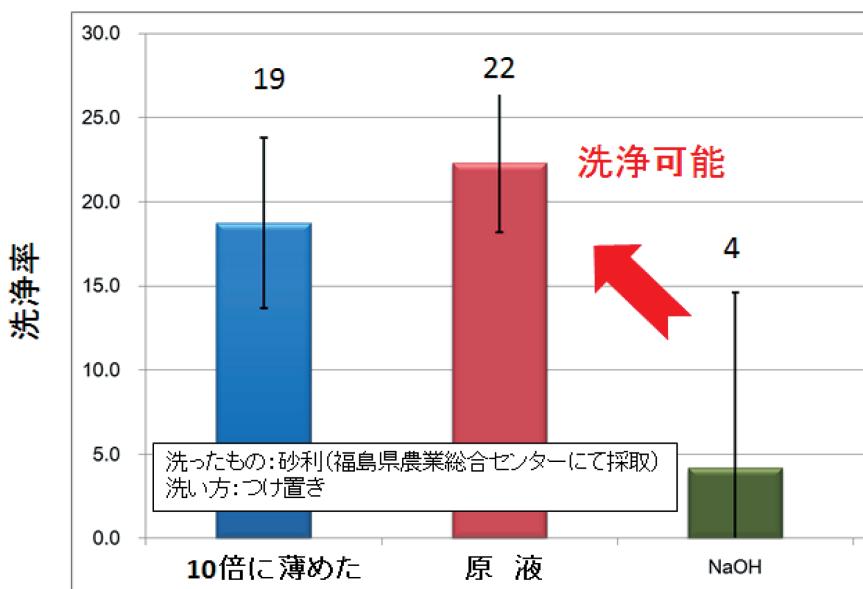
生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野（山川研究室）
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/yamakawa-lab/index.html>
「放射性セシウムの吸着特性に関する研究（東日本大震災復興関連研究）」

2011年に発生した福島原発事故由来の放射性セシウム（Cs-137）は、半減期が約30年であり、土壤から農作物へと移行してしまうと、食物連鎖により上位の生物の内部被曝につながる。そのため、地域復興、農業再生に向けた環境の除染作業が行われていることは周知の通りである。現状の除染方法は表面（表土や草木）の剥ぎ取りであるが、全ての被洗浄物に対して最適というわけではない。将来の対策技術開発としても、洗浄方法の多様化が今後必要である。

我々の研究グループでは、これまでにケイ酸塩系洗浄剤が除染に有効であることを見いだしてきた。この洗浄剤を用いることにより、不織布や砂礫からの放射性セシウムの除染が可能である。また、界面活性剤が含まれないため、泡立ちを抑えることができ、工業的な利用が容易だという特徴がある。さらに、廃液を酸またはアルコールで中和することによって固液分離が可能であること、放射性セシウムは固体に含まれることを同様に見いだしており、しばしば問題となる廃棄物の減容化という課題もクリアできる。

しかしながら、このケイ酸塩系の洗浄剤の洗浄メカニズムについては不明な点が多く、これを明らかにすることにより、高効率な洗浄法の考案が可能となると考えている。ひいては除染方法の多様化や、事故への備えとなるため、エネルギー確保の観点からも重要だといえる。

洗浄メカニズムの解明にはセシウムの洗浄前後の付着状態についての解析が必須であるが、濃度が数ppm程度と低いため、特定の核に着目した情報を得ることのできる放射光を用いたXAFS測定を行っている。XAFS測定には超高感度測定が必要であるので、SPring-8において行っており、粘土鉱物、土壤へのセシウムの固定化／脱離挙動に関する知見を得つつ、ケイ酸塩系の洗浄剤の洗浄原理について確認してきている。



けん化によって、油分を水溶性にした

Figure 1 非界面活性剤系洗浄剤による洗浄

生存圏研究所 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://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>
「電磁波の生体影響評価研究」

二十世紀末から今世紀に入って、我々の生活環境には電磁波があふれるように飛び交っている。特に、世界中で携帯電話や無線LANの利用、携帯電話基地局の新設などが急速に進展したことが主な要因となっている。その他、高圧送電線、家庭内の電化製品、医療現場での電磁波、空港のセキュリティーチェックなどがある。さらに電気自動車の電波によるワイヤレス給電（無線エネルギー伝送）の急速な普及が近い将来に予想される。近未来社会では、人が生活する上で、定常磁場、低周波、中間周波、高周波、さらにミリ波やテラヘルツ波など、多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどるであろう。電磁環境は目に見えないこともあり、このような背景から、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。

そこで、電磁環境における生体影響の評価、メカニズム解明と理解が大きな社会的要請となっている。当研究室では、これまで、研究室の宮越順二特任教授や小山眞特任講師らと共に、電磁波ばく露による細胞や遺伝子レベルでの明確な応答を定量的に解析し、線量-効果関係に基づくしきい値の推定ならびに電磁波に対する分子生物学的な応答のメカニズム解明を目的として研究を行ってきている。影響評価の観点からは、遺伝毒性（染色体異常、遺伝子突然変異、DNA損傷など）、遺伝子発現やシグナル伝達機構などの電磁場応答の有無やその機構について研究成果を発表してきた。（参考文献参照）図1には、電磁環境の生体影響評価研究の1例を示す。まず、共鳴送電による無線エネルギー伝送による電磁環境を細胞培養インキュベーター内に構築する。ばく露評価もあわせて行う。このシステムを用いて、発がん性に関与する細胞遺伝毒性（染色体異常、小核形成、DNA鎖切断など）への影響評価を行う。一方、世界保健機関（WHO）の推奨研究となっている電磁環境の免疫機能への影響について、免疫担当細胞のサイトカイン分泌や貪食能などを解析する。得られた成果は、電磁波の生体影響を議論する基礎資料となる。さらに、WHO、国際がん研究機関（IARC）や非電離放射線防護委員会（ICNIRP）のメンバーとして国際的評価会議に参加し、貢献してきた。

携帯電話をはじめとして、ワイヤレス給電の分野でも、工学的技術の進歩は目を見張るものがある。その一方、電磁波は新しい環境因子として、社会的に注目されることも考えておかなければならない。電気自動車のワイヤレス給電システム（走行中も含む）など、非接触エネルギー伝送技術をはじめとして、近い将来の電磁波利用は高まるばかりである。このように増加の一途をたどる将来の電磁環境を考えると、電磁波の安全性を科学的なデータから判断するため、未解明な部分については、生命科学の先端技術を駆使して、研究を推進してゆく必要があると考える。

【参考文献】

1. K. Mizuno, N. Shinohara, J. Miyakoshi. Expression of heat shock proteins in human fibroblast cells under magnetic resonant coupling wireless power transfer. *Energies* 8, 12020-12028 (2015)
2. K. Mizuno, N. Shinohara, J. Miyakoshi. In vitro evaluation of genotoxic effects under magnetic resonant coupling wireless power transfer. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 7;12 (4):3853-63. (2015)
3. S. Koyama, E. Narita, N. Shinohara, J. Miyakoshi. Effect of an intermediate-frequency magnetic field of 23 kHz at 2 mT on chemotaxis and phagocytosis in neutrophil-like differentiated human HL-60 cells. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 17;11 (9):9649-59. (2014)

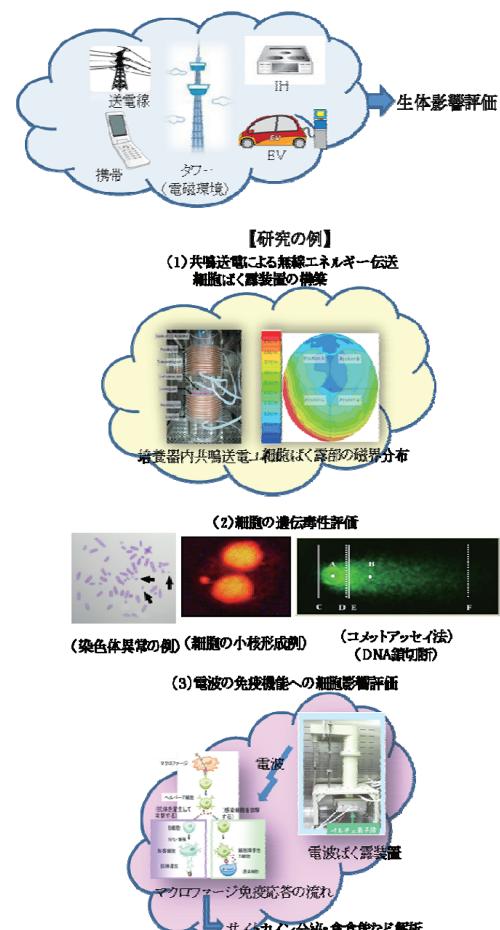


図1 電磁環境の生体影響評価

博士論文概要

[課程博士一覧]

Islam A K M Mahfuzul	「Modeling, Characterization and Compensation of Performance Variability using On-chip Monitor Circuits for Energy-efficient LSI」 (オンチップモニタ回路を用いた LSI 特性ばらつきのモデル化技術及び補償技術の活用によるエネルギー効率向上に関する研究)	平成 26 年 1 月 23 日
SinNyoung Kim	「Analysis and Design of Radiation-Hardened Phase-Locked Loop」 (放射線耐性を持つ PLL の解析と設計)	平成 26 年 3 月 24 日
坂 本 健 一	「パケット通信による高信頼・高品質ネットワークの実現方式の研究」	平成 27 年 3 月 23 日
平 松 淳 松 原 大 典	「高速パケット通信網の通信品質制御方式に関する研究」 「Studies on Information Sharing using Peer-to-Peer Systems and Information-Centric Networking」 (P2P システムおよび ICN による情報共有に関する研究)	平成 27 年 3 月 23 日
今 川 隆 司	「ソフトエラー耐性を考慮した粗粒度再構成可能アーキテクチャの設計手法」	平成 27 年 3 月 23 日
西 澤 真 一	「集積回路のエネルギー効率向上を目指した性能ばらつきの予測技術とセルライブラリの構築に関する研究」	平成 27 年 3 月 23 日
松 本 高 士	「Impact of Bias Temperature Instability and Random Telegraph Noise on CMOS Logic Circuits」 (バイアス温度不安定性とランダムテレグラフノイズが CMOS 論理回路特性に及ぼす影響)	平成 27 年 3 月 23 日
小 森 祥 央	「Epitaxial Growth and Superconducting Properties of 1212 Copper Oxides」 (1212 型銅酸化物のエピタキシャル成長とその超伝導特性)	平成 28 年 3 月 23 日
丹 羽 弘 樹	「Breakdown Characteristics in SiC and Improvement of PiN Diodes toward Ultrahigh-Voltage Applications」 (超高耐圧応用を目指した SiC における絶縁破壊特性の基礎研究および PiN ダイオードの高性能化)	平成 28 年 3 月 23 日
木 村 知 玄	「原子間力顕微鏡を用いた有機半導体グレイン／電極界面の局所電気特性評価」	平成 28 年 3 月 23 日
山 岸 裕 史	「有機薄膜トランジスタの特性制御およびそのチャネル上のナノスケール電荷分布評価に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日
井 上 卓 也	「電子・光子両状態制御に基づく高効率・高速熱輻射光源の開発」	平成 28 年 3 月 23 日
川 本 洋 輔	「薄膜シリコン太陽電池の光吸収増大に向けたフォトニック結晶構造の設計に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日
西 本 昌 哉	「分子線エピタキシー法を用いたフォトニック結晶レーザ作製法の開発と空孔立体形状の検討」	平成 28 年 3 月 23 日
田 昇 愚	「超高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日

赤 岩 和 明	「コランダム構造酸化ガリウム系半導体の電気特性制御とデバイス応用」	平成 28 年 3 月 23 日
金 弓 治	「High-quality Knowledge Acquisition of Predicate-argument Structures for Syntactic and Semantic Analysis」 (構文・意味解析のための高品質な述語項構造知識の獲得)	平成 28 年 3 月 23 日
Mo Shen	「Exploiting Vocabulary, Morphological, and Subtree Knowledge to Improve Chinese Syntactic Analysis」 (語彙的、形態的、および部分木知識を用いた中国語構文解析の精度向上)	平成 28 年 3 月 23 日
栗 野 皓 光	「Variability in BTI-Induced Device Degradation: From Silicon Measurement to SRAM Yield Prediction」 (トランジスタの BTI 劣化ばらつきに関する研究：特性評価から SRAM 回路歩留り予測へ)	平成 28 年 3 月 23 日
山 田 英 一	「非線形応答特性を持つ光デバイスを有する光通信システム の伝送特性に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日
羽 田 和 慶	「Model Analysis on Plasma Start-Up for Toroidal Fusion Devices」 (トロイダル核融合装置におけるプラズマ着火の研究)	平成 28 年 3 月 23 日
鈇 持 尚 輝	「Study of magnetic field configuration effects on internal transport barrier formation in Heliotron J」 (ヘリオトロン J における内部輸送障壁の形成機構に与える磁場構造の影響)	平成 28 年 3 月 23 日
石 川 峻 樹	「Study on Beam Forming for Phased Array Antenna of Panel-structured Solar Power Satellite」 (パネル構造型宇宙太陽発電所におけるフェーズドアレーナンテナのためのビーム形成技術の研究)	平成 28 年 3 月 23 日
水 野 公 平	「磁界共鳴送電の安全性に関する細胞影響評価研究」	平成 28 年 3 月 23 日
尾 上 洋 介	「因果グラフのビジュアル分析に関する研究 —評価グリッド法における評価構造分析を通じて—」	平成 28 年 3 月 23 日
Claudia Cecilia Yamamoto Noguchi	「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism Considering Meal Absorption Rate and Model-based Blood Glucose Control for Prandial State in Type 1 Diabetes」 (1型糖尿病における食事の吸収速度を考慮に入れたグルコース・インスリン代謝の数理モデル及び食事時の血糖値のモデルベースト制御)	平成 28 年 9 月 23 日
金 子 光 顯	「Strain-Controlled AlN Growth on SiC Substrates」 (SiC 基板上への歪み制御 AlN 層の成長)	平成 28 年 9 月 23 日
権 平 皓	「3 次元フォトニック結晶光配線技術構築に向けた光伝搬制御 の理論検討」	平成 28 年 9 月 23 日
John Richardson	「Improving Statistical Machine Translation with Target-Side Dependency Syntax」 (目的言語側の依存構文による統計的機械翻訳の改善)	平成 28 年 9 月 23 日
石 川 惠理奈	「Semantic Interpretation of Eye Movements Using Author-designed Structure of Visual Content」 (提示コンテンツのデザイン構造を用いた視線運動の意味理解)	平成 28 年 9 月 23 日

-
- 趙 欧 「Sum Rate Analysis and Dynamic Clustering for Multi-user MIMO Distributed Antenna Systems」 平成 28 年 9 月 23 日
(マルチユーザ MIMO 分散アンテナシステムにおける総和 レート及びダイナミッククラスタリングに関する研究)
- 福 園 隼 人 「Spatial Signal Processing on Distributed MIMO Systems」 平成 28 年 9 月 23 日
(分散 MIMO システムにおける空間信号処理)
- 橋 本 大 志 「Robust adaptive beamforming for clutter rejection on atmospheric radars」 平成 28 年 9 月 23 日
(大気レーダーのための適応的クラッター抑圧手法)

[論文博士一覧]

- 中 西 俊 博 「Coupled-resonator-based metamaterials emulating quantum systems」 平成 28 年 1 月 25 日
(量子系を模擬する結合共振型メタマテリアル)

Islam A K M Mahfuzul (小野寺秀俊教授)

「Modeling, Characterization and Compensation of Performance Variability using On-chip Monitor Circuits for Energy-efficient LSI」

(オンチップモニタ回路を用いた LSI 特性ばらつきのモデル化技術及び補償技術の活用によるエネルギー効率向上に関する研究)

平成 26 年 1 月 23 日授与

本研究は、LSI のエネルギー効率の向上を目的とし、微細化により問題とされている LSI 特性ばらつきを回路・設計技術で解決するための手段であるオンチップモニタ回路の構成手法の検討、特性ばらつきを自律補償技術の検討、ならびに提案手法を試作チップによる評価を行ったものである。

LSI 技術は現在の情報化社会の基盤技術であり、LSI の低消費エネルギー化は喫緊の課題である。トランジスタの微細化及び電源電圧の低下により LSI の高速化と低消費電力化が実現されてきた。しかし、微細化に伴う特性ばらつきの増大により正常動作には大きな電圧マージンを設ける必要があり、微細化と電源電圧の低下を阻む要因となっている。この問題は製造技術だけでは解決できず、製造技術と回路技術の協調が必須とされている。本研究では、製造後の回路特性変動と変動要因を見積もるためにオンチップモニタ回路の開発を行う。さらに、特性モニタの診断結果を元に、ばらつきを自律的に補償する技術を提案する。

はじめに、LSI 特性の正確な見積もりを目標とし、各種ばらつきの要因を抽出するためのモニタ回路構成を検討する。特性ばらつきには補償可能な成分とランダムな成分がある。電源電圧が異なると、これらのばらつき成分の影響も異なり、特に低電圧動作ではばらつきの影響が急拡大する。これらのばらつき量を低コストと小面積でモニタすることにより補償可能な成分を補償し、ランダム成分に強靭な設計方法により大幅なエネルギー削減が可能とする。本研究では、各種の特性ばらつきの測定、モデル化及びばらつき要因の分離手法を提案し、ばらつきモニタ回路の構造を提案する。実際にチップを試作し、提案手法及び回路構成の評価を行い、妥当性を示す。

従来のモニタ回路技術では、ばらつきの統計的性質とばらつき要因を抽出するために、異なる種類の回路を大量にチップ上に搭載する必要があり、実装コスト及び面積オーバヘッドが大きい。本研究では、トポロジー可変な回路構造を提案し、同一のモニタ回路によりばらつきの統計的性質と要因分離の手法を可能とする。提案回路は面積と実装コストを大幅削減する。そして、実測により各種のばらつきのオンチップ診断を検証する。

次に、補償可能なばらつき成分をオンチップで動的に補償する技術を提案する。特性ばらつきをオンチップモニタ回路で診断し、目標の特性を達成するようにトランジスタ特性を自律調整する回路技術を開発する。本研究で提案した小型のモニタ回路を用いることによりチップ上に細粒度で補償回路を搭載可能にする。特性ばらつきの自律的補償を活用することにより回路のマージンを大幅削減することができ、LSI のエネルギー効率を大幅向上できる。ばらつきによる電源電圧低下を阻む問題を回路技術で解決し、LSI のさらなる成長を可能とする。

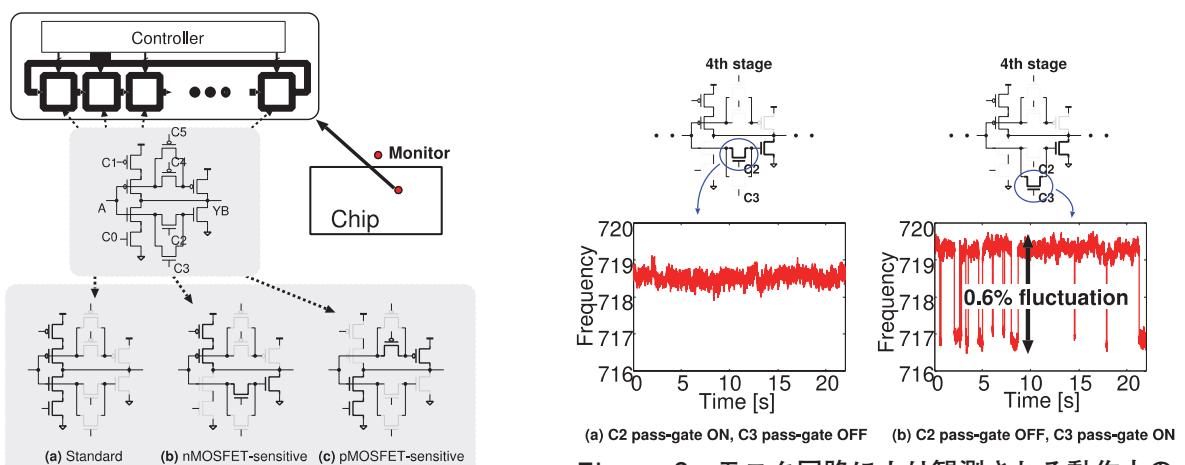


Figure 1 トポロジー可変なモニタ回路。1つの回路により様々なばらつき情報を抽出する。

Figure 2 モニタ回路により観測される動作中のトランジスタ特性変動。トランジスタによって変動量が異なる。

SinNyong Kim (小野寺秀俊教授)
 「Analysis and Design of Radiation-Hardened Phase-Locked Loop」
 (放射線耐性を持つ PLL の解析と設計)
 平成 26 年 3 月 24 日授与

Phase-locked loop (PLL) is a clock generator. A radiation strike of high-energy particles on PLL causes clock perturbation. The perturbed clock is propagated to all over the digital system and attributed to a malfunction in the system. Thus, the performance related to radiation effect of the PLL is important for high-reliability applications such as satellite systems, medical equipment, vehicles, super computers et cetera. In this dissertation, an analysis of radiation effect on PLL and a radiation-hardened PLL (RH-PLL) design to guarantee clock-perturbation immunity are presented.

Firstly, this dissertation discusses an analysis of radiation effect on PLL. The radiation effect on PLL mainly depends on locations of radiation strikes, timings of radiation strikes, and PLL's design parameters. The analysis categorized radiation-induced errors based on locations of radiation strikes, which is sub-circuits of PLLs. The sub-circuits area phase-frequency detector (PFD), a divider, a charge pump (CP), and a voltage-controlled oscillator (VCO). The categorized errors were expressed as a set of equations, which is called an analytical model. The analytical model is used to evaluate quantitatively the amount of clock-perturbation. This value is evaluated immediately when a radiation strike occurs. This dissertation presents a behavioral model to evaluate a recovery time that is the time from the onset of the clock perturbation to that of settling. As a demonstration, a PLL designed in a $0.18\mu\text{m}$ CMOS process was evaluated using the analytical model and the behavioral model. The evaluation results indicated the PFD as the most vulnerable part.

Based on the analysis of radiation effect, an RH-PLL design that guarantee clock-perturbation immunity is proposed. The proposed technique can achieve an area-efficient RH-PLL due to the use of dual modular redundancy (DMR), in contrast to the triple modular redundancy (TMR) technique. The basic concept of the proposed RH-PLL is detecting errors and switching the output from one PLL having error to the other. Two detectors, which are clock detector and pulse detector, are developed to achieve high speed detection of the radiation-induced errors. The clock detector is for detecting errors originated from the analog sub-circuits and the pulse detector covers the errors originated from the digital sub-circuits. The proposed RH-PLL is fabricated in a $0.18\mu\text{m}$ CMOS process and verified by radiation-test. The clock perturbation immunity is confirmed in the experiment.

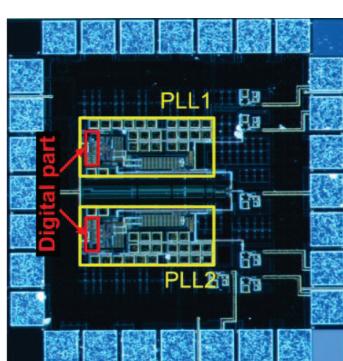


Fig.1 Micrograph of proposed RH-PLL.

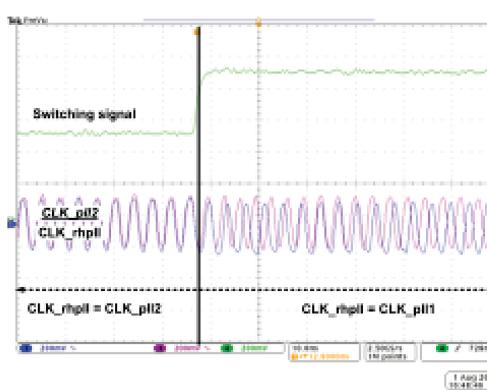
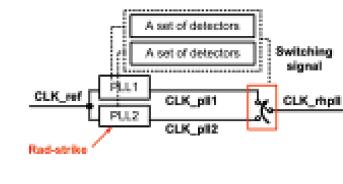


Fig. 2 Radiation test result of proposed RH-PLL when a radiation strike occurs at PLL2. The RH-PLL output (Blue line) clock remains constant clock period.



坂 本 健 一 (高橋達郎教授)

「パケット通信による高信頼・高品質ネットワークの実現方式の研究」

平成 27 年 3 月 23 日授与

本論文は、音声からメール・画像・ストリーミングデータ等の多様な通信要件を持つ通信アプリケーションに対応するとともに、コンシューマ・ビジネスユース・マシンツウマシンのような各種のユーザの特性に応じた、多様な通信要件を満たす次世代のネットワークアーキテクチャとそれを実現するための通信システム実現技術について論じている。

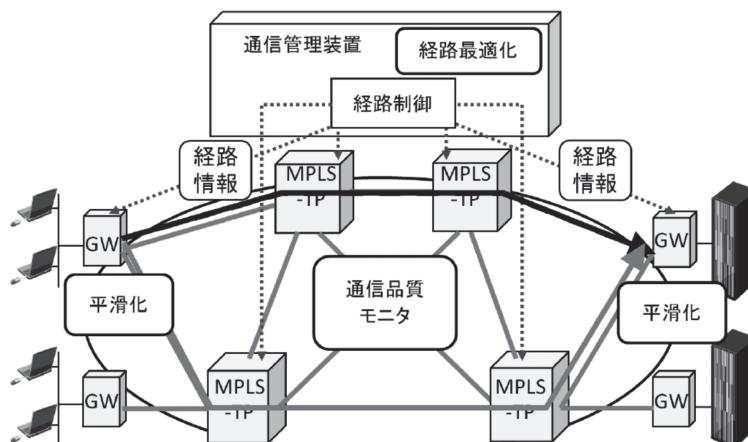
2 章は、複数の要件を持つユーザを収容するための、コアネットワークにおけるパケットによるユーザ多重方式である MPLS (Multi Protocol Label Switching) プロトコルの構築法を扱っている。仮想専用網を対象にした通信装置の実現方法として、ユーザごとのレイヤ 2 アドレスとレイヤ 3 アドレスの両者をテーブルとして具備するマルチルーティングテーブル方式により、ユーザ間の独立性が保証されることを示した。

3 章は、パケット通信ネットワークにおける、通信可用性確保の方式について述べ、短時間で障害復旧を行うための通信装置の実装方法を述べている。障害発生時の通信途絶時間を、音声通信ユーザが体感できない 50ms 以内に抑えることを要件に、多数のユーザが収容される通信インターフェースで障害が発生した場合にも要件を満たすような通信手順と、装置への機能配備法と実装方式を明らかにした。

4 章は、パケット通信ネットワークにおける、通信品質要件を満たすためのトラフィック制御方式を述べている。ユーザ間で公平な通信サービスを提供し、かつ実装の容易なポリシングに基づく通信トラフィック制御方式を提案し、シミュレーションでその有効性を示している。また、ユーザが利用しているトランSPORTプロトコルに依存しない通信帯域確保方式を提案し、その有効性を実証した。

5 章は、アクセスネットワークで用いられる PON (Passive Optical Network) システムにおいて、インターネットトラフィックに加えて TDM (Time Division Multiplexing) 型の既存サービスを伝送する方式を検討している。TDM 情報を低遅延でかつ通信ロスなく伝送するためのフレーム構造を提案し、その有効性を示した。

6 章は、前章までに提案、評価を行った技術をもとに、多様な要件を満たすネットワークを、パケット通信プロトコルを用いて統合するアーキテクチャを提案している。コアネットワークのトランSPORT機能として MPLS-TP (図) を適用するとともに、疑似ルータ方式を提案し、現実的な制約時間内に収束可能なルーティング処理を実現し、通信品質の確保及び通信可用性要件の確保を可能にした。



図：MPLS-TP による高信頼化 copyright©2012 IEICE

平 松 淳 (高橋達郎教授)
「高速パケット通信網の通信品質制御方式に関する研究」
平成 27 年 3 月 23 日授与

本論文は、高速パケット通信網の通信品質制御を対象とし、神経回路網の学習機能を用いた通信品質制御方式の提案と性能評価を行うとともに、将来の省エネルギー化に向けた広域同期スケジュール型高速パケット網を実現するための効率的なトラヒック収容手法を研究したものである。

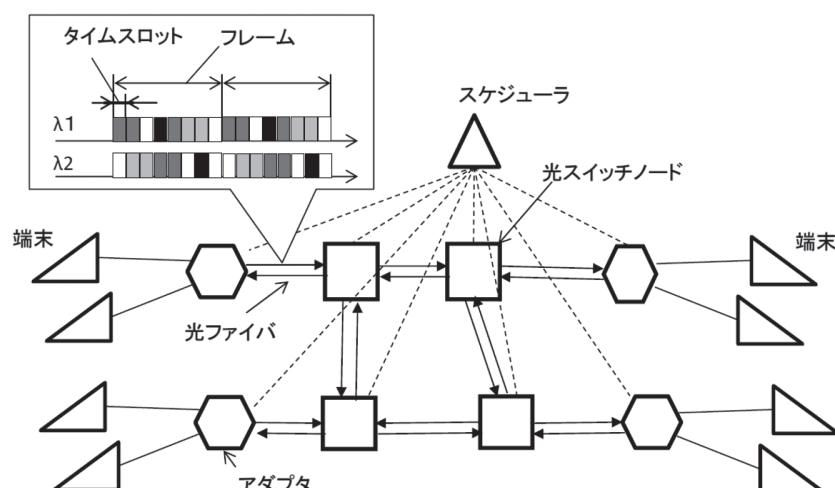
第 2 章は、高速パケット網における通信品質制御の枠組みを述べている。通信品質制御がパケット転送レベル、呼レベル、網レベルの 3 階層から構成されることを示し、本論文が対象とする、学習型通信品質制御と広域同期スケジュール型パケット網の研究課題を述べている。

第 3 章から第 5 章は、神経回路網を用いた学習制御方式を提案している。第 3 章は、3 層神経回路網を用いたオンライン学習制御型呼受付制御方式を提案している。さまざまなパケットの到着状況におけるパケット廃棄率をあらかじめ学習することにより、新たな呼接続の要求があった場合に、品質を満足できるかどうかを推定し、受付判定制御を行うものである。一般に目標パケット廃棄率は低い確率が設定される。低確率な事象を精度よく学習するためのリーキーパターンテーブル学習法を考案し、各種の呼種の組み合わせに対して、呼受付制御が可能であることを示した。

第 4 章は、呼受付制御に加え、リンク容量割り当てを行うクロスレイヤ型のオンライン学習制御を提案し、比較的時間間隔の短い呼受け付け制御と、比較的長周期のリンク容量割り当て制御を連携統合して制御可能であることを明らかにした。

第 5 章は、仮想出力バッファ法による学習型通信品質制御を述べている。学習制御方式においては、品質が悪い状態も経験しないと受付制御の限界が学習できないという課題がある。そこで、実際の回線容量よりも小さな出力帯域を持った仮想バッファでパケット廃棄を発生させ、それを観測する手法を提案し、パケット廃棄を発生させずに、接続限界を学習できることを示した。

第 6 章は、低消費電力な広域同期型光バスネットワークを扱っている。GPS 等の高精度な時刻同期を用いた時分割型の光バスネットワークは（図）、小さな粒度で効率的に帯域割り付けが可能で、光信号のまま処理が可能なため電力消費量が小さい特長を持つ。高効率なタイムスロット割り付けを実現するために、連続タイムスロット割り付けや、基準ノードからの最短経路木を用いてタイムスロット選択位置をシフトする方法を提案し、高いリンク利用率が達成できることを示した。



図：広域同期スケジュール型高速パケット網 copyright©2014 IEICE

松 原 大 典 (高橋達郎教授)

「Studies on Information Sharing using Peer-to-Peer Systems and Information-Centric Networking」

(P2P システムおよび ICN による情報共有に関する研究)

平成 27 年 3 月 23 日授与

本論文は新たな情報通信ネットワーク技術として、Peer-to-Peer (P2P) システムとデータ指向型ネットワークを研究対象としている。

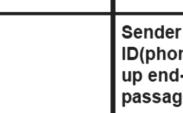
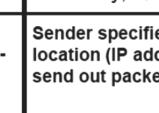
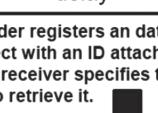
第 2 章は複数ユーザ間で直感的なリソースの探索および管理を実現する P2P 情報共有システムを提案している。分散配置されたファイルの整理・管理を直感的なユーザインタフェースで実現する仮想ディレクトリを実装し、中央管理サーバが管理する。ユーザビリティや管理性を向上させると共に、仮想ディレクトリ上のファイルやフォルダに対してアクセス制御を設定することで厳密なファイルセキュリティを実現できることを示した。

第 3 章は、複数ユーザ間でリアルタイムな相互交流を実現する P2P 情報共有システムを提案している。要約したテキスト情報をプッシュ型でクライアントに通知し、通信アーカイブにより、交流スペースにおけるユーザ通信の録音データをユーザ間で共有する。プッシュ型通知と通信アーカイブの統合により、ユーザ間のリアルタイムな情報共有と、時間に依存せずにユーザが参照できる通信アーカイブを提供した。

第 4 章は、IP アドレスの代わりにデータの名前を用いて端末間の通信と情報共有を実現する新しいネットワークアーキテクチャである情報指向型ネットワークの一方式として Data-Centric Network (DCN) を提案している(図)。最適化経路を形成することにより、データの移動に伴う経路情報数の増加や、上位階層の中継ノードのトランザクション負荷を低減し、大量データの頻繁な移動に対応することを可能とした。

第 5 章は、DCN を大規模網に適用した際の通信遅延およびトランザクション負荷に関する課題を述べ、集約ノード同士を隣接ノードとして直接接続する集約ノードドピアリング方式を提案している。プロトタイプシステムを実装し、37 の中継ノードと 336 台の端末による広域網テストベッドを用いた実験評価により、遅延と上位階層の中継ノードのトランザクション負荷を低減できることを実証した。

第 6 章では、理論的評価によって DCN のトランザクション負荷を分析している。大規模プロバイダ網トポジを用いたシミュレーションにより、各種の端末分布パターンや通信パターンにおける特性を明らかにし、特に近隣の端末同士が通信する場合において DCN が中継ノードのトランザクション負荷を低減できることを示した。

	PSTN(Telephony)	IP(Internet)	Data Centric Network
Time	1930's~	1980's~	2020's~
Usage	voice communication	WEB	M2M
Communication Type	Human to Human (1 to 1)	Human to Machine (1 to many)	Machine to Machine (many to many)
Infrastructure	circuit switching	packet switching	data dissemination
Strength	reliability, QoS	connectivity	mobility, efficiency
Weak	efficiency	reliability, QoS, mobility	delay
Mechanism	Sender specifies terminal ID(phone number) and set-up end-to-end circuit passage. 	Sender specifies terminal location (IP address) and send out packet flows. 	Sender registers an data object with an ID attached, and receiver specifies the ID to retrieve it. 

図：ネットワークアーキテクチャのパラダイム copyright©2013 IEICE

今川 隆司（佐藤高史教授）

「ソフトエラー耐性を考慮した粗粒度再構成可能アーキテクチャの設計手法」

平成 27 年 3 月 23 日授与

プロセスの微細化が進むことで、集積回路の開発や製造に要するコストの増大とシステムの信頼性の低下が懸念されている。特に近年はソフトエラーが回路に及ぼす影響が顕在化し、航空宇宙や社会インフラ等の分野だけでなく、民生機器においても信頼性を考慮したシステム設計を効率良く行うことの重要性が高まっている。これに対して本研究では、粗粒度再構成可能アーキテクチャ (CGRA: coarse-grained reconfigurable architecture) に注目し、この CGRA をソフトエラー耐性を考慮しながら設計するための手法を提案した。

本論文ではまず、ソフトエラー耐性を考慮した CGRA の設計空間探索の効率化のための評価環境を構築した。本環境を用いた信頼性評価により、ソフトエラーが発生する場所によって回路上に現れる影響に違いがあり、選択的空間多重化が有用であることを定量的に示した。また、配線資源の違いが選択的空間多重化における面積と信頼性のトレードオフに与える影響を評価し、アプリケーション回路や設計制約によって適切な配線資源量が異なることを示し、信頼性の観点からの設計空間探索の重要性を示した。

次に空間多重化に注目し、CGRA 上に実装されるアプリケーション回路に選択的三重化を適用する際の、適用領域の優先順位を高速に決定する手法を提案した。本手法は、データフローグラフ (DFG) で表現されたアプリケーション回路の各頂点がもつ特徴に注目し、その脆弱性を重み付き線形和の評価関数を用いて評価し、多重化適用の優先順位を決定している。提案手法により得られる回路面積と信頼性のトレードオフカーブは、網羅的な探索により得られるものに近くなることを示した（図 1）。また、評価関数の重みの値を、複数のサンプルアプリケーションに対する故障挿入シミュレーションの結果に基づいて求める手法を提案した。求まった重みの値から、DFG の頂点の脆弱性が自身に接続される他の頂点の脆弱性の影響を受けることや、論理演算や算術演算がもつ信頼性に与える影響の相対的な違いを、定量的に明らかにした。

更に時間多重化に注目し、構成情報メモリ上で発生したソフトエラーの影響を効率よく訂正可能な時間多重化手法を提案した。本手法では、繰り返しの処理の途中でエラーの発生を検出された時点や、それ以上の処理が不要と判定された時点で処理を打ち切る。これにより、繰り返しの最中に再度エラーが発生して誤り訂正が不可能になる確率を低下させるとともに、回路面積のオーバーヘッドを小さく抑えることが可能となる。評価を通じて、提案手法を CGRA 上に実現するのに必要な面積オーバーヘッドが 1.01 倍程度であることを示した。また標準的な時間多重化や空間多重化よりも、提案手法の方が最大で 2.5 倍程度信頼性が高くなることを示した（図 2）。

最後にこれらの結果を統合し、回路面積やスループットを制約として与えられたときの、提案手法を含む時間多重化や空間多重化の使い分けによるソフトエラー耐性の最大化について論じ、ソフトエラー耐性を考慮しながら CGRA を設計する際に、提案した評価環境・空間多重化手法・時間多重化手法が果たす役割を明らかにした。

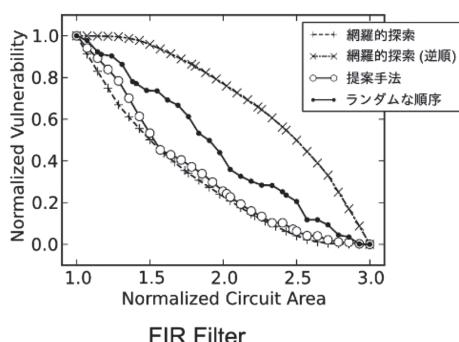


図 1：提案手法により決定される優先順序で三重化をした場合の面積と信頼性のトレードオフ曲線。

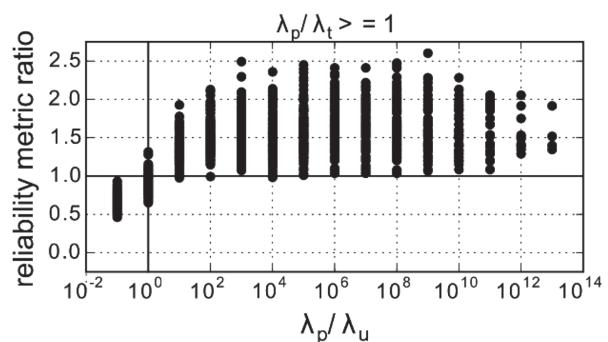


図 2：空間多重化に対する提案時間多重化の信頼性の比。

西澤真一（小野寺秀俊教授）

「集積回路のエネルギー効率向上を目指した性能ばらつきの予測技術とセルライブラリの構築に関する研究」

平成27年3月23日授与

集積回路は、これまでその製造プロセスの微細化によって高速化、大規模化、低消費エネルギー化を実現してきた。しかし最小加工寸法が100nmを切るようになると、微細化なトランジスタや配線素子の製造上および設計上の問題が顕在化してきた。一つは素子特性のばらつきが回路特性に与える影響の拡大である。製造プロセスの複雑化によって、トランジスタ特性ばらつきが複雑化している。ばらつきの正確なモデル化と設計への反映が必要不可欠である。もう一つは、微細化による消費エネルギー削減効果が得られなくなってきた事である。増大するリーク電流の影響によって、トランジスタの閾値電圧を下げられず、従って定格電圧を下げる事ができないためである。電源電圧を定格電圧以下に設定する事で回路のエネルギー効率を改善する事が可能であるが、回路遅延が増大し、また各種特性ばらつきが回路特性に与える影響が拡大する。そのためエネルギー効率の高い集積回路を実現するためには、低電圧動作に適した回路設計手法の構築が必要である。

本論文では、集積回路のエネルギー効率の向上を目的として、大きく以下の2つの問題について取り組んだ。

(1) 性能ばらつきの予測技術の向上によるエネルギー効率の向上

集積回路における素子特性ばらつきを考慮するために設計時にマージンを設けているが、不適切な設計マージンの設定は無駄な消費エネルギーの増加、性能歩留まりの悪化につながる。性能ばらつきの適切な予測のために、製造プロセスに起因する回路遅延ばらつきの統計的性質に応じた分離手法の高精度化、電源配線構造に起因する電圧ばらつきを評価するための埋め込みモニタ回路の検討を行った。実際の集積回路における回路遅延を評価し、その統計的性質の違いを利用して遅延ばらつきの分離、および電源電圧ばらつきモニタ回路の観測結果から、提案手法の妥当性を検証した。

(2) エネルギー効率の高い低電圧デジタル回路を実現するスタンダードセルライブラリの構築

電源電圧を下げる事は集積回路のエネルギー効率を改善する有効な手法であるが、電源電圧を下げる回路遅延は増大し、また製造プロセスに起因するトランジスタ特性ばらつきの影響が拡大する。そのため、低電圧動作に適したスタンダードセルの構成法について検討した。スタンダードセルの遅延特性がその回路構造に依存する事から、集積回路の動作電圧に最適なゲート幅を持つスタンダードセルを容易に設計可能なセルレイアウト構造を提案した。また、低電圧動作において拡大するトランジスタ特性ばらつきを考慮した順序セルの設計法について検討を行った。モンテカルロシミュレーションを利用した加速試験を行い、回路遅延ばらつきに大きく影響するトランジスタを見つけ出す事で、順序セルの設計改善を可能にした。

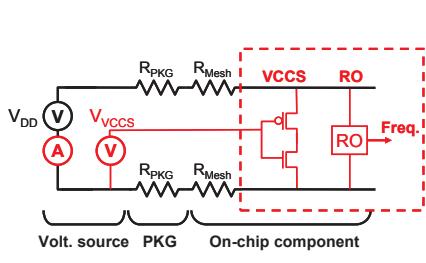


図1：提案電源ドロップ測定回路。
ROと電圧制御電流源からなる。

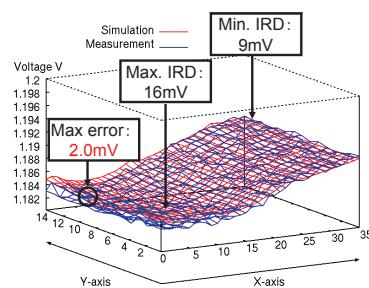


図2：電圧分布の測定結果。
提案回路の実測結果（青）は
シミュレーション（赤）とよ
く一致し、誤差 0.17% (2mV)。

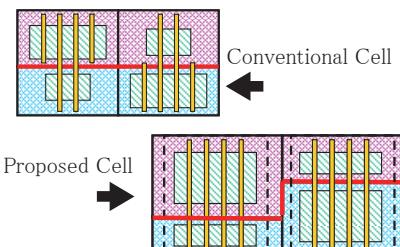


図3：従来セル構造に対し、提案
構造は左右に余白を設けること
で PN 比の最適化が可能。

松本高士(小野寺秀俊教授)

「Impact of Bias Temperature Instability and Random Telegraph Noise on CMOS Logic Circuits」

(バイアス温度不安定性とランダムテレグラフノイズがCMOS論理回路特性に及ぼす影響)

平成27年3月23日授与

CMOSテクノロジのスケーリングにより、トランジスタのゲート酸化膜において、回路性能に影響を与える新たな信頼性の問題が近年発生している。その結果、高信頼性を備えたシステムを設計することはますます困難になっている。バイアス温度不安定性(NBTI, Negative Bias Temperature Instability)とランダム・テレグラフ・ノイズ(RTN)は、ゲート酸化膜における信頼性の問題として近年活発に研究が行われている分野である。NBTIはトランジスタ特性の経年劣化を引き起こす要因であるが、時間とともに一様に劣化するのではなく、回路動作条件によっては急速な回復を伴う複雑な現象である。本研究では複数の高速なNBTI回復特性評価手法を構築した。65nm CMOSで試作した回路においては、図1に示すように、pMOSFETの様々な劣化状態からの回復を1つの回復曲線にマッピングできることを明らかにし、ある条件では数時間のうちに大部分は劣化が回復することを明らかにした。さらに回復現象を活用したマルチコアLSIの長寿命化手法を提案した。

本研究では次に、RTNに起因したデジタル回路の遅延ゆらぎについて、40nm CMOSテクノロジにおいて試作したリング発振回路(RO)を実測した結果に基づいて明らかにした。図2(a)に示すように、あるROの発振周波数を連続的に観測していると、一時的に10.4%もの巨大な発振周波数ゆらぎが発生することを示した。最大で12,600個のROについて測定し、図3に示すように発振ゆらぎの統計的な分布が対数正規分布に従うことを明らかにした。特に、組合せ回路を0.65V程度で低電圧動作させた場合には、RTNによる深刻な遅延ゆらぎが発生することを示した。さらに組合せ回路において発生する遅延ゆらぎを回路設計者が低減する手法を提示した。組合せ回路の動作電圧、トランジスタサイズ、論理段数を増加させることでRTNの影響を急激に低減させることができることを実験的に示した。RTNゆらぎの分布と製造プロセスばらつき分布との相関はほとんど無いことを示し、7シグマ値付近ではRTNゆらぎが製造プロセスばらつきを越えて支配的になる可能性があることを示唆する結果を得た。

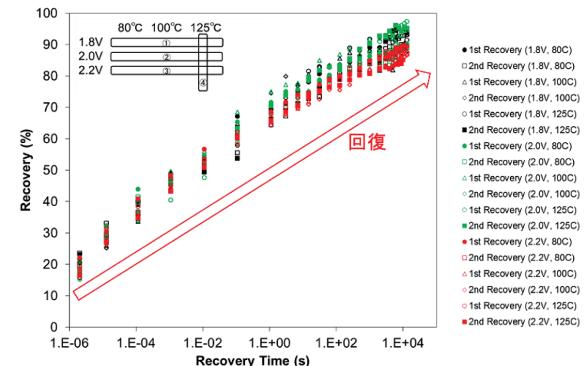


図1 pMOSFETの高速な回復測定結果

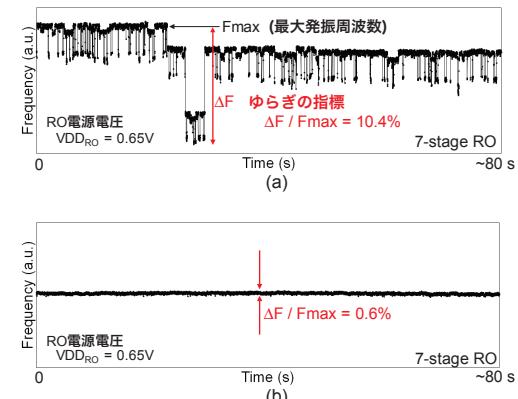


図2 RTNによるRO発振周波数ゆらぎの実測例

(a) ゆらぎが大きいRO (b) ほとんどゆらがないRO

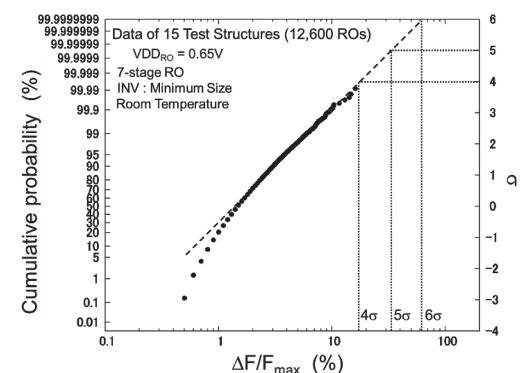


図3 RO発振周波数ゆらぎの統計分布(対数正規分布)

小森祥央（掛谷一弘准教授）

「Epitaxial Growth and Superconducting Properties of 1212 Copper Oxides」

(1212型銅酸化物のエピタキシャル成長とその超伝導特性)

平成28年3月23日授与

本研究は、超伝導体の中で最も高い超伝導転移温度を示す物質群である銅酸化物をベースとした高温超伝導薄膜の作製に関するものである。酸化物の中でも特に”1212型”と呼ばれる結晶構造をもつ物質の研究を行った。この1212型の銅酸化物は、c軸方向の電気伝導性に優れており、そのため、超伝導臨界電流が他の結晶構造の銅酸化物よりも高いことが魅力である。1212型の物質群は、鉛、ビスマス、ルテニウムといった、融点の低い元素をベースとして構成される物質が多く、そのため薄膜成長の際にこれらの元素の再蒸発が伴い、超伝導を示す欠陥の少ない薄膜を得ることが困難とされてきた。本研究では、蒸発しやすい元素の分圧を高めながら熱処理を施すという新たな成長方法を用いることで、1212型物質の良質なエピタキシャル薄膜を得ることに成功し、これによって、超伝導特性（臨界電流、臨界磁場、ジョセフソン特性など）の詳細を初めて明らかにすることができた。下図は、 $PbSr_2YC_{12}O_{23}$ ($Pb1212$) 薄膜の原子像である。数多くの元素で元素置換が可能であることを活かし、c軸導電率に大きな影響を及ぼす”ブロック元素（下図ではPb）”の置換効果に関する検証を行った。その結果、ブロック元素が構成する酸化物半導体（下図では PbO_2 ）のバンドギャップの大きさとc軸抵抗率に正の相関があることが分かった。詳細な解析から、バンドギャップの大きさをトンネル障壁とした際のトンネル電流から見積もられるc軸導電率が実験から得られる導電率とよく一致することが分かった。銅酸化物高温超伝導体のc軸導電率は、超伝導特性を決める重要なパラメータであるが、理論的な導出が困難で新規高温超伝導材料の開拓を阻む一因となっている。しかし本研究で得られたモデルによって元素の種類からc軸伝導率を推定することが可能となった。

得られた具体的な結果は以下の通りであり、博士論文では以下のそれぞれが一つずつ章を構成している。

「1212型物質のエピタキシャル薄膜の作製と結晶性の評価」

スパッタ法によるアモルファス薄膜の作製と元素の分圧を調整した熱処理を組み合わせることで基板に配向したエピタキシャル薄膜を得ることができた。1mm²以上のサイズの単結晶薄膜が得られていることが確認され、バルク多結晶よりも高い90Kの超伝導転移温度を示す薄膜も得られた。

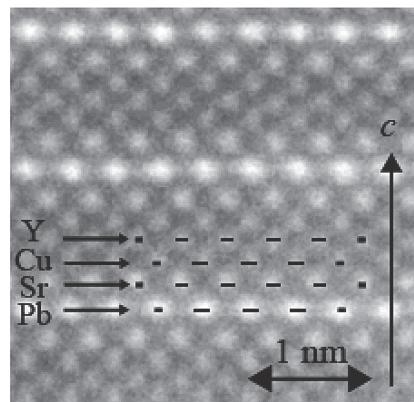
「高磁場・異方的電気伝導特性を基にした超伝導特性の評価」

60Tのパルス高磁場を用いて超伝導を破壊し、臨界磁場の面内面直異方性から超伝導コヒーレンス長のab面方向とc軸方向の異方性を評価した。異方性は5-10と見積もられる結果となり、結晶構造から予想される通り、銅酸化物高温超伝導体の中で非常に異方性が小さく、1212型の物質群は超伝導材料としての応用に適することが明らかとなった。

「c軸ジョセフソン特性の評価」

薄膜に微小メサ加工を施し、c軸電流電圧特性の観察を行った。これまでビスマス系を中心とした限られた物質しか観測されていなかった明瞭なジョセフソン特性を鉛がドープされた1212型の物質で初めて観察することに成功し、超伝導ギャップ・最大ジョセフソン電流などの知見を深めることができた。元素置換効果を検証した結果、鉛イオンの存在がc軸抵抗率を増大させ、明瞭なジョセフソン特性を形成する鍵となっていることが分かった。

「ブロック元素とc軸導電率を結びつける新たな理論に関する議論」
ブロック元素が構成する酸化物半導体のバルクのバンドギャップの値を用いてSimmonsの量子トンネル電流を計算したところ、実験結果から得られたc軸導電率を説明できることがわかり、1212型の物質に限らず、高温超伝導体全般が同様の傾向を示すことがわかり、磁場特性やジョセフソン特性をはじめとした超伝導特性を説明できることがわかった。



$PbSr_2YC_{12}O_{23}$ ($Pb1212$) 薄膜の
断面透過型電子顕微鏡像

丹 羽 弘 樹 (木本恒暢教授)

「Breakdown Characteristics in SiC and Improvement of PiN Diodes toward Ultrahigh-Voltage Applications」

(超高耐圧応用を目指したSiCにおける絶縁破壊特性の基礎研究およびPiNダイオードの高性能化)

平成28年3月23日授与

ワイドギャップ半導体SiCはSiと比較して優れた物性値を有しており、Siでは実現不可能な高性能パワー半導体素子が作製できることから大きな注目を集めている。特に600-1200V級のショットキーバリアダイオード(SBD)や電界効果トランジスタ(MOSFET)は産業機器やハイブリッド車・電気自動車などの電力変換機応用に期待されており、数多くの研究の末、2000年台より量産化が始まっている。一方で本研究では、より高耐圧、すなわち耐圧10kVを超えるような次世代の超高耐圧SiCバイポーラデバイスに注目している。このようなデバイスは、特に送電・変電系統における電力変換装置の低損失化に期待されている。しかし現在までに超高耐圧SiCバイポーラデバイスについては断片的な報告例こそあるものの、その学術的な基礎研究は皆無である。そこで、超高耐圧SiCバイポーラデバイスの実現に向けて、その基本構造であるPiNダイオードを用いた研究が必須となっている。

本論文では、超高耐圧SiCバイポーラデバイスの高性能化に向けて、(1)正確な絶縁破壊特性の性能予測に向けた衝突イオン化係数の精密測定、(2)超高耐圧デバイスの実現に向けた接合終端構造の基礎研究、(3)バイポーラデバイスにおける順方向特性の改善に向けたハイブリッド動作デバイスの提案および実証と、物性からデバイス物理に関する基礎研究をまとめたものである。

- (1) 衝突イオン化係数はデバイスの絶縁破壊電圧などを決定する重要な物性値であり、SiCデバイス全般において設計の基盤となるものである。そこで、正確な値を決定するために本研究では先行研究が抱える問題点を明らかにし、測定・解析手法の改善を図った。これにより、1.0-3.2MV/cmの広い電界範囲で衝突イオン化係数の決定に成功し(図1)、さらに正確な温度依存性も明らかにした。
- (2) パワーデバイスにおいて高耐圧を実現する上で必須となる構造である接合終端構造に関して系統的な研究を行い、超高耐圧を実現するまでの設計指針を明らかにした。特に本研究では空間変調型JTEの改良により26.9kVの耐圧を有するSiC PiNダイオードを実現した。
- (3) SiCバイポーラデバイスの導通損失低減に向けて、ユニポーラデバイスを内蔵させるSiCハイブリッド動作デバイスを提案した。本デバイスでは立ち上がり電圧以下ではユニポーラ動作させることで、低電圧(電流)領域における損失の低減が可能となる。そこで本研究ではハイブリッド動作デバイスの基礎構造であるMPSダイオード(PiN/SBDダイオードの並列構造)を設計・作製し、基本的な設計指針を示した。さらに(2)の空間変調型JTEを用いることで10kV級SiCMPSダイオードを実現した(図2)。

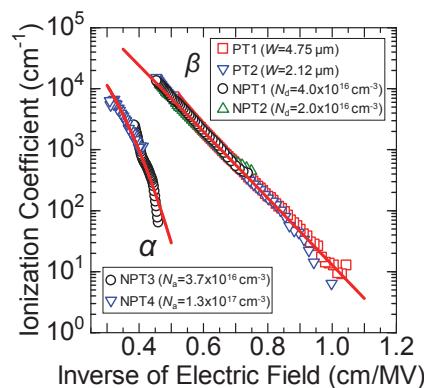


図1：SiCにおける衝突イオン化係数の電界依存性

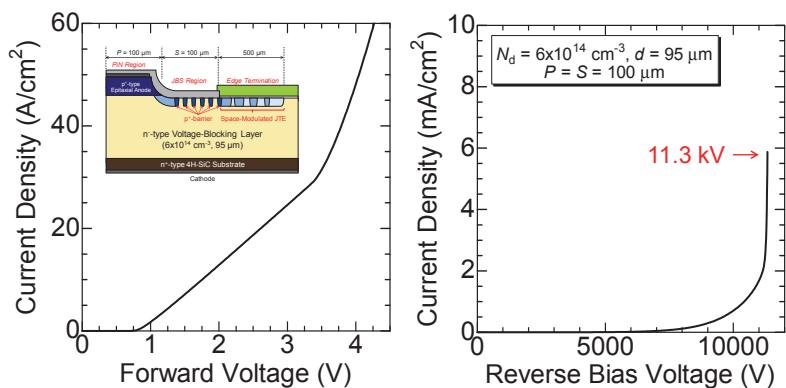


図2：超高耐圧SiC MPSダイオードの電流電圧特性

木村知玄（山田啓文教授）

「原子間力顕微鏡を用いた有機半導体グレイン／電極界面の局所電気特性評価」

平成 28 年 3 月 23 日授与

有機エレクトロニクスは有機半導体材料の電気・光学的機能を利用した軽量性・可撓性のある新規デバイス創成に向けた研究分野であり、有機薄膜トランジスタ（OFET）はその中核を成すデバイスの一つである。有機薄膜は多数の島状のグレインで構成されているため、OFET のデバイス特性に関係する金属／有機界面物性を正しく評価するには特定のグレインに注目した局所物性評価手法の確立が急務である。ここで、表面形状の可視化手法である原子間力顕微鏡（AFM）は、これまで有機薄膜の様々な電気的刺激や応答の評価にも応用されてきた。本論文では AFM 応用を更に発展させ、特定の有機グレイン／電極界面の新規電気特性評価手法を開発し、評価した内容について記述している。

AFM の導電性探針を電気的端子としてグレインに接触させることで、グレインを通る経路の電気特性を測定できるが、探針／グレイン間の接触抵抗が大きいため電極／グレイン間の接触抵抗評価には向かない。そこで、交流バイアスを用いることで非接触でも電極／グレイン間の接触抵抗評価可能な新規局所インピーダンス評価法を開発した。回路モデルより界面インピーダンスの等価回路パラメータを導出できることを数式的に示し、実験結果より金／ペンタセン単一グレイン界面のインピーダンスが抵抗－容量並列回路で表わされることを示した。

非接触での電極／グレイン間電気特性評価を発展させ、グレインの動的なチャネル形成過程を評価するための AFM 時間分解電位測定環境を構築した（図 1）。測定条件の最適化により、図 1 のように单一グレインへのキャリア注入・排出過程を 1 ms オーダの時間分解能、50 nm 以下の空間分解能で可視化することに成功した（図 2）。測定から、キャリア注入によりグレイン全体が徐々に電位増加しており、電極／グレイン界面の接触抵抗のみがその注入制限要因となっていることが分かった。さらに、電位変化の時定数のバイアス電圧依存性から非線形な界面電気特性の抽出を行うことができ、単一グレインとの界面においてもマクロな有機薄膜と同様な金属／有機界面物性が現れることを見出した。

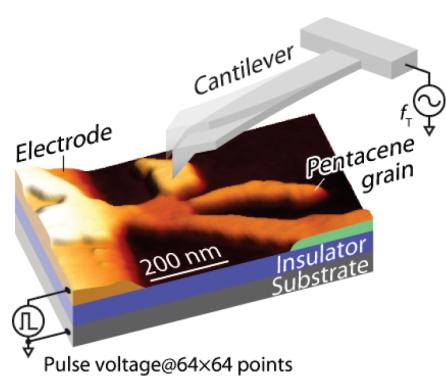


図 1：100 nm スケールの単一ペンタセングレイン上で AFM 時間分解電位測定を行うセットアップ。

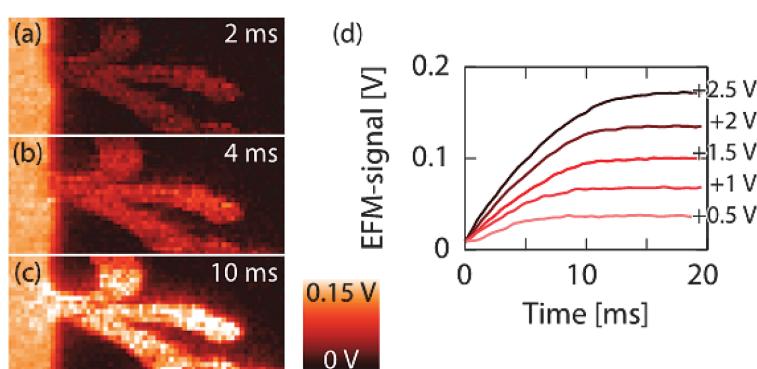


図 2：(a)-(c) 電極に 2.5 V のパルス電圧を加えた際の時間分解電位応答像。(d) グレイン上で平均した時間分解電位応答。

山 岸 裕 史 (山田啓文教授)

「有機薄膜トランジスタの特性制御およびそのチャネル上のナノスケール電荷分布評価に関する研究」

平成 28 年 3 月 23 日授与

有機エレクトロニクスは、有機半導体を中心とする機能性材料を能動的な電子デバイスへと応用することを主眼においた学術分野であり、これまでの無機半導体を中心としたエレクトロニクスとは異なる価値を創出する分野としてその発展が期待されている。有機材料が有する特長として、材料が軽量であること、フレキシブルなデバイスを実現可能であること、デバイス作製に溶液プロセスや低温プロセスが利用可能であること、合成可能であり多様性に富んでいること、などが挙げられ、これらの特長を最大限引き出した高性能有機半導体デバイスを実現するための研究開発が盛んである。有機薄膜トランジスタ (OTFT) は、上述の有機材料の特長を生かした電子回路を構築するために必須の基幹デバイスの一つであり、その実用化に向け広く研究開発が行われている。その一方で、OTFT の実用化および市場投入は未だ実現していない。

本論文は、OTFT の特性制御法およびデバイスの局所物性評価法の開発を行い、デバイスの実用化に向けた課題解決を目標に研究した結果をまとめたものである。本論文によって得られた主な成果は次のとおりである。

(1) OTFT の有機半導体 / ゲート絶縁膜界面に分子ドーピングされたポリマーバッファ層を導入する手法を開発し、本手法によりデバイスのしきい値電圧のシフト量を連続的に制御可能であることを示した。

(2) OTFT に対してケルビンプローブ原子間力顕微鏡を用いてデバイス評価を実施し、デバイスの電気特性を制限し得る要因を明らかにした。

(3) OTFT のチャネル内におけるキャリアダイナミクスの評価手法として、ケルビンプローブ原子間力顕微鏡及び静電気力顕微鏡に基づく、新たなキャリア挙動の時間分解観察法を開発した(図1)。この開発した手法を用いて多結晶有機薄膜トランジスタの評価を行い、バイアスターントオフ時のチャネル内からの拡散過程にあるキャリアが、結晶粒界を反映した不均一な空間分布を形成している様子を可視化することに成功した(図2)。さらに、探針に働く外力をカンチレバーの共振周波数のシフトとして捉える周波数変調原子間力顕微鏡において瞬時周波数法を用いることで、外力の高速時間変化を測定することを可能とし、拡散過程のキャリアの空間分布の時間変化を 3 μ s の時間分解能で可視化することにも成功した。

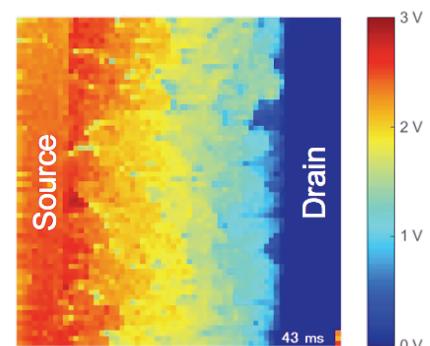
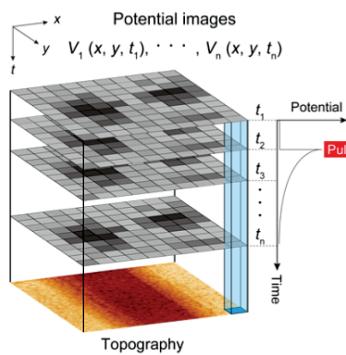
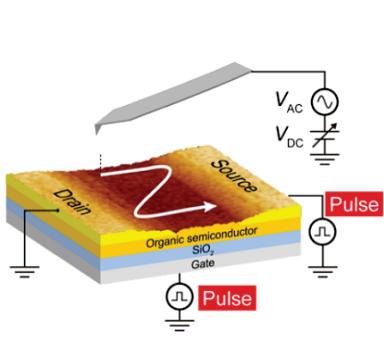


図 1 時間分解ケルビンプローブ原子間力顕微鏡による OTFT のチャネル領域の表面電位像取得に基づく電荷分布時間発展計測の模式図。

図 2 時間分解ケルビンプローブ原子間力顕微鏡によるチャネル領域の表面電位像。

井 上 卓 也 (野田進教授)

「電子・光子両状態制御に基づく高効率・高速熱輻射光源の開発」

平成 28 年 3 月 23 日授与

本研究は、半導体量子井戸による電子状態の制御とフォトニック結晶スラブによる光子状態の制御を併用することにより、熱輻射光源の高効率化および高速制御を実現したものである。従来の熱輻射光源は、プランクの輻射則に従う広帯域な発光スペクトルを示し、輻射強度が光源温度のみで決定されるために応答速度が極めて遅いという課題を抱えていた。それに対し本研究では、熱輻射強度が物質内の電子と光の相互作用に依存して決定されることに着目し、量子井戸のサブバンド間遷移を用いた電子状態の制御とフォトニック結晶スラブを用いた光子状態の制御を併用して、上記相互作用の帯域制御と高速制御を行うことで、所望の单一波長に熱輻射が集約された高効率光源や、熱輻射強度・波長の電圧変調が可能な高速応答型光源を、世界に先駆けて開発することに成功した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 目標の単一波長で狭線幅・高強度な熱輻射を実現するための光源構造の設計指針を、モード結合理論による解析により定量化した。また、GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子井戸と正方格子ロッド型フォトニック結晶スラブを組み合わせた具体的な光源を設計・作製し、ほぼ单峰で Q 値 100 を超える狭帯域熱輻射スペクトルを実証した。
2. 開発した高 Q 値熱輻射光源に電流注入加熱機構を導入し、不要な熱伝導損失・熱輻射損失の抑制手法を確立して、低消費電力で動作可能な熱輻射光源の開発を行った。開発光源の熱輻射特性の評価を行った結果、同電力投入時に、目標波数において黒体輻射光源の 12 倍以上の輻射強度が得られることを実証した（図 1）。
3. 量子井戸構造を pn 接合内部に導入し、印加電圧により量子井戸の電子密度を変調することで、熱輻射強度の高速変調を実現した。開発した光源では、狭帯域 (Q 値 72) かつ高放射率 (0.74) な熱輻射ピークの電圧変調動作が確認され、従来光源と比較して約 4 衍高速な、周波数 600 kHz での高速変調動作が実現した（図 2）。加えて、熱輻射スペクトルの発光線幅や発光波長が印加電圧により操作可能な、従来にない新機能を有する熱輻射光源の開発にも成功した。

以上の成果は、従来の熱輻射光源が抱えていた広帯域発光・低速応答という課題を同時に克服するものであり、赤外センシングシステムの小型化・低消費電力化や、熱光発電システムの高効率化などに大きく寄与することが期待される。

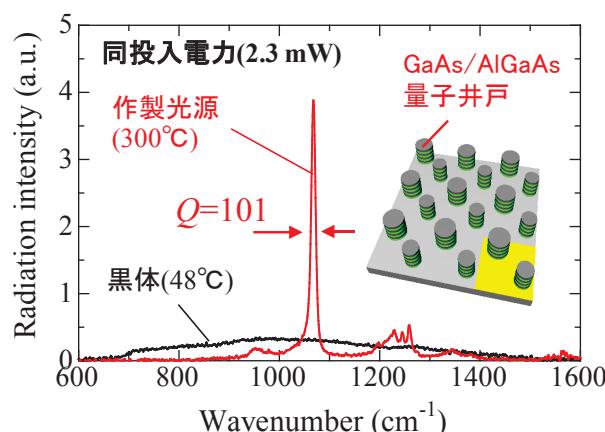


図 1 高効率・狭帯域熱輻射光源の実証

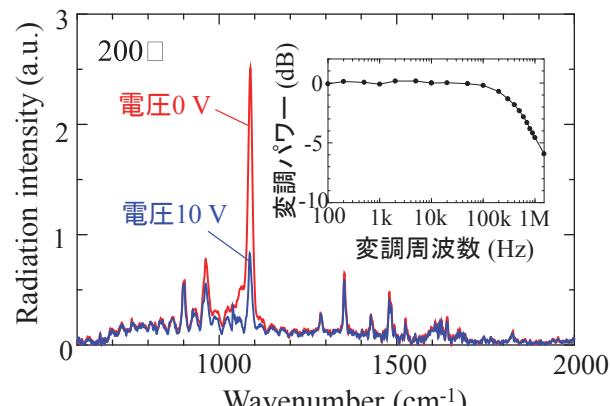


図 2 熱輻射光源の電圧高速変調動作の実現

川本洋輔（野田進教授）

「薄膜シリコン太陽電池の光吸収増大に向けたフォトニック結晶構造の設計に関する研究」
平成28年3月23日授与

本論文は、薄膜シリコン（Si）太陽電池の高効率化に向けて、その光吸収増大を図るべく、フォトニック結晶の導入を検討し、構造設計手法の構築とともに、高い光吸収を有する薄膜Si（特に薄膜微結晶Si）太陽電池の実現に向けた理論検討をまとめたものである。本論文において、得られた主な成果は次のとおりである。

1. フォトニック結晶のバンド端共振効果による薄膜微結晶Si太陽電池の光吸収増大を示すとともに、広帯域に亘る光吸収増大を実現すべく、バンド端モード数を増やしたフォトニック結晶構造についても検討し、バンド端数増大に伴う光吸収増大効果を示した。
2. 感度解析法を利用して正方格子フォトニック結晶の面内構造設計を行い、微結晶Si（厚さ400～600 nmの極薄）太陽電池の光吸収に関し、波長700～900 nmの範囲での光吸収率を図1のように増大させることに成功した。スペクトル計算を行った結果、フォトニック結晶がない場合と比較して最大で2倍以上に増大させることに成功し、その光吸収特性はランバシアン限界を上回ることを示した。
3. 感度解析法によるフォトニック結晶構造設計を3次元方向に拡張した場合についても検討を行った。厚さ2 μmの微結晶Si太陽電池の光吸収を、フォトニック結晶がない場合と比較して1.4倍増大させることに成功した。さらに透明導電膜の光吸収を抑制した構造設計についても検討した。図2の上段に最適化されたフォトニック結晶の一周期分を示す。この構造において、同図下段に示す内部量子効率スペクトルが得られ、最大で32.0 mA/cm²の短絡電流密度が得られた。本論文執筆時点で報告されている微結晶Si太陽電池の開放電圧および曲線因子を考慮すると、この構造において世界最大の光電変換効率が得られる可能性が示唆される。

以上により、本研究では薄膜Si（特に微結晶Si）太陽電池の高効率化に向けたフォトニック結晶の具体的な設計指針、および適切な構造を示す上で大きな貢献を果たすことができた。この成果は今後、フォトニクスおよびエネルギー分野の発展に大きく寄与するものと期待される。

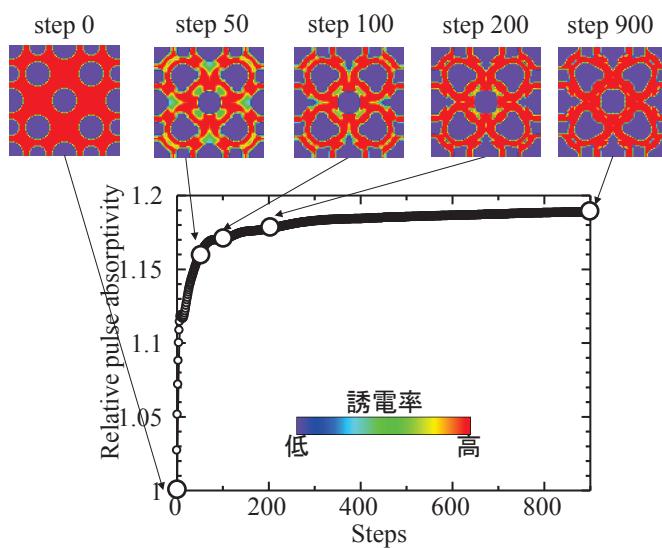


図1 感度解析法により得られたフォトニック結晶および構造変化に伴う光吸収率変化

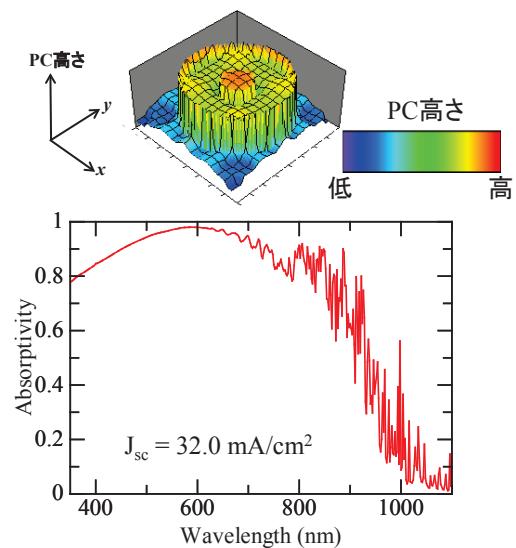


図2 得られたフォトニック結晶および内部量子効率スペクトル・電流値

西本昌哉（野田進教授）

「分子線エピタキシー法を用いたフォトニック結晶レーザ作製法の開発と空孔立体形状の検討」

平成28年3月23日授与

本論文は、大面積でのコヒーレントな発振が可能であり、出射ビームの形状や偏光を制御可能という特徴を併せもつフォトニック結晶レーザの空孔立体形状を制御し得る新規作製法を開発するとともに、空孔の立体形状に着目して新規機能の提案を行ったものである。

活性層の近傍に周期的な屈折率分布をもつフォトニック結晶を配置し、レーザ共振器として利用したフォトニック結晶レーザは、大面積発振による高出力動作のみならず、偏光およびビームパターンの制御や、ビーム出射方向の制御といった様々な機能の実現を可能とする、新しい半導体レーザとして注目を集めている。最近では、3次元結合波解析と呼ばれる、面垂直方向への結合特性を取り込んだ解析法の構築が進み、空孔の立体形状に非対称性を導入することにより、出射効率がさらに向上することが予見されている。しかしながら、空孔の立体形状を制御可能な作製手法は構築されていなかった。

本論文では、上記の課題に対して、分子線エピタキシー法（MBE）を用いてフォトニック結晶構造を埋め込むことを提案・実証し、分子線の照射方向などを変化させることによって、空孔の立体形状を制御し得ることを示した（図1）。さらに、本手法を実際にフォトニック結晶レーザの作製に適用し、レーザ発振の成功に至った（図2）。また、作製したデバイスの特性評価を通じて空孔の立体形状が、出射効率や出射されるビームの形状・偏光など、レーザの諸特性に与える影響を明らかにした。並行して、空孔の立体形状に着目した新規の偏光制御手法を提唱し、これまでフォトニック結晶レーザで実現していなかった円偏光を出射可能な空孔立体形状を提案した（図3、図4）。

以上のように、本論文で構築されたMBE空孔埋め込み法は、フォトニック結晶レーザの作製において空孔の立体形状という新たな自由度を与える画期的な手法である。本論文で得られた知見は、今後のフォトニック結晶レーザのさらなる高出力化や、新規機能の創出に繋がり、半導体レーザ研究の推進に寄与すると期待される。

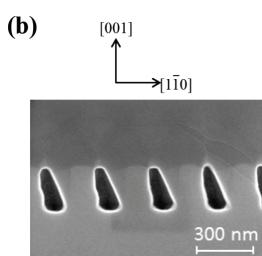
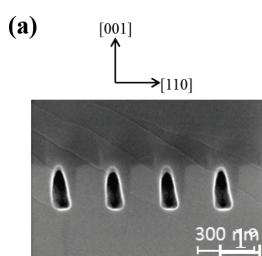


図1 MBE再成長後の断面SEM像

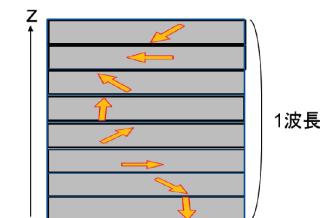
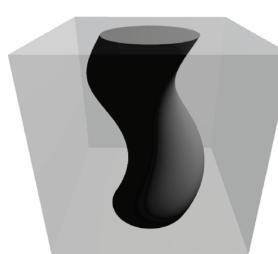


図3 螺旋形状による円偏光出射の提案

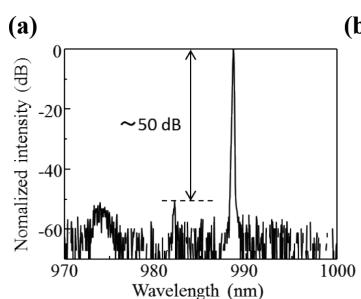


図2 作製した試料の測定結果
(a) 発振スペクトル、(b) 遠視野像

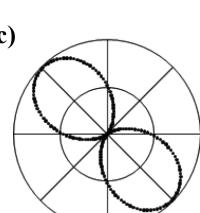
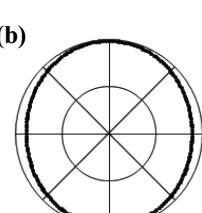
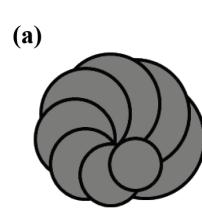


図4 提案した構造からの出射光の偏光特性の計算結果
(a) 空孔形状の模式図、(b) 偏光特性、
(c) 偏光特性（1/4波長板透過後）

田 昇 智 (JEON SEUNGWOO) (野田進教授)
「超高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器に関する研究」
平成 28 年 3 月 23 日授与

本論文は、ワイドバンドギャップ半導体である「シリコンカーバイド (SiC)」を材料としたフォトニック結晶ナノ共振器の Q 値を大幅に向上させる方法を提案するとともに実証的検討を行い、世界最高の Q 値を実現した成果をまとめたものである。研究の初期段階は、SiC フォトニック結晶ナノ共振器の Q 値は 1 万以下にとどまっており、より様々な分野への応用のために Q 値の向上が強く望まれている状況だった。本論文では、まず、SiC フォトニックナノ結晶共振器に関する設計から製作及び測定に至るまで、全過程を再検討することにより、これまで Q 値が 1 万程度にとどまっていた原因を明らかにしている。それを踏まえ、 Q 値を向上させる方法を提案し、従来の 30 倍の Q 値をもつ世界初の超高 Q 値 SiC ナノ共振器の実現に成功した結果をまとめている。また、超高 Q 値の SiC 共振器における非線形現象について考察し、今後の SiC 共振器の応用方向性について提言している。本論文において得られた主な成果は次のとおりである。

1. SiC フォトニック結晶ナノ共振器の Q 値が 1 万にとどまっている原因は、SiC フォトニック結晶を構成する材料である SiC 薄膜内部の結晶欠陥に起因した光吸収損失のためであることを明らかにした。また、これは SiC を薄膜化する工程で用いられるイオン打ち込みの結果生じていることを明らかにした。
2. イオン打ち込みを用いてフォトニック結晶共振器を作製し、高 Q 値化を達成する方法を 2 種類提案・実証した。1 つめは、斜めエッチング技術を用いることで、純粋な SiC バルクの上にナノビーム構造フォトニック結晶共振器を作製する手法であり、本手法で作製された共振器では最大 4 万という、従来の 4 倍の値が得られた（図 1 (a)）。2 つめは、研磨による SiC 薄膜化を利用した共振器作製手法であり、本手法で作製された SiC 共振器では最大 Q 値として 30 万という非常に高い値が得られた（図 1 (b)）。これは従来を 30 倍以上回る値であり、SiC を用いたフォトニック結晶ナノ共振器でも 10 万以上の高い Q 値が得られることを世界で初めて実証した。
3. 超高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器の光学的特性、特に非線形光学特性について考察した。具体的には、まず超高 Q 値 SiC フォトニック結晶共振器においても、多光子吸収が効果的に抑制されることを確認した。つづいて二次高調波発生の実験的検討を行った結果、高 Q 値化による波長変換効率の大幅な向上を示唆する結果を得た（図 1 (c)）。

以上の成果は、今後の SiC フォトニック結晶ナノ共振器の応用範囲の拡張に大いに貢献すると期待できる。

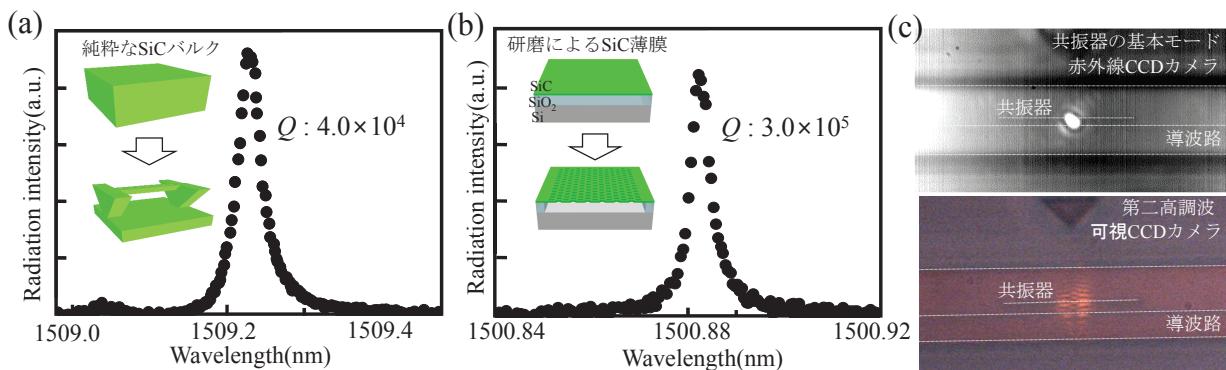


図 1：(a) 純粋な SiC バルクの上にナノビーム構造フォトニック結晶共振器からの放射スペクトル
(b) 研磨による SiC 薄膜化を利用した共振器からの放射スペクトル (c) 高 Q 値 SiC フォトニック結晶共振器からの近視野像

赤 岩 和 明 (藤田静雄教授)

「コランダム構造酸化ガリウム系半導体の電気特性制御とデバイス応用」

平成 28 年 3 月 23 日授与

半導体技術の発展において新規材料の開拓は新しい応用領域を創出する上で重要であり、また混晶という手法で材料物性の制御が行えることは、その材料の応用領域を広げるうえで重要な観点となる。このような観点から新規応用領域を開拓できる新規材料系として本研究ではコランダム構造酸化物混晶系に着目した。コランダム構造酸化物混晶系はバンドギャップ値が 5.3 eV で sapphire 基板上に成長可能なコランダム構造酸化ガリウム ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) を中心とした混晶系であり、同じ結晶構造をとる酸化アルミニウム ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) や酸化インジウム ($\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$) との混晶により 3.7 ~ 8.9 eV でのバンドギャップ制御が行え、また酸化鉄 ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) や酸化クロム ($\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$) といった遷移金属酸化物との混晶による、磁気特性の付与などの物性制御が行え、高耐圧パワーデバイスやスピンドバイスへの応用が見込める系である。コランダム構造酸化物混晶系の問題は電気導電性に乏しい事であり、この問題は中心となる $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が絶縁体的な特性を示していることに起因する。そこで本研究ではコランダム構造酸化物混晶系のデバイス応用を目的に、中心材料である $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の電気特性制御に取り組んだ。

まず Sn をドーパントに選び $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の N 型導電性制御に取り組んだ。成長条件の最適化により $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 台でのキャリア密度制御に成功したが、 10^{18} cm^{-3} 以下の領域においては転位欠陥によるキャリア補償が問題となって実現せず、結晶性の向上が必要であることが分かった。また高濃度 Sn ドープを行った $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜では XRD 非対称面 ω -scan の半値幅が減少する結果が得られ、結晶性が高いことが分かった。

次に 10^{18} cm^{-3} 以下の領域でのキャリア密度制御を実現するため、結晶性の向上に取り組んだ。高濃度 Sn ドープを行った $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜が高い結晶性を示したことから、アニールによる Sn の転位欠陥へのゲッタリングによる高抵抗化処理を行った高濃度 Sn ドープ薄膜を下地層として、高結晶性かつ高抵抗のバッファとすることを考案し（以降アニールバッファと呼称する）、このアニールバッファ層上の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の電気特性を評価した。図 1 に示すようにキャリア密度にして $10^{17} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ と 10^{18} cm^{-3} 以下の領域での制御を実現し、また $24 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という過去最高の移動度を得た。 10^{18} cm^{-3} においてキャリア密度減少に伴い移動度が減少する傾向が得られ、これが転位散乱によるということを移動度の温度特性解析の結果などから示した。

スピンドバイス応用に向けた磁性酸化物の創生を目的にコランダム構造酸化インジウム鉄 ($\alpha\text{-}(In,Fe)_2\text{O}_3$) の作製と磁気特性評価を行った。作製した $\alpha\text{-}(In,Fe)_2\text{O}_3$ は室温以上で強磁性を示し、またその磁気起源が傾角強磁性によることを示した。また Sn ドープにより抵抗率が低減することを示し、導電性制御が可能な事を示した。

最後に $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の電気特性制御の成功に伴ってデバイス試作を行った。MISFET を試作し、図 2 に示すようにゲート電圧印可によるチャネル層の伝導度変調動作を行うことができ、トランジスタ動作の実証を行った。特性の向上にはデバイスプロセスの最適化や更なる電気特性の向上が必要であり、今後の課題とした。

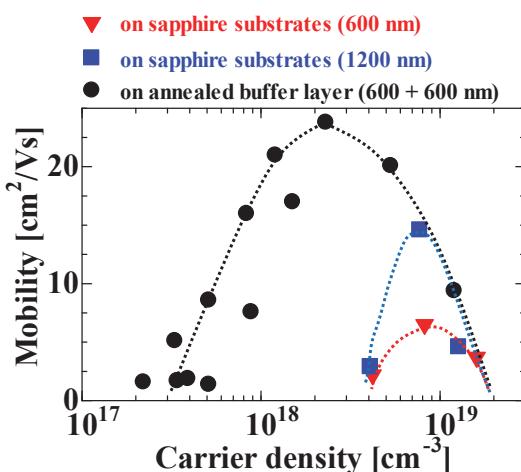


図 1：アニールバッファ層上の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の移動度とキャリア密度の相関

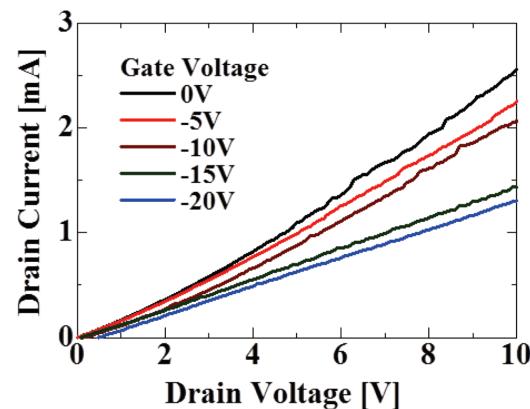


図 2：作製した MISFET のソースドレイン間の I-V 特性

金弓治（河原大輔准教授）

「High-quality Knowledge Acquisition of Predicate-argument Structures for Syntactic and Semantic Analysis」

（構文・意味解析のための高品質な述語項構造知識の獲得）

平成 28 年 3 月 23 日授与

In computer science, people have been trying hard to march toward one of the very ultimate goals which expects computers can truly understand human's language. This task is named as text understanding. During the past decades, great efforts have been made to develop various kinds of techniques to achieve text understanding, which can further provide us with the space to discover more humanized ways for human-computer interaction. To complete this ultimate goal, it may involve multiple domains such as cognitive science, linguistics and even psychology. In Natural Language Processing (NLP), which is a field of computer science and artificial intelligence, for computers to understand text in human language, the priority is to discover and clarify the internal relations of the words within a sentence. In this thesis, it is considered to be crucial to acquire large-scale knowledge for improvement of varieties of NLP tasks. Thanks to data explosion, unprocessed data that potentially contain a large amount of useful information can be relatively easier to acquire, and thus it is promising to acquire knowledge from these raw texts using automatic approaches. Automatic knowledge acquisition is always dependent on the fundamental analysis such as syntactic parsing and semantic analysis. Without considering the automatic analyzing errors, the knowledge will be extremely noisy and may cause bad effects when we apply this kind of knowledge to NLP tasks. In this thesis, we solve the abovementioned problems by proposing a framework of acquiring high-quality knowledge from unlabeled raw text that contains less noise, and apply the knowledge to syntactic and semantic analysis.

In this thesis, we present a framework for knowledge construction from high-quality dependencies that are selected from automatic dependency parses. Figure 1 shows the overview of the proposed framework. For the raw text, we apply dependency parsing and acquire automatic dependency parses, which inevitably contain parsing errors. A high-quality dependency selection approach is proposed to filter these erroneous automatic parses and only select those with high reliability. From the high-quality dependency parses, we extract predicate-argument structures (PASs), which contain the abstract of a sentence. PASs can be used as additional knowledge for other NLP tasks. Afterwards, semantic clustering is applied to merge all the predicate-argument structures with similar meaning. The clustered PASs are called case frames, which are regarded as another type of knowledge. These are a type of semantic frames that distinguish between the different usages of each predicate. The PAS knowledge is then used to improve dependency parsing. We also use case frames to improve Semantic Role Labeling (SRL). We apply a similar selection approach to select high-quality semantic roles for deep case PAS extraction and deep case frame construction. Deep case frames are used for further SRL improvement. The experimental results show that the quality management of acquired knowledge is beneficial for various NLP tasks.

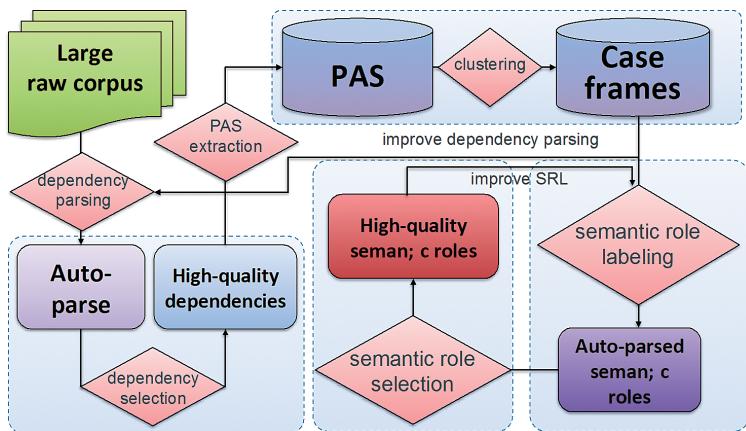


Figure 1: High-quality knowledge acquisition overview

Mo Shen (河原大輔准教授)

「Exploiting Vocabulary, Morphological, and Subtree Knowledge to Improve Chinese Syntactic Analysis」

(語彙的、形態的、および部分木知識を用いた中国語構文解析の精度向上)

平成 28 年 3 月 23 日授与

Syntactic analysis in Chinese, including word segmentation, part-of-speech (POS) tagging, and constituency and dependency parsing, has been actively studied since the publish of the first version of Penn Chinese Treebank. However, evaluations in major natural language processing (NLP) tasks suggest that the performance of state-of-the-art systems for Chinese is constantly lower than that for European languages. This is largely due to the ambiguous nature of the definition of “word”, as well as the lack of morphological inflection in Chinese, which have caused inconsistency and data sparseness problems in existing Chinese treebank annotation.

To address these difficulties, this thesis investigates the strength and weakness of previous studies and proposes new methods that improve the state-of-the-art systems. A consistent set of annotation guidelines for Chinese word segmentation, POS tagging, and dependency labelling is proposed (Figure 1.a); an algorithm that extracts substrings as reliable word boundary indicators which significantly enhance the accuracy of word segmenters is designed and implemented (Figure 1.b); a tagset for character-level POS tagging is proposed, based on which the entire Penn Chinese Treebank 5.0 is annotated (Figure 1.c); a model that performs character-level POS tagging jointly with word segmentation and word-level POS tagging is proposed (Figure 1.d); and a parse reranking model which takes advantage of global subtree features with less restriction in the structure and the size of the subtree context is proposed (Figure 1.e). All these components are integrated in a single Chinese syntactic analysis system, which is demonstrated to be effective through comprehensive parsing and machine translation experiments.

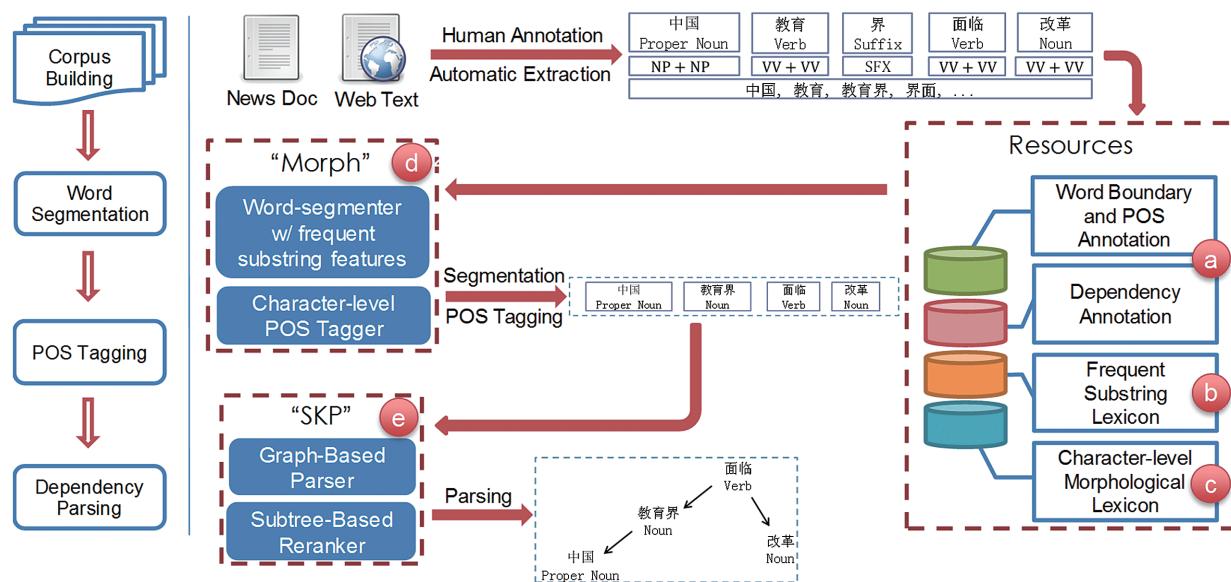


Figure 1. Illustration of the proposed system.

栗野皓光（佐藤高史教授）

「Variability in BTI-Induced Device Degradation: From Silicon Measurement to SRAM Yield Prediction」

（トランジスタの BTI 劣化ばらつきに関する研究：特性評価から SRAM 回路歩留り予測へ）

平成 28 年 3 月 23 日授与

コンピュータの性能は目を見張る速度で向上を続けているが、これはトランジスタの微細化によるところが大きい。一方、著しい微細化の進展により、集積回路の長期信頼性低下が懸念されている。先端プロセスでは、トランジスタのゲート長は数十 nm 程度に達しており、微細な構造を大電流が流れるために、特性劣化は免れない。従って、先端プロセスでは特性劣化を前提とした設計が求められている。本論文では、特性劣化の“ばらつき”に着目し、その統計的性質を明らかにするとともに、劣化ばらつきを考慮した歩留り解析手法を開発した。

まず、トランジスタの特性劣化を実シリコンで観測するために、劣化ばらつき測定に特化した TEG (Test Element Group) を開発した。バイアス温度不安定性 (BTI) に伴うしきい値電圧 (V_{TH}) 変化は緩やかに進行し、加速環境下で測定しても数時間から数日程度の測定時間を要する。そのため、数千個のトランジスタで劣化ばらつきを測定するためには、測定の並列化が必要不可欠であった。提案回路は、測定時間の大部分をストレス印加時間が占めることに着目し、複数のトランジスタに並行してストレスを印加し、逐次的に V_{TH} を測定する方式を考案した（図 1）。提案回路の有効性を検証するために、65nm プロセスを用いてチップを試作し、測定の並列化が有効であること、そして劣化ばらつきがチャネル面積に反比例して増大することを実験的に明らかにした（図 2）。

BTI は、絶縁膜内部の格子欠陥へのキャリアの捕獲・放出が関与していると考えられており、欠陥の活動を詳細に調べることが、BTI 発生メカニズムの解明に繋がると期待されている。しかし、欠陥活動は直接見ることが出来ず、 V_{TH} の時間変化から間接的に推定する必要がある。一般に、単体トランジスタには複数の欠陥が含まれているため、各欠陥の寄与の総和が、 V_{TH} 変化として観測される。個々の欠陥活動を個別に調べるために、 V_{TH} 変化から複数欠陥活動を分離する必要があるが、これは不良設定問題であり、何らかの拘束条件が必要となる。そこで、統計的機械学習を応用し、欠陥活動に対する事前知識と、観測された V_{TH} 変化をベイズ統合することで、個々の欠陥活動を分離する手法を開発した（図 3）。

以上の取り組みでは、単体トランジスタの BTI 劣化に注目していたが、BTI 劣化が回路動作に与える影響は未知数であった。特に SRAM セルには非常に高い歩留りが要求されるため、BTI に伴う僅かな特性変化も無視できない。そこで、SRAM セルの歩留り変化を効率的に予測可能な計算手法を開発した。BTI に伴う特性変化は緩やかに進行することに着目し、空間を動き回る粒子によって SRAM セル特性の経時変化を逐次的に追跡することで、従来手法と比較して 9.76 倍の高速化を達成した。

集積回路は我々の生活に密接に関与しており、集積回路の動作不良は重大な社会損失に繋がる恐れがある。微細化に伴う信頼性低下が問題視されている中で、本論文は劣化の観測から回路特性を予測に至る一連の課題に取り組み、集積回路の高信頼化に向けて有効な知見を提供した。

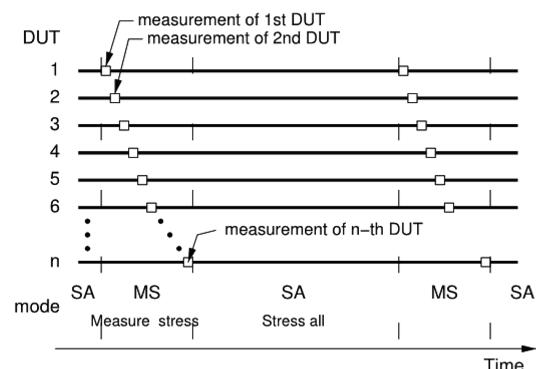


図 1：提案する並列測定法

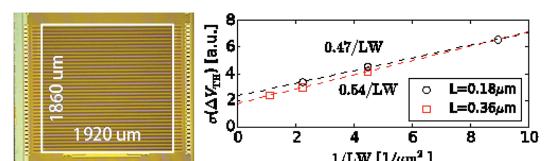


図 2：試作チップ（左図）と劣化ばらつき（右図）

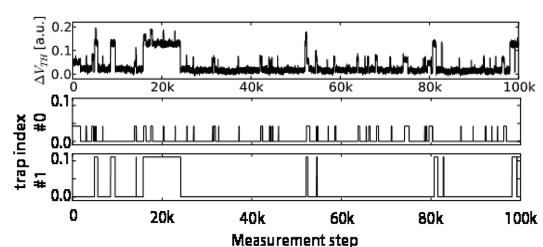


図 3：測定した V_{th} 変化（上段）と分離結果（下段）

山 田 英 一 (佐藤亨教授)

「非線形応答特性を持つ光デバイスを有する光通信システムの伝送特性に関する研究」

平成 28 年 3 月 23 日授与

光ファイバを伝送媒体として用いる光ファイバ通信技術は、今日の情報化社会における社会基盤として広く利用され、様々な技術により光通信の長距離化および大容量化が実現されてきた。しかし、光ファイバ伝送システムにおける各種非線形応答特性が長距離大容量伝送を制限するという課題がある。

本論文は、光伝送システムにおける非線形応答特性として、1. 伝送路を構成するデバイスの非線形性、2. 伝送路である光ファイバ自体の非線形性、3. 光送受信器の非線形性について、それぞれの非線形応答特性が伝送特性に与える影響に関する研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 伝送路内の光デバイスの非線形応答として、長距離光中継伝送システムに用いられるエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) の利得飽和特性が伝送特性に与える影響について検討を行い、伝送路への入力信号強度の変動があっても、利得飽和により多中継伝送後に EDFA から出力される光信号強度が一定値に安定化されることを数値解析により明らかにした。また、一定になる光信号強度は EDFA の励起光強度を調整することにより任意に設定できることを示した。さらに、光ソリトン伝送において、光信号強度とパルス幅とともに一定値に安定化されることを伝送実験により実証した。

(2) 光ファイバの非線形性光学効果の 1 つである自己位相変調効果を利用した非線形ループミラーを光伝送システムに用いることによって、信号光強度に対するしきい特性により、長距離伝送された光信号から光雑音が低減できることを提案し、伝送実験により実証した。また、その後の伝搬に影響する非線形ループミラー通過後のパルスの周波数チャープ特性の解析を行い、非線形ループミラーへの入射パワーを低くし、非線形な位相変化が 0.3π 以下のとき、影響が小さいことを明らかにした。

(3) 光送信器に用いられる InP Mach-Zehnder (MZ) 光変調器における非線形な Electro-optic (EO) 効果が伝送特性に与える影響について検討を行い、EO 非線形性のある InP MZ 変調器は、同一バイアス電圧プッシュプル駆動を行うことにより、強度変調方式、差動 4 値位相変調 (DQPSK) 方式のいずれにおいても、EO 非線形が無い MZ 変調器と同等の変調特性を持つことを明らかにした。さらに、DQPSK 方式における 1 波長 (図 1) および波長多重 (WDM) 長距離伝送 (図 2) において、符号誤り率を表す Q 値が EO 非線形の有無で差が無いことを明らかにし、InP MZ 変調器が長距離 WDM 伝送用の光変調器として有効であることを示した。

以上のように、数値シミュレーションあるいは実験により、光伝送システムに用いられる各種光デバイスの非線形応答特性が伝送特性に与える影響を明らかにすることによって、長距離大容量光伝送システム実現のための有用な知見を得た。

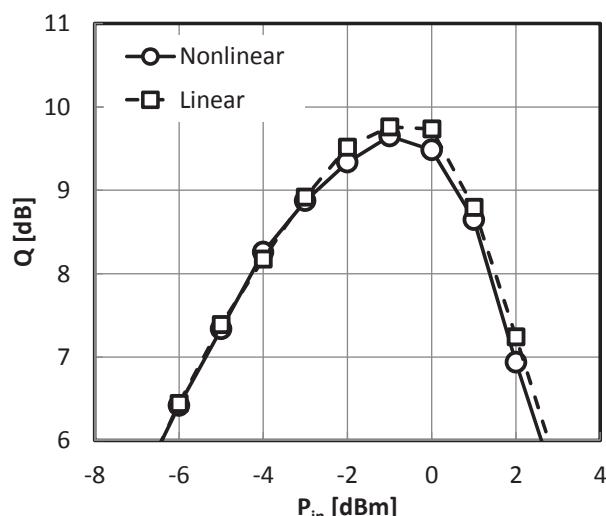


図 1 3200km 伝送後における Q 値のファイバ入力パワー P_{in} 依存性 (43 Gbit/s DQPSK、1 ch)

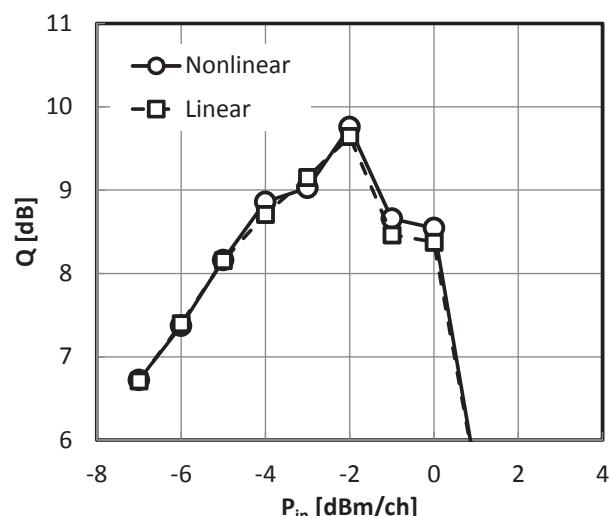


図 2 2400km 伝送後における Q 値のファイバ入力パワー P_{in} 依存性 (43 Gbit/s DQPSK、7 ch WDM)

羽田和慶（長崎百伸教授）

「Model Analysis on Plasma Start-Up for Toroidal Fusion Devices」

（トロイダル核融合装置におけるプラズマ着火の研究）

平成 28 年 3 月 23 日授与

プラズマ着火・立ち上げは、これに続く核融合プラズマ燃焼の出発点となるため、核融合発電の実現には非常に重要なテーマである。プラズマ着火の物理過程については完全に理解されているわけではなく、信頼性ある着火のために、今後、研究がますます必要となる。本研究では、トカマク装置及びヘリカル装置において、現在、注目されているプラズマ加熱手法による着火の条件や物理過程を調べるため数値モデルを構築し解析を行った。

トカマク装置においては、現在、定常運転のために超伝導コイルを用いた装置が主流になってきている。超伝導コイルは、容器内に印加できる一周電圧を大きくとることが困難でプラズマ着火を起こすことのできる圧力の範囲が非常に狭い。そのため、電子サイクロotron 共鳴加熱 (ECRH) による予備電離が非常に期待されている。現在、建設中の超伝導トカマク装置 JT-60SA において、どの程度の ECRH パワーによりプラズマ着火がおこなえるのか検証することが重要である。研究の第一歩として、空間的に一様なプラズマを仮定した従来の 0 次元モデルによる解析を行った。0 次元モデルによる数値解析では、第 2 次高調波 ECRH の吸収効率については取り扱いができなかったものの、基本波 ECRH については 100% 吸収を仮定した解析により知見を得ることができた。第 2 次高調波 ECRH はプラズマ着火の直後は吸収効率が非常に低く、共鳴層に局在化した吸収分布を持っているため、径方向の分布を考慮に入れた 1 次元モデルを構築した。1 次元モデルは、電子及び水素原子などの中性粒子の粒子輸送方程式、電子および水素イオンの熱輸送方程式、電流拡散方程式から成る。本モデルの構築により、第 2 次高調波 ECRH の吸収効率をモデルに組み込むことに成功するとともにプラズマの径方向分布の時間発展を追うことが可能となった。本モデルにより、JT-60SA において考えられているガス圧において、ECRH パワーが 1 MW 程度あればプラズマ着火ができる事を示した。これは、本装置において準備される ECRH システムのパワー内に納まっており、プラズマ実験に向けて非常に良い見通しが得られた。

ヘリカル装置においては、ECRH に依らない中性粒子入射 (NBI) によるプラズマ着火が、2.45 GHz マイクロ波によるシードプラズマの生成により中型装置においても可能となってきた。これは、容器内の磁場に依らないという特徴を持っており、高ベータ実験およびベータスケーリング実験において注目を集めている。京都大学のヘリオトロン J においては、2.45 GHz マイクロ波による非共鳴な加熱により、あらかじめ、シードプラズマを生成し外側より入射した高速の中性粒子と荷電交換し高速イオンが作られる。高速イオンとのクーロン衝突により電子を加熱し、追加のガスパフを電離させプラズマ密度の立ち上げを行う。このプラズマ着火については、定性的な理解はあるものの、物理モデルの構築については、あまり進んでおらず、より定量的な評価の行える物理モデルの構築が必要である。本モデルは 0 次元モデルをベースとし、解析対象の粒子種を原子から分子に拡張した。本モデル方程式は、高速水素イオンのバランス方程式、イオン（水素イオン、水素分子イオン、重水素イオン、重水素分子イオン）、中性粒子（水素原子、水素分子、重水素原子、重水素分子）のバランス方程式、電子およびイオン（水素イオン、重水素イオン）のエネルギーバランス方程式から構成される。0 次元モデルではあるものの、水素・重水素分子のプラズマ外からプラズマ内への侵入長を含めるなどプラズマの空間的な分布の効果を含めた。本モデルを用いて、ヘリオトロン J における NBI プラズマの電子密度立ち上げが成功する場合と失敗する場合の物理過程についての知見が得られた。具体的には、電子密度立ち上げが成功する場合は、①高速水素イオンの生成が大きく、これにより、②電子の加熱が十分に起こり、③高速水素イオンにより加熱された電子がガス分子を解離させる。③により、バルクイオン密度が大きくなり、さらに①高速水素イオンの生成に寄与する。①、②および③が正のフィードバックループを形成し、電子密度立ち上げが成功する。この正のフィードバックを阻害する物理過程を起こすことにより、電子密度立ち上げが失敗する。また、本モデルを適用することで、シードプラズマ密度、ガスパフのタイミング、NBI パワーに対する依存性について実験の傾向を再現し、物理過程についても説明が行えた。

鈎 持 尚 輝 (水内亨教授)

「Study of magnetic field configuration effects on internal transport barrier formation in Heliotron J」

(ヘリオトロンJにおける内部輸送障壁の形成機構に与える磁場構造の影響)

平成 28 年 3 月 23 日授与

高い温度とエネルギー閉じ込めの改善を伴う高性能プラズマの実現に輸送障壁の形成は必須となっている。近年、トーラス磁場閉じ込めプラズマにおいて三次元磁場構造形成の重要性が認知されており、今後この三次元構造が閉じ込め改善度やその遷移機構へ如何に影響を与えるか理解していくことは、将来の先進的核融合炉開発に不可欠である。ヘリオトロンJ装置は、5種類のコイル電流を制御することで多様な三次元磁場構造を形成できる。輸送障壁の形成条件に対し、有理面の存在との関係が議論されているが、ヘリオトロンJでは磁場配位を変えることで有理面のモードや位置制御も可能である。本装置での研究により、輸送障壁形成における磁場の三次元効果を解明することが期待され、トカマク／ヘリカル間わずトーラス型磁場閉じ込め装置共通の閉じ込め改善現象発現のメカニズム解明に大きく貢献できる。本研究では、電子内部輸送障壁(eITB)の形成機構に与える磁場構造の影響を実験的に明らかにすることを目的とした。

ヘリオトロンJにおいて実効ヘリカルリップルの大きさが異なるなる配位に対して、eITBが形成される密度閾値に違いがあることを観測した。この結果は新古典理論から予測される傾向と異なり、その要因として磁気島の形成の有無がeITBの形成条件に影響していることが考えられる。そこで、磁気島の存在に着目し、eITBの構造に与える影響を確認した。プラズマが存在しない状態(真空磁気面)において有理面が存在しない配位のヘリオトロンJプラズマに対し、加熱パワー・密度をeITB形成に十分な条件にすることでeITBを形成した(図1)。eITB形成を保持した状態で、トロイダル電流を~0 Aから徐々に上昇させることで回転変換を変化させた。トロイダル電流値がある閾値(~0.7 kA)を超えるとeITBフット位置が数百μsの間に r/a ~0.1から r/a ~0.2までプラズマ外側方向に向かって移動した。その後、トロイダル電流量の増加に伴いeITBフット位置が更に外側へ移動した(図2)。回転変換値の初期値を変えて同様の実験を行うと、磁気島が形成される可能性が高い $n/m=4/7$ に近いほど、eITBフットの位置が移動を始めるトロイダル電流値が下がることが明らかになった(図2)。実験パラメータ領域には他にも磁気島を形成することができる低次の有理面が存在するが、そのような有理面にはeITBが影響を受けないことも確かめられている。実験的に得られたトロイダル電流値とeITBフット位置の変化を考察するため、新古典理論計算からブートストラップ電流分布を求め、それを元にMHD平衡コード(VMC)を用いて回転変換分布を見積もったところ、トロイダル電流値がある値を超えるとプラズマ中心領域($r/a \sim 0.3$)が4/7を越え、有理面が形成されることが示された。更に、その後電流値の増加に伴い有理面位置がプラズマ外側に移動することも示され、実験と定性的に矛盾しない結果となった。以上の結果はトロイダル電流制御を介した時間応答性の高いeITBの形成及び位置制御の可能性を示している。eITBフット位置は閉じ込め性能に対して $(r/a)^2$ の改善効果があり、閉じ込め改善領域を広げることで高性能プラズマの生成手法に新たな知見を与えるものである。

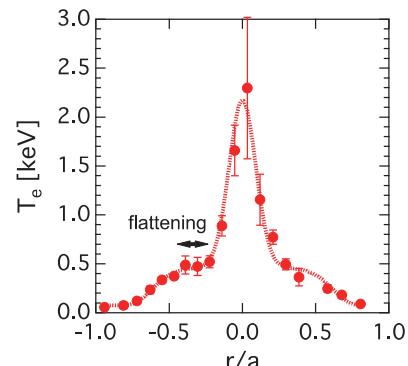


図1 ヘリオトロンJの典型的なeITBプラズマの電子温度分布

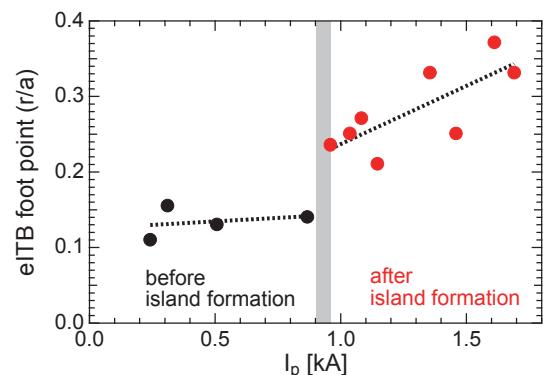


図2 トロイダル電流の増加に伴うeITBフット位置の移動

石川 峻樹 (篠原真毅教授)

「Study on Beam Forming for Phased Array Antenna of Panel-structured Solar Power Satellite」

(パネル構造型宇宙太陽発電所におけるフェーズドアレーランテナのためのビーム形成技術の研究)

平成 28 年 3 月 23 日授与

本論文は、パネル構造を持った宇宙太陽発電所（SPS、図 1）における送電ビーム制御を対象とした検討を行い、送電パネルのビーム制御の能力の評価や SPS のアンテナのゆがみを補正するビーム制御手法の精度評価および実際の SPS への適用に関する提案を行ったものであり、成果は以下のとおりである。

1. 生存圏研究所に導入された高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いた実験を行い、シミュレーションの結果と比較することにより、ビーム制御における制御精度やシミュレーション精度の評価を行った。このとき、単純なビーム方向制御だけではなく、平坦ビームという高度な位相制御が必要となるビームについても検討を行い、実際にビーム形成を行なえることを確認した。
2. 測定で誤差が生じる場合の制御精度について、解析的方法およびシミュレーションによる検討を行うことで制御において発生する誤差の大きさを示し、制御精度が最もよくなる測定点の配置を示した。
3. PAC 法の制御における制御において問題となる、パネル角度推定の不確かさ（アンビギュイティ）によって発生する誤りについて、対策の提案とその効果の検証を行った（図 2）。測定点を増やす方法およびパネル平面度維持技術を利用した手法について述べ、シミュレーションによりアンビギュイティの除去に有効であることを示した。
4. PAC 法を実際の宇宙太陽発電において運用するために必要となる、信号受信用アンテナを設計することで配置法を提案し、また電磁界シミュレーションにより、受信アンテナと周囲のアンテナの干渉による影響の検討も行い、問題なく運用が行えることを示した。
5. 宇宙太陽発電の送電パネルのビームについても、シミュレーションによる検討を行い、ビーム方向制御時の強度の変化を示した。

以上を要するに本論文は、フェーズドアレーによる高精度なビーム制御の実証や制御手法の精度の評価および実際のシステムにおける運用法の提案など、パネル構造型 SPS の実現において重要ないくつかの要素を達成している。

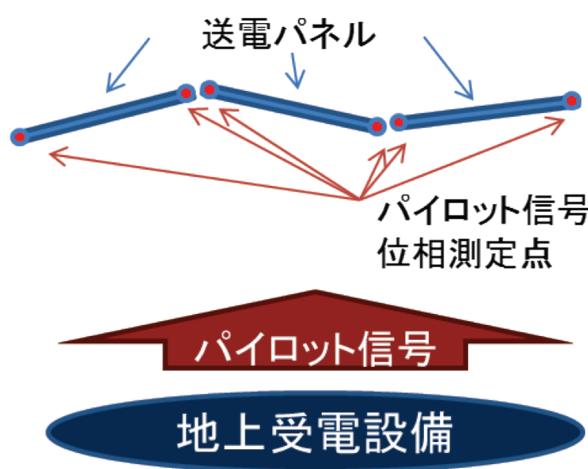


図 1 パネル構造型 SPS の送電ビーム制御

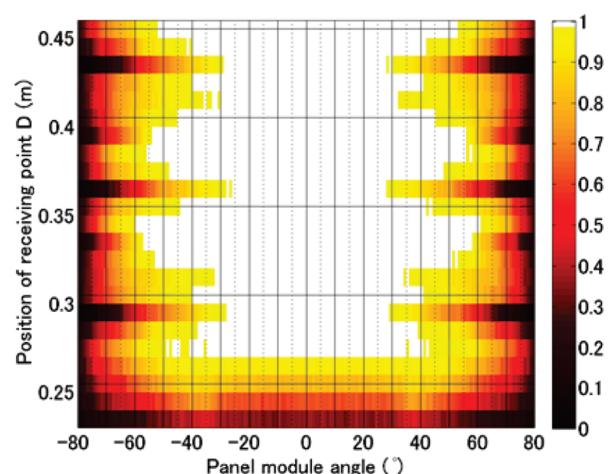


図 2 パイロット信号測定期がパネルに 4 点の場合のアンビギュイティ除去の成功 rate の一例

水野公平（篠原真毅教授）

「磁界共鳴送電の安全性に関する細胞影響評価研究」

平成28年3月23日授与

本論文は、身近な生活環境における共鳴送電の実用に向けて、その安全性を実験的に検証することを目的として、細胞影響評価のための磁界共鳴送電ばく露装置を開発し、それを用いて実際にヒトの細胞に対する影響を評価した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 磁界共鳴送電の細胞影響評価を実施するための、磁界共鳴送電ばく露装置を開発した。装置製作に先立ち、共鳴送電特性をシミュレーションにより検証し、金属箱による限られた閉空間内外での送電特性の変化を検証するとともに、更に電磁環境のレベル・均一性を考慮して最適な寸法を選択している。
2. シミュレーションによる検証結果に基づき装置製作（図1）に取り組み、共鳴送電特性等を確認した。送電効率は、共振周波数 12.5MHzにおいて 85.4%、細胞培養位置における磁界強度は 170A/m（国際非電離放射線防護委員会の定めるガイドライン 80A/m の約 2 倍）である。
3. 製作した磁界共鳴送電ばく露装置の中で、共鳴送電を行っていない状況下で実際に細胞を培養し、細胞増殖能力や周期分布といった基本動態を指標に検証を行い、製作した装置が適切な細胞培養安定性を保持していることを確認した。
4. 開発した共鳴送電ばく露装置を用いて、実際に磁界共鳴送電の細胞影響評価に取り組んだ。細胞影響評価の指標には、細胞基本動態（細胞増殖能、細胞周期分布（図2）、がんに至る可能性を有する遺伝毒性（染色体異常、DNA 損傷、遺伝子突然変異）さらに非遺伝毒性である細胞応答の観点からストレスたんぱく質発現というように広い範囲を指標とし、指標ごとに、他の安定した細胞培養環境で培養された細胞サンプルで得られた結果と比較して、いずれの指標、条件においても有意な差異は見られないことを確認した。

以上、本論文は、磁界共鳴送電の安全性を実験的に検証するため、必要となる共鳴送電装置の開発に成功するとともに、それを用いて細胞影響評価に取り組み、細胞への共鳴送電の影響が生じないことを見出したものである。

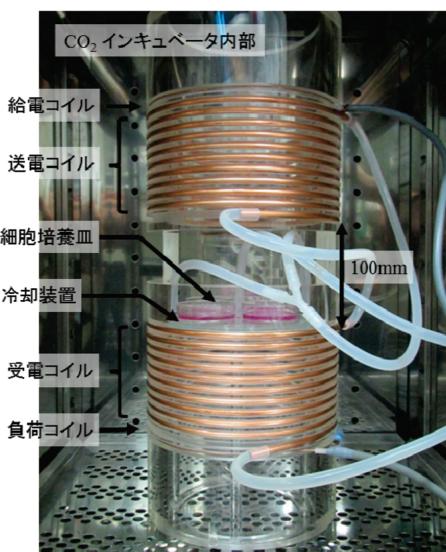


図1 試作共鳴送電ばく露装置の外観

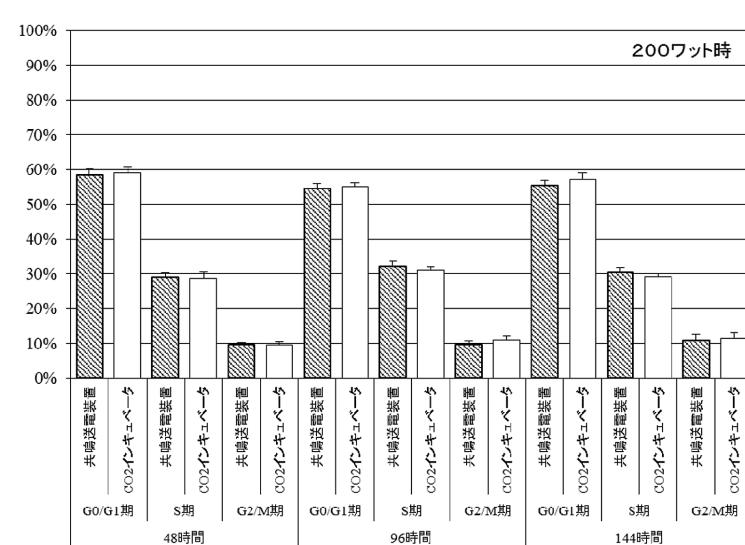


図2 共鳴送電ばく露による細胞周期への影響評価結果

尾 上 洋 介（小山田耕二教授）

「因果グラフのビジュアル分析に関する研究 一評価グリッド法における評価構造分析を通じて一」

平成 28 年 3 月 23 日授与

現代社会が直面している数多くの社会問題の解決に取り組むためには、問題がどのような要因によって引き起こされているのかといった因果関係の理解をした上で意思決定を行うこと必要不可欠となっている。しかし、現実的な問題では、多数の要因の間の因果関係が複雑なネットワークを形成する。このような因果関係のネットワークは因果グラフと呼ばれ、因果グラフから意思決定の鍵となる要因を見つけ出すことが重要な課題となっている。

複雑なデータを分析し意思決定に必要な知見を効果的に得るために、ビジュアル分析が科学・産業分野で発展してきた。ビジュアル分析とは、対話的なビジュアルインターフェースに支援された分析的推論である。因果グラフに対してビジュアル分析を行うことは、上述のような社会問題の解決に大きく貢献すると期待されるが、因果グラフに対するビジュアル分析の研究は十分に行われてこなかった。因果グラフのビジュアル分析のためには、有向グラフとして表現される因果グラフを効果的に可視化するためのグラフドローイング手法の開発や、因果グラフの分析を行うためのビジュアルインターフェースの設計が研究課題となる。

評価グリッド法と呼ばれる定性調査手法によって抽出される評価構造は、人の認知に関する因果グラフである。本論文は、評価構造の分析を主な対象とした、因果グラフのビジュアル分析に関する研究の成果を取りまとめたものである。本論文では、評価構造の可視化のために杉山フレームワークに基づいた新たなグラフドローイング手法を提案し、さらにその可視化手法を用いた評価構造のビジュアル分析システムの設計と開発を行った。本論文の主要な成果は以下の通りである。

1. 評価構造の可視化及び分析に対する要求を明らかにするため、実例として、学会の会員の満足度に関する因果関係分析を行った。
2. 評価構造の自動レイアウトを実現するために、評価構造レイアウトへの要求を反映した杉山フレームワークの新たな階層割当手法を提案した。階層割当問題を線形整数計画問題として定式化することで実用的な時間でレイアウトを生成できることを示した。また、ユーザー評価によって提案手法は評価構造レイアウトの要求を満たしていることを確認した。
3. 杉山フレームワークによって生成されるレイアウトの視認性を向上するために、辺集中化の新たなアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、辺集中化後の辺数を最小化するアプローチをとることで、従来アルゴリズムではグラフの単純化に失敗する場合にも効果的にグラフの単純化ができる음을示した。
4. 評価構造の可視化及び分析に対する要求に基づき、グラフドローイングとネットワーク分析を取り入れた評価構造のビジュアル分析システムの設計と開発を行った。評価グリッド法の専門家からのフィードバックにより評価構造の効果的な分析が可能であることを確認した。

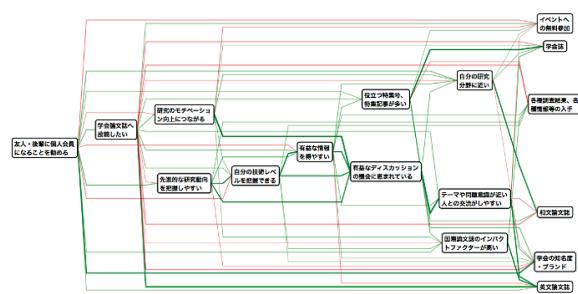


図 1 会員満足度の因果関係モデル

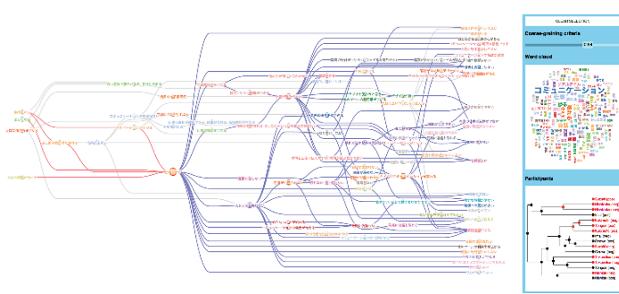


図 2 評価構造のビジュアル分析システム

Claudia Cecilia Yamamoto Noguchi (土居伸二教授)

「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism Considering Meal Absorption Rate and Model-based Blood Glucose Control for Prandial State in Type 1 Diabetes」
 (1型糖尿病における食事の吸収速度を考慮に入れたグルコース・インスリン代謝の数理モデル及び食事時の血糖値のモデルベースト制御)

平成 28 年 9 月 23 日授与

Diabetes mellitus is characterized by high blood glucose (BG) levels above the normal range of 80—130 mg/dL seen in healthy subjects. Depending on its etiology, diabetes is classified in different types with type 1 diabetes mellitus (T1DM) being caused by the absence of insulin secretion, thus requiring self-administration before every single meal with the necessary dose being directly proportional to the amount of carbohydrates. Recently, model-based control algorithms, also known as *artificial pancreas*, are expected to bring a ‘cure’ by automatic maintenance of BG levels within the recommended range of 70—180 mg/dL the first 2 hours post-meal. Previous success obtained during non-feeding overnight state aside, post-meal BG control imposes the greatest challenge due to the rapid absorption of carbohydrates compared to that of insulin, which results in a very large BG spike of >200 mg/dL within one hour post-meals, yet also followed by sporadic low BG episodes <70 mg/dL afterwards. We hypothesize that the BG control performance depends largely on the accuracy of the mathematical model of glucose-insulin metabolism and the impact of a meal on BG levels to provide a summary of the present study (Fig. 1) in the following:

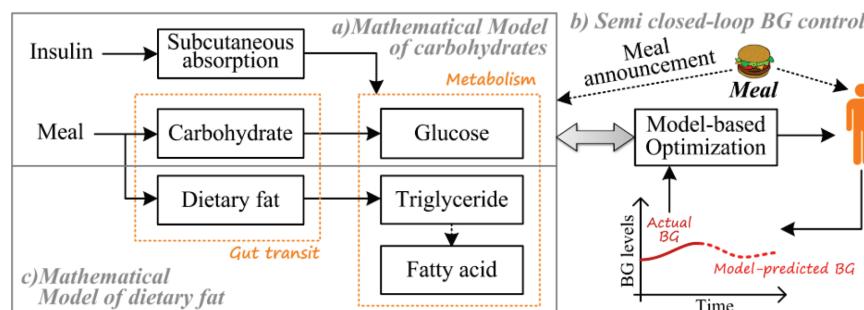


Fig. 1 The present study consists of a) novel mathematical model of glucose-insulin metabolism from carbohydrates for its utilization in b) model-based BG control for prandial state, and c) further model extension to include dietary fat metabolism as well.

- a) Mathematical model of postprandial glucose-insulin metabolism in T1DM: We propose a novel mathematical model of gut transit of carbohydrates to obtain a more accurate mathematical representation of the impact of a meal on BG levels by including several parameters of food-specific carbohydrate absorption including the glycemic index (GI) of foods, which provides a quantitative assessment of food-specific absorption rate as a single number. The model proposed is able to reproduce post-meal BG excursion in T1DM accurately given the carbohydrate amount of the specific food type to be consumed—hence the very first model with such detail—and the insulin bolus dose at any specific time.
- b) Semi closed-loop BG control algorithm in T1DM for prandial state: We propose a novel control strategy that comprises a pre-meal bolus (either continuous or as single-bolus) 1 hour in advance, followed by model predictive control for post-meal automatic BG control. The model in a) is utilized for BG predictions as part of the insulin optimization computed for insulin requirements throughout the prandial state. Simulation results in MATLAB demonstrate that BG levels can be maintained effectively within the acceptable clinical recommendations 100% of the time, even under a number of variability scenarios.
- c) Mixed meal model in T1DM: We propose a novel mixed meal model that includes the effect of dietary fat on glucose-insulin metabolism by considering a comprehensive physiological representation of glucose and fatty acid metabolism—which is beyond the current understanding—. The proposal is an extension of the mathematical model in a) to include gut transit of dietary fat, as well as post-meal triglycerides (TG) and non-esterified fatty acids (NEFA) dynamics. The ability to reproduce clinical data in T1DM accurately despite its minimal compartmental approach demonstrates its potential for utilization in BG control.

The present study thus demonstrates that diurnal BG control, albeit with only minimal restrictions for patient safety, is feasible within 70—180 mg/dL provided an accurate mathematical representation of the impact of a meal on BG levels. Based on these results, further clinical implementation is expected to contribute to the development and commercial release of the long-sought artificial pancreas in the forthcoming future.

金子光顕（木本恒暢教授）
「Strain-Controlled AlN Growth on SiC Substrates」
(SiC 基板上への歪み制御 AlN 層の成長)
平成 28 年 9 月 23 日授与

窒化ガリウム (GaN, $E_g=3.4$ eV) 系半導体は、高効率固体照明である白色（青色、緑色）発光ダイオード (LED)、移動体通信基地局で用いられる高出力高電子移動度トランジスタ (HEMT) の材料であり、現代社会を支えている。次なる社会の要請として、殺菌・浄水や医療・化学分析機器等様々な応用が期待されている深紫外 LED や、高耐圧かつ高温動作可能な HEMT が求められている。これを実現するにあたり、窒化アルミニウム (AlN, 6.0 eV) および AlN に数 %~40% の GaN を固溶させた高 Al 組成 AlGaN 混晶を用いた AlN 系デバイスに注目が集まっている。しかしながら、様々な研究機関が高 Al 組成 AlGaN を用いたデバイスの報告をしているものの、その材料物性から期待される性能は得られていない。要因の一つとして、成長した高 Al 組成 AlGaN 層中に多数の結晶欠陥が存在することが挙げられ、結晶の高品質化が重要である。

高 Al 組成 AlGaN の成長にあたり、格子整合する基板が存在しないため、ヘテロエピタキシャル成長する必要がある。使用できる基板のうち、本研究では SiC 基板に着目する。SiC 基板は AlN との格子不整合が約 0.9% と小さく、大口径の高品質ウェハ (6 inch) を比較的安価で入手することが可能である。これまでの研究において、成長初期を工夫することで、6H-SiC (0001) 基板上に低貫通転位密度の AlN 層が 700 nm 厚まで基板と格子整合して成長（コヒーレント成長）できることが示されている。しかしながら、この AlN 層成長の再現性が悪く、さらなる成長条件の検討が必要である。また、SiC にコヒーレント成長した AlN 層上に高 Al 組成 AlGaN 層を成長すると、バルク AlN 上の成長と比べて格子不整合が大きくなり、厚膜成長が困難となる。高品質高 Al 組成 AlGaN 層の成長には、より AlGaN 層の格子定数に近い格子定数に制御された AlN 層（歪み制御 AlN 層）上に成長するのが理想的である。

本論文は、高品質高 Al 組成 AlGaN 成長実現に向け、AlN 単層成長の基礎検討、物性評価および歪み制御 AlN 層成長に関する研究についてまとめたものである。主要な内容を以下に示す。

- 窒素プラズマ源に由来する成長初期 Al/N 比の変化を発光分光により定量評価し、過度に Al-rich 条件となることを防ぐ成長シーケンスを考案し、高品質 AlN 成長を実現した。
- 高分解能 X 線回折測定により AlN の歪み量を精密測定し、歪みによるバンド間遷移エネルギーおよび格子振動数の変化を変形ポテンシャルによる計算結果と比較することで、変形ポテンシャルの推奨値を提示した。同時に、より正確な弾性スティフネス定数を得る必要性も示した。
- 1 分子層単位で層厚が制御された極薄 GaN 中間層の成長を実証し、緩和度が異なる GaN 層上に AlN を成長することで広範囲 (-0.53 ~ +0.07%) の歪み制御を達成した（図 1）。
- AlN/SiC 界面に局在する格子不整転位に起因した横方向サテライトピークの観測に窒化物半導体系で初めて成功した（図 2）。さらに、ステップ端密度を増加した SiC 基板上へ AlN の成長を行うことで、より歪みを緩和した AlN 層の成長を実現した（図 3）。

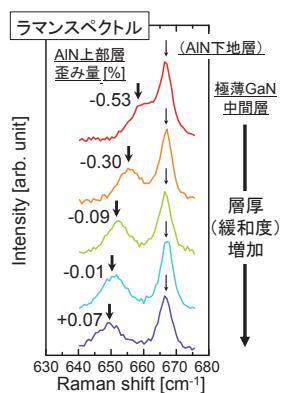


図 1：歪み制御 AlN 層のラマンスペクトル

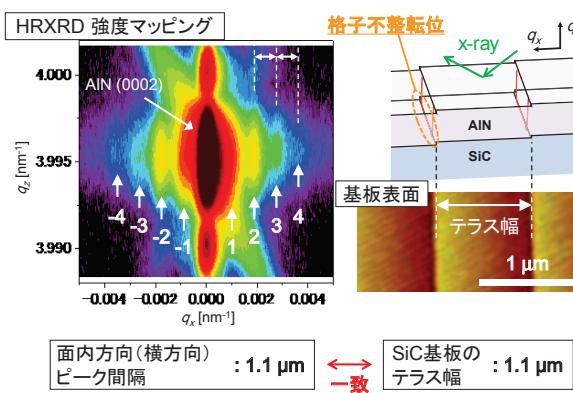


図 2：周期的に配列した格子不整転位による横方向サテライトピークの観測

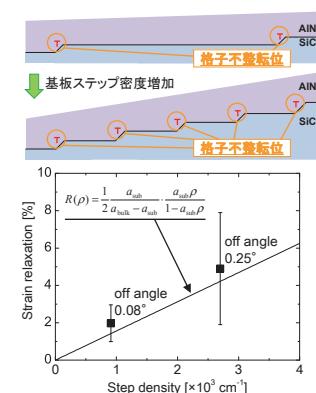


図 3：基板ステップ密度制御による AlN 層の歪み制御

権 平 皓 (野田進教授)

「3次元フォトニック結晶光配線技術構築に向けた光伝搬制御の理論検討」

平成 28 年 9 月 23 日授与

本論文は、3次元フォトニック結晶における光伝搬制御に関して体系的な理論検討を行い、3次元光配線技術構築の基礎となる結果をまとめたものである。

3次元フォトニック結晶は、3次元的な周期的屈折率分布をもつ構造体で、微小な光回路や光電子集積回路における立体光配線などの自在な光制御を実現するための基礎技術として期待されている。近年、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶(図1)において、フォトニック結晶の結晶方位を考慮して導波路構造を設計することにより、三次元的な光導波路が実現できることが明らかとなった。本論文では、3次元フォトニック結晶を用いた光伝播制御の体系的な理解を行い、次世代の光配線技術構築のための光制御の理論検討を行っている。本論文において、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 結晶の上部あるいは下部方向から入出力可能な導波路(図2)において、その入出射特性および伝搬特性の解明とその改善法を示した。入出力特性に与える結晶終端部の構造の影響を明らかにし、高効率な入出力を実現するための導波路端部の設計指針を提案している。
2. 高密度光配線の実現へ向けた導波路間の結合を定量的に解析し、集積密度の改善方法を示した。光電子集積回路における光インターフェクションへの応用を念頭に、導波路を集積していく際に生じるクロストークを解析(図3)し、具体的なクロストーク許容値を基に集積可能な密度を示した。そして、異なる種類の導波路を適切に集積することによって導波路間の結合を抑制でき、それによって集積密度を向上させられることを示した。
3. 導波路に加えて共振器も含めたより高機能な光配線技術を構築するべく、3次元フォトニック結晶による光閉じ込めの振る舞いを定量的に解析する手法を提案した。これによりストライプ積層型3次元フォトニック結晶の複素バンド構造の解析を行い、これを基礎として導波路および共振器特性解明及び新設計指針への展開を示した。

以上の成果は立体光配線技術構築の基礎を成す重要な成果と言え、フォトニック結晶による高機能な光回路および光配線の実現へ繋がり、半導体光制御の推進へ寄与すると期待できる。

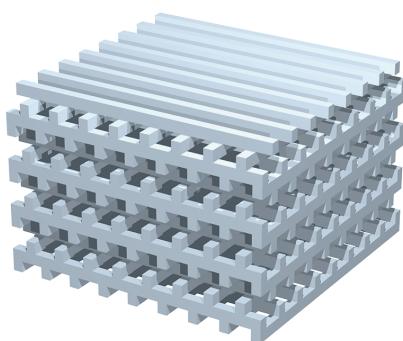


図1 ストライプ積層型3次元フォトニック結晶の模式図。ストライプパターンを4層一周期で積層することで構成される。

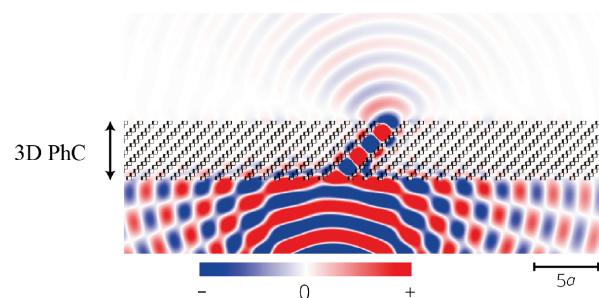


図2 3次元フォトニック結晶の導波路における光入出力の電界分布。

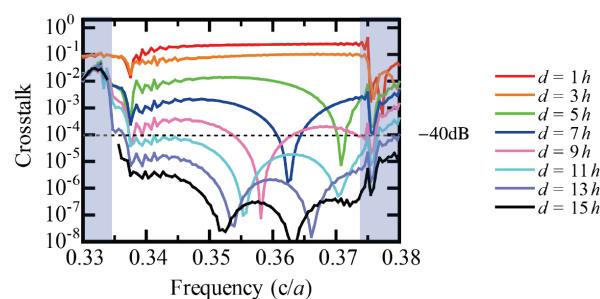


図3 導波路を立体交差させた場合のクロストークの解析結果の例。

John Richardson (黒橋禎夫教授)

「Improving Statistical Machine Translation with Target-Side Dependency Syntax」

(目的言語側の依存構文による統計的機械翻訳の改善)

平成 28 年 9 月 23 日授与

Machine Translation (MT) is the application of Natural Language Processing that focuses on the automatic translation between languages. Translation is particularly challenging for language pairs with widely different grammatical structures, such as English and Japanese. Syntax-based MT is a translation paradigm based on the principle of generalizing language with grammatical rules. This additional layer of abstraction enables the design of more robust and flexible translation rules. However, the majority of previous approaches to syntax-based MT have employed only source-side grammar (known as 'tree-to-string MT'). This is mainly because syntactic analysis is difficult, prone to error and resulting systems can become overly complicated.

While there have been previous studies on exploiting target-side syntax ('tree-to-tree MT'), results have not been promising. Our aim is to analyze in detail the effectiveness of target-side syntax in the modern world of machine translation. We ask whether the potential improvement in translation quality is able to outweigh the increased complexity of employing a structured target-side representation (in particular, dependency parses).

This thesis begins with an overview of machine translation, outlining the major paradigms and methods of evaluation. We continue by outlining the case study of a state-of-the-art dependency tree-to-tree system, KyotoEBMT (see Figure 1), which we have been developing as a core component of our research on syntax-based MT. The design and extraction of dependency tree-to-tree translation rules are discussed. Analysis of the system gives empirical evidence of the advantages and disadvantages of syntax-based approaches and provides a starting point for our investigation. We proceed to analyze two major aspects of translation where target-side syntax can be effective: word order and translation fluency. We discuss our approaches to each of these areas, describing experiments assessing the effectiveness of our proposed approaches and discussing the potential impact of each method.

While this thesis concentrates on statistical syntax-based approaches, the field has recently seen a surge in interest in translation methods based on neural networks. The final chapter presents an overview of future work that could incorporate ideas from this paradigm. We conclude by discussing the potential impact and future directions of our work.

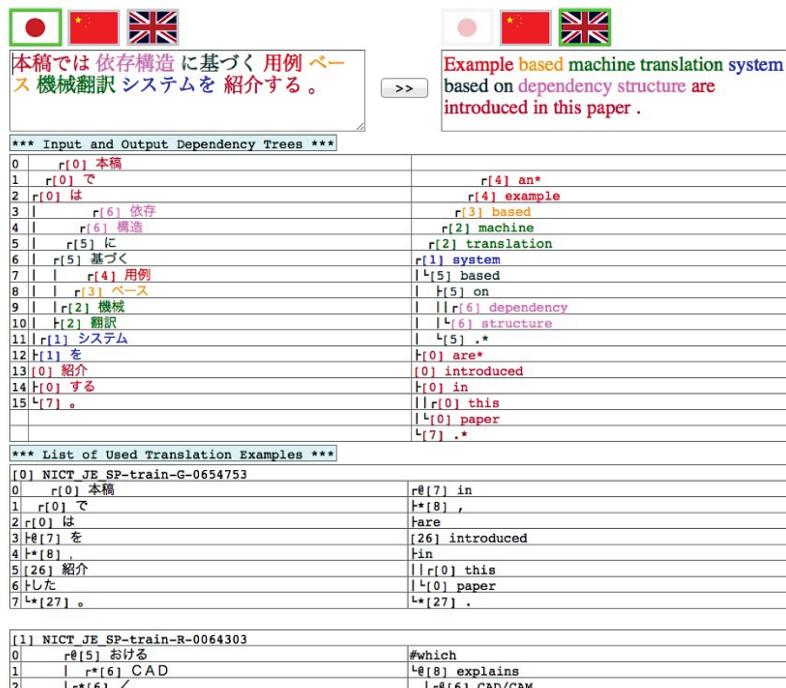


Figure 1: An example translation with KyotoEBMT showing translation examples with dependency trees.

石川 恵理奈（松山隆司教授）

「Semantic Interpretation of Eye Movements Using Author-designed Structure of Visual Content」

（提示コンテンツのデザイン構造を用いた視線運動の意味理解）

平成 28 年 9 月 23 日授与

「目は心の窓」というように、人の視線は「意図」や「興味」といった心的な状態をよく反映して振る舞うことが従来研究を通して明らかになっている。視線と心的状態の関係は、認知心理学やヒューマンコンピュータインターフェース、マーケティングなどの幅広い分野において長く調査されてきたが、近年では特に、統計的機械学習・データマイニングの技術を視線解析に応用し、視線と心的状態との関係を確率的数理モデルで記述しようといった試みも盛んに行われている。このようなモデルは、視線からの心的状態推定などに応用でき、「人の知的活動における情報処理過程の解明」という根源的な課題への重要な足がかりとなるとともに、コンピュータインターフェイスやインタラクションのデザイン・評価への活用といったような応用面へも貢献することが期待できる。

しかしながら、既存研究においては、比較的単純な提示コンテンツが用いられるなど、統制された実験室環境下での視線運動が扱われるにとどまっている。閲覧対象・心的状態の両者が多様で複雑となる実環境下での視線運動を理解するには、まず、提示コンテンツの意味的・空間的構造を考慮することが不可欠であり、これらのコンテンツ情報をどのようにモデル化して利用するかという課題がある。さらには、同じような特徴を持つ視線運動でも、その視線運動の持つ「意味」（つまり、その視線運動を表出した際の閲覧者の意図）は、閲覧のコンテキスト（本研究では「閲覧状態」とよぶ）に応じて異なると考えられる。このような時間的に変化する閲覧状態を適切に推定して、視線の解釈に利用する必要がある。

本論文では、Web ページやデジタルカタログといったデジタルコンテンツの閲覧状況を取り上げ、上述の課題を解決する階層的な閲覧行動モデルを構築した。まず、提示コンテンツの意図的・構造的なレイアウト（デザイン構造）を知識源として積極的に利用することで、視線運動の持つ「意味」を解釈する枠組みを提案した（図 1 Step 1）。この枠組みでは、視線運動は、コンテンツ上の要素間の空間的な配置関係や、「同一グループ内」といったようなデザイン構造上の意味的関係によって符号化される。視線計測実験を通して、提案する符号化法を用いることで、視線からの閲覧タスクの推定精度が向上することを確かめた。

次に、時間的に変化する閲覧状態を推定するために、隠れセミマルコフモデルに基づく閲覧行動モデルを提案した（図 1 Step 2）。提案モデルは教師データ無しでの学習が可能であり、閲覧状態の数や種類に関する事前知識がない状況でも、計測された視線データからボトムアップに閲覧状態を推定することができる。さらに、この提案モデルをもとに、閲覧者の興味を推定する手法を提案し、視線計測実験を通して手法の妥当性を評価した。

さらに、先行研究によって閲覧状態に関する事前知識がある程度得られている状況を想定し、上述の 2段階からなる閲覧行動のモデル化の枠組みに、事前知識を効率的に適用する手法を提案した。具体的には、「デジタルカタログを閲覧しながら商品を選んでいる」という選択行動の解析を扱い、提案手法により、選択行動中の意思決定過程の性質をよく表すような閲覧状態が推定できることを確認した。

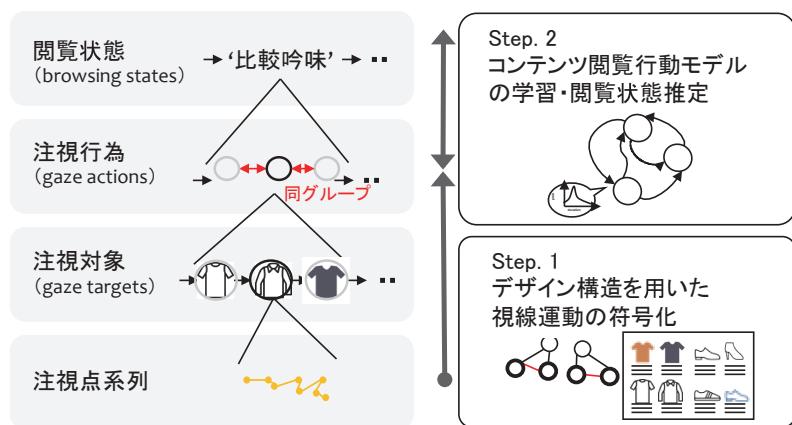


図 1 提案する視線解析手法の概要

趙 欧 (原田博司教授)

「Sum Rate Analysis and Dynamic Clustering for Multi-user MIMO Distributed Antenna Systems」

(マルチユーザ MIMO 分散アンテナシステムにおける総和レート及びダイナミッククラスタリングに関する研究)

平成 28 年 9 月 23 日授与

With the ever-growing demand for higher data rates in wireless communication services, recently, various techniques have been proposed to increase system capacity. Among these techniques, multiple-input multiple-output (MIMO) transmission has attracted considerable attention. It has been verified that, in an independent and identically distributed Rayleigh flat-fading channel, the MIMO capacity increases linearly with the smaller of the number of transmit and receive antennas. In practice, however, because of physical constraints, the number of antennas on a user cannot be made arbitrarily large that may prevent the realization of MIMO transmission.

Fortunately, using precoding techniques on a transmitter equipped with multiple centralized antennas, the required computational complexity and the number of antennas on each user can be reduced because multiple users can demodulate the signals without using any detection scheme while retaining the advantages of MIMO transmission. Because of these merits, the sum rate of the so-called multi-user (MU) MIMO transmission has been widely studied over some simple channel attenuation models. However, since it is hard to average the sum rate over the shadowing distribution and spatial correlations further complicates the distribution, the theoretical analysis on MU-MIMO sum rate over correlated composite fading channels has not been studied.

To bridge this gap, we concentrate on the sum rate distribution of MU-MIMO systems employing linear zero-forcing precoding, accounting for both Rayleigh fading and shadowing effects, as well as spatial correlation at the transmit and receiver sides. In particular, we consider the classical spatially correlated lognormal model and propose closed-form bounds on the distribution of the achievable sum rates in MU-MIMO systems. With the help of these bounds, we found that, for instance, the effect of spatially correlated shadowing can be considered to be independent when the inter-user distance is approximately five times the shadowing correlation distance.

On the basis of the above analysis results, a distributed antenna system (DAS) has been proposed to further decrease the access distance and spatial correlations. To verify the sum rate improvement in MU-MIMO DASs, we investigate and compare the characteristics of sum rates in both centralized antenna systems (CASs) and DASs under the effects of correlated composite fading channels and inter-cell interference. One of the computer simulation results indicates that the DAS can significantly improve the performance of the sum rate compared to the traditional CAS in the case under the consideration, therefore confirms the speculation.

Finally, combining MU-MIMO transmission and DAS with precoding techniques, the advantages of both MIMO and DAS can be achieved. However, by establishing a large-scale MU-MIMO DAS, such as, Fig. 1, to increase multiplexing gain, the use of a dynamic clustering scheme (CS) is necessary to reduce computation in precoding. In the last of our research, we propose a simple multi-carrier based method for dynamic clustering to establish a large-scale MU-MIMO DAS and investigate its performance. We also compare the characteristics of the proposal to those of other schemes such as exhaustive search, traditional location-based adaptive CS, and improved norm-based CS in terms of sum rate improvement. Additionally, we further introduce spatial correlation to the considered system. Computer simulation results indicate that the proposed CS provides better performance than the existing schemes and can achieve a sum rate close to that of exhaustive search but at a lower computational cost.

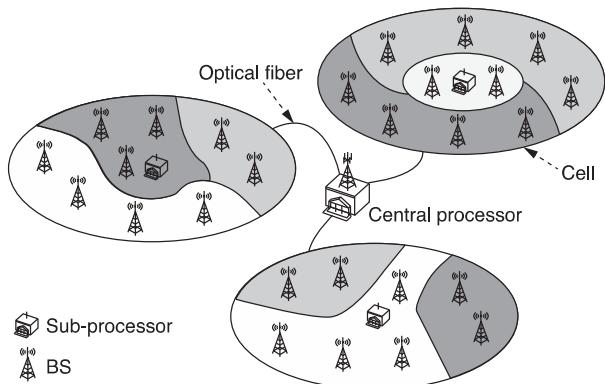


Fig. 1: An example of DAS with dynamic clustering.

福 園 隼 人 (守倉正博教授)

「Spatial Signal Processing on Distributed MIMO Systems」

(分散 MIMO システムにおける空間信号処理)

平成 28 年 9 月 23 日授与

近年、インターネットの爆発的な普及に伴い、モバイル端末によるデータトラフィックが著しく増加している。無線 LAN (local area network) は、MIMO (multiple-input multiple-output) システムに基づく空間信号処理技術を発展させこの増加に対応してきた。将来さらに増加するモバイル端末利用に対応するために、セルスループットの向上、エリヤスループットの向上、カバレッジエリアの拡大を行う必要がある (図 1)。本論文は、これらの課題を解決する次世代無線 LAN の確立に向け、分散 MIMO システムにおける空間信号処理に関する新規手法を提案し、その効果を理論解析、計算機シミュレーション、実伝搬実験など様々な側面から評価し議論している。本研究で得られた成果は以下の通りである。

1. セルスループットを向上させるインプリシットフィードバックを用いたマルチユーザ MIMO システムにおける上り CSI (channel state information) の高精度校正法 WCC (weighted-combining calibration) を提案した。WCC の特性評価を理論解析と計算機シミュレーションにより行い、測定器により構築したマルチユーザ MIMO-OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 伝送系による屋内の実伝搬実験で WCC の特性向上効果を確認した。
2. インプリシットフィードバックを用いたマルチユーザ MIMO-OFDM 伝送を行うリアルタイム試作装置を FPGA (field programmable gate array) を用いて開発し、その開発システムの詳細と実伝搬結果の提示を行った。WCC を用いることで動的環境においても安定したリアルタイムスループットが得られることを示した。
3. エリヤスループットを向上させるためのインプリシットフィードバックを用いた STMAP (simultaneous transmission from access points) システムを提案した。従来のエクスプレシットフィードバックを用いた STMAP システムと MAC (medium access control) スループットの比較を計算機シミュレーションにより行い、提案システムの優位性を示した。また、STMAP における送信ビーム形成に関わる式と評価指標となるサムレートの式を導出した。セル間干渉が発生する集合住宅で測定された通信路応答に基づくサムレート評価を行い、提案システムの実環境での有用性を示した。
4. カバレッジエリアを拡大させるための AF (amplify-and-forward) 協調リレーシステムにおける、Alamouti 符号および Golden 符号のための最尤復調器を提案した。検討システムの実効通信路利得に基づき、性能評価のための不稼働確率と平均誤り率を解析した。実際の無線 LAN のパラメータ条件下での提案復調器の計算量と誤り率特性の定量的評価を計算機シミュレーションにより示し、各復調器の適用領域と最適なリレー配置、電力割当量を明確化した。

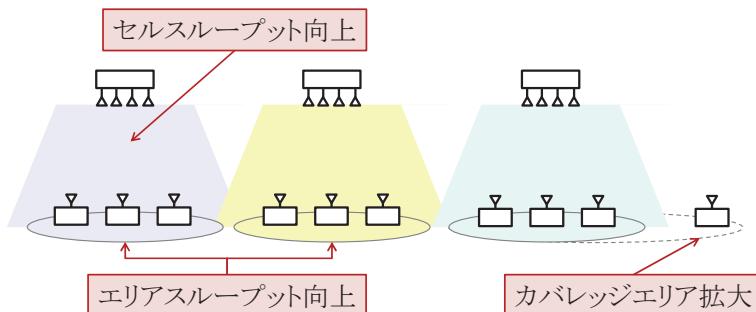


図 1. モバイル端末増加に伴う次世代無線 LAN の課題

橋本大志（佐藤亨教授）

「Robust adaptive beamforming for clutter rejection on atmospheric radars」

（大気レーダーのための適応的クラッター抑圧手法）

平成 28 年 9 月 23 日授与

現代の気象予測は観測により得られる初期値と地球大気の変動を再現する数値モデルによって成り立っている。予測の精度は初期値に大きく依存するため、高精度な予測を行うためには信頼性の高い初期値が必要となる。中でも大気レーダーによって得られる風速の推定値は重要な初期値の一つである。大気レーダーは屈折率変動に起因する非常に微弱な散乱波を観測する測器であるが、電波の性質上あらゆる方位から非所望散乱波（クラッター）が到来し、これらによる干渉を受ける。本論文ではこのクラッターを抑圧するため、複数の受信機をもつ大気レーダーにおける適応的信号処理法を提案した。主たる成果は以下の通りである。

1. 一般に中間圈における大気エコーは対流圈・成層圈に比べさらに微弱であり、流星エコーの混入を除去しなければドップラー風速推定は難しい。そこで中間圈観測にノルム拘束付き（NC-）方向拘束付き出力電力最小化（DCMP）法を適用して流星エコーを抑圧し、観測可能な高度範囲が流星の混入の無い場合の理論的な限界に近い値まで拡大することを示した。
2. 大気レーダーで観測されるのはメインビーム方向に投影された風速である。したがって特に微弱な鉛直風を測定する場合には、ビーム方向の誤差による水平風の漏れ込みが無視できない。そこでクラッター抑圧に必要な自由度を残して大部分をノンアダptiveに合成し、少数のサイドロープキャンセラからの出力をゲイン比に応じた重みを与えて合成するゲイン重み付き NC-DCMP 法を提案し、ビーム誤差を小さくできることを示した。また信楽の MU レーダーによる実観測では均等分割アレイとほぼ同等のクラッター抑圧度をより小さな SNR ロスで得られることを示した（図 1）。
3. NC-DCMP 法では事前に経験的に与えたノルム拘束値を用いるが、クラッターや所望波の強度比などにより適切でない場合がある。そこでクラッター抑圧度とノイズレベル上昇度を観測データから推定し、それらが均等に配分される最適なノルム拘束値を自動的に決定するパワーバランス（PB）法を提案した。数値実験においては、種々の所望信号及びクラッターの強度において NC-DCMP 法より高いクラッター抑圧度と DCMP 法より小さな SNR ロスを両立できることを示した。また南極大型大気レーダーによる実観測データへの適用例では、DCMP 法と同等のクラッター抑圧度をより小さな SNR ロスで得られるとともに（図 2）、NC-DCMP 法でクラッターが消え残る場合でも所望の抑圧度を得られることを示した（図 2 上）。

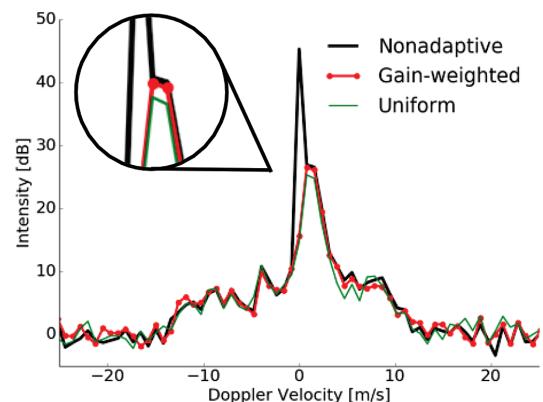


図 1：ゲイン重み付きアレイと均等分割アレイによるドップラースペクトラムの比較

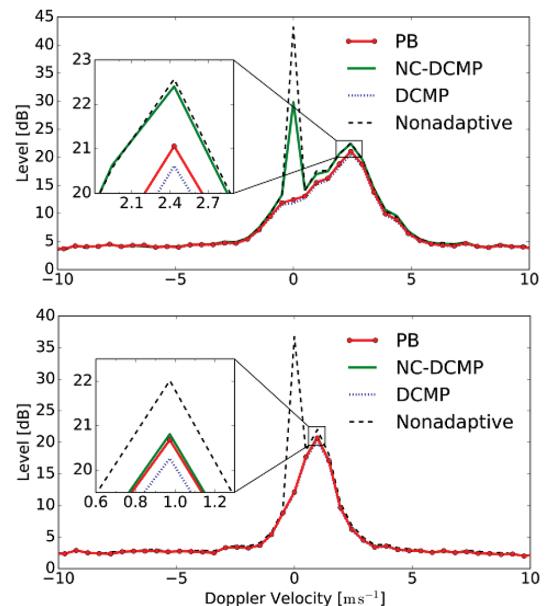


図 2: 南極大型大気レーダーへの適用例（上：クラッターが消え残る場合、下：容易に抑圧できる場合）

中 西 俊 博 (北野正雄教授)

「Coupled-resonator-based metamaterials emulating quantum systems」

(量子系を模擬する結合共振型メタマテリアル)

平成 28 年 1 月 25 日授与

メタマテリアルとは波長よりも小さい構造の集合体のこと、電磁波に対して媒質のように振る舞い、特異な電磁応答を実現できることから注目を集めている。本論文ではメタマテリアルを用いて量子系で起こる現象を人工的に模擬することを主な目的としている。本研究の成果は以下の通りである。

- 孤立原子系の時間発展を模擬する結合共振回路モデルを提案し、量子系を記述する基本方程式であるシュレディンガー方程式が共振器列で正確に表現できることを示した。スカラーポテンシャル中の量子波の波動伝搬だけでなく、ベクトルポテンシャル存在下の波動伝搬も回路モデルで表現し、トンネル効果やアハラノフ・ボーム効果を回路シミュレーションで実現した。
- 原子系で実現されている超光速光伝搬現象を回路で模擬する方法を考案し、入力パルスより出力パルスが先に観測される負群遅延効果を実証した。
- 原子系の電磁誘起透明化現象 (EIT 現象) を用いて実現されている光の低群速度化と光凍結をベースバンド信号で実現する回路モデルを提案し、対応する現象を観測した。また、光凍結に必要となる条件が回路モデルでも同様に導出されることを明らかにした。
- 電磁波と相互作用する 2 次位系や 3 次位系がメタマテリアルを用いて表現できることを明らかにし、共鳴吸収や EIT 現象を人工原子系で完全に模擬できることを示した。
- EIT 現象を制御することができるメタマテリアルを提案し、電磁波の保存と再生をメタマテリアル系で初めて実現した (図 1 参照)。実験はマイクロ波領域で行い、電磁波の位相情報をメタマテリアル中に保存されていることを実証した。
- 2 重共振型メタマテリアルという独自の発想に基づき、第 2 次高調波を高効率に生成するメタマテリアルを提案した。マイクロ波領域での実験で、従来法 (单一共振型メタマテリアル) の約 100 倍の第 2 次高調波発生を実現した (図 2 参照)。

以上の研究は、量子系の複雑な現象から本質を抽出して、古典系で同現象を実現しており、現象の理解と更なる発展を促進するという点で意義は大きい。また、通常の原子とは異なりメタマテリアルでは設計によって動作周波数をマイクロ波領域から光領域まで自由に設定できるという点で大きな利点がある。この性質により、本研究が対象にした低周波領域から、今後より高周波領域 (テラヘルツ、光領域) に発展していくことが期待される。

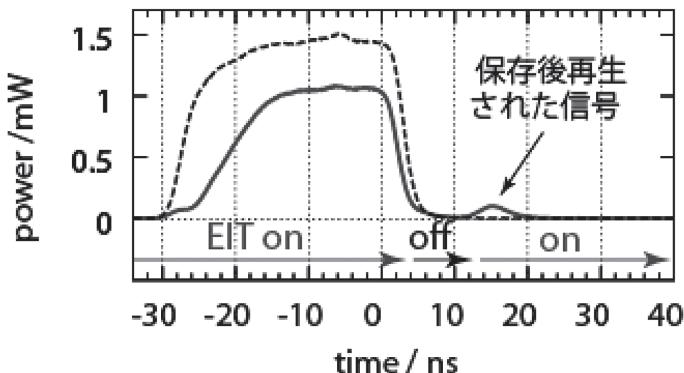


図 1 電磁波の保存と再生

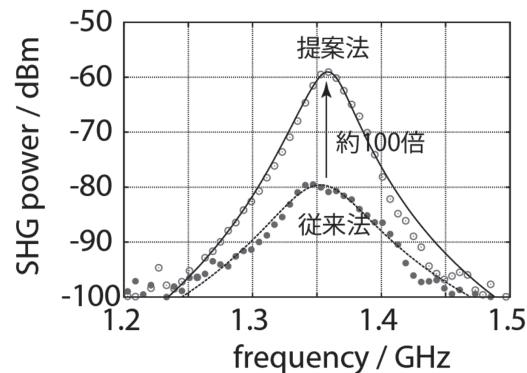


図 2 発生した第 2 次高調波強度

高校生のページ

レーザーの光で一億度を測る

大学院エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻
南 貴司、水内 亨

1. はじめに

高校生のみなさん。太陽は、どうして輝いているか知っていますか？太陽は核融合反応で輝いています。太陽を自由につくることができたなら、無限にエネルギーを生み出せるのではないか。”地上に太陽を輝かせよう”、核融合エネルギー研究は、この発想から始まりました。太陽は水素からできています。地上の太陽も水素を原料として、核融合エネルギーを生み出します。燃料の重水素は海水から作ることができますので核融合が実現できれば無尽蔵に海水からエネルギーを取り出すことができます [1]。太陽の中心温度は 1600 万度くらいあると言われており、核融合エネルギーを生み出すには高い温度が必要になります。実際に地上に太陽を輝かせてエネルギーを生成するには、太陽より高い温度、一億度まで水素を加熱する必要があります。この時、水素はイオン（原子核）と電子が電離して、”プラズマ”と呼ばれる状態になります。氷（固体）を加熱すると、水（液体）になり、さらに加熱すると水蒸気（気体）になります。気体を、さらに加熱した時に変化するのがプラズマなのです。こういってしまって、プラズマとは滅多に見られない特殊なもののように思えてしまいますが、実はプラズマは結構身近にあります。例えば照明として使われる蛍光灯の中にはプラズマが生成されています。北極圏や南極圏で見ることのできる美しいオーロラは太陽のプラズマが太陽風として地球に飛んできたものです。また、雷や炎の中にもプラズマは含まれています。このようにプラズマが生成されると、光を発するようになります。



図 1 北極圏のオーロラ

2. 核融合エネルギー生成のためプラズマを閉じ込める装置 ヘリオトロン J

核融合エネルギーを実現するためには、この一億度の水素のプラズマを自由に制御することができなくてはなりません。一億度ですから、どこかに閉じ込めておくことさえ難しいのです。そのために磁石の力を利用します。プラズマはイオンと電子が完全に分離している電荷、すなわちプラス、マイナスの電気を持った粒子の集まりです。一方、磁石は磁力線を作り出します。磁石の N 極と S 極の間に両極を結ぶように目には見えない磁力線が作られるのです。電荷を持った粒子は、この磁石が作りだす磁力線に、らせん状に巻きつくように運動します。つまり磁力線があればプラズマを構成する粒子の動きを制御することができるのです。

コイルに電気を流すと電磁石になることはみなさんご存知ですね。京都大学のヘリオトロン J (Heliotron J) 装置は、幾つかのコイルを組み合わせて磁力線を作り出しプラズマ粒子の動きを制御し

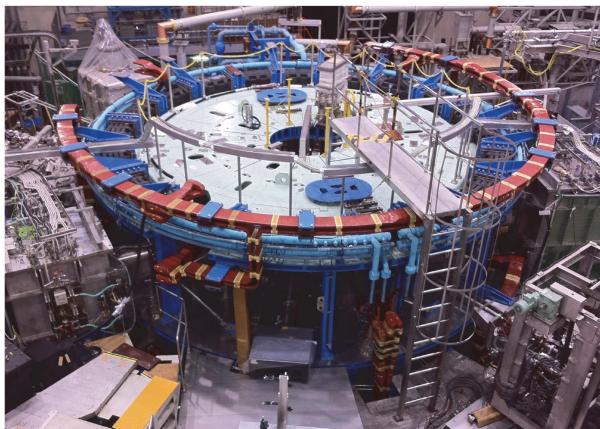


図2 ヘリオトロンJ装置

て閉じ込める実験装置です。つまり電磁石が生み出す磁力線の力で一億度のプラズマを閉じ込めることを目指した装置です。ヘリオトロンJ装置は、京都大学の研究者によって世界で初めて考えだされた「ヘリカル軸ヘリオトロン配位」と言う磁力線の集まり、磁場を生成して高温のプラズマを閉じ込める先進プラズマ実験装置です。図2の写真を見てください。これがヘリオトロンJ装置です。実はヘリオトロンJ装置がつくる磁場はドーナツ型をしています。プラズマが作られる真空容器の周りに様々な装置がくっついているので写真からはわかりにくいかもしれません、装置の上部

の中心に穴が空いていますね。そこから、装置がドーナツ型であることがわかるでしょう。

3. 一億度のプラズマの温度を測る

このような高温のプラズマの温度を測るにはどうすればよいでしょうか？普段よく使う棒状のガラス温度計なんかでは、もちろん計れません。高温のプラズマの温度を測るには、ドップラー効果という物理現象を利用します。例えば救急車が目の前を通り過ぎた時、近づいている時はサイレンの音が高く聞こえ遠ざかっている時は低く聞こえるという経験はありませんか。これはサイレンの音があなたの目の前で切り替わったのではなく、音を出している救急車が動いているために、発している音波の波の波長（波の山と山の間の距離）が詰められて高くなったり伸びさせて低くなったりしたために音の高さが変わったのです。これをドップラー効果と言います。もし救急車のスピードが、もっと速くなったら音はさらに高くなるでしょう。もちろん救急車が遠ざかっていたら、もっと音が低くなります。逆にどれだけ元の音より音が高くなったか、低くなったか、測ることができれば、救急車に乗らなくても救急車の走るスピードを測定することができます。

この原理を応用するのです。しかし音は使いません。実は、光も波なので、音波の代わりに光の波、光波を使うのです。オーロラを思い出して下さい。プラズマは光を出します。プラズマ中の粒子が発する光の波長は予めわかっていますので、この波長が縮んだか伸びたか測定することでドップラー効果を使ってプラズマ中の粒子のスピードを測定するのです。プラズマを構成する個々の粒子のスピードがわかれれば、そこからプラズマの温度を計算することができます。

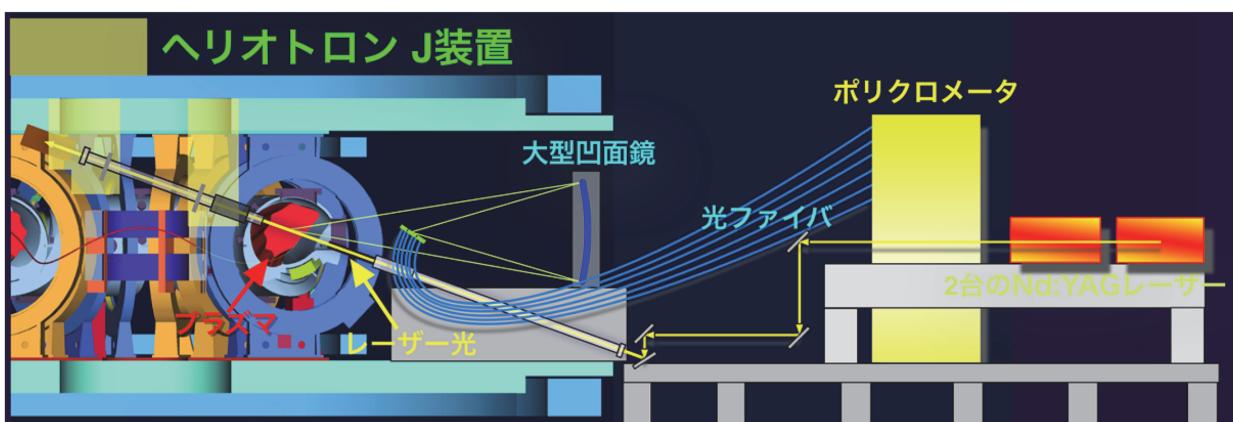


図3 ヘリオトロンJ装置のトムソン散乱計測装置

ところが実際に一億度のプラズマの温度を、この方法で測定しようとしますと、一つ大きな壁にぶち当たります。プラズマは光を発するのですが、何と一億度もの高温になってしまふとプラズマの発する光は弱まり、ほとんど光を出さなくなってしまうのです。これでは手も足も出ません。この問題を、どうやって解決すればいいのでしょうか。実はドップラー効果は、自ら光らなくても、やってきた光を反射しても同じように起こります。野球で、投手の投げたボールのスピードを測るのに使われるスピードガンも、マイクロ波をボールにあててドップラー効果を使ってスピードを測定しています。これと同じように光らないなら、外から光を打ち込んでプラズマ中の粒子を光らせてやればいいのです。打ち込む光として強力なレーザーを使います。高温のプラズマ中の電子により反射された（物理の用語では散乱といいます）光のドップラー効果を測定するのです。この方法をトムソン散乱計測法と言います。

4. ヘリオトロン J 装置のトムソン散乱計測装置

図3がヘリオトロンJ装置のNd:YAGトムソン散乱計測装置の全体図です。これでわかりにくいですから装置全体の原理図を図4に示しました。ヘリオトロンJ装置のトムソン散乱計測装置では、レーザーにNd:YAGレーザー（波長 $1.064\mu\text{m}$ ）を用いています。このレーザーの光は人間の目では見えない近赤外光と言われる光です。

まずヘリオトロンJ装置の中に作られているプラズマにレーザービームをレーザー伝送パイプを通じて下部から斜め上方向に向かって入射します。プラズマの電子によって散乱される光はとても弱いですから、大型反射天体望遠鏡でも使われている直径80cmの大型凹面鏡を使った集光ミラーで集めます。天体望遠鏡では集めた光を目で直接見ることができますが、Nd:YAGレーザーは近赤外光なので見えません。そこで光ファイバーを接眼レンズの位置に置いて、光をポリクロメータと呼ばれる分光器に導きます。分光器とはプリズムで太陽光を七色に分解するのと同じように、散乱された光の成分を分解し（分光と言います）ドップラー効果による波長の伸び縮みを測定することができます。図5の写真がヘリオトロンJ装置のトムソン散乱計測装置です。下の方にレーザー伝送パイプがありますが、この中をレーザーが伝わっていきます。プラズマが生成される真空容器は写真の左側にあります。そこに散乱光観測窓と言われる丸窓がついていますが、そこからプラズマの散乱光が出てきます。写真の右側にあるのが集光ミラー、直径80cmの大型凹面鏡です。接眼レンズの位置にある集光用光ファイバーは左側から上部につながっています。ポリクロメータによるドップラー効果の測定値はデータ収集装置によって自動的にコンピュータに取り込まれてプラズマの温度が計算できるようになっています。

ヘリオトロンJ装置の中に作られるプラズマは、とても高温ですが、一番温度の高い場所はプラズマの中心部分で、そこから外側に向かって温度が下がっていきます。そのため、プラズマの中心だけでなくプラズマ断面のいろいろな場所の温度を測定する必要があります。これには先ほどの凹面鏡により散乱光の像ができる位置に25本の光ファイバーを並べておくことで、プラズマ断面の端から端まで電子温度が計測できるようになっています。またプラズマの温度は急速に上昇したり下降したりします。残念ながら強力なレーザー光を常に出し続けることは、とても難しいことです。しかしNd:YAGレーザーは強力なレーザーを短い時間間隔で何度も出すことができます。そこでヘリオトロンJ装置では、0.02

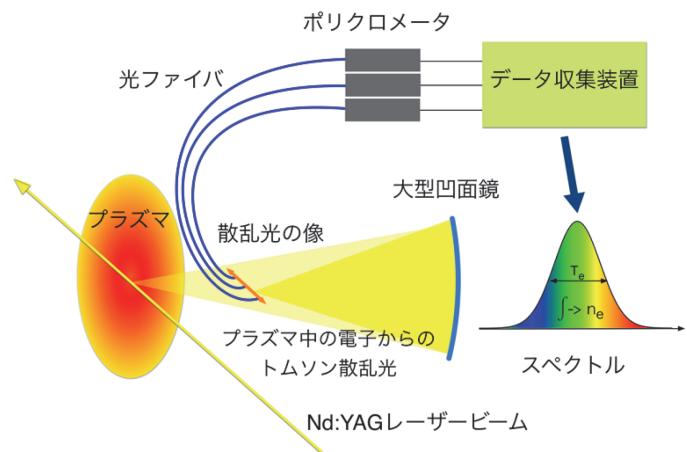


図4 トムソン散乱計測装置の原理図



図5 トム森散乱計測装置受光システム

秒間隔でレーザーを出せる Nd:YAG レーザーを二台用いて 0.01 秒の時間間隔でプラズマの電子温度を計測するようにしています。ヘリオトロン J 装置のプラズマ生成時間は約 0.2 秒であるため、1 放電あたり約 20 の時間点で計測することができます。プラズマ生成時間が短いのに驚かれたかもしれません。しかしプラズマの温度は、一瞬で上昇するので、これでも研究には十分長い時間なのです。

5. ヘリオトロン J 装置で実現された高温プラズマの閉じ込め

ヘリオトロン J 装置によって一億度のプラズマを実現するためには、プラズマのエネルギーをできるだけプラズマの中に閉じ込めて逃さないようにする必要があります。プラズマエネルギーが外に逃げなければ、加熱によってプラズマが得たエネルギーが、どんどんプラズマ中にたまってプラズマの温度は上昇し続けます。このプラズマエネルギーを閉じ込めて逃がさない能力を閉じ込め性能と言います。

これまで閉じ込め性能を通常の状態より向上させる特別な閉じ込め改善状態、すなわち閉じ込め特性改善モードと呼ばれる幾つかの状態が発見されプラズマの温度向上に役立ってきました。このような閉じ込め特性改善モードは、放電の途中で突然起こるものなどがあり 0.01 秒の時間間隔で、細かくプラズマの電子温度を計測できるヘリオトロン J 装置の Nd:YAG レザートム森散乱計測装置は、細かい時間点でプラズマの温度測定ができるので、このような現象をとらえるのに適しています。

図 6 はヘリオトロン J 装置において観測された、ある種の閉じ込め特性改善モードが起こった時のプラズマ断面全体の温度分布です。図は、断面の端から端までの電子温度の様子を示しています。プラズマ断面の外側で温度が低く中心に向かって高くなっているのがわかるとおもいます。ここでは、プラズマを加熱するためには電子レンジで使われているようなマイクロ波を使いますが、この実験はプラズマ

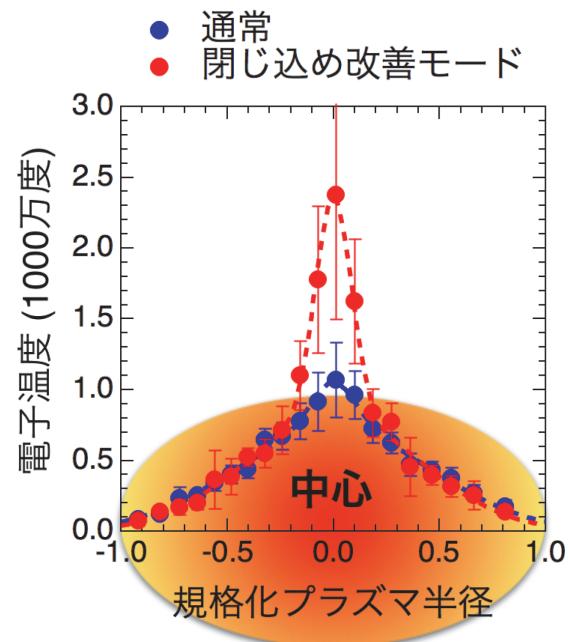


図6 トム森散乱計測装置で測った閉じ込め改善モードのプラズマの電子温度

中心部のみを正確にマイクロ波の一種である電子サイクロトロン波によって加熱しました。通常のプラズマの温度は青い点で示されています。プラズマ中心の温度は、約 1000 万度ですね。プラズマをうまく制御して、閉じ込め特性改善モードの状態になると、赤い点で示されているようにプラズマの中心部で電子温度が上昇し、通常の約 1000 万度の温度から約 2300 万度まで上昇しています。この温度上昇は中心部のみでプラズマの外側では温度上昇がみられていません。これは、ちょうどプラズマの温度が中心に向かって急上昇している境界でプラズマの閉じ込め性能が向上したため、エネルギーの外への流れがせき止められ、それより内側の領域で温度が上昇したのです。このような現象を専門的には”内部輸送障壁”が形成されたと言います。輸送とはプラズマエネルギーの流れのことです。つまりプラズマ内部にエネルギーの流れをくい止める障壁ができたので、プラズマ中心の温度が、どんどんあがったのです。ヘリオトロン J 装置のプラズマ中に、さらに強固な障壁を形成することができれば、プラズマの温度を、もっと上げることができるでしょう。

6. 最後に

このようにヘリオトロン J 装置によって太陽の中心と同じ高温のプラズマを生成することができます。しかし残念ながら地上で十分な核融合エネルギーを生み出すには一億度の温度が必要です。まだ多くの解決すべき課題がありますが 21 世紀半ばの夢の核融合エネルギー実用化を目指して研究を続けていきます。

参考文献

- [1] 松岡啓介、岸本泰明、他 SUPER サイエンス「人類の未来を変える核融合エネルギー」(核融合 フォーラム編)

学生の声

研究者として留学するということ

工学研究科 電気工学専攻 大村研究室 博士後期課程2年 久保田 結子

私は修士課程より京都大学のスーパーコンピュータを用いて地球近傍を取り巻く放射線帯電子の急激な変動について研究してきました。シミュレーション解析を行う中、本当の宇宙空間の状態を示す精査されたものでない『生データ』を見て自分の構築した仮想空間が本当に適切なのか確認したいという欲求が生まれました。そこで私は『京都大学大学院工学研究科馬詰彰奨学寄附金』の支援を賜り、放射線帯探索衛星 Van Allen Probes のプラズマ波動観測装置の主任研究者 Craig Kletzing 先生のいらっしゃるアメリカ・アイオワ大学 (University of Iowa) に4ヶ月間、海外研修を受けに参りました。

留学中は、初めて用いるデータ解析ソフトの使い方、仮想空間と違う『宇宙』の見方を教えて頂き、お昼を研究室のみなさんと食べに行ったり、ミーティングに参加させてもらったりと多くの人と英語で深く関わりを持つ機会に恵まれました。私はこれを、自由な学生という立場でなく一つの研究テーマを持った研究者として留学したからこそ得られた機会だったと思っています。

留学を考えていらっしゃる後輩の皆様には、どうか『英語を勉強する』以外の確固たる理由を持って海外に行ってほしいと思います。そうすればその理由がトピックとなり、共通の興味を持ったネイティブの学生や先生方と会話を交わすことができるからです。

最後にこのような貴重な機会をお与え下さった Craig Kletzing 先生、大村先生、馬詰彰奨学寄附金関係者の皆様にこの場をお借りして御礼申し上げます。

博士課程の魅力 —ひとりぼっちドクター撲滅を目指して—

情報学研究科 通信情報システム専攻 小野寺研究室 博士後期課程1年 塩 見 準

私の研究室では数年前まで博士課程の先輩が4,5人ほどいらっしゃったのだが、気づくと私が研究室で唯一の博士課程の学生（ひとりぼっちドクター）になってしまった。修士で就職する人と比べると、博士の人は3年も遅れて社会に出ることとなる。そのため進学には相当の覚悟が必要であり、進学を躊躇するのも当然だと思う。ぜひ博士仲間が増えたらなあと日々思うのだが、そのためにも私が感じる博士課程の魅力についてこの場を借りて宣伝させていただこうと思う。私が思う博士課程の魅力は沢山あるが、そのうちの一部分を紹介する。

まず、私が思う最大の魅力は、研究活動の自由度の高さである。博士課程では、1) 自分が重要と思う（興味のある）社会問題を考え、2) 自分なりのアイディアを提案し、3) 問題を解決する、という一つの物語を自分の納得のいくように完成させる場が与えられる。特に2番のアイディアの出し方は完全に自由であり、既存の技術を上手く組み合わせて新しい技術を作り上げるのも自由だし、突拍子もない予想斜め上の技術を提案するのも自由である。自分が思いつくアイディアは、残念ながらたいていの場合使えないか車輪の再発明である。しかしめげずに考え続けているとごく希に、（程度は小さいかもしれないが）過去に誰も思いつかなかったアイディアを思いつくことがあり、その瞬間が個人的に進学して最も楽しいと思う瞬間である。

もう一つの魅力は、世界をリードする研究者と議論できる点である。博士課程に進むと卒業のために（国際）学会に参加し自身の研究内容を議論することが必須となる。学会には世界をリードする研究者が参加している。自分が日々まじめに考えた研究成果に関してその方々と議論し、フィードバックがいただけるということは非常に光栄なことであり、また同時に評価されることはうれしく思う瞬間である。

博士課程へ進むことは相当の勇気が必要であるが、一歩踏み込むと自由で充実した世界が広がっている。今後、日本全国でひとりぼっちドクターが撲滅され、博士課程の学生でわいわい賑わうことを願っている。

教室通信

学生の多様性

電気電子工学科長 守 倉 正 博

平成 28 年度より 2 年間、電気電子工学科長を務めることになりました。最近の学部学生入学に関する多様性に関して 3 点ほど申し上げます。

(1) 特色入試

本制度は平成 28 年度入試より導入し、実施されました。特色入試では特に「授業科目の一環として実施した課題研究や科学に関する課外活動において顕著な実績を上げた者」が重要であり、実績の証拠として賞状等のコピー提出が求められます。昨今の大学入学者は模擬試験の偏差値により、より精密かつ詳細に分類され、医学部を頂点とする各学部、学科へと進路指導が行われているように思われます。その結果、学部学生との面談で学業に馴染めないケースが散見されます。電気電子工学科に興味を持って入学してきたとは限らず、入学前の成績で本人の適性とは関係なく進路を決めた結果が顕在化しているように思われます。

特色入試では、高い基礎学力についてはセンター試験の合格得点が 80% を越えた者で保証し、物理・化学や数学等の課外活動で顕著な業績をあげた者を対象とするため、大学に入学後自分の興味や適性と合わせドロップアウトしていく学生を減らし、逆に学生実験等で特色入試により合格した学生がリーダーシップを持って引っ張っていくことが期待されます。

(2) 最先端科学の体験型学習講座（エルキャス Experienced-based Learning Course for Advanced Science）

当学科では、優秀な高校生に電気電子工学への興味を持ってもらうため、これまでスーパーサイエンスハイスクール指定校や教員からの紹介を通じて高校との交流を図ってきました。今年度は従来からの方法を見直し、全学的な高大連携事業（エルキャス）に参加するため、企画広報委員会を中心に議論を重ね、平成 29 年度からエルキャスに参加することになりました。エルキャスは、特色入試と対をなす京都大学の高大連携事業の 2 本柱です。学内の組織としては理学研究科、薬学研究科、工学研究科、農学研究科、情報学研究科、総合生存学館、地球環境学堂、産官学連携本部が協力部局として参加しています。

実施形態としては、京都大学に月 2 回（原則として毎月第 1、第 3 土曜日）通い、講義を受け、研究室に配属され実験等を行います。指導には教員に加え、大学院生が直接指導を行います。

エルキャスを受講できる高校生は、全国の 12 の教育委員会（関西各府県、東京、徳島）からの推薦枠と一般公募枠の 2 形態により約 130 名が募集されます。プログラムは 1 年目の「基盤コース」（約 130 名）と 2 年目の「専修コース」（約 30 名）からなり、「基盤コース」前期では講義を受講し、後期になると 7 ~ 9 人ずつのチームで各分野（研究室）に配属されます。電気電子工学科では、平成 29 年度から「基盤コース」後期を担当し、電気電子工学に興味を持つ優れた高校生を育成する予定です。

(3) 女子学生

工学部としては女子学生の入学者を増加すべく、毎年 8 月のオープンキャンパスでも力を入れていますが、なかなか増加しない状況です。電気電子工学科の最近 3 年間の女子学生数の推移は次の通りです。平成 26 年度（4 名）、平成 27 年度（10 名）、平成 28 年度（7 名）。当学科の定員 130 名に対して 10% を越えることはありません。性能追求型の研究開発も重要ですが、様々な技術を組み合わせた製品やサービスを研究開発するという点も重要です。これらの製品やサービスの購入者の少なくとも半数は女性です。電気電子工学科が生み出す新しい製品やサービスに女性の感性が重要となっている反面、当学科での女子学生比率が 10% 未満である現状から、何らかの方策が必要だと感じています。この問題は産業界の取り組みも重要なのは言うまでもありません。

以上、主に学部入学生の多様化に向けた学科の取り組みについてご紹介致しました。皆様方には、引き続きより一層のご支援とご教示をお願いします。

編集後記

昨年来、「まさか」と思うことが数多く起きています。イギリスがEUを離脱するなんてまさか思わなかっただし、アメリカの大統領に不動産王が就任するなんてまさか思わなかっただでしょう。人工知能が「まさか」という事象に対応するために、どのような機械学習をさせるのかは研究者として興味深いところです。また大学の役割としては、このような予測できない未来に対応できる人材を供給することが重要です。それには、学生・教員のダイバーシティを進めることが一つの方針ではないかと思います。

[I. K. 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
口一ム株式会社
(アイウエオ順)

発行日：平成29年3月

編集：電気系教室 cue 編集委員会
大村 善治、白石 誠司、石原 亨、
掛谷 一弘、吉谷 栄光、村田 英一、
龍頭 啓充、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

