

## cue 33号 目次

### 巻頭言

Big Data 時代

…………… 昭和 48 年卒 株式会社日立システムズパワーサービス 取締役社長 森田 隆士…………… 1

### 大学の研究・動向

制御技術を支える工学としての制御理論

……………工学研究科 電気工学専攻 システム基礎論講座 自動制御工学分野…………… 3

### 産業界の技術動向

日本の未来を拓く ICT

……………東日本電信電話株式会社常務取締役 加賀谷 卓…………… 10

### 新設研究室紹介……………

15

### 研究室紹介……………

16

### 博士論文概要……………

34

### 高校生のページ

大気を測るレーダー

……………生存圏研究所 レーダー大気圏科学分野 山本 衛…………… 58

### 学生の声

「オールラウンドな人」

……………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 3 年 釜江 典裕…………… 62

「納豆を四百回練る」

……………工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学講座 博士後期課程 3 年 神原 仁志…………… 62

### 教室通信

就職・採用活動時期の変更

……………工学研究科 電気工学専攻長 和田 修己…………… 63

### 賛助会員の声

「村田製作所チアリーディング部」の開発に携わって

……………村田製作所 プロセス技術開発 2 部開発 3 課 北河 満…………… 64

### 編集後記……………

67



## 巻頭言

## Big Data 時代

昭和 48 年卒業 株式会社日立システムズパワーサービス 取締役社長 森田 隆 士



賢者は歴史に学び、愚者は経験に学ぶと良く言われるが、経験にも学ぶ点があると信じているので、自ら長らく関与してきた情報通信事業の端々で実感した事を書いてみたい。

私が理科系を志したのは、中学生時代と記憶している。ケプラーの伝記を読んでからである。ご案内の通り、彼は観測に観測を重ねて詳細な情報を留めて、そこから惑星の軌道を描こうとしていた。彼は自然の調和の美しさを信条としていたが、観測結果は決して調和の取れた美しい円運動を示さなかった。何度何度も観測をやり直したが、美しい円運動でない結果を得るばかりであった。彼は終に自らの信条を捨てて、得た情報の観測結果を受け入れたと言う伝記だったと記憶している。最後には、事実と認めた事柄に従う科学者の心・姿勢とはそのようなものか、そして正確な情報収集こそ事実判断の大きな要素とも感動した。

その後、情報通信事業に生業をえるようになった。ところで、この「情報」とは何であろうか？人によっては「情けのある報」等といわれるが、広辞苑には「あることがらについてのしらせ。判断を下したり行動を起こしたりするために必要な、種々の媒体を介しての知識。」とある。一方、英語では「Information」を使う業界が多い。例えば情報通信技術を一般的には Information Communication Technology と呼ぶ。しかし、英語では「Data」も情報である。先のケプラーの観測結果は Data である。そして円運動ではないとの結論は、ある意味 Information である。更には軍事面含めて「Intelligence」も使う。この場合の分かりやすい使い方として、先ず事実を Data として収集し、その中からある視点で意味を持つ情報集団の Information として具現化して実態を掴んでいく、更にある目的の為に分析・解析して Intelligence とする。米国の中央情報局 CIA (Central Intelligence Agency) は、国家戦略の為に分析レポートしている事からも Intelligence が使われると推測する。

20 世紀の大半において、国家戦略面・軍事面を除けば、情報通信産業での情報とは Data 或いは Information である。概念として Intelligence は余り確固たるポジションではなく、Information の意味も含まれていたとも言える。その場合 Data 収集も、やみくもではなく Information 化を想定しながら収集するのが通例であった。目星を付けて収集するとか、意味有る Data を如何に効率的に収集するかに力点が置かれていた。5W 的、即ち如何なる・何時の・何処の等々の Data 収集を的確にする技術・技能を競ってきた時もある。

20 世紀末から、分野によっては Intelligence の概念を明確に意識しながら情報を捉えることとなった。同時に Data 収集も革新的変化を遂げていくこととなる。一つ一つはそれ自体「あまり意味のない情報」であっても、何十万何百万と集めると Information として仕立て上げ Intelligence に辿りつき、「今後の戦略立案の欠かせない高度な情報」となる可能性が有るのである。

例えば、未だ Big Data という言葉が一般的でなかった 10 年近く前からの研究によると、センサーが収集した人間（行動）の膨大な Data を分析・学習による解析を進めていくと、従来は個人の自由意志あ

るいは感情任せの結果としか捉えられていない幾つかの行動も法則性が見出せ方程式として表現が可能なレベルになると、矢野和男博士他から報告されている。既に高度な Intelligence に辿り着いている。

情報通信分野で、敢えて日本が取り組むべき Big Data 関連を一つ追加すると、情報セキュリティ分野である。膨大な Data を取扱い高度な Intelligence を導くに当たって、そのセキュリティをどうやって担保するのも課題である。Data の収集方法含めてプライバシー・セキュリティの両面でのコンセンサスを得る事も必要な課題であるが、セキュリティ担保自体にも Big Data 解析が重要である。ウイルスを見つけてワクチンで対応するといったプロセスだけでなく、膨大な Data (システム系・人間系・環境系等) を集めて、システムの振る舞い・人間の行動・環境の変化等から何が起きているのかを多方面の学問を駆使して解析する事も求められる。

Big Data 解析を具現化するには、半導体等の材料工学の進歩と相まって、コンピュータ処理能力向上・メモリーの高密度化・ネットワークの高速高度化・学習能力のある人工知能の発展等の技術の進歩がなくして成り立たない。そして情報関連の工学の他、数学・統計力学・熱力学・エネルギー工学・心理学・哲学等の学問を多角的多面的に駆使して解析が行われる必要がある。20 世紀末から急速に拡大している Big Data の動きが要求しているのも総合的なアプローチなのである。

京都大学がこの分野でも世界をリードし、多角的多面的な高度な学問を総合して京都大学から「産業界においても情報技術 (IT) とは Intelligence Technology である。」と発信される事を期待してやまない。

## 制御技術を支える工学としての制御理論

電気工学専攻 システム基礎論講座 自動制御工学分野

教授 萩原 朋道

准教授 蛭原 義雄

助教 細江 陽平

### 1 はじめに

#### 1.1 フィードバック制御について

産業革命に多大な寄与を果したジェームズ・ワットがガバナ（調速機）を導入して回転機器の速度制御に大きな成功を取めて以来、制御技術は産業界の至るところで、設備、機器等のシステム運用技術として大きな役割を果たしてきました。とくにフィードバック制御技術は、システムの有する動特性に伴う制約下で、そのシステムの振舞いに関して所望の性能を達成するための運用方策を与えるという役割を担っています。ここで、システムの動特性とは、各時刻におけるシステムの振舞いが、その瞬間においてなされている操作のみで決まるのではなく、過去の操作の影響も引き継いだ形で決まるという性質のことを表しています。このことを言い換えると、システムに対する操作はなんらかの歪んだ形ではじめて影響を及ぼし、その結果がシステムの振舞いに反映されるまでにはある種の時間的な遅れを伴うという性質であることとらえることもできます。こういった歪みや遅れを考慮せず瞬時瞬時における振舞いのみから近視眼的に判断して行う制御方策では、性能を高めようとして積極的な操作を行うにつれてむしろ制御系の不安定化を容易に來たしうるものとなります。ですので、動特性の存在は、すでに述べた通り、フィードバック制御を難しくする制約となっていることとらえることができるわけです。

モータに印加する電圧と回転速度の関係や、抵抗  $R$  とキャパシタ  $C$  からなる積分回路における入力電圧と出力電圧の関係がそういった性質の端的な例であることからわかるように、動特性を有する機器類は世の中に遍在していて、それらが複雑に組み合わせられて構成されるシステムは、さらに複雑な動特性を示すこととなります。そのため、適切なフィードバックを施して最適な運用を成し遂げ、最大限の性能を引き出したりエネルギーやコストを極力抑えたりすることは、決して易しいことではありません。フィードバック制御によりそういったことを達成することが期待されるシステムがますます複雑になる中、合理的な方法でこの難点を解決することの重要性は従来にも増して高まっています。

#### 1.2 自動制御工学分野萩原研究室での研究の基本的方向性

上述の難しさには様々な要因が考えられますが、フィードバック制御が使われる様々な現場において共通の大きな要因として、システムの動特性に関する情報として不確実なものしか得られないことや、外界からの擾乱（外乱と呼びます）が観測不能で未知であるということがあげられます。フィードバック制御においては、そういった要因の影響を極力低減してなおかつ高い性能を達成すること（ロバスト制御と呼ばれます）が求められているわけです。制御理論は、上記のような状況を一例として、現実的な難しさの要因を可能な限り一般的にとらえることを通して、制御方策をできるだけ一般的な形として与えるための理論的基盤をなすものです。もう少し具体的には、難しさの要因に関する特徴をうまくと

らえるための視点をどうとるべきかが鍵となりますが、そのような点に関する検討そのものも含めて、個別のシステムというよりもそのような視点ごとに、それが関わる多くの状況において難しさを克服しうる方法を一般論として提供することを目指すのが制御理論であるということになります。さらに具体的にいえば、システムの動特性やそれがおかれる環境、ならびに制御目的、さらには許容される制御装置のクラスなどに関する数学的記述が与えられたときに、合理的な制御装置の設計法を提示することを目指した理論であるということになります。

フィードバック制御あるいはその技術の歴史は制御理論の歴史と切り離せないもので、理論的基盤の研究は、個別の具体的な制御対象の制御における重要なフィードバック制御技術を提供する一方で、十分に満足な性能を達成することが難しい個別の制御対象や制御仕様に対してできるだけその本質をとらえた合理的な理論的解決策を提供すべく発展してきました。萩原研究室では、そのような理論基盤をさらに発展させるための研究に軸足をおくことで、フィードバック制御に関する様々な分野での進歩発展に資することを目指した研究を進めていますが、同時に、得られた理論的成果を可能であれば実験室レベルでの制御対象に適用してその効果を実証するなどの研究もあわせて行っています。上述の制御理論の立場から明らかなように、産業界を含む多くの具体的な制御対象に見られる特徴に沿った分類のなかで、研究テーマごとにある程度限定的な範囲の制御対象を扱うこととなりますが、個別の具体的な状況などに過度に特化した扱いは避け、一般的なフィードバック制御系の解析や設計を数理的な問題と捉えることが基本的な議論の出発点となります。そのため、以下で紹介する個別テーマの詳細について踏み込んで述べたとしますと、それは極めて数学的色彩の濃いものとなってきますが、そのような形の紹介は本冊子の目的にそぐわないと考えられます。そのため、研究成果の結論を必ずしも具体的につかんでいただける記述になっておらず、どういった観点から現れる理論的課題にどういった方針で取り組んでいるのかの一端をごく表面的にご紹介するにすぎないケースも少なくないかもしれません。詳細については参考文献などを適宜ご参照いただくことで何卒ご容赦いただけますと幸いです。

## 2 研究概要の簡単な紹介

### 2.1 サンプル値制御系に関する研究

今日至るところで使われている制御系は、ごく単純なものを除けばほとんどがデジタル機器を利用しています。しかしそれは、実装面におけるデジタル機器のメリットが主たる理由であって、制御方策としてはあえて制約を課したことになっている点、とくにそのことが制御性能に及ぼす影響について十分に考慮されていないことも少なくありません。おおざっぱに言えば、サンプリング周期が $h$ であるデジタル制御系においては、それが対象とする連続時間信号の $h$ ごとの値にしか着目しないという意識でのみ利用されているといえます。このこと自体はもちろん、デジタル機器を利用する以上、制御系の動作上の話としては必然であるのですが、制御性能を最大限に引き出すためにどのような設計が可能であるのかといった本質を意識した問題に取り組む上では、十分な視点とはいえません。とくに、正確なモデル化の難しい制御対象、おかれる環境による特性変動の大きな制御対象、顕著な外乱にさらされる制御対象などに対して高度の制御性能を達成する上では、サンプリング時刻間での応答（サンプル点間応答といいます）がどのような挙動を示すかについて正確に解析し、その振舞いに関する性能までも含めた形での適切な設計を行うことが重要になります。そのような意味でサンプル点間応答に着目するとき、デジタル機器が見ている時間 $h$ ごとの信号は、背景にある連続時間信号のあくまでもサンプル値にすぎず、より本質はもとの連続時間信号そのものであるという（本来は当然ながらも軽んじられている）視点に行き着くため、このような立場での研究はサンプル値制御系の研究と呼ばれます。

本研究室では、サンプル点間応答を厳密に考慮した制御のための理論の構築を行っています。そのために高速リフティングと呼ばれる手法を導入し、制御系の振舞いを厳密に記述した上で正確な解析や設

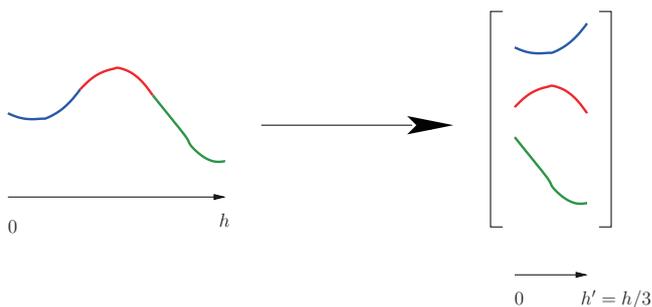


図1：サンプル点間応答の高速リフティングによる取り扱い

計を可能とするような様々な問題に取り組んでいます [1, 2, 3]。そこでは、信号を関数空間上でとらえ、それが動特性を有するシステムの中でどのように時間遷移していくかを作用素として表現するといった数学的（関数解析的）アプローチをとっています。基本的に、高速リフティングではサンプリング周期  $h$  の間の信号を（サンプリングに相当する両端の値のみでなく）全体としてそのまま厳密に扱う際に、 $N$  個のより細かい区間での信号の集まりととらえてベクトル的に表現します（図1は  $N = 3$  の場合）。このような表現上の変換においては信号の情報を一切失いませんが、より細かい区間での信号の集まりとしてとらえていることが鍵となり、その信号の振舞いを定める（動特性を有する）システム側については、解析や設計に関する都合に合わせて適切な方法を構築した上で近似的に扱っても、（ある程度大きな  $N$  のもと）制御系の漸近的に厳密な（あるいは近似誤差の影響を厳密に評価しうる）解析と設計が可能となるといったからくりを構築しているのだ、といった雰囲気をご理解いただければ幸いです。

## 2.2 むだ時間制御系に関する研究

信号の伝搬遅延を内部に有するシステムは数多く存在し、それはしばしば制御系の性能を劣化させる要因となります。そのような遅延のことを制御分野ではむだ時間と呼んでいます。本研究室ではそのようなむだ時間制御系に関する研究を行っています [4, 5]。このような制御系に関する微分差分方程式と呼ばれる表現法と図2(a) のような有限次元系  $F$  とむだ時間要素  $H$  からなるフィードバック系  $\Sigma$  との関係性を明らかにする研究や、この  $\Sigma$  の動特性に関する時間遷移が、 $F$  の内部状態  $x(t)$  と  $H$  の内部状態  $u(t)$  のセットがむだ時間の長さ  $h$  ごとに図2(b) における青のものから赤のもののように離散時間的に遷移することにより生じるととらえることによる、新たな視点での研究などです。これらの研究でもむだ時間要素  $H$  の中の信号を厳密に取り扱うことが重要となり、関数解析などの数学的枠組みを活用しています。

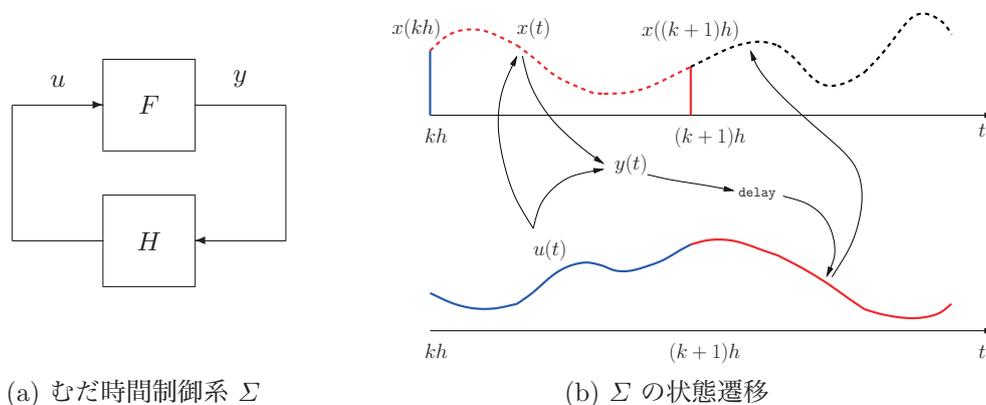


図2：むだ時間制御系  $\Sigma$  とその状態遷移

## 2.3 凸最適化に基づく制御理論研究と非負システム解析・設計への展開

半正定値計画 (Semidefinite Programming, SDP)、線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality, LMI) や線形計画 (Linear Programming, LP) といった凸最適化を用いた制御系の解析・設計手法の開発に関する研究を軸に、近年は非負システムの制御理論の構築に向けた研究を展開しています。

### 2.3.1 凸最適化に基づく制御理論研究

現代制御理論においては、制御対象のダイナミクスを微分方程式 (状態方程式) で (近似的に) 表現することでモデル化し、このモデルに基づいて制御系の解析や設計が行われます。しかしながら、実際の制御対象のダイナミクスとモデルとの間に誤差 (ずれ) が生じることは不可避であり、そのようなモデル化誤差の存在のもとでモデルに基づいて設計された制御器が実際の制御対象に対してどの程度の性能を発揮できるかを事前に見積もることは極めて重要です。モデル化誤差の要因が制御対象の物理パラメータの不確かさである場合、制御系のロバスト性能を解析する問題はパラメータの不確かさ (変動) に応じた無限個の線形行列不等式を制約条件とする最適化問題 (半無限計画問題) として定式化されます。この数学的に厳密な取り扱いが難しい制御系のロバスト性能解析問題に対して、本研究室では凸解析、LMI および双対理論に基づいた独創的な研究を展開しています [6]。さらに設計する制御器に、過去の履歴に関する特別な周期時変メモリ構造を持たせることで、高いロバスト性能を有する制御器を SDP を用いて極めて効率的に設計できることなどを明らかにしています [7]。図 3 の青点は、不確かな 2 つの物理パラメータを有する不安定な離散時間システムに対して、周期 2 の周期時変メモリ型制御器を設計することでロバスト安定化を達成した際の (適切な意味での) 閉ループ極を示しています。パラメータの変動に応じて変動する極がすべて赤線で表される単位円内に留まっており、ロバスト安定化が達成されていることを確認できます。なお、極の変動を図示するために、図 3 を描く上ではパラメータ空間をグリiddingしていますが、開発した制御器設計手法はそのようなグリiddingを必要としない (パラメータの変動を一括して取り扱える) ものとなっています。

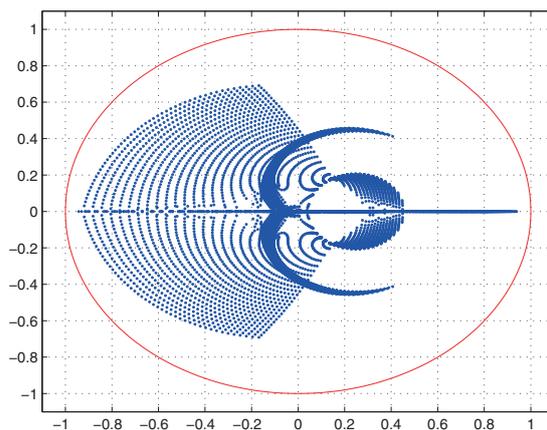


図 3 : 不確かな離散時間システムのロバスト安定化

### 2.3.2 非負システム解析・設計への展開

非負システムとは、非負の入力と非負の初期状態に対して、状態と出力が常に非負となる動的システムです。このような非負性は資源、エネルギー、製品、化学物質といった“負の値を取り得ない物理量のやりとり”を表すダイナミクスにおいて普遍的に現れるものであり、非負システム理論は経済学や社会システム工学、生物学といった多彩な分野で重要な研究対象となっています。また、積分器や一次遅れ系、およびそれらの (正の係数による) 直列結合、並列結合で表されるシステムはすべて非負システムです。もちろん積分器や一次遅れ系のダイナミクスは極めて単純ですが、これらが多数結合することで構成される大規模システムの挙動は複雑であり、マルチエージェントシステムに関連する分野で十分に研究深い研究対象となっています。

本研究室では、非負システムの制御理論の基盤を確立することを目的として、とくに凸最適化に基づいた解析・設計手法の開発に力を注いでいます。重要な研究成果として、非負システムの安定性や  $H_\infty$

性能を特徴づける種々の LMI 条件を導出しています [8, 9]. さらに非負システムのシステムゲインとして重みつき  $L_1$  誘導ノルムに注目し、安定な線形非負システムの重みつき  $L_1$  誘導ノルムの計算を LP に帰着できること、また重みつき  $L_1$  誘導ノルムが大規模結合線形非負システムの安定性やパーシステンス性を解析する上で重要な役割を果たすことを明らかにしています [10]。大規模結合非負システムのパーシステンス性に関する結果は、マルチエージェントシステムのフォーメーション制御 (図 4 参照) といった実問題に適用することが可能であり、さらには資源の動的有効配分や自動車群の車頭時間制御、電力システムの需給制御といった多様な問題への応用も期待できる将来性の高いものとなっています。

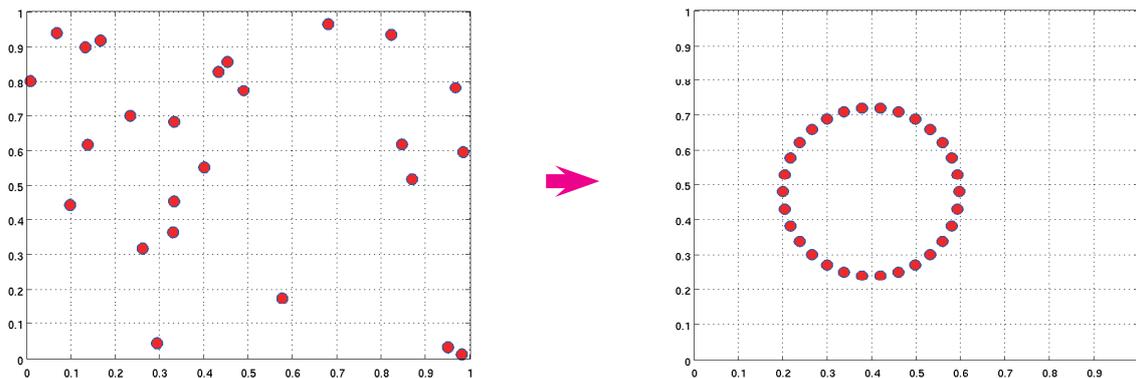


図 4: マルチエージェント非負システムのフォーメーション制御

#### 2.4 非因果的周期時変スケーリングに基づくロバスト制御

現実の制御対象に制御理論を適用する際、まずはその対象のモデルを求めるのが一般的です。しかし、実対象は物理パラメータに関する不正確さや非線形性等の取り扱いの厄介な要因を含んでおり、そのような側面を含めて厳密なモデル化を行うことは事実上、不可能です。したがって、あらかじめ現実の制御対象とそのモデルの間にずれが生じてよいような不確かさを想定し、その取り扱いのもとで制御系を設計することが制御の実用上重要になります。本研究は、そのような不確かさを含む系に対して安定性等の保証を与えるためのロバスト制御技術に関するものです。

ロバスト制御の分野では、しばしば図 5 のような不確かさを含まない系  $G$  (ノミナル系と呼ばれる) と不確かさ  $\Delta$  からなる閉ループ系を考えます。そして、想定している範囲の中で不確かさがどのような値をとったとしても、上記の閉ループ系が所望の仕様を満たすかを判定することをロバスト性解析、またそのような仕様を満たされるよう (ノミナル系  $G$  が内包する) 制御器を設計することをロバスト制御器設計と呼びます。本研究室では、これら解析・設計のための基礎理論として非因果的周期時変スケーリング [1, 11] と呼ぶアプローチを提案しています。このアプローチは、リフティングと呼ばれる時間的な操作を介して導入され、図 5 の閉ループ系のロバスト性を判定する上での基礎技術であるスケーリングにおいて、ある範囲で因果性を無視した仮想的なスケーリング要素を用いるものです。リフティングを介すことにより、より広いクラスのスケーリングを活用することができ、その結果としてリフティングを介さない従来のスケーリングに比して精度が高い解析や、性能が高い制御器の設計が可能となります。非因果的周期時変スケーリングの有効性は、理論的な側面からは文献 [12] 等において、また実用上は文献 [13] 等において示されています。今後同研究をさらに発展させることにより、さまざまな場面において、よ

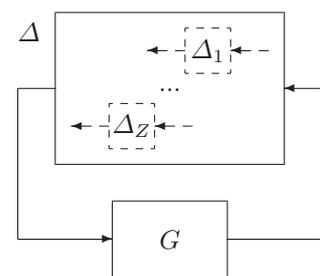


図 5: ノミナル系  $G$  と不確かさ  $\Delta$  からなる閉ループ系

ある範囲で因果性を無視した仮想的なスケーリング要素を用いるものです。リフティングを介すことにより、より広いクラスのスケーリングを活用することができ、その結果としてリフティングを介さない従来のスケーリングに比して精度が高い解析や、性能が高い制御器の設計が可能となります。非因果的周期時変スケーリングの有効性は、理論的な側面からは文献 [12] 等において、また実用上は文献 [13] 等において示されています。今後同研究をさらに発展させることにより、さまざまな場面において、よ

り広いクラスのロバスト制御問題に対処可能になると期待されます。

## 2.5 確率的なダイナミクスを有する系のロバスト制御

本研究は、いわゆる確率系のロバスト制御に関するものです。制御対象がシンプルな構造を有していれば、多くの場合、十分にその特徴を反映させる形で確定系としてモデル化することができます。一方、複雑なダイナミクスを有していたり、本質的にランダム性を排除できない対象を扱う場合には、確定系によるモデル化ではその特徴を十分に表現できないおそれがあります（モデルにおけるそのような情報の欠落は最終的には設計される制御系の性能劣化につながります）。したがって、上記の複雑な対象を扱う場合には、確率的な現象も系の構造の一部とみなした上で、確率的なダイナミクスを有する系としてモデル化することが望まれます。

モデルとして確率系を扱う場合、確定系と同様に、モデル化誤差が生じることは避けられません。とくに、上記確率系においてはその背後にあるランダム性も系の構造とみなすことから、それ自体にもモデル化誤差が生じうると考えるのが自然です。本研究は、このモデル化誤差を不確かさとみなし、それに対処するためのロバスト制御技術を確立することを目的としています。また、その議論においては新たに導入する確率的ポリトープという概念がキーとなります。確率的ポリトープは、端点がランダム行列（行列を値にとる確率変数）で与えられるポリトープとして定義されます（図6参照）。確率的ポリトープに属する点はすべて端点行列の凸結合として与えられるので、この性質を活用すれば、端点に関する条件判定のみによってそれらすべての点を尽くした解析あるいは設計が行える可能性があります（これは不確かな確率系のロバスト制御につながります）。本研究室ではこの課題に関して基礎理論の構築から取り組んでおり、一定の成果 [14, 15] を得ています。

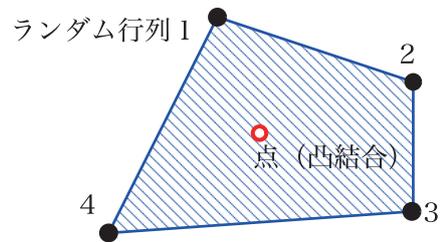


図6：確率的ポリトープの概念図（端点数4の例）

## 3 おわりに

萩原研究室での研究概要についてごく簡単なながらも紹介させていただきました。皆様のご理解とご支援をたまわれますと幸いです。今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。

## 参考文献

- [1] 萩原朋道：（解説記事）サンプル値制御とデジタル制御の新展開—高速リフティングと非因果的周期時変スケーリングを中心として—，計測と制御，第52巻，第4号，pp. 316–322（2013）。
- [2] T. Hagiwara and K. Okada: Modified Fast-Sample/Fast-Hold Approximation and  $\gamma$ -Independent  $H_\infty$ -Discretisation for General Sampled-Data Systems by Fast-Lifting, *International Journal of Control*, Vol. 82, No. 9, pp. 1762–1771（2009）。
- [3] J. H. Kim and T. Hagiwara: Computing the  $L_\infty [0, h)$ -Induced Norm of a Compression Operator via Fast-Lifting, *Systems & Control Letters*, Vol. 67, pp. 1–8（2014）。
- [4] 萩原朋道：（解説記事）むだ時間系の表現モデルと初期値問題，システム／制御／情報，第58巻，第9号，pp. 378–383（2014）。
- [5] T. Hagiwara and K. Hirata: Fast-Lifting Approach to the Computation of the Spectrum of Retarded Time-Delay Systems, *European Journal of Control*, Vol. 17, No. 2, pp. 162–171（2011）。
- [6] Y. Ebihara, Y. Onishi and T. Hagiwara: Robust Performance Analysis of Uncertain LTI Systems:

- Dual LMI Approach and Verifications for Exactness, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Special Issue on Positive Polynomials in Control, Vol. 54, No. 5, pp. 938–951 (2009).
- [7] J. F. Tréguët, D. Peaucelle, D. Arzelier and Y. Ebihara: Periodic Memory State-feedback Controller: New Formulation, Analysis and Design Results, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 58, No. 8, pp. 1986–2000 (2013).
- [8] 松村大気, 蛭原義雄, 萩原朋道: LMI を用いた離散時間非負システムの安定性と  $H_\infty$  性能解析, システム制御情報学会論文誌, 第 26 巻, 第 1 号, pp. 45–51 (2013).
- [9] Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: LMI Approach to Linear Positive System Analysis and Synthesis, *Systems & Control Letters*, Vol. 63, No. 1, pp. 50–56 (2014).
- [10] 松村大気, 蛭原義雄, 萩原朋道: 重み付き  $l_1$  誘導ノルムを用いた離散時間結合非負システムの安定性解析, システム制御情報学会論文誌, 第 26 巻, 第 10 号, pp. 355–364 (2013).
- [11] T. Hagiwara and Y. Ohara: Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Robust Stability Analysis of Discrete-Time Systems: Frequency-Dependent Scaling Induced by Static Separators, *Automatica*, Vol. 46, No. 1, pp. 167–173 (2010).
- [12] Y. Hosoe and T. Hagiwara: Unified Treatment of Robust Stability Conditions for Discrete-Time Systems through an Infinite Matrix Framework, *Automatica*, Vol. 49, No. 5, pp. 1488–1493 (2013).
- [13] 片山啓, 細江陽平, 萩原朋道: 台車型倒立振子制御実験による非因果的周期時変スケーリングに基づくロバスト性能設計の有効性検証, システム制御情報学会論文誌, 第 26 巻, 第 5 号, pp. 165–173 (2013).
- [14] Y. Hosoe and T. Hagiwara: Robust Stability Analysis of Discrete-Time Linear Systems Characterized by Stochastic Polytopes, Proc. 2014 American Control Conference, pp. 4973–4978 (2014).
- [15] Y. Hosoe and T. Hagiwara: State Feedback Synthesis for Robust Stabilization of Discrete-Time Linear Systems Characterized by Stochastic Polytopes, Proc. 13th European Control Conference, pp. 612–617 (2014).

## 産業界の技術動向

# 日本の未来を拓く ICT

東日本電信電話株式会社  
常務取締役 加賀谷 卓

## 1. はじめに

日本における ICT は、1990 年代後半からの携帯電話の普及及び 2000 年代からのブロードバンドインターネット接続サービスの本格普及を契機として急速に国民生活や企業活動に浸透し、現在ではスマートフォンへのシフトやクラウド事業への拡大など、更なる成長と変化を続けている。こうした背景には、飛躍的な技術の進化とそれに伴う利用料金の低廉化が挙げられ、ICT は今後も企業のビジネスモデルや個人のライフスタイルなど様々な分野において変革をもたらすことを期待されている。

こうした急速な変化に伴い、通信事業者の役割も変わってきている。過去の電気通信の時代においては、人と人をつなぐことが重要であったため、すぐつながる、いつでもつながることを主眼に活動してきた。しかしながら、最近では人と情報をつなぐことが役割として加わり、大量の情報を高速にかつ安全にお客さまに届けることが重要になった。これからは、さらに ICT の提供により、さまざまな分野・業界の価値を高める役割を果たしていくことが求められる（図 1）。<sup>[1]</sup>

また、政府としても ICT の活用を成長戦略の柱と位置づけており、特に 2020 年を一つのマイルストーンとして取組を強化している。その背景として 2020 年に開催が予定されている東京オリンピック・パラリンピックがあり、国内のみならず、海外からも多くの観光客が訪れることが見込まれることから、日本の ICT 技術や文化等を海外に発信する大きな機会になることも期待されている。<sup>[2]</sup>

本稿では、2020 年までにさまざまな業界とコラボレーションすることにより実現される新たなサービスの事例をいくつか挙げるとともに、それらのサービスを下支えするための NTT グループのチャレンジについて述べる。

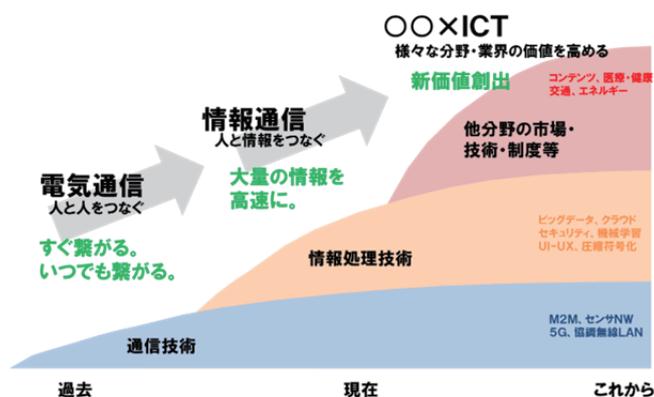


図 1 ICT の進展と NTT グループの役割 <sup>[1]</sup>

## 2. スマートライフ & ワーク 2020 <sup>[3]</sup>

上述のとおり、2020 年に東京オリンピック・パラリンピックが開催されるが、2020 年に関するいくつかの予測を図 2 に示す。GDP は中国や新興国が力をつけ、中央にある日本は小さい円になっている。

これは、オリンピック・パラリンピック開催が決定する前のさまざまな研究機関の予測である。このビッグイベントを機に、日本の円がもう少し大きくなることを目指していきたい。また、日本は世界に先駆けて高齢化社会を迎える。世界のインターネットの接続端末数は300億～500億、現在の10倍になると予測されている。こうしたさまざまな変化が、今後、ビジネスにどのような影響を及ぼしていくのだろうか。

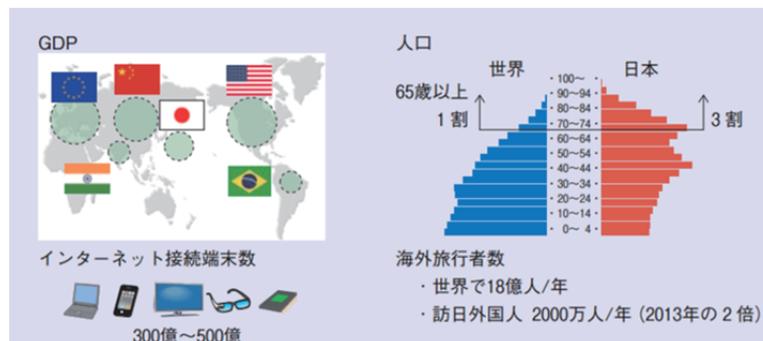


図2 2020年の社会動向予測<sup>[3]</sup>

2020年の世界では、さまざまなサービスがクラウドをベースに成り立っている(図3)。そして、ヒトとモノと情報が結び合い、連携し合うことで、新しいサービスやビジネスモデルが生まれることが想定される。例えば交通について、バス、地下鉄、飛行機、およびタクシー業界のクラウドが連携していくことで高度なITS(Intelligent Transport Systems:高度道路交通システム)を実現することができる。このように様々なモノや情報がクラウド上で連携することによって新しい世界が拓けるが、交通とほかの業界が結びついた場合の例を次に紹介する。

#### ■観光サービス「ナビ×翻訳」

交通と観光、ナビ、翻訳、これらの技術が結びついた場合のサービスを紹介する。駅を目印をスマートフォンで撮影し、次に行きたい場所、例えば観光雑誌等の写真を撮る。初期登録した言語で駅から観光地までを案内するだけでなく、その際に観光スポットやレストラン等の情報も併せて提供されるサービスなどが可能になるであろう。最近のニュースによると、駅の案内板は多言語にするように、というガイドラインを政府が定めている。ひょっとすると何か国語も載っているような大きな看板が用意されるかもしれないが、スマートフォンを使えば多言語看板は不要になり、撮影するだけで様々な言語で案内を行うことが可能になる(図4)。



図3 スマートライフ & ワーク 2020<sup>[3]</sup>



図4 観光サービス「ナビ×翻訳」のイメージ

## ■エンタテインメント「映像×スポーツ」

次に、スポーツと映像が結びついたエンタテインメントの世界のサービスを紹介する。サッカーや野球において、選手の視線で見る、監督・コーチの目線で見る、天井からプレーを見る、個々の選手のデータを合わせて見る。このようなことが、スマートフォンやタブレットで可能になる。すでに米国では本サービスの実験が行われ、商用化も多少進んでいる。これまで「通信と放送の融合」という言い方がされていたが、スタジアム、またはチーム・球団と放送事業者のコラボレーションと考えれば、また違った展開があるかもしれない。

このように、さまざまなサービスが結びつくことで新しいサービスが生まれる可能性がある。これまで考えたことのないような組み合わせ、コラボレーションが今後起こることを想像すると、非常に楽しい世界が描け、その中で日本型のビジネスモデルができるのではないだろうか。

### 3. 2020 年に向けた NTT グループのチャレンジ<sup>[3]</sup>

前章では、コラボレーションによる新しいビジネスモデルの創出の可能性について紹介してきた。もちろん、NTT グループも新しいマーケットへ自ら参画するプレイヤーとして、また、新しいマーケットを切り拓くバリューパートナーとして、チャレンジを続けていく。ここからは 2020 年に向けて、通信キャリアとしての NTT のチャレンジを 2 つ紹介する。

## ■ネットワーク制御

いろいろな予測があるが、2020 年には現在の数十倍の情報が、NTT グループやその他のプレイヤーのネットワークを通っていくことになる。ちなみに、ブリティッシュテレコムによると、北京オリンピックの会場周辺のトラフィックと、その 4 年後のロンドンオリンピックの会場周辺のトラフィックを比較すると 7 倍に増えたとのことである。それがリオデジャネイロでどの程度になるか。さらにその 4 年後の東京ではどの程度になるか。単純に 7 倍が続くならば、 $7 \times 7 = 49$  倍の情報量になる。増大するトラフィックをどうコントロールするか。これが NTT グループの第一のチャレンジであり、以下に関連技術を紹介する。

#### (1) 映像の視聴品質の最適化<sup>[4]</sup>

従来、ニコニコ動画をはじめとする映像配信サービスでは、配信レートが高い高品質映像の提供中にネットワークが混雑すると、データ伝送が映像再生に追いつかず映像が停止するという現象を引き起こしていた。映像再生の停止は、サービス利用者の体感品質 (QoE) を大きく低下させてしまう。

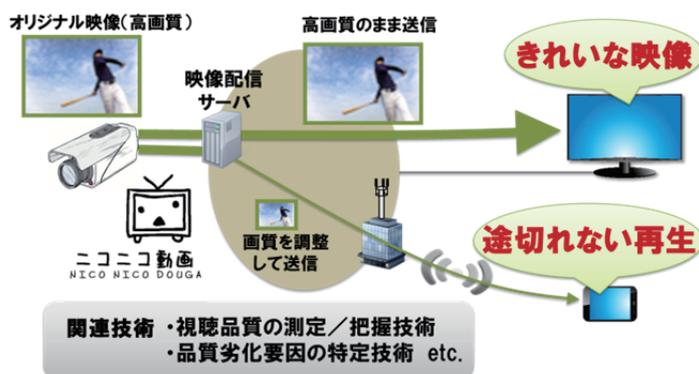


図5 映像の視聴品質の最適化

このため、NTT ではネットワークの状態とサービス利用者の QoE との関係性を解明し、視聴者が実際に感じる映像の満足度を客観的な数値として推定・最適化可能な「視聴品質最適化技術」を確立した(図5)。

本技術を用いて、サービス利用者の環境やネットワークの混雑状況に応じて、最適な配信レートなどをレコメンドする品質 API のプロトタイプを開発するとともに、ドワンゴでは本 API に接続することで、動画サービス「niconico」における体感品質の最適化を可能とするアプリを開発した。今後、2014 年中に、「niconico」において開発した品質 API 対応アプリを利用し、一般ユーザを対象とした実証実験を行い、配信方法レコメンドの効果検証を進めていく。

## (2) プロアクティブな広域トラフィックコントロール

広域トラフィックコントロールは、ネットワーク帯域を融通し、全体トラフィックをコントロールする技術である

(図6)。例えば、企業のクラウドのデータセンターが札幌にあるとする。イベントの期間中は大変なトラフィック集中が予想される。このようなときに札幌のデータセンターが輻輳してクラウドサービス全体に悪影響を及ぼす前に、輻輳を事前に予測し、プロアクティブな対応で、福岡のバックアップデータセンターで分散処理を自動的に行う。このような広域トラフィックコントロール技術も、2020 年までには間違いなく必要であると考えている。

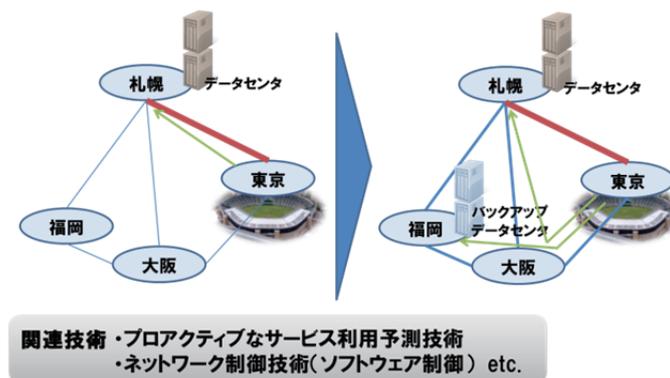


図6 広域トラフィックコントロール +<sup>[3]</sup>

## ■セキュリティ・インテグレーション

2012年のロンドン五輪においては、公式ホームページを襲ったアタックの回数が2億1000万回にのぼった。ブリティッシュテレコムはそれらが無事凌いだが、2020年はずっと巧妙なアタックが行われると想定せざるを得ない。スマートシティにしても、金融機関にしても、ほとんどのサービスがクラウド化される世界では、社会的なリスクも大きなものとなる。さまざまなネットワーク、クラウドの弱点を、アタッカーが襲ってくることを想定し、そういった社会的リスクの増加にどう対処していくか。これも私ども NTT グループの大きなチャレンジの1つである。

巧妙化するアタックに対しては、世界最先端の技術開発を行って防ぐ(図7)。NTT コミュニケーションズでは、すでにグローバルでセキュリティオペレーションの連携をしているが、海外の通信キャリアや IT ベンダも含めて、オペレーションの連携も必要になる。オペレーションのコラボレーションといっても良いだろう。今後クラウド間連携が進んでいくと、NTT グループだけでセキュリティ対策を完全に行うことは不可能である。そこで、さまざまなプレイヤー、必要に応じて同業他社ともオペレーション連携を行うことによって、巧妙化するアタックを防御していく必要がある。



図7 セキュリティ・インテグレーション<sup>[3]</sup>

#### 4. おわりに<sup>[3]</sup>

コラボレーションする力の大きな源は、パートナーどうしの信頼関係である。NTTグループでは、一昨年まで使用していた Total という言葉を Trusted Solutions に変え、「Next Value Partner for Transformation by Trusted Solutions」をスローガンとして掲げることにした。NTTグループは、これまでの単純なプロバイダとしての企業グループではなく、さまざまな企業や業界とコラボレーションをして、新しいビジネスモデルをつくるお手伝いをする。そういった意味での対企業向けのビジネスに軸足を移していきたい。

#### 参考文献

- [1] 篠原 弘道：Co-Innovation への挑戦、NTT 技術ジャーナル、2014.4、pp.12-21
- [2] 総務省：平成 26 年度版 情報通信白書
- [3] 鶴浦 博夫：加速するイノベーションとコラボレーション、NTT 技術ジャーナル、2014.4、pp.4-10
- [4] Focus on the News、NTT 技術ジャーナル、2014.5、pp.49-50

## 新設研究室紹介

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野（竹内研究室）

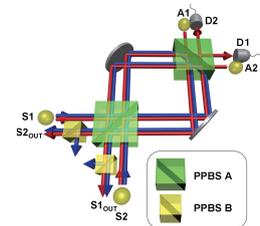
<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「光子を操る－光子を用いた量子情報科学の研究」

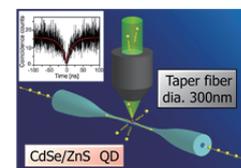
本研究室は、2014年3月1日に教授の竹内が、10月1日に助教の岡本が、北海道大学電子科学研究所より着任した新研究室です。光子や電子などの「量子」は、古典的な粒子とは全く異なる振る舞いをします。それらの量子状態を完全に制御し、従来のコンピュータでは莫大な時間を要する問題を解く「量子コンピュータ」や、従来法の限界を超える「量子計測」などの実現が期待されています。本研究室では、光子を用いた量子情報科学に関する研究を推進しています。共同研究も広く募集いたしております。下記の内容にご興味をお持ち頂けましたら、ぜひ一度、お立ち寄り頂けましたら幸いです。



**1. 光量子情報** 光量子コンピュータ・光量子シミュレータの実現を目指す研究です。これまでに、光子と光子の間の「量子干渉」を駆使した世界最大級の光量子回路「量子もつれフィルター [1]」や、単一光子レベルの非線形素子を組み合わせた量子計算の基本ゲートを実現 [2] するなど、光量子回路の研究を推進しています。最近、SiN 導波路を用いた、オンチップ集積光量子回路の研究も開始しました。



**2. ナノフォトニクス** ナノテクノロジーを駆使したデバイスにより、半導体量子ドットやダイヤモンドの単一発光体（人工原子）から、光子を自在に出し入れすることを目指しています。特に、光ファイバの一部を、直径が光の波長以下（300nm）にまで引き延ばした「テーパー光ファイバ」を実現 [3]、研究を進めています。このデバイスを用いる事で、対物レンズや大型顕微鏡などを使わずに、単一発光体からの発光を効率良く単一モード光ファイバに結合できるため [4]、生命科学への応用も期待されます。これまでに、ダイヤモンド中の窒素欠陥を用いた最も明るい単一光子源の実現などに成功 [5]、将来的には光量子メモリなどのデバイスの実現を目指しています。



**3. 光量子計測** 光は、重力波干渉計から生体計測まで、非常に多く用いられています。光子ひとつを操った「量子光」を用いることで、これらの計測の感度や分解能を飛躍的に高める研究を進めています。これまでに、4光子の経路に関する量子もつれ状態を用いた高精度多光子量子干渉を実現、従来光よりも高い位相測定感度を実現可能であることを示しました [6]。この研究は、2007年度サイエンティフィックアメリカン誌の世界ベスト 50 研究にも選ばれました。また最近、量子もつれ光子対を光源とする微分干渉顕微鏡「量子もつれ顕微鏡」を世界で初めて提案・実現、従来の光の限界を超えた感度を実証しました [7]。最近、超広帯域周波数量子もつれ状態の生成 [8] とその量子光コヒーレンストモグラフィ（量子 OCT）への応用 [9] の研究も推進しています。

[1] R. Okamoto, et. al., **Science**, **323**, 483-485, (2009). [2] R. Okamoto, et. al., **PNAS**, **108**, 10067 (2011).

[3] M. Fujiwara, et. al., **Optics Exp.**, **19**, 8596, (2011). [4] M. Fujiwara et. al., **Nano Lett.**, **11**, 4362 (2011).

[5] T. Schröder, et. al., **Opt. Exp.**, **20**, 10490 (2012). [6] T. Nagata, et. al., **Science**, **316**, 726, (2007).

[7] T. Ono, et. al., **Nat. Commun.**, **4**, 2426 (2013). [8] A. Tanaka, et. al., **Opt. Exp.**, **20**, 25228 (2012).

[9] M. Okano, et. al., **Phys. Rev. A**, **88**, 043845 (2013).

## 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自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

電子物理学講座極微真空電子工学分野 (白石研)

電子物理学講座プラズマ物性工学分野 (竹内研) \*

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

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 (高岡研)

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 (高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

##### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (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 (佐野研)

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研) #

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (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)

#### 学術情報メディアセンター

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)

## 生体医工学講座 複合システム論分野（土居研究室）

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

### 「エネルギー局在現象の制御と応用」

エネルギー局在現象とは、エネルギーが空間的に狭い範囲に集中した状態が安定に保たれる現象であり、自然界に普遍的に存在すると言われている。エネルギー局在現象は、連続な媒質においては、ソリトンやブリーザーとして知られている。一方、非線形結合振動子のような離散的な媒質においては、連続媒質の場合との現象論的類似性から、離散ソリトン（DS: Discrete Soliton）や離散ブリーザー（DB: Discrete Breather）と呼ばれる事が多い。より一般的には、非線形局在振動（ILM: Intrinsic Localized Mode）または空間局在モードと呼ばれる。

非線形結合振動子は、例えば結晶格子における分子の振動や生体細胞の活動電位を記述するためによく用いられるモデルであり、適用される物理系は多岐にわたる。非線形結合振動子における ILM は、1980 年代の後半から主に理論的側面から活発に研究され始め、1990 年代末以降では実験的研究も増えてきている。それらの研究の結果、様々な種類の非線形結合振動子において ILM の存在が確かめられており、また、様々な物理現象への ILM の関与が明らかにされつつある。近年では、本研究室も含めたいくつかのグループで、応用に向けた研究も開始されており、今後、様々な分野へ ILM の研究が広がっていくものと考えられる。

本研究室では、非線形結合振動子における ILM の力学的性質を明らかにしようという研究を基礎として、ILM の応用についても研究を行っている。基礎研究としては、ILM の力学的安定性や分岐、移動メカニズムについて研究を行っている。図 1 に ILM の例を示す。図において、質点は自身の変位にのみ依存する力と、隣り合う質点の変位との差に依存する力によって振動する。それらの力が変位に対して非線形に変化する場合、ある条件下で図 1 に示すような ILM が生じる。図では 4 番目の質点が大振幅で振動しているにもかかわらず、その振動が他の質点へは伝わっていないことが分かる。これまでの研究により、ILM の空間的対称性と安定性の関係や、移動のメカニズムを明らかにしており、それらの特性を利用した ILM の操作方法や制御手法などを提案している。

実験的な研究としては、板バネと磁石を用いて非線形振動子を製作し、ILM の励起実験や操作実験などを行っている。図 2 にその非線形振動子の模式図を示す。板バネは強磁性体のものを用いているため、電磁石の作る磁界に依存した非線形特性を復元力に持つ。それらの非線形振動子は結合弦により線形結合されており、全体は電磁アクチュエータにより加振される。図 3 は ILM の操作実験の結果である。一定の加振振幅・周波数の下で、電磁石の電流を操作し、ILM を  $n = 5$  から  $n = 4$  へ移動させることに成功している。

応用研究としては、上述の操作・制御手法に加え、パラメトリック励振による移動型 ILM の生成や、パラメータギャップをもつ結合振動子における移動型 ILM の整流などを行っている。パラメトリック励振では、安定な ILM がパラメトリック共振により不安定化し、不規則に移動することを確認しており、この現象を利用した一定速度の移動型 ILM を生成する手法について研究を進めている。また、結合振動子にパラメータギャップ、すなわち異なる 2 種の結合振動子が接合されている場合、移動型 ILM の反射・透過が移動方向に対して非対称に生じる。この特性を利用して、移動型 ILM の整流を行い、運動エネルギーの流れの制御へつなげる研究を行っている。

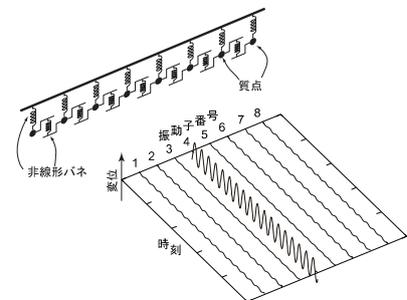


図 1 ILM の例。

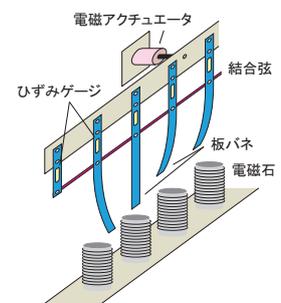


図 2 電磁機械系。

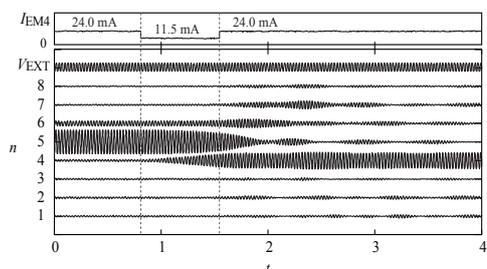


図 3 ILM の操作実験。V<sub>EXT</sub> はアクチュエータの印加電圧、I<sub>EM4</sub> は 4 番目の電磁石を流れる電流。

## 生体医工学講座 生体機能工学分野（小林研究室）

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

### 「光ポンピング原子磁気センサを用いた MR 信号の直接計測に向けて」

当研究室では、生体計測、中でも、生体磁気計測を中心とした脳機能イメージングを主要なテーマとしている。この生体磁気計測や脳機能イメージングでは、pT 以下の極微弱な磁気信号を計測する必要がある。我々の研究室では、このような微弱磁気信号の計測に向けて超高感度な磁気センサである光ポンピング原子磁気センサ (optically pumped atomic magnetometer : OPAM) の研究を進めている。OPAM は、光ポンピングにより生成されたアルカリ金属原子の電子スピン偏極の磁気光学効果を用いて微弱磁気信号を計測する。また、OPAM は光ポンピングのポンプ光方向のバイアス磁場により共鳴周波数を変更することができるため、特定の周波数の信号を計測したい場合には、バイアス磁場を調整する必要がある。

一方、生体イメージング法の 1 つに磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging : MRI) があり、一般的には 1T 以上の高磁場を用いて生体の解剖画像や機能画像が収集されている。しかしながら、金属インプラントを使用している患者への適用が困難などの理由から、低磁場・超低磁場 MRI にも注目が集まっている。超低磁場 MRI では、低周波数の微弱な磁気信号を計測する必要があるが、高磁場 MRI で一般的に使用されているピックアップコイルでは計測が困難であるため、前述の OPAM の MR 信号計測への応用が検討されている。超低磁場 MRI において OPAM を用いて MR 信号を直接計測するには MRI の静磁場中において、OPAM のバイアス磁場を MR 信号の共鳴周波数に一致させる必要がある。

我々の研究室では、モジュール型の OPAM をキャノン株式会社と京都大学が共同で進めている文部科学省のプロジェクト (CK プロジェクト) の一環として開発しており、モジュール型 OPAM のバイアス磁場をモジュールの周囲に巻いたコイルにより調整する方法を検討している (図 1 参照)。このとき、MRI の静磁場を歪ませると MR 信号計測における信号対雑音比の低下や取得画像の歪みにつながるため、OPAM 外の磁場歪みが小さくなるよう能動遮蔽型のバイアス磁場調整コイルを設計することを検討した [1]。ビオ・サバルの法則を用いた磁場分布シミュレーションの結果 (図 2 参照)、遮蔽コイルがある場合、磁束が主コイル・遮蔽コイル間に集中し、遮蔽コイル外への影響が小さくなり、MRI 内におけるバイアス磁場調整に有効である事がわかる。今後は、実際に能動遮蔽型バイアス調整コイルを実装し、MR 信号の直接計測、さらに脳磁図等との融合計測が可能なマルチモーダルな MRI システムの実用化を進める。

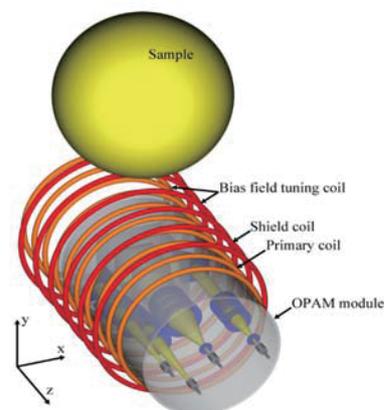


図 1 OPAM の周囲に配置した能動遮蔽型バイアス調整コイル模式図。

#### 参考文献

1. T. Oida, *et al.*, "Actively shielded bias field tuning coil for optically pumped atomic magnetometer toward ultra-low field MRI", IEEE Sensors Journal, in press.

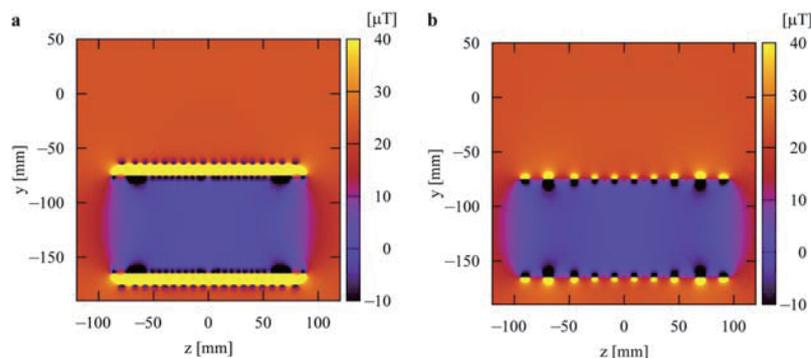


図 2 遮蔽コイルがある場合 (a) および無い場合 (b) の磁場分布。

## 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/>

## 「送り手と受け手が協調した P2P エネルギー伝送」

再生可能エネルギーによる分散電源や EV の充電スタンドなど従来とは異なるエネルギーの流れが増加する中、それらが与える電力フローの急峻な変化が電力システムに与える影響が無視できなくなってきた。これは、電力ネットワークの中では常に需給が等しくなるという制約により、接続された機器が互いに干渉し、好き勝手にエネルギーのやりとりを行うと、ネットワーク全体の電圧や周波数の制御が難しくなっているとも言える。そこで、個々の送り手と受け手が互いに P2P (Peer to Peer) の形で協調することにより、ミリ秒のスケールで同時同量を実現し、ネットワークへの影響の少ない緻密なエネルギー伝送を実現する方法について研究を行っている。

具体的には、エネルギー伝送を担う回路を双方向 AC / DC 変換モジュールと蓄電池を用いて構成し、やりとりする電力フローの情報を送り手と受け手のモジュールが無線通信により共有した上で、同時性を保ってエネルギー伝送を行う。このようなシステムを実現する上で重要となるのが、物理的なエネルギーを扱うシステムと情報通信システムの協調設計であるが、通信に伴う遅延をモジュール同士が互いに把握することにより、ロバストにミリ秒のスケールで同時性を保ったエネルギー伝送を実現している [1]。

簡単な例として図1のような孤立ネットワークを考える。EV からの出力は最大 200W、パワーコンディショナシステム (PCS) の出力は最大 100W として、これらを用いて 300W の冷蔵庫を動作させる状況を AC/DC 変換モジュールと蓄電池で模擬した。このとき、EV と冷蔵庫のタイミングがずれると PCS の容量を超え、ネットワークがダウンすることになる。実際に同時に動作させた場合の通信と電力のやりとりを図2に示す。上図が通信のやりとり、下図が電力のやりとりであり、正弦波は交流の電圧波形を示す。このようなモジュールを用いてシステムを構成することにより、ネットワークの分割・統合、分散した蓄電池を用いた仮想蓄電池、ネットワークの協調診断など、サイバーシステムと物理システムの協調による、環境に応じた自由度の高いネットワークが実現可能になる。

一方で、このようなネットワークは、パワーエレクトロニクスのスイッチング、低電圧動作の制御回路、低消費電力の無線通信などを含むため、環境によらず安定に動作するロバストなシステムを構成するためには、これらの干渉も考慮したモデル化・設計手法の確立が重要な課題となっており、このような視点でも研究を進めている。

## 参考文献

[1] 枝川、深江、久門、和田，“双方向 AC-DC 変換モジュールを用いた P2P エネルギー伝送システム”，電気学会電力技術研究会、PE-14-192, 2014.

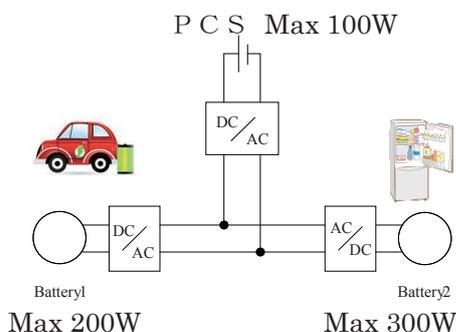


図1 簡単な孤立ネットワーク。

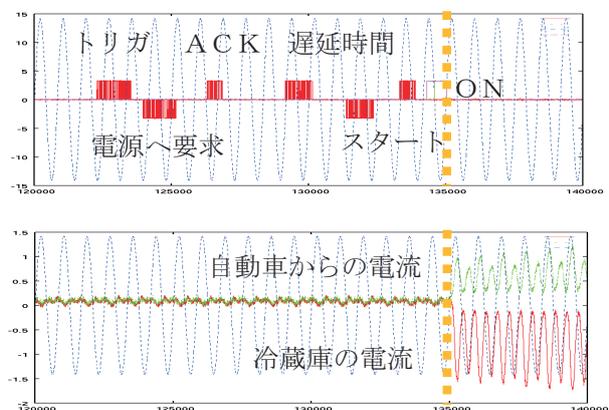


図2 エネルギー授受の同時性(上は通信、下は電力)。

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

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

## [SiC 半導体における点欠陥に関する基礎研究]

変電所等の電力インフラ用変換器には、超高耐圧のパワーデバイスが要求されます。このような電力を変換（交流→直流、直流→交流など）する際、現在は、耐圧 6~8kV 級の Si サイリスタが用いられていますが、変換時の電力損失が大きく、発熱に弱いという問題を抱えています。このような超高耐圧応用では、少数キャリアの注入を活用する SiC（炭化珪素）バイポーラデバイス（PiN ダイオード、サイリスタ、IGBT 等）が有望です。

高電圧应用到に有利な SiC と言えども、実用化の目処が立っているのは約 1kV 級のデバイスであり、10kV 超級のデバイスを実現するためには、結晶およびデバイス作製の両面において、課題が山積しています。少数キャリアの注入を活用するバイポーラデバイスでは、キャリア寿命の増大と制御が重要となります。本研究では、n 型 SiC におけるキャリア寿命制限欠陥が、当該分野で Z センターと呼ばれる深い準位（伝導帯底から約 0.6eV の準位）であることを同定し、高温熱酸化を施すことによって、この Z センター欠陥が消滅することを見出しました。この Z センターと呼ばれる欠陥は、成長直後の SiC 結晶だけでなくイオン注入を行った SiC でも最も高密度に存在する欠陥です。しかしながら、その起源（原子構造）が不明であるため、長年、推測の上に推測を重ねる議論が続けられてきました。今回、この Z センター欠陥が炭素空孔であることを同定しましたので、紹介いたします。

Z センター密度を正確に測定するために、接合容量の過渡解析から欠陥情報を得る DLTS 測定を行いました。また、欠陥に存在する不対電子の性質と対称性を調べるために電子スピン共鳴（EPR）測定を行いました。ここで大切なことは、DLTS 測定と EPR 測定を同一の試料に対して行うことです。一般に、DLTS 測定は低い欠陥密度を有する試料に適しており、EPR 測定は非常に高密度の欠陥を含む試料に適した分析法ですので、不純物ドーピングと電子線照射を活用して、高ドーピング密度でかつ高い欠陥密度を有する試料を複数準備しました。また、下地基板からの信号を排除するために、厚膜エピ成長を行い、基板を研磨により除去した自立膜を準備しました。さらに、欠陥密度の 100  $\mu\text{m}$  以上に亘る深さ分布の精密測定、negative-U と呼ばれる欠陥の特殊性を解決するために低温、光照射下で EPR 測定を行うという困難に挑みました。

図 1 に最も大きな信号強度を示した EPR スペクトルの例を示します。その g 値や対称性から、この信号は炭素空孔 ( $V_C$ ) からの信号であることが分かりました。次に、EPR 測定から得られた炭素空孔のスピンドensityと DLTS 測定から得られた Z センター密度の相関を図 2 に示します。ドーピング密度や欠陥密度の異なる 12 種類の試料全てに対して、ほぼ  $V_C$  密度と Z センター密度が一致していることが分かりました。EPR、DLTS 測定において、他に同じ桁で存在する欠陥はないことも確認しました。この結果、SiC におけるキャリア寿命制限欠陥である Z センターの起源が炭素空孔であることを明確に同定することに成功しました。

[1] K. Kawahara et al., Appl. Phys. Lett., **102**, 112106 (2013).

[2] K. Kawahara et al., J. Appl. Phys., **115**, 143705 (2014).

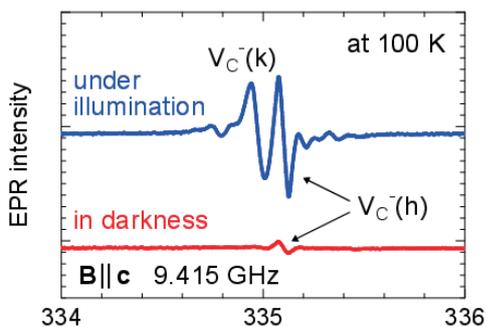


図 1 炭素空孔の EPR スペクトルの例。

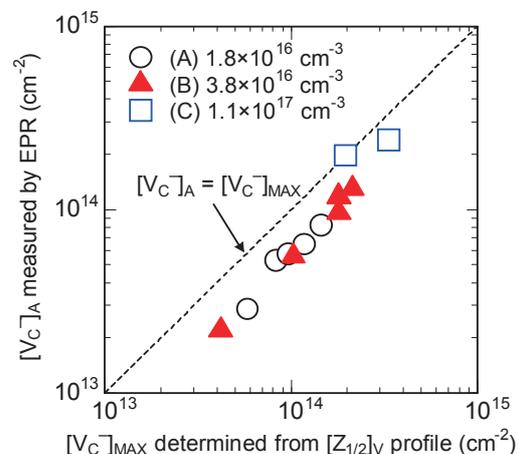


図 2 炭素空孔密度(EPR)とZセンター密度(DLTS)の相関。

## 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

## 「原子間力顕微鏡による固液界面系のナノスケール電荷分布計測」

現在、蓄電技術の重要性はかつてない程に高まっており、電気二重層キャパシタやリチウムイオン電池などの大幅な改善が求められています。これら電気二重層キャパシタや二次電池においては、電解質-電極界面における電荷密度や電気二重層の特性がその性能と直接的に関係しています。一方、生体分子における機能発現においても、生体分子-溶液界面の帯電状態や電気二重層が重要な役割を果たしています。しかしながら、微視的スケールで固液界面の電荷分布を実験的に直接評価する手法は存在しないため、新たな固液界面計測法の確立が強く望まれていました。本研究室では、これまでに開発してきた液中動作の周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) を、固液界面系のナノスケール電荷分布計測に応用することに成功しました。以下では、試料基板上に形成される、界面活性剤分子 (SDS) の表面ミセル (自己組織分子集合体) をモデル試料として、ミセル上の電荷密度および電気二重層を測定した結果について紹介します。

FM-AFM では、試料と探針との間にはたらく相互作用力を AFM カンチレバーの共振周波数の変化として検出します。電荷分布解析には定量的な相互作用力計測が必須となりますが、定量解析にはカンチレバーが理想的な調和振動をしていることが前提となります。われわれは、光熱励振と呼ばれる理想的なカンチレバー駆動法を開発することで、この定量測定に成功しました。さらに、フォースマッピング法と呼ばれる全空間の力分布を計測する方法を組み合わせることで、界面電気特性を反映する電気二重層力の 3 次元マップをナノレベルで測定することに成功しました (図 1 (b), (c))。基板上的表面ミセルは、図 1 (d) の模式図に示されるように、直径約 4.8 nm の半円筒状の構造を取っていますが、測定マップは、実際、図 1 (b) (c) のように、この構造に一致しています。さらに、測定された電気二重層力からミセル表面の電荷密度分布を求める計算法を開発し、ミセル頂上部の電荷密度がミセル谷部の電荷密度より大きくなることを示しました (図 3 (e))。本測定法は、今後、さまざまな分野における固液界面系の局所電気特性の測定に応用されていくと期待しています。

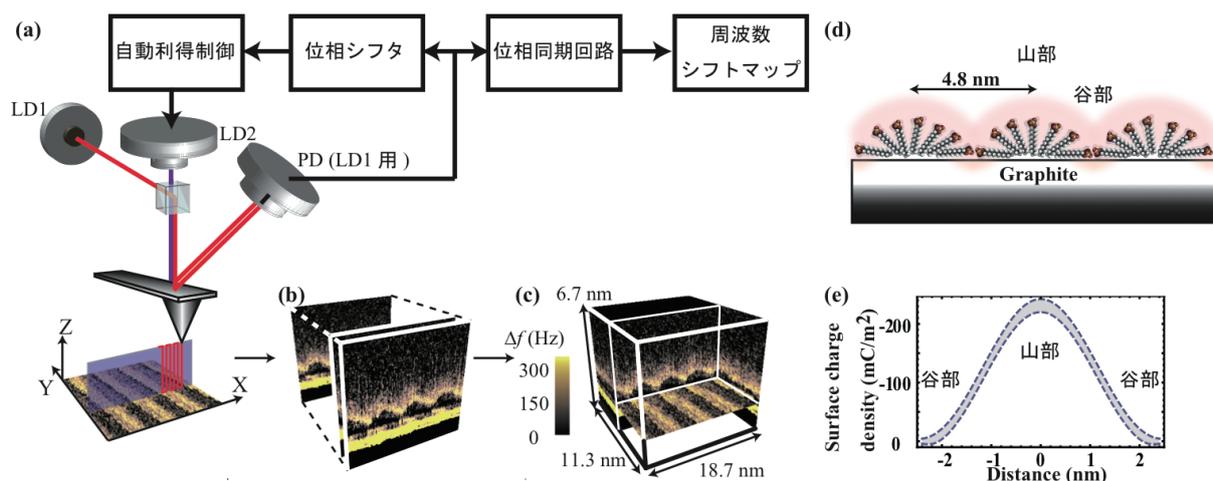


図 1 (a) FM-AFM の装置構成 . (b) FM-AFM で取得される 2 次元周波数シフト ( $\Delta f$ ) マップ . (c) (b) で取得したマップから構成される 3 次元  $\Delta f$  マップ . (d) グラファイト上の SDS の半円筒ミセル . (e) 半円筒ミセル上の電荷密度 .

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

「高速電気変調可能な狭帯域熱輻射光源」

通常の熱輻射光源では、光源の温度を変化させることで熱輻射強度を変調できるが、それは物体の熱容量で決まる応答時間でしか変化しないため、100Hz以上の高速の輻射強度変調は期待できない。一方、輻射率と吸収率が等しいというキルヒホッフの輻射法則を考えると、温度が一定に保たれた物体であっても、吸収率 (= 輻射率) を高速に変化させることで熱輻射強度が高速変調できると期待される。このような高速強度変調を狭帯域に制御された熱輻射において実現できれば、非分散型赤外 (NDIR) センシングによる気体・化学物質検出を含めた様々な場面で非常に有用であると考えられる。我々はこれまでに、量子井戸のサブバンド間遷移によって物質の吸収帯域をある程度制御した後に、2次元フォトニック結晶の面内共鳴モードと相互作用させることで、中赤外域における狭帯域熱輻射光源を実現してきた。さらに今回、量子井戸層の上下に p 層および n 層を設け、印加するバイアス電圧を変えることで量子井戸層へのキャリア注入・引き抜きを行ってサブバンド間吸収を制御することで、電氣的に高速に熱輻射強度を変調する手法を提案・実証した。

電氣的変調可能な狭帯域熱輻射光源を図1に示す。本構造では、GaAs (24ML)/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (46ML) からなる10層のn型多重量子井戸層をGaAsのp-i-nダイオード構造の内部に導入し、そこに三角格子空気孔型の2次元フォトニック結晶構造を形成している。200°Cに光源を加熱したときの、逆バイアス0Vおよび10Vにおける輻射スペクトルの測定結果を図2に示す。逆バイアス0Vでは波長9.2μmにおいて輻射率0.74、Q値72という高強度・狭帯域な熱輻射スペクトルが得られている。逆バイアス10V時を見ると、ピーク輻射率は0.24まで減少するが、その他のスペクトルの強度は殆ど変化していないことが分かる。この結果から、狭線幅 (Q値72) の熱輻射を放射率0.5にわたって電氣的に変調できることが示される。さらに本光源の輻射強度変調の周波数依存性を測定した結果を図3に示す。同図より本光源のカットオフ周波数はおよそ1MHzであることが分かる。この値は、温度変化により輻射強度を変調する一般的なパルス型熱輻射光源の変調限界 (100 Hz程度) を4桁近く凌駕する。今後、ウエハ構造の最適化により抵抗・空乏層容量を減少させ、かつ電極をグリッド化してPCから電極までの距離を縮小させることで~10 MHz程度の高速スイッチングの実現も期待される。参考文献：T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Realization of dynamic thermal emission control," Nature Mater. **13** (2014) 928.

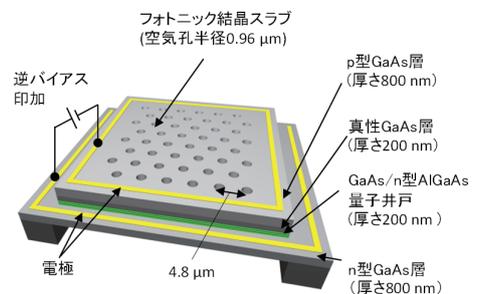


図1 高速電気変調可能な狭帯域熱輻射光源の模式図。

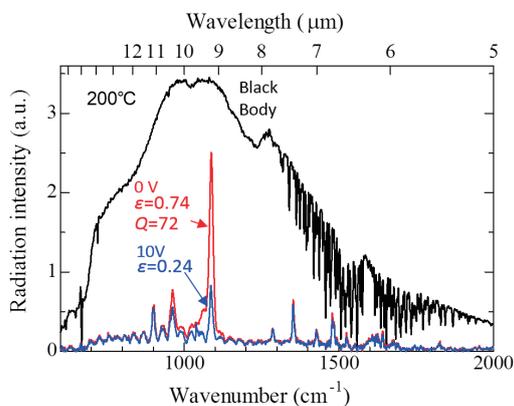


図2 逆バイアス印加による輻射スペクトルの変化。

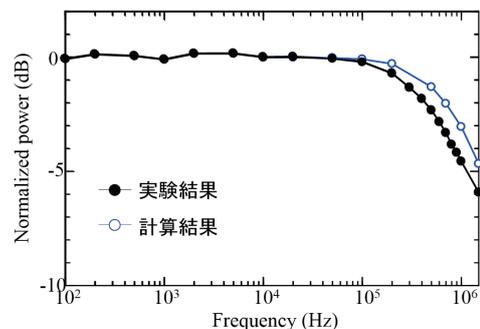


図3 変調パワーの周波数依存性。

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研究室）

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

## 「光周波数コムを用いた光時計の周波数比計測システム」

原子・分子、あるいはそれらのイオン（以下、原子）の共鳴線に周波数をフィードバック制御した発振器は、きわめて安定かつ正確な周波数を出力し、原子時計とよばれる。セシウム原子のマイクロ波領域の共鳴を用いたセシウム原子時計では、周波数の不確かさが  $10^{-16}$  台に達している、現在の秒の定義にもなっている。一方、光領域の共鳴にレーザーの周波数を安定化すると、周波数の不確かさをさらに小さくすることが可能で、現在  $10^{-18}$  台に到達しつつある。このようなレーザーは光時計ともよばれ、秒の定義の更新へ期待が高まっている。

光時計の不確かさがマイクロ波原子時計よりも優れているため、マイクロ波原子時計との比較ではその周波数の不確かさを評価できない。したがって、2台の独立な光時計を比較して不確かさは決定される。さらに、同種の光時計の比較だけでは周波数値に関しては情報が得られないので、異なる光時計同士を比較し相互の比を測定する。異なる光時計の周波数は見た目で色が異なるほど大きく離れているため、直接ビート周波数を測定できない。それらの比較には光周波数コムを利用する。光周波数コムは、モード同期レーザーから発せられる周期的な光パルス列を周波数軸でみたもので、等しい周波数間隔で発振する多数のレーザー光の集合体となっている。その等間隔性は  $10^{-19}$  台以下と非常に正確なため、コムを仲介して光時計どうしを比較することができる。

2台を比較は、図1に示すように、まず一方の光時計にコムを位相同期させる。すなわち、光時計のレーザー光とコムとのモードとのビート周波数を検出し、このビートの位相が一定となるようにコムをフィードバック制御する。そして、コム別のモードと2台目の光時計とのビート周波数を測定する。

図1の写真は研究室で開発中のシステムで、モード同期チタニウム・サファイアレーザーを自作し、特別な光ファイバーでスペクトル幅を広げたものである。（Web版では回折格子で分光したスペクトルが虹のように見える。）図2左は位相同期中のビート周波数をカウンタで測定した結果で、周波数ゆらぎはゲート時間の逆数以下にはほぼ収まっていて、周波数比較に使用可能となった。図2右は同時計測した別のレーザーとのビート周波数である。位相同期が完全ではないため平均化時間であるゲート時間の逆数で分解能が制限されている。現在、制御の高速化を進めていて、位相同期を完全にして高分解能化を達成する。

不確かさ  $10^{-18}$  の光時計の比較は、基礎物理学実験としても注目されている。原子の共鳴の周波数はいつでもどこでも測定しても同じで、2種類の原子時計を比較しても進み具合の違いが検出されることはないと言われてきた。しかし、宇宙のごく初期段階を記述可能とする物理理論では、異なる原子の共鳴周波数は異なる時間変化を示すことが示唆されていて、最高精度の時計を使えば、現在でもわずかに残るその効果を検出できるかもしれない。我々はこれを目標に研究を進めている。

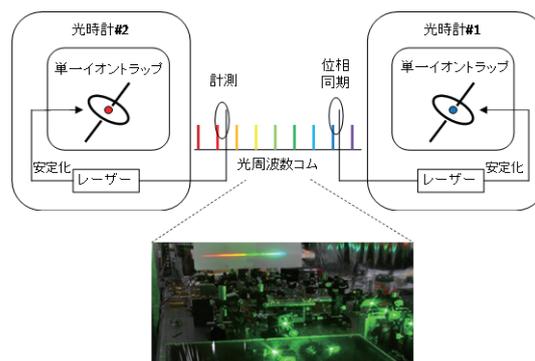


図1 光時計（開発中）の周波数比較の構成。下の写真は光周波数コム装置。

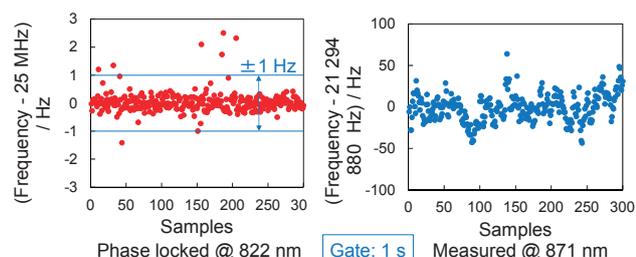


図2 左：レーザーに位相同期したコムとのビート。右：同時測定した波長の異なる別のレーザーとのビート周波数。

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/>

「視線運動の解析によるコンテンツ閲覧時の状態理解」

電車の中でのウェブ閲覧や街中の大画面デジタルサイネージなど、人が情報端末を通じてインターネット上の情報にアクセスする時間や場面は急速に増えています。しかし、アクセスできるコンテンツは現在爆発的に増加・複雑化しており、自分が欲しいと思っている情報にたどり着くまでに、しばしば多くの時間を費やすことがあります。一方、人は同僚や家族、友人に聞き、教えてもらうことで、適切な情報をしばしば容易に見つけ出すことができます。そこで本研究室では、情報端末などの機械が、利用者の様子を傍らで見ながら意図や興味を推定し、能動的・対話的に情報を提示するようなインタラクティブ・システムの開発を進めています。

このとき、(1) 利用者の音声情報だけでなく、視線や顔向き、表情といった非言語的情報を活用しながら利用者の心的状態（意図や潜在的興味・関心など）を推定し、(2) 適切な情報を自然な間合いで（ディスプレイや音声発話を通じて）提示・応答する、といった機能を実現する必要があります。(1) はパターン認識、(2) は制御の問題となり、多くの事例から適切な認識や制御の方法を見つけるには、機械学習の技術を使うことができます。このような取り組みのひとつとして、以下では特に (1) の問題に焦点を絞り、商品カタログや料理レシピ集といったコンテンツを閲覧している状況において、コンテンツ閲覧時の視線運動情報から、利用者の状態を推定する手法について紹介します。

1. 注視行動の確率モデルに基づく利用者の興味推定

利用者が「自身の興味に駆動されてコンテンツ上の対象を注視する」という一連の流れを確率的生成モデルによって表すことで、利用者の視線からその興味を推定し、次に閲覧・選択する対象を予測する手法を開発しました (図 1, 2)。このモデルでは、たとえば「健康によさそう」な料理に興味があれば、「緑色」や「野菜」といった属性がより重要視され、これらの属性を持つような対象がより多く注視されると考えます。さらに、そもそもどのような側面 (アスペクト) からの興味がありうるかを、多くの利用者のコンテンツ閲覧時の視線データから学習する手法を提案しています。

2. デザイン構造を利用した選択行動フェーズの認識

利用者がコンテンツを閲覧し購買行動を行う際には、まずどのような選択候補があるのかを利用者が「情報取得」するフェーズ、選択行動に移るために「比較・吟味」するフェーズ、さらに「購入対象決定後」の閲覧など、意思決定の過程に応じていくつかの状態に分けられるといわれます。そこで、「コンテンツのデザインや配置構造がどれだけ利用されて見比べが行われているか」に着目し、これを特徴量化することで、利用者の注視対象の属性情報を用いるよりも高精度で、「情報取得」や「比較・吟味」といった状態認識を行う手法を考案しました。

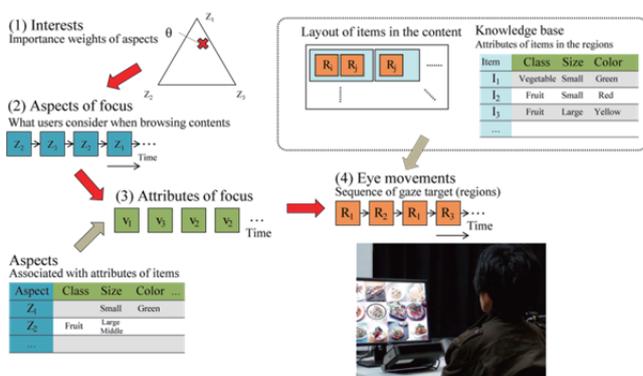


図 1 興味アスペクトに基づく注視行動モデル.

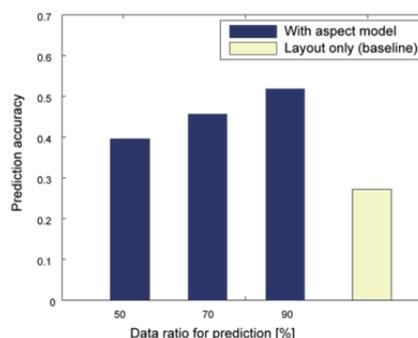


図 2 ユーザの選択アイテムの予測精度. 横軸は予測に用いた視線データの割合.

## 通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

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

### 「コンテンツとの適切な相互作用を実現するシステムアーキテクチャ」

従来、情報通信ネットワークの研究開発は「いつでも、どこでも、高速に」を目標に進められてきた。しかしながら、本来人々は社会活動において他者との間に距離感を有している（Hall 1969, Davidow 2011）。しかし、社会的な関係は時間とともに変化し人々は地理的にも広く移動するのに対し、情報通信ネットワークの物理インフラは静的・固定的である。そこで、動的にネットワーク空間を生成することを可能にする物理インフラが必要である。そこで、ネットワーク空間をニーズに応じて動的に構成する技術である仮想ネットワーク空間の技術と、人々やコンテンツとの間の社会的な関係を定量化する技術である関係性メトリックの技術を用いた統合システムアーキテクチャを研究している（新熊 新世代ネットワークシンポジウム 2014）。図1のように仮想ネットワーク空間のレイヤが存在し、レイヤ上に併存する仮想ネットワーク空間 NW-A、NW-B、NW-C に人々がそれぞれ属している。各仮想ネットワーク空間の関係性メトリックは属する人々のライフログや関連するセンサーデータから形成される。各仮想ネットワーク空間においてどういったコンテンツが社会的に遠いか近いかは関係性メトリックに基づいて評価される。評価された社会的距離の遠さ／近さに応じて物理ネットワークが制御される。具体的には、社会的な距離が近ければ物理的な距離も近くなるように社会的な距離が遠ければ物理的な距離も遠くなるように制御される。物理的な距離の近い／遠いはコンテンツの取得の容易さや早さといったユーザの体感品質として表現される。これを実現するために物理ネットワークでは、社会的距離の近いコンテンツほどより優先的に処理したりより多くの物理リソース（計算・記憶性能、通信帯域など）を割り当てたりする。

ネットワーク空間は年齢や、文化圏、産業分野といったコミュニティごとに生成することが望ましいが、仮想ネットワーク空間を生成するためには物理ネットワーク上で物理リソースを提供するルータの数を考慮する必要がある。そこで、必要なルータ数を数学的に算出した。結果を図2に示す。合計ルータ数 300、クラスタ係数 0.1、0.4、0.7 の物理ネットワークを用いた。横軸にユーザが直接接続するルータの数、縦軸に仮想ネットワーク 1 つあたりに必要なルータ数を示す。図から、クラスタ係数が小さいとき横軸に対し必要なルータ数は大きく増えるがすぐに飽和する。これは、ルータ間が密に接続されていないため、接続ルータ数の増加に対し中継ノード数が大きく増えるためである。一方で、クラスタ係数が大きいときルータ数はほぼ線形に増えている。これは、ユーザが直接接続するルータの多くが互いに接続されているため、必要な中継ルータが少ないためである。このようにクラスタ係数が小さい、すなわち、ルータ間が密に接続されていない場合、ユーザが直接接続しているルータに対し全体として数倍のルータが必要になる。この問題は、1 ルータあたりに接続するユーザ数が数百、数千といったように十分大きければ許容できるので、ユーザの接続をネットワークの端で集約するような仕組みを設けることで仮想ネットワーク空間の実現性を向上させることができると考えられる。

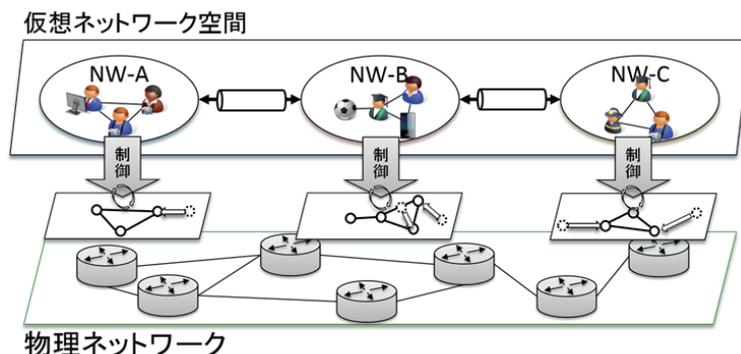


図1 仮想ネットワーク空間の統合アーキテクチャ。

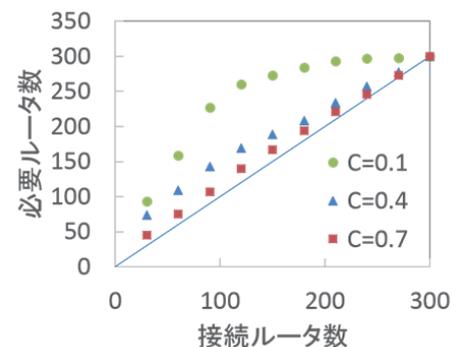


図2 必要な物理ルータ数。

## 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/>

## 「微細トランジスタの特性劣化を効率的に測定する回路方式」

半導体製造プロセスの進歩により極めて微細なトランジスタの製造が可能となり、集積回路の性能は大幅に向上した。一方で、ゲート絶縁膜は原子数個分相当まで薄くなるなど、微細な構造を用いることに起因する集積回路の信頼性低下が問題となり始めている。トランジスタには様々な故障モードがあるが、負バイアス温度不安定性 (Negative Bias Temperature Instability; NBTI) と呼ばれる特性劣化が主要な要因の一つである。NBTIは、pMOS トランジスタの閾値電圧が緩やかに上昇する現象として観測される。閾値電圧の上昇により集積回路の動作速度が低下し、またはタイミング違反により、正しい演算ができなくなりシステムの誤動作に至る。NBTIは以前より知られている劣化要因であるが、その現象は未だ完全には明らかになっていない。当研究室では、集積回路とそれを用いるシステムの信頼性向上を目指し、その初期段階として NBTI の正確な測定と劣化機構のモデル化に取り組んでいる。

本稿では NBTI 劣化のトランジスタ毎のばらつきの測定について説明する。特性ばらつきの影響は、微細化とともに大きくなってきている。従来は、トランジスタ特性ばらつきの低減とそれによる回路動作速度のばらつきを低減することが主な研究対象であったが、近年の集積回路の広い応用を考慮すると、特性劣化ばらつきの影響低減が重要な研究課題となっている。

劣化ばらつき測定における最大の課題は長い測定時間である。NBTIは通常、年単位で緩やかに進行する現象であり、高温・高電界により劣化を加速させても劣化測定には数時間から数日程度を要する。多数のトランジスタ劣化の統計情報を測定により収集するには、並列化が不可欠である。図1に当研究室が提案した NBTI 劣化の並列測定法の概念図を示す。

多数のトランジスタを同時に劣化または回復条件下に置き、並行して閾値を逐次的に測定できる回路構造を提案している。測定時間の大部分を占めるトランジスタ劣化のための電圧印加を、多数のトランジスタに並列に行うため、単体トランジスタの測定とほぼ同じ時間で劣化の統計的情報を得ることができる。

提案方式の有効性を確認するため、65nm [1] 及び 180nm [2] の CMOS プロセスを用いて試作を行い、NBTIによる劣化を測定した。図2は 180nm プロセスで試作した LSI チップの写真であり、約 4000 個の被測定トランジスタと図1の並列測定を実現するための周辺回路が約 2mm 四方の領域に集積されている。図3には、測定で得られた同サイズのトランジスタ 600 個の NBTI 劣化のばらつきを示している。こうした測定により、NBTIによる劣化ばらつきがチャンネル面積に反比例して増加すること等を実験的に明らかにしてきている。これらの知見をモデルに組み込み回路設計にフィードバックすることで、微細なプロセスにおいてもこれまでと同様の信頼性を確保した集積回路設計が可能になると期待される。

## 参考文献

[1] H. Awano, M. Hiromoto, and T. Sato: "BTIarray: a Time-Overlapping Transistor Array for Efficient Statistical Characterization of Bias Temperature Instability," IEEE Trans. Device and Materials Reliability, Vol.14, No.3, pp.833-843, Sep. 2014.

[2] H. Awano, M. Hiromoto, and T. Sato: "Variability in Device Degradations: Statistical Observation of NBTI for 3996 Transistors," in Proc. of ESSDERC, pp. 218-221, Sep. 2014.

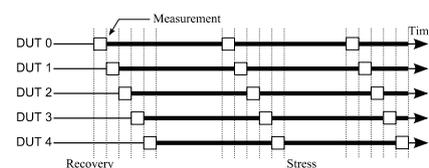


図1 並列測定の方法図

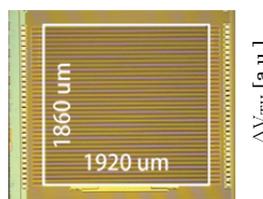


図2 チップ写真

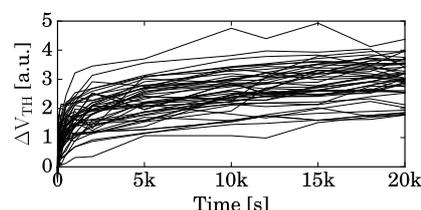


図3 NBTI 劣化の測定例

## 集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研究室）

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

## 「空港保安検査での不審物検出のための超広帯域レーダ高速イメージング技術」

現在、空港での安全確保は複雑な国際情勢等を背景に極めて重要な課題となっています。多くの空港の保安検査場では、手荷物はX線検査により、乗客は金属探知機により不審物が機内に持ち込まれないような措置が取られています。ところが、金属探知機ではセラミック製のナイフなど非金属の武器等が検出されず、保安上の重要な課題として認識されつつあります。近年、空港での乗客の検査に超広帯域レーダによるイメージング技術が導入されつつあります。レーダは、X線検査装置のような人体への被爆もなく、通常の上着を容易に透過し、高い分解能でのイメージングが可能であるという長所が知られています。北米や欧州などの多くの空港でレーダイメージング装置がすでに配備され、空の安全を確保するために活躍しています。

こうした空港保安検査レーダ装置では乗客が静止した状態での測定が必要であるため、検査場での待ち時間が長くなり乗客の利便性の悪化が指摘されています。私たちはこの問題を緩和するために、移動中の人体の高速イメージング技術を開発してきました。移動中の人体の運動がわかっている場合には、その運動の効果を補償することで形状の推定が可能となります(図1)。一方、人体の形状が正しくわかっている場合には、運動を高精度に推定することができます。このように、形状と運動は互いに影響を及ぼし、双方を正しく求めることは容易ではありません。私たちは、人体頭部の位置や統計に基づく平均サイズなど、人体形状についての事前知識を効率的に利用し、レーダイメージングにより得られる画像の明瞭度を指標としたオートフォーカス技術を開発し、移動人体の運動と形状を正しく推定することに成功しました [1]。空港のセキュリティ技術開発を目的とする欧州プロジェクト ATOM (<http://atom-project.eu/>) に参画し、これまでに私たちが開発してきた技術をもとに、レーダによる人体の追跡・イメージング技術を開発しました(図2, 3) [2]。

## 参考文献

[1] Sakamoto, Sato, Aubry and Yarovoy, Proc. European Conference on Antennas and Propagation, 2014.

[2] Sakamoto, Sato, Aubry and Yarovoy, IEEE Trans. Geos. Remote Sens. Vol.53, No.1, 2015.

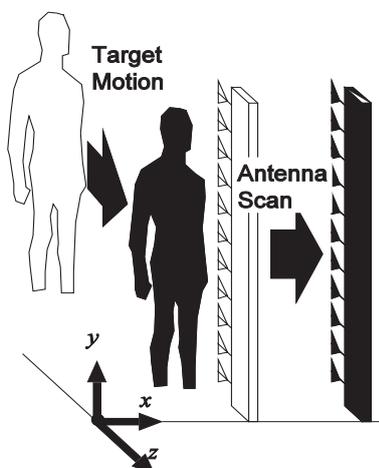


図1 アンテナアレイの走査と同時に乗客が移動するモデル。



図2 測定に使用したマネキンおよび胸部に設置した拳銃。

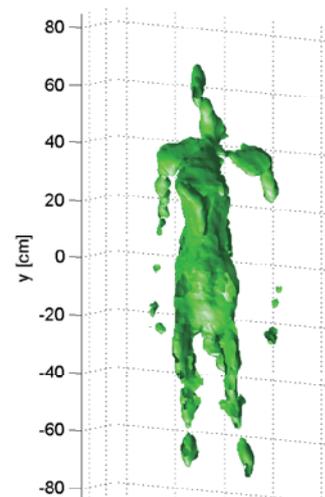


図3 提案技術で推定されたマネキン形状および胸部の拳銃。

## システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研)

<http://ishiilab.jp>

## 「知性の謎に挑む脳コネクトミクス」

論理生命学分野では学習するシステムを対象に (1) 生命や知性を学習するシステムと見立ててモデリングする自然科学的研究、(2) 学習するシステムのモデルを数理的に調べる理論的研究、(3) 学習するシステムを現実世界に役立つ形で作り応用してゆく工学的研究の、3種アプローチを同時に推進しています。

最近力を入れて取り組んでいるトピックに、脳のコネクトミクスがあります。コネクトミクスとは脳における神経細胞間の接続関係を網羅的に調べてゆく研究を指します。人間の脳は約 1000 億個の神経細胞が、1 細胞あたり 1 千～1 万個の細胞と相互にシナプス結合してできた複雑な構造物です。ミクロな目で見ると、各神経細胞は発火状態をシナプス結合を介して伝え合い、さらにシナプス結合の強さは環境との相互作用のもとで変化してゆきます。一方で、マクロな目から見た脳は、感覚入力を処理し、筋骨格系制御へとつなげる情報処理機械であり、処理機能自体が記憶と経験によって変化してゆく学習するシステムです。そこで、脳のミクロな回路構造を決定することで、脳のマクロな機能の理解、ひいては脳の情報処理原理の理解に迫ることができるのではないかと期待されているのです。

しかし、ミクロな脳神経回路の構造を知ることは、全く簡単なことではありません。3 次元的に広がる神経回路の構造を探ることは、顕微鏡の機能・解像度の限界への挑戦です。限界ギリギリの品質の画像データから、回路構造を決定してゆくことは情報処理技術の限界への挑戦です。さらに、決定された回路構造を理解してゆくことは、巨大データ処理と統計技術への挑戦です。

Skibbe 研究員はショウジョウバエの脳全体にわたる共焦点顕微鏡画像に基づき、微細な神経回路構造をトラッキングする手法を開発しました。この手法によって、ショウジョウバエ全脳において、特定の遺伝子を発現する神経回路の構造の同定が可能になり、また、先行研究に比べその精度も向上しています (Skibbe, et al., 2014) (図 1A)。

中江研究員は従来よく調べられてきた神経細胞間の結合ではなく、神経細胞と、別の種類の細胞 (グリア細胞) との結合を、それらの活動から推定する手法を開発しました (Nakae, et al., 2014) (図 1B)。この手法を実際のラットの海馬神経回路における  $Ca^{2+}$  イメージングデータに適用することで、脳が自然に活動している状態では、グリアから神経細胞へは正の結合があるが、逆の影響はあまり見られないことがわかりました。

我々は今後とも冒頭に述べた (1) (2) (3) の全てのアプローチを総動員し、コネクトミクスを進めてゆくためのブレークスルーを求めてゆきます。

Skibbe, H., Reisert, M., Maeda, S., Koyama, M., Oba, S., Ito, K., & Ishii, S. (2014). Efficient Monte Carlo image analysis for the location of vascular entity. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, to appear.

Nakae, K., Ikegaya, Y., Ishikawa, T., Oba, S., Urakubo, H., Koyama, M. & Ishii, S. (2014). A statistical method of identifying interactions in neuron-glia systems based on functional multicell  $Ca^{2+}$  imaging. *PLoS Computational Biology*, **10** (11), e1003949.

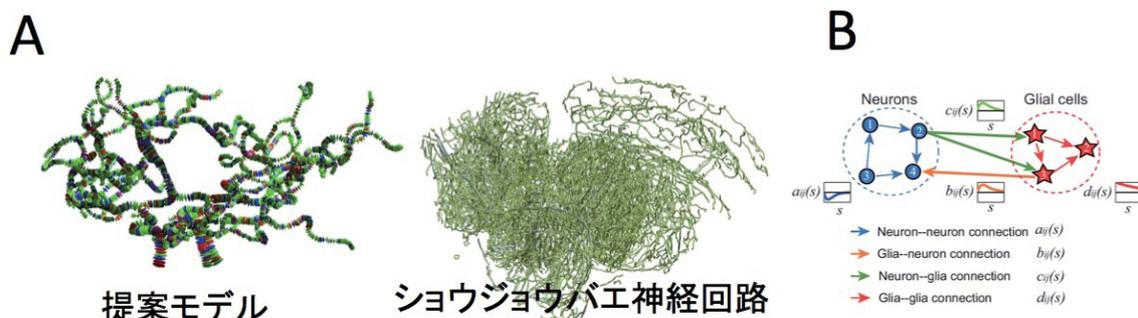


図 1 (A) ショウジョウバエの神経回路 (B) マウスのニューロン・グリア相互作用モデル。

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野 (中村祐司研究室)  
<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>  
 「3次元 MHD 平衡解析に関する研究」

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

超高温プラズマを真空容器内といった比較的狭い領域に閉じ込めるために、プラズマの圧力分布には急峻な勾配が存在し、プラズマはこの圧力勾配による力 ( $-\nabla p$ ) により外に拡がろうとします。これを電磁力 ( $\vec{j} \times \vec{B}$ ) で抑えようとするのがプラズマの磁場閉じ込め装置です。したがって、磁場閉じ込めを考える場合、最初に検討する必要があるのは、これらの力がバランスした状態 ( $-\nabla p + \vec{j} \times \vec{B} = 0$ )、すなわち磁気流体力学的 (Magnetohydrodynamics; MHD) 平衡を見つけることです。この MHD 平衡の式は見た目は簡単で、たとえば1次元計算が可能な無限平板状プラズマに対しては容易に解析解を求めることができるのですが、2次元計算が必要なトカマクプラズマのようなドーナツ状の軸対称トーラスプラズマに対してはとたんに計算が難しくなり、特殊な解析解を除いて一般的にはコンピュータによる数値計算が必要となります (平衡計算は非線形問題となり、繰り返し計算が必要です)。

トーラスプラズマでも軸対称性を持たないヘリカル系プラズマの平衡計算では、3次元計算が必要となるため、数値計算もさらに難しくなります。理論的にも対称性が欠如 (解析力学でいうサイクリック座標が欠如) した3次元配位では理想的な MHD 平衡は存在しないと考えられており、その解析は質的にも量的にも大変です。しかし、近年のトカマク研究ではトロイダル磁場 (TF) コイルに起因する小さな磁場の非軸対称性だけでなく、プラズマの安定性を目的としたコイルなど非軸対称な制御用コイルが用いられることがあり、非軸対称な3次元 MHD 平衡の解析の重要性が高まっています。

そこで、私たちの研究室では、ヘリカル系プラズマやトカマクプラズマなどのトーラスプラズマを対象に、3次元 MHD 平衡解析に関する研究を進めています。とくに最近は、3次元 MHD 平衡計算コードの高精度化、新しい3次元 MHD 平衡計算アルゴリズムの開発、トカマクプラズマのディスラプションにともなう MHD 平衡の3次元ダイナミクス解析とその制御に関する研究を進めています。

平衡解析の例として、3次元 MHD 平衡コードで得られた国際熱核融合実験炉 (ITER) の磁気面と磁場ベクトルを図1に、様々な非軸対称コイルが作る磁場を考慮した ITER の3次元 MHD 平衡計算から得られた非軸対称性な磁場強度分布を図2に示します。

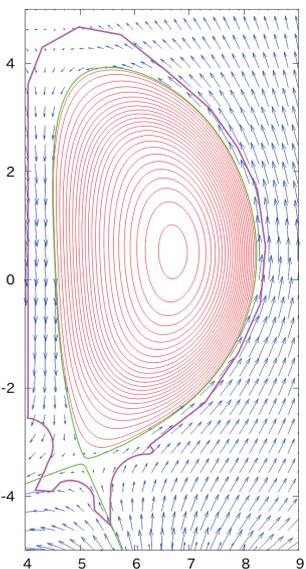


図 1

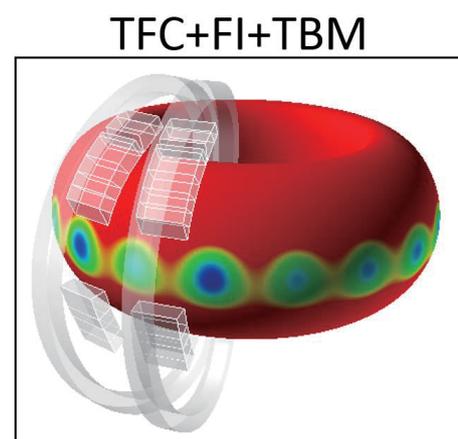


図 2

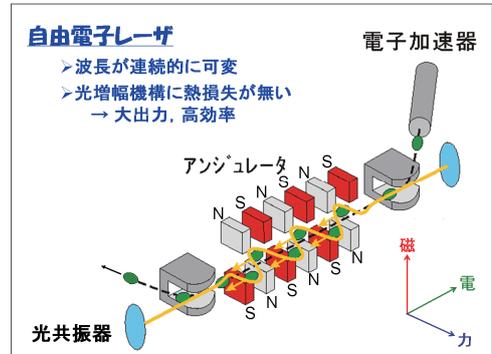
エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

「先進量子放射源を実現するための相対論的高輝度電子ビームの生成」

本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用の高度・高精緻制御による先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、小型の核融合装置による高エネルギー粒子の発生とテロ対策技術などへの応用や、ここで紹介する高輝度・高エネルギー電子ビームの生成とそれを用いた量子放射エネルギーの発生などの研究を行っています。

相対論的効果が顕著となる高エネルギーの電子ビームを用いることによって、従来の光源にはない機能、波長領域、強度の新しい光源が実現します。例えば、そのような先進量子放射源の代表である自由電子レーザー（Free Electron Laser: FEL）は、右上図のように電子加速器、アンジュレータ、光共振器から成ります。電子加速器で生成された高エネルギー電子ビームは、アンジュレータの周期的交代静磁場の中を蛇行し、その蛇行周期（数 cm）に応じた波長の電磁波を放出しますが、このとき相対論的ドップラーシフトの効果により、前方に放出される電磁波（自発放射光）の波長は電子エネルギーに応じて THz から可視、X 線領域にも達します。さらに、蛇行する電子は横方向の速度成分を持ちますので、自発放射光の横方向電界と相互作用してエネルギーの授受が起り、条件が整えば光の増幅が起こって最終的に光はコヒーレントなレーザーになります。



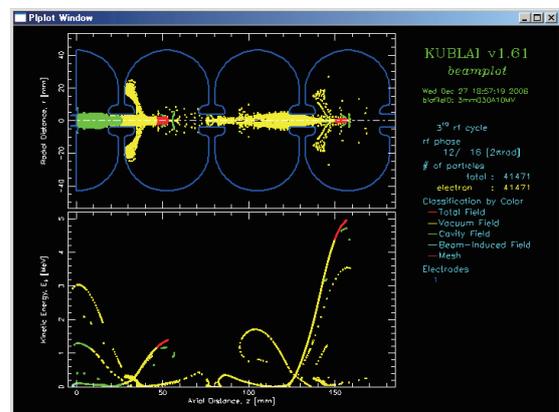
自由電子レーザー (FEL) の概念図と特長。

自由電子レーザー (FEL) の概念図と特長。自由電子レーザー (FEL) は、右上図のように電子加速器、アンジュレータ、光共振器から成ります。電子加速器で生成された高エネルギー電子ビームは、アンジュレータの周期的交代静磁場の中を蛇行し、その蛇行周期（数 cm）に応じた波長の電磁波を放出しますが、このとき相対論的ドップラーシフトの効果により、前方に放出される電磁波（自発放射光）の波長は電子エネルギーに応じて THz から可視、X 線領域にも達します。さらに、蛇行する電子は横方向の速度成分を持ちますので、自発放射光の横方向電界と相互作用してエネルギーの授受が起り、条件が整えば光の増幅が起こって最終的に光はコヒーレントなレーザーになります。

従来のレーザーは原子や分子に束縛された電子が高エネルギー準位から低い準位に遷移するときに発生しますが、FEL は言わば準位を人工的に作り出すことによって得られます。このため、広い波長領域でのコヒーレント光の発生が可能で、右上図中に示したような従来のレーザーにない特長があります。私たちが宇治キャンパスで開発してきた中赤外 FEL は、5~20  $\mu\text{m}$  の波長領域にて連続的に発振波長が可変で、分子の指紋領域をほぼカバーしています。波長選択が可能で、しかも 1 psec を下回る極短パルス光ですので熱的格子振動励起の影響を最小限に抑えることができ、例えば SiC など固体の特定の格子振動だけを選択的に励起することができます。

このような FEL を初めとする量子放射光は、相対論的電子の運動エネルギーを、より付加価値の高い量子放射エネルギーに無損失で変換したものとも言えますので、量子放射源の高度化のためには自ずと、電子ビーム発生・輸送技術の高度化が求められます。

本研究室では、このような先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビーム生成の研究を行っており、数値シミュレーション研究においても世界をリードする研究成果を挙げてきました。例えば、導体近傍の鏡像効果で電子ビームに働く非線形な空間電荷力は、従来は電子ビーム輝度を低下させると認識されてきましたが、最近の我々の数値シミュレーション研究で、ある条件が整うと逆に輝度を向上させることが見出されました。この新奇な現象を理解し、上手く利用すれば、従来の常識を覆すような高輝度の電子ビーム生成に繋がる可能性があると考え、数値シミュレーション研究と理論解析を進めています。



本研究室で開発した有限要素法粒子シミュレーションコード。

## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

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

### 「Nd:YAG トムソン散乱計測法による核融合プラズマの電子温度・密度分布計測」

私たちの研究室では、磁場閉じ込め方式の核融合炉実現に向け、環状磁場閉じ込めによる高温・高密度プラズマ生成・維持に関する基礎研究を進めています。特に、本学創案になる先進ヘリカル磁場配位、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位を持つプラズマ実験装置ヘリオトロンJによる研究を、他の関連研究室と協力して進めています。

プラズマ性能向上のためには高温・高密度プラズマの分布制御が重要な課題の一つであり、プラズマの温度、密度分布時間変化の詳細なデータが不可欠です。そこで、私たちは、高繰り返し発振可能なNd:YAG レーザによるトムソン散乱計測システムの開発を行ってきました。同計測はプラズマ中に入射したレーザ光の電子による散乱（トムソン散乱）光のドップラーシフトから電子温度を、散乱光量から電子密度を知る方法です。今回構築したシステムはトラス斜め下方からレーザを入射し、プラズマからの後方トムソン散乱光を水平方向から大型凹面鏡（直径80cm）により散乱光を集光します（図1）。ヘリオトロンJで生成されるプラズマ（放電維持時間：約0.2s）の温度、密度分布の時間変化計測のため、繰り返し発振周波数50HzのNd:YAG レーザ（発振出力550mJ）を二台使用し、二つのレーザを交互に発振させることにより、通常10ms 間隔でプラズマ分布をモニターしています。発振タイミングを調整することにより、より短時間での分布変化を計測することも可能です。

現在、ヘリオトロンJでは、プラズマへの粒子供給法やその条件を制御することで、プラズマ性能を向上させる研究を精力的に行っています。その中で、超音速分子ビーム入射（SMBI: Supersonic Molecular Beam Injection）による粒子供給法も試みています。SMBIでは、高密度を得るための多量の粒子を、超音速ビームとして短時間で供給することにより、従来手法で問題となるプラズマ性能劣化を防ぎ、高密度・高温プラズマ生成を可能とすることを狙っています。中性粒子ビーム入射加熱中のプラズマにSMBIによる粒子供給を試みた際の、SMBI直前（ $t = 230\text{ms}$ ）及びSMBI後（ $t = 240, 250, 260\text{ms}$ ）の温度、密度分布を図2に示します。SMBI直後には中心密度が大きく上昇し、その後周辺密度も上昇して行くのが分かります。一方、電子温度に関しては、SMBI直後は入射粒子による冷却効果のためプラズマ全体で一時的な低下が見られますが、その後上昇に転じ、260msではSMBI前と同程度の温度にまで回復しています。これにより、SMBIによってプラズマ蓄積エネルギーを大幅に上昇できました。今後は計測された分布情報を元に、プラズマの熱や粒子の輸送を解析していく予定です。



図1 トムソン散乱計測システムの入射及び集光部。

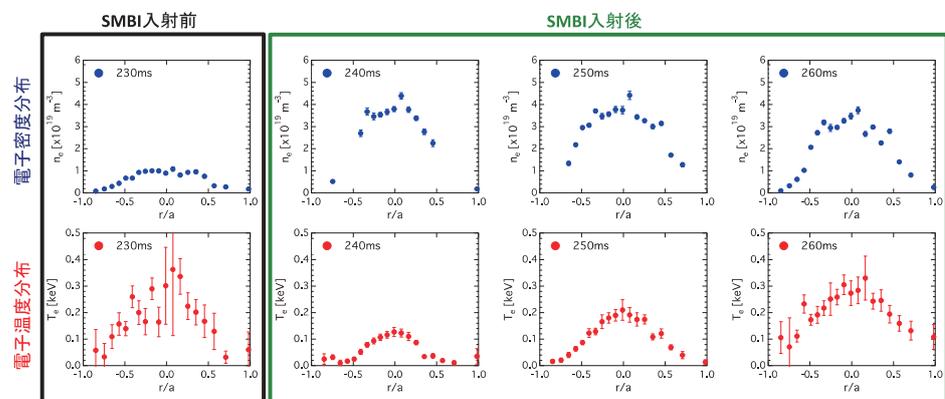


図2 SMBIによる粒子供給時のHeliotron J プラズマの電子密度・温度の時間発展。

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/index-j>  
 「宇宙空間電磁環境観測用小型センサープローブ」

宇宙空間へと打ち上げる衛星や探査機は、常にリソースとの戦いです。サイズ、重量、電力を、いかに小さく、軽く、省電力にするか。最終的なデザインが決まるまで、あるいは、ものを作り始めてからでもこれらのリソースとの戦いは続きます。我々の研究室では、宇宙空間の電磁環境を探査するためにプラズマ波動観測器を開発して衛星やロケットに搭載し観測を行っています。プラズマ波動観測器の場合は、観測帯域の絞り込みや低ノイズ回路の実現のために、どうしても、フィルタや低ノイズアンプなどアナログ回路の規模が大きくなってしまいます。通常、装置の小型化・軽量化にはデジタル化と処理のソフトウェア化が大きく寄与しますが、プラズマ波動観測器の場合には、アナログ部の小型化がキーとなっていました。そのため山川研究室では、アナログ ASIC 内にプラズマ波動観測器アナログ部を実現する取組を、10年ほど続けてきました。アナログ ASIC はデジタルよりも、技術的な難しさを伴うため、その実現にはずいぶんと時間がかかりましたが、それでも電磁界6成分を5mm角のベアチップ内に収めるところまで到達しました。

そして我々はそのチップを用いることにより、従来の科学衛星では実現できない多点同時観測を実現できるセンサープローブの開発を行いました。科学衛星による1点観測は、時間変化と空間変化の分離ができないことから、その欠点を補うべく複数衛星による編隊観測が国際的に一般になりつつあります。ただ、複数衛星といってもロケットの能力には限りがありますから、せいぜい多くて5機程度です。空間的なサンプリングを考えても、とても十分とはいえません。そこで、プラズマ波動だけでもより多くの点で観測できるように、先に開発したプラズマ波動チップと、小型化した電磁界センサー、小型無線装置の組合せを小型の筐体に組込んだシステムの開発を行いました。小型センサープローブと呼ぶこのシステムは、電源、観測、通信とすべての機能を、8cm角の筐体内におさめ（全体は11cm角）、それ単独で電磁界6成分のプラズマ波動をとらえることができます。図は今年度試作したプロトタイプです。センサーは磁界用にループアンテナ3軸が筐体を囲むように装着されています。電界用センサーはCFRPでできており宇宙空間に放出される時は、筐体周辺に巻かれた状態になっていますが、放出後にコマンドによって自己伸展し1.6m tip-to-tipの3軸ダイポールアンテナとなります。このような小型プローブであれば宇宙空間に数10個単位で放出することができ、科学衛星を遙かに超える多点で宇宙空間を探査することができます。私たちは、このシステムをMSEE (Monitor System for space

Electromagnetic Environments)と呼んでいます。イメージとしては、竜巻の内部構造を観測しようとする四苦八苦する映画 Twister に出てくる Dorothy システムの宇宙版です。このセンサープローブを来年度にはロケット実験で宇宙空間へと実際にもっていく計画を立てているところです。センサープローブは、プラズマ波動観測チップ設計・製作とシステム全体の設計を京大が行い、軽量磁界センサーは金沢大との共同開発です。またCFRPの自己伸展電界アンテナでは、サカセアドテック（株）、小型無線器では沖電気工業（株）、センサープローブ全体の設計・アセンブリは明和システム（株）の協力を得て進めています。

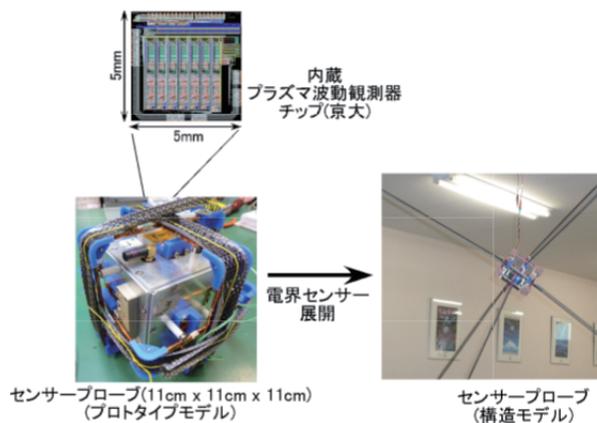


図 センサープローブと京大開発のチップ。

## 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>

### 「マイクロ波を用いた震災瓦礫処理システムの開発と実証実験」

当研究室では、宇宙太陽発電所 SPS (Space Solar Power Satellite/Station) [1] の実現を目指し、SPS で用いるマイクロ波無線電力伝送技術 [2][3] を中心に研究開発を行っている。マイクロ波無線伝送では大電力のマイクロ波を発生させることがあるため、大電力マイクロ波発振器が必要である。当研究室では大電力マイクロ波発振器の用途拡大のためにマイクロ波化学の研究 [4] を行っている。電子レンジのようにマイクロ波を熱源として利用して材料生成等の化学反応を促進するための研究である。

2012-13 年度に当研究室では環境省環境研究総合推進費による研究事業として「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理—アスベスト飛散とダイオキシン発生防止—」を行った。災害に見舞われた地域では、家屋や様々な瓦礫を始めとする多量の物質の処理が復興への大きな課題である。この目的に対して、京都大学、中部大学、東北大学、上智大学らの研究グループにより、マイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉による、瓦礫（アスベスト含有スレート瓦等）の無害化・再資源化処理に関する研究開発を行った。実際に宮城県名取市に加熱炉を設置し、現地で瓦礫処理実験を実施した（図 1） [5]。その結果、2 トン以上 / 日でのアスベスト無害化の実証（図 2）に成功した。

また、学会への貢献として、当研究室では日本電磁波エネルギー応用学会 JEMEA (Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications) 等のマテリアル分野の研究者との連携を深めている。2014 年 7 月には（独）日本学術振興会 電磁波励起反応場第 188 委員会の設立メンバーとして参加し、マイクロ波化学分野の発展を目指した活動を行っている。



図 1 現地に設置されたマイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉。

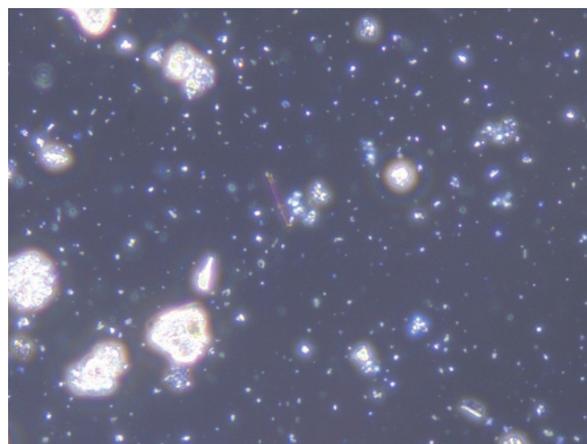


図 2 マイクロ波処理後のスレート瓦の顕微鏡写真。(アスベストが処理され、無害化されている)

#### 【参考文献】

- [1] 篠原（監著），“宇宙太陽発電（知識の森シリーズ）”，オーム社，2012.7
- [2] Shinohara, N., “Wireless Power Transfer via Radiowaves”, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and United States, 2014.1
- [3] 篠原，小紫，“ワイヤレス給電技術”，科学技術出版，2013.2
- [4] 堀越（監著），篠原，滝澤，福島（著），“マイクロ波化学”，三共出版，2013.12
- [5] Kashimura, K., et al., “Rapid and In-Situ Transformations of Asbestos into Harmless Waste by Microwave Rotary Furnace - Application of Microwave Heating to Rubble Processing of the 2011 Tōhoku Earthquake -”, Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Mgmt, 2014, in print

## 博士論文概要

### [ 課程博士一覧 ]

米 谷 竜	「Modeling Spatiotemporal Correlations between Video Saliency and Gaze Dynamics」(映像の視覚的顕著性と視線ダイナミクス間の時空間相関モデリング)	平成 25 年 11 月 25 日
Pedro Favuzzi Antonio	「Ab-initio design methods for selective and efficient optomechanical control of nanophotonic structures」 (ナノフォトニック構造の選択的かつ効率的なオプトメカニカル制御のための第一原理設計)	平成 26 年 1 月 23 日
泉 朋 子	「Normalization and Similarity Recognition of Complex Predicate Phrases Based on Linguistically-Motivated Evidence」 (言語学的特徴を用いた述部の正規化と同義性判定)	平成 26 年 1 月 23 日
永 原 静 恵	「Studies on Functional Magnetic Resonance Imaging with Higher Spatial and Temporal Resolutions」 (機能的磁気共鳴画像法の高時空間分解能化に関する研究)	平成 26 年 3 月 24 日
岩 田 達 哉	「Study on Resistive Switching Phenomenon in Metal Oxides for Nonvolatile Memory」 (不揮発性メモリに向けた金属酸化物における抵抗スイッチング現象に関する研究)	平成 26 年 3 月 24 日
森 岡 直 也	「Fundamental Study on Carrier Transport in Si Nanowire MOSFETs with Smooth Nanowire Surfaces」 (表面平坦化処理を施した Si ナノワイヤ MOSFET におけるキャリア輸送の基礎研究)	平成 26 年 3 月 24 日
広 瀬 政 晴	「デュアルプローブ原子間力顕微鏡の開発および有機半導体ナノスケール電気伝導評価への応用」	平成 26 年 3 月 24 日
金 潤 碩	「Effects of Potential Modulations on Optical Gain Properties in InGaN-based Green Laser Diodes」 (InGaN 緑色レーザダイオードの光学利得特性におけるポテンシャル変調の効果)	平成 26 年 3 月 24 日
西 中 淳 一	「緑色レーザのための半極性 GaN 系歪多層構造の設計と作製」	平成 26 年 3 月 24 日
大 音 隆 男	「Emission Mechanisms in Al-rich AlGaIn Quantum Wells toward Deep Ultraviolet Light Emitters by Electron Beam Pumping」 (電子線励起深紫外発光素子に向けた高 Al 組成 AlGaIn 量子井戸の発光機構に関する研究)	平成 26 年 3 月 24 日
Lee Yoonsik	「Hybrid photonic systems consisting of dielectric photonic crystals and plasmonic meta-atoms for nanoscale light manipulation」	平成 26 年 3 月 24 日
中 村 達 也	「量子ドット-フォトニック結晶ナノ共振器結合系の発光制御」	平成 26 年 3 月 24 日
梁 永	「フォトニック結晶面発光レーザの 3 次元結合波理論の構築」	平成 26 年 3 月 24 日
萩 行 正 嗣	「Studies on Annotated Diverse Corpus Construction and Zero Reference Resolution in Japanese」 (日本語の多様な文書からなるタグ付きコーパスの構築及びゼロ照応解析に関する研究)	平成 26 年 3 月 24 日
古 田 潤	「集積回路におけるシングルイベント効果の評価とソフトウェア耐性向上手法の提案」	平成 26 年 3 月 24 日

ZANG Linge	「Study on Edge Fluctuation of Supersonic Molecular-Beam Fueled Plasmas Using Langmuir probes and Fast Cameras in Heliotron J」 (超音速分子ビーム入射時の周辺プラズマにおけるフィラメント状構造の高速カメラによる動的観測)	平成 26 年 3 月 24 日
中 田 陽 介	「Investigation of artificial electromagnetic structures in terms of lattice symmetry and self-complementarity」 (格子の対称性と自己補対性の観点からの人工電磁構造体の研究)	平成 26 年 5 月 23 日
後 藤 功 雄	「Word Reordering for Statistical Machine Translation via Modeling Structural Differences between Languages」 (統計的機械翻訳のための言語構造の違いのモデル化による語順推定)	平成 26 年 5 月 23 日
Mirza Golam Kibria	「Radio Resource Allocation Optimization for Cellular Wireless Networks」 (セルラワイヤレスネットワークにおける無線資源割当最適化)	平成 26 年 7 月 23 日
石 群	「Action History Volume for Spatiotemporal Editing of 3D Video in Multi-party Interaction Scenes」 (複数人物インタラクションシーンにおける Action History Volume を用いた 3 次元ビデオの時空間編集)	平成 26 年 9 月 24 日
布 房 夫	「Quality-of-Service Control Scheme for Wireless Local Area Networks」 (無線ローカルエリアネットワークにおける通信品質制御方式の研究)	平成 26 年 9 月 24 日
新 谷 道 広	「デバイス特性推定に基づく集積回路の適応型テストに関する研究」	平成 26 年 9 月 26 日

米 谷 竜 (松山教授)

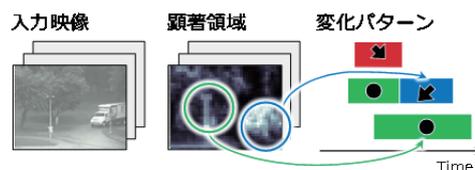
「Modeling Spatiotemporal Correlations between Video Saliency and Gaze Dynamics」  
(映像の視覚的顕著性と視線ダイナミクス間の時空間相関モデリング)

平成 25 年 11 月 25 日授与

我々がテレビやスマートフォンといったディスプレイ端末を利用し、映像コンテンツを閲覧する状況において、その注視行動（何をどのように見るか）はしばしば映像コンテンツ中の視覚的イベント（例：映画におけるシーンの切り替わりやコマーシャルにおけるロゴの出現）に影響される。このような注視行動の解析に関する研究は、人間がどのような視覚的イベントに注意を引き付けられるかを明らかにするという基礎研究的な側面に加え、マーケティングやインタフェースデザインにおいて人間の注視行動を活用するという応用的な側面を持つものであり、視覚心理をはじめコンピュータビジョン、インタラクションといった分野において長く取り組まれている。とりわけ近年では、視線計測技術や映像解析技術の高度化、データ処理の大規模・高速化にともない、映像と視線の関係、さらには興味や集中といった人間の内的状態と視線の関係を統計的機械学習により獲得する試みが盛んになっている。その一方で、既存研究で扱われるコンテンツは実験者により統制されたものが中心であり、様々な視覚的イベントを持った複雑な映像コンテンツに対する注視行動の解析は困難であった。

本論文では上述の問題を解決するために、複雑な映像ダイナミクスと視線ダイナミクスの関係性を単純・系統的な変化パターンを用いてモデル化・学習する新たなアプローチを提案した。具体的にはまず、映像中において人間の目を引きつける顕著領域を抽出し、領域の持つ基礎的な変化パターンを組み合わせることで、物体の出現や移動、シーンの切り替わりといった様々な視覚的イベントを含む映像ダイナミクスを効率的に表現する顕著性変動モデルを提案した（図1 (a)）。さらに、映像・視線ダイナミクス間の関係性として「領域変化パターンの組み合わせからなる特定の映像シーンに相関してどのような視線パターンが現れるか」および「特定の領域変化パターンに対して視線がどの程度の時空間ずれをとまって反応するか」の2種類（これらを合わせて本論文では時空間相関と名付けた）を記述するモデルを開発し（図1 (b)）、実環境における注視行動解析においてその有効性を示した。たとえば、映像を閲覧する際の注視行動から内的状態を推定するタスクでは、顕著性変動モデルを用いて映像シーンを記述・分類し、シーンの種類ごとに異なる視線特徴を抽出・学習することで、これまで困難であったシーンの変化に適応的な推定を実現した（図1 (c)）。ほかにも、映像と視線データのペアから視線が向きやすい映像特徴を学習することで未知映像のどこが見られやすいかを予測するタスクでは、顕著領域の変化パターンと視線の時間的ずれを特徴として利用することで、映像中の特定の動きに対して視線が遅れて反応するという状況を扱える新たな予測手法を提案し、その有効性を確認した（図1 (d)）。

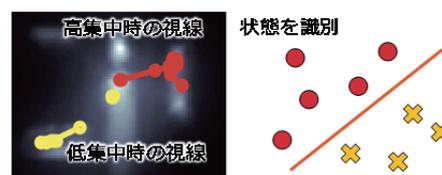
(a) 顕著性変動モデル



(b) 映像・視線間の時空間相関



(c) 視線情報からの内的状態推定



(d) 映像からの視線予測



図1 時空間相関モデリングと注視行動解析

Pedro Favuzzi Antonio (川上教授)

[Ab-initio design methods for selective and efficient optomechanical control of nanophotonic structures]

(ナノフォトニック構造の選択的かつ効率的なオプトメカニカル制御のための第一原理設計)  
平成 26 年 1 月 23 日授与

The objective of my thesis was to develop methods and techniques to better understand and tailor optical forces between photonic waveguides by studying the relationship between the behavior of such forces and the morphology of the photonic system. In practice this implies an increased ability to control the position and vibrational modes of nano-mechanical systems via optical forces.

This is not only an important step toward the development of simple MEMS devices based on such interaction but the increased flexibility of such effect should allow the realization of novel all optical photonic devices. Throw-out my PhD I developed simple and intuitive methods that can be used to describe and predict both magnitude and direction of optical forces between (but not limited to) parallel waveguides which can be used to increase our ability to control the forces acting between them. This methodology allowed us to find structures which could be used to induce repulsive optical force at all separations as well as trapping effect under conditions that could be controlled dynamically; examples of which are shown in Figs. 1 and 2.

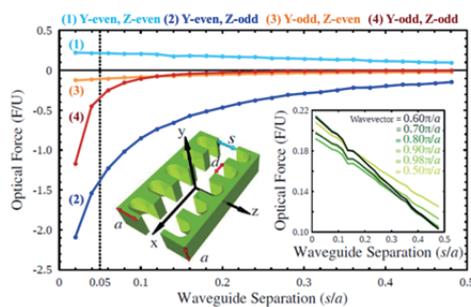


Figure 1. The geometry in inset shows repulsive optical forces ( $F > 0$ ) for all separations

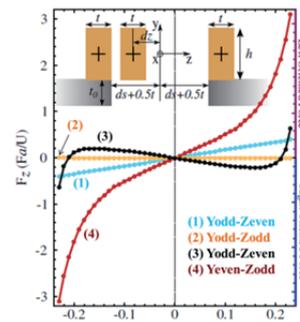


Figure 2. The geometry in inset is an example where optical forces form a stable trapping potential at  $dz/a = 0$

Finally the same technique can be used to design structures in which the mechanical and optical mode are mode-matched, thus promising novel methods to drive the optomechanical interaction (Fig. 3).

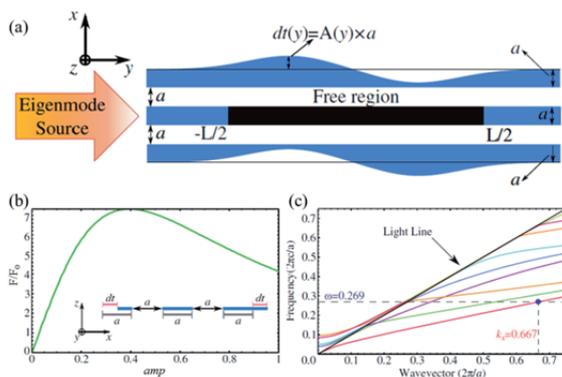


Figure 3. a) Proposed geometry profile. b) expected force distribution along the y-axis. c) structure dispersion diagram

泉 朋子 (黒橋教授)

「Normalization and Similarity Recognition of Complex Predicate Phrases Based on Linguistically-Motivated Evidence」

(言語学的特徴を用いた述部の正規化と同義性判定)

平成 26 年 1 月 23 日授与

ブログ、Twitter、対話ログなど大量のテキストデータから有益な情報を抽出するためには、計算機による深い意味理解が必要である。特に、「つながらない」「わからない」など「どうした」を表す述部は、文の核情報を表しており、これら述部の意味を正しく計算機が扱えることで、意見マイニングや、QA/対話システム、検索エンジンなど後段の言語処理技術の精度を大幅に向上させることが可能である。しかし、これらの述部は、その表現の多様性ゆえに、計算機で意味を扱う事（すなわち同義性を認識する事）が困難である。例えば、「つながらない」という表現も、「接続を行うことができない」「つながらんのですが」など様々な言い方で表現される。

本論文では、文の「どうした」を表す述部に焦点を当て、これらの多様な述部表現を、言語学的な分析をもとに、同じ出来事を表す単純な表現に正規化し、さらに文脈をも考慮し同義となる述部を自動で認識する高精度な同義判定技術を提案した。

本論文で対象にする述部の多様性には、「形態素レベルでの多様性」「構造レベルでの多様性」「意味レベルでの多様性」という3つの要因が関連している。第2章では、「形態素レベルでの多様性」に焦点をあて、日本語の文末表現の正規化を提案している。出来事の意味に影響を与える文末表現を、形式意味論の「時制」「モダリティ」「否定」という3つの軸をもとに定義し、これらに属す表現のみを最低限残す正規化ルールを確立し、述部を「同じ出来事を表す最も単純な表現」に正規化した。第3章では、「構造レベルでの多様性」に焦点をあて、「解約を行う」「納得が行かない」などの機能動詞構造の正規化を提案した。動詞の文法機能のみを保持しつつ、単純な述部に言い換えるための正規化パターンを構築し、さらに、機能動詞構造と本動詞構造の曖昧性解消に関して、大規模な新聞・ブログコーパスを用いて「曖昧性解消辞書」を構築した。第4章では、「意味レベルでの多様性」に焦点を当て、「メモリを消費」と「メモリを食う」のような文脈によって同義になり得る述部をも対象とした、述部の同義性判定手法を提案した。辞書定義文、用言属性、分布類似度、機能表現といった異なる言語情報から、同義述部の特徴を抽出し、同義判定の素性として用いた。さらに、今まで言語処理では困難であった、反義関係を表す述部と同義関係を表す述部の識別を、反義関係に特化した言語的特徴を用いることで、正しく判別することを可能にし、既存手法に比べて高精度に述部の同義性を判定することができた。

今後は、これら述部の同義性判定技術を用いて、QAシステムや検索エンジンなど、上位アプリケーションでの効果を検証するとともに、同義だけではなく反義・含意・推意といったより深い述部の意味関係の認識・獲得技術の研究を行う。

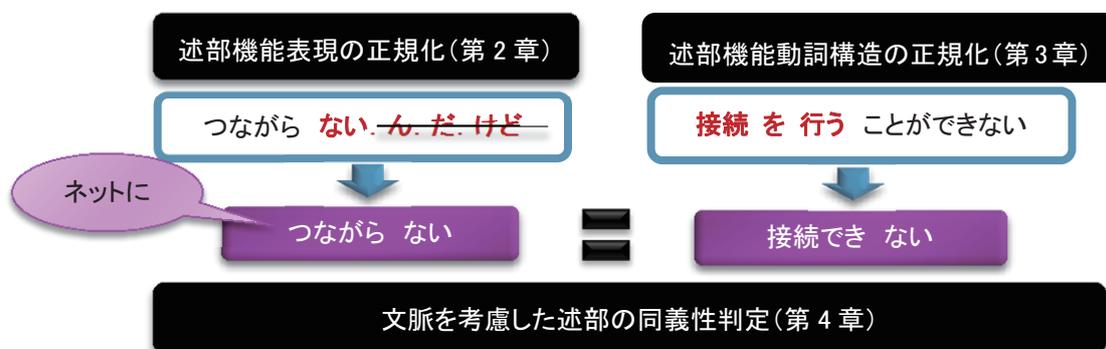


図1：述部の正規化と同義性判定

永原 静恵 (小林教授)

「Studies on Functional Magnetic Resonance Imaging with Higher Spatial and Temporal Resolutions」

(機能的磁気共鳴画像法の高時空間分解能化に関する研究)

平成 26 年 3 月 24 日授与

非侵襲的脳機能計測法により様々な脳機能が明らかにされつつあるが、脳内での複雑な情報処理が想定される高次脳機能については未だ多くの謎が残されている。そのため、脳機能計測法のさらなる発展が期待されている。中でも、血行動態変化を捉えるという計測原理に基づく fMRI (機能的磁気共鳴画像法) は、現在最も一般的に使用されているが、時間分解能が低く、空間分解能も十分であるとは言えない。本研究では、従来手法より高い時空間分解能が期待できる異なる計測原理に基づく 2 種類の fMRI 手法について検討を行った。

1 つ目の手法は、水分子の拡散情報を画像化する DWI (拡散強調画像) を用いた fMRI 手法である。本手法は脳神経活動に伴う神経細胞の体積変化により細胞近傍に存在する水分子の拡散が変化することを利用して、そこで、神経細胞近傍領域の水分子の拡散現象を Monte-Carlo 法を用いたシミュレーションでモデル化し、脳神経細胞の体積変化の前後での MR 信号強度差を最も強調するような撮像パラメータについて検討を行った。結果として、DWI 撮像パラメータについて、それぞれの信号強度及び神経細胞の体積変化前後での信号強度差に対する依存性の詳細を明らかにでき、撮像に適した値を示した。

また、DWI を用いた fMRI 手法についてモデルを拡張し、神経細胞内外領域における水分子の拡散現象を考慮したシミュレーションを行った。新たなモデルを用いたシミュレーションではより現実的な条件の下、水分子の拡散が MR 信号強度にもたらす変化と、撮像パラメータが MR 信号強度に与える影響について検討した。その結果、神経細胞膨張に伴う体積変化により神経細胞近傍の全領域で MR 信号が増加する機序を示し、fMRI としての撮像に適したパラメータの値を示した。

次に、2 つ目の手法として、スピンロック撮像法を用いて脳神経磁場を直接捉える fMRI について検討した。本手法はスピンロック撮像法で用いる RF パルスと撮像中に脳神経細胞から生じる微小磁場の相互作用による MR 信号の局所変化を捉えるものである。そこで、Bloch 方程式に基づき、MR 撮像中に撮像対象に磁場が生じた場合の磁化モーメントの挙動をシミュレーションにより求め、計測原理を分かり易く視覚化した。また、脳神経磁場を擬した振動磁場を発生するループコイルを用いたファントム実験により、MRI を用いて最小で 200 pT 程度の磁場が検出可能であることを示した。

以上のように、本論文では現在注目されている 2 種類の新たな fMRI 手法について、それぞれの計測原理を明らかにし、より良い撮像条件を提案、実証した。

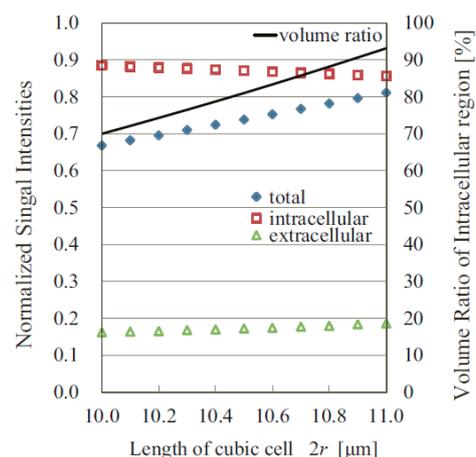


図 1: 脳神経細胞に体積変化が生じた際の神経細胞内外領域及び全領域における MR 信号強度と神経細胞内領域の体積比率

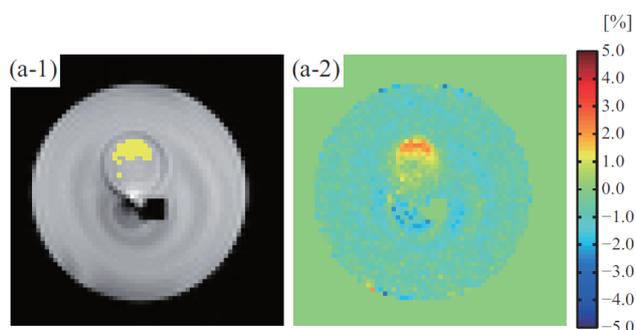


図 2: ループコイル内に微小磁場 (300 pT 程度) が発生した場合の MR 画像 (a-1) と磁場の有無による信号変化率 (a-2)

岩田 達哉 (木本教授)

「Study on Resistive Switching Phenomenon in Metal Oxides for Nonvolatile Memory」  
(不揮発性メモリに向けた金属酸化物における抵抗スイッチング現象に関する研究)

平成 26 年 3 月 24 日授与

抵抗変化型メモリ (ReRAM) は、大容量・高速動作・不揮発性という、既存のメモリでは実現困難な性能を同時に達成し、現行のメモリシステムにパラダイムシフトを起こしうる次世代メモリの候補として注目されている。ReRAM の単一素子は金属酸化物を電極で挟んだキャパシタ構造からなり、その動作は、電圧印加による可逆的かつ不揮発な抵抗変化、いわゆる抵抗スイッチング現象に基づく。抵抗スイッチング現象は、図 1 に示すように、フォーミングと呼ばれる疑似絶縁破壊により、金属酸化物中に局所的な導電性領域 (フィラメント) が形成されることで発現する。そして、フィラメントが断裂 (リセット)、再形成 (セット) を繰り返す事で、低抵抗状態 (LRS) と高抵抗状態 (HRS) との間を変化する、と定性的には説明される。しかしながら、フィラメントの構造や電気伝導特性など、抵抗スイッチング現象には不明な点が数多く存在するため、更なる高性能化に向け、その詳細な理解が不可欠である。

本研究では、金属酸化物として酸化ニッケル (NiO) を用い、フィラメントの構造評価や、素子の電気伝導特性の評価を行い、抵抗スイッチング現象の基礎的な理解に取り組んだ。本研究で得た主要な結果を以下に示す。

1. 素子に形成されたフィラメントの位置を、電流検出型原子間力顕微鏡を用いて観察し、フィラメントの位置を特定した。さらに、位置を特定したフィラメントについて、透過型電子顕微鏡による断面形状観察および、エネルギー分散型 X 線分光による組成分析を行い、フィラメントは酸素が欠乏した領域からなることを明らかにした。
2. 堆積時の酸素供給量を変化させ作製した種々の NiO 薄膜について、薄膜中の残留応力を評価し、フォーミング電圧 ( $V_{Form}$ ) との関係調べた。その結果、NiO 薄膜中の残留圧縮応力が大きくなるほど  $V_{Form}$  が大きくなるという、フォーミングに関する新たな知見を見出した。さらに、NiO 薄膜堆積時の酸素供給量を適切に制御することで、図 2 に示すように、従来に比べ大幅な  $V_{Form}$  の低減 (5 V  $\rightarrow$  2 V : 膜厚はいずれも約 100nm) を可能にし、2 桁以上の動作電流 ( $I_{Reset}$ ) の低減 (30mA  $\rightarrow$  80  $\mu$ A) を達成した。
3. 初期状態および LRS (フィラメント形成)、HRS (フィラメント断裂)、それぞれにおける直流・交流伝導特性を評価した。LRS においては、フィラメント起因と考えられる伝導特性、初期状態においては NiO バルク起因の伝導特性がそれぞれ見られた。一方、HRS では LRS 同様、フィラメント起因と考えられる伝導特性が支配的であることを明らかにした。このような HRS における伝導特性は、従来モデル、すなわち、「HRS においては、フィラメント断裂部、すなわち初期状態と同等となった領域によって素子全体の電流 (抵抗) がほとんど決定される」というモデルでは説明できず、従来モデルを修正しうる重要かつ新たな知見である。

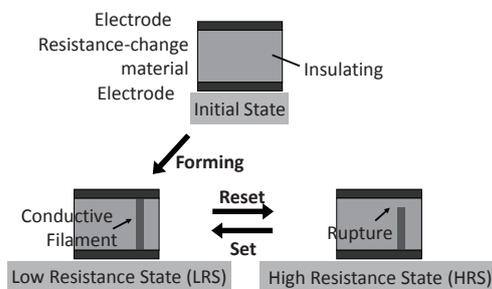


図 1 : 抵抗スイッチング現象のモデル図。

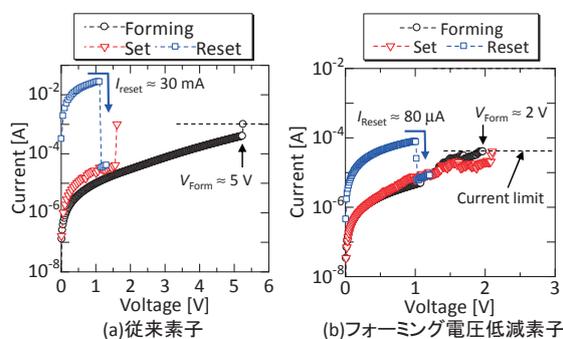


図 2 : (a) 従来素子および (b) フォーミング電圧低減素子の電流 - 電圧特性。フォーミング電圧の低減 (5 V  $\rightarrow$  2 V) により 2 桁以上動作電流 ( $I_{Reset}$ ) を低減した。

森岡直也 (木本教授)

「Fundamental Study on Carrier Transport in Si Nanowire MOSFETs with Smooth Nanowire Surfaces」

(表面平坦化処理を施した Si ナノワイヤ MOSFET におけるキャリア輸送の基礎研究)

平成 26 年 3 月 24 日授与

Si LSI (大規模集積回路) は素子の微細化により著しい性能向上を達成し、現代の情報化社会を支えてきた。しかし、さらなる微細化に向けて短チャネル効果の抑制が課題となっている。Si ナノワイヤ (NW) MOSFET は、直径数 nm の Si NW (量子細線) をゲート電極で包み込んだ構造のトランジスタであり、ゲートによる静電制御性が極めて良好である。このため、短チャネル効果を抑制できると期待されている。

一方、Si NW MOSFET の電気伝導特性の理解は未だ不足している。理由として、電気伝導に影響を与える電子状態が NW の結晶方位、断面形状・サイズ等に依存し、その物理的理解が不十分であること、NW 作製時に生じる太さの揺らぎや表面ラフネスが NW の本質的な電気伝導特性の発現を妨げることが挙げられる。本論文では、Si NW の価電子帯の計算、Si NW の表面平坦化プロセスの研究、そして表面平坦化を施した Si NW MOSFET の作製・評価を実施し、Si NW MOSFET におけるキャリア輸送の研究を行った。主要な内容を以下に示す。

1. 様々な構造の Si NW の価電子帯構造や正孔状態を理論的に計算し、NW MOSFET に適する方位・断面形状構造を予測するとともに、正孔状態の NW 構造依存性が波動関数の観点から解釈できることを示した。
2. Si NW を作製し、減圧水素雰囲気中での熱処理 (水素アニール) による NW の表面平坦化を行った。プロセス条件の工夫により、本手法で従来困難であった様々な方位の微細な Si NW (幅 9 ~ 20 nm、直径換算 10 ~ 23 nm) の平坦化に成功した (図 1)。
3. 電子・正孔の両方の輸送特性を単一の NW で評価可能な特殊な構造の Si NW MOSFET を、平坦化処理を適用して作製し、良好なトランジスタ動作を得た。低温での測定で相互コンダクタンスに振動が現れ、これは NW に特有な状態密度に起因する移動度の振動と考える。本モデルに基づき、実験で作製した NW と同構造の NW のバンド構造計算を行い、コンダクタンス振動を理論的に計算すると、正孔・電子の両方において実験とよく一致した (図 2)。本結果は、振動現象のモデルの正当性に加えて、実験で作製した Si NW のバンド構造が理論計算により正しく予測できることを示唆している。これは、バンド構造の観点からデバイス性能を予測・実験と比較して、デバイス構造を最適化してゆく上で非常に重要な知見である。

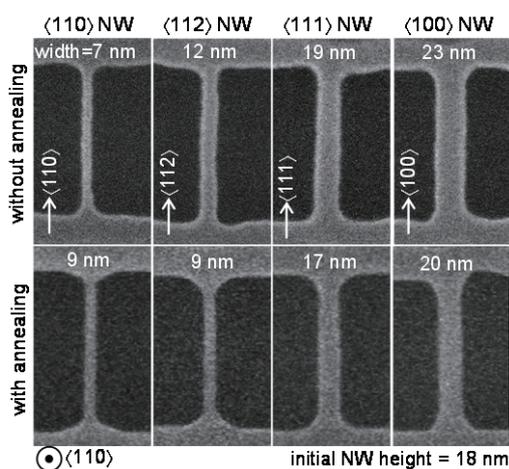


図 1 様々な結晶方位の微細な Si NW の水素アニールによる表面平滑化 (上段: 水素アニールなし、下段: 水素アニールあり)

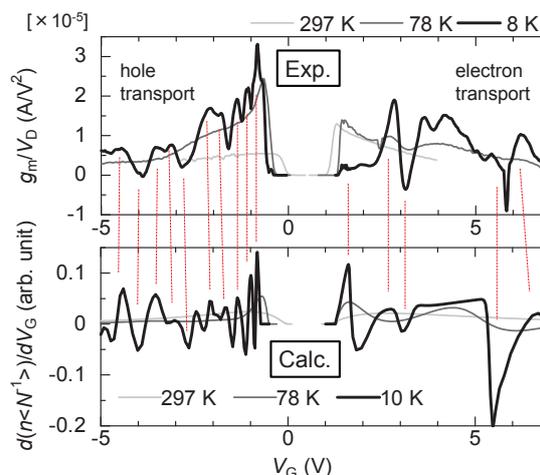


図 2 直径 7.5 nm の Si NW MOSFET の相互コンダクタンス-ゲート電圧特性の温度依存性 (上段: 実験結果、下段: 理論計算によるバンド構造から予想した振動)

広瀬 政 晴 (川上教授)

「デュアルプローブ原子間力顕微鏡の開発および有機半導体ナノスケール電気伝導評価への応用」

平成 26 年 3 月 24 日授与

ナノ物性計測技術は、新規なナノ材料やナノスケール電子素子の開発における必須の基盤技術となっており、その重要性はますます高まっている。特に、原子間力顕微鏡 (AFM) をベースとする各種のナノプローブ計測法は、測定対象や測定環境に基本的な制約がないことから、さまざまな研究分野で広く用いられている。一方、半導体性の有機分子薄膜材料を用いる「有機エレクトロニクス」や、単一の分子自身もつ電子物性に根ざした「分子エレクトロニクス」分野は、新たな分子材料開発の進展に伴って急速に発展しつつある。本論文では、独立制御可能な2本のプローブを有するデュアルプローブ AFM (DP-AFM) の開発を通じて、有機分子のナノスケール電荷輸送特性を実験的に明らかにした研究内容およびその結果を記述している。

プローブの連携操作が必要となる DP-AFM では、プローブを精密に動作させることが極めて重要である。今回、プローブを平面走査する際の XY 軸間の動作干渉を抑制するため、板ばね機構を動作ガイドとする新たな走査機構を開発し、各軸の運動が直交していることを実験的に確認した。また、最低次の機械共振周波数は 7 kHz を上回り、高速な運動性能が実現した。

図1は、2本のプローブを電極とする FET チャンネル伝導測定の様式図である。プローブには、Si 探針表面を金属でコートした導電性探針を用い、また、SiO<sub>2</sub> 付きの高ドーピングシリコン基板をゲート電極として用いている。各探針を所望の場所に位置決めすることで、試料上の任意の2点間の伝導測定が可能となる。つまり電極パターンのない、試料薄膜だけの状態でも、FET 特性を計測することができる。図2は、真空蒸着法で成膜した無置換オリゴチオフェン6量体 ( $\alpha$ -6T) 微結晶の FET 電気特性である。図中 AFM 像の ● 位置にソース探針、× 位置にドレイン探針を接触させ、ゲート電圧依存の伝導特性を測定した。得られたホール移動度は、多結晶試料を用いた先行研究の報告値を2桁上回る値となり、多結晶グレイン薄膜チャンネルの素子を測定する従来手法では困難であった、結晶単位での伝導測定が可能であることを示した。

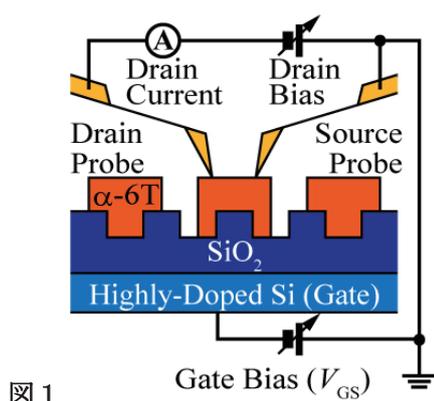


図 1

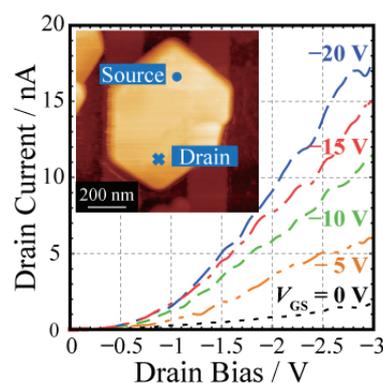


図 2

図 1 : 導電性探針を用いた伝導計測の様式図。試料上の所望の位置で計測をおこなうことができる。

図 2 : シリコン基板に蒸着成膜した無置換オリゴチオフェン6量体結晶上で計測した電気伝導特性。

金 潤 碩 (川上教授)

「Effects of Potential Modulations on Optical Gain Properties in InGaN-based Green Laser Diodes」

(InGaN 緑色レーザダイオードの光学利得特性におけるポテンシャル変調の効果)

平成 26 年 3 月 24 日授与

Recently, the demand for green laser diodes (LDs) has increased remarkably due to their use in several applications such as full color display, medical applications, and etc. Up until 2008, it was difficult to fabricate green LDs using III-nitrides since their threshold current densities increase significantly due to strain induced piezoelectric polarization and inhomogeneous broadening by tail states in the InGaN layer. (Those two effects were defined as “potential modulations” in this thesis.) By the efforts of several leading researchers, the green LDs have successfully been fabricated with InGaN-based quantum wells (QWs) on the  $\{20\bar{2}1\}$  semipolar crystal plane for the first time, and then followed by the (0001) polar plane.

In this thesis, above two major potential modulations in both the  $\{20\bar{2}1\}$  and (0001) LD structures are systematically studied by using optical characterization methods such as time-resolved photoluminescence (TRPL), confocal nanoscopic PL mapping, and scanning near field optical microscopy (SNOM).

For the semipolar LDs, a significantly reduced carrier recombination lifetime was confirmed. This observation suggested a smaller internal electric field and consequent greater overlap integral between electron and hole wavefunctions than in conventional green LDs on polar plane. Then SNOM results show very uniform luminescence as displayed in Fig. 1. Both of them may contribute to the increase in the material gain.

For the polar LDs, suppressed inhomogeneity was confirmed. Such a uniform luminescence property is owing to the improved epitaxial technology of InGaN layers and analyzed by confocal PL mapping as shown in Fig. 2. Furthermore, it was experimentally revealed that a thinner QW effectively avoided the influence of the polarization induced electric field, even though it was stronger than in conventional one due to a higher In composition to compensate for the reduced well width. Again, those improvements contribute to the gain increase.

Optical gain properties of both green LDs were successfully assessed by the Hakki-Paoli's method. The material gain, optical confinement factor, and internal loss were evaluated. It was demonstrated that competition among them determines the lasing properties.

I acknowledge Sumitomo Electric Industries and Nichia Corporation for providing state-of-the-art green LDs.

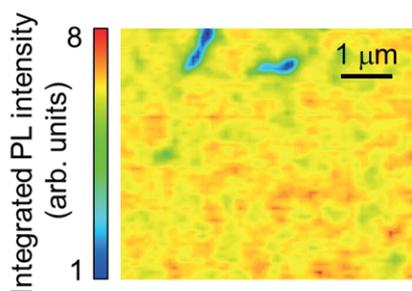


Figure 1. SNOM-PL intensity mapping of an InGaN green QW on the semipolar  $\{20\bar{2}1\}$  plane.

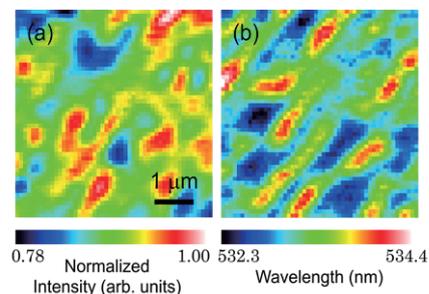


Figure 2. Confocal nanoscopic PL (a) intensity and (b) wavelength mappings of a polar (0001) green InGaN QW.

## 西 中 淳 一 (川上教授)

## 「緑色レーザのための半極性 GaN 系歪多層構造の設計と作製」

平成 26 年 3 月 24 日授与

レーザダイオード (LD) は、赤色・青色が既に実用化され、緑色が揃えば光の 3 原色を用いたレーザディスプレイが実現可能となる。窒化物半導体 InN と GaN の混晶である InGaN は全組成域にわたって直接遷移型であり、その組成により発光波長を紫外から赤外まで制御することができる。しかしながら、従来用いられてきた極性面上の InGaN 量子井戸 (QW) は、In 組成が大きくなるほど内部電界が大きくなるというデメリットを有するため、緑色 LD の実現は困難である。この解決策として、我々は図 1 に示す半極性  $\{11\bar{2}2\}$  面に着目した。この面方位の利点としては、①内部電界が小さい、②成長時の In 取り込み効率が低い、③偏光スイッチ現象の利用により劈開面を共振器ミラーとして使える、の 3 点が挙げられる。そこで、本論文では半極性  $\{11\bar{2}2\}$  面上への緑色 LD の実現に向けた研究を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

1. ウルツ鉱構造の  $(11\bar{2}2)$  と  $(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})$  面では、その表面の構造は等価ではないため、これらの面上への結晶成長には差異が生じると考えられる。GaN ホモエピタキシャル成長に関しては、 $(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})$  の方が幅広い成長条件で平坦になりやすく、意図しない不純物が入りにくいことが分かった。一方、p 型ドーパントである Mg のドーピング制御性に関しては、 $(11\bar{2}2)$  の方が優れていた。InGaN に関しては、 $(11\bar{2}2)$  の方が In 取り込み効率・ヘテロ界面平坦性の両面で優れていることを明らかにした。これらのことから、LD を志向する場合には  $(11\bar{2}2)$  の方が適していると結論付けた。
2. 窒化物半導体非極性面上ヘテロ構造に対し、異方性を考慮した臨界膜厚の計算手法を確立した。また、InGaN/GaN 多重量子井戸のように複雑な歪多層構造に対しては、これを等価な InGaN 単層膜と見なすことによって、図 2 のように実験結果をよく説明できることを明らかにした。
3. 上記のような計算手法を、より複雑な歪多層構造である LD 構造にも拡張し、その設計と作製を行った。その結果、 $(11\bar{2}2)$  GaN 基板上への LD 構造のコヒーレント成長に成功した。さらに、これにデバイス加工を施し、図 3 に示すように、電流注入による緑色 (波長 540 nm) の自然放出光を得た。
4. 窒化物半導体 LD では、長波長ほど光閉じ込めが弱くなるため、これを解決すべく新規光閉じ込め構造を提案した。1 つは InGaN/AlGaIn 応力補償超格子クラッドであり、急峻なヘテロ界面を有し、クラッド層として十分な厚さの超格子の作製に成功した。もう 1 つはポイド (空隙) をクラッド層として利用するもので、ストライプ溝加工を施した GaN 基板上に成長を行うことで、ポイド上に LD 構造を作製することができた。

以上の結果により、本研究では高品質な非極性面 LD の設計手法を確立することができた。これは、今後の窒化物半導体 LD のさらなる発振波長領域拡大や高性能化に大きく貢献するものと期待される。

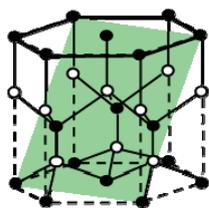


図 1: 半極性  $\{11\bar{2}2\}$  面の模式図

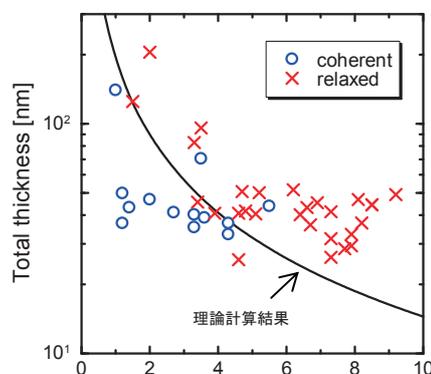


図 2: 半極性  $(11\bar{2}2)$ InGaN/GaN 多重量子井戸の臨界膜厚

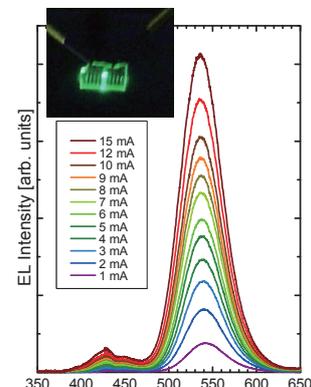


図 3: 半極性  $(11\bar{2}2)$ GaN 基板上緑色 LD の発光スペクトルと発光像

大 音 隆 男 (川上教授)

「Emission Mechanisms in Al-rich AlGa<sub>N</sub> Quantum Wells toward Deep Ultraviolet Light Emitters by Electron Beam Pumping」

(電子線励起深紫外発光素子に向けた高Al組成AlGa<sub>N</sub>量子井戸の発光機構に関する研究)

平成 26 年 3 月 24 日授与

深紫外光は水銀ランプやエキシマレーザの開発によって、多くの分野で応用がなされ、社会を支える重要な光となっている。近年、ランプ系の光源から有毒な物質を使わない環境にやさしい窒化物半導体 AlGa<sub>N</sub> を用いた固体光源への置き換えが望まれている。しかしながら、高効率な発光素子の実現に向けて重要な構造である AlGa<sub>N</sub> 量子井戸の発光機構も未解明であることが数多く存在する。また、高いホール密度を有する高 Al 組成 p 型 AlGa<sub>N</sub> の作製が原理的に困難であることから、AlGa<sub>N</sub> 系の発光ダイオード (LED) の外部量子効率は 10% 以下と非常に小さい。本研究では、高 Al 組成 AlGa<sub>N</sub> 量子井戸の発光機構を解明し、発光デバイスの高効率化に寄与するための知見を得ることを目指した。また、LED の高効率化を律速している p 型の問題を回避し、高効率な深紫外固体光源の実現に向けて、AlGa<sub>N</sub> 量子井戸の電子線励起を用いた発光デバイスを提案し、その有用性を実証した。

まず、弱励起条件下における高 Al 組成 AlGa<sub>N</sub> 量子井戸の発光機構を解明するために、Xe<sub>2</sub>\* エキシマランプを用いた弱励起 PL 測定系を提案・構築した。また、CL 測定によって微小領域からの発光を観測・評価することで、発光機構を調べた。その結果、AlGa<sub>N</sub> 量子井戸において、二つの局在深さの異なる局在準位に基づいた発光機構を明らかにした。さらに、井戸幅の薄い量子井戸では、室温付近で励起子の深い局在準位への流れ込みが顕在化しており、局地的に明るく発光する様子を観測した。

次に、高 Al 組成 AlGa<sub>N</sub> 量子井戸の光学利得特性を励起長可変法によって調査した。表面 PL に比べて半値幅が大幅に減少し、励起長の増加に伴って PL 強度が指数関数的に増加することから、増幅された自然放出光 (ASE) の観測に成功した。また、光学利得の消費による ASE の飽和現象に伴って、ピークエネルギーが低エネルギー側に移動することを解明した。また、光学利得の井戸幅依存性の測定によって、最大 140cm<sup>-1</sup> のモード利得を達成した。図 1 に示したように、Al 組成が約 80% 以上で、TE モードから TM モードへの利得偏光スイッチングが生じることを初めて実験的に検証した。

最後に、再吸収を抑制し、高い内部量子効率が得られ、偏光特性の観点から光取り出し効率の向上を見込める AlGa<sub>N</sub> 量子井戸構造の電子線励起を提案し、評価を行った。Al 組成 69%, 井戸幅 1 nm の量子井戸において、モンテカルロシミュレーションにより最適な加速電圧を見積もり、最大光出力 100 mW を達成した (図 2)。得られた結果は、深紫外発光デバイスにおいて、電子線励起が主な励起手法になることを示唆している。

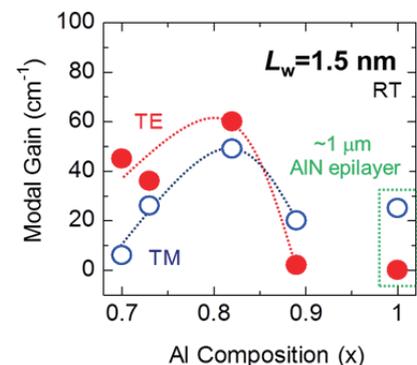


図 1 : AlGa<sub>N</sub> 量子井戸の光学利得の偏光依存性

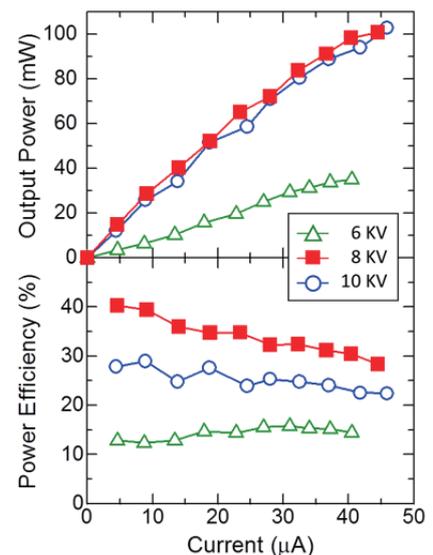


図 2 : 電子線励起した AlGa<sub>N</sub> 量子井戸の光出力とパワー効率。

Lee Yoonsik (野田教授)

「Hybrid photonic systems consisting of dielectric photonic crystals and plasmonic meta-atoms for nanoscale light manipulation」

平成 26 年 3 月 24 日授与

This dissertation is a summary of the research results of hybrid photonic systems for achieving nanoscale photonic functionality. Here, we proposed a compact and functional photonic system by constructing hybrid photonic platform based on a dielectric photonic-crystal (PC) nanocavity and metallic meta-atoms. Specifically, we used local interactions between the nanocavity and meta-atoms that allow the excitation of not only electric but also magnetic resonance, which can extend current capabilities of photon manipulation techniques with a large degree of freedom.

The key results that we obtained are as follows: First, we designed a hybrid photonic platform which has an intermediate layer (low refractive index material such as SiO<sub>2</sub>) between Si-based PC cavity and meta-atoms, and obtained manageable interaction strength by resonance matching.

Second, we investigated cavity meta-atom response as shown in figure 1. Important interaction features are achieved here as a function of position with respect to meta-atom's resonance type. By observing cavity quality (Q) factors in composite systems, sub-wavelength scale interaction localities were observed.

Third, we devised a new photon manipulation method based on cavity meta-atom response and experimentally demonstrated ability of nanoscale polarization controls such as left-hand/right-hand circular polarization from nanocavity as shown in figure 2.

We expect this approach can be applicable to any type of cavity modes and also can extend to photonic band edge modes in photonic slab structures for the versatile applications such as optical sensing, laser beam patterns in THz or even visual range keeping a selective locality for each meta-atom.

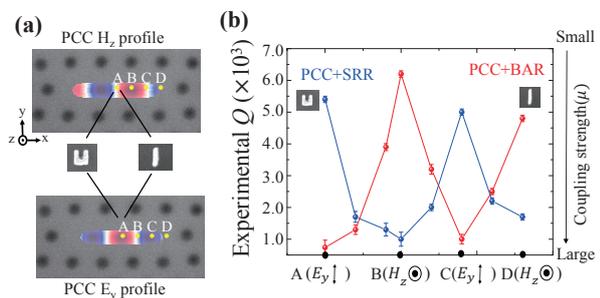


Figure 1. (a) Geometric configuration of PC cavity meta-atom system. Overlaid filled profiles indicate electric/ magnetic mode of PC cavity. (b) Experimental Q-factors as a function of meta-atom position and type

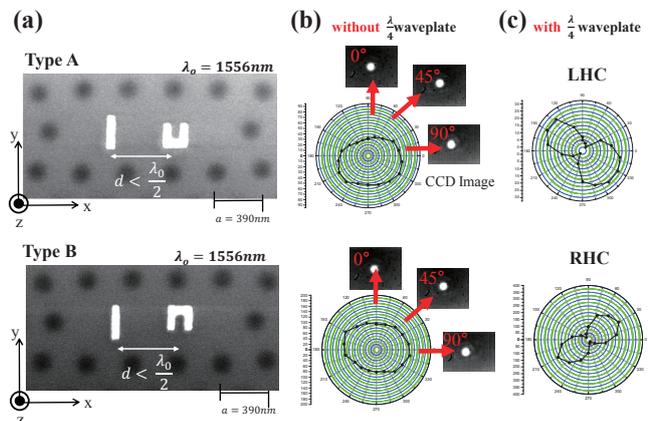


Figure 2. (a) Fabricated samples for each type A, B. Each meta-atom is located at electric/magnetic anti-node position, and type A and B has mirror symmetry. (b) Observed polar-intensity diagram without quarter-wave plate. (c) with quarter-wave plate

中 村 達 也 (野田教授)  
 「量子ドット-フォトニック結晶ナノ共振器結合系の発光制御」  
 平成 26 年 3 月 24 日授与

本論文は、半導体中に形成される単一光子光源である量子ドットからの単一光子放出現象を、光子モードを変調可能な2次元フォトニック結晶共振器内に量子ドットを埋め込むことにより制御可能であることを提案・実証した結果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. 量子ドットとフォトニック結晶共振器の光子モードを強く相互作用させるためには、フォトニック結晶共振器の Q 値が高いこと、およびモード体積が小さいことが要求される。従来、共振器の構造を改良して高 Q 値を達成する方法では、モード体積が増大する傾向があったが、本論文では、共振器の性能劣化に寄与する部分構造を可視化して共振器形状を少しずつ変化させることで、モード体積の増大を抑制しつつ Q 値を増大可能であることを示した。
2. フォトニック結晶スラブの実効屈折率を安定的かつ局所的に制御することのできる窒素堆積剥離法を考案し、共振器 Q 値を変調可能なフォトニック結晶共振器-導波路-反射鏡集積系（図1）に適用することで共振器 Q 値を外部から変調可能であることを実験的に実証した（図2）。
3. フォトニック結晶共振器と量子ドットが強く結合している状態において、共振器の Q 値を変調することによって、量子ドットからの発光レートが大きく変化することを実験的に示した（図3）。

以上の成果は、固体集積共振器発光体結合デバイスにおいて、単一光子レベルでの究極的な発光制御が可能であることを実証したものであり、光子の量子性を用いた次世代光デバイスの発展に大きく貢献するものと期待される。

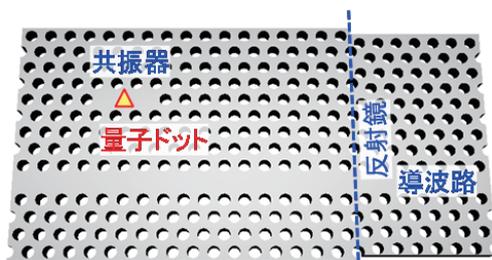


図 1. 量子ドットを内包する 2 次元フォトニック結晶共振器 - 導波路 - 反射鏡集積系.

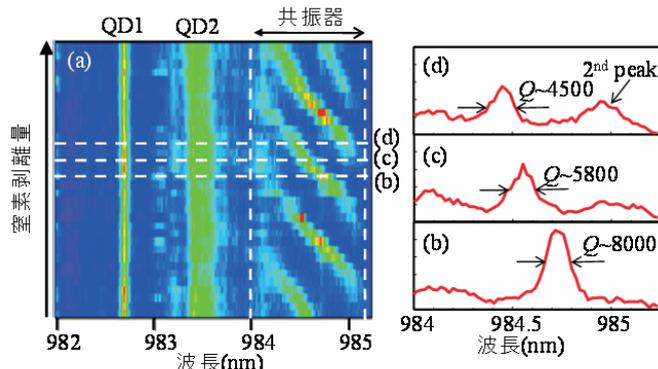


図 2. 窒素剥離による共振器状態の制御.

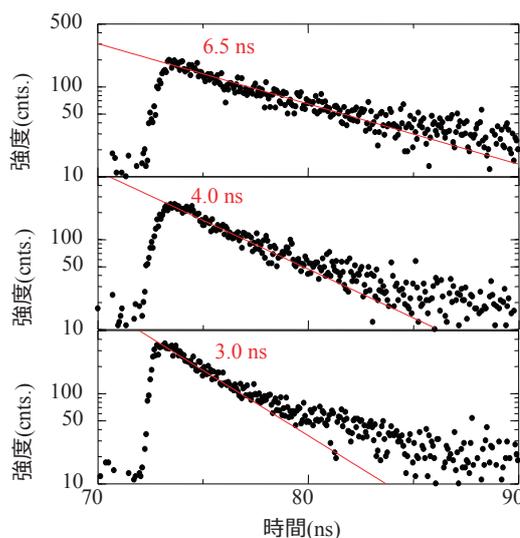


図 3. 同一試料の異なる共振器状態における発光レートの変化.

梁 永 (LIANG YONG) (野田教授)  
 「フォトニック結晶面発光レーザの3次元結合波理論の構築」  
 平成26年3月24日授与

本論文は、基礎・応用両面において大きな注目を集めているフォトニック結晶レーザの共振状態および動作特性を、定量的に解析する理論を構築し、体系化したものである。フォトニック結晶レーザは、フォトニック結晶という2次元周期構造の設計により、大面積・高出力化や、デバイス単体でのビーム射出方向制御など、従来の半導体レーザでは実現しえない、新たな機能を得ることができる。しかしながら、このような優れた機能を与えるフォトニック結晶構造の設計は、これまで3次元FDTD法などの大型計算機を用いた数値シミュレーションに頼っていた。その結果、計算量が数週間と膨大になるため、現実の素子構造（サイズ）への適用が困難であった。本論文では、上記の課題に対して、大型計算機を一切使わず、通常の計算機を用いても短時間で、実際の素子構造に対して信頼性の高い解析が可能な3次元結合波理論の構築に成功している。以下、本論文において得られた主な成果について述べる。

1. 正方格子フォトニック結晶における光の共振状態を形成する主な波数成分である4つの光波に加え、より高次の波数成分を多数含めることが、現実的なデバイス動作を説明する上で、有効であることを見出した。さらに、面垂直方向のデバイス構造にも着目し、光波の結合が垂直方向の電界分布に強く依存することを明らかにした。これらの効果を考慮し、光波の結合を解析的に取り扱う3次元結合波方程式を導出し、通常の計算機を用いてわずか1秒で一つの結晶構造（無限周期）に対する高速かつ精度の高い解析が実現できることを示した（図1(a)）。
2. 現実のデバイスにおける共振モードの包絡線分布や境界条件を考慮し、3次元結合波方程式理論を有限周期構造へと拡張した。実デバイスの動作特性解析を行ったところ、これまで報告された実験結果をよく再現できた（図1(b)）。また、素子サイズ（周期数）を大きくするに従って、発振するバンド端モードが入れ替わり、さらに高次の包絡分布をもつ高次のモードによるモード競合が起こり得ることを初めて見出した。
3. 任意の結晶構造を含めた体系的な設計が可能とする理論へと発展させた。具体的には、面内方向には正方格子、三角格子、面心長方格子を含む2次元共振状態が形成可能な全ての格子配列、面垂直方向には傾斜した側壁をもつ孔形状をも取り扱える一般化した3次元結合波方程式を導出した。また、実験と数値計算との比較により、拡張した理論モデルの計算精度と妥当性を確認した。さらに、電流の注入時の屈折率変化やゲインの変化などを結合波モデル中に取り入れ、レーザ発振閾値以外の解析にも展開している。

以上の成果は、フォトニック結晶レーザの極めて有力な解析法を確立し、その理論基盤を築いたものであり、フォトニック結晶レーザ研究の進展に大いに貢献すると期待できる。

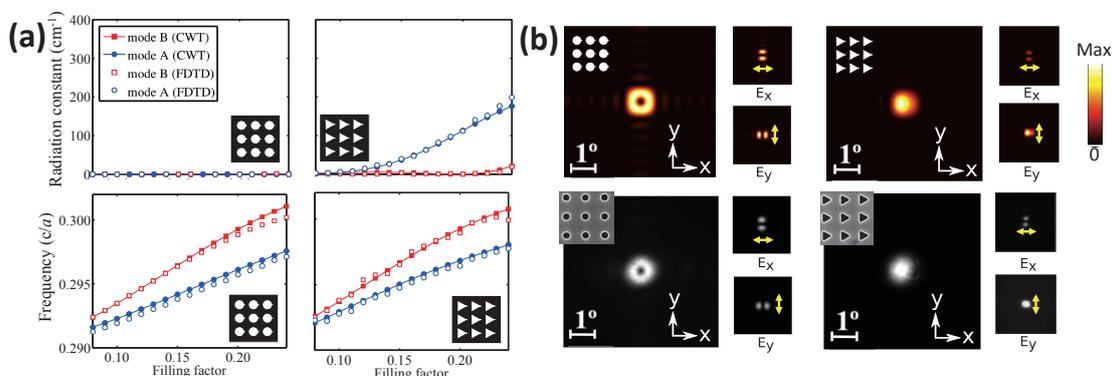


図1：3次元結合波理論による解析例 (a) 計算した共振周波数及び放射係数と3次元FDTD法による数値計算の結果との比較 (b) 計算したビームパターン（上部）と実験結果（下部）の比較

萩 行 正 嗣 (黒橋教授)

「Studies on Annotated Diverse Corpus Construction and Zero Reference Resolution in Japanese」

(日本語の多様な文書からなるタグ付きコーパスの構築及びゼロ照応解析に関する研究)

平成 26 年 3 月 24 日授与

近年、Web の広まりとともに情報検索や機械翻訳などの自然言語処理アプリケーションが広く利用されるようになってきたが、その精度向上には基礎的な自然言語処理解析の精度向上が不可欠である。その基礎的な自然言語処理解析の中の一つにゼロ照応解析がある。ゼロ照応とは用言の項が省略される現象である。例えば「(Φ1 ガ) パスタが好きで、(Φ2 ガ) (Φ3 ヲ) 毎日食べています。」という文では、「誰が」パスタが好きで、「誰が」「何を」毎日食べているのか、という情報は明示的には書かれていない。しかし、実際には、Φ1 および Φ2 はこの文の著者であり、Φ3 は前方で言及された「パスタ」である。ゼロ照応解析は、このような省略された項を推定する処理である。特に日本語においては、ゼロ照応が頻出するため、ゼロ照応解析は日本語の意味解析において必須的な技術の一つであると言える。

従来のゼロ照応解析の研究は主に新聞記事を対象としてきたが、本論文では Web 文書をその対象としている。本論文では、これらの違いとして、文書の著者・読者に着目している。新聞記事では、著者は新聞記者に、読者は購読者に限られており、事件などを報道すること目的のため、著者や読者が話題中に登場することはほとんどない。一方、Web 文書は様々な著者によって様々な読者に向けて書かれており、その内容も blog や通販サイトなどを中心に、著者や読者が話題中に出現することが多い。著者や読者は、省略されやすい、敬語表現などがゼロ照応解析の手掛かりになるといった特徴を持つため、ゼロ照応解析において著者や読者を特別に扱うことは重要である。著者や読者は、上述の例における文書の著者のように明示的に言及する表現が存在しない、外界ゼロ照応として出現する。従来のゼロ照応解析研究の多くは外界ゼロ照応を扱ってこなかったが、著者・読者を扱うには、この外界ゼロ照応を扱うことは必要不可欠であると言える。

本論文では、まず、Web 文書からのタグ付きコーパスの構築について論じている。タグ付けにあたり、著者・読者に関するタグ付けの問題を分析している。一つ目の問題は「私」「我々」「あなた」などの文書の著者や読者について言及する表現の存在である。本論文では、そのような表現を著者・読者表現として定義し、タグ付け基準を整理した。二つ目の問題は、著者・読者が談話構造に出現することで、著者、読者および不特定の人のいずれか複数とも解釈できるようになる項である。本論文では、このような表現を分析し、タグ付けの基準を設定した。そして、1,000 文書からなる Web コーパスを構築し、ゼロ照応関係を含む、様々な意味関係の付与を行った。

そして、本論文では、外界ゼロ照応および著者・読者表現を考慮したゼロ照応解析モデルの提案している。提案手法では、初めに語彙統語パターンを利用して著者・読者表現の自動推定を行う。その後、述語項構造解析の一部として、ゼロ照応解析を行う。この際、外界ゼロ照応に対応する仮想的な談話要素を考慮することで、外界ゼロ照応を扱っている。提案モデルでは、外界ゼロ照応や著者・読者表現を扱わない手法に比べて高い精度を達成している。

ゼロ照応解析は、表層には現れていない現象を扱うという点において、意味解析の一種といえる。今後は、さらに意味解析の技術が発展し、計算機による言語理解が一層進むことが期待される。

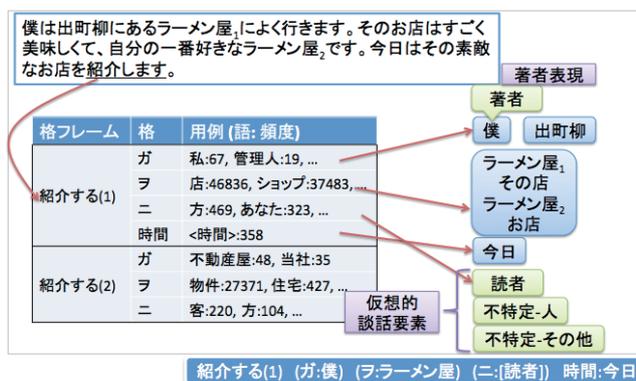


図 1 提案手法によるゼロ照応解析

古 田 潤 (小野寺教授)

「集積回路におけるシングルイベント効果の評価とソフトエラー耐性向上手法の提案」

平成 26 年 3 月 24 日授与

集積回路の微細加工技術により、シングルイベント効果起因のソフトエラーに対する懸念が高まっている。シングルイベント効果は放射線によって生じ、トランジスタの出力を一時的に反転させる。集積回路の微細化に伴いソフトエラーの発生率は増加しており、シングルイベント効果によって複数のトランジスタの出力が反転する多ビットエラー(MCU)の割合も増加している。本論文は回路シミュレーションと中性子線照射による加速試験を用いてシングルイベント効果の特性評価を行い、評価結果を基にしてソフトエラー耐性を向上させる回路設計手法を提案したものである。

回路シミュレーションと加速試験を用いたシングルイベント効果の特性評価では、MCUの原因である寄生バイポーラ効果に着目した。回路シミュレーションによる評価では、放射線による基板電位の変動を回路モデルに組み込むことで、複数のトランジスタへのシングルイベント効果の影響を評価した。また、図1に示すチップを65nmプロセスを用いて試作し、シングルイベント効果を加速試験により実測評価した。実測と回路シミュレーションを用いて評価したMCU発生割合のラッチ間距離依存性を図2に示す。多ビットエラーの割合はラッチ間距離に対して指数で減少することを明らかにした。実測におけるMCU発生率は最大で23%と高く、ソフトエラー耐性回路である多重化回路ではMCUの対策が不可欠であることを示した。さらに寄生バイポーラ効果はMCUの発生だけでなく、単一ビットエラーであるSEUや論理回路で生じる一過性のパルス(SET)のパルス幅にも影響することを明らかにした。

次にシングルイベント効果の評価結果を基にソフトエラー耐性を向上させる手法を提案した。既存のソフトエラー耐性フリップフロップでは一部のトランジスタでSETが生じた場合にエラーとなりやすく、高速動作時にエラー率が増加する問題があった。またMCUを考慮した設計もなされておらず、ソフトエラー耐性が微細化により低下する。本論文では既存回路のソフトエラーに弱い部分の構造を修正することで、高速動作時にもエラー耐性が低下しない回路を提案した。同時にシングルイベント効果の特性を考慮したソフトエラー耐性回路の配置手法の検討を行い、ソフトエラー耐性工場手法を提案した。提案手法を用いて回路を設計し、提案手法のソフトエラー耐性を実測した。その結果、従来回路よりもソフトエラー耐性が高く、通常のフリップフロップの100倍以上のソフトエラー耐性を持つことを確認した。また提案回路では高速動作時にもソフトエラー耐性が低下しないことを動作周波数に対するソフトエラー率の変化を測定することで示した。

以上の研究により微細化によって増加しているソフトエラーを回路設計によって削減する方法を示し、LSIの信頼性向上に貢献した。

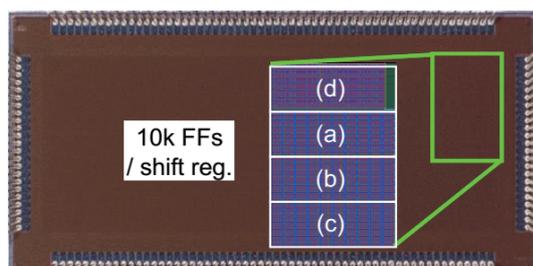


図1 65nmプロセスを用いて設計したチップ

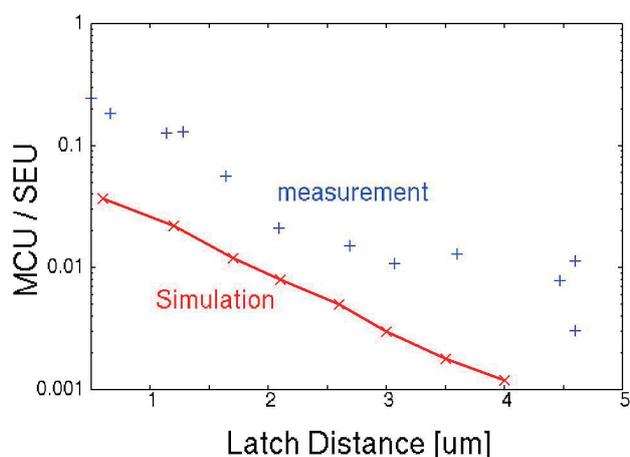


図2 MCU/SEUのラッチ間距離依存性

ZANG Linge (水内教授)

[Study on Edge Fluctuation of Supersonic Molecular-Beam Fueled Plasmas Using Langmuir probes and Fast Cameras in Heliotron J]

(超音速分子ビーム入射時の周辺プラズマにおけるフィラメント状構造の高速カメラによる動的観測)

平成 26 年 3 月 24 日授与

Edge fluctuations in a supersonic molecular-beam injection (SMBI) fueled plasma in Heliotron J have been studied using a combination of an electrostatic probe array and a high speed frame-rate video camera.

The local plasma fluctuations and fluctuation induced particle transport before and after SMBI have been analyzed. In a short duration ( $\sim 4$ ms) just after SMBI, the low frequency broad-band density fluctuation increased, and its probability density function (PDF) changed from a nearly Gaussian to a positively skewed non-Gaussian one. This suggests intermittent structures were produced due to SMBI. Also the fluctuation induced particle transport was greatly enhanced during this short duration. After this short duration, the low frequency broad-band density fluctuation decreased, and the PDF return to a nearly Gaussian shape. Compared with normal gas puff fueling case, the degradation period of plasma stored energy  $W_p$  is very short due to the short pulse injection of SMBI. After this short degradation period, fluctuation induced particle transport was reduced and  $W_p$  started the climbing-up phase. This means the short effect period of gas injection to the edge fluctuation would be an advantage of this novel fueling technique.

In Heliotron J, a high speed frame-rate speed video camera viewing perpendicularly plasma captured filamentary structures along the field line in the edge plasma density fluctuations. The characteristic dynamics of such filamentary structure was revealed just after SMBI in the consecutive images. To overcome the line-integration effect of the camera observation, an electrostatic probe has been combined to get the radial span of the density fluctuation structures observed in camera images. With this technique, we have inferred that the outmost edge of a 20-30kHz density mode is at about 10°mm outside of LCFS. This suggests the combination of camera and Langmuir probe is a powerful tool for edge fluctuation study.

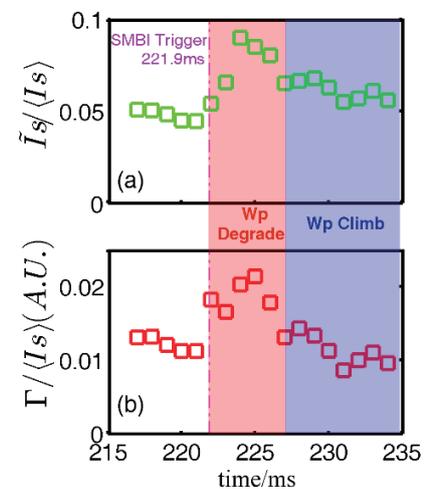


FIG. 1 Time trace of (a) density fluctuation intensity in edge plasma (b) fluctuation induced particle flux. The dot-dash line in magenta indicates the injection timing of SMBI.

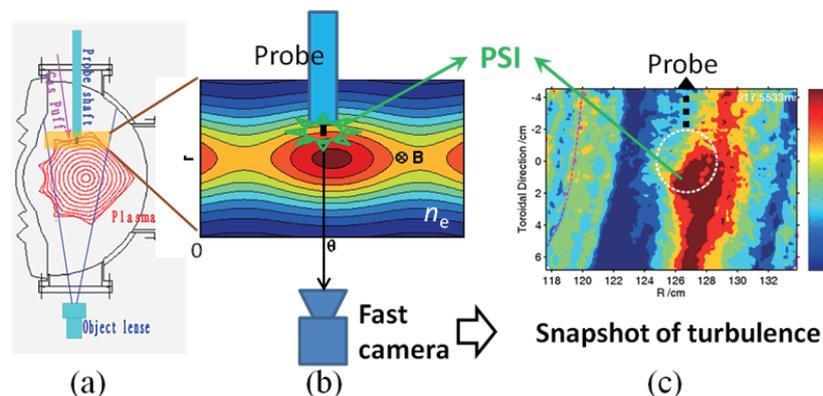


FIG. 2 Method for locating the turbulent structure in plasma (a) Experimental setup, (b) A model of plasma turbulence structure, and interactions between a probe and a plasma (PSI), (c) Snapshot of the experimentally observed density fluctuation structures.

中 田 陽 介 (北野教授)

「Investigation of artificial electromagnetic structures in terms of lattice symmetry and self-complementarity」

(格子の対称性と自己補対性の観点からの人工電磁構造体の研究)

平成 26 年 5 月 23 日授与

電磁波の伝搬を自在に操るために、メタマテリアルと呼ばれる人工構造体が大きな注目を集めている。通常の物質が原子から成るように、メタマテリアルはメタ原子と呼ばれる微小な構造体から構成される。メタ原子の構造を上手く設計することで、今まで自然界では実現不可能と考えられていた負の屈折媒質や、回折限界を越えた集光レンズ、透明マントなど、特異な性質を持つメタマテリアルが実現されてきた。しかしながら、いまだメタマテリアルの持つ可能性が十分に開拓されたわけではない。

メタマテリアルの応答は、その構造によって決定される。そこで、様々な対称性を持ったメタマテリアルを調べることによって、特異な応答を顕在化させることができると考えられる。本研究では、メタ原子が並べられた格子の対称性、および、金属・空隙の入れ替えに対する対称性に着目し、新たな性質を持つメタマテリアルの可能性を探求した。ここで、前者は幾何学的な対称性であり、後者は、構成要素の入れ替えに対する対称性である。以下に得られた結果の要約を示す。

(1) メタマテリアル応用のための強束縛モデルの回路アナログの構築

格子状に配置されたメタ原子間の結合を利用したメタマテリアルにおける電磁伝播を調べるための回路モデルを構築し、特性を解析した。特に量子系と回路系のアナログをブラケット記法によって定式化した。さらに本アナログを用い、フラットバンドと呼ばれる全波数領域で平坦な分散関係を持つ周期回路網を構成した。

(2) 金属カゴメ格子のフラットな共鳴バンドの観測

上記の理論で予言されたフラットバンドの存在を検証するため、金属カゴメ格子の電磁応答をテラヘルツ領域で測定した [ 図 1. (a) ]。この結果、フラットバンドに対応する共鳴反射バンドの観測に成功した [ 図 1. (b) ]。フラットバンドでは群速度が低下するため、波束の伝搬制御に応用できる。

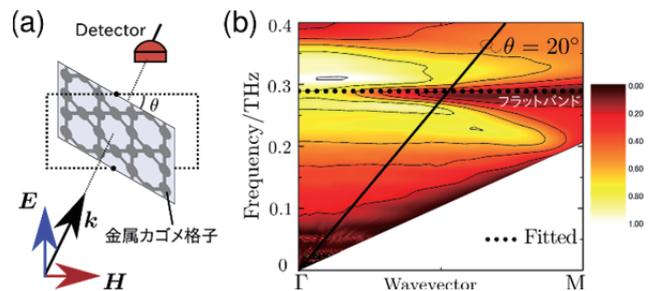


図 1 実験配置 (b) 金属カゴメ格子の透過スペクトル

(3) 自己補対メタ表面の電磁応答の解明

薄い金属スクリーン(メタ表面)における金属部分と空隙部分を入れ替える操作は構造反転 [ 図 2.(a) ] と呼ばれる。本論文では構造反転を抵抗要素が存在する場合に拡張したインピーダンス反転操作のもとで不変な構造である自己補対メタ表面 [ 図 2. (b) ] の電磁応答を理論的に解析した。その結果、自己補対メタ表面が周波数無依存の特性を示すことを明らかにした。さらに、こうした周波数無依存応答をするためのいくつかの十分条件を示した。以上のように本研究によって自己補対メタ表面に関する基礎的性質を理論的に明らかにできた。今後、自己補対メタ表面の特性の実験的検証や広帯域メタマテリアルへの応用に期待がもたれる。

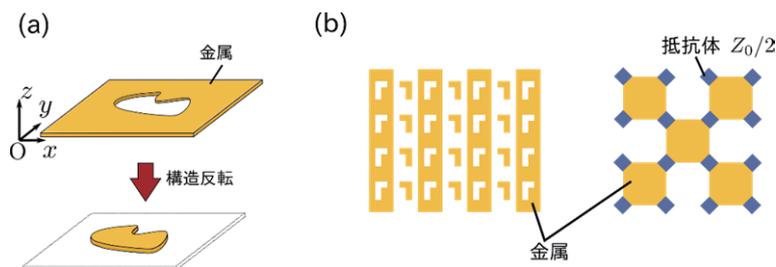


図 2 (a) 構造反転 (b) 自己補対メタ表面の例

後 藤 功 雄 (黒橋教授)

「Word Reordering for Statistical Machine Translation via Modeling Structural Differences between Languages」

(統計的機械翻訳のための言語構造の違いのモデル化による語順推定)

平成 26 年 5 月 23 日授与

機械翻訳はグローバル化が進む現代においてニーズが増加している。近年中心的に研究されている機械翻訳は、大規模な対訳コーパスから翻訳知識を自動獲得して利用する統計的機械翻訳 (SMT) である。機械翻訳は主に「訳語選択」と「語順推定」という 2 種類の処理が必要である。語順が大きく異なる言語間の翻訳では長距離の語順並べ替えが必要であるが、従来の SMT 手法で利用しているフレーズレベルの局所的な情報では長距離の語順並べ替えを高精度に行うことは困難であった。図 1 に語順が大きく異なる言語である日本語と英語の対訳文の例を示す。これらの言語間では、長距離の並べ替えを含む複雑な並べ替えが必要であることが分かる。

入力文から目的言語の構造 (syntax) に従った語順を推定するには、原言語と目的言語の構造の違いに対するモデルが有用である。世界には多くの言語があるが、ほとんどの言語では高性能な構文解析器がない。また、目的言語で構文解析器が使える翻訳のニーズが大きい。そこで、本論文は、構文解析器を必要としない場合および目的言語の構文解析器を利用する場合において、言語構造の違いを既存手法より適切にモデル化することで、SMT における語順推定を改善する手法を提案した。構文解析器を必要としない SMT の語順推定モデルのモデル化手法として、単語列ラベリングに基づく手法を提案した。このモデルは、入力文の翻訳過程において、最後に翻訳した位置と次に翻訳すべき位置候補の範囲をラベル系列で表現することで、動詞句や名詞句などの特徴を捉える。これによって、言語間の構造の違いを近似的にモデル化した。目的言語の構文解析器を利用する SMT の語順推定手法として、2 つの手法を提案した。1 つは構文解析を利用するポストオーダリング手法である。日英の構文構造の違いは大きく、言語間で同期がとれない部分が多いため、モデル化が難しい。それに対して、この提案手法では、目的言語の構造を原言語風の構造に変換した構造と変換前の構造との違いをモデル化することで、言語構造の違いのモデル化を容易にした。もう 1 つは目的言語の構文解析器を用いたプレオーダリング手法である。射影によって目的言語の構造となるべく同期がとれる原言語の構造を構築することにより、言語構造の違いのモデル化という課題を扱いやすくした。

語順の推定には言語構造が重要である。言語構造の同定の性能は改善の余地があるため、構造の同定の改善および構造の解析誤りに頑健な翻訳手法の開発が今後の課題である。

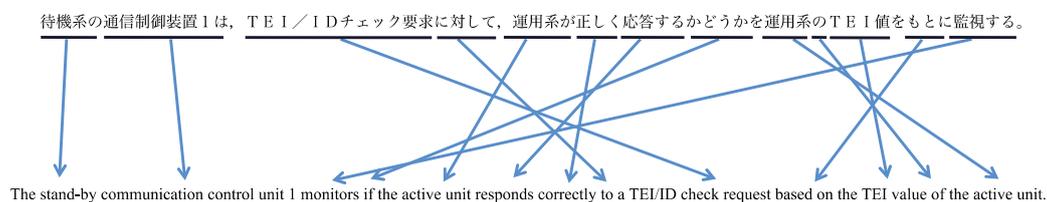


図 1 語順が大きく異なる言語間 (日英) の語順の違いの例

Mirza Golam Kibria (村田准教授)

「Radio Resource Allocation Optimization for Cellular Wireless Networks」

(セルラワイヤレスネットワークにおける無線資源割当最適化)

平成 26 年 7 月 23 日授与

In a typical multiuser cellular system, different users have different types of services requirements, which can be categorized into different classes, such as minimum target data-rate requirements, desired quality of services (QoS) etc. Furthermore, because of the scarcity of wireless bandwidth and transmitting power constraints, the resources need to be allocated judiciously among the users to optimize the system objectives while meeting the users service requirements under various constraints. Unfortunately, most of the times, the resource allocation optimization problems are not convex. To achieve the optimum system objective, we need to be reliant on the global optimal approaches, which are computationally very expensive, and are not applicable in practical communication systems operating under stringent time limit. Furthermore, In channel state information (CSI) feedback based downlink precoding systems, in order to optimize the CSI quantization efficiency, the feedback budgets of the users should be allocated optimally among the partitions and respective channel quality indicator (CQI) and channel direction indicator (CDI). This work focuses on the radio resources (feedback budget, spectrum, power) allocation optimization in cellular wireless networks.

First, we consider the feedback budget allocation optimization problem, we proposed an efficient heuristic approach quantifying the quantization mean-square-error measure (Q-MSE). For a given feedback budget per user, the optimal number of partitions and the corresponding CQI and CDI budgets are derived such that minimum Q-MSE is incurred. The applicability of our proposed optimization approach in frequency-selective channel scenarios and in the systems with users having diverse signal-to-noise is also discussed.

For the resource allocation optimization problem in multiuser orthogonal frequency division multiplexing (MU-OFDM) systems, we have considered several design objectives. An efficient suboptimal resource allocation technique based on sequential parametric convex approximation approach is proposed for a system aiming to optimize the weighted sum-rate under transmitting power constraints. A more simplified approach for the same resource allocation problem is also proposed, which is formulated as an optimization of an exponential function. Both of the proposed solutions are fast, computationally less-complex and provably convergent. We, then, consider the power minimization problem while meeting the users' QoS for a single cell system. In particular, we have proposed two efficient suboptimal solutions. The first proposed approach is based on Lagrange dual decomposition and, the second proposed solution is based on separating the subcarrier and power allocation. Simulation results reveal that the performances of the proposed solutions are very close to the optimal solution.

Finally, we study the resource allocation optimization problem that maximizes the sum-rate of a single cell MU-OFDM system under transmitting power constraint with proportional data rate fairness among the users. We adopt a two-stage optimization process and propose an efficient and low-complexity suboptimal solution that separates the subcarrier and power allocation. The simulation results show that the proposed solution has the best adherence to the desired proportional data rate fairness while achieving the maximum system throughput when compared to the other existing solutions.

石 群 (松山教授)

「Action History Volume for Spatiotemporal Editing of 3D Video in Multi-party Interaction Scenes」

(複数人物インタラクションシーンにおける Action History Volume を用いた 3次元ビデオの時空間編集)

平成 26 年 9 月 24 日授与

3次元ビデオは、3D テレビのように映像が飛び出して見えるステレオ映像、もしくはコンピュータグラフィックスで作成された人工的な 3D アニメーションではなく、自由に運動する対象の 3次元形状と動き、表面テクスチャを全周囲に渡って記録した完全な実写 3次元映像である。3次元ビデオの編集には、従来の 2次元映像に対する信号処理・画像処理的な編集だけでなく、撮影対象が持つ 3次元的な形状および運動情報を考慮した時間的・空間的編集を行わなくてはならない。また、被写体が振袖や袴のような複雑な衣服をまとっている場合には、撮影された 3次元ビデオから骨格構造を推定することが困難であるため、3D アニメーションで用いられる骨格構造に基づいた映像編集法を適用することはできない。本論文は、個別に撮影された人物アクションの 3次元ビデオを編集、合成し、複数人物によるインタラクションシーンを表す 3次元ビデオを生成するための時間的・空間的編集アルゴリズムについてまとめたものであり、得られた成果は以下の通りである。

(1) 運動する対象の部位や視線がある時区間中に走査する 3次元空間を Action History Volume (AHV) と定義し、新たな身体運動の時間的・空間的表現法を考案した。

(2) AHV の表面領域が、その法線方向と身体の運動方向との関係から 3種類にラベル付けされること、様々なアクション編集操作は 3種類のラベルの可能な組み合わせである 6種類のアクションパターンのいずれかによって表現され、各アクションパターンは個別に撮影された 3次元ビデオの位置合わせ問題における制約条件として定式化されることを示した。

(3) 3次元ビデオとして撮影された被写体の視線が定義する AHV を得るために、自由に運動する人物の 3次元ビデオから視線方向を高精度に推定するアルゴリズムを考案した。

(4) AHV を用いた複数人物によるインタラクションシーンの編集アルゴリズムとして、①キー時区間・遷移時区間への分割、②キー時区間におけるアクションパターン制約を満たす解候補探索、③全時区間に渡る最適化という 3段階からなる手法を考案し、実写データにより有効性を示した。



図 1：3次元ビデオの時間的・空間的編集の例。上段：再生時間のみを調節した場合。下段：本手法により適切な動作タイミング・位置となるように時間的・空間的編集をした場合。両者を比べると、上段で生じていた不自然な部位間の空隙や交差が本手法によって適切な位置姿勢へと編集されていることがわかる。

布 房 夫 (守倉教授)

「Quality-of-Service Control Scheme for Wireless Local Area Networks」

(無線ローカルエリアネットワークにおける通信品質制御方式の研究)

平成 26 年 9 月 24 日授与

近年、携帯電話や無線 LAN (Local Area Network) の利用者が爆発的に増加し、無線通信は様々な場所で利用されている (図 1)。本論文では、構内系で利用される無線 LAN、およびその延長上にある M2M (Machine to Machine) 通信を研究の対象とする。無線通信では、有線通信と比べ、スループットが小さく、誤り率も高いという欠点があるが、MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) 方式や多値変調方式等の技術革新により、高機能化する無線端末の無線通信に対する要求を満足させつつある。しかし、まだ十分ではなく、限られた無線リソースを用いて高品質サービスを提供するためには、QoS (Quality of Service) 制御が重要である。また、要求される QoS の実現には MAC 層における無線リソース管理が不可欠である。図 2 に MAC 層通信プロトコル分類を示す。本研究では、それぞれの通信プロトコルにおいて、スループットや伝送遅延時間等のサービス品質を公平に配分、保証する QoS 制御について、従来技術の問題点を明らかにし、それらを解決する手法について検討した。本研究の成果は下記の通りである。

1. 集中制御型無線 LAN において一種類の帯域要求方式のみを用いた場合、伝送遅延時間が増大する。その解決のため、帯域要求方法 (ポーリング/ランダムアクセス) を動的に切り替え、最低帯域を保証しながら余剰帯域を平等分配する方法を提案し、伝送遅延時間を低減できることを示した。
2. ATM (Asynchronous Transfer Mode) を用いた集中制御型無線 LAN では無線の伝送遅延時間が大きい場合、無線端末の送信レートの安定制御が難しい。そこで、VD/VS (Virtual Destination/Virtual Source) 技術を用い送信レートを予測制御する方式を提案し、公平性が改善できることを示した。
3. 自律分散制御型無線 LAN の優先制御方式では各無線端末のスループットを定量的に保証することが難しい。本研究では ACK フレームに 1 ビットのフラグ情報を載せることで端末送信レートを制御する方法を提案し、端末毎にそれぞれのスループットを保証できることを示した。
4. M2M 通信システムでは、一つの無線基地局に非常に多くの端末を収容する。そのため、収容トラヒックが非常に大きく変動し伝送遅延時間の保証が難しい。この課題を解決するために、収容トラヒック量から無線アクセスパラメータの適正値を算出し端末の送信レートを制御する伝送遅延時間保証方法を提案し、優先端末の伝送遅延時間を収容トラヒックに依らずほぼ一定にできることを示した。

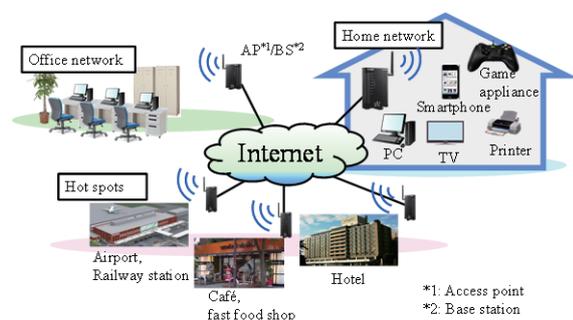


図 1 無線通信の利用

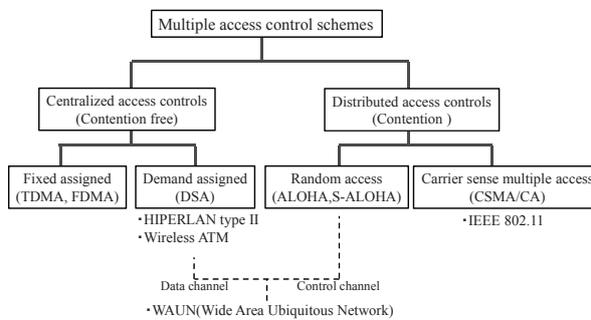


図 2 MAC 層通信プロトコル

新 谷 道 広 (佐藤高史教授)

「デバイス特性推定に基づく集積回路の適応型テストに関する研究」

平成 26 年 9 月 26 日授与

微細化の著しい進展により、同一寸法で設計されたトランジスタのしきい値電圧等の特性が素子ごとに異なる特性ばらつきが問題となっている。LSI は出荷前に、設計仕様どおりに製造されたことを確認するテストを行うが、近年、テストにかかるコストの増大とテスト品質の低下が強く懸念されている。特性ばらつきによる製品仕様からの外れが増加し、LSI の良否を判定する基準の設定が難しくなっているためである。本論文ではこの課題を解決するため、特性ばらつき推定に基づく適応型テスト手法を提案した。従来は、いかなるチップにおいても同じテストを行う固定的なテストが主流でありテスト品質、コストの面で非効率であった。提案する適応型テストでは、事前に特性ばらつきを推定し、これを元にチップ毎の回路性能を推定する。推定した回路性能に応じてチップ毎に最適な基準でテストを行えるようになるため、テスト品質の向上とテストコストの削減が見込める (図 1)。本論文では、特性推定に基づく適応型テストの適用例として適応的な IDDQ テストと動作周波数テストを示した。実験より LSI テストにおけるテスト品質の向上およびテストコストの削減が行えることを示し、その有用性を確認した。

まず、提案する適応型テストの基盤となる特性ばらつき推定手法を提案した。従来は、リングオシレータなど特性推定専用の回路を LSI に追加して特性ばらつき値を得ていた。これに対し提案手法では、量産テストで広く適用されている静止電源電流 (IDDQ) テストで得られる IDDQ シグネチャから特性ばらつき値を推定する手法を与え、推定用回路の追加を不要とした。本手法では、事前に計算した IDDQ 電流の統計的分布を元に、測定した IDDQ シグネチャからバイズ推定を行い、特性ばらつきを逆算する。この推定精度が適応型テストの効果を大きく左右するが、計算機実験より、しきい値電圧ばらつきを 5mV 精度で推定できることを示した。

次に、特性ばらつき推定結果を用いて、チップ毎に IDDQ テストの良否基準を決定する適応型 IDDQ テスト手法を提案した。特性ばらつきの増加によりチップの IDDQ 電流が大きく変動し、不良とばらつきによる電流増加の影響の区別が困難になっている。従来は全チップに同じ判定基準を使うため、テスト品質の低下が問題となっていた。本手法では、事前に特性ばらつき推定手法を用いてチップ毎の特性ばらつきを推定し、この結果をもとに、チップに故障が含まれない場合に期待される IDDQ の分布を推定してチップ毎の良否基準を得る (図 2 (a))。計算機実験により、提案手法が良品と不良品を高精度に分類でき、既存手法と比べてテスト品質を 14 倍改善できることを示した。

最後に、特性ばらつき推定結果を用いた適応型動作周波数テストを提案した。特性ばらつきによるトランジスタ性能の変動により、回路の動作周波数が製品規格を超えるパラメトリック故障が増加している。パラメトリック故障は特性ばらつきに起因して発生するため、チップ毎に発生傾向が異なる。従来の動作周波数テストは、特性ばらつきによらず、悲観的な最悪条件を想定した一律のテストを行うため非効率であった。提案手法では、推定された特性ばらつきを元に、チップ毎に悲観性を排除したテストを行うことで、テスト時間を削減する (図 2 (b))。テスト時間はテストコストに直結する。計算機実験にて、テスト品質を保持しつつ、テストコストの期待値を 96% 以上削減できることを示した。

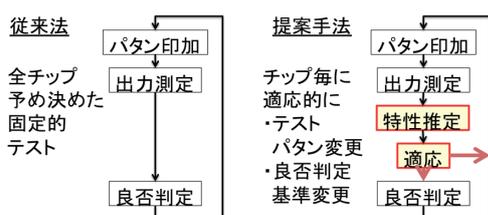


図 1: 従来法と提案手法の違い

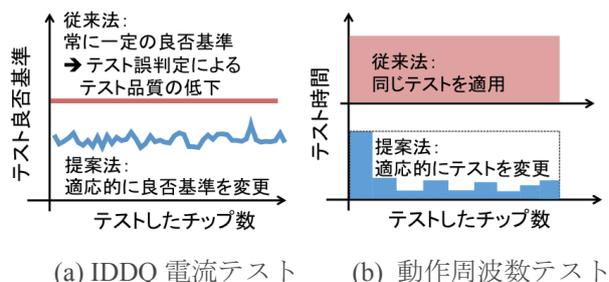


図 2: 提案する適応型テストの適用例

高校生のページ

# 大気を測るレーダー

生存圏研究所 山本 衛

## 1. はじめに

電波の利用としては、まず携帯電話やテレビに代表される通信がありますが、もうひとつ忘れてはならないのはリモートセンシングです。さらにそれは観測対象が発する電波（あるいは光）を受信して相手の性質を測る受動的なリモートセンシングと、観測装置が電波や光を観測対象にあてて観測をする能動的なリモートセンシングに分かれます。電波を使った能動的なリモートセンシングの代表的なものがレーダーです。飛行機や船を探索する装置という印象が強いですが、大気中のさまざまな現象を標的とするレーダーが実用されています。ここでは、大気を観測するレーダーについて、その基礎技術、装置の概要と実際の観測成果について紹介します。

## 2. 大気構造

大気は重力によって地球表面に捉えられた気体であり、密度と圧力は地表面が最大で高度と共に指数関数的に減少します。図1に標準的な大気温度の高度分布を示します。気温は地表面から高度10kmを過ぎるあたりまでは1km当り約6.5度の割合で高度と共に低下して行きます。ここを対流圏と呼びます。雨・雲などの気象現象は対流圏内の現象です。高度約11kmに対流圏界面と呼ばれる気温の極小層があり、その上部の高度約50kmまでは高度と共に温度が上昇していく成層圏です。その上部は再び温度が下がる中間圏、高度80km以上は温度が飛躍的に高くなっていく熱圏となっています。熱圏は、例えば高度100kmでは大気密度は地表の $2 \times 10^7$ 程度しかありません。高度300km以上は更に希薄で人工衛星が飛翔しうる領域です。この上部は太陽系空間に徐々につながって行きます。熱圏では大気を構成する原子や分子が太陽光線に含まれる紫外線やX線によって電離して、電離圏を形作っています。電離圏は高度100～120kmがE層、高度200km～400kmがF層と呼ばれる層構造をしています。

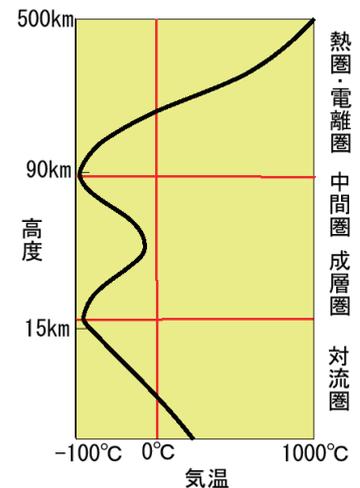


図1 大気温度分布

## 3. 大気レーダーの基礎

レーダーは電波パルスを観測対象にあてて跳ね返ってくるエコーを調べる装置であり、能動的なリモートセンシング装置です。図2にレーダーの原理図を示します。送信機と受信機がひとつのアンテナを共用しています。送受切替えスイッチを送信側にし

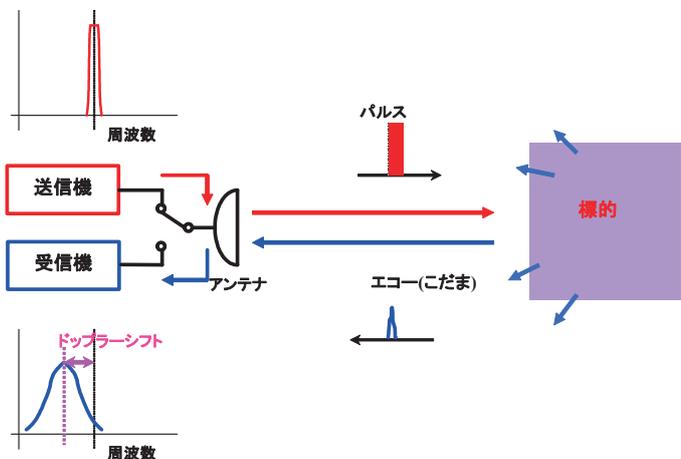


図2 レーダー原理図

てパルス変調波を標的に向かって短時間送信します。そのあとスイッチを受信側に切り替えて反射波の到来を待ちます。送信からエコー受信までの時間差から、レーダーから標的までの距離が分かります。標的が動いていれば、エコー波の周波数がドップラーシフトをしていますので、速度が分かります。1方向の観測では風速の1成分しか観測できませんから、3次元の風速ベクトルを求めるためには、3つ以上の方向成分を観測する必要があります。そのため大気レーダーでは観測方向を高速に走査する工夫が必要です。これは後で述べます。

周波数 50MHz 付近から数 GHz の電波を利用するレーダーとしてウィンドプロファイラーや ST（成層圏・対流圏）レーダー、MST（中間圏・成層圏・対流圏）レーダーなどと呼ばれるグループがあります。観測高度範囲は、小型のものでは高度数 km、ST レーダーと呼ばれるタイプで高度 10～20km、大型の MST レーダーでは高度 60～80km の中間圏も観測可能となります。これらのレーダーはまとめて「大気レーダー」と名づけられます。京都大学生存圏研究所では大気レーダーを中心として多様な装置を開発し、大気研究に利用してきました。

大気レーダーの「標的」について図3を使って説明します。大気中には、乱流や密度成層などから生じる屈折率変動があり、電波が入射すると、ごくわずかですが、その界面に分極電界が生じ、そこから電波が再放射されます。例えば、大気中にプラスチックの球が浮かんでいる様子を考えてください。電波が入射すると球には分極電界が生じ、入射波と同じ周波数で振動しますので2次放射が生じます。大気中にはいたるところに乱流がありますので、雲粒・雨粒などがなくてもエコーが得られます。この機構で散乱される信号は、干渉性が比較的良好なので、「コヒーレント散乱」と呼ばれます。一方、高度 100km を越える電離圏においては、大気の一部が電離してプラズマになっています。自由に飛び回る電子1個1個からの非常に微弱な電波の散乱があり、大型レーダーでは捉えられます。こちらの散乱から得られる信号は干渉性が低いので「インコヒーレント散乱」と呼ばれます。

#### 4. MU レーダー

MU レーダー (Middle and Upper atmosphere radar) は、京都大学生存圏研究所 (当時の名称は超高層電波研究センター) が滋賀県甲賀市信楽町に 1984 年に完成させた大型の大気レーダーです。図4にその全景写真と個々のアンテナの写真を示します。直径約 100m の円形敷地内に 3 素子直交八木アンテナ 475 本を敷き詰めたアクティブ・フェーズド・アレイアンテナを特徴としています。中心周波数は 46.5MHz、各八木アンテナと同数の送受信機を有し、それぞれの送信出力を合成することで全体の送信出力は 1MW に達します。従来の大気レーダーは、送信パルスを大出力の真空管式増幅器で増幅してから各アンテナ素子に給電していましたが、MU レーダーでは、小型の半導体



図3 大気レーダーの標的



図4 MUレーダー全景写真と個々のアンテナの写真

送受信機を用いた分散型システムを取っています。MU レーダーのアンテナアレイは6 角形状に区切られた、八木アンテナ 19 本からなる 25 個の「群」から構成されています。このようなアンテナ構成をアクティブ・フェーズド・アレイ方式と呼びます。図 5 にその動作原理を示します。個々の八木アンテナから放射される電波の位相を揃えることで、巨大なパラボラアンテナと同じ働きをさせることができ、上空に細い

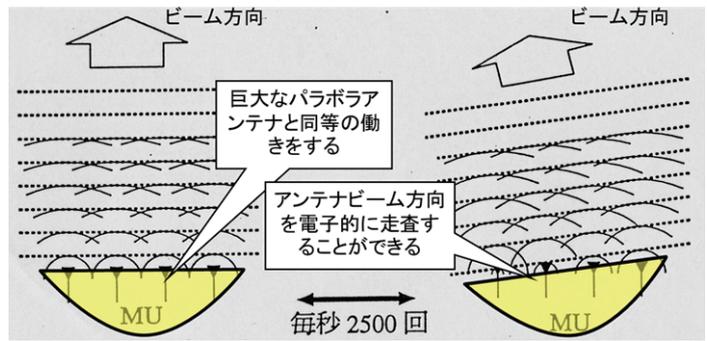


図5 アクティブ・フェーズド・アレイ・アンテナの動作原理

ビームを向けて強い電波を送ることが出来ます（左図）。さらに、個々のアンテナから放射される電波の位相を少しずつずらすことによって、アンテナビームを傾けることもできます（右図）。MU レーダーは、このように電子制御によって電波の向きを変化できる点に特徴があります。全アンテナを一体として使用したとき、ビーム半値幅は 3.6 度であり、ビーム方向を天頂角 30 度以内のプリセットされた約 2000 の方向に、1 秒間に最大 2500 回の速度で走査できます。大気運動の変化は、ビーム走査に比べて十分遅いので、3次元風速の測定や、レーダー上空の大気乱流の分布等が観測できます。

5. 観測例

MU レーダーを用いて台風を観測した例を示します。この台風は紀伊半島を縦断しながら北進し、1994 年 9 月 29 日に MU レーダーの上空を通過しました。このため、台風を完全に輪切りにする観測に成功しました。台風は中心の周りに大気が反時計回りにまわる巨大な渦巻き構造を持っています。そこで図 6 に示すように、MU レーダーで観測された風速から台風の移動速度を引き去ることで台風と共に動く系からみた

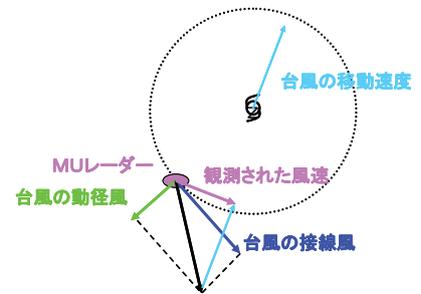


図6 台風観測の原理図

風速を求め、さらに回転成分（接線風）と半径方向の成分（動径風）に分解して研究を進めました。図 7 には台風 9426 号の観測から得た接線風の水平距離・高度分布を示します。ここで水平距離は、元は時間変化としてえられた風速を、そのときの MU レーダーと台風中心との水平距離に置きなおしたものです。台風が MU レーダーを通過したため、水平距離ゼロまで観測を行うことができました。台風は接線風はほぼ全域にわたって反時計回りであり、高度 10km より下側で強い風が吹いています。台風中心付近に時計回りの成分（負の値）が見られますが、上陸後の台風の構造が完全な軸対称からずれたことによるものと考えられます。図 8 には同時に観測され

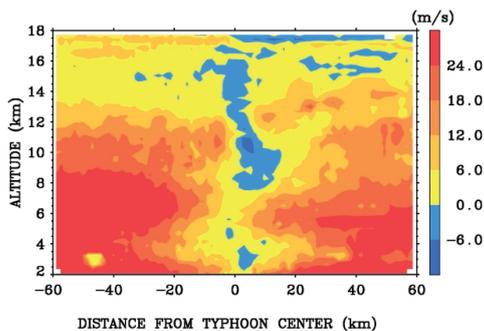


図7 台風 9426 号の接線風速の分布図

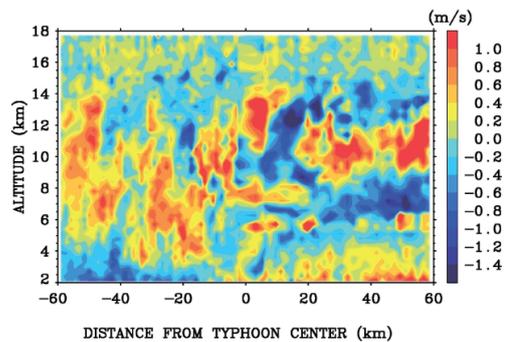


図8 台風 9426 号の鉛直風の分布図

た鉛直風の分布を示しますが、1 m/s を超える上昇流と下降流が複雑に分布する様子が捉えられました。このように台風内部の3次元風速の分布を高い分解能で明らかにできたのは、MU レーダーならではの成果です。

## 7. まとめ

本稿では大気乱流を標的とし風速測定を主とする大気レーダーを中心として観測原理・レーダーシステム・観測成果についてまとめました。レーダーは大気の観測に広く用いられています。

MU レーダーに引き続き、我々は2001年にインドネシア共和国にあるスマトラ島の赤道上に赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; 以下ではEAR) を建設しました。図9にアンテナ面の写真を示しますが、EARもMUレーダーと同様、直径110mの円形敷地内に560本の3素子八木アンテナを配置し、各アンテナの直下に半導体の送受信機を備えたアクティブ・フェーズド・アレイ方式の分散システムを取っています。MUレーダーと比較すると、送信出力 (尖頭値) が100kWと小さいために感度が1/10ですが、高度20kmまでの大気エコーの観測は可能です。現在まで10年以上にわたって赤道大気データのデータを取り続けています。また図9に示すとおり、日本が設置運営にかかわる大型レーダーが他にもあります。国立極地研究所と東京大学はPANSYと呼ばれるMUレーダーと同等規模の大型レーダーを、南極の昭和基地に設置しています (PANSYには情報学研究科の佐藤亨教授が技術面で協力しておられます)。さらに国立極地研究所と名古屋大学は、北極域にあるEISCATと呼ばれる電離圏観測用の大型レーダーの運営にもヨーロッパの数カ国と共に参加しています。MUレーダーと赤道大気レーダーをあわせると、日本は北極～赤道域～南極と世界中をカバーする観測網を有しています。さらに、MUレーダーの技術は天気予報にも実用化されています。我々の技術を基礎としてウィンドプロファイラーと呼ばれる小型レーダーが開発されており、気象庁がそれを用いた観測網を全国30数カ所に展開しています。ウィンドプロファイラーからの風速データは日々の天気予報のためのデータとして活用され、集中豪雨などの局地的な気象現象の予報精度の向上に役立っています。

電気電子分野の世界最大の学会IEEEでは、25年以上を経過した顕著かつその後に大きな影響を与えた開発業績に対して「マイルストーン」表彰を行っています (IEEEマイルストーンプログラムのホームページ [http://www.ieeeighn.org/wiki/index.php/Milestones:IEEE\\_Milestones\\_Program#Lists\\_of\\_IEEE\\_Milestones](http://www.ieeeighn.org/wiki/index.php/Milestones:IEEE_Milestones_Program#Lists_of_IEEE_Milestones))。つい最近に、MUレーダーが「アクティブ・フェーズド・アレイ・アンテナを備えた先駆的な大型大気レーダー」として2015年5月に受賞することが決まりました。1984年に始まる日本の大型レーダー開発と大気研究に対する高い評価に深く感謝いたします。今後も新たな研究開発に向かって行きたいと考えています。

## 参考文献

深尾昌一郎・浜津享助、気象と大気のレーダーリモートセンシング、京都大学学術出版会、491ページ、ISBN:4-87698-653-3、2005年3月。(改訂第2版ISBN:978-4-87698-788-7、2009年7月)(大気レーダーと気象レーダーの優れた教科書です。インターネット上の京都大学学術情報レポジトリから公開されておりダウンロードできます。<http://hdl.handle.net/2433/49766>)

MUレーダー／赤道大気レーダーのホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu+ear/index.html>



図9 赤道大気レーダー全景と、日本がかかわる大気レーダーの配置

## 学生の声

### 「オールラウンドな人」

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3年 釜江典裕

研究者にはオールラウンドな人が求められると聞いたことがある。申請書の執筆など様々な業務を一人でこなさなければならず、文章を書くなど理系の人には苦手なことも長けているべきであるらしい。

試験でそこそこ良い成績が出るのと研究で良い成果が出るのはさほど相関が無いのだろう。研究、とくに大学での研究では、その人の能力だけでなくもっと様々な要因で順調に進まないことがあるように思える。身近な先輩方を見ると、6割くらいが修業年限を超えた。このように研究室での生活では様々なストレスにさらされる。これまでの6年間をふりかえてみると、もう一度経験したいとは言えないが、わたしにとって非常に益になる日々であったことは間違いない。

私が研究を進める上での失敗の一つは、先生方から十分な助言を引き出せなかったことにあるのだろう。小さい頃から内向的で周りの人との意思疎通が苦手だったが、そういう欠点が研究室での生活においてひとつの障害となった。少しずつでも欠点を克服していくしかない。もうちょっとがんばろう。

ところで、この記事の読者の中には、博士後期課程への進学を考えている学生もいるだろう。周囲の反対を押し切ってでも進学したいというくらいの意志がないなら、進学しないほうが良いと思う。

### 「納豆を四百回練る」

工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学講座 博士後期課程3年 神原仁志

美食家の北大路魯山人によれば、納豆は練れば練るほど美味しいとのことである [1]。具体的には納豆のみを三百回ほど練り、そこに（普通の）醤油を少したしてさらに百回ほど練ると良いらしい<sup>(1)</sup>。練るだけでそんなに味が変わるものなのだろうか？そう思ったとある大学院生は、あくる日の午後、生協食堂セレネの中央に陣取り延々と納豆を練りまわしていた。ある程度の回数を超えると文献 [1] の記述通り、かたく、練りにくくなってきた。正直半信半疑であったのでこの時点でなかなかの驚きである。練り終える頃には五分以上も経っており、粘々成分と豆とが混然一体となったそいつを食べてみると、たしかに甘味とうま味が増しているように感じる<sup>(2)</sup>。なるほど、一般の納豆製品に甘い出汁醤油が付属しているのは練る手間無しにこの味の変化分を補おうという考えであるようだ。

さて、上記の経験を研究生生活とこじつけてみようと思う。いかにも科学らしい話にするなら練り回数依存性や成分分析といった研究を取り上げるべきだろう。しかし、重要なのはそういったことではない。納豆を長時間練りまわすなどということは普通の人にはやらないだろうし、そこから得られた知見をわざわざ文章にして世に残そうというのはもっと少なからう。つまるところ、多少馬鹿らしかったり単純であったりしても「誰もやらないこと」をやって、僅かでも「新しい知識を創り出す」ことが重要なのだ。そうすることで一くだらないことであっても一人類の知っていることが増えていき美味しいメシも食えるのである。自身の研究生生活を振り返ると「綺麗な実験」をしようとして時間を浪費するきらいがあり<sup>(3)</sup>、アウトプットも碌にしなかったと反省する次第である。これから博士課程を過ごそうという人は、反面教師にして頂ければ幸いである。ちなみに、世の中には納豆を一万回以上練りまわしたあげくペースト状の物体を拵えた阿呆な人々もいるそうだ<sup>(4)</sup>。

[1] 北大路魯山人、納豆の茶漬け、青空文庫、No.54975

- (1) この回数自体は魯山人による直接の言及ではない。
- (2) 成分が変化しているという説と舌触りの変化による効果だとする説がある。
- (3) 勿論、科学全体を考えると再現性や明瞭な議論のためにも洗練された実験は重要である。
- (4) 豆が物理的に破碎されてしまったようだ。

## 教室通信

## 就職・採用活動時期の変更

電気工学専攻長 和田 修己

新聞やマスコミでも取り上げられましたのでご承知の方もおられるかと思いますが、平成27年度に卒業・修了（平成28年3月卒業・修了）予定の学生諸君から、就職活動の時期が大きく変更されることになりました。京都大学としては、学生支援センターキャリアサポートルームからも公式の情報として就職活動スケジュールの変更が図入りで説明されています（[http://www.gssc.kyoto-u.ac.jp/career/misc/job\\_hunting/](http://www.gssc.kyoto-u.ac.jp/career/misc/job_hunting/)）。従来、平成26年度までは、企業からの就職情報を伝える広報活動は前年度の12月1日に解禁となり、4月1日から採用のための選考が開始されてきました。この卒業・修了の前年度からの就職活動（いわゆる「就活」）が大学での勉強・研究活動の妨げになる、ということで、平成27年度より「広報活動解禁・3月1日、採用選考活動解禁・8月1日」に変更されます。なお、正式内定・10月1日以降は変更されません。

今回の時期変更は、昨今の過熱気味の早期からの就活を改める意味で良い改革になればと期待されるものですが、いくつか懸念する点も有り、またOBの皆様にお願ひさせていただきたい点もございます。

国立大学協会も構成団体の一つである「就職問題懇談会」から、就職・採用活動の秩序を維持するとともに、正常な学校教育と学生の学修環境を確保することの重要性を踏まえ「大学、短期大学および高等専門学校卒業・修了予定者に係る就職について（申合せ）」[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/25/09/1340139.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/25/09/1340139.htm)（平成25年9月27日）が出され、また個々人の個性や適性に応じた職業を学生自ら選択できる能力の育成や学修意欲を高めるため、初年次からのキャリア教育・職業教育の充実を図ることを目指し「企業等の協力を得て取り組むキャリア教育としての学内行事に関する申合せ」[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/26/09/1351973.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/09/1351973.htm)（平成26年9月16日）が出されています。京都大学電気系でもこれに準拠し、企業等、関係各位にご協力をお願いすると共に、専攻構成員にも遵守するようお願いしております。

今回の変更に伴う懸念点の1つは、卒論・修論への影響です。従来は4月には学校推薦を出して採用選考が開始され、早い学生で4月中に就職先が内々定しており、多くの学生が6月頃までに就職先が決定しています。これが採用選考8月開始となると、10月にずれ込むことも考えられ、卒論・修士論文に向けた研究の時間が十分とれるのか心配なところです。修士1回生諸君には、M1の間に研究をしっかりと進めておくように指導はしましたが、はたしてどのくらい進んでいるか不安も残ります。懸念点の第2は、8月の大学院入試への影響です。これは逆に、修士課程の学生諸君が博士後期課程進学をより積極的に考えてくれれば、利点ともなるかと思えます。第3の懸念点は、3月・8-9月の学会参加・発表への影響です。しっかり研究が進んでいる学生諸君には、就職活動時期の変更の影響は小さいと思われるかもしれませんが、「就活」重視の学生諸君には研究発表の機会を無くすことにもなりかねません。研究成果をしっかり学会発表して、専門性を深め経験を高めて就職することを期待します。

昨年から今年にかけ、多くの企業の方と面談させていただき、今回の就職活動時期の変更を良い方向に向けることができるよう、お願ひをさせていただきました。特に、就活の長期化を避けるという本来の目的から、3・4月と7・8月の春・夏休暇期間を活用した重点的な求人・情報交換・採用活動をお願ひし、学部4回生・修士2回生の前期が就活だけで終わることの無いように心がけたいと学生にも伝えております。

考えてみれば、筆者が学生の時代には7・8月の夏休みに企業訪問を行うのが普通でしたので、昔に戻っただけと云えるのかもかもしれませんが、今回の変更は大学側にとっても企業の皆様にも若干不安の残る変更になります。当初の精神に立ち戻って、皆様のご協力ですムーズな移行ができればよいなと思っております。どうぞよろしくお願ひ申し上げます。

**賛助会員の声****「村田製作所チアリーディング部」の開発に携わって**

村田製作所 プロセス技術開発2部開発3課 北 河 満

**【はじめに】**

私は学生時代には電気電子を専攻しており、1994年に村田製作所に入社しました。技術一筋でやってきた私がこのような情報誌に寄稿させて頂くのは甚だ恐縮ではありますが、社会人になるまで良く分からなかった会社での研究開発のことや生産技術という仕事のことなどについて、これから社会人になれる方々に伝える良い機会と思い寄稿させていただきました。この中から将来会社での仕事をイメージしたり、こんな仕事をしてみたいなど、何かの足しにして頂ければ幸いです。

**【村田製作所について】**

村田製作所は電子部品の総合メーカーで、その業界では有名な会社です。一般の皆様には最近でこそ知名度が上がっていますが、それは弊社の電子部品を搭載して紹介するロボット（ムラタセイサクくん、ムラタセイコちゃん）に拠るところが要因の一つかと思います。

弊社は今年創業70年を迎えますが、主力商品は創業当時から生産しているセラミックコンデンサなど焼き物を中心とする受動部品や、高周波モジュール商品、各種センサなどになります。弊社では「一貫生産体制」とっており、原材料の開発から製品の生産までを一貫して社内で行っています。材料開発、プロセス技術開発、生産設備開発、そしてそれらをサポートするソフトウェア開発や分析技術開発といった技術を統合することにより、独自の製品を世の中に送り出しています。これは、弊社の一つの強みとなっています。そして、私は入社してから20年間この中のプロセス技術開発に携わってきました。

**【プロセス技術開発という仕事】**

プロセス技術とは、会社で生産する電子部品を製造するための製法や装置の開発を行う部門です。例えば、積層セラミックコンデンサを作るためにはセラミック材料を捏ねるところから始まり、内部電極とセラミックのシートを交互に積層して焼成し、個片にカットした後に外部電極形成してメッキすることで製品の形状になります。そして、出来上がった全ての製品の特性検査をして良品のみを市場に出荷するというプロセスを踏みますが、これらの各プロセスにおける製法（工法）や設備などの技術開発を行うのがプロセス技術開発部門の役割です。本社の技術開発メンバーと国内各地にある関係会社（生産工場）の技術開発メンバーが緊密な連携をとりながら、革新的な技術開発を行っています。このように、プロセス技術開発部門はまさに技術者の集団といえる部門なのです。

私はこのプロセス技術の中で計測制御技術に関する開発を行ってきました。

学生の皆さんは、高校や大学で習ったことが仕事で実際にどの様に活用されるか疑問をもたれている方も多いかと思います。私の部署は計測制御に関する技術開発を担当していますが、ここは電気、機械、制御、ソフトなどを専門とするメンバーで構成されています。主な業務としては、完成した電子部品の検査を行う装置や技術の開発です。検査といっても、電気的な特性検査以外にも、画像処理による外観検査、場合によっては非破壊で内部状態を検査する必要があります。このような検査を行うためには電

子部品を搬送する装置や、検査を行うための測定システム、そして画像処理システム、更にはそれらの検査結果を集計/管理するシステムなど、さまざまな技術開発が必要になります。

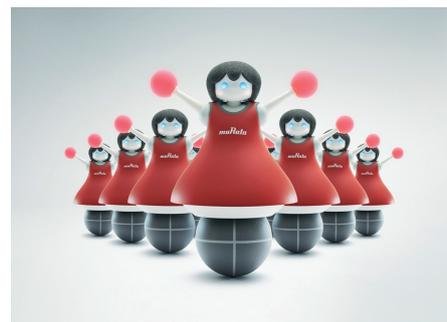
これら技術を集結して出来上がった例として、セラミックコンデンサの特性検査装置では、1分間に1万個以上の製品の検査を行うほどの処理能力を有するものもあります。また、コンデンサのチップサイズは小さいもので0.25mm × 0.125mmの製品もあり、これらのチップをハンドリングする技術開発も行っており最先端の技術力が要求されます。

しかし、コンデンサなどの電子部品は、東南アジアや中華圏において安価な製品が大量に生産されるようになり、価格競争の渦に巻き込まれています。これを回避するには、弊社のビジネスの領域を変化させ他社がやっていない領域に踏み出す必要があります。そこで、常に新しい商品を開発していこうとしているのです。我々の部門は商品開発部門ではありませんが、新商品の開発に伴いそのプロセス開発も必要になります。この様に、プロセス技術開発も新しい領域に踏み出していく必要があるのです。既存商品の技術開発をやりながら、新領域の技術開発を行っていくのです。技術的にもパワー的にもしんどいですが、世の中に無い技術開発にチャレンジすることができるということで、モチベーションは高く保たれます。

このようにプロセス技術とは、関連する専門技術者が集まりプロジェクトを作って、常に同業他社に対して競争力を維持できるように、誰もやっていない領域（世界一）を目指して日々仕事をしているのです。

### 【ロボット開発に携わって】

話は少し変わりますが、皆さんは『村田製作所チアリーディング部』をご存知でしょうか。2014年のCEATECというエレクトロニクス総合展示会（10月初旬）で一般公開された村田製作所の技術をPRするための新しいロボットです。私はこの開発に携わることができました。既にテレビやネットでご覧頂いた方もおられるかもしれませんが、この開発には以下にあげる3つの技術（3S）が使われています。



#### (1) Stability（倒立振り制御技術）

ロボット本体が安定して倒立や移動ができる。移動では、最高速度300mm/s、最高加速度300mm/s<sup>2</sup>、と $\theta$ 回転も90deg/s、90deg/s<sup>2</sup>が出せる。

#### (2) Synchronization（群制御技術）

10台のロボットが協調動作を行う。その上で、交差、集団行動、衝突回避などが行える。

#### (3) Sensing & Communication（超音波位置計測技術）

超音波と赤外線を用いて□4mの範囲を±1cmの精度で位置計測可能。また、暗闇でも使用可能。位置計測結果をホストPCに送りリアルタイムで協調動作をさせることが可能。

これらの技術は、社外の企業や大学の協力を得て開発を進めました。その中でも(2)の群制御技術に関しては、京都大学の松野教授の研究室に多大な協力を頂きました。そのご縁もあって今回この寄稿に至ったものです。

このプロジェクトに参加しているのは、社内公募で手を上げたメンバーが中心となっています。弊社では、このように個人の意思を尊重し、各種のプロジェクトに参加できるという自由な風土があります。今回のプロジェクトでは、自ら手を挙げたやる気に満ちたメンバーが、これまでのロボット（ムラタセイサクくんやムラタセイコちゃん）を超える企画の立案から始め、CEATECで公開するまで、2年4ヶ

月間かけて開発をやり遂げました。この長い期間の間には、何度も壁にぶつかりましたが、ぎりぎりのところでこの壁をクリアする、ということは何度も繰り返していたのです。実は、ロボットがきちんと倒立できるようになったのは2014年5月ごろ、複数台で移動できるようになったのは、8月ごろで、CEATECのたった2ヶ月前のことです。周囲からは「無理ではないか」、「台数を減らすか」などの声もちろほら聞こえてきましたが、プロジェクトのメンバーはあきらめることなく、しかも単に世間にお披露目するだけでなく、インパクトを与えたお披露目することにこだわってきました。結果として、非常に多くの反響を頂けるロボットに仕上がったと思います。

また、今回のロボット開発では単に技術力をアピールすることを狙ったものではありません。弊社のビジネスモデルとして、開発スピードUPの為に積極的に社外技術を活用することも始めています。その様なビジネスモデルをロボット開発において実践して表現したものにもなっています。具体的には、先に述べた3つの技術開発では、それぞれ社外との協働を行っています。また3つの技術は極端に凄い技術ではありませんが、これらを組み合わせることによりトータルとして付加価値をお客様に提供すること（ソリューション提供と呼んでいます）ができるものになっています。プロセス技術開発部門においても、社外の技術を取り込みそのソリューションとしてプロセス技術を革新していくことも必要になっているのです。

ところで、このプロジェクトの技術開発の中心メンバーはプロセス技術開発部のメンバーです。歴代のロボットでも、プロセス技術開発のメンバーが中心となっていました。普段面識のないメンバー数名が各部門から集結してプロジェクトに参加します。各メンバーにはプロジェクトの中で各々役割がありますが、今回のように目標達成時期がCEATECと明確であったことや自ら手を挙げて参加していること、などによりメンバーの志気も高く、青臭い言葉ですが「一致団結」してプロジェクトの達成に取り組めました。

弊社ではこのようなプロジェクトがたくさんありますが、挙手型や提案型のものもあります。社員のやる気を積極的に応援してくれる風土ができつつあります。また、私がこのプロジェクトに参加している間は本来の業務にパワーをかけられなくなりますが、自部門の別のメンバーの支えにより、プロジェクトに集中することができ非常に感謝しています。プロジェクトでは、普段感じられないことをたくさん得ることができ、良い経験ができたと感じています。また、大学やベンチャー企業との協働においても得るものが多く、今後の仕事の幅が広がったと感じています。

### 【学生の皆さんへ】

入社して20年、プロセス技術開発に携わり続け、新たなことへのチャレンジも続けています。学生時代を振り返ると、もっと勉強しておけば会社に入ってから更に色々なことにチャレンジできて楽しかったらと思うことが時々あります。基礎知識は社会人になってからよりもやはり学生時代に習得しておくべきだと思います。自分の幅をできる限り広くできるように、何にでも興味を持って取り組んでください。20年前よりもいろんな面で環境が良くなっていますので、最大限に活用してください。

どの様な会社に入るか、そこでどの様な仕事をするかは皆さんの考え次第で大きく変わりますので、積極的に自分の将来に自分の意思が関与できるようにして頂ければと思います。ここに記載させて頂いた内容が皆さんの希望に満ちた将来に少しでも参考になればと思います。

今後の皆さんのご活躍を期待しています。

以上

## 編集後記

cue33号をお届けします。京都大学では、松本紘総長が任期満了で退任し、山極壽一新総長が就任しました。電気系からは北野正雄新理事が就任し教育・情報・評価を担当します。大学の教育研究にも新しい取り組みが求められる中、電気関係教室の活動は情報誌 cue にて発信を続けてまいります。今後とも cue ならびに電気関係教室にご支援を頂けますようお願い申し上げます。

[T.M. 記]

