cue 31 号 目次

巻頭言

日本の電機に将来はあるか

…… 昭和 44 年卒業　三菱電機株式会社　取締役会長　下村　節宏…… 1

大学の研究・動向

新しい材料・構造・概念がもたらす半導体デバイスの革新

……電子工学専攻　電子物性工学講座　半導体物性工学分野…… 3

産業界の技術動向

日本エレクトロニクスの復権に向けて

……シャープ株式会社　種谷　元隆…… 10

研究室紹介…… 16

博士論文概要…… 35

高校生のページ

「集積回路の長期信頼性向上に向けて」

… 情報学研究科　通信情報システム専攻　集積システム工学講座　情報回路方式分野　佐藤　高史…… 63

学生の声

「博士課程短縮卒業への道」

…… 工学研究科　電気工学専攻　山川研究室 博士後期課程 2 年　芦田　康将…… 68

「急がば回れという基本」

……工学研究科　電子工学専攻　木本研究室　博士後期課程 3 年　森岡　直也…… 68

教室通信

各種アンケートから見た電気電子工学科とその学生像

……電気電子工学科長　小野寺　秀俊…… 69

賛助会員の声

「ロームにおけるメディカル製品の研究開発」

……ローム株式会社　メディカル・ヘルスケア研究開発ユニット　百瀬　俊…… 70

編集後記…… 73

巻頭言

日本の電機に将来はあるか

昭和 44 年卒業　三菱電機株式会社　取締役会長　下　村　節　宏

京都帝国大学が 1897 年に創設されると同時に理工科大学電気工学科が創立された。

時代は日本の電気事業の黎明期であり、以降電気工学科は数々の人材を輩出し日本の電機産業の発展に貢献して 116 年の歴史を刻んできたことは真に感慨深い。

少し歴史を辿ってみると 1878 年 3 月 25 日に東京虎ノ門の工部大学校講堂に日本最初の電灯が点灯。フランス製のデュボスク式アーク灯とグローブ電池 50 個を用いたものでほんの一瞬の点灯であったが画期的な出来事であった。後に 3 月 25 日を電気記念日に定めたのはこの由来による。

1879 年エジソンが白熱電球を発明。フィラメントは木綿糸を炭化したものであったが 40 時間程度の寿命で実用には程遠いものであった。以後長寿命の素材を求め 6000 種の繊維を試しついに 1000 時間以上もつ素材を見つけた。それが京都岩清水八幡宮の真竹であった。その後十数年にわたり京都の真竹がアメリカの夜を照らしたことは大変感慨深い。1934 年に岩清水八幡宮にエジソン記念碑が建立され毎年エジソン彰徳会によって生誕際と命日の碑前祭が行われている。

1887 年に東京電燈が開業し日本橋に商用発電所が運転開始された。エジソンの電気事業開始からわずか 5 年の後であったが工部大学校の藤岡市助助教授の慧眼と指導力によるところ大であった。

1888 年に日本電気学会が創設された。初代会長は榎本武揚で 20 年にわたり会長を務め電気学術の調査、研究、普及発展に尽くした。榎本は幕府海軍副総裁を務め戊辰戦争を最後まで戦いぬいた武人だが、後に明治政府の重職を歴任し新生日本の基盤作りに貢献した文武両道の人であった。

1891 年に京都蹴上に日本最初の商用水力発電所が開業。琵琶湖疏水の水流を利用した水力発電機は 80 キロワット、500 ボルトのエジソン式の直流発電機 2 機であった。都が東京に遷都され寂しくなってしまった京都の産業振興を期しての事業だったそうだが、日本の電気事業はそうした先人の気概によって育てられたのである。

以後無数の有名無名の電気技術者の弛まざる努力によって全国に電灯が普及していき、電気が動力に使われ始めて工場が近代化され、家庭に電気製品が普及し始める。当初は欧米の技術に学び次第に実力をつけて競争力を高めるに伴い、日本の電気事業、電機産業は大いに成長し日本の経済を牽引してきた。のみならず電機メーカーが提供する製品やシステムが多くの産業の基盤を支え豊かで快適な暮らしを支える国家的基盤事業になった。

電気電機の分野に携わることを誇りに切磋琢磨し、価値を創造し続けて近代日本を建設してきた無数の先輩諸氏に深く敬意を表する。

そんな時代に変調が生じたのはいつ頃からだろうか、電気工学を志す人が減って電気工学科が定員割れになっている大学が続出し、メーカーではなく金融や商社などへの就職を選択する電気工学系の卒業生が増えたのは何故だろうか？

日本企業が国際市場の中で競争力を高め海外進出を積極的に進めるようになって世界から Japan as Number One と、もて囃された時代があった。自信を深めた電機メーカーはこぞって大型投資を行い目覚ましく成長しつつあった。世界の競合相手を破りまさに破竹の勢いを得ているかのようであった。しかしながら大きな景気の波動の中でこの景色は一気に暗転してしまう。過大な投資が重荷になり業績をひどく悪化させるメーカが続出し、日本の電機メーカーは軒並み構造対策に追われることになった。一方新興国の企業の台頭が日本の企業に脅威となり始め一部の製品で覇権を握られる事態が生じたこともあって日本の時代が終ったと言われるようになった。こうした状況の中で電気電機の分野に魅力を感じない風潮が広がったのが電気工学離れの一因になったのだと思う。

しかし今、電機業界は長い低迷のときを経て新たな世界を創造しつつある。コモディティー化してしまった製品分野を規模の拡大で支配しようとするより、新たな価値を創出することによって成長を期するようになった。様々な技術を統合して安心して快適に暮らせるスマートなコミュニティーを造ることや持続可能な生活空間を維持するために製品の高性能化省エネ化を進めることにビジネスの方向を定める企業が増えてきた。

日本の産官学の力は依然として世界のリーディングエッヂにあると思う。この力をしっかり結集し活かして新しい価値を創造し続ければ日本の電機産業の将来には大いに希望があると思う。

電気、電子、情報通信の電気系学科に学ぶ学生の皆さんには日本の技術、電機産業の牽引力としての気概を持ち、日本でそして世界で大いに活躍されることを期待している。

大学の研究・動向

新しい材料･構造･概念がもたらす半導体デバイスの革新

電子工学専攻　電子物性工学講座　半導体物性工学分野
教授　木　本　恒　暢
准教授　須　田　　淳
助教　西　　佑　介

1. はじめに

半導体デバイスは、言うまでもなく高度エレクトロニクス社会を支えるハードウェアです。論理演算や情報記憶の中枢を担うロジックやメモリ、通信用の高周波デバイス、電力変換用のパワーデバイス、光電変換を司る太陽電池、発光ダイオードや半導体レーザ、光センサなど枚挙に暇がありません。本研究室では、半導体中の電気伝導を主に活用する「電子デバイス」を中心に据え、半導体材料の作製、電子物性およびデバイスに関する研究に取り組んでいます。半導体電子デバイスの特性向上に関する主な課題を図 1 に示します。トランジスタの発明から既に 60 年以上が経過しましたが、時代や産業の進展と共に、半導体デバイスに求められる性能はより厳しくなり、かつ要求事項も変わってきています。例えば、エネルギー問題に端を発する電気電子機器の高効率化は重要な課題となっており、あらゆる半導体デバイスの低消費電力化が強く求められています。当研究室では、従来技術の延長ではなく、新しい半導体材料あるいは独自の構造・概念を導入することによって、半導体デバイスに革新をもたらすことを目標にしています。本稿では、当研究室が取り組んでいる主な研究内容について紹介いたします。

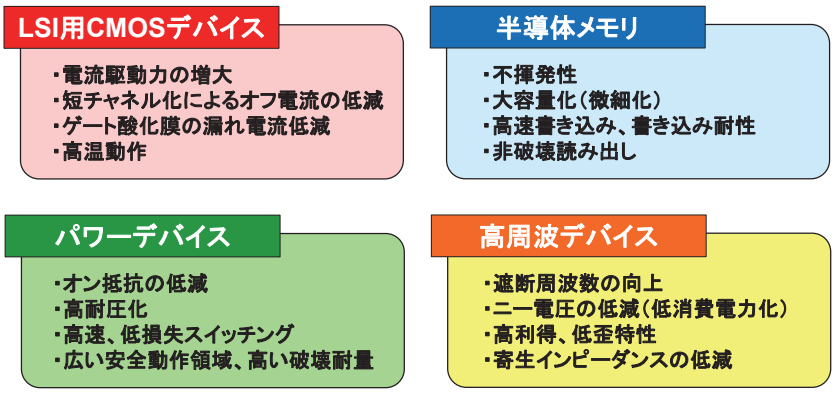


図 1. 半導体電子デバイスの特性向上に関する主な課題。

2. 半導体ナノワイヤ・トランジスタ

Si をベースとした LSI（大規模集積回路）用 CMOS（相補型 MOS）デバイスの微細化は、数々の困難を克服しながら進展し、他技術の追随を許さない状況にあります。さらなる微細化における大きな問題の一つは短チャネル効果によるオフ電流の増大とこれによる発熱（消費電力）です。この問題を解決

する有効な方法は、半導体で構成されるチャネル領域を低次元化し、その周囲に酸化膜とゲート電極を設けることで、ゲートによる静電ポテンシャルの制御性を高める（チャネル内のポテンシャル低下を抑制する）ことです。従来のバルク Si（三次元）を用いた CMOS から、SOI（Silicon-on-Insulator）を用いた超薄膜（二次元）CMOS やフィン型チャネルを有する FinFET が開発されてきました。この究極が、一次元量子細線（ナノワイヤ）をチャネルとするナノワイヤ MOSFET（NW-MOSFET）です [1]。

半導体ナノワイヤでは、エネルギーバンド構造やフォノン（格子振動）分散がバルク結晶から大きく変化します。したがって、ナノワイヤ中のキャリアの輸送現象（電気伝導）に関する物理的な理解が求められます。例えば、Si バルク結晶のエネルギーバンド構造は教科書に示されていますが、ナノワイヤでは、その結晶方位、断面サイズ、断面形状によって量子閉じ込め効果が変化しますので、バンドギャップでさえ一意に決まりません。また、バルクでは間接遷移型のバンド構造を有する半導体であっても、ナノワイヤでは逆格子空間の原点（Γ 点）に有効質量の軽い伝導帯底が出現することもあり（結晶方位や形状にも依存）、キャリアの散乱機構の観点でも興味深い研究対象です。

本研究室では、ナノワイヤの電子物性とデバイス応用に関して、理論と実験の両方のアプローチで研究を行っています。理論研究では、強束縛近似法や第一原理計算を用いて半導体ナノワイヤのバンド構造の計算、原子価力場モデルを用いたフォノン分散の計算を行い、ナノワイヤの基礎物性の解明を目指しています [2,3]。図 2 に Ge ナノワイヤの伝導帯の電子状態（エネルギー E と波数 k の関係）の計算例を示します [3]。Ge（100）基板上に形成した [110] 方向の Ge ナノワイヤでは、Γ 谷のエネルギーが最も低く、かつこの谷の有効質量が小さいことが分かりました。また、これに対応してフォノン散乱だけで決まる移動度（長チャネル極限）、散乱のない電子波としての伝搬（バリスティック伝導：短チャネル極限）ともに、この Ge[110]/（100）ナノワイヤ MOSFET が高いドレイン電流駆動力を示すことが計算により明らかになりました。これは、将来のナノワイヤ MOSFET 作製時の指針になると考えられます。

実験研究では、SOI 基板に電子線リソグラフィを用いて Si ナノワイヤを形成し、これを MOSFET に適用するトップダウン方式を採用しています。数 nm ～数十 nm の様々な断面サイズを有する Si ナノワイヤを用いて n チャネルおよび p チャネル MOSFET を作製し、良好な動作を確認しました。また、ナノワイヤの断面サイズの減少と共に MOSFET のしきい値電圧の絶対値が大きくなることを見出し（図 3）、これがナノワイヤのバンドギャップの変化で説明できることを理論計算により示しました。

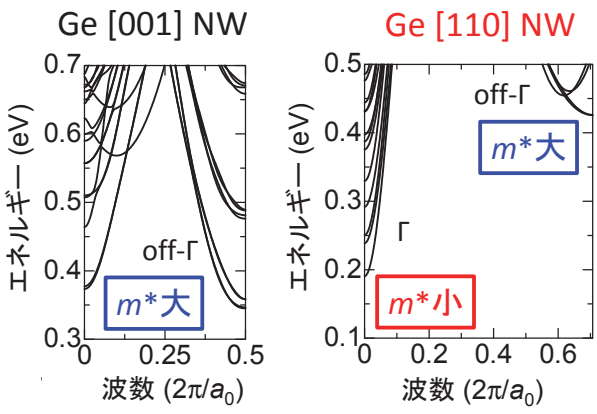


図 2. 強束縛近似法で計算した Ge ナノワイヤの伝導帯の電子状態（エネルギー E と波数 k の関係）。
断面サイズが 2nm（幅）× 6nm（高さ）のナノワイヤを対象としている。

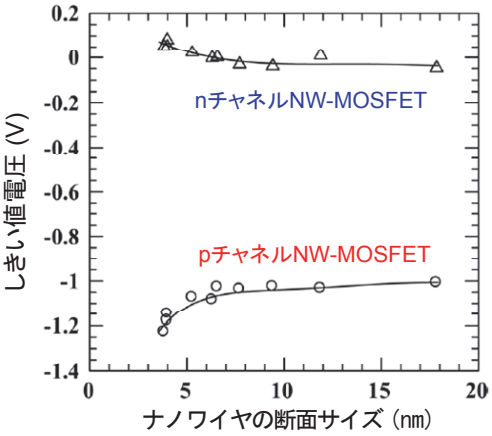


図 3. 様々な断面サイズを有する Si ナノワイヤを用いて作製した n チャネルおよび p チャネル MOSFET のしきい値電圧の変化。

3. 抵抗変化型不揮発性メモリ

半導体不揮発性メモリの代表格であるフラッシュメモリが開発されて四半世紀が経過し、今では各種メモリカードやパソコンの記憶装置（SSD）に応用されるまでになりました。フラッシュメモリは今後も応用分野を拡大すると予測されますが、書換え耐性や速度に本質的な限界を抱えています。本研究室では、究極的な小型・高速の不揮発性メモリ候補として遷移金属酸化物を用いた抵抗変化型メモリに注目しています。遷移金属酸化物が高抵抗状態と低抵抗状態を遷移する抵抗変化特性を示すことは古くから知られており [5]、近年では次世代の不揮発性抵抗変化型ランダムアクセスメモリ（ReRAM）としての応用が期待されています。

本研究室で反応性スパッタリングにより作製した酸化ニッケル（NiO）薄膜を、白金（Pt）電極で挟んだ積層構造（Pt/NiO/Pt 素子）の抵抗変化特性を図 4 で簡単に説明します。まず、抵抗変化特性の発現には、初期電圧印加であるフォーミング（Forming）が必要となります。フォーミングにより低い抵抗状態となった素子に改めて電圧を印加すると、約 1 V で高抵抗状態に戻ります（リセット : Reset）。さらに素子に改めて電圧を印加すると、今度は約 2 V で再び低抵抗状態へと変化します（セット : Set）。その後リセットとセットを交互に繰り返すこの特性は、電源を切っても抵抗状態を保持しますので、リセット電圧以下での抵抗値判別による非破壊の読み出し、セット・リセットによる書き換えが可能で、不揮発性メモリとして機能します。これらの抵抗状態の遷移は約 1~3V、ns 程度の高速パルスで起こるため、書き込みに 15 V 以上の電圧と数 μ s の時間を要するフラッシュメモリでは到達しえない低消費電力かつ高速な動作が実現できます。

ところが、この抵抗変化のメカニズムについては、ReRAM の量産化が発表された現在も明確ではありません。金属と酸化物との界面における電界や電流誘起の酸化還元反応（酸素イオンの移動）である、という説明が認知されつつありますが、金属イオン移動の報告や、堆積法や膜質の違いによりセットとリセットの印加電圧極性が逆でなければ動作しない報告も多く、提案されているモデルによる説明は限定的なものにすぎません。したがって、抵抗変化を起こす電圧の設計指針さえ無い状況にあります。

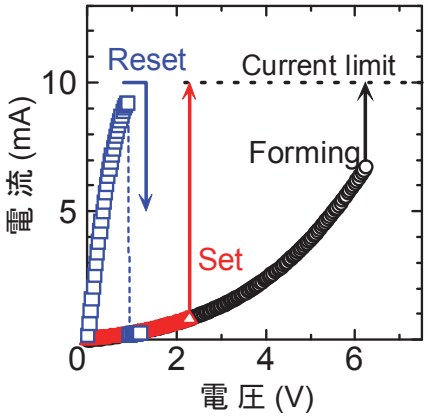


図 4. NiO の上下を Pt 電極で挟んだ Pt/NiO/Pt 素子の抵抗変化特性。比較的低い電圧の印加により、高抵抗状態（HRS）から低抵抗状態（LRS）への遷移（Set）、低抵抗状態から高抵抗状態への遷移（Reset）が生じる。HRS、LRS は電圧を印加しなければ半永久的に保持される。

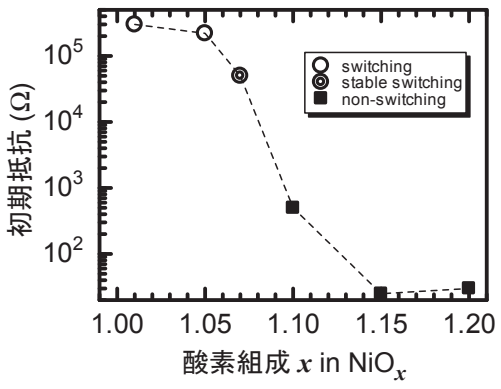


図 5. NiO 薄膜の酸素組成と Pt/NiO/Pt 素子の初期抵抗の関係。NiO 薄膜の酸素組成は、スパッタリング堆積時の酸素供給量を変えることで変化させた。酸素組成が 1.07 近傍で安定な抵抗変化が観測される。

本研究室では、主にNiOの物性に着目して、抵抗変化特性の基礎研究を進めています。例えば、異なる酸素組成を有するNiOの抵抗変化特性を調べ（図5）、ある作製条件において$NiO_{1.07}$という組成で安定した抵抗変化特性を示すことを見出しました[6]。別の作製条件においても同様に調べ、抵抗変化特性に最も影響するNiOの物性を明らかにしようとしています。他にも、抵抗変化特性の発現の鍵となるフォーミング現象に着目し、フォーミング時に形成される微小な低抵抗領域（数十nm程度）の直接観察やフォーミング特性の定量解析などを進めています。また、別の酸化物である酸化チタン（TiO_2）を用いた抵抗変化特性についても研究しており、普遍的なメカニズムの解明に繋げようとしています。これらの基礎研究を地道に積み重ねることにより、ReRAMの高性能化における明確な指針を提示することを目指しています。

4. ワイドギャップ半導体SiCパワーデバイス

シリコンカーバイド（SiC）は、高い絶縁破壊電界を有するワイドギャップ（広禁制帯幅）半導体であり、シリコン（Si）の限界を打破する高耐圧・低損失の電力用半導体デバイス用材料として期待されています[7]。近年のSiC結晶成長およびデバイス作製技術の進展により、300~1700V級ショットキーダイオードの実用化が始まり、サーバー電源、太陽電池用パワコン、インバータエアコン、地下鉄（東京メトロの銀座線）等に搭載され、顕著な省エネ効果を実証しています。また、SiO_2/SiC界面特性に課題を残しながらも600~1700V級SiCパワーMOSFETも市販が開始され、各種電源、急速充電器や高速エレベータ等への搭載が始まっています。当研究室では、平成21年より内閣府「最先端研究開発支援プログラム」の一つに採択していただき、SiやGaAsでは到達できない10kV超級の超高耐圧パワーデバイスの基礎研究を推進しています。例えば、日本における配電系統の電圧は6.6kVですので、これを一段のデバイスで電力変換回路を組むためには、余裕を確保するために13kV以上の耐圧が要求されます(Siパワーデバイスの耐圧の上限は8kV)。このように、超高耐圧SiCパワーデバイスは、将来の電力インフラや高速鉄道、医療用加速器電源の小型化、高機能化に貢献すると期待されています。

高い絶縁破壊電界を有するSiCといえども、10kV超級の耐圧を得るためには、高純度で厚い（100μm以上）高品質結晶が必要です。また、少数キャリア注入による高純度層の低抵抗化（伝導度変調）を促進するために長いキャリア寿命も必要となります。当研究室では、近年、SiCにおけるキャリア寿命制限欠陥（ライフタイムキラー）が炭素空孔であることを同定し[8]、熱酸化時における過剰炭素原子の放出と拡散現象を活用することで、ライフタイムキラー欠陥をほぼ完全に消滅させることに成功しました[9]。この結果、図6に示すように従来の約30倍となる30μsを越える長いキャリア寿命を達成することができました[10]。低エネルギー電子線照射を用いて炭素空孔を選択的に導入することにより、ライフタイム制御にも成功しています。

図7に厚膜高純度エピタキシャル層を用いて作製したSiC PiNダイオードの電流―電圧特性を示します[11]。接合端部で局所的な電界集中が発生しないように、独自の接合終端構造を採用しています。逆方向耐圧として26kV以上の耐圧が得られました。実用化されているSiダイオードの最高耐圧は6~8kVに留まっており、この耐圧は半導体デバイスとして最高の値です。また、順方向のオン抵抗は19m Ω cm^2で、超高耐圧デバイスとしては例外的に低い値が得られています。また、本研究室では高性能SiCバイポーラトランジスタの作製にも取り組み、非常に高い電流利得（250~430）を有するトランジスタ[12]や超高耐圧（21kV以上）トランジスタ[13]の試作にも成功しています。

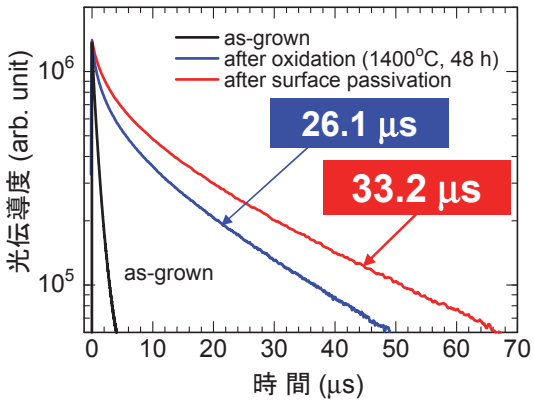


図 6. 熱酸化による炭素空孔消滅を活用した厚膜 SiC エピタキシャル成長層のキャリア寿命の改善（光伝導度の減衰特性）。成長直後の結晶では、キャリア寿命が約 1 μ s であるが、熱酸化処理と表面パッシベーションを施すことで、30 μ s 以上のキャリア寿命が得られている。

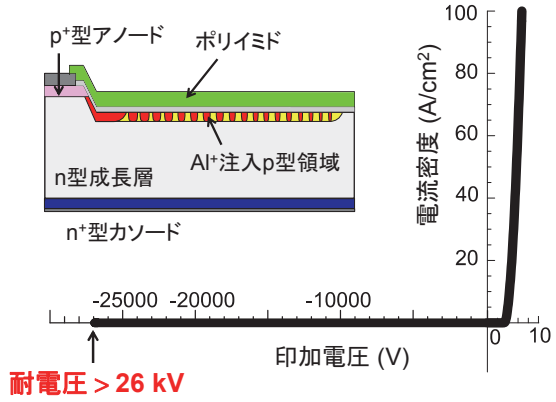


図 7. 高純度・厚膜 SiC エピタキシャル成長層を利用して作製した SiC PiN ダイオードの電流密度―電圧特性。26kV 以上の超高耐圧と 19mΩ cm² という低いオン抵抗を両立している。

5. Ⅲ族窒化物半導体の結晶成長とデバイス応用

窒化ガリウム（GaN）は短波長発光デバイス用材料として、社会にイノベーションを興した半導体です。GaN は、AlGaN/GaN ヘテロ界面に高濃度、高移動度の電子を誘起することができるため、高周波デバイス、パワーデバイス用材料としても大きな注目を集めています。Si 基板上に成長した GaN、いわゆる GaN/Si パワーデバイスはコスト競争力があり、商品化も始まっています。その一方で、GaN の電子物性は SiC に比べると不明な点が多くあります。これは、発光ダイオードも含めて歴史的に GaN デバイスの研究が結晶欠陥（貫通転位）を多く含むヘテロエピタキシャル成長層を用いたものが中心だったからです。その物性が転位由来なのか、GaN の本質的なものなのかの切り分けることが困難でした。本研究室では、転位密度がヘテロエピタキシャル成長層に比べて 3 桁小さいハイドライド気相成長（HVPE）法により作製された高品質 GaN バルク結晶を用いて、GaN の物性評価の基礎検討を進めています。具体的な成果の例としては、GaN ショットキー接合の逆方向リーク電流のメカニズム解明が挙げられます。ヘテロエピタキシャル成長した GaN と GaN バルクを用いてショットキー接合を作製、詳細な特性評価の結果を比較することで、逆方向リーク電流は転位密度の低減と共に大きく減少し、十分に転位を低減した結晶では、リーク電流は、金属 /GaN 界面における熱電界放出モデルにより完全に説明できることを初めて明確に示しました（図 8）[14]。これは、GaN デバイスでは空乏層内の電界強度が高いために、ショットキー障壁が薄くなり、量子力学的トンネル効果が顕著になるからです。この成果により GaN ショットキー接合の電気的特性の予測（シミュレーション）が可能となり、今後のデバイス設計に大きく資する成果と言えます。

また、窒化アルミニウム（AlN）は 6 eV という大きなバンドギャップを持ち、深紫外発光材料や厳環境電子デバイス材料として注目を集めています。AlN は SiC と格子不整合が 0.9% と小さく、高品質・大面積の SiC 基板は AlN 成長用基板として有望です。本研究室では分子線エピタキシー（MBE）法により高品質 AlN を SiC 上に成長することに取り組んでおり、AlN を成長の初期段階から SiC 上に原子レベルで一層ずつ成長させ、数 nm という薄膜でも極めて高品質の AlN を得る技術や、その成長技術を応用することで 700nm という厚さまで AlN を SiC 上にコヒーレント成長（格子不整合による転位を

生じさせないこと）に成功しています（図 9）[15]。デバイス応用として、あらかじめ用意した SiC pn 接合上に n 型の AlN/GaN 短周期超格子を形成し、これを電子エミッタとして活用する npn 型 AlGaN/SiC ヘテロバイポーラトランジスタの試作を行い、初めてこの系で 20 を超える電流増幅率の実現に成功しています [16]。また、高品質 AlN を用いて AlN の物性を詳細に調べる研究や AlN/GaN 短周期超格子を発光デバイスや電子デバイスに応用する検討も行っています。

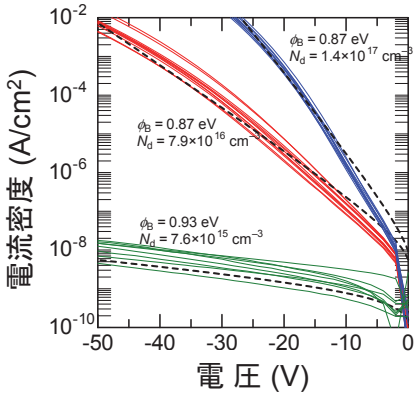


図 8. 3 種類の異なるドナー密度を有するバルク結晶上に形成した GaN ショットキーダイオードの逆方向リーク電流の測定値（実線）と熱電界放出（TFE）モデルによる計算値（破線）。

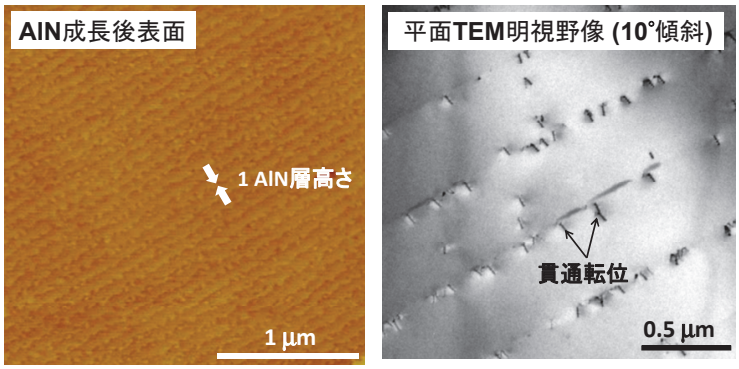


図 9. SiC（0001）基板上に成長した AlN 結晶の原子間力顕微鏡（AFM）による表面形状像（左）および透過電子顕微鏡の平面明視野像（右）。表面には Al-N の 1 層分に相当する結晶のステップ - テラス構造が整然と並んでいる。透過電子顕微鏡では、貫通刃状転位が見られるが、その密度は 4x10^{8}cm^{-2} であり従来に比べて二桁少ない。

6. ワイドギャップ半導体 MEMS

本研究室では、マイクロエレクトロメカニカルシステム（MEMS）に関する研究も行っています。今日、Si MEMS を用いた様々なセンサが作られて、自動車、スマートフォン、ゲーム機などに広く使われています。本研究室では、ワイドギャップ半導体材料を MEMS の構造材料として用いることで、新しい機能性や高い性能を実現することを目指して研究を進めています。Si に比べて、一般にワイドギャップ半導体は加工が困難で、MEMS の基本構造である片持ち梁（カンチレバー）やブリッジの作製方法自体が研究対象となっています。本研究室では、蓄積してきた電子デバイス作製のための半導体加工プロセスに、電気化学エッチングや光電気化学エッチングを組み合わせることで作製に取り組んでいます。最近、再現性良く SiC カンチレバーの作製ができるようになり、次のステップとして、作製した SiC カンチレバーの機械共振特性の詳細な評価を行っています。当研究室で作製した SiC カンチレバーは、従来報告されている多結晶 SiC や Si 基板上 SiC のカンチレバーの 10 倍以上の優れた共振特性（Q 値）を示すことが判明しました [17]。このような高 Q 値カンチレバーはセンシングなどの MEMS 応用上非常に有利ですので、基礎検討と並行して、何らかのセンサを作製してその優位性を実証したいと考えています。

7. おわりに

上述のように、当研究室では、現在、伝統的な研究テーマと新しい研究テーマをバランスさせながら、幅広い研究活動を展開するよう心掛けています。学生は、ほぼ全員が独立したテーマに取り組み、独自性の高い博士論文、修士論文、学士論文を仕上げられるようスタッフ共々努力しています。京都大学と

いう恵まれた研究環境で学生を指導し、将来のリーダーを育成すべき使命、責任を重く感じながらも、学生からの積極的な提案や予想外の発見を楽しんでいます。もし当研究室の研究活動にご興味をお持ちいただけましたら、研究室ホームページ（http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp）をご参照ください。先輩諸氏からのご指導をいただければ幸いです。

参考文献

[1] The International Technology Roadmap for Semiconductors（ITRS: http://www.itrs.net/）.

[2] N. Morioka, H. Yoshioka, J. Suda, and T. Kimoto, J. Appl. Phys. **109**（2011）064318.

[3] S. Mori, N. Morioka, J. Suda, and T. Kimoto, IEEE Trans. Electron Devices **60**（2012）944.

[4] H. Yoshioka, N. Morioka, J. Suda, and T. Kimoto, J. Appl. Phys. **109**（2011）064312.

[5] J. F. Gibbons, and W. E. Beadle, Solid-State Electron. **7**（1964）785.

[6] Y. Nishi, T. Iwata, and T. Kimoto, Jpn, J. Appl. Phys. **50**（2011）015802.

[7] T. Kimoto, Tech. Digest 2010 VLSI Technology Symp.（Honolulu, 2010）, p.9.

[8] K. Kawahara, X.T. Trinh, N.T. Son, E. Janzen, J. Suda, and T. Kimoto, Appl. Phys. Lett. **102**（2013）112106.

[9] T. Hiyoshi and T. Kimoto, Appl. Phys. Express **2**（2009）041101.

[10] S. Ichikawa, K. Kawahara, J. Suda, and T. Kimoto, Appl. Phys Exp. **5**（2012）101301.

[11] N. Kaji, H. Niwa, J. Suda, and T. Kimoto, Ext. Abstr. Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2013（Miyazaki, 2013）, p.86.

[12] H. Miyake, T. Kimoto, and J. Suda, IEEE Electron Device Lett., **32**（2011）285.

[13] H. Miyake, T. Okuda, H. Niwa, T. Kimoto, and J. Suda, IEEE Electron Device Lett. **33**（2012）1598.

[14] J. Suda, K. Yamaji, Y. Hayashi, T. Kimoto, K. Shimoyama, H. Namita, and S. Nagao, Appl. Phys. Exp. **3**（2010）101003.

[15] H. Okumura, T. Kimoto, and J. Suda, Appl. Phys Exp. **5**（2012）105502.

[16] H. Miyake, T. Kimoto, and J. Suda, IEEE Electron Device Lett. **31**（2010）942.

[17] K. Adachi, N. Watanabe, H. Okamoto, H. Yamaguchi, T. Kimoto, J. Suda, Sensors and Actuators A **197**（2013）122.

産業界の技術動向

日本エレクトロニクスの復権に向けて

シャープ株式会社
種　谷　元　隆

1. はじめに

資源国でない日本は、付加価値貿易によって産業を発展させてきた。1970 年代の生産性競争で日本企業は、垂直統合・自前主義・同業種切磋琢磨による高い生産性を武器として世界市場を席巻し、付加価値獲得競争での優位性を保ってきた。

しかしながら、半導体の性能向上とソフトウェアの進歩による製品の「デジタル化」、さらに各パーツ間のインターフェースのオープン化・標準化による製品の「モジュール化」の進展により、単なるものづくりから得られる付加価値が急速に低下し、日本企業の得意とする高度な擦り合わせ技術の強みが発揮できなくなってきた。この結果、デジタル化・モジュール化が最も早くから進んだエレクトロニクス産業を中心に、近年の日本企業の国際競争力低下という状況を招いている。

それでは、日本企業の「付加価値を生み出す能力」が弱ってきたのかというと、決してそうではない。「技術で勝っても事業で負ける」状況を改めるための「強い技術を利益に繋げる戦略」が重要である。

本稿では、いくつかの事例を挙げながら、日本エレクトロニクス産業復権への方向性の一つとして「付加価値を最大利益に繋げるための仕組み作り」およびその源泉となる「付加価値創出のスピードアップ」について述べる。

2. 日本企業の国際競争力

近年の技術のデジタル化、モジュール化の進展により、日本企業が生み出した付加価値が海外企業にすぐにキャッチアップされ、日本企業が新たなイノベーションを起こす前に追い抜かれてしまう状況となっている。

例えば、IMD（国際経営開発研究所）の国際競争力ランキングでは、日本は 1990 年代前半のトップの位置から一気に順位が下落し、2012 年は 27 位、2013 年は 24 位と低迷している [1]。

世界市場における日本のシェアをみても、図 1[2] に示すように、日本企業は新たな製品市場で当初は高い世界シェアを獲得しながら、急速にシェアを失う傾向がある。さらには、その優位性を保てる期間が短くなってきた。

このようにデジタル化・モジュール化した領域においては、高度な技術を開発しても技術優位が企業収益に結び付く期間が極めて短くなり、莫大な研究開発投資が営業利益の向上につながらないという事態が生じている。

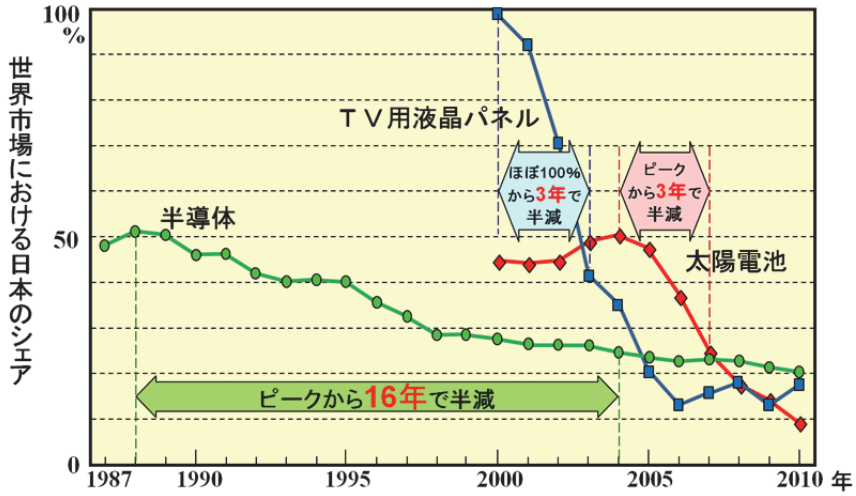


図１　世界市場における日本のシェア推移 [2]

一方、日本の「付加価値を生み出す能力」はどうかというと、前述の 2013 年 IMD 国際競争力ランキングにおいても、科学インフラの項目では日本はここ数年間２位を維持している。また近年の米国特許商標庁の分野別特許登録状況をみると、日本は全体でも、「バイオテクノロジー」「ナノテクノロジー」「再生可能エネルギー」「情報通信技術」というような分野別でも、米国に次ぐ２位のレベルを保っている [3]。さらにパテントファミリーとしての特許出願数においては、日本が世界第１位のシェアを占めている [4]。

すなわち日本企業の「知的生産力」は衰えていない。では今後日本企業が生み出す付加価値を守り、国際競争力を回復していくためには、どうすればよいだろうか。

3.　付加価値を最大利益に繋げるための仕組み作り

このような状況を打破するためには、企業のビジネスモデルを変革していかねばならない。

デジタル化・モジュール化の進展により、当該分野製品の製造に参入することへの技術的障壁が低くなり、多くの新興国企業が参入することで製品のコモディティ化を引き起こしている。こうした中で、海外の有力企業の中では、製品の普及面では新興国企業の製造能力を積極的に活用する一方、自社の付加価値を競争力の源泉として自社内に残し、高い利益に繋げる巧みなビジネスモデルを展開する企業が出現してきた。

日本企業においても、従来の摺合せ型ビジネスモデルを変革し、創出した付加価値を最大利益に繋げていくために、戦略的な「知的財産（知財）マネジメント」を実現していくことが重要となる。知財マネジメントの基本は、強みである知財のどの部分をブラックボックス化（クローズ化）して自社内に確保し、どの部分をオープン化（さらには国際標準化）して市場拡大に結び付けるか、というオープンとクローズの巧みな使い分け（オープン・クローズ戦略）である。オープン・クローズ戦略の基本フレームを図 2[5] に示す。

ここで重要なのは、知財をどのような形でクローズするか、すなわち知財をクローズするための「器」として何を用いるか、ということである。

図３に、そのような「器」の例を示す。知財をクローズする「器」は、それぞれの企業の事業分野や生み出した付加価値の内容に応じて様々な形が考えられる。各企業にとって最大の利益が得られるような「器」をどのように選び、オープン化によってその「器」を如何にして世の中に大量に普及させるか、という戦略を作り上げ、その戦略を実現するビジネスモデルを構築していくことが、高収益を確保するための重要な要素である。

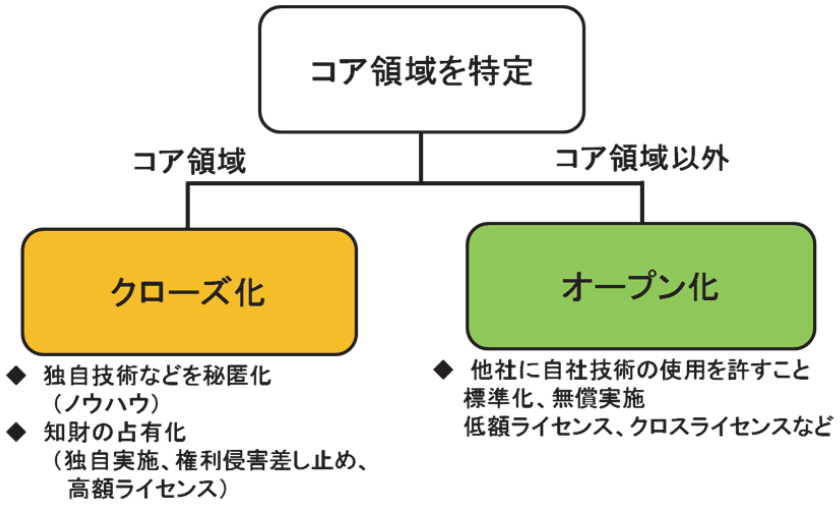


図２ オープン・クローズ戦略の基本フレーム [5]

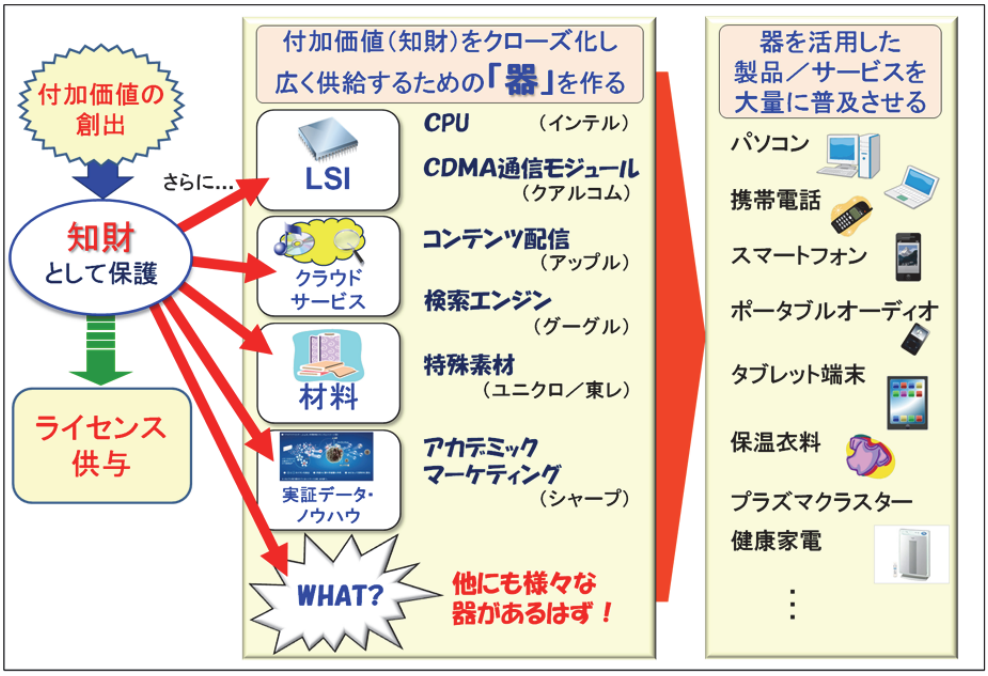


図３ 知財をクローズ化するための「器」の例

図３において、例えばインテルとクアルコムは、いずれもコアとなる部品をクローズ化して自社の知財を確保しながら、周辺領域のオープン化によりコア部品を搭載する商品が大量に普及する中で、コア部品の独占的販売やライセンスによって利益を得るというビジネスモデルで成功している。

またアップルやグーグルは、独自のインターネット（クラウド）サービスを提供することでユーザーに新しい体験を提供し、サービスと連携した端末あるいは広告により高収益を得ている。

またこれらの企業は、付加価値創出の源泉となる研究開発に注力しており、一般に売上高に占める研究開発費の割合も大きくなっている。

図４に、これら米国企業の最近３か年の研究開発費売上比率と営業利益率を示す。比較のため日本のエレクトロニクスメーカー３社についても同様に図中にプロットした [6]。

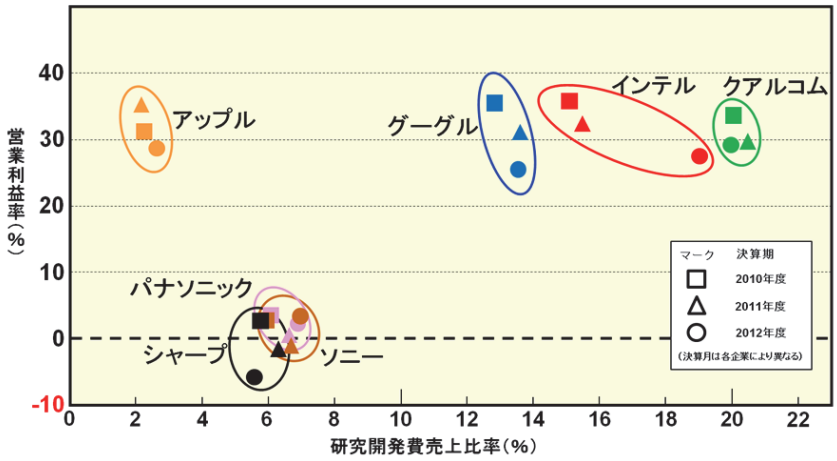


図４ 各社の研究開発費売上比率と営業利益率 [6]

図４から分かるように、このように巧みにビジネスモデルを構築した米国企業は、付加価値創出の源泉である研究開発費を売上に対して高い比率で確保し、売上の伸長に合わせて研究開発費も増大させながら、30%前後の高い営業利益率を維持している。これに対して日本メーカーは、研究開発投資が収益に結びついていない状況が表れている。

図３におけるその他の「器」の例としては、知財を材料（特殊素材）の形でクローズしたユニクロがある。ユニクロは、東レと共同開発した特殊素材により保温インナーを商品化した。その後、ユーザーの意見を商品開発に反映するとともに、東レとの戦略的パートナーシップによるグローバルな原料から製品までの大量一貫生産体制の構築により、商品を進化させながらグローバル規模で販売数を拡大している。

また、知財をモノではなくデータやノウハウの形でクローズ化した例として、シャープのプラズマクラスター技術がある。2000 年にシャープが初めて空気清浄機に搭載したプラズマクラスター技術は、消費者の健康・環境意識の高まりとともにエアコンや冷蔵庫、掃除機といった家電製品にその応用分野を広げ､コモディティ化していた白物家電を「健康･環境家電」という成長産業に変身させた。シャープは、プラズマクラスター技術に関して、専門の第三者機関により効果を裏付ける「アカデミックマーケティング」という手法を用いることによって競争優位を維持している。　図５に、アカデミックマーケティングによるプラズマクラスター技術の効果実証例を示す。

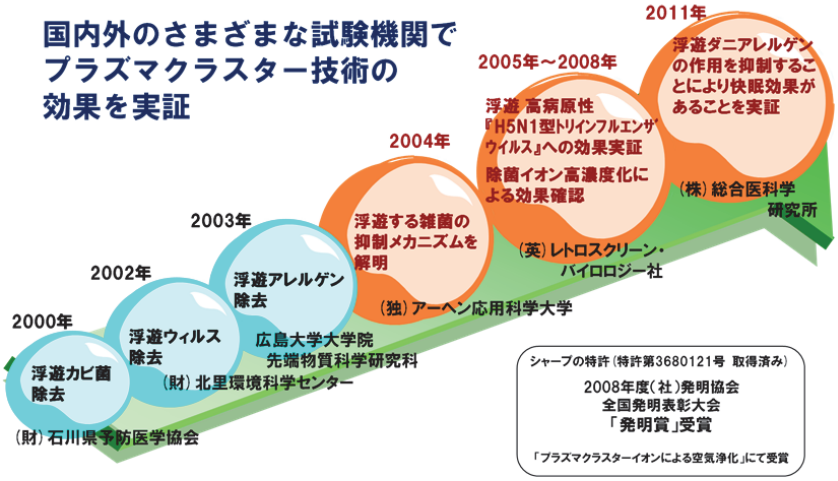


図５ アカデミックマーケティングによるプラズマクラスター技術の効果実証の例

プラズマクラスター技術によって浮遊ウィルスや浮遊カビ菌等の作用を抑える効果は目に見えないが、アカデミックマーケティングにより国内外の様々な大学や試験機関において実証することで、その効果を世の中に広く知らしめることができた。さらに、これら長年の実証試験の成果として得られた膨大なデータやノウハウが、特許とともにシャープの知財として蓄積され、他社の追随を容易に許していない。

4. 新たな付加価値創造のスピードアップ

他社に先駆けて自社の付加価値をクローズ化し、利益に繋げるためには、新たな付加価値を生み出すスピードを上げてイノベーションやカテゴリーシフトを起こしていかなければならない。またオープン化による商品の普及を進めるためには、国際標準化への積極的な取り組みも必要である。

重要なことは、ユーザー目線に沿った価値を創造していくことである。グローバル市場でのユーザーニーズを吸い上げ、課題解決型の価値創造を世界に先駆けて実行していかなければならない。その中で、オープン・クローズ戦略を実現するビジネスモデルを構築していく必要がある。

新たな価値の創造にはさまざまな分野の技術の組み合わせが求められるため、個々の企業の努力だけでなく、企業間や産官学の連携強化が必要である。付加価値創出スピードを上げるためには、オープンイノベーションが有効な手段となる。

シャープでは、図６に示すように、オープンイノベーションを進める上で社外からの技術導入とともに社内技術を社外に提案する技術マーケティングにも力を入れており、異業種企業との技術交流を通じて新たなニーズを取り込み、いち早く新規事業創出に結び付ける取組みを進めている。

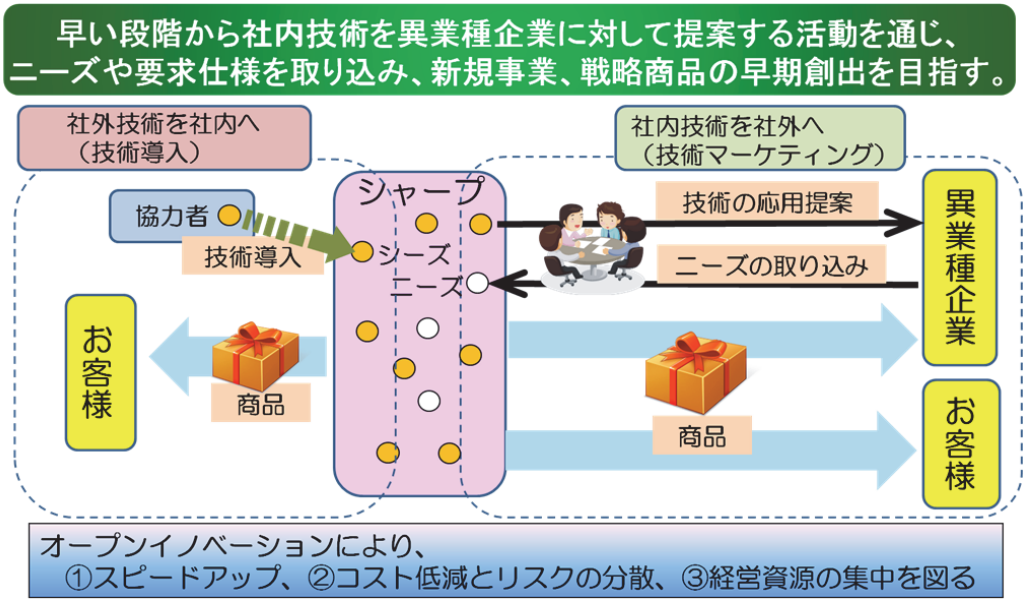


図６　シャープのオープンイノベーションへの取組み

このような技術マーケティングにおいて重要なことは、「シーズ側の人間が、応用を想定して、分かりやすく技術を提案する」ことである。ニーズ側の人間にとって学会発表的な技術説明ではなかなか理解しがたい。シーズ側の人間が１ユーザーとして応用を考え、それを分かりやすく相手に伝えて理解してもらえる提案力を養う必要がある。大学教育においても、深い専門性に加えて広い視野を持ち、自分の思いを相手に伝えるプレゼンテーション能力をも備えた人材の育成を期待したい。

5. おわりに

日本企業が国際競争力を取り戻すためには、戦略的な知財マネジメントが重要であり、その基本は自社の強みである知財のクローズ化とオープン化の巧みな使い分けにある。

知財を自社内にクローズする手法（器）は様々な形があり得る。競争優位を維持するためには、自社の保有する知財・付加価値をクローズするために最適な器を考案し、最大の利益を確保できるようにビジネスモデルを変革していくことが重要である。

そのためにも、新たなイノベーションやカテゴリーシフトを海外企業に先駆けて進めていかなければならない。オープンイノベーションはその有効な手段である。社外からの技術導入ばかりでなく、社外に自分たちの技術を分かりやすく提案し活用していただいて新たな価値を創造していく「技術マーケティング」が重要な役割を担っており、そのような提案力を備えた技術者を育てていくことが必要となっている。

これから社会に出る若い人たちにも、社会の仕組み、経済の動き、世の中が何に価値を見出しキャッシュがどのように流れるか、ということをしっかりとつかみ咀嚼できるよう、感性を磨き発想力を高めていっていただきたい。また、自らの技術に独自性を持ち、自分の生み出す技術がトップであると言える根拠を作り上げる力を身に付けていくことを望みたい。

参考文献

1) IMD World Competitiveness Yearbook 2013.
2) 電子情報技術産業協会 IC ガイドブック編集委員会：IC ガイドブック -2012 年版 -（産業タイムズ社、2012）、環境省：平成 24 年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書（日経印刷、2012）、 総務省：ICT 産業の国際競争力とイノベーションに関する調査 (2007)、総務省：平成 24 年版 ICT 国際競争力指標（2012）より作成。
3) 文部科学省：科学技術指標 2012（2012）。
4) 文部科学省：科学技術指標 2013（2013）。
5) 経済産業省、厚生労働省、文部科学省：2013 年版ものづくり白書（2013）。
6) 各社の決算発表資料より作成。ただし、図中「2012 年度」として、以下の決算期を用いた。他の年度も同様。
・インテル、グーグル：2012 年 12 月期
・クアルコム、アップル：2013 年 9 月期
・シャープ、パナソニック、ソニー：2013 年 3 月期

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

電気関係研究室一覧

工学研究科（大学院）
電気工学専攻
先端電気システム論講座（引原研）
システム基礎論講座自動制御工学分野（萩原研）
システム基礎論講座システム創成論分野
生体医工学講座複合システム論分野（土居研）
生体医工学講座生体機能工学分野（小林研）
電磁工学講座超伝導工学分野（雨宮研）
電磁工学講座電磁回路工学分野（和田研）
電磁工学講座電磁エネルギー工学分野（松尾研）

電子工学専攻
集積機能工学講座
電子物理工学講座極微真空電子工学分野（白石研）
電子物理工学講座プラズマ物性工学分野
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）
デバイス創生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ィジタル通信分野
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）

システム基礎論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）
http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「非因果的周期時変スケーリングに基づくロバスト制御器設計とその実用性検証」

自動制御工学はさまざまな産業の発展を支える基礎的な学問である。近年、制御すべき対象はますます高度・複雑化しており、より取扱いの難しい対象を制御するための理論構築が求められている。本研究は、そのような要請に応えるための一つの方針として、ロバスト制御と呼ばれる技術のさらなる先鋭化を目指したものである。

現実の制御対象の制御理論に基づく制御においては、その対象を伝達関数や状態方程式でまずモデル化するのが一般的である。しかし、現実の対象は、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、不可能である。そのために生じる現実の制御対象とそのモデルの間のずれを、不確かさと呼ぶ。この不確かさの存在を十分に考慮せずに制御器設計を行うと、設計された制御器は現実の制御対象に対しては期待通りの性能を発揮できないといった不都合が生じ、制御系が不安定なものとさえなり得る。したがって、生じうる不確かさの範囲をあらかじめ見積もった上で、モデルと現実の制御対象の間のその範囲におけるずれに関してはその影響を抑え込んで所望の性能を保証するロバスト性という考え方は、制御の実応用上の観点から大変重要である。

本研究では、より精度の高いロバスト制御を達成するため、非因果的周期時変スケーリングという手法を制御器設計に応用することを検討した。非因果的周期時変スケーリングとは、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るロバスト安定解析のためのアプローチである。リフティングを用いる際にはリフティング周期と呼ばれる周期をユーザー側で設定することになるが、この周期を大きくとることにより、対応する非因果的周期時変スケーリングに基づくロバスト安定解析の解析精度を向上させることが可能である。本研究では、非因果的周期時変スケーリングの活用がもたらす恩恵を享受しつつ、より性能のよい制御器を設計するための設計法を整備した。ただし、ロバスト性の中でももっとも基本的な性質であるロバスト安定性のみを考慮して制御器設計を行うと、制御系の応答が現実には許容できないほど振動的になってしまう恐れがある。そこで、本研究ではそのような振動の抑制を目的とし、ロバスト安定性だけでなくロバスト H ∞性能も同時に考慮するよう上記設計法を整備した。整備した設計法の有効性は、台車型倒立振子を用いた制御実験を通して検証した。本研究で扱った台車型倒立振子（模式図を図１に示す）は振子長が 30cm、40cm、50cm から選択可能である。本研究ではこの振子長が 40cm を基準として不確かであるとみなし、（30cm から 50cm の範囲で）振子長に依らず振子を鉛直上方へ倒立させることの可能な単一の制御器を設計した。その実験結果（台車の移動距離 r に関する応答）を図２に示す。リフティング周期 N=1 の結果（破線）は応答が大きく振動しているのに対し、本質的に非因果的周期時変スケーリングを活用した N=4 の結果（実線）ではその振動が大きく低減されている。なお、本実験は振子長 40cm のもとで行ったが、振子長を 30cm、50cm にかえて実験を行っても概ね同様の結果が得られた。

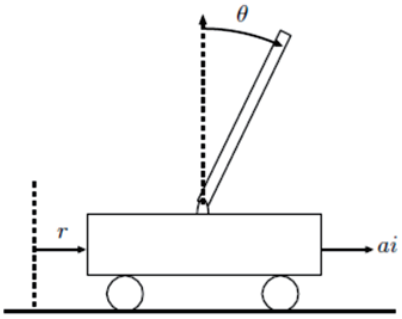


図１：台車型倒立振子の模式図

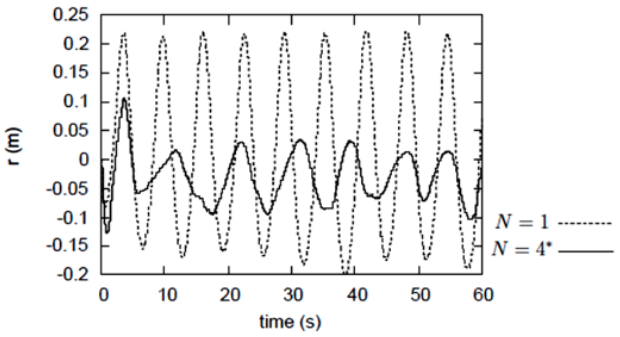


図２：実験結果（台車の移動距離 r の応答）

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/
「心臓ペースメーカ細胞におけるリズム調節機構の数理的解析」

生物の細胞は、リン脂質の２重層からなる細胞膜で覆われているが、イオンチャネルというタンパク質が細胞膜を貫通しており、そこを特定のイオンが選択的に通過する。イオンがイオンチャネルを通って細胞内外を移動することで細胞膜内外に電位差が生じる。この電位差（活動電位）が、信号として細胞膜上を、さらには細胞を越えて伝わることで、脳・神経系の情報処理や心臓の律動制御が行われている。このような電気生理現象は、Hodgkin–Huxley（HH）型の微分方程式で表現することができ、それを用いることで、神経系や心臓の様々な性質を数理的に、システムとして解析することが可能になる。

図１(a) は、（ウサギの）心臓のペースメーカである洞房結節（辺縁部の）細胞に発生する活動電位の時間波形を示している。Zhang ら（2000）によって提案された HH 型モデル（15 変数の非線形常微分方程式で記述される）を用いて数値計算した。このような周期的電気信号が心臓各所に適時に伝わることで、心臓の周期的な収縮が制御される。ところが、遺伝的あるいは後天的要因により、ペースメーカ細胞膜上に存在するイオンチャネルになんらかの異常が生じると、心臓のポンプとしての機能に障害が生じる（イオンチャネル病）。図２(b) は、イオンチャネルに変異が生じたとき、ペースメーカ細胞の活動電位がどのように変化するかを纏めた図であり、非線形系の分岐解析を行うことにより得られた。横軸と縦軸は、それぞれＬ型Ca2+チャネルと速い遅延整流性K+チャネルの変異を表しており、図中の様々な曲線は、活動電位の性質が変わる境界線を示している。例えば、イオンチャネルの変異が、HB や DC4 と記された曲線を越えて area2 に及べば、細胞は周期的活動電位の生成を停止し、ペースメーカとしての機能を全く停止する。また、250 などの数字が記された曲線は活動電位の周期（の等周期線）を表しており、イオンチャネルの変異に伴って、リズムがどのように変調するかが分かる。特に、等周期線が密集する箇所では、チャネル変異に対する周期の感受性が高く、その辺りで生じる変異は重篤な変異であると言える。細胞の電気生理学実験だけでは、このような描像を明らかにすることは難しく、数理的・システム論的研究ならではの産物である。

参考文献

[1] S. Doi, J. Inoue, Z. Pan and K. Tsumoto, *Computational Electrophysiology: Dynamical Systems and Bifurcations,* Springer (2010).

[2] Z. Pan, R. Yamaguchi, S. Doi: Bifurcation analysis and effects of changing ionic conductances on pacemaker rhythm in a sinoatrial node cell model, Biosystems, Vol. 106, 9–18 (2011).

[3] 潘振興、土居伸二：心臓洞房結節細胞詳細モデルの大域的分岐構造とペースメーカー周期の変動性、電学論Ｃ , Vol. 131, pp.2138-2147 (2011).

[4] R. Tsuneki, S. Doi, J. Inoue: Generation of slow phase-locked oscillation and variability of the interspike intervals in globally coupled neuronal oscillators, Mathematical Biosciences and Engineering, Vol. 11, pp.125– 138 (2014).

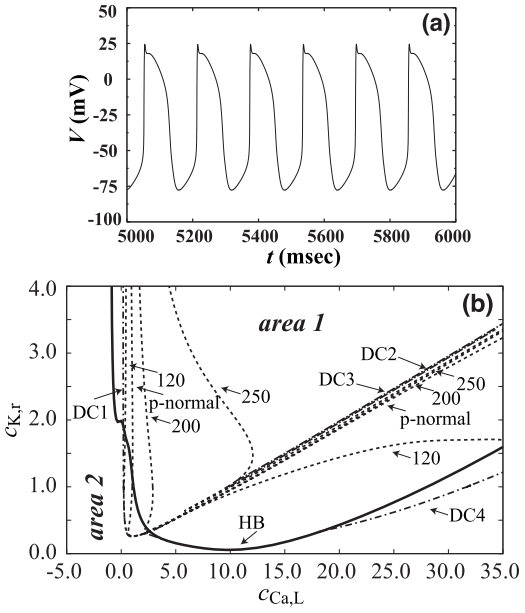


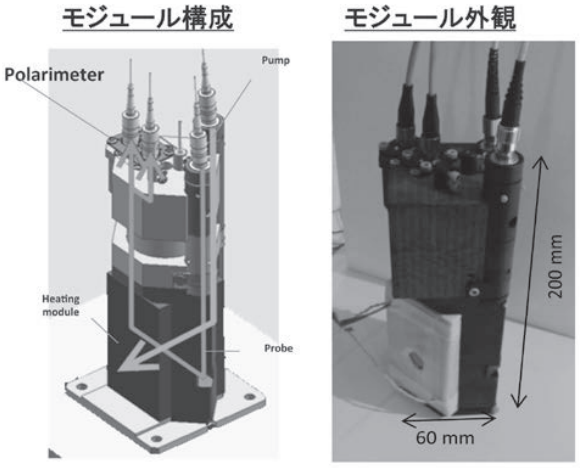
図１ (a) 心臓ペースメーカ細胞の活動電位波形
(b) 2- パラメタ分岐図

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/
「超高感度な光学的磁気計測により高次脳機能の謎を探る」

人間の脳が有している様々な高次機能の謎を探り、得られた知見を人類の幸福に役立てて行くという学問分野は、今後益々その重要性を増して行くと考えられる。具体的には、システム科学や神経科学などの境界を広げることはもとより、より人間の脳に近い機能をもったロボットなどの知能化機械の実現、人間に代わって安全に自動運転する乗り物の実現といった工学的応用、神経疾患や精神疾患の診断支援、病気や事故で視覚や聴覚といった感覚機能に障害をもった人のための機能代行、リハビリテーションといった医療や福祉分野への応用など、様々な貢献が期待できる。

本研究室では、生体機能工学分野のテーマの一つとして、人間の高度な脳の働きを脳を傷つけずに計測・解析・イメージングする新たな手法の研究を行っている。中でも、脳磁図 (MEG) に代表される極微弱な生体磁気計測と磁気共鳴画像 (MRI) の研究に重点をおいて、基礎から応用にいたる幅広い展開を行っている。今回は、その中から超高感度の新規な光学的磁気計測に関する研究を紹介する。

従来、生体磁気計測においては超伝導量子干渉素子（SQUID）が使用されてきた。しかし、SQUID は液体ヘリウムにより極低温状態にして動作させる必要があり、装置自体は勿論、高額な維持費が必要であり MEG の普及を妨げる要因の一つとなっている。一方で近年、光ポンピング原子磁気センサ (OPAM) により、1fT/Hz$^{1/2}$ オーダの感度を有する SQUID と同レベルあるいは凌ぐ超高感度が達成できることが報告され注目が集まっている。



OPAM は生体磁気計測に留まらず、核磁気共鳴 (NMR) 信号の検出や磁気共鳴画像 (MRI) といった生体医工学分野への応用が開始されており、基礎物理学研究をはじめ高感度の磁気センシングが要求される様々な応用分野の進展に大きく貢献すると期待されている。

我々は 2006 年から OPAM の開発をはじめ、OPAM を用いた生体磁気計測の分野では世界的にも先導的な立場にある研究室の一つである。一昨年には、MCG 計測を実現し [1]、また本年、MEG 計測に成功した。現在、センサのさらなる高感度化 [2] やモジュール化等に加え、OPAM を用いた超低磁場 MRI（ULF-MRI）に関する研究・開発を進めている。図は、文科省「高次生体イメージング先端テクノハブ」プロジェクトによりキヤノンと共に開発中の OPAM モジュールである。今後、ULF-MRI と MEG などの同時計測が行えるマルチモーダルシステムの実現を目指して研究を進めて行く予定である。

SQUID を凌ぐ超高感度を液体ヘリウムなどによる冷却なしに実現できる可能性を秘めた OPAM にはまだ多くの基礎的研究が求められている。将来、理論的に予測されている～ 10aT/Hz$^{1/2}$ オーダの超高感度が達成されれば、脳機能計測に留まらず磁場計測に関連する様々な分野にイノベーションやパラダイムシフトを起こすことが期待できる。

[1] Kamada K, et al., “Human MCG measurements with high-sensitivity potassium atomic magnetometer”, Physiological Measurement, Vol.33, pp.1063-1071 (2012)

[2] Ito Y, et al., “Development of optically pumped atomic magnetometer using a K-Rb hybrid cell and its application to magnetocardiography”, AIP advances, Vol.2, 032127-1-5 (2012)

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/

「メタマテリアルの等価回路」

メタマテリアルとは人工的な構造によって作られた自然界にはない特性をもつ物質のことを言う。たとえば図１のような誘電率（ε）透磁率（μ）の平面において通常の物質は第一象限にあるが、人工的な構造を構成すると負の誘電率や負の透磁率も実現できる。しかし、所望の性質を示す物質構造を設計しようとすると、複雑な構造における電磁現象を把握する必要があり、現在ではまだ手探り状態である。それに対して、複雑な導体構造中の電磁現象を、電気回路を用いて記述することにより、設計への道を開くことを目指している。

Maxwell 方程式では電荷と電流が作る電界と磁界の振舞をおもに扱うが、回路モデルでは電荷と電流の振舞が重要になる。電荷と電流の役割をうまく電気回路に変換できる構造の１つとして、図２左のような導体球と導体線から成る構造を扱う。このような構造では電荷と電流の自分自身への作用以外は、図２右のような点電荷と線電流によるモデルを用いることにより、導体構造と等しいトポロジーをもつ単純な回路モデルを Maxwell 方程式から系統だって導出することができる [1]。

たとえばメタ原子としてよく用いられる図３のような構造では、単純な６次元の常微分方程式で表現される回路モデルが得られる。その周波数特性を電磁界解析（FIT）と比較したものが図３右であるが、簡単なモデルにもかかわらず、膨大な要素数で解く電磁界解析に近い特性が表現できている。このように、Maxwell 方程式の構造を保った形でモデルを導出することにより電磁界解析よりも大幅に単純化された等価回路モデルが得られ、共振や結合などの電磁現象のメカニズムが明らかになることから、電磁現象の設計に向けた研究を進めている。

参考文献

[1]T. Hisakado, K. Yoshida, O. Wada, “Equivalent Circuit Model with External Coupling for Metamaterial Composed of Wired Metallic Spheres,” Metamaterials’ 2013, Poster No. 54, Bordeaux, France (September 2013).

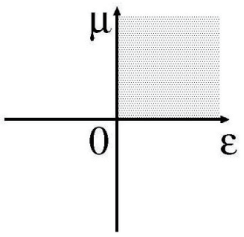


図１　ε - μ平面

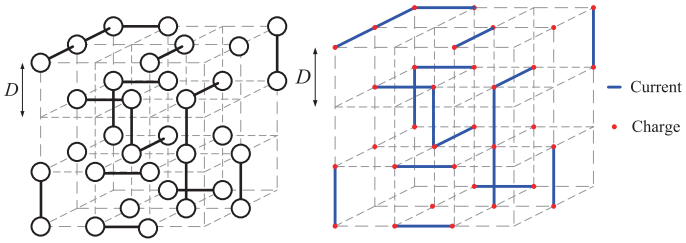


図２　導体線と球から成る構造とそのモデル

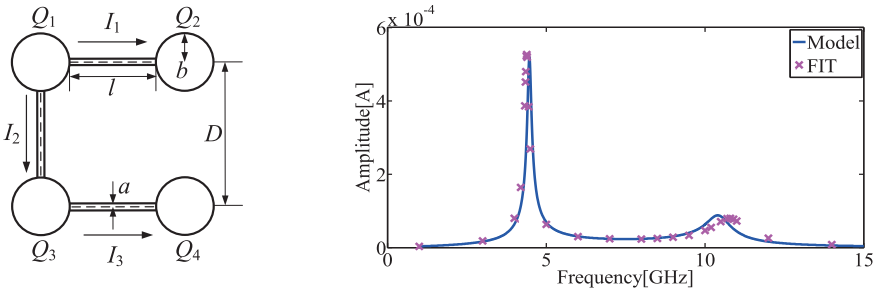


図３　C 型構造とその電流 I2 の周波数特性の電磁界解析 (FIT) との比較
(a=0.01mm, b=1mm, l=5mm, D=7mm)

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野
http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「プラズマを要素とする非線形メタマテリアルの研究」

当研究室の主な研究対象であるプラズマは、半導体デバイス製造などの材料プロセスにおいて、我が国の産業へ大きく貢献してきました。半導体産業におけるプラズマプロセスの重要性は今後もゆるぎなく、研究開発は依然として盛んに行われています。

一方で、我々の研究室では、さらに次世代のプラズマ工学の主要トピックスとなりうる研究テーマを萌芽的に取り上げています。その一つがプラズマを要素とする電磁波メタマテリアル“プラズマ・メタマテリアル”の研究です。我々が世界に先駆けて 2007 年に学術雑誌で提案したこのコンセプトは、幸いにもその重要性（パラメータが動的に調整・再構成可能である点など）が認知されてきており、欧州や中国での研究が追随した後、今年に入ってからは米国における複数の研究グループ立ち上げの動きにつながってきています。先に本誌 CUE NO.27 でその初期研究結果のご紹介をさせていただきましたが、我々としましては、これまで先行してきた優位性を十分生かして、さらに将来的な方向性を示す先導役を務めるべく研究を一層加速しております。

ここでは、プラズマに内在する非線形性を生かして、非線形メタマテリアルを構成する例についてご説明します。非線形メタマテリアルは、メタマテリアルの研究分野の中で、負の屈折率やクローキング（隠れ蓑）現象の実証に引き続く次の段階の研究として、その重要性が指摘されています。プラズマを伝搬電磁波で生成することを考えた場合、伝搬電磁波の電界とプラズマの密度の間にはフィードバック機構があるため自己無撞着に解析する必要がありますが、逆に言うとこの現象は生来強い非線形性を帯びているとも言えます。

ここでは、実験に先行して行った理論解析に結果 [1] についてご説明します。前述のような伝搬電磁波によるプラズマ生成を想定し、その背景として透磁率が負のメタマテリアル空間を設定しました。すると、得られた比誘電率（注：プラズマ密度がゼロのとき +1、プラズマ密度が増えていくと負の方向に大きな値となる）の電磁波電界強度依存性は、図 1 のような分岐図として得られました。図中に矢印で示してありますように、電磁波電界強度が大きくなり閾値（図 2 の点 B）を越えると、比誘電率が +1 の状態から -20 程度の負の大きな値に遷移することが見て取れます。逆に、比誘電率が負の大きな値の状態から電磁波電界強度を小さくしていって別の閾値（点 A）を越えると、比誘電率が +1 の状態に戻ります。この全体動作は、図 2 のモデル図に示しますように、履歴現象を伴い、２つの閾値の間の領域では双安定性を示します。最近、この理論予測の妥当性を強く示唆する実験結果も得られてきております。この現象の応用としては、まずは材料プロセス用の高密度プラズマ源として利用を想定していますが、双安定性を利用した数 10W ～数 100W 帯の高出力マイクロ波のスイッチング素子としての応用も可能と考えています。

参考文献 [1] O. Sakai, Journal of Applied Physics, vol. 109, 084914 (2011). [2] O. Sakai, S. Iio and Y. Nakamura, Plasma and Fusion Research (in press).

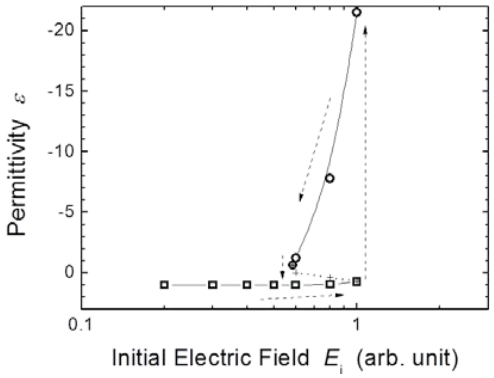


図１．伝搬電磁波（周波数 2.45 GHz）の電界強度と空間の誘電率の関係 [2]．図中の矢印は、現象の推移を示す．

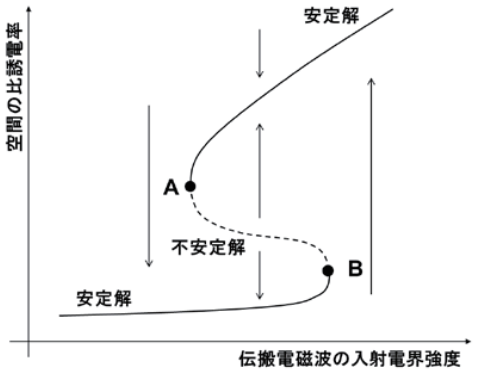


図２．図１の変化を説明するモデル図（分岐図および位相線図）．点 A および B が遷移点（サドルノード分岐点）．図中の矢印は、動作点の変化の向きを示す．

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表面下ナノ構造の非破壊可視化計測」

磁気共鳴あるいはX線による断層撮像法や超音波診断に代表される非破壊内部診断技術は、通常は破壊／侵襲を伴わなければ観察することのできない内部構造を、透過性のある波動や粒子線を用いて外部から可視化する手法として広く用いられていますが、材料評価や電子デバイス診断の分野においても、破壊したり断面露出したりすることなく、内部の構造欠陥や界面構造あるいは不良箇所などを評価する技術として重要な計測法となっています。しかしながら、使用する波動や粒子線の波長、収束性あるいは検出感度などのために、その空間分解能は10 μ–10 mmの範囲にとどまっており、ナノ材料やナノデバイスへの応用が可能な、ナノ空間分解能をもつ非破壊内部診断法の開発が求められています。

一方、原子間力顕微鏡（AFM）は、試料表面の構造や物性を原子・分子スケールで可視化する測定法であり、既にさまざまな分野で使用されていますが、近年、このAFMを用いて表面下に存在する欠陥や界面などの構造を可視化しようとする研究に注目が集まっており、本研究室においても、これまで行ってきた表面ナノ力学物性に関する研究を基盤として、高分解能表面下可視化技術の開発を進めています。

AFM探針と試料表面が接触している場合、接触による応力変化は接触部のみならず試料内部に及ぶため、この応力変化は表面下の力学情報を含んでおり、結果的に表面下診断が可能になることが期待されます。実際の接触応力の微弱な変化の測定にはいくつか方法がありますが、ここでは、接触状態にある探針と試料をそれぞれ異なる周波数f_1およびf_2で振動させ、接触力の非線形応答によって生じる差周波信号（$f_2 - f_1$成分）を試料の各点で検出するヘテロダイン・フォース顕微鏡法（HFM）を用いた測定結果について紹介します。本測定では、ポリイミド基板に堆積・固定したAuナノ粒子（直径40nm）を、ポリマー膜でコートしたモデル試料を用いました。図1にHFM測定系の模式図を示します。探針と試料を接触させた後、試料ホルダーをf_1（800kHz）、カンチレバーをf_2（864kHz）で振動させ、その結果生じた探針変位の信号の中から、$f_2 - f_1$成分を検出して画像化します（ヘテロダイン像）。f_1およびf_2は、$f_2 - f_1$が探針の接触共振周波数付近になるように選んでいます。図2に、コートしたポリマーの膜厚が900nmの場合の観察結果を示します。表面形状像（左）は比較的凹凸の大きい表面であることを示していますが、この中にAu粒子があるかを判断することは非常に困難です。一方、図2の同時観察されたヘテロダイン像にはAu粒子が明瞭に可視化されていることが分かります。

実は、現状では深層部にあるAu粒子が可視化される理由はよく分かっていません。今後、実用的な表面下診断に向けて本手法をさらに改善し発展させるためにも、コントラスト形成機構を明らかにして行きたいと思います。

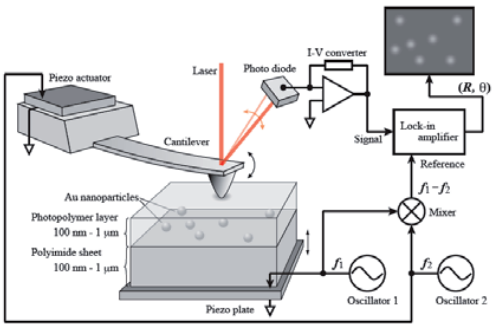


図1：ヘテロダインフォース顕微鏡 (HFM) による表面下構造可視化測定の模式図.

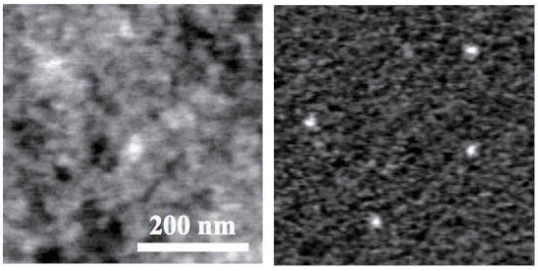


図2：(左) 900 nm厚のポリマーでコートされた表面のAFM形状像. (右) 同じ領域のHFM像. 表面下900 nmにある、直径40 nmのAu粒子が明瞭に可視化されている（＝差周波信号の振幅像）.

量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）
http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器を用いた超小型・超低閾値シリコンレーザ」

電子デバイスとして大きな優位性を持つシリコンを基盤材料に用いた光デバイスの研究は、大規模集積回路に将来的に生じるボトルネックを解決するための手段として注目を集めている。そのような研究の中で最も困難とされているのが、光源として使用しうるレーザ光をシリコンから発生させるための技術である。これはシリコンが間接遷移半導体であり、バンド間遷移による発光確率が本質的に小さいためである。そのような中、2005 年にインテル社によってシリコンのラマン遷移を用いた細線導波路型レーザが検討され、室温連続発振が報告されたが、この素子は 1cm 以上の共振器長をもち 20mW を超える励起パワーを必要としていた。また、高い励起パワーに起因するシリコンの非線形光吸収が生じてキャリアが発生し、これによってラマン散乱光が自由キャリア吸収損失を受けてレーザ発振が阻害されるという問題があったため、PiN 構造の導入と逆バイアスの印加による生成キャリアの引き抜き機構が必要であった。

これに対して我々は独自の高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器を用いることで従来の 10,000 分の 1 の大きさ、（数 μ m）で、かつ励起パワーが 10,000 分の 1（～ μ W）という極微小値で発振するシリコンラマンレーザを実現することに成功した。図 1 にその構造を示す。この構造はヘテロ構造ナノ共振器をベースとしており、シリコンのラマンシフト量である 15.6THz だけ離れた二つの共振モードを形成できる。作製には SOI(Silicon on Insulator) 基板を用い、その上部シリコン層（220nm）に基本格子定数 a を 410nm とした構造を形成した。格子定数が a+Δa(Δa~ 数 nm) と大きくなっている領域に共振モードが形成され、その大きさは数 μ m 程度である。高周波数側のモード（波長 1428nm）をポンプ光で励起し、ラマン遷移を介して低周波数側のモード（1543nm）にゲインを与える。（動作波長に関しては設計によって幅広く調整可能である。）それぞれの共振モードの損失は非常に小さく、その Q 値は 10 万および 150 万と高い。この低損失化には我々がこれまで開発してきた種々の手法が用いられている。共振器によって微小領域に光が閉じ込められることでシリコンの格子振動を介した相互作用が増強されることに加えて、さらに両モードの電磁界分布の対称性および広がり、そしてラマンテンソル対称性のシリコン結晶方位依存性を適切に設計・調整することで高いラマンゲインを達成している。また、微小領域への閉じ込めにもかかわらず非常に低い散乱損失を達成できているため、共振器内の高周波数側モードの光エネルギー密度が低い状況で低周波数側モードのレーザ発振が十分に可能である。そのため、ポンプ光の非線形光吸収の影響が生じる前に発振が達成でき、キャリア引き抜き機構は必要ない。また、高周波数側モードの散乱損失自体も小さいので、外部から入力したポンプ光強度に対する共振器内のポンプ光エネルギー密度が高くなるため、非常に低い入力パワーで発振が可能になる。その結果、図 2 に示すような μ W レベルの低閾値の発振を実現することが出来た。

参考文献

Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, “A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold,” Nature, vol. 498, no. 7455, pp. 470–474, Jun. 2013.

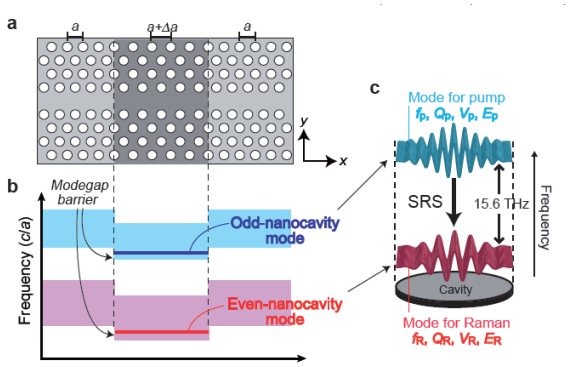


図 1：シリコンラマンレーザの原理図

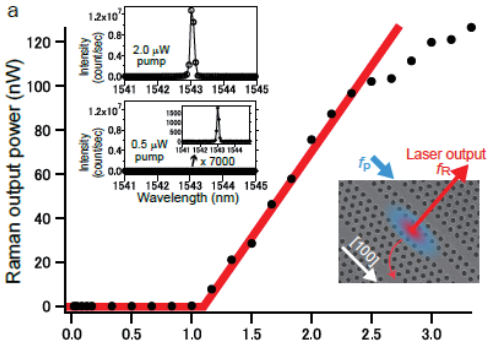


図 2：シリコンラマンレーザの発振特性

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

「メタマテリアルを用いた電磁波の保存と再生」

光を含む電磁波より速く伝搬するものはこの世の中にはないとされ、その性質は通信を含め幅広い分野で利用されています。しかし、光の速度を遅くすることは意外に難しく、屈折率の高い透明な媒質（例えばガラス）中でも真空中の光速の数分の１にしか減速されません。それに対して電磁誘起透明化現象（EIT 現象）といわれる現象を用いると、群速度と呼ばれる光パルスの伝搬速度を極めて遅くすることができます。ナトリウム原子気体を用いた実証実験では、光パルスの伝搬速度を 17m/s まで減速することに成功しています。さらに、EIT 現象を動的に制御することにより、光パルスを媒質中に停止させることも可能となります。その逆過程により、停止した光パルスを再進行させることも可能です。このような、光の保存および再生の技術は「光メモリ」を実現するものとして応用の観点からも盛んに研究されています。

EIT 現象は上記のように、元々原子系を用いて実現されていますが、この現象をメタマテリアルで実現する研究が近年注目を集めています。メタマテリアルとは、金属や誘電体で構成される波長以下の構造の集合体のことを指し、「負の屈折現象」など電磁波に対して特異な応答をする「媒質」として機能します。この波長以下の構造体は、いわば人工的な原子のように振る舞うことから「メタ原子」と呼ばれることがあります。メタマテリアルの特長の一つとして、スケーラビリティがあり、同じような設計方針で、マイクロ波のような低周波数の電磁波から、光のような高周波数の電磁波まで同様の効果を実現することができます。このことが、対象となる電磁波の波長が決まっている自然の原子ではなく「メタ原子」によって EIT 現象を実現することの大きな利点となります。

EIT 現象を実現するメタマテリアル (以下 EIT メタマテリアル) の研究は、2007 年頃から始まり、それ以来あらゆる波長帯で様々な EIT メタマテリアルが提案および実現され、原子系の EIT 効果と同様に、電磁波パルスの進行速度の減速も実験的に実証されています。しかしながら、電磁波パルスのメタマテリアル中での保存および再生はこれまで報告されていませんでした。パルスの保存再生には、EIT 効果を動的に制御する必要があります。そこで、我々は、図１(a) に示すような EIT メタマテリアルを提案しました。構造の内部にバラクタダイオードという電圧で容量を制御できる素子が入っており、これにより EIT 現象の動的制御が可能となっています。図２(b) がこのメタマテリアルの透過スペクトルです。バラクタダイオードに印加される電圧が -0.4V のときには EIT 効果特有の鋭い透明化現象がおこっていますが、-3.6V のときにはそのような現象は起こっていません。このような EIT 現象の切り替えを利用することで、電磁波パルスの保存再生に成功しました [1]。本研究では、メタマテリアルの作成が容易なマイクロ波領域で実証しましたが、更なる高周波化も可能であると考えています。

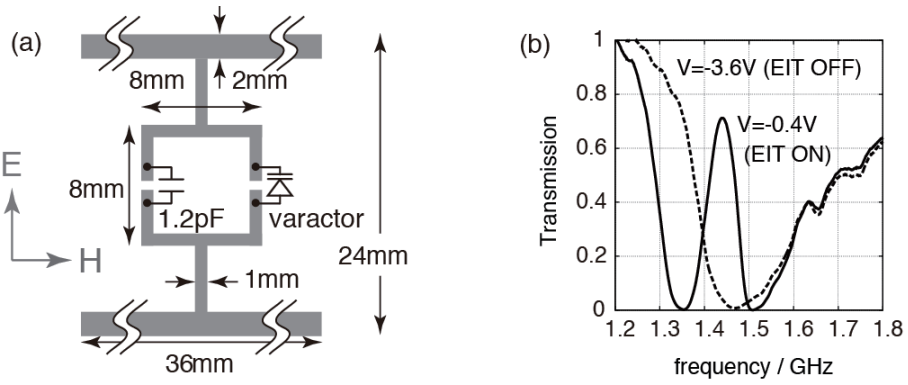


図 1 (a) 電圧可変 EIT メタマテリアルの構造 (b) 透過率

参考文献 [1] T. Nakanishi et al. Phys. Rev. B, 87, p. 161110 (2013).

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）
http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「アクアビジョンの開拓に向けて：水中生物の実時間３次元計測と自由視点映像生成」

画像メディア分野では「アクアビジョン」と呼ぶ多視点映像を用いた水中生物の３次元形状・運動計測の実現を目指した研究を進めている。これは従来空気中にある人物・建造物を対象として３次元形状・運動計測を行って来たコンピュータビジョンを、より複雑な光学現象が生じる水中世界においても機能するように拡張する技術であり、例えば受精卵の３次元計測による卵割過程の可視化・分析による医学・薬学・生物学への貢献、遊泳する魚の３次元計測による漁業、特に養殖業の情報化など、数多くの応用が期待されている。以下ではその第一歩として行った研究として、水中生物の実時間３次元計測と自由視点映像生成について紹介する。

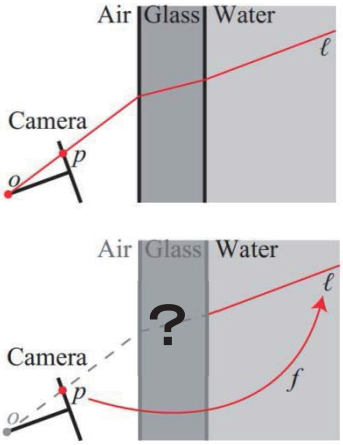


図２：屈折を伴う投影過程のモデル化。上：物理法則に基づく方法、下：水中光線と画素との対応付けに基づく方法

まず図１左に示すように、水槽中の生物（金魚）を水槽の周囲に置かれたカメラ群で撮影する状況を考える。ここで水槽の形状が未知であるとすると、水槽壁面での屈折をスネルの公式など物理法則に沿って記述し、撮影画像と水中空間の関係を解析的に計算する手法は現実的ではない。そこでカメラの各画素と、対象が存在する水中の光線との対応関係を写像関数として学習し、途中の屈折過程については明示的には扱わない手法（図２）を開発して任意の水槽形状内の物体計測モデルを確立した。

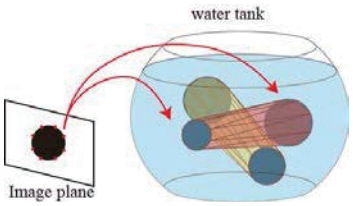


図３：視体積交差法による３次元形状復元

続いて視体積交差法と呼ばれる手法によって３次元形状を復元する。これはカメラの投影中心を頂点、シルエットを断面とする錐体（視錐体）を各カメラで作成し、その交差領域をもって対象形状とする考え方であり、上記の投影モデルでは視錐体のうち水中部分のみを取り出した視錐台を作成して交差領域を計算することに相当する（図３）。

最後にこの処理を GPU 上に実装することで、入力多視点映像から３次元形状を実時間で計算し、これを任意の方向から表示することで自由視点映像生成を実現した（図１右）。今後は水中光線のモデル化と解析の双方について研究を深め、屈折・反射・透過・散乱を伴う複雑な生物（例：クラゲ）についても扱うことができる計算体系の確立を目指す予定である。

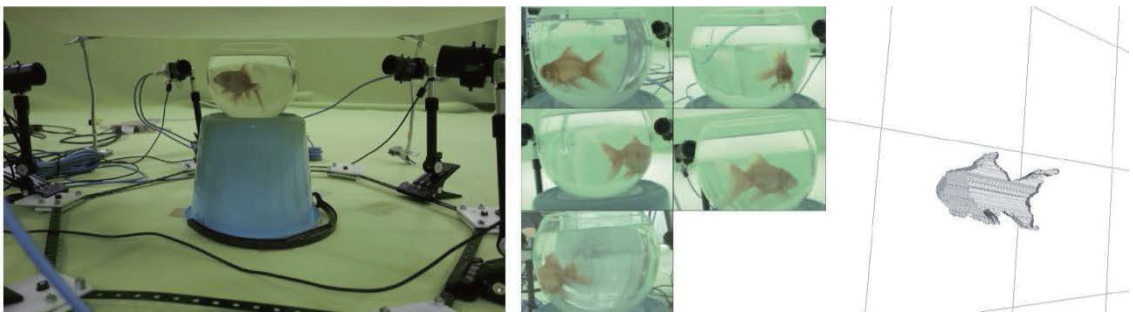


図１：水中生物の実時間３次元形状計測と自由視点映像生成。左：撮影環境。中央：撮影画像の例。右：計測された３次元形状

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/
「モバイルクラウド実現のための異種資源協調利用機構」

近年のモバイル端末の普及は目覚ましく、モバイルアプリケーションを通して様々なサービスが提供されています。一方で、モバイル端末の計算資源や帯域などの通信資源は限られており、サービスや通信品質の制約となっています。本研究では、モバイルユーザ間で協力し、分散的に計算や通信を行う機構をモバイルクラウドと呼び、計算・通信資源の共有メカニズムについて検討しています。

スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末は様々な“資源”を持っています。それは、CPU や GPU などの計算資源、Wi-Fi や LTE などの通信資源、メモリや SSD などのストレージ資源、カメラや GPS などのセンサー情報資源です。これらの“資源”をいかに効率的に共有するかが問題となります。

図１にモバイルクラウドのレイヤモデルを示します。ベースとなるのは無線ネットワーク技術です。端末（ノード）と他の協調端末（クラウド）は､無線ネットワークを通して情報や資源をやりとりします。

次に位置するのが資源共有技術です。豊富な計算資源や通信資源があっても、それらを提供および享受する技術がなければ成り立ちません。三層目は、資源共有制御技術です。モバイルクラウドでは、他のユーザの端末の資源を利用するので、利用効率はもちろん、公平性を考慮した制御が必要になります。こうした制御なしでは、不正に利得を得るユーザが多数現れ、システムが成り立たなくなります。

最上位に位置するのがコンテキスト管理です。コンテキストとは、端末の状態や状況を表す情報のことで、例えば、現在位置やアプリの現在の使用状況など“今”に関することから、移動履歴や通信履歴など過去に関する情報も含まれます。こういった情報は、各レイヤの制御技術の性能向上のみならず、サービス提供者にフィードバックされ、個々人に適したサービス利用が可能となります。

このように、本研究では、基礎となる無線通信技術から、人の行動や心理とも関係の深いコンテキスト技術まで、通信技術という枠を超えて包括的に研究を進めており、情報化社会の一躍を担っています。

参考文献

T. Nishio, R. Shinkuma, T. Takahashi, and N. B. Mandayam, “Service-Oriented Heterogeneous Resource Sharing for Optimizing Service Latency in Mobile Cloud”, in Proc. of ACM Mobile Cloud'13 in Conjunction with MobiHoc 2013, India, July 2013.

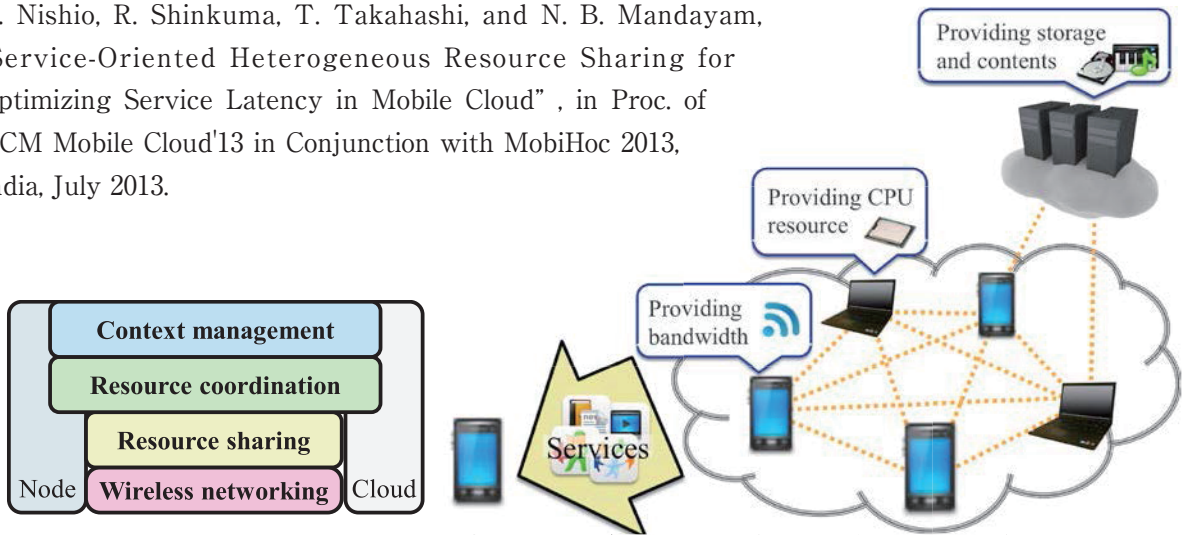


図１：モバイルクラウドコンピューティングのレイヤモデルおよびシステムモデル

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研空室）
http://www.asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

「多値信号伝送におけるファイバ非線形効果の誤り率への影響の高速評価法」

インターネットの普及に伴う加入者系伝送路の光化の進展により、長距離光伝送システムの大容量化がさらに望まれています。このようなシステムとして実際に用いられている構成は、図1 に示すような光ファイバによる光パワー損失を光増幅器で補償する光多中継システムです。このような構成にすることで、国内はもちろん太平洋を横断するような距離も伝送できます。この光増幅器間を1 スパンと呼びます。また、光ファイバの有効利用のため、波長の異なる光それぞれに異なる種類の信号を載せ、図1のようにそれらすべてを1 本の光ファイバで伝送します（以下では、各々を“チャネル”と呼びます）。

しかし、光ファイバの直径は数十μ m と非常に細く、光増幅器により光ファイバ内の光パワー密度が増大するため、非線形効果が起こって波形がなまり、デジタル信号の「0」「1」の判定に誤りが生じてしまいます。多くの光増幅器を用いると、さらに非線形効果の影響が大きくなってしまいます。このような誤って受信される確率である“誤り率”でシステムの性能を示しますが、非線形効果の影響が大きくなると誤り率の劣化につながります。伝送速度を増大させることは光パワーの増加を伴いますので、非線形効果の影響は今後益々増加することになります。

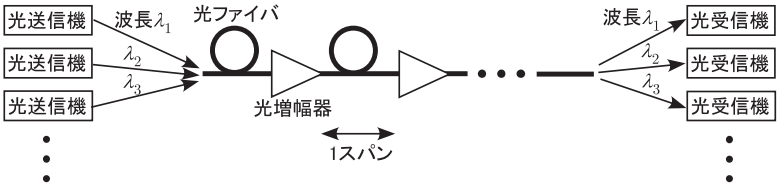


図1：長距離光ファイバ伝送系状

以上のようなシステムを設計する場合、伝送路である光ファイバの種類を変え、ファイバ非線形効果が起こりにくい組合せをシミュレーションにより求めます。1チャネルだけの伝送であればよいのですが、複数チャネルのシステムでは信号の組合せを変えてシミュレーションを行う必要があり、伝送距離により数時間～数日もかかります。

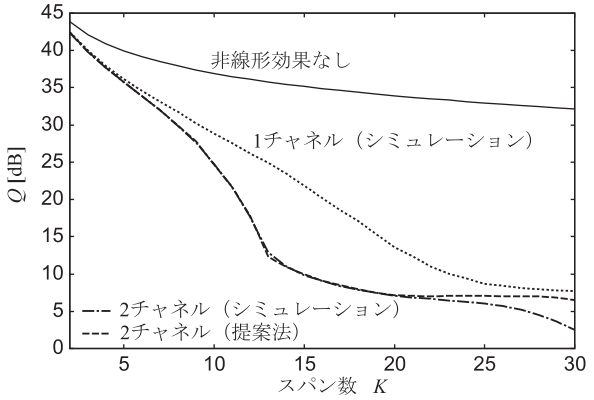


図2：スパン数に対する Q 値

そこで、高速に誤り率への影響を評価する方法を提案してきました。これは従来の信号の送り方（デジタル信号の「0」「1」に対し光の「なし」「あり」）に対する方法でした。現在は、強度や位相の組合せによる光の1つの状態で、複数のデジタル信号を表すことができる多値信号を用いて、高効率化が進められています。しかし、信号の形式が異なるために、従来の方法を多値信号へそのまま適用することができませんでした。複数チャネルの場合の非線形効果の影響が雑音を増加させたように見なせることと、特定の光状態への影響が大きいことを見出し、これらを利用して、計算機内で適切な雑音を発生させ、その影響を計算することで、シミュレーションよりも高速に誤り率への影響を評価できることを示しました[1]。図2に結果の一例を示します。縦軸は誤り率に対応する Q 値で示しており、大きいほど誤り率が良くなります。横軸はスパン数で、1スパン 80km で示しています。22スパン程度まで提案法が有効であることが分かります。これより長い伝送では別の非線形効果が効いてきますので、十分な長さと考えられます。また、計算に要する時間は、シミュレーションにかかる時間の 7/100 となります。これにより、伝送路の設計において容易に最適な構成とすることが可能となります。

参考文献

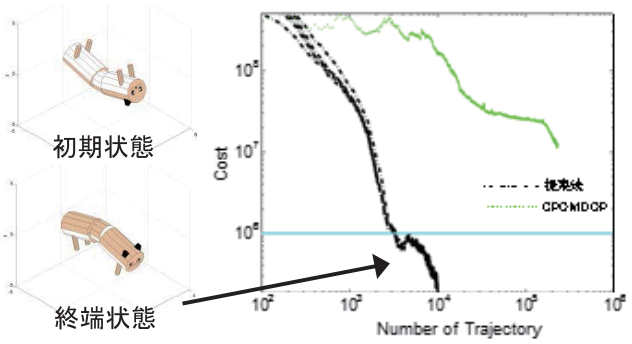
[1] 阿形、乗松、信学論 Vol.J95-B, No.2, pp.155-167, 2012.

システム情報論講座 論理生命学分野
http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home
「強化学習による非ホロノミックシステムの制御」

当研究室では、不確実な環境に対して適合するシステムとしての「生命」と「知性」の計算原理を明らかにすることを目的に、多岐にわたる研究を行っています。その一環として、未知の環境においても環境に対する試行を繰り返すことで適切な制御則を学習するシステムの研究を行っています。ここでの適切な制御則とは、鉄棒の蹴上がりの際の、腰を曲げ延ばしして勢いをつけて腰を持ち上げる運動のように、特定のタスクをこなすのに必要なものです。ヒトは必ずしも鉄棒と自身との関係の正確な力学的性質を知っていないものの、試行を繰り返すことで、すなわち経験に基づき、適切な制御則を学習することができます。

このような経験に基づく制御則の学習を数理的に表現するものとして強化学習があります。通常、強化学習では、次状態が現状態とその時点での行動によって（確率的に）決定されるというマルコフ性を想定し、制御則は方策と呼ばれる状態の関数として定義されます。そのため、状態空間が大きい、あるいは方策が状態空間において複雑な形状となる問題に対しては、学習が困難になります。効率的な学習のために、しばしば方策の実効的自由度を下げることが行われますが、方策の表現能力が低いと勾配法などで求められる局所解の性能が低くなってしまうといった問題がありました。一方で、初期状態が状態空間のごく一部に限局するような問題も豊富に存在します。われわれは、その点に着目し、初期状態が固定していることと、外乱が無視できることを前提として、方策を状態に依存せず時刻のみに依存する関数として定義し、その方策に対する強化学習法を開発しました。例として、ネコを模擬した２つの連結した円柱の姿勢制御（図）を行いました。ネコは仰向けの状態からでも、その空中での姿勢制御により、うつ伏せの状態に変えることができ、この「ネコひねり」システムは非ホロノミックシステムの一種と考えられます。ネコひねりシステムにおいて、仰向けの状態からうつ伏せの状態への制御を考える場合、５次元の状態変数によって一意に状態を記述することができますが、その５次元の実数空間に限定したとしても従来型の強化学習法による制御則の学習は容易ではありません。一方で、初期状態を固定すると、われわれの新しい学習法が使えます。図では、状態空間の一部しか訪れない場合においても安定な学習を行える従来型の強化学習法(GPOMDP)とわれわれの手法による学習過程を示しています。横軸は試行数、縦軸は学習された制御則による試行あたりのコスト（小さいほど良い）を表しますが、われわれの手法によれば従来法よりも大幅に効率良く適切な制御則が学習できていることがわかります。

初期状態の固定と、無視できる外乱という仮定は非常に強い制約を与えることになりますが、現実問題では特定の初期状態からの制御で十分な場合は、数多く存在します。また、例えば、蹴上がりの途中の状態など通常、経験しない初期状態から続きの行動を遂行することは熟練した体操選手でも難しいことから、ヒトは状態の関数として運動を学習しているのではなく、特定の状態からの一連の運動系列を学習しているように思えます。このような現実問題の特徴を活かした学習法の開発により、未知多自由度システムの制御などの工学応用のみならず、ヒトのような多自由度システムにおける素早く柔軟な運動学習のメカニズムの理解を追求していきたいと考えています。



図： 提案法と従来法 (GPOMDP) によるネコひねり運動の学習過程の比較 横軸は試行回数、縦軸は試行あたりのコストを表す。従来法は提案法の 100 倍近い試行回数を用いても適切な制御が学習できていないことがわかる。

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
「ヘリオトロン J における新古典フローと粘性の解析」

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実験と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

磁場閉じ込めプラズマの閉じ込め性能を決める重要な要素として、プラズマの輸送過程が挙げられます。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、プラズマの温度・密度分布には急峻な勾配が存在します。これらの勾配は「熱力学的力」と呼ばれ、プラズマ粒子やエネルギーの外向きの流れをもたらします。たとえば、一様磁場中ではプラズマ中の荷電粒子はローレンツ力によって磁力線に巻き付きますが、荷電粒子同士のクーロン衝突を考慮すれば磁力線を横切る粒子拡散が起こるため、磁力線に垂直方向に密度勾配があれば、密度の高い方から低い方へと粒子の流れが生じます。このような衝突性の粒子輸送は「古典輸送」と呼ばれます。さらにトーラスプラズマのように磁場に非一様性があるとドリフトと呼ばれる粒子の磁力線を横切る運動が生じ、これが衝突性輸送を増大させます。これは「新古典輸送」と呼ばれています。実際のトーラス型磁場閉じ込めプラズマでは様々な微視的不安定性により渦ができ、この渦による対流が「乱流輸送」をもたらしており、特にプラズマの周辺に近い領域ではこの乱流輸送がプラズマの閉じ込め性能を支配していると考えられています。

近年、多くのプラズマ磁場閉じ込め装置において、「閉じ込め改善モード」と呼ばれる乱流輸送が抑制された状態が見つかっています。この乱流抑制には大きな渦を引きちぎり、小さな渦に分裂させるような強い流れが重要な役割を果たすため、プラズマ中のフローとその大きさを決める粘性の研究が様々な装置においてなされています。京大エネルギー理工学研究所にあるヘリオトロン J 装置でも、プラズマ中に不純物として存在する炭素イオンが荷電交換再結合時に放出する光を分光学的に測定することにより、炭素イオンのフローが計測されています。我々の研究室ではこのプラズマ中のフローを新古典輸送理論に基づき理論解析を行っています。

前述の通りプラズマの径方向の輸送現象では、多くの場合乱流輸送が支配的ですが、新古典輸送の影響も無視できず、とくに磁力線方向の運動量保存に関係した物理量、たとえばブートストラップ電流と呼ばれる自発電流や磁力線方向のフロー・粘性は新古典輸送理論で説明できると考えられています。しかし、ヘリオトロン J プラズマのような非軸対称で複雑な形状を持つプラズマ中に、水素、重水素、不純物など多種のイオンが存在し、さらに中性粒子ビーム入射などによる外部からの運動量源も存在する場合、新古典輸送解析も大変難しくなり、複雑な数値解析が必要となります。

我々の研究室ではこの理論解析に成功し、実験で観測された炭素不純物のフローが外部運動量源を考慮すれば新古典輸送理論で説明できることを初めて示すことができました（図 1 に実験で得られた磁力線方向のフローと計算結果（実線）の比較を 2 ケース示す）。今後、これらの成果を大型ヘリカル装置の実験解析に適用するとともに、その物理メカニズムを明らかにしていく予定です。

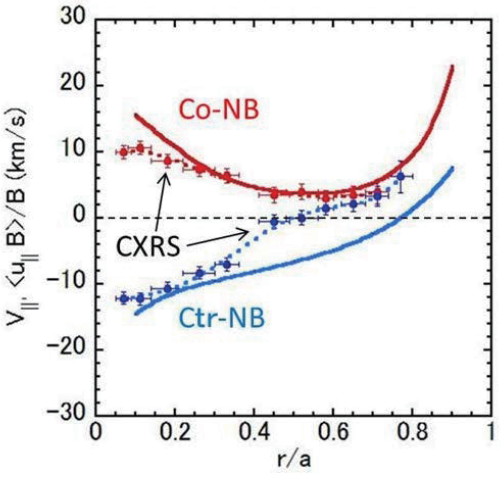


図 1

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長﨑研究室）
http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html
「揺らぎが生み出す高温プラズマ中の電磁場の構造」

本研究室では、荷電粒子と電磁場を制御することにより、核融合プラズマの生成・制御とその計測を通じた物理研究、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生、小型の核融合装置を用いた高エネルギー粒子の発生と利用について研究を進めています。本小文では、核融合を目指し生成された高温プラズマ中の電磁場の揺らぎ計測について紹介します。

磁場閉じ込め核融合は、(1) 燃料が無尽蔵、かつ地域的偏在性がない、(2) 炭酸ガスを排出しない、(3) 生来的な安定性（暴走しない）、などの優れた利点を有することから理想的なエネルギー源として長年研究されてきました。現在、国際協力の下においてフランスに建設中の国際熱核融合実験炉 ITER は数年後の運転開始が迫っており、誰も見たことがない核燃焼プラズマの実現が近づいています。この核燃焼プラズマでは、核反応によって生成される 3.5MeV の高エネルギーのヘリウム粒子によって加熱・維持されます。しかしながら、発生した高エネルギー粒子自身がプラズマ自身と相互作用することで、高速イオン励起不安定性と呼ばれる大きな揺らぎが発生し、閉じ込めを劣化することが予測されています。実際にプラズマ中に高エネルギービームを入射して、揺らぎを意図的に誘起する模擬実験でその物理が調べられてきました。

本研究室においても、磁場閉じ込め装置ヘリオトロン J 装置を用いて、高温プラズマに高エネルギービームを入射し、高速イオン励起不安定性に関する実験を行っています。この不安定性が観測された放電の磁場の揺らぎの信号を図 1 に示します。高速イオン励起不安定性が、およそ 0.5ms の短い周期で発生していることがわかります（図 1 上）。このとき、この揺らぎと同期して、プラズマ中の径電場が変化する現象が見出されました（図 1 下）。径方向の電場が変わるということは、プラズマにとっては周方向への流れ構造が変化することに相当します。プラズマ中の流れが変わると、微細な揺らぎ構造が影響を受け、プラズマの閉じ込め性能が変化する可能性があることを意味しており、興味深い現象です。また、プラズマ内部の高速イオン励起不安定性の構造を、プラズマ中の密度の揺らぎを計測可能なビーム放射分光という手法によって明らかにしました。不安定性によって磁場の構造が揺らぐことで、図 2 に示すような密度の揺らぎが生まれていると考えられます（ここで、実際にはプラズマは単純な円形ではありませんが、簡単のため円形断面としています）。揺らぎの強度と構造は時間的に刻一刻と変化し、らせん状の構造が形成され、そして消失していきます。高速イオンとプラズマの非線形的な相互作用の結果、このような複雑な挙動が周期的に繰り返されていると考えられます。

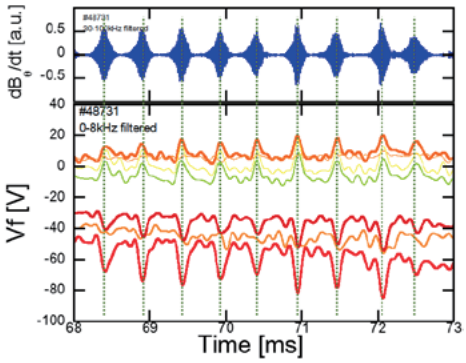


図 1(上) 磁気プローブ信号。再帰的に高速イオン励起不安定性が観測されている。 (下) ラングミュアプローブで計測した浮遊電位信号。不安定性と同期して電位が変化している。

ここで述べてきたように、高温のプラズマ中には電磁場の揺らぎが発生し、多彩な構造が形成され、それがプラズマの閉じ込めに直接的、或いは間接的に影響します。揺らぎを研究することで、プラズマの振舞いを解明することが本研究室のひとつの課題です。

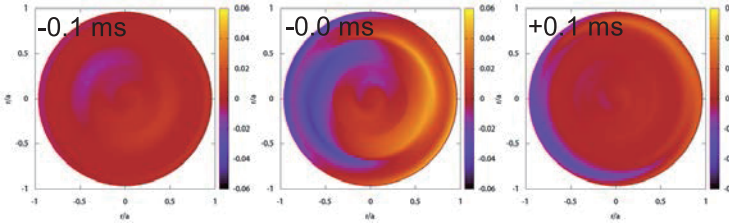


図 2 ビーム放射分光計測によって計測したあるプラズマ断面の密度の揺らぎの二次元構造。不安定性の典型的な平均的な (-0.1, 0, +0.1ms) , 不安定性が発生するたびに、らせん状構造が形成され、また消失していく。

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/
「環状磁場に閉じ込められたプラズマの回転を探る」

私たちの研究室では、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。現在は、他の関連研究室と協力して、本学創案によるヘリオトロン型磁場配位にさらなる工夫を取り入れた先進ヘリカル磁場配位であるヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位を用いたプラズマ実験装置ヘリオトロンＪを用いた研究を行っています。本稿では、ヘリオトロンＪプラズマの回転に関する研究を紹介します。本研究の最近の成果に関し、李炫庸博士が彼の博士学位論文概要として本誌に紹介していますので、合わせてご覧下さい。

ヘリオトロン型磁場もその一種である環状磁場による磁場閉じ込め核融合プラズマ研究においては、クーロン衝突に起因する（粒子／エネルギー／運動量等の）輸送が支配的な場合を既述する新古典理論を実験的に検証するため、実機プラズマの巨視的流を探ることは重要テーマの一つです。さらに、この様な巨視的流の存在がプラズマの電磁流体力学的安定化及び閉じ込め性能向上に重要な役割を果たしていると考えられ、プラズマ流の決定機構について、その理論的・実験的研究が進められています。特に減衰機構に関しては、磁場リップル強度が重要な要素と考えられ、この観点からの研究が注目されています。バンピー（ミラー）磁場成分を第３の制御因子とするヘリオトロンＪでは、その磁場制御性によりミラー磁場成分のみを変化させることができ、これによる磁場リップル強度の違いが、磁場に平行なプラズマの巨視的流（平行プラズマ流）の駆動・減衰に及ぼす影響を調べることが可能です。プラズマ流計測には、プラズマ中のイオンが発する線スペクトルのドップラーシフトを用いますが、高温プラズマでは、殆どのイオンが完全電離しているため、中性粒子ビーム入射（NBI）による中性粒子との荷電交換反応（CXR）により生じる水素様イオンからの線スペクトルを利用します。本研究では、プラズマ加熱用NBIを利用し、C+6から生じたC+5からの可視光（529.05nm）を観測します。図１に荷電交換再結合分光（CXRS）計測システムを示します。CUE（29号）に紹介したビーム放射分光（BES）システム同様、ヘリオトロンＪの特徴を活かす観測視線の採用で、高空間・時間分解で平行プラズマ流分布計測が可能です。

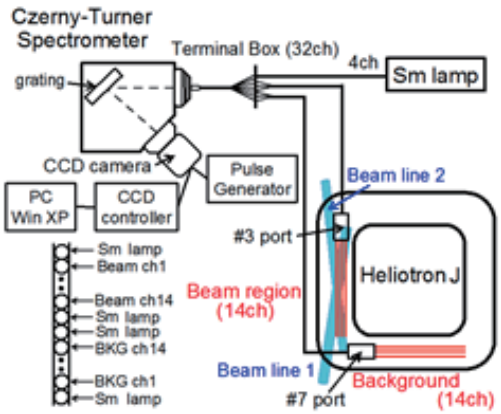


図１　ヘリオトロンＪ用CXRSシステム

図２は、NBI入射方向の異なる２条件下での平行プラズマ流速とNBIによる付加運動量の径方向分布例です。付加運動量の大きなプラズマ中心部（0< ρ <0.3）では、その付加運動量の方向と矛盾しない平行プラズマ流が観測されています。一方、外部運動量入力の殆ど無いプラズマ周辺部では、正方向の平行プラズマ流が確認され、外部からの運動量付加によらないプラズマ流駆動機構の存在が示唆されています。また、リップル強度が違うと、同じ付加運動量下でも異なるプラズマ流速となることも観測され、リップル強度の減衰に及ぼす影響を調べる手掛かりを得ています。

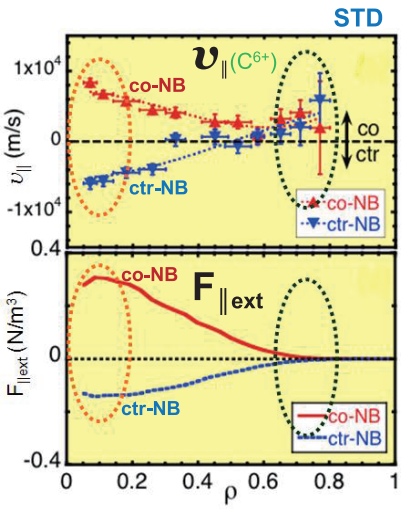


図２ NBI入射方向が異なる２例（co、ctr）における平行プラズマ流速（v//）とNBIによる付加運動量（F//ext、計算）の（規格化）径方向分布：標準磁場配位

これらの観測を理解するため、詳細な数値シミュレーションが中村（祐）研の学生さんにより進められています。また、実験面では、次のステップとして、磁場に垂直方向のプラズマ流の計測に向け、準備を始めています。

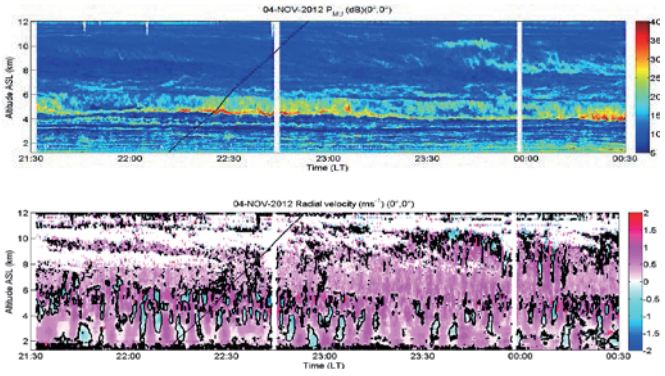
生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab
「MU レーダーイメージング観測による大気乱流特性の国際協同研究」

乱流混合は熱や物質の鉛直輸送に寄与する重要なプロセスであるが、そのスケールが極めて小さいことから観測が難しい現象の一つである。気象予報モデルにおいても乱流を直接解像することはできないため、パラメータ化して取り扱われており、観測から定量的に評価することが求められている。当研究室ではフランスのトゥーロン大・LATMOS と協同で大気乱流の観測的研究を続けている。2000 年に実施した MUTSI（MU radar, Temperature Sheets and Interferometry）観測キャンペーンでは、高度分解能 20cm の超高感度ラジオゾンデと MU レーダーとの同時観測から、厚さ 10m 以下という従来の常識を越える極めて薄い乱流薄層が多重に存在するという驚くべき姿を明らかにし、従来の下層大気における乱流渦による鉛直拡散過程の再考察を迫った。

地上から上空に向けて電波を発射し、大気の乱れに散乱されて戻ってくる電波を受信することで、上空の風向風速等を高時間分解能で測定する大気レーダーは、大気乱流からの散乱エコーを観測すること、時間・空間的に連続観測可能である点で、大気乱流の観測装置として優位にあるが、従来空間分解能に限界があった。世界最高性能の大気観測用大型レーダーである MU レーダーでは、2004 年に高機能化への改修が行われ、レーダーイメージング（映像）観測が可能となった。その後、イメージング観測手法の開発・改良が重ねられ、現在ではレンジ分解能が飛躍的に向上した観測が可能となっている。MU レーダーは現在のところ乱流を最も正確に映像化でき、それらの発生・発達・形成メカニズムや、メソ～総観規模現象との関連を研究する上で最も強力な測器である。例えば、風速の変化が大きいところでは、ケルビン・ヘルムホルツ不安定により乱流が発生することが知られているが、雲底下で持続的に乱流が存在する様子が MU レーダー観測によりイメージ化されている。

MUTSI の後も、MU レーダーに加えて、Ka バンド雲レーダー・X バンド気象レーダー・レイリーライダー・ラジオゾンデ等を用いた観測キャンペーンをたびたび実施してきた。今年度も 11 月初めに、フランスからの 3 名に加え、アメリカから 2 名の研究者が参加し、信楽 MU 観測所において約 1 週間の観測キャンペーンを実施した。今回は特に最近国内メーカーで開発された約 30cm の高高度分解能で気温プロファイルを取得可能なラジオゾンデ気球を同時放球する実験を行った。現在そのデータ解析を進めており、大気乱流特性の実態に迫りつつある。大気乱流は至るところに存在し、人間生活に及ぼす影響も小さくなく、航空機の安全運航のためにもその観測・予測は重要な課題である。今後は、より普及型の 1.3GHz 帯小型大気レーダーへのイメージング観測技術の応用や、赤道大気レーダーを用いた熱帯域大気乱流研究にも発展させたい。

信楽 MU 観測所の MU レーダー（アンテナ直径 103m, 送信出力 1MW）



2012 年 11 月 4 日に MU レーダーイメージングモードで観測された（上）エコー強度、（下）鉛直流の時間高度変化。斜めの線はラジオゾンデの観測高度を表す。

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野（山川研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/yamakawa-lab/index.html

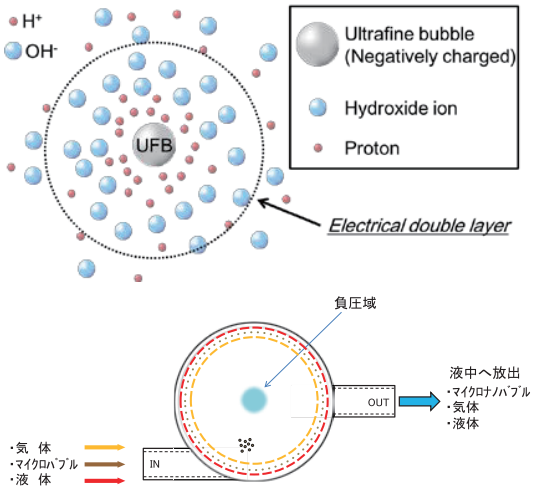
「微細気泡水のもつ電気諸特性と理論的な考察」

気泡の入った水は、我々にとってとても身近な存在です。例えば、炭酸水は二酸化炭素からなる気泡を含んでいますし、金魚などを飼う水槽や泡風呂など、気泡を水中に存在させる装置も多くあります。これらの気泡は、浮力によって水面へ浮上し、最終的には消滅しますが、その大きさ（直径）は、数ミリ程度の大きさであると言われています。ところが、気泡の大きさがマイクロメートルサイズになってくると、浮力が減少して水中に滞留する時間が大きくなり、また表面張力が大きくなることでミリサイズの気泡とは異なった性質を示す事がわかってきています。また、ナノサイズまで小さくなる微細気泡（以下微細気泡とします）になると、目視で確認出来ない大きさでもあることから、その特性について様々な推測や仮説が多くうまれ、研究分野としてとても面白い課題になっています。

微細気泡を使った応用例としては、現在既に医療分野や洗浄分野で利用されつつありますが、私たちは 2011 年度の東日本大震災にて発生した原発事故の際、環境浄化技術として微細気泡を用いて放射性セシウムの除染技術研究を行ってきました。現場利用にて即対応可能な技術であり、また実証試験を行った際も通常の水を用いるより高い効率で除染が可能である事がわかりましたので、現在もその研究を続け、実証研究を行っています。また、福島県における連携研究として、微細気泡を利用した農業利用試験も並行して行っています。具体的には、観葉植物の着色・延命効果や、農作物の放射性セシウムの吸収率に関する研究、また大規模水耕栽培に利用可能な技術としての企業との共同研究など、様々な応用研究も行っています。

微細気泡は先に述べたように目に見えない大きさ（ナノメートルサイズ）であり、濃度も水分子の数量やその他のイオン濃度と比較すると非常に個数が少なく、基礎的な研究の際に指標となるべき測定方法が技術的にはまだ確立されていません。水中に含まれる微細気泡の計測には、一般的にはレーザー散乱によるブラウン運動解析から推定される粒径分布と濃度分布が良く用いられていますが、確かにレーザー散乱により濃度分布として計測は可能ですが、不純物による散乱の効果や、統計的な問題から、絶対値としての濃度測定は原理上不可能です。私たちが実証している除染や農業などの応用技術についても、基礎データとしては相対的な変化と実験結果の比較を行っているだけであり、微細気泡の基礎研究としては、より精確なデータを用いて研究を行う必要があります。

微細気泡の基本的な特性としては、負に帯電して水中に存在している事がわかっており、圧壊や縮合による気泡消滅・浮上に対する安定性を維持するためには、理論的にはかなり大きな帯電量が必要だと考えています。また、帯電による正負イオン（純水中だと水素イオンと水酸化物イオン）との相互作用も予想されます。そのため、私たちは、濃度の低い微細気泡を精度良く測定し、その物理化学現象を正しく理解するため、微細気泡が存在する水や水溶液の電気伝導度と誘電率に着目し、基礎研究を開始しています。微細気泡濃度が低くても、帯電による電気的な相互作用は感度良く測定が可能であり、実際の測定でも違いをみることが出来ています。今後は、基礎データと応用研究とを結びつける新しい理論について構築し、今後の実用化への貢献をしていきたいと考えています。



気液混合剪断方式によるナノバブルの生成。IN 側から気体と液体、それらを混合させ発生させたマイクロバブルを、ポンプ圧力でナノバブル発生器に送る。遠心力により、マイクロバブルが剪断されナノバブルが発生する。

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

「マイクロ波無線電力伝送用受電整流回路の効率特性改善」

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を中心に研究開発を行っている。特に近年マイクロ波無線電力伝送技術を SPS 以外に様々応用をする研究も行っており、電気自動車の無線充電や無線給電による新しいセンサーの共同研究等を行っている [2]。

マイクロ波無線電力伝送は送電されたマイクロ波をアンテナで受電し、ダイオードを用いた整流回路で直流変換する（図 1）。この受電整流アンテナをレクテナと呼ぶ。レクテナの整流変換効率はダイオードの V-I 特性に起因する入力マイクロ波強度依存性と、接続負荷依存性を持つ。最適なマイクロ波入力強度と最適な接続負荷の場合は非常に高い整流変換効率（2.45GHz で最高 90% 程度）を持つが、マイクロ波入力強度が強すぎるとダイオードがブレークダウンを起こし、逆に弱すぎるとダイオードの立ち上がり電圧を超える電圧がダイオードにかからなくなるため、効率が極端に低下する。回路に接続された負荷によっても同様の特性を持ち、レクテナはいわば内部抵抗が数百 Ω の直流電源のような動作となり、非常に使いずらい電源となってしまっている。そこで当研究室ではレクテナの整流回路にさらに特性を考慮した DC-DC コンバータを接続し、出力インピーダンスのアクティブなコントロールを行うことで整流変換効率特性の改善を図った [3]。周波数は 2.45GHz を用い、図 2 のシングルシャント整流回路に図 3 の buck-boost DC-DC コンバータを接続した。図 4 がその整流変換効率特性である。整流回路単体よりも RF-DC-DC 変換回路の整流変換効率特性が格段に改良されていることが分かる。

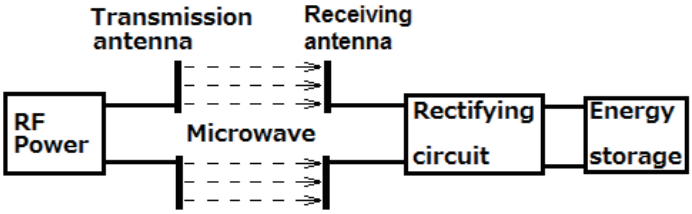


図 1　マイクロ波無線電力伝送の原理

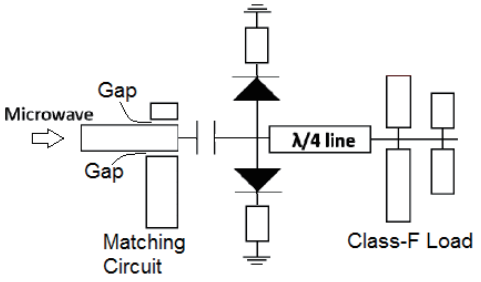


図 2　実験に用いたレクテナ整流回路

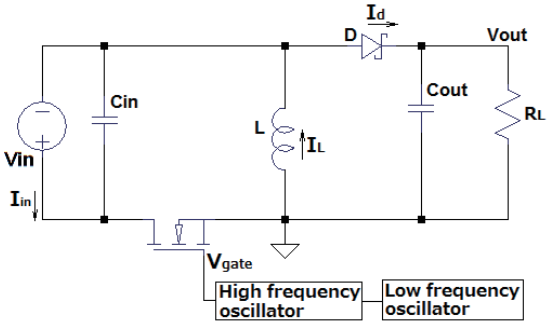


図 3　実験に用いた buck-boost DC-DC コンバーター

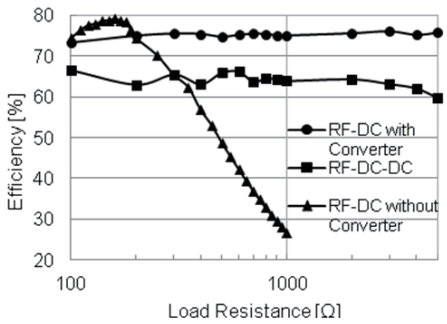


図 4　整流変換効率の比較

【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] 篠原 , 小紫 , “ワイヤレス給電技術”, 科学技術出版 , 2013.2
[3] Huang, et al. “Study on a Low-power Rectenna Using DC-DC Converter using the Maximum Power Point Tracking Method”, IEEE Trans., MTT, in print

博士論文概要

[課程博士一覧]

単　　麟	「Adaptive Radio Resource Allocation and Scheduling for Wireless Networks」 （無線ネットワークにおける適応無線資源割当とスケジューリングの研究）	平成 24 年 5 月 23 日
夏 川 浩 明	「脳磁図・機能的 MRI・眼球運動計測による奥行き注意下の運動透明視に関わる皮質活動の研究」	平成 25 年 3 月 25 日
山 本 詩 子	「Fiber Tracking and Tractography with Magnetic Resonance Diffusion Tensor Imaging for Quantitative Evaluation of Schizophrenia」 （統合失調症の定量評価のための MR 拡散テンソル画像法に基づく神経線維追跡とトラクトグラフィ手法に関する研究）	平成 25 年 3 月 25 日
南　　政 孝	「分散型電源の系統連系における受動性に基づく制御および位相同期方式に関する研究」	平成 25 年 3 月 25 日
齊 藤 義 行	「内部結合を含む機能ブロック単位の LSI-EMC マクロモデルに関する研究」	平成 25 年 3 月 25 日
巳 谷 真 司	「Satisficing Nonlinear Spacecraft Rendezvous Under Control Magnitude and Direction Constraints」 （制御入力制約を考慮した宇宙機の相対軌道制御）	平成 25 年 3 月 25 日
川 原 洸太朗	「Identification of Deep Levels in SiC and Their Elimination for Carrier Lifetime Enhancement」 （SiC 中の深い準位の解析とキャリア寿命増大に向けた準位低減法の確立）	平成 25 年 3 月 25 日
渡 辺 直 樹	「Fundamental Study on Wide-Bandgap-Semiconductor MEMS and Photodetectors for Integrated Smart Sensors」 （高機能集積センサ実現に向けたワイドギャップ半導体 MEMS および光検出器の基礎研究）	平成 25 年 3 月 25 日
井 戸 慎一郎	「周波数変調原子間力顕微鏡を用いた生体分子のナノスケール固液界面構造計測」	平成 25 年 3 月 25 日
石 井 良 太	「GaN および AlN の励起子変形ポテンシャルの同定と（Al、Ga）N 系歪量子構造の物性予測」	平成 25 年 3 月 25 日
山 田 翔 太	「ワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたフォトニック結晶に関する研究」	平成 25 年 3 月 25 日
鈴 木 克 佳	「多方向同時エッチングによる 3 次元フォトニック結晶の一括形成」	平成 25 年 3 月 25 日
佐 藤 義 也	「空間的に離れた光ナノ共振器間の強結合状態形成とその応用展開」	平成 25 年 3 月 25 日
玉 手 修 平	「Geometry of weak measurements and its application to optical interferometry」 （弱測定の幾何学とその光干渉測定への応用）	平成 25 年 3 月 25 日
金 子 健太郎	「コランダム構造酸化ガリウム系混晶薄膜の成長と物性」	平成 25 年 3 月 25 日
原 島　　純	「Studies on Re-ranking and Summarizing Search Results」 （検索結果の並べ替えと要約に関する研究）	平成 25 年 3 月 25 日

佐　方　　連	「A Study of Flexible Cognitive Radio with Software Defined Radio and Dynamic Spectrum Access」 （ソフトウェア無線及びダイナミックスペクトラムアクセスを用いた柔軟なコグニティブ無線の研究）	平成 25 年 3 月 25 日
服　部　有里子	「ITS 無線情報システムの高度化に関する研究」	平成 25 年 3 月 25 日
熊　谷　　崇	「移動通信網における位置情報管理技術を用いた通信・放送の高品質化」	平成 25 年 3 月 25 日
西　尾　理　志	「Cooperative Resource Sharing toward Mobile Cloud」 （モバイルクラウドに向けた資源協調利用の検討）	平成 25 年 3 月 25 日
李　　炫　庸	「Study on Effect of Magnetic Field Configuration on Parallel Plasma Flow during Neutral Beam Injection in Heliotron J」 (ヘリオトロン J における中性粒子ビーム入射加熱プラズマ中の平行プラズマ流に及ぼす閉じ込め磁場配位の影響に関する研究)	平成 25 年 3 月 25 日
顔　　偉　達	「A Study on Augmented Reality for Supporting Decommissioning Work of Nuclear Power Plants」 （原子力発電プラントの解体作業支援のための拡張現実感に関する研究）	平成 25 年 5 月 23 日
児　島　貴　徳	「光学顕微イメージングを用いた単一量子ドット・フォトニック結晶ナノ構造結合系の作製および基礎特性評価」	平成 25 年 7 月 23 日
細　江　陽　平	「Discrete-Time Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Robustness Analysis and Controller Synthesis」 （ロバスト性解析と制御器設計のための離散時間非因果的周期時変スケーリング）	平成 25 年 9 月 24 日
山　口　辰　久	「3D Video Capture of a Moving Object in a Wide Area Using Active Cameras」 （能動カメラ群を用いた広域移動対象の 3 次元ビデオ撮影）	平成 25 年 9 月 24 日

[論文博士一覧]

藤　原　亮　介	「Study on Accurate Ranging and Positioning System with UWB-IR Technology」 (UWB-IR を用いた高精度測距・測位システムの開発)	平成 25 年 3 月 25 日

単　麟　（吉田教授）
「Adaptive Radio Resource Allocation and Scheduling for Wireless Networks」
（無線ネットワークにおける適応無線資源割当とスケジューリングの研究）
平成 24 年 5 月 23 日授与

近年、無線通信は著しい発展を遂げており、携帯電話をはじめとして、無線 LAN、ETC システム、無線 IC タグなどの無線通信を利用する加入者が急速に増加している。今後もその利用は拡大の一途をたどることが予想される。しかしながら、周知の通り無線通信に適した電波の周波数は限られており、この有限の資源である無線周波数をいかにして最大限有効活用を図るか、適切な無線資源割当とスケジューリングが緊要の課題となっている。そこで、本論文では次世代無線マルチホップ網や次世代セルラ携帯電話網を念頭において、適応的な高効率無線資源の割当手法に取り分け、ネットワークのスループット、双方向通信のトラヒック、システム容量、公平性などの特性改善を図る手法について研究を行い、得られた成果を取りまとめている。

1)、本論文の前半は無線マルチホップネットワークを対象として、特に双方向通信の総スループットを向上させるために協力中継（Cooperative Relaying）及びネットワーク符号化（Network Coding）を用いる適応的な中継技術を提案している。これは、双方向のトラヒック比や伝搬路チャネル状況に応じて適応的に中継方式の選択と無線資源の割当を行うものである。提案手法は、比例公平性（Proportional Fairness）スケジューリング法の特徴を生かし、中継方式の選択基準及び双方向トラヒック比の制御パラメータなどに新たな工夫を導入している。また、アルゴリズムの計算量も従来方式と遜色のない効率的なスケジューリング法である。計算機シミュレーションにより、提案手法は非対称トラヒックに対応しつつ、従来方式より高い総スループットを達成できることが示されている。

2)、1）に用いたマルチホップモデルを複数中継局が配置されているモデルへ拡張し、中継局選択法と資源スケジューリング法の結合技術を提案している。その提案手法が中継局選択のダイバーシチ利得及びネットワーク符号化利得を得られるため、結果として、提案手法による達成した無線マルチホップ網のスループットの特性が更なる向上できることが示されている。次に、1）と 2）の結果に基づき、一般性がある且つより大きいスケールの無線マルチホップネットワークへ拡張し、そのモデルにおいて、提案手法の有効性について研究を行っている。計算機シミュレーションを行った結果、提案手法は従来方式より特性が改善され、非対称トラヒックに対応可能であることを明らかにしている。

3)、本論文の後半は次世代セルラ携帯電話網を対象として、無線資源割当法とスケジューリング方式について研究を行い、ユーザに対する所望の公平性とスループットの最大化を達成するため、適応的な公平性とスループット制御手法を提案している。従来の公平性を考慮した方式は重み付きの比例公平性が達成できるが、しかし、ユーザ所望の公平性指標と直接な関係がないため、所望の公平性の目標値に達成することが困難である。そして、ダイナミックシナリオの環境において、例えばユーザの位置や数がセル内に変化する時、従来手法は安定な公平性の指標値が提供できない。そこで、本研究では公平性の指標値と関連があるスケジューリング方式を提案した。計算機シミュレーションを行った結果、提案方式の有効性を明らかにしている。

4)、セルラ通信エリアの拡大やセル端通信容量の向上のため中継局を利用したマルチホップセルラシステムに着眼し、中継局において非再生中継と再生中継方式があるが、これらをセルラシステムへ適用した場合にどちらの中継方式が有効かは明らかではない。そこで、本研究では OFDMA を用いるセルラシステム上り回線が想定され、中継方式を導入した場合のシステム容量向上効果について比較評価が行われている。また、公平性に優れた OFDMA 周波数サブチャネル割当方式が適用されており、システム容量及び公平性の観点から評価がされている。

夏　川　浩　明　（小林教授）

「脳磁図・機能的 MRI・眼球運動計測による奥行き注意下の運動透明視に関わる皮質活動の研究」

平成 25 年 3 月 25 日授与

私達は現実にあるものをあるがままに見ているのではない。視対象からの光を眼で受けて脳で情報処理されることにより初めて視知覚が生じ、結果として外界を知覚する。実際に存在するものと視知覚とのギャップはどのような視覚情報処理によって起こるのであろうか？このような視知覚現象の解明は学術的に面白いだけでなく、情報処理分野の技術応用に繋がりうる課題である。そこで本研究はヒトの視覚にとって重要な、動きから奥行きを抽出する“structure from motion”と呼ばれる機能に関わる運動透明視に注目し研究を行った。運動透明視とは、視覚刺激が変化しないにも拘わらず見え方が時間とともに交替するといった双安定な知覚現象であると共に、知覚に伴って生じる不随意の眼球運動によってその知覚を客観的にも調べることができる非常に重要な現象である。しかし、その脳内機構についてはまだ一部が分かっているにすぎない。そこで、本論文では非襲侵脳機能計測手法の中で時間分解能の高い脳磁図（MEG）と空間分解能の高い機能的磁気共鳴画像法（fMRI）及び眼球運動計測を用いて、奥行き注意下における運動透明視課題遂行中の皮質活動について多角的な検討を行った。

まず、MEG と眼球運動計測による奥行き注意下の運動透明刺激に誘発される皮質活動について、奥行きが知覚される過程の脳活動を検討した。MEG 信号より事象関連脳磁界を計算し、そのデータに空間フィルタ法の sLORETA を適用することで皮質活動を求めた。その結果、運動透明視の奥行き構造の処理には低次視覚野（V1/V2）から五次視覚野（hMT/V5+）や頭頂間溝（IPS）に至る背側経路に加えて外側後頭皮質近傍領域（LO）が関わっていることを明らかにした。

さらに、高次脳機能のような複雑な脳活動を調べる新たなツールとなりうる Normalized fMRI-MEG 統合解析法を提案した。この手法は標準脳の座標系でのクラスタリング手法を用いた被験者共通の神経活動を抽出するものである。手法の有用性を内在する脳活動が比較的良く知られている視覚誘導性サッカード遂行時の MEG、fMRI データ解析により検証した後に、運動透明視に関わる皮質活動として頭頂間溝、五次視覚野、外側後頭皮質の活動部位と活動時間を高時空間分解能で捉えることができた。

以上の結果より、運動透明視の奥行き決定に関わる皮質活動には五次視覚野や頭頂間溝に至る背側経路に加え外側後頭皮質領域に見られることが分かった（図 1）。今後は脳活動を反映する運動透明視の計算モデルを作成することで、さらなる運動透明視の理解、ひいてはヒトの視覚システムの理解とその工学的応用が期待できる。

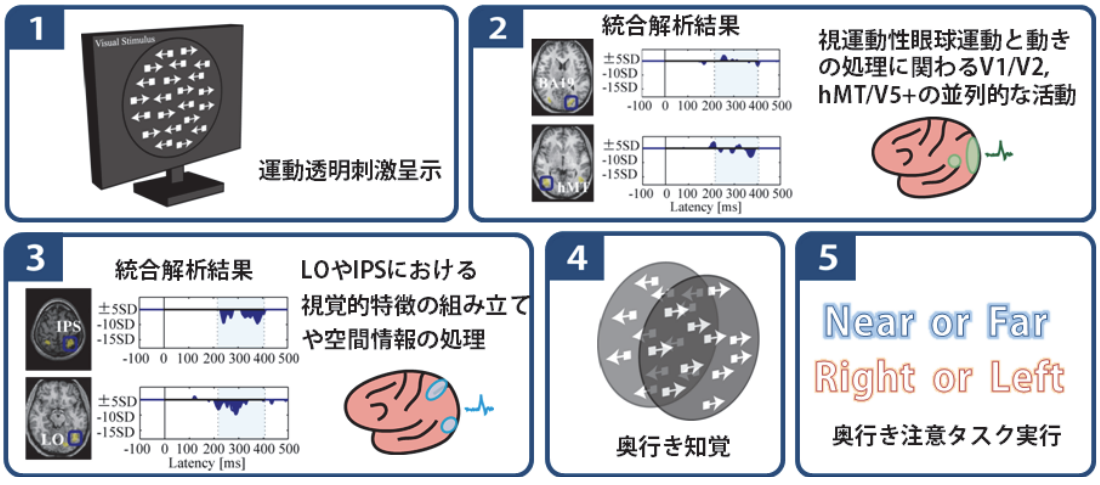


図 1　運動透明視の奥行き知覚決定に関わる皮質活動

山　本　詩　子　（小林教授）

「Fiber Tracking and Tractography with Magnetic Resonance Diffusion Tensor Imaging for Quantitative Evaluation of Schizophrenia」
（統合失調症の定量評価のための MR 拡散テンソル画像法に基づく神経線維追跡とトラクトグラフィ手法に関する研究）

平成 25 年 3 月 25 日授与

ヒトの大脳では情報を処理する皮質間が脳神経線維で複雑に繋がり合い、脳に取り込まれた情報はこの脳神経線維を介して複数の皮質部位で処理されることにより、人間の高次脳機能が実現されている。高次脳機能が障害された精神疾患の中でも、患者数が多く日常生活に深刻な影響を与える統合失調症において、脳神経線維の異常が提唱されてきた。神経線維の情報を定量化し、神経線維に生じた異常を検出することで疾患の早期診断や早期治療に役立てるのではないかと期待されている。そこで、本研究では統合失調症患者の脳神経線維異常を定量的に評価することを目指し、生体内を非侵襲的に計測する MRI 技術を応用して水分子の拡散現象を画像化する MR-DTI 技術を用いて、脳神経線維の情報を定量化する神経線維追跡手法の開発を行なった。

統合失調症患者 14 名と健常者 21 名を対象に上縦束、下縦束、および下前頭後頭束の神経線維追跡を実施し、神経線維の特徴を患者と健常者の群間と大脳半球間で比較した。特徴を表す指標に、拡散異方性の強さ FA、拡散の大きさ MD、線維束の太さ S を求めた。その結果、上縦束では S に、下縦束と下前頭後頭束では S と MD において、患者群と健常者群を判別できる可能性が見出された。

被験者脳を標準脳に位置合わせし、標準脳に合わせた 3 次元の組織配置画像から組織の空間座標を特定し、関心領域を自動設定して神経線維追跡を行なう方法を開発し、矢状層および上縦束で追跡を行なった。S、FA、MD に加えて、軌跡の曲率 Cu および連続した追跡の方向ベクトルの内積 DA を求めた。各評価指標について統計解析を行なったところ、各線維束ともに複数の指標で患者群と健常者群を判別できる可能性が見出され、関心領域の設定手法が統合失調症の判別に適している可能性が示された。

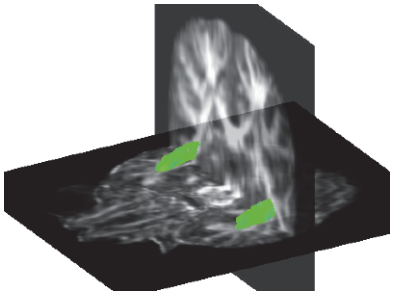


図１：矢状層の追跡結果例

さらに、神経線維追跡を行なう際に問題となる複数神経束の交叉部での追跡エラーに対処するため、追跡途中に交叉領域にさしかかったと考えられる場合に、交叉領域の反対側に続く対象線維束上の軌跡を探索・補間する手法を提案した。交叉領域を B- スプライン曲線によって補間し、対象線維束上の軌跡として尤もらしい軌跡を、軌跡の曲率および捩率を用いて判断した。本手法をヒト脳の複数の神経線維束を模して作成したシミュレーション画像に適用し、追跡された本数を用いて評価することによって、その有効性を示した。

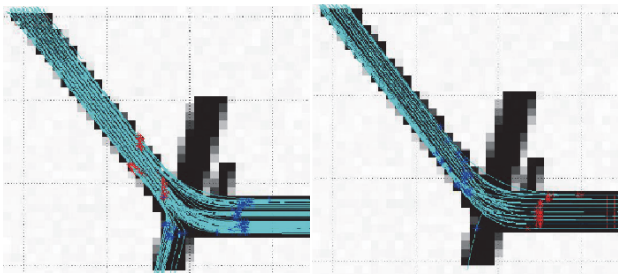


図２：曲線モデルに提案手法を用いた線維追跡

南　　政　孝　（引原教授）

「分散型電源の系統連系における受動性に基づく制御および位相同期方式に関する研究」
平成 25 年 3 月 25 日授与

電気エネルギーシステムは，現代社会におけるエネルギーネットワークの根幹をなしている。近年、その電気エネルギーシステムを取り巻く環境が大きく変化し、環境負荷低減や低炭素化社会実現のため、太陽光や風力などの自然エネルギーを利用した分散型電源の研究が進められている。今後、これらの分散型電源の一層の導入が期待される。一方、これらの分散型電源の出力は、天候などの気象条件に左右されやすく、一定の出力が得られないという特性がある。出力変動の大きな分散型電源が配電系統に多数連系する場合、電力の需給バランスが崩れることによる周波数の変動や逆潮流による配電線電圧の上昇をまねくなどの問題が懸念される。また、系統事故などの広域の擾乱発生時に、分散型電源が一斉停止し、配電系統に電力不足を及ぼすことも懸念される。今後の増加する分散型電源の導入量に伴い、分散型電源単独の系統連系ガイドラインを満たすだけでなく、系統運用に積極的に貢献しうることが強く要求される。すなわち、分散型電源系統連系システムは、定出力特性、擾乱への耐性、電力の調整機能を有することが不可欠となっている。そこで本論文では、受動性に基づく制御による統括的な電力変換器の制御手法の有用性、位相同期方式による擾乱に対する柔軟な耐性などを明らかにしている。主要な内容は以下の通りである。

1. 複数の電力変換器が結合するシステムに関して、受動性に基づく制御を用いることによって、システムの状態変数が目標値へ追従動作することを実証した。
2. 系統連系インバータに、位相同期方式を適用することにより、インバータが慣性を持つ同期発電機のように振る舞うことを明らかにした。その結果、配電系統側の電圧位相がステップ的に変化した場合においても、インバータの位相が自律的に調節されて収束することを明らかにした。
3. 配電系統に生じる位相急変や瞬時電圧低下および需要家側に生じる負荷抵抗値変動等の擾乱に対して、上述の制御手法を用いることにより、目標値追従動作を保証し、系統連系を維持できることを示した。この結果より、提案手法が系統連系において実際的に有効な手法となることを示した。
4. インバータに周期的摂動を加えることにより、負荷を推定する機能をインバータに付与する手法を示し、使用する摂動の条件を得た。この手法を用いた分散型電源の系統連系システムの定常状態への遷移を実現し、提案システムが所望の状態を維持できることを数値的に示した。

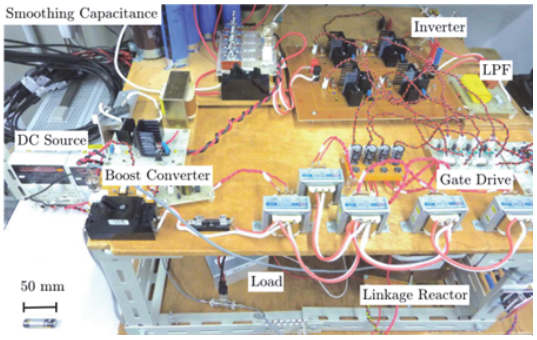


図 1. 分散型電源系統連系システム

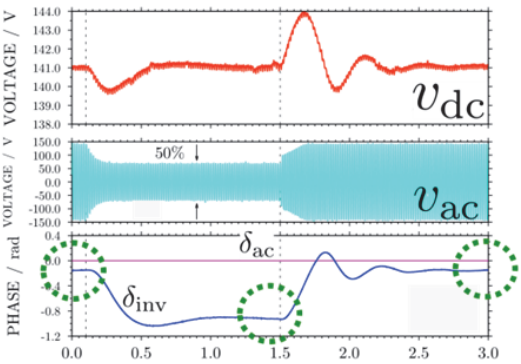


図 2. 瞬時電圧低下に対する過渡挙動

齊　藤　義　行　（和田教授）

「内部結合を含む機能ブロック単位の LSI-EMC マクロモデルに関する研究」
平成 25 年 3 月 25 日授与

本論文は、電子機器に搭載されるマイクロコントローラ（以下、マイコン）の動作によって生じる電源系高周波電流が原因で発生する電磁干渉（Electromagnetic Interference：EMI）のシミュレーションを行うための EMC マクロモデルについて論じた結果をまとめたものである。

最初に、マイコンを機能ブロック（コアブロック、I/O ブロック、アナログブロック等）に分割してマクロモデルを構築する場合に、各ブロック間に存在するブロック間内部結合（Inter Block Coupling：IBC）のモデル化が必要であることを示し、IBC を含む 3 ポートの線形等価回路モデル構造（図 1）を新たに提案した。また、記号解析（Symbolic Analysis）と最小二乗パラメータ最適化を用い、線形等価回路のインピーダンスの絶対値・位相両方を考慮して線形等価回路の素子の値を決定する新たな方法を提案した。

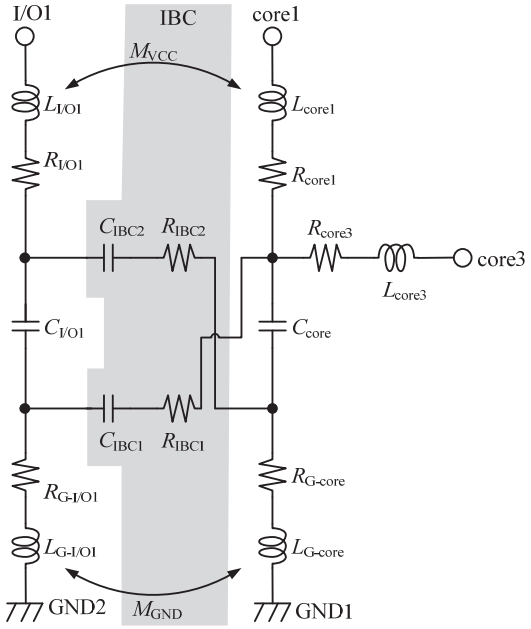


図 1　IBC を含む 3 ポート線形等価回路

次に、複数の電源端子間の伝達インピーダンス特性に注目し、より実測値に近い特性を示す線形等価回路を構築することを目的として、新たな線形等価回路モデルの構造を提案した。従来のモデルでは、異なる電源系に属する電源端子の駆動点インピーダンスについては実測とよく一致しているのに対し、電源端子間の伝達インピーダンスについては低周波数領域で実測と差があった。伝達インピーダンスの実測結果において、低周波数領域では平坦性（抵抗性）を示していることから、グラウンド間にシリコン基板を介した結合が存在していると推定し、この結合を表現する抵抗素子をグラウンド側に挿入した構造の等価回路モデルを提案した。この等価回路の各回路素子の値についても記号解析（Symbolic Analysis）と最小二乗パラメータ最適化を用いて決定した。

最後に、8 ビットマイコンを対象として、機能ブロックごとの電源電流を実測によって求め、それらをマイコンで実行するプログラムに応じてパイプライン処理を考慮して足し合わせることで、プログラムや動作周波数を変更した場合でも電源電流のシミュレーションが可能であることを示した。マイコン全体の電源電流測定結果から機能ブロックごとの電流を分離する方法について提案するとともに、ブロックごとの電源電流を合成して求めたマイコンの電源電流の時間波形から周波数スペクトルを求めると、動作クロック周波数の高調波だけでなく、イントラ EMC で問題となる次数間調波も精度良く予測することができることを示した（図 2）。さらには、プログラムで扱うデータの値に応じて電源電流が変化することを示し、データの違いを考慮することで電源電流の解析精度が向上することを示した。

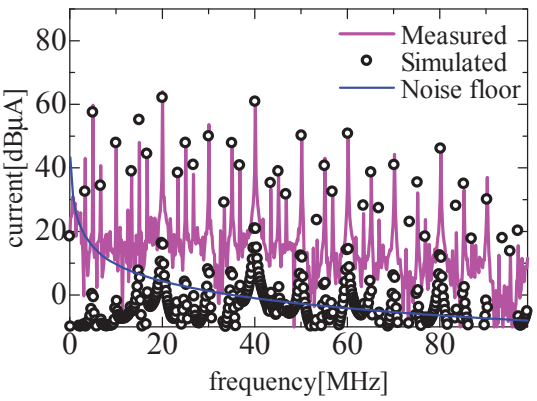


図 2　電流スペクトルの実測比較

巳　谷　真　司　（山川教授）
「Satisficing Nonlinear Spacecraft Rendezvous Under Control Magnitude and Direction Constraints」
（制御入力制約を考慮した宇宙機の相対軌道制御）
平成 25 年 3 月 25 日授与

本論文は、制御入力制約下における 2 機の宇宙機の相対軌道の最適制御に関する研究成果についてまとめられたものである。本論文では、制御入力の方向と絶対値に制約がある中で燃料消費を抑えつつ安全に宇宙機の軌道を制御する問題を考え、複雑な入力制約条件を考慮する新たな手法を二種類提案した。得られた成果は以下の通りである。

1. バリア関数を入力の方向制約のペナルティとして評価関数に付加することにより、最適制御問題を解くことを検討した。この結果、ポンドリャーギンの最小原理に基づき、ハミルトニアンを最小化する制御入力の平滑解を初めて解析的に導くことに成功した。この解は、過去の研究で得られている入力の絶対値制約のみを考慮した平滑解の一般化となっている。また、本手法により、燃料消費最小問題、エネルギー最小問題の両方を定式化することに成功した。どちらの問題に対しても、制約を満たす最適制御入力の履歴が得られることを数値解析により示した。

2. 1 で得られた開ループ的な制御則に対して、より安定性を高めるため、非線形制御の手法の一つである Satisficing 法を適用し、準最適な閉ループ制御則を求めることを検討した。2 次評価関数に制約条件を考慮した重み行列設定にすることにより、最終軌道遷移中で方向入力の制約を満たす制御リアプノフ関数の選定方法を考案した。また、絶対値制約と方向制約のバリア関数を、Satisficing 集合の条件の中に予め導入することにより、厳密に入力制約を満たす安定入力の集合に拡張可能なことを示した。この着想により、利得関数とコスト関数の差を最大にする制御入力を解析的に求めることに成功した。提案手法の安定性を議論するための入力空間内での作図法を考案し、重み関数等のパラメータを適切に選択することにより、時変・非線形システムで記述される宇宙機のランデブー問題において安定な解が得られることを示した。

以上のように本論文は、スラスタ噴射方向などに複雑な制約条件が課される宇宙機の相対軌道の最適制御問題に対して、新たな解法を提案している。本手法は、複数の宇宙機の相対軌道制御に留まらず、支配方程式が時変システムや非線形システムで記述される他の力学系にも広く適用できるものである。

川　原　洸太朗　（木本教授）

「Identification of Deep Levels in SiC and Their Elimination for Carrier Lifetime Enhancement」
（SiC 中の深い準位の解析とキャリア寿命増大に向けた準位低減法の確立）

平成 25 年 3 月 25 日授与

半導体中の点欠陥は、バンドギャップ中に深い準位を形成する。深い準位は、半導体デバイスの導電率およびキャリア寿命を減少させ、また、リーク電流を増大させる。特に、キャリア寿命への影響は大きく、バイポーラデバイスの性能を左右する。しかし、SiC（Si に代わる次世代半導体）中の深い準位に関しては、その物性の大部分が未解明であった。よって、本研究では、(i) デバイス作製プロセスによって生成される深い準位を検出・解析し、(ii) その起源（点欠陥）を同定、さらに (iii) SiC 中の深い準位の制御法を確立し、(iv) キャリア寿命の制御を試みた。

(i) SiC デバイス作製の際には、イオン注入および反応性イオンエッチングが必須である。本研究により、これらのプロセスにより多種・高密度の深い準位が生成することが判明した。特に、生成された深い準位にはキャリア寿命を支配する準位（$Z_{1/2}$ センター）が含まれ、その低減法の確立が重要課題であることが分かった。

(ii) 測定法を工夫することにより、初めて、$Z_{1/2}$ センターの起源が炭素空孔であることを明らかにした。

(iii) さらに、SiC を高温で長時間酸化することにより、$Z_{1/2}$ センターを消滅させることに成功した。これは、酸化中に、酸化膜界面で発生した格子間炭素が SiC 中に拡散し、炭素空孔を埋めることにより生じることが分かった。本モデルに基づいた拡散方程式を解くことにより、酸化後の $Z_{1/2}$ センターの分布を計算予測可能にした。図 1 は様々な条件で酸化した後の $Z_{1/2}$ センターの深さ方向分布である。各線が計算予測値、シンボルが実測値を示しており、酸化条件によらず両者はよく一致している。$Z_{1/2}$ センター消滅に必要な酸化条件はサンプルによって異なり、本計算法で酸化条件を決定する必要がある。

(iv) 最後に、熱酸化（キャリア寿命増大法）および電子線照射（キャリア寿命低減法）を用いることで、SiC 中のキャリア寿命の制御が可能であることを示した。図 2 は図 1 の各試料の μ-PCD 測定結果である。高温・長時間の酸化を行うことで、エピ層の深くまで $Z_{1/2}$ センターが消滅し、キャリア寿命が増大していることが分かる（0.6 μs から 6.5 μs）。このようにしてキャリア寿命を増大させた後、電子線照射により所望のキャリア寿命に調整することで、面内均一なキャリア寿命を再現性よく得ることができる。

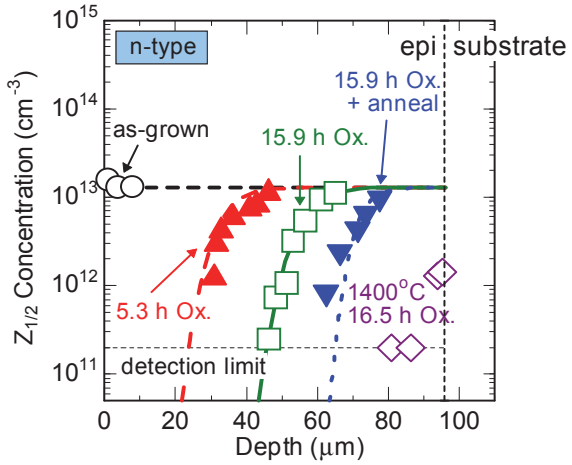


図 1　様々な条件で酸化後の $Z_{1/2}$ 深さ方向分布

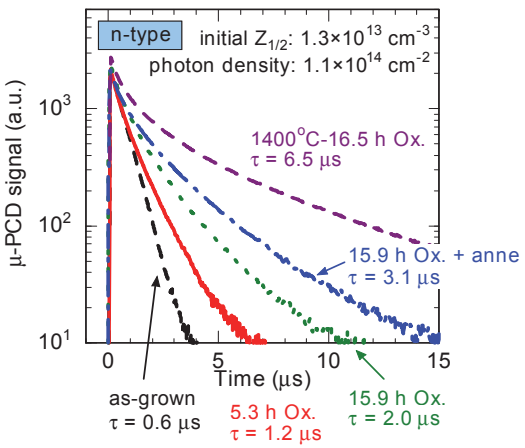


図 2　図 1 の各試料の μ -PCD 測定結果

渡　辺　直　樹　（木本教授）

「Fundamental Study on Wide-Bandgap-Semiconductor MEMS and Photodetectors for Integrated Smart Sensors」
（高機能集積センサ実現に向けたワイドギャップ半導体 MEMS および光検出器の基礎研究）

平成 25 年 3 月 25 日授与

MEMS（Microelectromechanical Systems）は超小型・高機能センサデバイスとして注目を集めているが、高温などの厳環境における動作への要求が高まっており、高温でも化学的に安定で機械的強度も優れている炭化ケイ素（SiC）や窒化ガリウム（GaN）などのワイドギャップ半導体を構造体に用いた応用が期待されている。一方、ワイドギャップ半導体を機能性材料として扱うことにより新規機能デバイスが実現でき、さらにこれらのワイドギャップ半導体は、禁制帯幅が大きいことに起因して高温でも動作可能な電子デバイスを実現することができる。したがってワイドギャップ半導体 MEMS と新機能デバイス、さらに光検出器などのセンサデバイスを集積することで、高機能かつ高性能なセンサシステムへと応用することが可能となる。

本論文は厳環境動作可能な集積センサの実現に向けて、ワイドギャップ半導体 MEMS と光検出器の基礎研究をまとめたものである。このような集積センサを実現するうえでの課題として　1）高温におけるワイドギャップ半導体の物性データの解明、 2）ワイドギャップ半導体の微細加工プロセスの確立と MEMS デバイス作製、 3）ワイドギャップ半導体電子デバイスの高温動作の実現があげられる。本論文では、これらの課題に対し以下の研究に取り組み、ワイドギャップ半導体 高機能集積センサ実現へ向けた進展を示した。

1. ワイドギャップ半導体の良好な可視光透過性を活かした光受動素子の実現に向けて、SiC、GaN、および窒化アルミニウム（AlN）の屈折率の温度依存性を正確に評価し、温度範囲が室温から 500℃、波長範囲がバンド端付近（SiC: 392nm, GaN: 367nm, AlN: 217nm）から 1700nm の赤外域の領域においてその値を決定した。また得られた結果を用いて、温度により屈折率を変化させて透過波長を変調する光学フィルタのシミュレーションを行い、ワイドギャップ半導体による可視域波長可変フィルタの実現可能性を示した。
2. 高温における SiC 光検出器の設計のため、SiC 光吸収係数の温度依存性を正確に評価し、室温から 300℃、光吸収係数が 500cm^{-1} までの波長における値を決定した。
3. （光）電気化学エッチングを用いることで SiC の伝導型選択エッチングが可能であることを示し、これを用いて単結晶 4H-SiC から成るブリッジ構造・カンチレバー構造を作製した。図 1 に作製したブリッジ構造の鳥瞰 SEM 像を示す。また、作製した単結晶 SiC カンチレバーの共振特性において、同程度のサイズの Si カンチレバーより大幅に大きな Q 値（230,000）を達成し、単結晶 SiC MEMS の高いポテンシャルを実証した。
4. 高温動作 SiC pn フォトダイオードの実現に向けて、 1）逆バイアス電圧調整による感度の温度無依存化の提案と実証を行い、 2）パッシベーション手法の改良による高温でのリーク電流の大幅な低減と、室温から 500℃までの温度範囲における SiC pn フォトダイオードの良好な光感度特性（量子効率 50-70%）を達成した（図 2）。

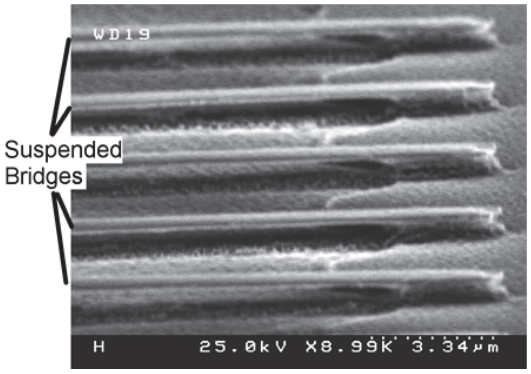


図 1. 単結晶 SiC ブリッジ構造の鳥瞰 SEM 像

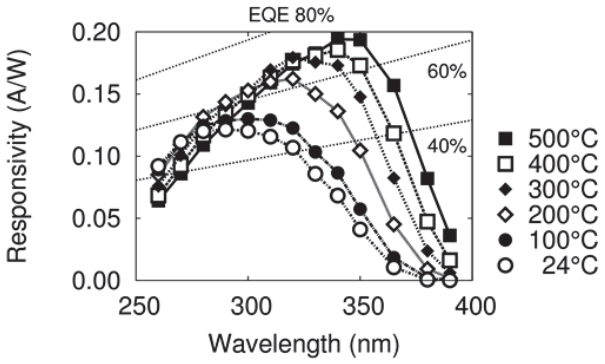


図 2. SiC pn フォトダイオードの分光感度特性

井　戸　慎一郎　（木本教授）
「周波数変調原子間力顕微鏡を用いた生体分子のナノスケール固液界面構造計測」
平成 25 年 3 月 25 日授与

次世代のエレクトロニクス技術の確立に向け、限界を迎えつつあるトップダウン型の微細加工プロセスから、ボトムアップ型のプロセスへの転換が迫られている。その実現のための有力な手法のひとつとして、生体分子の自己組織化現象を利用する方法があり、ナノバイオテクノロジーと呼ばれる分野において現在活発な研究が行われている。ナノバイオテクノロジーのさらなる発展のためには、生体分子の機能に相関した構造を精密に計測する必要があるが、分子生物学で伝統的に用いられてきた構造計測手法である X 線回折や電子顕微鏡は、生体分子が機能を発現する水中の計測が困難であるなど様々な制約を有していた。いっぽう原子間力顕微鏡（AFM）は、測定環境や観察可能な試料に対する原理的な制約が存在しないため、水中で動作するナノバイオデバイスの特性をその場で評価可能な数少ない技術のひとつとして近年大きな注目を集めている。本論文では、液中で動作する周波数変調検出方式 AFM（FM-AFM）を、DNA やタンパク質分子など様々な生体分子のナノスケール固液界面構造計測へと応用した結果について記述している。

FM-AFM を用いたプラスミド DNA 分子の水中観察の結果の 1 例を図 1（a）に示す。いわゆる B 型 DNA の右巻き二重らせん構造における主溝と副溝の違い（図 1（b））や、DNA 鎖のバックボーンを形成する糖リン酸鎖上に周期的に存在する個々のリン酸基を分解して観察することに成功した。また、二重らせん構造の局所的な融解（緩和）など、これまでの結晶学的に決められた構造からの差違も明瞭に観察された。さらには、液中 FM-AFM を利用した 3 次元フォースマッピング法と呼ばれる手法を用いることで、高度好塩菌の紫膜内に存在する、bacteriorhodopsin（BR）タンパク質分子の規則的配列、およびその膜表面に形成される水和構造を分子スケールで可視化できることを示した。

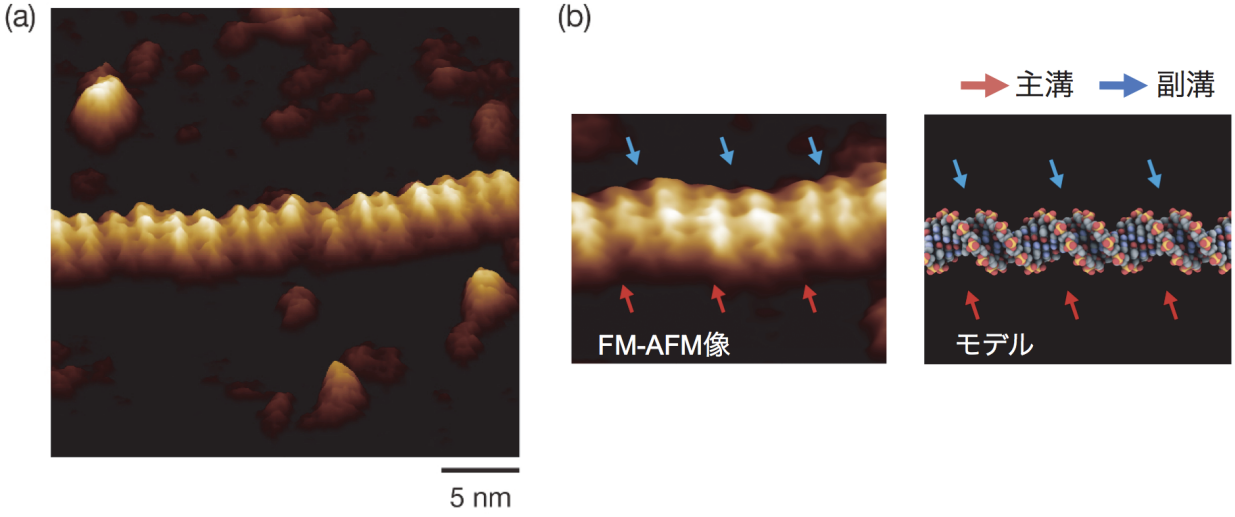


図 1: 液中動作周波数変調検出方式原子間力顕微鏡 (FM-AFM) を用いた DNA 分子の高分解能固液界面構造計測 . (a) プラスミド DNA 分子の B 型二重らせん構造 . (b) 二重らせん構造の拡大 AFM 像 (左) とそのモデル図 (右).

石　井　良　太　（川上教授）

「GaN および AlN の励起子変形ポテンシャルの同定と（Al、Ga）N 系歪量子構造の物性予測」

平成 25 年 3 月 25 日授与

紫外線には、リソグラフィ、光触媒および光合成反応、殺菌・消毒など様々な応用分野が存在する。窒化物半導体（ここでは AlN と GaN の混晶の AlGaN）を用いた発光ダイオード（LED）やレーザダイオード（LD）は、発光波長の制御性の高さ、長寿命かつ小型・堅牢など数々の特長から、新しい紫外発光素子として期待されている。しかしながら、LED の光出力および量子効率は高いとは言えず、336 nm 以下で発振する LD は実現されていない（原理的には 210 nm 程度まで発振可能）。

本研究では、上記の原因として、GaN と AlN の物性定数のほとんどが未解明であることに着目した。物性定数を精密に同定することができれば、（Al、Ga）N 系発光デバイスの特性を信頼性高く予測することができ、紫外高効率発光に向けたデバイス構造を提案することが可能となる。特に本研究では、発光層が大きな歪を内包した量子井戸構造であることに着目して、歪が電子状態に与える影響の程度を表す“励起子変形ポテンシャル”を実験的に同定した。

GaN と AlN の励起子変形ポテンシャルを全て実験的に同定するために、外部から意図的に応力を印加できる装置を構築した。図 1 に、一例として、結晶主軸に平行に応力を印加したときの GaN 基板の偏光反射スペクトルを示す。実験結果を解析することで、GaN と AlN の全ての励起子変形ポテンシャルを実験的に同定することに成功した。

上記の物性定数を用いて、（Al、Ga）N 系歪量子構造の電子状態を計算した。一例として、井戸幅が 3 nm の $Al_{0.7}Ga_{0.3}N$/AlN 歪量子井戸構造の価電子帯状態密度を図 2 に示す。図 2 より、従来の成長面方位である（0001）面に対して、（11-22）面は価電子帯頂上近傍の状態密度が大幅に低減されていることが分かる（レーザ発振に有望なことを示している）。これらの計算結果をもとに、紫外領域におけるいくつかの波長帯に対して、高効率発光が期待できるデバイス構造の提案を行った。

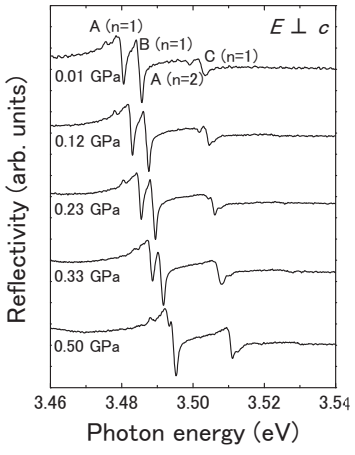


図 1 GaN の偏光反射スペクトルの一軸性応力依存性

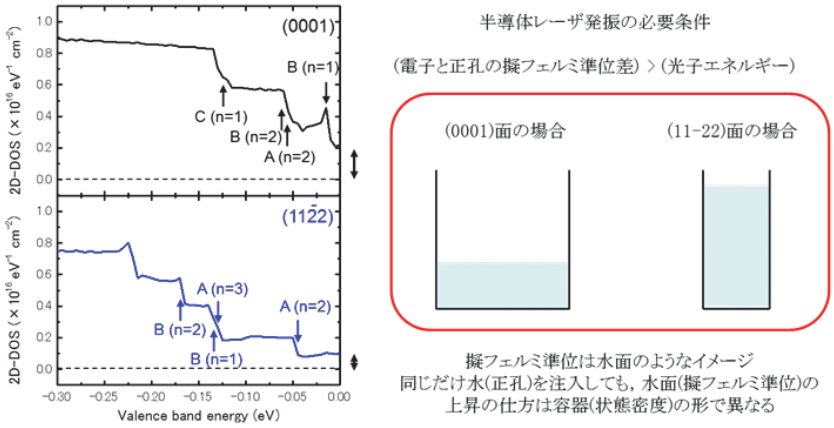


図 2 $Al_{0.7}Ga_{0.3}N$/AlN 歪量子井戸構造の価電子帯状態密度 (井戸幅 3nm)

山　田　翔　太　（野田教授）
「ワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたフォトニック結晶に関する研究」
平成 25 年 3 月 25 日授与

本論文は、次世代の光材料であるフォトニック結晶の応用範囲を飛躍的に拡張することが可能とされる、ワイドバンドギャップ半導体材料「シリコンカーバイド（SiC）」に着目し、これを用いた新たなフォトニック結晶の設計・作製手法の確立およびその実証を行っ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. SiC を用いたフォトニック結晶を設計し、新たに作製手法の開発を行った。光学特性評価を行った結果、光通信帯域（1.55 μ m 帯）において約 200nm 程度の PBG 領域、約 100nm の導波帯域をもつ導波路や Q 値約 10000 をもつ共振器が得られ、SiC を用いて初めて 2 次元フォトニック結晶を実証した。
2. ワイドバンドギャップをもつ SiC は可視領域においても透明であり、フォトニック結晶の可視領域への応用が可能である。格子定数 a を 150nm から 600nm まで 25nm 間隔で様々に変化させたフォトニック結晶を作製し（図 1（a））、光学特性評価を行った結果、波長 550 ～ 1450nm という従来の材料では成し得なかった非常に広帯域において、同一基板上に導波路・共振器結合系を実現することに成功した（図 1（b））。
3. SiC フォトニック結晶共振器における二光子吸収の抑制の可能性について、入力するエネルギーを変化させながら共振器特性を評価し、Si フォトニック結晶共振器との比較を行った。その結果、SiC を用いることによって二光子吸収が十分に抑制され、少なくとも Si の約 100 倍の入力エネルギーに対しても安定に動作できることが明らかとなった。
4. SiC がもつ二次の非線形係数を利用し、SiC フォトニック結晶共振器において、初めて第二高調波発生や和周波発生を観測することに成功した。また、用いる共振器構造によって、第二高調波や和周波の放射パターンや偏光特性が異なることを見出し、かつ 3 次元 FDTD 法を用いた理論計算により、その実験事実を良く説明できていることを示した。

以上の成果は、SiC フォトニクスとも言うべき、これまでにない新たな光分野の萌芽となるものと期待される。

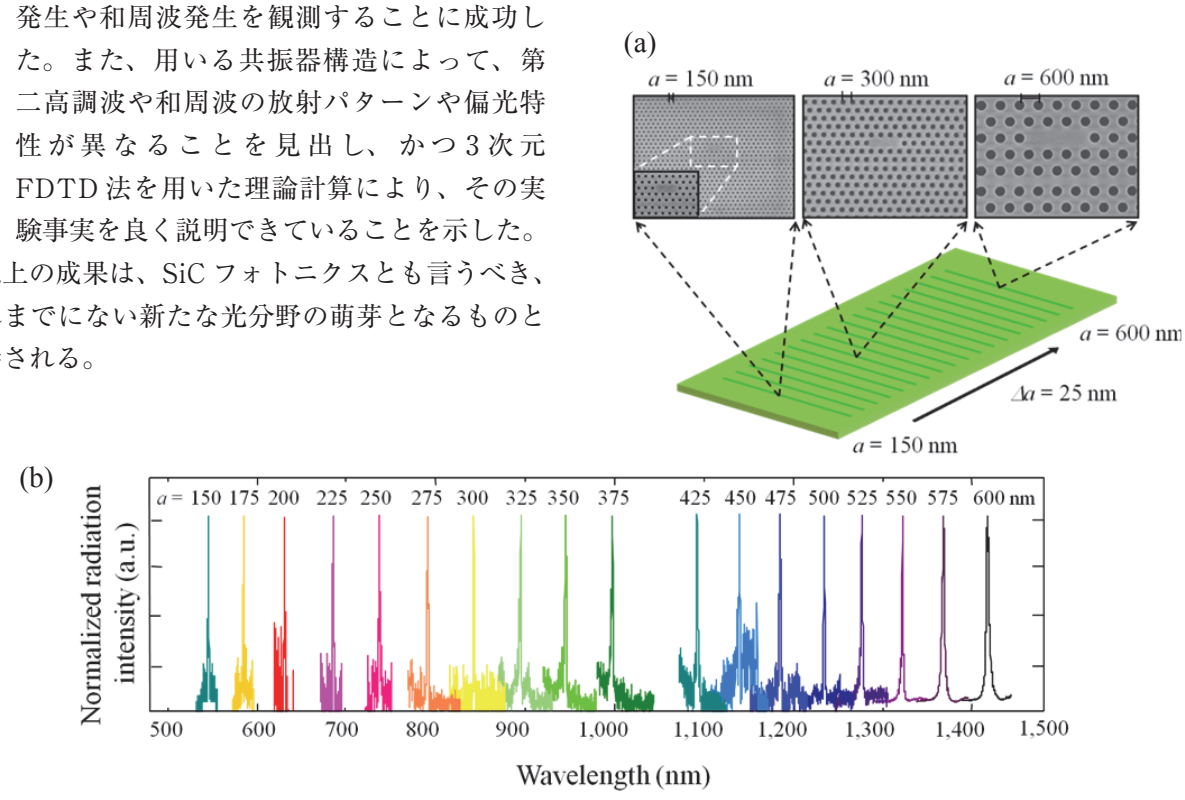


図 1：様々な格子定数の SiC フォトニック結晶共振器 (a) SEM 像 (b) 放射スペクトル

鈴　木　克　佳　（野田教授）
「多方向同時エッチングによる 3 次元フォトニック結晶の一括形成」
平成 25 年 3 月 25 日授与

本論文は、次世代の光材料として期待されている 3 次元フォトニック結晶を簡便に実現可能な新規作製法の提案と実証を行った結果をまとめたものである。3 次元フォトニック結晶は、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光ナノ構造体であり、全方向に対する光の禁制帯であるフォトニックバンドギャップをもつことを特徴する。このような 3 次元フォトニック結晶は、光子を制御・操作するための次世代光材料と位置付けられ、様々な光制御の実現の鍵を与えるものと期待されている。しかしながら、その実現には高精度な形成技術が要求され、高品質な 3 次元フォトニック結晶を一括して簡便に作製することは困難であった。本論文では、多方向から「同時に」斜め方向のエッチングを行うというユニークな手法を実現し、わずか 1 回のエッチングにより 3 次元フォトニック結晶を一括形成することに成功した。

第一に、市販のプラズマエッチング装置内に、金属から成るイオン軌道制御板を配置するのみで、多方向から同時に斜め方向のプラズマエッチングを行う独自の手法を開発した。この技術を用いて図 1 に示す 3 次元フォトニック結晶の一括形成を試みた結果、わずか 1 回のプラズマエッチングにより、世界でもトップクラスの 3 次元フォトニック結晶が一括形成できることを示した（図 2)。これらは、2 次元構造形成と同程度の簡便さで高精度な 3 次元構造の一括形成が可能であることを如実に示している。さらに、フォトニック結晶を用いた光制御を実現するために重要な、フォトニックバンドギャップ帯域制御を試み、可視光域から近赤外光域までの非常に広い波長域において、フォトニックバンドギャップ帯域を制御することに成功した。

第二に、3 次元フォトニック結晶を用いた光制御の一例として、3 次元フォトニック結晶の表面を用いた光制御について検討を行った。まず、表面における光の伝搬状態を、実験･理論の両面から明らかとした。さらに、表面近傍の構造を変化させて表面における光の状態が存在しない状況を実現し、その一部分に、意図的に周期性を乱した表面欠陥を導入することにより、表面における光ナノ共振器及び、光導波路が実現できることを理論的に示した。

以上の成果は、次世代の光材料として期待されている 3 次元フォトニック結晶の簡便な実現を可能とするものであり、3 次元フォトニック結晶を用いた研究の進展に大いに貢献すると期待できる。

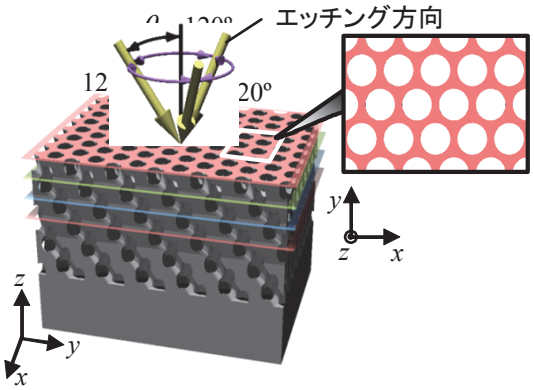


図 1: 3 次元フォトニック結晶の模式図。

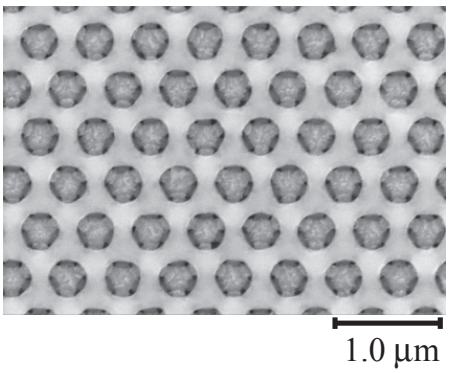


図 2: 試料上面の電子顕微鏡像。

佐　藤　義　也　（野田教授）

「空間的に離れた光ナノ共振器間の強結合状態形成とその応用展開」
平成 25 年 3 月 25 日授与

本論文は、光を微小領域に長時間閉じ込めることが可能なフォトニック結晶光ナノ共振器間を、光波長の数十倍もの距離を離した状態で強く結合させ、かつその結合を共振器の光子寿命より短い時間で変化させて結合状態を動的に制御する技術について提案と実証を行った結果をまとめたものである。

光を波長の３乗程度の極微小領域、すなわち光ナノ共振器に強く閉じ込めることは、光を用いた量子演算や、光を光のままで蓄えることが可能な光メモリーなど、将来の通信・情報処理のための高機能光回路の実現にとって鍵となる技術である。これまでに単体の光ナノ共振器への光閉じ込めは実現されていたものの、複数の光ナノ共振器間で光を自在に交換する技術は存在しなかった。本研究では、第一に、図１に示す２つの共振器 A, B の中間に導波路を配置した構造を考え、導波路から外部環境へ光が逃げるのを抑えるために導波路の両端を反射鏡 C, D で閉じると、この導波路が結合振り子において振動を媒介する棒と同様に、ナノ共振器間での光の交換を媒介し得ることを提案した。

第二に、導波路の伝搬時間や位相を適切に設計することで、導波路部への光の散逸を抑えつつ、ナノ共振器部に光を集中させた状態のままで、ナノ共振器間の光のやり取りを実現できることを理論的に明らかにした。

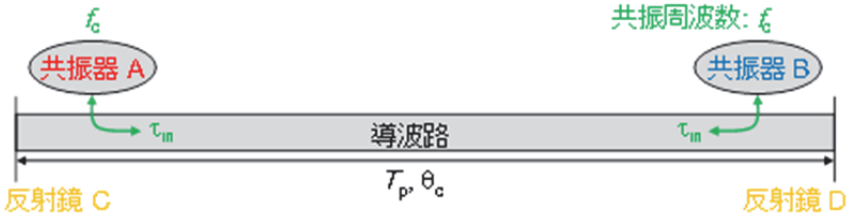


図 1: 導波路を介した結合共振器モデル

第三に、実験的に図２に示すように 83 μm も離れた光通信帯域の共振器間で光が超高速（周期 54ps）に何度も交換される様子を確認した。さらに、その交換を外部制御光パルスを用いて任意のタイミングで切断することにも成功した。これらの成果は光情報を古典光のレベルだけでなく単一光子レベルにおいてもそのまま保持して処理できる技術として、次世代高機能光回路の実現に大きく貢献するものと期待できる。

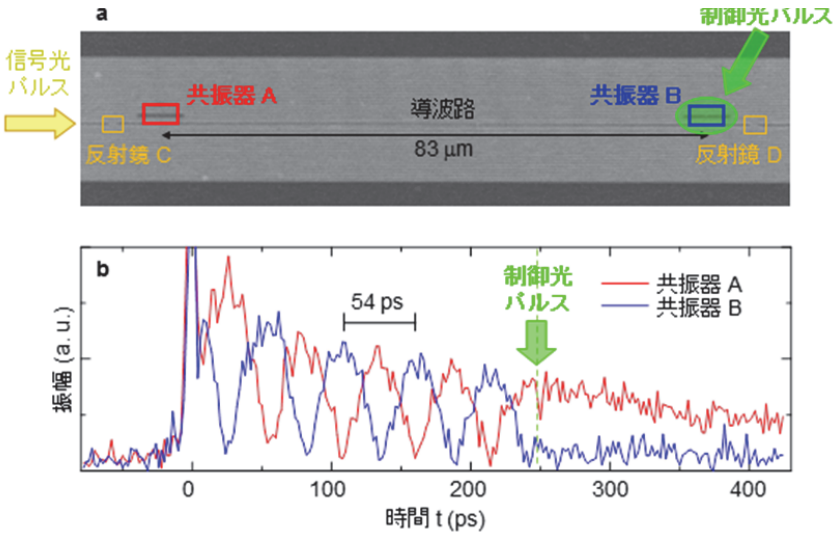


図 2: 離れた共振器間の強結合とその切断の実証

玉　手　修　平　（北野教授）

「Geometry of weak measurements and its application to optical interferometry」（弱測定の幾何学とその光干渉測定への応用）

平成 25 年 3 月 25 日授与

弱測定はアハラノフ・ボーム効果で有名なアハラノフによって、提案された量子測定の一つの方法であり、微弱な相互作用を効率的に検出する計測手法としても注目を集めている。本論文は、弱測定の定式化に用いられる 2 状態形式と呼ばれる量子力学の定式化を幾何学的な観点から整備し、その定式化をもとに弱測定の光干渉測定へ応用手法を考案し、その結果についてまとめたものである。

まず、弱測定のもととなる量子力学の定式化である 2 状態形式における状態ベクトルをブロッホ球上に表現する方法について検討した。また、この状態表示をもとに、弱測定の測定結果である弱値の取り得る範囲について検討し、負の弱値をとるための条件を幾何学的に明らかにした。

次に、弱測定と幾何学的位相の関係について調べた。弱測定においては、その測定値である弱値が測定条件によって、非常に大きな値をとり、この効果が計測上有利に働くと考えられている。ここでは、弱測定の測定系と量子消去系のアナロジーを考察することで、弱値が大きな値をとるために必要な条件を幾何学的位相にもとづいて考察し、幾何学的位相と弱値の関係を明らかにした。

最後に、弱測定の光干渉測定への応用として、完全無偏光状態を用いて、干渉計内の偏光回転を測定する測定手法を提案し、この検証実験を行った。実際の実験系を図 1 に示す。この系において、初期状態を Quartz 結晶により無偏光状態に準備し、この状態を用いて干渉計内部の半波長板（HWP1）の回転角の測定を行った。図 2 が波長板の角度に対する検出器の応答を示している。この図から、測定に用いる偏光状態が無偏光な場合にも波長板の角度が測定可能であり、弱測定の特徴であるパラメータの変化に対する急激な応答の変化も得られることを明らかにした。

本研究は、幾何学的な考察から弱測定のノイズに対する耐性を明らかにし、その事実をもとに光の干渉測定に応用したものであり、今後の弱測定のさらなる応用に繋がる研究であると考えられる。

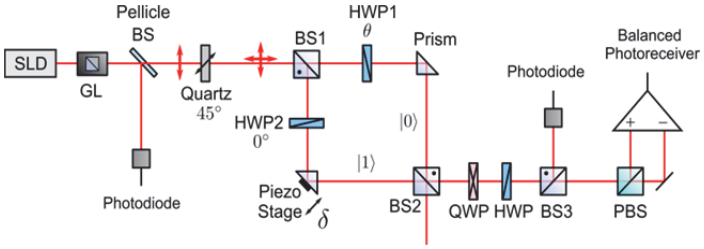


図 1　無偏光状態を用いた偏光回転の弱測定の実験系

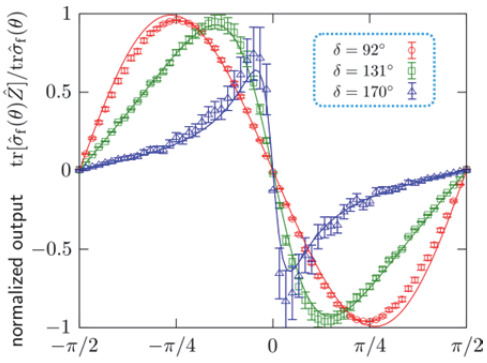


図 2　波長板の角度に対する検出器の応答の変化

金　子　健太郎　（藤田教授）

「コランダム構造酸化ガリウム系混晶薄膜の成長と物性」

平成 25 年 3 月 25 日授与

半導体研究において新材料の開拓は重要である。その中でも新しい混晶系の開発は大きな意義をもち、半導体研究の歴史を鑑みても、新規機能性デバイスは常に新材料の混晶系によってもたらされてきた。博士研究では、新しい混晶系としてコランダム構造酸化物に着目し、その混晶薄膜作製と新規機能開拓を行った。

コランダム構造酸化物の混晶系は主に 2 つの領域により構成されており、1 つ目は典型金属酸化物による混晶系であり（α-Al_2O_3-α-Ga_2O_3-α-In_2O_3 図 1)、バンドギャップ値を 3.7 ～ 9.0eV まで変調させる事が可能である。2 つ目は遷移金属酸化物である α-Fe_2O_3、α-Cr_2O_3 等で構成される領域であり、1 つ目の領域の典型金属酸化物と混晶化、またはドーピングを行う事で、強磁性等の機能付加が可能となる。つまり II-VI、III-V 族化合物半導体と同様に 1 つ目の領域で「バンドギャップエンジニアリング」が可能であり、さらに 2 つ目の領域の 3d ブロック元素を中心とする材料の、スピン偏極した電子の特性を付加する事で、半導体薄膜中に磁気秩序や特殊な電子秩序をもたせる「ファンクションエンジニアリング」が可能となる事が大きな特徴である。

博士研究において、まずは c 面サファイア基板上において α-$(Al,Ga)_2O_3$、α-$(In,Ga)_2O_3$、の混晶薄膜の作製を行い、それぞれ透過率測定結果よりバンドギャップの組成依存性を確認し、バンドギャップエンジニアリングに成功した。また、α-$(Al,Ga)_2O_3$ 混晶薄膜は 0006 ピークにおける XRC の半値幅が全 Al 組成領域において 300arcsec 以下と c 軸配向性が高く、さらに α-$(Al,Ga)_2O_3$/ α-Ga_2O_3 界面の断面 TEM 観察から顕著な結晶格子の乱れが確認されない、非常に良好な界面を形成する事を確認した。電子走行層である α-Ga_2O_3 と絶縁層である α-$(Al,Ga)_2O_3$ が良好な界面を形成する事から、α-Ga_2O_3 をベースとしたパワーデバイスへの応用可能性を示す結果であった。

さらに、α-Ga_2O_3 と、弱強磁性体である α-Fe_2O_3 の混晶である α-$(Ga,Fe)_2O_3$ 混晶に着目し、c 面サファイア基板上において高品質薄膜の作製に成功した。その XRC の半値幅は全 Fe 濃度領域で 100 arcsec 以下と非常に高い c 軸配向性をもち、さらに断面及び平面の TEM 観察、TEM-EDX 測定の結果から、明瞭な結晶格子を形成しながら、薄膜内に金属間化合物の析出や、濃度が異なるドメインの偏析などが確認されなかった。そして磁化測定結果から、300K において明瞭なヒステリシスカーブを示し、強磁性を示した（図 2)。さらに大阪大学との共同研究により、バンド構造計算から、強磁性起源についての一定の解釈を得た。

このように、バンドギャップ変調のみならず機能付加も可能な系としてコランダム構造酸化物混晶を提案し、その変調及び機能発現を実証する事が出来た。これらの結果は次世代のパワーデバイス開発分野のみならず、スピントロニクス分野における新しいアプローチにつながるものである。

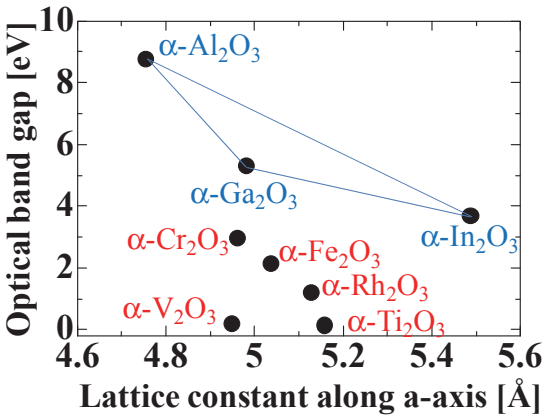


図 1 コランダム型構造酸化物による新しい混晶系

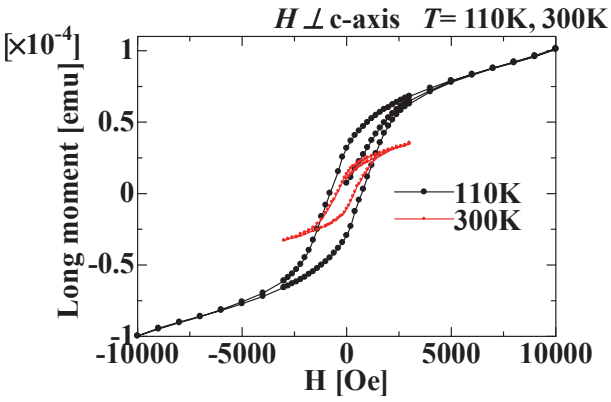


図 2 α -(Ga,Fe)2O3 薄膜の 110K と 300K における磁気モーメントの磁場強度依存性

原　島　　純　（黒橋教授）

「Studies on Re-ranking and Summarizing Search Results」
（検索結果の並べ替えと要約に関する研究）
平成 25 年 3 月 25 日授与

現在、ウェブから情報を取得するには、検索エンジンの利用が必要不可欠である。検索エンジンを用いるユーザの情報要求は、クエリと呼ばれる単語のリストで表現される。クエリは次の三つタイプに分類できる。

・誘導型のクエリ … 特定のサイトやウェブページに到達するためのクエリ
・取引型のクエリ … 商品の購入や予約など、ウェブ上での何らかの取引を目的としたクエリ
・情報型のクエリ … 広く情報を収集するためのクエリ

クエリの多くが情報型だと言われている。しかし、既存の検索エンジンは、検索した文書のリストを返すのみであり、情報収集に十分有用であるとは言えない。

本研究では、ユーザの情報収集を支援する種々の手法の開発に取り組んだ。まず、検索結果をリランキングする新しい手法を提案した。既存のリランキング手法では、文書の表層に現れる単語の情報のみを用いてリランキングを行う。一方、提案手法では、トピックモデルを用いて、文書に潜在する単語の情報も用いてリランキングを行う。実験の結果、文書の潜在的な情報がリランキングに有効であることが示された。

次に、検索結果からクエリに関する要約を生成する手法を開発した。検索結果から情報を収集するためには、検索された各文書に目を通さなければならない。これは非常に骨の折れる作業である。本研究では、トピックモデルを用いて検索結果からクエリに関する重要文を抽出し、トピック毎に要約を生成する手法を提案した。実験の結果、提案手法によって生成された要約が、クエリに関する情報を収集するのに有効であることが分かった。

最後に、日本語文を圧縮する新しい手法を提案した。要約は、できるだけコンパクトな方が良い。そのような要約を生成するためには、重要文を抽出するだけでなく、抽出した文を圧縮する必要がある。しかし、日本語文に対する既存の圧縮手法は、文節から情報量の小さい単語を除いたり、文法的な圧縮文をつくったりする能力に欠ける。本研究では、ラグランジュ緩和を用いて、文節から情報量の低い単語を除きつつ、文法的な圧縮文を生成する手法を提案した。実験の結果、提案手法が、情報量と文法性を保ちつつ、文を柔軟に圧縮できることが示された。

以上のように、本研究では文書のリランキングと要約、日本語文の圧縮に取り組み、その解法を提示した。今後は、本研究での成果を実社会に還元し、ユーザの情報収集を支援していきたいと考えている。

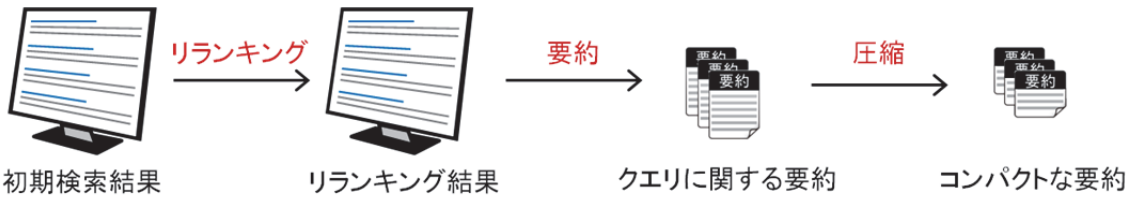


図 3 本研究の取り組み

佐　方　　連　（吉田教授）

「A Study of Flexible Cognitive Radio with Software Defined Radio and Dynamic Spectrum Access」
（ソフトウェア無線及びダイナミックスペクトラムアクセスを用いた柔軟なコグニティブ無線の研究）

平成 25 年 3 月 25 日授与

近年、無線通信の高速化に伴う周波数帯域の逼迫を背景に、限りある周波数資源を有効利用することが可能なコグニティブ無線システムが注目を集めている。ヘテロジニアス型コグニティブ無線システムでは、利用可能な複数の無線システムの中から最適な無線システムを選択して利用することでトラヒックを分散する。またホワイトスペース型コグニティブ無線システムでは、地理的及び時間的に利用されていない周波数帯域を一時的に活用することで周波数利用効率の向上を目指す。しかし、ヘテロジニアス型コグニティブ無線システムでは、複数の無線システムを搭載することによる装置の大型化が問題となる。一方、ホワイトスペース型コグニティブ無線システムでは、動的な周波数利用を常時リアルタイムに制御できる制御通信方式が必要になるという問題がある。そこで本論文は、コグニティブ無線システムの実現に向けて上記問題の解決に取り組んだ。

まずヘテロジニアス型コグニティブ無線システムにおいて装置が大型化する問題を、ソフトウェア無線技術により解決した。移動端末の小型化の要求に応えるため、動作を止めることなくリアルタイムに処理を変更できるダイナミックリコンフィグプロセッサを 2 つないし 3 つ搭載することを提案し、昨今の高速移動体通信システムである LTE（Long Term Evolution）等の変復調処理を、処理量の観点から現実的な範囲でソフトウェア処理できる見込みを示した。

次に、周囲の周波数利用状況に合わせて動的にキャリア周波数を変化させながら通信するホワイトスペース型コグニティブ無線システムにおける制御信号伝送手段を検討した。新たにシステムに参加する端末や通信が途絶えてしまった端末が、利用中のキャリア周波数を知るために、キャリア周波数情報の詳細な取り決めが無くとも情報伝送が可能な DCPT（Differential Code Parallel Transmission）方式を提案した。図 1 に示すように、DCPT 方式では、送信機は予め取り決めた周波数差を持つ 2 つの周波数を利用して情報を送信する。受信機は、受信信号と、周波数シフトした受信信号との相関を求めることで、送信機が利用した周波数を知らなくとも情報を再生できる。理論検討及び計算機シミュレーション検討により、他の干渉信号の存在する環境下でも信号伝送が可能なことを示した。

さらに DCPT の改良方式として、伝送時間の短縮が可能な DCPT − ABF（DCPT-Adaptive Bandpass Filter）方式を検討した。DCPT 方式では、受信信号中に含まれる広帯域で多量の雑音信号や干渉信号により所望信号の品質が劣化する。もし所望信号のキャリア周波数周辺のみを通過させるバンドパスフィルタを受信時に利用できれば問題は解決するが、キャリア周波数そのものが未知な所望信号を受信する DCPT 方式では実現は容易ではない。そこで教師信号による学習を通じて周波数特性の改善等が可能な適応等化器に着目し、受信信号を教師信号、周波数シフトした信号を入力信号として学習し、あるいは双方の信号を入れ替えて学習させることを提案し、DCPT 方式に比べ伝送に掛かる時間を 12% にまで削減できることを示した。

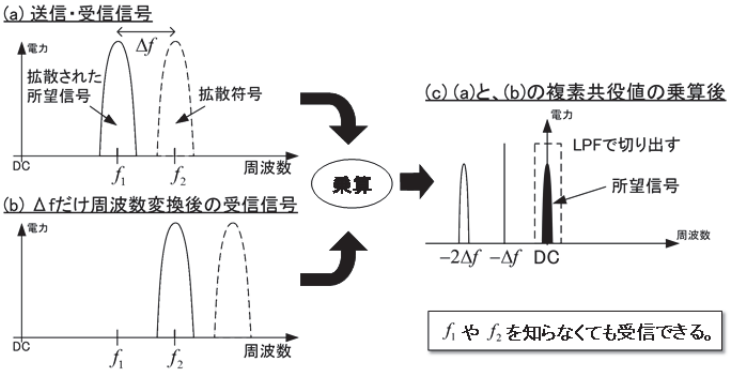


図 1 ：DCPT 方式の送受信信号と動作原理

服　部　有里子　（吉田教授）
「ITS 無線情報システムの高度化に関する研究」
平成 25 年 3 月 25 日授与

ITS（高度道路交通システム）は、進展著しい情報通信技術の利活用により、安全・安心・快適で、効率的かつ利便性が高く、環境にも優しい道路交通社会を実現することを狙っており、今後の展開が大いに期待されている。とりわけ、モバイル通信を駆使した ITS 無線情報システムでは、多様な無線通信方式の中から個々の要求に応じた適切な無線方式を選択、組み合わせることにより、必要とされる機能の実現を図ることが必要となる。本論文は、ITS 無線情報システムにおけるいくつかの代表的な利活用の事例を取り上げ、それぞれの事例について、システムの高度化を実現する上での課題を明らかにするとともに、その具体的な解決策を提案し、実証実験で確認するものである。

実際、ITS サービスに求められる伝送情報量の増大、高レスポンス性、高信頼性、高いセキュリティに対応するため、それぞれの無線方式特有の通信性能を踏まえた上で、以下の課題を解決していく必要がある。

1）路車間通信での高信頼・高効率な通信の提供、シャドウイング等に伴う回線劣化が存在する場合の安定したサービスの提供
2）利用者が必要な情報を安定してシームレスに伝送、車のネットワーク化による車両内のセンシング情報の連続的収集と車両の遠隔操作
3）IP（Internet Protocol）系と非 IP 系のスムーズな連携による、実際のサービス窓口でのサービス時間短縮
4）路車間通信と IC カードアクセスの連携による、高速で高セキュリティな情報伝送

上記に対する研究成果として、1）の研究では、同報通信と個別通信が混在する小ゾーン（直径 20 ～ 30m）路車間通信の高信頼度化、高効率化について検討を行った。5.8GHz 帯 DSRC（専用狭域通信）を仮定して、近接大型車両などに起因するシャドウイング等に伴う回線劣化が存在する場合でも、移動局側の通信接続管理タイマーの制御を工夫することにより、路車間回線接続確率を高めるとともに、基地局の移動局に対する通信接続維持管理手段に工夫を加えることにより、通信帯域の一層の効率的な利用が図れることを実証実験により明らかにした。例えば、100km/h の高速移動車両に対し、同報通信の安全運転支援情報サービスと個別通信のプローブ情報サービスを同時に提供できることを実証した。

2）の研究では、EV（電気自動車）の特徴を生かした ITS サービスの提供を狙いとして、3.5 世代広域携帯網、路車間通信 DSRC、車載ネットワークを統合したネットワークの構築を提案するとともに、それに適した通信プロトコルの開発を行った。これにより、情報センタおよび路側無線装置から車載器を介して車両データの読み出しや車両の遠隔操作が可能となり、例えば、EV のバッテリ残量を連続的に収集して車両内に情報提供することや、充電ステーションでの最適な充電スケジューリング等に利用できることを明らかにした。

3）の研究では、車両内からのインターネット利用について検討し、カーナビゲーションからインターネット経由で情報を登録し、実際のサービス窓口でサービスの提供を受ける、IP 通信と非 IP 通信を連携するシステムを提案、構築した。ドライブスルー実店舗で実証実験を行い、車両が注文窓口に来てから注文確定と支払が完了するまでの処理時間が現行より 50% 削減され、利用者の待ち時間が短縮できることを実証した。

4）の研究では、路車間通信と IC カードアクセスの連携技術について検討し、DSRC 通信エリア内でのみカードアクセス処理ができる、DSRC と非接触式 IC カードを連携する通信プロトコルを提案した。DSRC と非接触式 IC カードをベースとした道路課金システムにより、複数の高セキュリティ非接触式 IC カードに対応して、車速 80km/h で料金収受をセキュアに完了することを実証した。

以上要するに本論文は、ITS サービスのいくつかの事例を取り上げ、最新の情報通信技術を駆使したそれらの高度化に関する研究成果を取りまとめたものである。

熊　谷　　崇　（高橋教授）

「移動通信網における位置情報管理技術を用いた通信・放送の高品質化」
平成 25 年 3 月 25 日授与

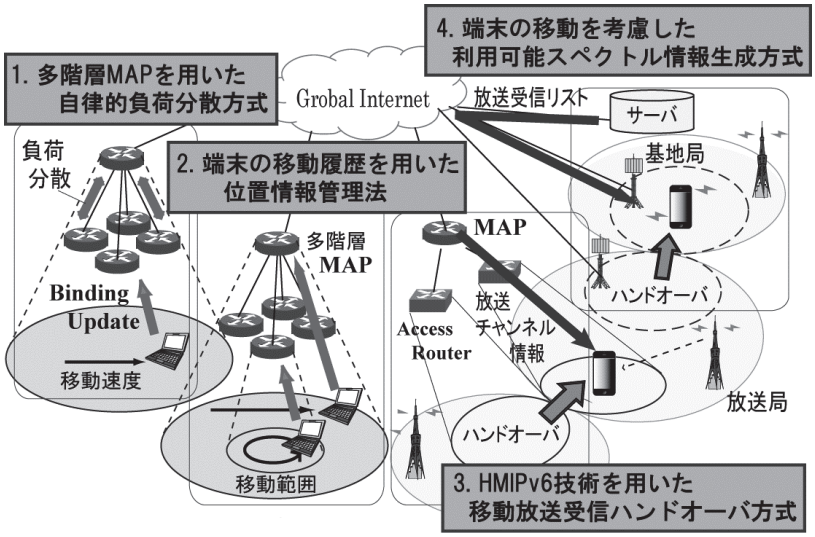
携帯電話網の LTE や WiMAX などの普及により、移動通信網の利用人口は年々増加している。この移動通信の実現には、ネットワーク側が端末位置を常に把握して通信を確立する、位置情報管理技術が必要不可欠である。本論文は、移動通信網の位置情報管理技術に着目し、“性能改善”並びに“応用”という二つの観点で、移動通信および放送受信の高品質化について研究し、まとめたものである。

1. 位置情報管理技術の性能改善

IP ベースの位置情報管理技術である Hierarchical Mobile IPv6（HMIPv6）は、ローカルドメインで端末位置情報を管理する Mobility Anchor Point（MAP）への負荷集中や、ホームネットワークで端末の担当 MAP 情報を管理する Home Agent（HA）への位置登録に起因するバースト的なパケットロスなどの課題がある。そこで、多階層 MAP を用いた二方式を提案する。“多階層 MAP における自律的負荷分散方式”は、端末の移動モデルに依存せず、MAP の負荷分散を実現する。また、端末の担当 MAP 割り当てに移動速度を考慮することで、HA への位置登録 Binding Update（BU）数を削減する。次に、“端末の移動履歴を用いた位置情報管理法”は、Access Router が端末の移動履歴を用い、移動範囲に基づいた適切な MAP を選択する。MAP の変更回数を最低限に抑え、HA への BU 数および制御トラヒック量を削減する。

2. 位置情報管理技術の応用

本論文では、“地上デジタル放送”並びに“コグニティブ無線”への応用による、各技術の高品質化について議論する。まず、地上波放送の移動受信では、放送局間ハンドオーバの度にチャンネルスキャンが伴うなど、移動中の継続視聴に課題がある。提案する“HMIPv6 技術を用いた移動放送受信ハンドオーバ方式”では、MAP がドメイン内の放送チャンネル情報を集約し、通信ハンドオーバ時に端末へ通知する。放送局間ハンドオーバを行う端末は、通知された情報を用いて選局し、速やかに視聴を再開できる。次に、コグニティブ無線における放送用周波数共用では、既存の放送受信設備に混信を与えないことが前提となる。本論文で提案する“端末の移動を考慮した利用可能スペクトル情報生成方式”は、携帯電話網の基地局 ID を用い、サーバに蓄積される放送波検知情報を基地局単位に集約し、セル内の放送受信可能チャンネルを記載した放送受信リストを生成する。各端末は、基地局間ハンドオーバ時に基地局 ID を基に該当セルのリストを取得し、センシングを行う。この方式は、放送受信設備に対する混信を軽減し、移動通信の通信容量を増大できる。また、セル内移動中の周波数共用を可能とし、移動通信の利便性向上が期待される。



図．博士論文の概要

西　尾　理　志　（高橋教授）
「Cooperative Resource Sharing toward Mobile Cloud」
（モバイルクラウドに向けた資源協調利用の検討）
平成 25 年 3 月 25 日授与

近年のモバイル端末の普及は目覚ましく、モバイルアプリケーションを通して様々なサービスが提供されている。一方、モバイル端末の計算資源や帯域などの通信資源は限られており、サービスや通信品質の制約となっている。本論文は、図 1,2 に示すモバイルクラウドの実現に不可欠なノード間資源協調利用機構を研究対象とし、以下の 3 点についてまとめている。

1. 無線 LAN における通信帯域協調利用機構

無線 LAN を対象とし、端末から基地局へ向かう上り通信、および、基地局から端末へ向かう下り通信のそれぞれに対し、帯域協調利用機構を提案している。上り通信では、端末側の MAC 層プロトコルにおいて、無線 LAN 標準規格の制御機能を拡張することで、任意の量の帯域を端末間で融通するメカニズムを実現している。一方、下り通信では、TCP（transmission control protocol）の輻輳ウィンドウを制御することで、特定の端末間で通信帯域を提供し合う方式を提案している。両方式とも、無線 LAN 基地局に変更を加えることなく実現可能である。計算機シミュレーションにより、他の端末の通信スループットを低下させることなく、端末間で柔軟にスループットを融通できることを確認している。

2. モバイルノード間での異種資源協調利用機構

モバイルノードの持つ、計算資源、通信資源、ストレージ資源、センサー情報資源などの様々な資源を共有するメカニズムについて検討している。通信や計算タスクの処理によるサービス享受までの待ち時間に基づき、次元の異なる各種の資源共有に対する効用を統一的に評価している。また、地理的距離と資源共有の効用のトレードオフをモデル化し、協調のインセンティブを考慮した最適化問題を設計することで、最適な資源共有メカニズムを導いている。

3. 資源利用予測のための社会的コンテキスト変化検出

人と人との関係のみならず、場所、趣味、イベントなどのあらゆる社会的オブジェクト間の社会的・地理的関係性を用いることで、効率的な資源の利用が可能となる。本論文では、特に社会的コンテキストの変化を検出する手法を提案している。提案手法では、社会的オブジェクト間の社会的関係性および地理的関係性をグラフにより表現する。グラフの変化から、コンテキスト変化を検知し資源の割り当て制御を行う。提案しているコンテキスト変化検出手法は、事前に参照モデルを構築することなく、あらゆる種類の社会的オブジェクトを一元的
に取り扱うことができる。

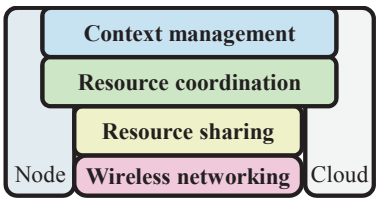


図１：モバイルクラウドレイヤモデル

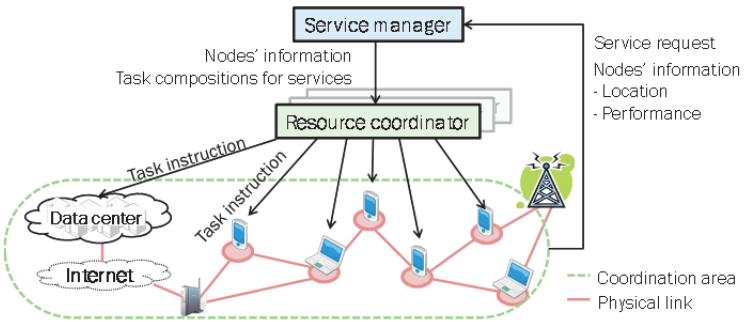


図２：モバイルクラウドシステムモデル

李　　炫　庸　（水内教授）

「Study on Effect of Magnetic Field Configuration on Parallel Plasma Flow during Neutral Beam Injection in Heliotron J」
（ヘリオトロン J における中性粒子ビーム入射加熱プラズマ中の平行プラズマ流に及ぼす閉じ込め磁場配位の影響に関する研究）
平成 25 年 3 月 25 日授与

近年、新たな一次エネルギー源の一つとして核融合エネルギーの研究が活発になされている。プラズマ流は核融合プラズマの電磁流体力学的な安定性及び性能向上に重要な役割をするため、プラズマ流の決定機構について様々な研究がなされてきた。本研究では、閉じ込め磁場配位と平行プラズマ流の関連性に関する知見が不足しているステラレーター／ヘリオトロン磁場配位において、3 次元磁場構造を持つ閉じ込め磁場配位が平行プラズマ流に及ぼす影響を実験的に調べた。

本研究では、ヘリオトロン J における平行プラズマ流計測のために荷電交換再結合分光計測（CXRS）システムを開発した。このシステムはプラズマ全領域を計測できるように視線を設けた。また、中性粒子ビーム（NB）を用いることで局所計測も可能とし、検出器として CCD カメラを用いることで時間分解能は 10ms 以下にした。同じ磁気面において、複数視線を用いた計測と中性粒子分析器の計測結果との比較を行うことで、平行プラズマ流及びイオン温度計測の妥当性を示した。

非軸対称性の異なる 3 つの磁場配位（High, Standard and Reversed mirror）の中性粒子ビーム入射加熱プラズマにおいて平行プラズマ流の計測を行った。非軸対称性の大きい High mirror 配位で計測された平行プラズマ流速は他の 2 つの配位より約 2-3 倍小さかった。その原因を調べるために、NB による駆動力及び減速力を調べた。図 1 に示すように駆動力を変化させた実験より、各磁場配位間の駆動力の差は少なく、平行プラズマ流速の差は減速力が起因することが示唆された。中性粒子ビームによる駆動力は FIT コードに用いて求めた。また、減速力のソースを調べるために K.C. Shaing の解析モデルを用いて参考粘性を計算し、計測した平行プラズマ流速から求めた実験的な粘性と桁比較を行った。参考粘性と実験的な粘性は同様な傾向を示したことから、新古典粘性が 3 つの磁場配位における平行プラズマ流の差に寄与していることが示唆された。

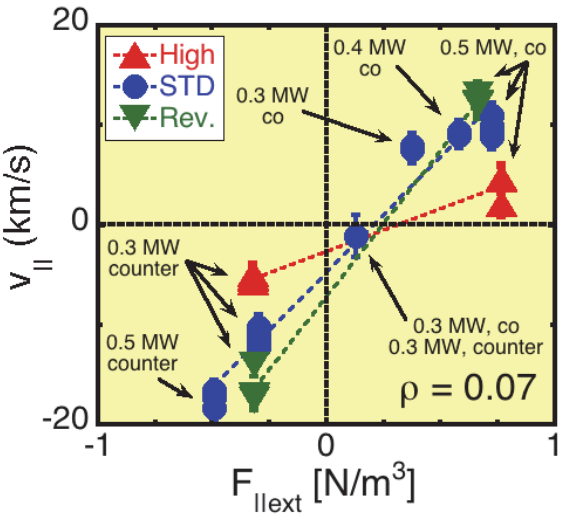


図 1. 駆動力スキャン実験の結果

以上の結果は、3 次元磁場構造を持つステラレーター／ヘリオトロン磁場配位におけるプラズマ流の決定機構を理解する上で、重要な役割を果たすものである。今後、詳細な新古典粘性の計算を行うことで、実験結果との定量比較や減速力の詳細なソースなどの知見が得られることが期待できる。

顔　　偉　達　（下田教授）

「A Study on Augmented Reality for Supporting Decommissioning Work of Nuclear Power Plants」
（原子力発電プラントの解体作業支援のための拡張現実感に関する研究）

平成 25 年 5 月 23 日授与

原子力発電プラントは放射性物質を取り扱うことから、十分に安全への対策を講じた上で解体される必要がある。そこで、解体作業時に必要な確認作業を支援する方法の一つとして、拡張現実感技術を利用する方法が考えられる。

拡張現実感技術とは、カメラで捉えた現実世界の映像にコンピュータで生成した情報を重畳表示する技術であり、直感的に理解しやすい形でユーザに情報提示を行うことができる。拡張現実感を実現するためには、作業員の位置と向いている方向を正確かつリアルタイムで計測するトラッキング技術が必要になるが、本研究ではマーカと呼ばれる人工的に作成した特殊な模様を手がかりにトラッキングを実現するマーカトラッキングという方法を応用し、原子力プラントのような広範囲で複雑な環境でも利用可能な新しい円形マーカを設計した。このようなマーカを原子力プラント内で利用するためには、多数のマーカを環境に貼り付け、事前にその 3 次元位置を計測する必要があるが、レーザーレンジファインダ、ビデオカメラ、電動雲台等を組み合わせて、これを自動的に計測するシステムも同時に開発した。

しかし、原子力プラント構内には、狭隘なところや高いところでマーカの貼付と計測が難しい場所もある。そこで、マーカトラッキングだけではなく、マーカを用いないトラッキング技術の開発も進めた。ここでは、カメラで撮影した環境映像から直線を検出し、事前にデータベースに登録している特徴線に対応させることで、カメラの 3 次元位置と方向を計算する特徴線トラッキング方法を実現した。

さらに、解体作業を支援するための拡張現実感の有用性を評価するため、上記のトラッキング技術を利用したプラント解体計画支援システムを開発した。このシステムは、二つのサブシステム構成されている。一つはモデリングサブシステムであり、解体作業計画時に現在の作業環境の 3 次元形状を自動的に計測し、そのデータを用いて作業シミュレーションに必要な作業環境および解体機器の形状モデルを作成するものである。一方、作業検証サブシステムは、得られた形状モデルを用いて、狭隘な作業環境と解体機器の接触を確認しながら解体・運搬作業をシミュレーションし、拡張現実感技術を利用してその様子を作業現場で可視化することができる。本研究により得られた知見は、今後の解体シミュレーションやその可視化技術など、解体作業支援システムを開発していく際の設計指針の一つになると考えられる。

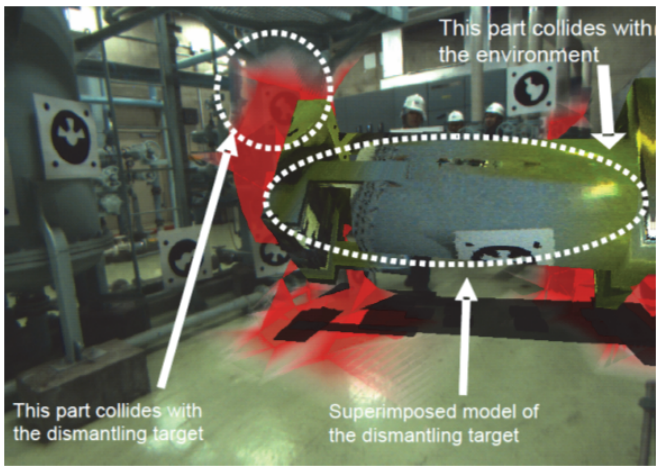


図 1：解体支援シミュレーション

児　島　貴　徳　（野田教授）

「光学顕微イメージングを用いた単一量子ドット・フォトニック結晶ナノ構造結合系の作製および基礎特性評価」

平成 25 年 7 月 23 日授与

半導体量子ドット（QD）と微小光共振器の結合系は、固体中における共振器量子電磁力学（CQED）のプラットフォームとして注目を集めている。CQED に特有の種々の現象は、量子情報処理素子や高効率単一光子光源、無閾値レーザなど様々な新しい応用が期待される。フォトニック結晶と QD を組み合わせる研究は、QD として InAs/GaAs 自己形成 QD、フォトニック結晶として GaAs2 次元スラブフォトニック結晶を用いて行われてきたが、自己形成 QD の形成位置がランダムであることから、フォトニック結晶構造と QD の相対位置を制御することはできなかった。また、フォトニック結晶構造中の所望の位置に QD が必ず含まれるように比較的高密度な QD が用いられており、所望の位置にも、意図しない位置にも多数の QD が存在する状況で種々の実験的検討がなされてきた。しかし、上述のような応用への展開を考えると、フォトニック結晶構造中の所望の位置にのみ単一の QD を配置することが必須であり、これまで用いられてきた多数の QD が存在する環境は理想的ではなかった。

このため本論文では、単一の QD がフォトニック結晶ナノ構造、特にナノ共振器の内部に存在している系の実現と、その基礎特性の評価を行った。極低密度 QD のフォトルミネッセンスを直接イメージングすることでその位置および波長を特定し、それに合わせたフォトニック結晶構造を作製することで、単一 QD をフォトニック結晶構造中の所望の位置に配置し（図 1）、CQED に特有な現象の一つである、単一 QD-フォトニック結晶ナノ共振器間の強結合状態の創出に成功した（図 2）。

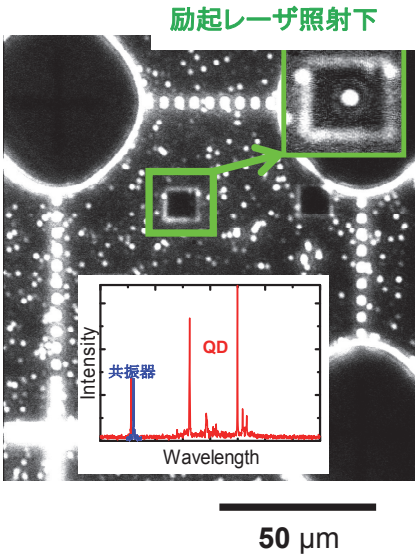


図 1: 位置合わせ QD・ナノ共振器の光学顕微鏡像。挿入図はそのフォトルミネッセンススペクトル。

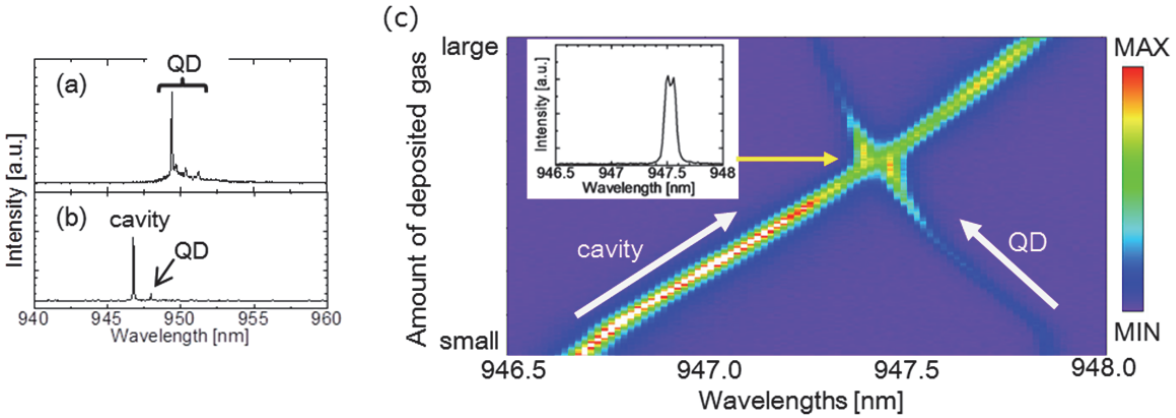
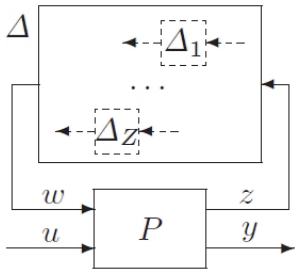


図 2: フォトニック結晶加工前 (a) と後 (b) の QD の低温フォトルミネッセンス (PL) スペクトル。946.8 nm 付近のピークが共振モードである。(c) 共振器・QD 間の波長差を変えながら測定した PL スペクトルのカラープロット。波長差の制御は共振器へのガス堆積を用いた屈折率変化による。波長差が 0 になるときにスペクトルの反交差が生じており、この共振器と QD が強結合状態にあることを示している。スペクトル分裂幅は 67 pm であった。

細　江　陽　平　（萩原教授）
「Discrete-Time Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Robustness Analysis and Controller Synthesis」
（ロバスト性解析と制御器設計のための離散時間非因果的周期時変スケーリング）
平成 25 年 9 月 24 日授与

現実の制御対象の制御理論に基づく制御においては、その対象を伝達関数や状態方程式でまずモデル化するのが一般的である。しかし、現実の対象は、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、不可能である。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もよいよう不確かさを想定し（右図参照）、その取り扱いのもとで制御器を設計（あるいは制御系を解析）することが制御の実応用上重要になる。本研究は、上記不確かさに対処するためのアプローチの一つであるロバスト制御理論に関するものである。ロバスト制御理論は鉄鋼業や化学プラントにおける各種プロセス、人工衛星の姿勢制御やハードディスクのヘッド位置制御等、応用先は極めて広範である。



図：不確かさ Δ を含む制御対象のモデル

本研究ではまず、ロバスト性の中でももっとも基本的な性質であるロバスト安定性の解析において有効であることが示されている静的非因果的周期時変スケーリングという手法を、ロバスト制御器設計へ応用することを検討した。ただし、制御器設計においてロバスト安定性のみを考慮すると、制御系の応答が現実には許容できないほど振動的になってしまう恐れがある。そこで、本研究ではそのような振動の抑制を目的とし、ロバスト安定性だけでなくロバスト H ∞性能も同時に考慮するような制御器設計法を整備した。整備した設計法の有効性は、静的非因果的周期時変スケーリングが理論的に有する特徴を踏まえつつ、数値例を通して検証した。また、振子長が可変である台車型倒立振子に対して振子長に依らない単一の制御器を設計して実験を行うことにより、その設計法が実用上も効果を発揮することを確かめた。

また本研究では、非因果的周期時変スケーリングの特徴を明らかにするためのより理論的な課題も遂行した。非因果的周期時変スケーリング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る。本研究では、リフティングのタイミングという視点を新たに導入し、それに関するシフト不変性という概念をさらに導入した。そして、因果的時不変スケーリングとして特徴づけられる従来手法はシフト不変性を有するのに対して、非因果的周期時変スケーリングは一般にシフト不変性を持たないことを示した。また、シフト不変性を持たない後者のスケーリングからシフト不変性を持つスケーリングを自然に導くシフト不変化という操作を考えるとき、非因果的周期時変スケーリングをシフト不変化して得られるスケーリングは、従来の枠組の中に収まるあるクラスの動的なスケーリングと等価になると同時に、それがもとの非因果的周期時変スケーリングのロバスト安定解析における精度に関する能力の一つの限界を与えることを示した。

また、本研究では非因果的周期時変スケーリングの特徴をさらに、上記の議論とは異なる観点から明らかにした。具体的には、ロバスト安定解析の対象となる系を無限行列で表現する枠組を考え、リフティングを介す非因果的周期時変スケーリングと介さない従来の因果的時不変スケーリングとの間に成り立つ関係を、その枠組のもとで明らかにした。上記 2 つのスケーリング手法は、それぞれ異なる時間軸上で定義されているため、それら相互の関係を直接的に考察することがこれまで容易でなかった。しかし、それら 2 つのスケーリング手法はいずれも無限行列表現に基づく統一的枠組で解釈することが可能であり、そのような視点を通して 2 つのスケーリング手法を比較することが可能である。得られた成果は数値例によりその妥当性を検証した。以上を通して、非因果的周期時変スケーリングに基づくロバスト制御に関する理論基盤を包括的に整備した。

山　口　辰　久　（松山教授）
「3D Video Capture of a Moving Object in a Wide Area Using Active Cameras」
（能動カメラ群を用いた広域移動対象の３次元ビデオ撮影）
平成 25 年 9 月 24 日授与

３次元ビデオは､3D テレビのように飛び出して見える立体映像や､CG による仮想的な 3D アニメーションではなく、運動する対象のありのままの姿・動きを（裏側も含め）完全な３次元映像として記録したものである。３次元ビデオを撮影するには、対象を多数の異なった視点から同時かつ高精細に（2D）ビデオ撮影する必要があり、従来の固定カメラを用いたシステムでは広範囲を移動する対象を撮影することは困難であった。本研究は、広域移動対象の３次元ビデオ撮影を実現するための方法として、多数の能動カメラが互いに協調しながら対象をリアルタイムに追跡撮影するという方式を提案し、そのための分散協調型カメラ制御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) ３次元ビデオ撮影に用いられる多視点ビデオ映像が満たすべき要件が、(1) 対象表面を全ての方向からくまなく撮影していること、(2) 対象表面を十分な解像度で撮影していること、(3) ビデオ撮影に用いる各カメラのパラメータが正確に得られること、の３点であることを明らかにした。

(2) 従来困難であった広域移動対象の３次元ビデオ撮影法として、多数の能動カメラ群を分散協調的に制御するという考え方を採用し、それを実現するための具体的アイデアとして、移動可能空間のセル分割、セルに基づいた能動カメラ群の分散協調型対象追跡撮影アルゴリズム（図 1）を考案し、これによって上記３次元ビデオ撮影の３要件を全て満たすことができることを示した。

(3) セル方式に基づいた具体的な追跡撮影法として、①移動可能空間を六角形セルに分割、②セル集合およびカメラ群をそれぞれ３つのグループに分割、③対象が存在するセルとその最近傍の２セルを常に３つのカメラグループが撮影するようにカメラ群をリアルタイム制御する、というアルゴリズムを考案し、実際のスタジオでの実験により、提案アルゴリズムによって３次元ビデオ撮影に求められる３要件を満たしつつ、自由に移動する対象の追跡撮影が可能であることを実証した。また本アルゴリズムがフィギュアスケートリンクといった数十メートル規模の範囲を高速に移動する対象にも適用可能であることを示すため、能動カメラ群の特性・配置が与えられた際のセルサイズ設計法を解析的に導き、その妥当性をシミュレーションによって示した。

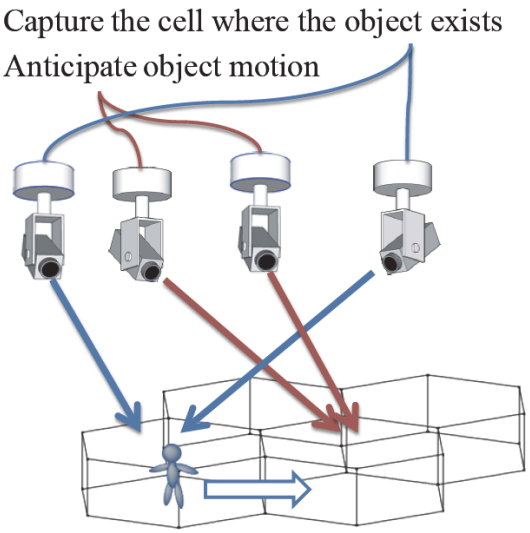


図１：セルに基づいた能動カメラ群の分散協調型対象追跡撮影アルゴリズム

藤　原　亮　介　（山川教授）
「Study on Accurate Ranging and Positioning System with UWB-IR Technology」
（UWB-IR を用いた高精度測距・測位システムの開発）
平成 25 年 3 月 25 日授与

本論文は、ウルトラワイドバンド・インパルスラジオ（UWB － IR）方式を用いたセンサネット向けの測位システムに関して新しい測位方式と無線通信方式・送受信機アーキテクチャを考案し、その開発と評価を論じた結果をまとめたものであって、7 章からなっている。本論文は、測位機能を有した UWB － IR 送受信機とそれを利用した測位システムについて、センサネットに適応できるシステム構築を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 従来の測位方式では、基地局間あるいは基地局・ノード間でナノ秒オーダーの高精度な同期が必要であるか、あるいは通信回数や基地局を増やして同期を不要にする必要があったが、同期が不要でかつ通信回数、基地局数を余分に必要としない TOA ／ TDOA（Time of Arrival ／ Time Difference of Arrival）ハイブリッド方式を考案した。

2. CMOS プロセスで実装可能でありかつ低消費電力な受信機構成を可能にする低パルス繰り返し周波数、2 段階直接拡散方式及び差動符号化を行う通信方式を考案した。

3. 低消費電力かつ低コストで実装可能な受信機構成を考案した。特にパルス繰り返し周波数サンプリングとシリアルサーチとマッチトフィルタを併用した高速同期捕捉及び同期保持手法を考案した。

4. 上記受信機構成を利用し、簡易な構成かつ波形推定のためにメモリ量を多く必要としない第一パス到来信号時間計測手法を考案した。

5. 考案した送受信機を CMOS プロセスで 1 チップ化し、トランシーバモジュールを開発した。それらを用いて測距システム及び測位システムを実際に構築し、実測により評価を行うことにより考案する測位システムの実証を行った。

以上より、本論文は、これまで困難であった CMOS プロセスによる測位システム向けの UWB － IR 送受信機トランシーバの開発とセンサネット向けに実用性の高い測位システム方式の考案を行っている。

高校生のページ

集積回路の長期信頼性向上に向けて

情報学研究科　通信情報システム専攻　集積システム工学講座　情報回路方式分野
佐　藤　高　史

1. はじめに

我々に身の回りには、集積回路を使用している製品が数多く有ります。ディジタルカメラ、携帯電話、パーソナルコンピュータのような情報機器や、テレビ、ビデオ等の家電製品はその代表的なものとして挙げられます。一見して集積回路とは縁がないかのような製品にも、集積回路は多数使われるようになっています。例えば、炊飯器の多くは、ご飯を美味しく炊くためにマイクロコントローラと呼ばれる集積回路を用いて温度や時間の調整等を行なっています。自動車や医療計測機器には極めて多くの半導体が使われていますし、金融や運輸等の社会インフラも計算機なしで構成することはもはや困難となっています。現代の社会システムは、全て集積回路に支えられていると言って過言ではないでしょう。

こうした応用の広がりとともに、集積回路の信頼性保証技術の重要性が増してきています。社会において不可欠なものとなったことにより、故障等によって動作を止めることが許されにくくなってきています。旅先でデジカメが突然壊れ、旅行中の写真を撮ることができなくなれば、非常に残念に思うことでしょう。自動車のエアバッグ制御やブレーキ制御に使われている集積回路がいつの間にか壊れていて、いざという時に機能を果たせないことがあれば命にかかわります。他にも、医療機器や社会インフラ等の応用では、高い信頼性を長期間維持することが求められます。集積回路とそれを用いるシステムが長期間故障せずに動作すること、および故障による寿命を予測･検出できる適切な設計を行うことが、様々なところで求められ始めています。

2. トランジスタの微細化とその影響

2.1　スケーリング

1940 年代後半にバーディーン、ブラッテン、ショックレーらがトランジスタを発明し、1958 年に最初の集積回路が作成されて以来、集積回路の製造技術は目ざましく発展してきました。集積回路とは、複数のトランジスタを、ひとつの半導体チップ上に同時に形成し相互に接続して作成した回路のことです。トランジスタの寸法を縮小（スケーリング）すれば、同じ面積のチップにこれまでよりも多くのトランジスタを搭載できるようになります。多数のトランジスタを組み合わせることで、これまでは実現が困難であった複雑な処理をハードウェア回路により作成し、より高機能な製品を実現することができます。また、トランジスタの寸法を縮小することで、トランジスタ 1 個あたりが消費する電力と遅延時間を小さくする効果も得られます。トランジスタのスケーリングは、まさに良いことずくめです。このため、加工寸法を小さくする努力が今も継続的に続けられてきています。その成果として、例えば今日使っている携帯電話の計算と通信の能力は、かつての大型計算機にも匹敵するようになっています。多様な機能の実現と応用範囲の拡大は、主にトランジスタのスケーリングのおかげと考えることができます。

「一つのチップに搭載されるトランジスタ数が、1.5 年から 2 年で 2 倍になる（加工寸法で $1=\sqrt{2}$ 倍になる）」という洞察を最初に発表した人の名をとって、集積回路のスケーリングはムーアの法則と呼ばれています。ムーアの法則が見出された頃の最小加工寸法は数マイクロメートル程度だったのですが、

現在では、その 1/100 以下である 14 ナノメートル（0.014 マイクロメートル）程度にまで縮小されています。

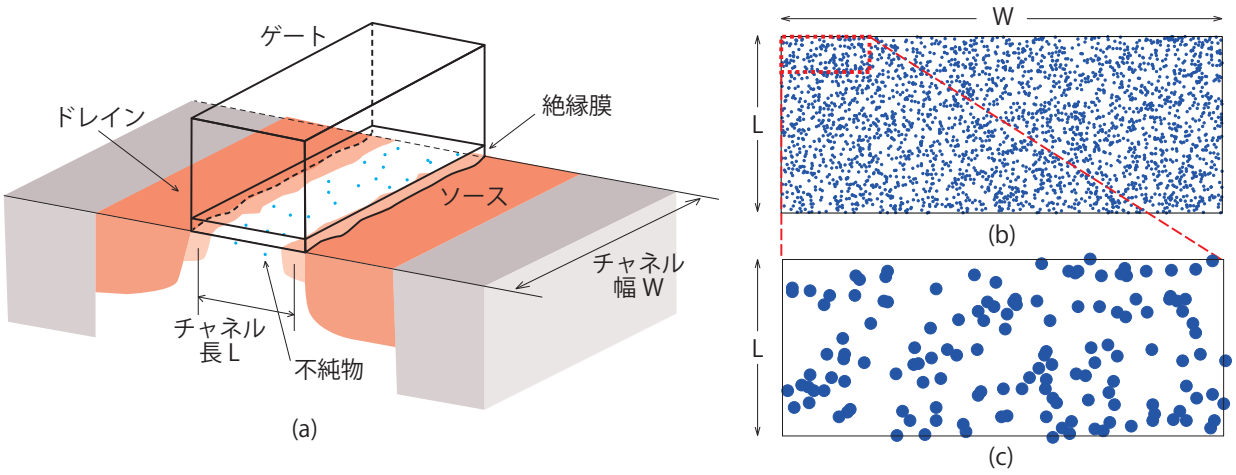


図 1：MOS トランジスタの構造と不純物ばらつきの概念図。(a) MOS トランジスタの構造、(b) トランジスタチャネルの不純物分布の例、(c) 微細化されたトランジスタにおける不純物分布の例（(b) に対して 1/5）。不純物イオンの数と配置が異なるため、特性ばらつきが大きくなる。

2.2　スケーリングの影響 : ばらつき

スケーリングにより新たな応用が活発に切り開かれている一方で、極限までのスケーリングの副作用もあらわれ始めています。なかでも、しきい値ばらつきは最も重要な課題の一つです。

現代の集積回路の代表的な構成部品である金属－酸化物－半導体トランジスタ（MOS トランジスタ）の構造を図 1（a）に示します。トランジスタは、ゲート、ソース、およびドレインの 3 端子からなり、ゲート電極に与える電圧により、ソース－ドレイン電極間に流れる電流を入り切りするスイッチ回路として動作します。しきい値電圧を超えるゲート電圧を与えるとゲート電極下のチャネル領域に反転電荷が集められてソース－ドレイン間が導通し、しきい値以下である場合にはソース－ドレイン間は絶縁状態となります。すなわち、ゲート電極の電圧が「しきい値」を超えているか否かで、スイッチのオンとオフが決まります。

しきい値は、チャネル領域に存在する不純物の濃度で決定されます。不純物は、トランジスタを作成する過程で電界加速した不純物をシリコン基板に打ち込むことにより形成されますが、これらの数および位置を一つ一つ制御することは出来ません。ここで、スケーリングによりトランジスタが極めて小さくなると、困ったことが起こります。完全に同じ寸法で設計し製造したトランジスタであっても、ゲート下にある不純物の数と位置がランダムであり、またその数が少なくなることによって、トランジスタ毎にしきい値が異なることになります。図 1（b）（c）には、チャネル中の不純物の配置を模式的に示しています。（b）のようにトランジスタ寸法が大きい場合には、不純物の密度はチャネル内で概ね均一であり、結果としてどのトランジスタもほぼ同じしきい値になります。一方、（c）のようにトランジスタの寸法が縮小されると、不純物密度が一定とはみなしにくくなります。ランダムに配置される不純物数およびその配置の相違が、しきい値に大きな影響を与えることになります。結果として、微細なトランジスタほどしきい値のばらつきが大きくなります。チップ内に多数形成されるトランジスタは、たとえ全く同じ寸法で作成し、すぐ隣に配置されていても、しきい値が異なることになります。しきい値の

高低は、回路の遅延時間の大小と直接関係します。しきい値が著しく高いトランジスタが論理経路上に形成されると遅延時間が大きくなり、結果として目標の遅延時間を満たせない（目標クロック周波数を達成できない）チップが出来上がります。または、複数の回路間の遅延時間の差により、意図した機能を果たせなくなります。最先端のトランジスタを用いる回路設計では、こうしたばらつきによる特性の相違をあらかじめモデル化して、ばらつきがあっても回路が確実に動作するような設計を行う工夫がなされています。

2.3　スケーリングの影響 : 経年劣化

近年はさらに、ばらつきに加えて、トランジスタの経年劣化の影響が懸念されています。化学的に安定なシリコン基板の上に回路を形成することから、適切な電圧環境下で使用する限りでは、トランジスタは丈夫で信頼性が高いことが知られています。しかし、すべてのものには寿命があり、集積回路も例外ではありません。集積回路における代表的な故障として、絶縁膜経時破壊（TDDB: Time Dependent Dielectric Breakdown）、エレクトロ・マイグレーション（EM: Electro Migration）、バイアス温度依存性（BTI: Bias Temperature Instability）等があります。TDDB は、スケーリングによって極めて薄くなったゲート絶縁膜にかかる 4 ～ 5MV/cm 以上の高いゲート電界により、絶縁膜に電流を運ぶキャリアを捕獲するトラップが形成されることで、ゲート電極からシリコン基板の電流短絡経路が生じる現象です。エレクトロマイグレーションとは、金属配線に流れる電流が配線を構成している原子に衝突し移動させて、配線の空乏化による断線等の故障を引き起こす現象です。

BTI は、微細なトランジスタを用いる集積回路の性能と中長期信頼性を決定する主要因になると考えられている重要な現象です。pMOS トランジスタでは、ゲート電極に負電圧を印加することでしきい値電圧が時間とともに上昇し、負電圧を除くとしきい値電圧が回復する NBTI（Negative BTI）現象が広く観測されています。nMOS トランジスタでも、高誘電率絶縁膜や金属ゲート電極等、新材料の導入により正電圧による特性劣化（PBTI: Positive BTI）の影響が顕著となります。BTI のためにトランジスタのしきい値が高くなると、ある時から回路の動作が不可能となります。BTI による回路故障を防止するには、絶縁膜とシリコン基板の境界で起こる物理現象の把握、そのモデル化、およびモデルに基づいた回路レベルの性能変化の見積りとその回路的対策手法が必要となります。特に、BTI は劣化が部分的に回復する場合があることが他の故障要因と異なるの特徴です。劣化の最大の要因である電圧ストレスを取り除くことで、しきい値が回復することが知られています。このため、こうした性質を用いて、回路を長寿命化しようとする研究も数多く行われています。

3. トランジスタの経年劣化の測定とそのモデル化

しかし、こうしたトランジスタの経年劣化が、どのような機構により起こるのかは実はまだ良くわかっていません。このため世界中の大学と企業で、活発に研究がすすめられています。我々の研究室では、経年劣化が生じる物理的な機構を明らかとし、またこれをモデル化することで、集積回路の性能変化の見積りを可能とし、また、性能劣化の防止対策を可能とするための研究を行なっています。

しきい値の変動機構を調べるには、多数のトランジスタについて、しきい値の劣化を生じさせて詳細に観察を行う必要があります。トランジスタに高温・高バイアスを与えて劣化を加速させても、これには長時間を要します。このため、現在、複数のトランジスタに対して条件を揃えた、精度のよい測定は非常に困難となっています。この課題を解決して、劣化の物理現象を解明し特性変化の統計的モデルを作成するために、我々は専用のアレイ回路を考案しました（図 2）。この回路では、複数のトランジスタに並列に劣化または回復のバイアス電圧を加えながら、着目するトランジスタについて素早くしきい値

電圧測定を行うことのできる回路が搭載されています。この工夫により、これまでは加速条件下でも極めて長時間を要していた多数トランジスタの劣化現象の観測を大幅に効率化することが出来ました。例えば、従来の順次測定であれば 83 日間を要する 128 個のトランジスタの劣化測定を、約 15 時間に短縮することが出来ています。これにより、多数のトランジスタのしきい値の初期ばらつきと劣化速度ばらつきを正確に測定することが初めて可能となりました [1]。

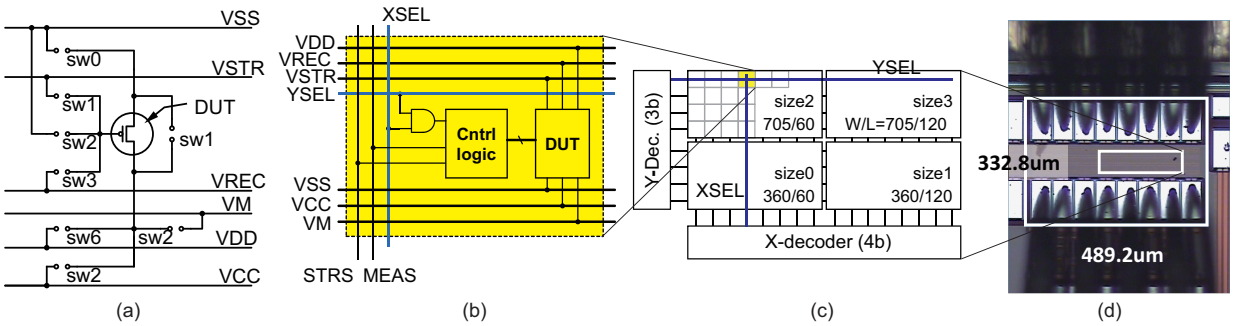


図 2：しきい値電圧経時変動測定のためのアレイ回路。外部プログラムにより、128 個のトランジスタに対して任意タイミングで並列に劣化・回復バイアスを与えられるよう構成している。(a) 測定トランジスタ（DUT）とバイアス電圧切り替えのためのスイッチ、(b)(c) チャネル面積の異なる 4 種類の DUT がアレイ状に配置されている。(d) アレイ回路の顕微鏡写真。

図 3 に我々のアレイ回路を用いて測定したしきい値電圧の時間変動の実例を、10 個のトランジスタについて示しています。はじめに約 5 時間 30 分の劣化バイアス電圧を与えた後、回復バイアスを与えています。劣化バイアスの印加期間中は、しきい値が急速に上昇しその後緩やかに劣化が進んでいます。チャネル面積の小さなトランジスタでは、劣化は単調ではなくトランジスタ毎に不規則であり、また劣化量もトランジスタごとに異なっていることが、本観測により明確に観測されました。その後、各トランジスタを回復バイアス条件とすると、やはりまずしきい値電圧の速い回復がまず起こり、その後緩やかなしきい値回復が生じることがわかります。回復バイアス下でのしきい値は離散的な電圧レベルを持っており、電圧間の遷移はランダムに起こっているように見えます。非単調なしきい値劣化の進展と回復バイアス時の階段状の回復から、我々は、トランジスタのソースドレイン間を走行するキャリアがトラップへ捕獲・放出される現象が、NBTI におけるしきい値変動の主要因であると推察しています。しきい値の劣化・回復速度はトランジスタ毎に異なっていますが、チャネル面積の大きなトランジスタではそのばらつきが小さいこともわかります。これは、キャリア一個の捕獲により引き起こされるしきい値変化が、チャネル面積で平均化されたことによると考えられます。また、劣化速度はデバイスごとに異なっているため、トランジスタの製造直後のしきい値のばらつきだけでなく、劣化・回復の速度についてもばらつきを考慮する必要があることが分かります。

こうした実験結果に基づいて、トランジスタのしきい値電圧の劣化と回復を表すモデル式を提案しています [2, 3]。トラップによりしきい値電圧の変化が生じるという仮定のもとで計算すると、しきい値変動は時間の対数関数の形で表されることがわかりました。シリコン酸化膜への水素イオンの拡散に基づく従来のモデル式は時間の指数関数で表されていますが、これと比較して実測とよく一致し、また長期間の劣化を予測精度を高めることが出来ています。

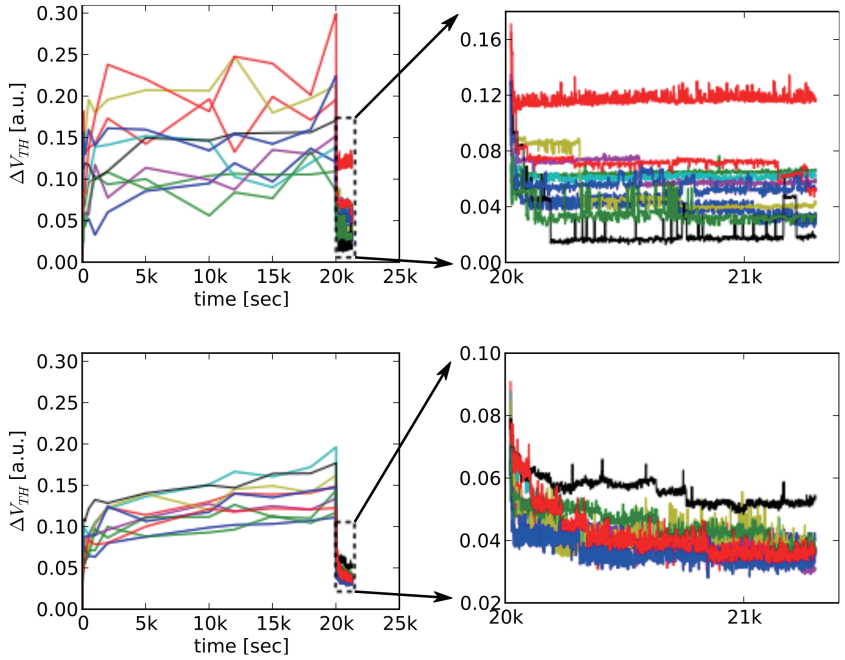


図 3：BTIarray によるしきい値電圧の時間的変化測定結果の例（10 トランジスタ）。20,000 秒までは劣化バイアス、それ以後は回復バイアスを与えている。上段：チャネル長 L=60nm, チャネル幅 W=360nm, 下段：L=120nm, W=705nm

4. おわりに

集積回路の応用範囲は、今後ますます広がります。集積回路に期待される信頼性はアプリケーションにより異なりますが、高い信頼性が求められる機会が増えてきていることは間違いありません。コストを考慮しつつ、適切な信頼性を与える設計が必要になっています。トランジスタが誕生して 60 年以上が経ちましたが、原理のわかっていない現象はまだ数多くあります。これらを解明することで、集積回路がより高い性能を達成し、またはより高い信頼性を達成することが可能となります。正確な観測に基づくモデルにより長期信頼性を実現する「頼れる」集積回路設計が、強く期待されています。

参考文献

[1] T. Sato, T. Kozaki, T. Uezono, H. Tsutsui, and H. Ochi, “A device array for efficient bias temperature instability measurements,” in Proc. Europian Solid-State Device Conference, September 2011, pp. 143-146.

[2] J. B. Velamala, K. B. Sutaria, T. Sato, and Y. Cao, “Physics matters: statistical aging prediction under trapping/detrapping,” in Proc. ACM/IEEE Design Automation Conference, June 2012, pp.139-144.

[3] J. B. Velamala, K. B. Sutaria, H. Shimizu, H. Awano, T. Sato, G. Wirth, and Y. Cao, “Compact modeling of statistical BTI under trapping/detrapping,” IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 60, No. 11, November 2013, pp. 3645-3654.

学生の声

「博士課程短縮卒業への道」

工学研究科　電気工学専攻　山川研究室 博士後期課程２年　芦　田　康　将

博士課程に進学するか迷ったときどうしても意識してしまうのは卒業時の年齢で、多くの人は２７＋α歳となってしまいます。修士で就職する人と比べると収入や実社会での活躍といった点でどうしても進学という選択肢が見劣りしてしまいます。また、博士課程卒業後の進路についても何かと不透明で、ポスドクの受け入れ先の不足や３年毎の任期付きのポストばかりが増えていく現状は、最近でもよく耳にします。しかし、工学研究科　電気・電子工学専攻には、博士課程前後期連携プログラムが用意されています！私もこの連携プログラムに参加している学生です。博士課程への進学とともに院試や修論の免除といった特典もついてくるこの制度ですが、私が何より恩恵を受けたのが博士課程の短縮卒業が可能となったことです。もちろん連携プログラム以外の学生でも短縮卒業は可能ですが、４回生から密な研究の時間や学会参加の機会、投稿論文を見据えた研究計画を練ることができるため、当然短縮卒業の要件を満たすための研究成果をあげることもより容易になります。私の場合、修士で２本、博士で３本の論文を書き、現在（１１月執筆中)、１年２ヶ月の期間短縮を目指して博士論文の執筆を行なっていますし、研究室の先輩も半年の期間短縮で卒業されています。また、修士の段階ですでに投稿論文があったことは、日本学術振興会の特別研究員への採用や共同利用施設（京コンピュータ）への課題採択などで非常に有利に働き、より研究を加速させることが出来ました。一般企業への就職活動も行い、修士卒で２５、６歳の人も多い中、博士短縮卒業という肩書のアピール力には雲泥の差があることも実感しました。期間短縮で卒業してその後どうするのかという考え方は人それぞれだと思いますが、この５年間が非常に濃い時間となることは確かだと思います。

「急がば回れという基本」

工学研究科　電子工学専攻　木本研究室　博士後期課程３年　森　岡　直　也

私は、様々な実験装置を駆使して半導体デバイスや物性についての実験ベースの研究に従事してきた。研究活動を通じて学んだことは多いが、学術的側面の外で特に印象深いのは、「実験装置というものは、とにかくよく壊れる」ということである。しかし、実験装置はたいてい非常に精密な機器であり、さらに複雑な実験を実施しているのだから、壊れるのはある意味当然である。実験中に装置が壊れて不具合を感じると、原因を探り、修正して追試するという作業を幾度も繰り返すことになり、限られた研究時間が失われていく。私もこれに大いに悩まされた。

しかし、突発的な装置の不調もあれば、適切なメンテナンスを怠ったことによる不調もある。日頃から手入れをしっかりしていれば、と思わされたことも一度や二度ではない。大学の研究室では、装置の運用や保守は主な使用者である学生自身が担当するが、学生は限られた時間の中での短期的効率を重視するあまり、面倒な維持作業を怠り、長期的効率を軽視してしまいがちである。そのため、無理が重なって突然実験装置が深刻な不具合に見舞われ、研究が数か月間ストップするという事態も起こりうる。また、研究というものは十年、二十年と続いてゆくが、学生は数年単位で次々と入れ替わってゆく。この入れ替わりの間に、維持管理のノウハウを喪失している例もあった。これらのような事態を防ぐためには、学生一人一人が実験装置と真摯に向き合い、「急がば回れ」の意識を忘れずに研究に取り組むことが重要だと考える。結果、トータルとしての研究効率の改善だけでなく、維持管理作業を通じた実験装置に対する深い理解も期待できる。また、そのような意識を常に持つことは、曖昧な部分を焦って放置せずに丁寧に真実を見出すことにもつながり、研究者としての基本的態度を身に着ける上でも重要だろう。

教室通信

各種アンケートから見た電気電子工学科とその学生像

電気電子工学科長　小野寺　秀俊

電気電子工学科では、新入生に対して志望動機や電気電子工学分野への興味を問うアンケート（新入生アンケート）を実施しています。教員に対しても、修士課程修了時点での指導学生の学力や研究力などを問うアンケート（教員アンケート）を実施しています。また、修士課程を修了する在学生に対して、学部教育に対する満足度を調査し意見を求めるアンケート（卒業生アンケート）を実施しています。ここ数年のアンケート結果に基づいて、電気電子工学科における教育研究とその学生像をご紹介致します。

新入生アンケートによりますと、電気電子工学科の対象分野に興味があったことが志望理由に含まれる学生は、全体の約 80% です。この割合は高いようでもありますが、約 20% の学生は電気電子工学分野には興味を持っておりません。興味を持つ学生とともに、興味を持たずに入学した学生についても、電気電子工学分野の重要性や素晴らしさを早期に実感させ、本学科での勉学と研究に意欲を持って取り組めるカリキュラムや履修指導が重要だと考えています。なお、電気やエレクトロニクスについて興味を持ったきっかけも聞いていますが、多くの諸君がパソコンや携帯などをその理由に挙げています。筆者の学生時代には、いわゆる「ラジオ少年」が多数いたように記憶していますが、自分でハードウェアを組んだ経験のある学生は非常に少なくなっています。そのため、学生実験など、実際の「物」を扱う課題を重視したカリキュラムを編成しています。

このようにして入学してきた学生諸君は、その約 90% が学部卒業後に大学院に進学します。博士後期課程まで進学する人は、学部入学者の約 15% です。したがって、学部入学者の多くは修士課程を修了して卒業します。修士課程修了者に対する教員アンケートでは、指導学生の各種のパフォーマンスを尋ねています。その結果、基礎学力や専門的基礎知識の評価は高く、研究力については研究意欲や自主・主体性、粘り強さなどが高く評価されています。一方、語学力や研究活動における計画性などの評価は、それらと比べると低めになっています。学部ならびに修士課程において、世界第一線の研究活動に携わってきたことが、高い研究意欲の源泉となっていると推察します。

次に、卒業生アンケートの結果についてご紹介します。学科で受けた教育全体の満足度を尋ねた質問に対しては、約 70% の学生が「大変満足している」もしくは「満足している」と答えています。この割合は、毎年ほとんど同じです。学部教育で良かったと思うところについては、約半数の学生が学生実験と回答しています。その理由は、「電気電子工学の様々な分野の経験ができた」「レポートの書き方や実験手順など、電気電子工学分野の素養が身についた」といったもので、教員側が意図した通りの教育効果を学生自身も実感しています。学生実験に次いで多い理由には、幅広い分野の教育を受けることが出来たことが挙がっています。学部教育については、電気電子工学分野に共通のコアとなる基本的項目を精選して教育するというポリシーに基づき、カリキュラム改革を行ってきました。電気電子の基礎を幅広く学ぶ事の重要性が、修士修了時には理解されているようです。

学部教育については、学生や教員といった学内関係者による評価だけではなく、外部有識者による外部評価も 2012 年に実施致しました。その結果、教育内容、方法、成果などのほとんど全ての項目で最も高い評価を頂きました。教育効果の高い学生実験や、電気電子工学全般に必須の基礎科目を中心としたカリキュラム編成を行っている事がその理由として挙げられています。

このような学部教育体制は、教務委員会や企画・評価委員会をはじめとする電気電子工学科教員全員の努力の賜です。現在、運営予算の削減や教員数の減少により、特に学生実験の実施体制が厳しい状況に直面しています。教育内容や方法の改革により、教育効果を更に高めるための検討を進めています。教室に関係する皆様方には、引き続きより一層のご支援とご鞭撻をお願いいたします。

賛助会員の声

ロームにおけるメディカル製品の研究開発

ローム株式会社　メディカル・ヘルスケア研究開発ユニット　百　瀬　　俊

1. はじめに

私は2002年に京都大学工学研究科電子物性工学専攻を卒業し、ローム株式会社に入社しました。今回このような機会を頂き、学生時代を大変懐かしく思い出しながら原稿を書いています。ロームに入社してからの10年間はあっという間でしたが、企業で働き始めて初めて感じたことや、反省したことも多々あるので、在校生の方々にとって少しでも参考になればと思っています。また私自身、実際に世の中で使用される製品を開発することで得られた喜び、充実感が多々あるので、企業における研究開発の楽しさ・やりがいを伝えられたら幸いです。

2. ロームにおける研究開発の特徴

ローム株式会社は、LSIをはじめとする電子部品の開発、生産、販売を行っている会社です。売上規模は約3,000億円で、半導体業界の中では中堅に位置している会社です。社風はベンチャー精神盛んで、自分から積極的に行動すれば会社も応援してくれるとてもやりがいのある会社だと感じています。もちろん企業研究ですので、最終的に会社の売上・利益に繋がることが前提となりますが、1～2年先の製品化を目指す開発テーマから5年以上先を見据えた研究と言えるようなテーマもあります。また、研究開発から製造までが西大路五条の京都本社に集まっており、研究開発と製造の間の垣根があまりないことが特徴だと思います。研究開発を行いながら、製造部のメンバーに相談することで、製造を意識した製品開発が行えますし、自分が開発したテーマをそのまま製造まで担当することも可能です。研究開発テーマを実際に世の中に出すためには、研究開発と製造が一体感を持つことが大切だと思いますが、ロームのこのような環境を私はとても気に入っています。

また、ロームの研究開発のスタイルとして、すべてを自前で行うのではなく、大学をはじめとする様々な研究機関と共同研究をさせて頂くことが多いです。工学部では、最終的には世の中で役立つテーマを研究していると思います。一方、大学等で研究された新しいデバイスや材料を製品化するのは企業の役目だと思いますし、現在弊社は、大学ととてもいい関係を築けていると思います。

3. メディカル製品の研究開発

私が所属しているメディカル・ヘルスケア研究開発ユニットでは、血液検査を行うための小型検査装置（Banalyst、右図）の開発・製造を行っています。Banalystはバイオチップを利用することで、大病院にしかないような大型の自動分析装置と同じことを持ち運び可能な小型装置で行うことができます。ロームのバイオチップはμ-TAS（Micro-Total Analysis Systems）という技術を応用し、血球分離から計量、混合、光学測定までのすべてを数センチ程度の大きさのチップ内で行

うことができます。

ロームにおけるバイオチップの開発は私が入社したちょうど10年前からスタートしました。バイオチップでは0.3 μリットルという極微量の液体を1%の精度で正確に計量する必要があります。そこでロームが長年培ってきた微細加工技術が必要になると考え、この開発テーマがスタートしました。元々のスタートは半導体技術の応用でしたが、実際に開発を行っていくと、対象物は電子ではなく血液です。また製品は薬事法で規定されており、開発手順から製造まですべての活動に対して要求事項があります。社内で誰も経験したことがないことだったので、試行錯誤を繰り返しながらいろいろ苦労したことを覚えています。

4. 海外における活動

私たちが現在取り組んでいるのは、海外市場への販路拡大と新製品の開発です。海外市場の開拓を担当している者は毎月海外出張に行って海外販社と打合せをしたり、展示やデモを行っています。また新製品を開発するにあたっては初めから海外市場を意識する必要があるので開発段階から海外の販社と打合せを行う必要があります。また開発の一部をODMメーカーに委託したりしますが、材料の供給先やODM先は日本国内に限定されません。

弊社は、2011年に中国技術系大学のトップである清華大学にROHM記念館を寄贈させて頂き、その1フロアで共同研究を行っています。私たちのメンバーも中国に出向して現地の人達と一緒になってメディカル製品の研究･開発を行っています。そのような環境の中で現在､英語の必要性を痛感しています。英語でコミュニケーションがとれないと仕事はできないと言っても過言ではありません。在学時、周りには常に留学生がいたので、彼らともっと英語でコミュニケーションを取る努力をしていればと悔やまれます。学生時代は時間も作りやすいと思うので、在学時に英語をマスターしておくと、会社に入った後の活躍の場は2倍3倍に広がると思います。

5. 在学生の皆様へ

企業に就職して10年が経ちましたが、本当にあっという間の10年間でした。その間に感じたことを述べさせて頂きましたが、企業に就職してよかったと思うのは、研究からスタートした製品が実際に病院で使用されていることです。患者さんやお医者さんに喜ばれたという話しを聞くととても嬉しいですし、充実感を得ることができます。

私は学生時代にはDRAMのキャパシタ材としての高誘電率薄膜の研究を行っていました。私の場合はトップダウンの指示で、それまでの電子材料系の研究からバイオに転向しました。最初は自分がバイオの研究なんかできるのか疑問もありましたが、今振り返ると、とてもいい機会に恵まれたと思います。というのも現在、バイオ・メディカルはまだ未開の分野だと感じるからです。病院の先生方からの『こうゆうことができたらいいのに』というニーズは多々ありますので、研究、開発テーマは尽きないと思います。

私が電気系学科を選んだのはちょうどNHKで放送されていた『電子立国日本』というドキュメンタリー番組を見たからです。私が大学に入学した20年前は日本の半導体産業は世界を席巻していましたが、現在日本の半導体産業が置かれている状況は当時と大きく異なります。私がこの場をお借りして言いたいのは、自分の専門以外のことにも興味を持ち、広い視野を持って、これからの技術や分野を見極める力が必要だということです。自分の研究に専念すればするほど視野が狭くなって周りが見えなくなる危険があると思います。もちろんやると決めたらとことん深く追求する必要があると思いますが、自分の専門を深く追求すると同時に、浅くても広く周りを見渡す視点も必要だと思います。いくら頑張っても成果が得られなかったり、社会的なニーズが乏しいところで頑張るよりも、社会的ニーズが高く成

果が得られる分野で頑張る方がよっぽどいいと思いますし、今のメディカルは正にそういう状況だと思います。私の場合はたまたま上からの指示での転向でしたが、在学生のみなさんにはこれからの 10 年 20 年先を見越した選択をして頂きたいと思います。

新しいことにチャレンジするのに遅すぎるということはないと思います。私は博士課程まで在籍させて頂いたので、大学 4 回生の時から数えても研究室には 6 年間お世話になりました。その間は一貫して電子材料の研究を行いました。博士課程まで行って自分の専門を変えるのに抵抗がなかったと言ったら嘘になりますが、今振り返ってみると自分のそれまでの専門に固執しないでよかったと思います。また自分がそれまでに学んだことは、分野を変えても必ず生きてきます。研究者としての考え方などのような間接的な場合もありますし、意外と昔経験した技術そのものが必要になったりする場合もあります。昔もっと勉強していればと後悔することも多々あります。

在学生の皆さんはこれから就職して世の中に出て行かれると思いますが、これまでの研究内容や国境にこだわらず、様々な分野において世界中でご活躍されることを期待しています。

編集後記

本号の「巻頭言」、「産業界の技術動向」、「賛助会員の声」では、日本の電機・エレクトロニクスの復権には、技術力に加えて新たな価値と生み出す国際コミュニケーション能力が必要であると強いメッセージが込められています。「大学の研究・動向」と「研究室紹介」からも、京都大学電気系教室では活発に世界をリードする第一線の研究がなされていることが伝わってくる一方、「教室通信」で紹介されている学生アンケートからは国際的場面を志向する学生像は伝わってきません。これに対処するように京都大学での教育を国際化しようとする動きが活発になってきています。京都大学では平成２６年度より多数の外国人教員を雇用して相当数の講義が英語で行われるようになります。講義の中で、英語で質問できる学生が一人でも増えてくれることを期待したいものです。国際的な場面で、日本の新技術をアピールして国際標準にまでもってゆくには、交渉の場に立てるように英語力と共に博士号をもっていることも重要な要素となります。本号で紹介されている 26 件の充実した内容の博士論文概要に加えて、「学生の声」の欄には、短期間で博士号まで取得して企業で活躍しようとする学生、じっくりと研究者を目指す学生と、タイプの異なるものの、頼もしい声が寄せられています。本号が博士課程を志す学生の参考になることを願います。最後になりましたが、ご多忙のところ本号にご寄稿頂いた皆様をはじめ、いつも cue 誌を支援頂いている多くの皆様に厚く御礼申し上げます。

[Y.O. 記]