

cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.19

MARCH 2008

[第19号]

.....
卷頭言

平田 康夫

.....
大学の研究・動向

量子工学講座 光量子電子工学分野

.....
産業界の技術動向

株式会社 村田製作所

荒井 晴市

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

編集後記

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

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

巻頭言

積極的な情報発信を

昭和40年卒 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 代表取締役社長 平田 康夫



縁あって、2007年7月よりけいはんな学研都市にある民間研究機関の国際電気通信基礎技術研究所（ATR）に勤務することになり、これまでのわが人生の3分の2を過ごした東京を離れ、家族共々関西に居を移すことになった。懐かしい子供時代、学生時代を過ごした故郷への40年ぶりのUターンである。

ATRへの赴任前後にまず感じたことは、関東と関西との間の情報の格差である。KDDIからATRに移るに当たって、東京でお世話になった方々に挨拶をさせていただいた際に、「けいはんな学研都市にあるATRという研究機関に移ることになりました」といってもなかなかご理解いただけないことが多々あった。「けいはんな学研都市」でまず？が付き、その設立背景、規模、現状などを縷々説明した後、要は関西における「つくば学研都市」のようなところですよと言ってやっと理解していただく場面に何度も遭遇した。さらに追い打ちをかけるように「けいはんな」の「けい」は京都の京、「はん」は大阪の阪、ところで「な」は名古屋の名ですか、などとまじめに尋ねられたこともあった。関東の方々の関西に対する認識の浅さ、興味の薄さの一端を垣間見たところである。ましてやATRにいたっては、けいはんな学研都市の第一号入居者で、株式会社でありながら情報通信に関わる最先端技術の研究開発をする研究機関で、約300名の研究者の内およそ4分の1が海外の研究者で・・・、といった説明を何度も何度も繰り返させていただいた。一方、関西に移り住んだ後のことであるが、ATRは関西特に京都では、関連業界以外の一般の方々にも意外に知名度の高い会社であるとの印象を受けた。

このような情報の格差は、当然といえば当然ではある。近いものほど身近に感じ、興味を持つのは当たり前のことであるが、新聞やテレビなどのマスメディアの報道の仕方にも問題であるのではないかと思う。情報の東京一極集中の弊害の一つであろう。例え東京一極集中であっても、様々な地方の情報が東京に集められ、その後情報の取捨選択が行われ、わが国にとって国民にとって有意な情報が東京から全国に向けて発信される構図ならばまだ良い。実態は東京の情報は全国にばらまかれるが、地方の情報はその地方だけで閉じてしまっている場合が数多く見受けられる。すなわち情報の流れ、パスの上りと下りがバランスしていないのが問題である。少々話がそれるが、京都が都の昔に戻って江戸から京都へ向かうのを上りと呼ぶのはJR時刻表との混乱を避けるためあきらめるとしても、少なくとも関西を地方とは呼びたくないのが私の本音である。

話を戻すと、例えば我がATRの研究成果がテレビのニュースで取り上げられた、新聞に掲載され得意気になっても、所詮ほとんどの場合はローカルニュース、地方版での扱いである。全国に放映される価値のある内容であっても然りである。京都大学や関西在住の方々も同様の経験をされ、同じ思いをされているのではないかと思う。何故もっと地方発信の情報を全国版のニュースや記事として取り上げないのかとマスコミに文句を言っても始まらない。要は、様々な機会をとらえ、自ら工夫を凝らして全国に向けてより積極的な情報発信に努めていく必要があるのではないかと強く感じている次第である。

京都大学は、東京にオフィスを設けられ、また京都大学の活動を紹介する各種シンポジウムを東京を始めとして全国各地、および海外において積極的に開催されるなど幅広く広報活動に取り組んでおられ

ると聞いている。もちろん京都大学の知名度が全国区であることは言うまでもないことであるが、優れた研究の成果、優秀な人材の輩出、近況などをより多くの人々に正しく知ってもらうためには、私どもOBも含めて大学関係者が、関西の、京都の、そして京都大学のPRにつながる情報発信を様々な機会を捉えてきめ細かく行っていくことが大切であろう。

組織においても地域においても、継続的かつきめ細かい情報発信によって正しく知ってもらい、身近に感じてもらうことの意義、効用は計り知れない。そこに住みたい、そこで仕事をしたい、一緒に働きたい、親しくお付き合いしたい、といったことにつながっていくことになる。関西そして京都を、人、もの、金、すなわち優秀な人材、地域の活性化を促す諸施設、潤沢な資金が集まる地域、真の意味のCOE (Center Of Excellence) へと展開してゆくために重要なアクションと理解している。

情報発信の強化は、極東に位置する島国「日本」の国内に留まる話ではない。幸いにも歴史的文化と伝統の町「京都」の世界における認知度は「東京」に勝るとも劣らない。世界に向けての情報発信の強化は、わが国の重要政策に対する理解の促進、国際的地位の向上、産業競争力の強化、さらには優れた技術や伝統文化の紹介などに繋がり、国として極めて重要な戦略的施策である。

関西発全世界向けの情報発信の強化は、関西を地方区から全国区に格上げするのにも大いに役立つ。わが国は、海外で高く評価されたものを無条件で受け入れる傾向が強いように感じられる。情報を関西発、海外経由、東京着とする、いわゆる着地点が少しそれるブーメラン現象の活用も大いに効果的な情報発信戦略であろう。

少々とりとめも無いことを述べたが、関西に戻って情報発信の大切さを改めて強く感じた次第である。今後とも様々な機会をとらえて情報発信の強化に努めていきたいと考えている。もっとも、情報発信に精を出しても内容が伴わなければ、かえって評判を落とすことになりかねない。辻褄あわせの情報発信、見せ掛けの情報発信は避けなければならない。より大切なことは情報の中身である。

最後に京都大学に対する期待として、自由な学風、個の尊重といった京都大学の伝統、京大らしさを最大限に活かしつつ、世界に誇れる研究成果、未来社会に貢献できる人材の育成を強くお願いして私の拙文の終わりとしたい。

フォトニック結晶工学の進展

京都大学工学研究科 電子工学専攻 量子工学講座 野田研究室
 教授 野田 進
 准教授 浅野 卓
 助教 富士田 誠之

1. はじめに

フォトニック結晶とは、周期的な屈折率分布をもつ光ナノ結晶であり、固体結晶において、周期的ポテンシャル分布により、電子のエネルギーバンド構造が形成されるのと同様に、光子のエネルギーに対してバンド構造が形成されるという特徴を持つ。特に、屈折率分布が3次元のダイヤモンド構造をもつとき、光がどのような方向にも伝播できない、完全バンドギャップが形成される。フォトニック結晶において最も興味深い点は、このフォトニックバンドギャップの存在にある。バンドギャップに相当する波長をもつ光は、結晶中に存在し得ないため、通常自由空間における現象とは全く異なる現象が生じることになる。例えば、物質からの発光現象を根本から抑制したり、逆に特定部分で強めたりする究極の発光制御が可能となる。また、原子系を外場から遮断することができるため、いくつかの閉じ込められた原子系同士の純粋な相互作用を可能とし、近年注目を集めている量子演算が構成可能な量子場を提供するものとしても期待される。また、フォトニック結晶中に点状欠陥や線状欠陥を導入することにより、極微小の光共振器や導波路を形成することも可能となる。これらの点、線欠陥を組み合わせることにより、従来に比べて2～3桁程度小さな極微小の光回路を構成できるものと期待される。その他にも、光の速度を極限的に遅くしたり、群速度零のバンド端における定在波状態を利用することにより、大面積コヒーレントレーザ動作を可能とするなど、様々な魅力的な応用可能性をもつと期待でき、近年、フォトニック結晶は、大きな注目を集めるに至っている。

本研究室では、上記フォトニック結晶の開発そのものから、それをを用いた様々な光制御の可能性の提案・実証を行ってきた。以下、その詳細を述べる。

2. 完全3次元フォトニック結晶

フォトニック結晶は、3次元的な超微細構造をもつ人工物質であるため、当初は、結晶そのものが世の中に存在せず、結晶の実現が急務の課題であった。本研究室では、'90年初頭から、全く独自の手法を用いて完全3次元フォトニック結晶の実現に着手し、'90年代半ばに、まず、4 μm 周期のGaAsストライプを井桁状に積層したダイヤモンド構造3次元結晶を実現した。続いて、'99年には、700nm周期のGaAsストライプを30nm以下の超高精度で積層させた完全3次元結晶の実現に成功した(図1)。この結晶により、光通信波長域(1 μm 帯)において透過率の減衰量として-40dB(反射率99.99%)という優れた光の遮断効果を達成することが出来た[1]。

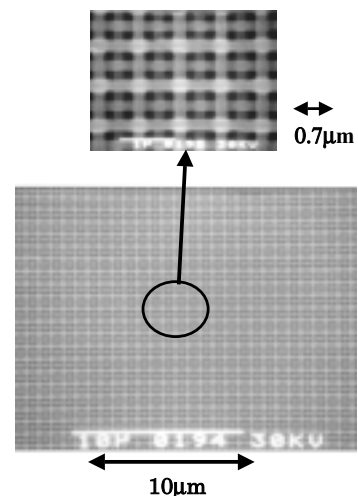


図1. 開発した3次元フォトニック結晶のSEM写真

3. フォトニック結晶による発光制御

フォトニック結晶研究において、その初期から最も興味をもたれた概念は、「発光可能な物質であっても、その物質が3次元フォトニック結晶へ導入されると、完全フォトニックバンドギャップ効果により、その発光は根本から抑制される。逆に、人為的に結晶の周期性を乱すと、その周期性の乱れ部分（欠陥）において、物質からの強い発光が可能となる」という発光現象の根本制御の可能性であった。本研究室では、2節で述べた3次元結晶実現の後、結晶内部への発光体および人為欠陥の導入に取り組み、幸いにも世界に先駆け、物質からの究極の発光制御の可能性を実証することに成功した（図2）[2]。

本研究室では、この研究を、さらに次元の1つ低い2次元フォトニック結晶による発光制御の研究へも展開し、2次元結晶の特徴を反映した極めて興味深い成果を得ている。2次元フォトニック結晶においては、2次元面内の発光は禁止されるが、上下方向の発光は、許容されると考えられる。従って、発光体の面内方向の発光の禁止により、蓄えられた励起キャリアが、上下方向への発光にのみ使用され、その結果上下方向の発光効率が大幅に増大するという、極めて興味深い現象が起こることが予測される。我々は、このような2次元フォトニック結晶によるユニークな発光制御の可能性を示すことに成功した[3]。この成果は、次世代の固体照明への応用が期待される発光ダイオードの外部量子効率の大幅な向上にも寄与するものと考えられる。

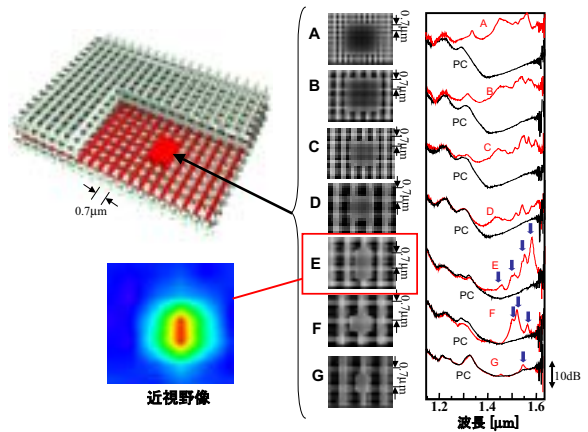


図2. 3次元フォトニック結晶による発光制御。完全結晶部では、発光が抑制され、人為的な欠陥を導入した部分では、強い発光が得られ、かつ欠陥の大きさに応じた共振ピークが観測された。

3. 2次元フォトニック結晶による光ナノデバイス

前項でも述べたように、本研究室は、理想的な3次元フォトニック結晶の研究と平行して、2次元フォトニック結晶の研究にも取り組んできた。2次元結晶においては、周期屈折率分布の存在しない上下方向の光閉じ込めをどのように行うかが大きな課題（注：前項における発光制御の場合は、上下方向の漏れを逆に積極的に利用している）となる。例えば、2次元結晶に線状欠陥を導入すると一見、光導波路となるが、実際には上下方向の光の漏れが問題となり、導波路として用いることは出来ない。そのような中、我々は、結晶の厚さを光波長程度に薄くしたスラブ（薄板）構造を用いるとともに、上下媒質、格子点の大きさの適切な設計により、上下方向の全反射条件を満たすことが可能となり、無損失導波路が実現可能であることを見出した[4]。

さらに、我々は、上記、導波路の近傍に、点状欠陥共振器を導入し、線欠陥導波路を伝播する光のうち、点状欠陥共振器に共鳴する光を、点状欠陥により捕獲するとともに、全反射条件の破れにより、上下方向に放出可能なことを実証した[5]。この現象は、極微小点状欠陥により、結晶から光を出し入れ可能なことを示している。我々は、さらにヘテロ構造の概念をフォトニック結晶に導入し、1.25nmという極小の格子定数差をもつヘテロフォトニック結晶を開発し、従来の10万分の1という超小型光合分波デバイス機能を実証した（図3）[6]。

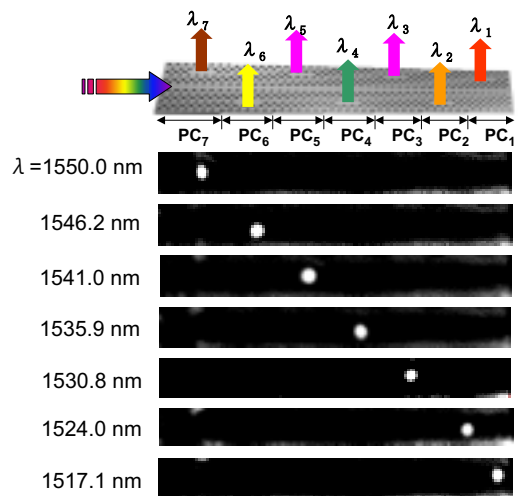


図3. フォトニック結晶によるナノデバイスの例。従来の10万分の1の大きさの光アッドドロップ機能が実現

4. 光ナノ共振器

前項において述べたように、2次元フォトリック結晶においては、極微小点欠陥共振器に光が捕獲されると、全反射条件が満たされなくなるため、光は上下方向に放出されるようになる。このような極微小点欠陥共振器においても、光の漏れの極めて少ない共振器が形成されるようになると、上記、光ナノデバイスの高性能化のみならず、様々な新しい応用の道が開ける。例えば、光を光のまま蓄える光メモリ、量子光チップ、超高感度センサ、バイオ応用など。これらは、強い光閉じ込め効果により光の滞在時間が十分に長くなること、極微小域に光を強く閉じ込めることにより光と物質との相互作用が極限的に強くなること、極微小共振器ゆえ大規模集積が可能となること等の効果に基づくものである。本研究室は、光を極微小域で強く閉じ込めるためには逆に緩やかな光閉じ込めが重要であるという逆説的な概念を提唱し、2次元結晶スラブの点欠陥端部の空気孔をほんのわずか(60nm)シフトすることで、従来の100倍、すなわち5万を越すQ値をもつ光ナノ共振器を実現した[7]。さらに、その後、2005年には、数ナノメートル毎に格子定数を変化させたフォトリック・ダブルヘテロ構造の概念を提唱し、Q値として、さらに10倍、すなわち60万という値を達成した[8]。なお、2007年には、200万を越えるQ値を実現することに成功している(図4)[9]。

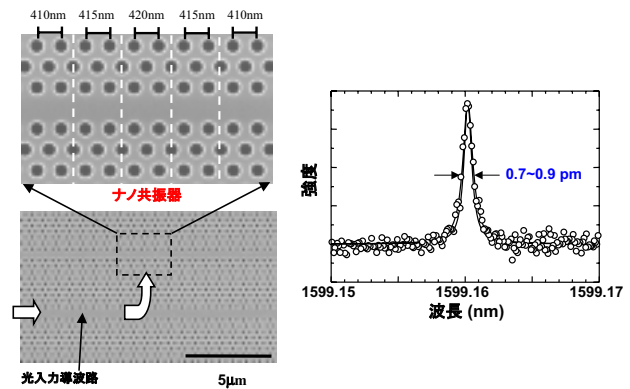


図4. 世界最大のQ値をもつナノ共振器。
Q>2,000,000が得られている。

ナノ共振器のQ値が大きくなっていくと、次に、重要になるのは、このような高いQ値をもつナノ共振器に光をどのように出し入れするかである。高Q値ナノ共振器は光を長く閉じ込めることを可能にするが、当然、光を導入するためにも、より長い時間がかかるようになる。すなわち、高Q値ナノ共振器はそのままでは、ゆっくりと光を導入し、ゆっくりと光を放出させることしか出来ない。重要なことは、光をナノ共振器に導入する時にはQ値を低くしておいて光をすばやくナノ共振器に導入し、光がいったんナノ共振器に導入されると、速やかにQ値を増大させ、光を無駄なくナノ共振器に留めることである。また必要とあれば、さらにQ値を低下させ、光をすばやく取り出せるようにすることが重要である。我々は、2007年に、Q値の動的制御のための新たな基本概念を提唱し、その基本動作を実証することに成功した[10]。

5. 2次元フォトリック結晶を用いた大面積コヒーレントレーザ

前述の3, 4は、如何に光を微小域で制御するかという観点からの研究であるが、一方、フォトリック結晶を用いて、大面積で光を制御することも可能である。1でも述べたように、フォトリックバンド構造のバンド端に注目すると、光の群速度が零、すなわち、定在波が形成されることになる。本研究室は、このバンド端を用いることにより、大面積で、コヒーレント動作可能なレーザの実現が可能であることを提唱するとともに、実際に、大面積で、完全な単一波長、単一偏光で面発光動作するデバイスの実現を目指してきた[11,12]。このレーザは、同一面内に複数個並べること(アレイ化)も可能であり、出力光は非常に狭い拡がり角で出射され、かつまた出力も極めて大きく取ることが可能であり、従来にない新しいレーザと言える。さらに、我々は、数ナノ~数10nmの精度でフォトリック結晶構造を様々に制御することにより、ドーナツ形状から、真円形状に至る様々な形状のビームを発生させることが可能であることを見出した[13]。特に、ドーナツビームは、金属微粒子などの不透明物質の操作や、さらには波長の数分の1程度にまで集光可能なビームとして期待され、マイクロフレイディスクや、次世代の光ディスク用光源、近接場光源として重要と考えられる。

さらに、本レーザの発振波長を青紫色領域(~400nm)まで短波長化することが出来ると、その応用範囲は格段に広がるものと期待される。極最近、GaNを材料として用い、独自のフォトリック結晶形成技術(AROG)を開発することにより、レーザ内部に、良質のGaN/空気2次元フォトリック結

晶を形成することに成功し、青紫色領域で、初めてフォトニック結晶面発光レーザーの電流注入動作に成功した(図5) [14]。

6. まとめ

以上述べたように、本研究室は、フォトニック結晶の開発から、本結晶がもたらす新しい現象・応用可能性を提案・実証してきた。今後、フォトニック結晶とエレクトロニクスの融合も進み、所謂、シリコンフォトニクスとしての展開も考えられ、電子回路による制御により、光の切り替えやチューニング機能、光ディレイ機能等をもたせた光・電子融合回路への展開なども期待される。また、アクティブ機能の付加による超小型波長多重光源、Q値の高さやスローライト効果を利用した超高感度センサーや光バッファメモリー機能、さらには、量子ナノ構造との融合による電子・光子強結合状態の創出等、次世代通信・情報処理デバイスへの展開を含む数多くの応用へと発展するものと期待される。また、フォトニック結晶のバンド端効果を利用したレーザーは、大面積で、完全な単一波長、単一偏光、単一スポットで面発光動作することが可能であり、ビームパターンとしても、結晶構造の制御により、自在に制御されるようになると期待され、今後、情報処理、通信、加工をはじめ、バイオ等の様々な幅広い分野に応用可能であると確信する

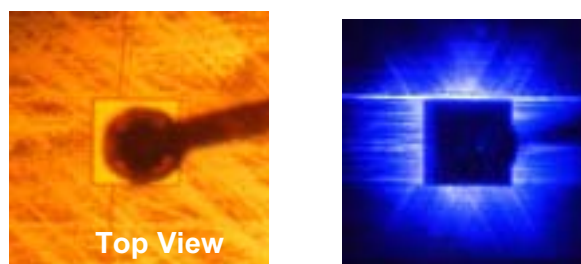


図5. 青紫色領域での大面積面発光動作。

[文献]

- [1]"Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths," Science, vol.289, No.5479, p.604 (2000).
- [2]"Control of light emission by 3D photonic crystals," Science, vol.305, No.5681, p227 (2004).
- [3]"Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals," Science, vol.308, No.5726, p.1296 (2005).
- [4]"Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs", Phys. Rev. B, vol. 62, No.7, p.4488 (2000).
- [5]"Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure," Nature, vol.407, No.6804, p.608 (2000). [377 times cited].
- [6]"Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals," Science, vol.300, No.5625, p.1537 (2003). [95 times cited].
- [7]"High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal, Nature, vol.425, No.6961, p.944 (2003).
- [8]"Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity," Nature Materials, vol.4, No.3, p.207 (2005). [158 times cited].
- [9]"Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities", Nature Photonics, vol.1, No.8, p.449 (2007).
- [10]"Dynamic control of the Q factor in a photonic crystal nanocavity", Nature Materials, vol.6, No.11, p. 862 (Nov 2007).
- [11]"Coherent 2D lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure", Appl.Phys.Lett., vol.75, No.3, p.316 (1999).
- [12]"Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design", Science, vol.293, No.5532, p.1123 (2001).
- [13]"Lasers producing tailored beams", Nature, vol.441, No.7096, p.946 (2006).
- [14]"GaN Photonic-Crystal Surface-Emitting Laser at Blue-Violet Wavelengths", Science, (Just Published Online, December 20, 2007, Science DOI: 10.1126/science.1150413)

受動電子部品の動向

株式会社 村田製作所
荒井 晴市

1. はじめに

通信・放送・家電がネットワーク化し融合していく時代にあって、電子部品は年々小型化・薄型化され、電子機器のウェアラブル化に貢献している。筆者は、昭和46年に電気工学第2学科を、昭和48年に同修士課程を修了し、株式会社村田製作所に入社以来、今日までセラミック電子部品の研究開発に携わってきた。本稿では電子部品、特に受動部品の動向と今後について、当社の製品の事例をもとに述べさせていただく。

2. 村田製作所の起源と独自性の追及

本論に入る前に筆者の所属する村田製作所の歴史を少し振り返ってみたいと思う。

京都東山で陶磁器業を営んでいた父を持つ村田昭（村田製作所創業者）は家業を拡大することを父親に提案したが、注文を多く取ろうとすれば、同業者の得意先へ行くことになり、同業者より安くしないと注文はもらえない、それでは同業も困るし、自分のところも儲からない仕事をするようになるからやめておくようにと諫められた。それならばと、他の人のやっていないセラミックスを使った電

子部品に取り組むことを決意するに到ったというのが創業時のエピソードである。これが村田製作所の「社是」に“独自の製品を供給し”というフレーズが入り、独自性を大切にする風土を大事に受け継いできた所以である。

最初の主力製品となったのは誘電体材料に酸化チタンを使ったセラミックコンデンサであった。その後、京都大学で当時助教授をされていた田中哲郎先生との出会いがあり、今で言う産学連携の草分けと言える関係を通じてご指導いただいた。第二次世界大戦中に、日・米・露で独立してほぼ同時に発見されたチタン酸バリウムが注目を浴び、産官学連携の研究会が発足した。村田製作所も実験や材料の提供を通じてお手伝いした。そのチタン酸バリウムは非常に優れた特徴を持った電子材料であったので、多くの独自性の高いセラミック電子部品が誕生した。その後も村田製作所は、一貫してセラミックスを応用した電子部品を追及し続けて今日に到っている。

エレクトロニックセラミックスは組成や添加する不純物により、圧電性・誘電性・絶縁性・磁性・焦電性・半導性と多様な電気特性を示すため、様々な電子部品に展開することができた（図1）。またセラミックスはSi単結晶のように均質な物質ではなく、基本組成が同じでも微量の不純物や焼成条



図1. セラミックスを使った電子部品

件により結晶粒の粒径が異なったり、空孔（ポア）や粒界の状態が変化したりすると大幅に性質が変化するため、安定して狙った特性を出すことが難しく、大量生産するには非常に厄介な代物である。しかし、それを制御することに専念努力してきた結果、その技術が会社のコアコンピタンスとなり他社に対する参入障壁や差別化要素となった。

3. 東南アジア部品メーカーの台頭

上述の村田製作所の例のように多くの日本の受動電子部品メーカーが、その品質と技術力で世界のエレクトロニクス市場を席卷してきた。しかしIT技術の発展やグローバル化の進展により、技術の拡散スピードが速くなり、例えば半導体分野では最新の製造設備が数年も経つとどこでも誰でも入手できる時代になった。技術ノウハウについても日本勢に押されたヨーロッパ系の部品メーカーからの技術導入などで東南アジア勢が力をつけてきた。化学材料については機械設備と比較すると最先端の新材料が誰でも入手できる状態にはないが、コモディティ化した一世代前の受動部品については台湾や中国などの部品メーカーが、その安い労働力を生かした低価格戦略で一定規模の市場を獲得するに到った。事業として実績を積んでくると、当然のこととして材料の調達力も上がり、総合的に力をつけてきている。また部品を購入する側のセットメーカーも、ロジスティクスの発達により、良くて安いものであれば世界中のどこからでも調達するようになったこともこれらの東南アジア部品メーカーにとってのフォローの風となった。

日本の受動電子部品メーカーは、このような新興勢力に対抗していくための方策を打ち出していく必要に迫られることになった。一番直接的な対抗策は工場を海外に移して、その場所の安い労働力を活用して価格競争力をつけることであり、この方策はすでに他分野の日本企業がやってきたやり方であるが、国内の空洞化の問題も顕在化し、最近では、その反省からまた日本に回帰する例も多くなってきている。

4. モノづくり立国

4-1 摺り合わせ技術と標準化

前項で述べた新興勢力に対抗するあるいは住み分けるためには、やはり技術力で勝負することが望ましい。その一つは、いわゆる「摺り合わせ技術」すなわち徹底的にユーザーの現場ニーズに対応していくこと的能力を磨くことである。小型化や電氣的性能面での改善要求に応えることは当然として、それ以外にもユーザーからの要求は多様化してきている。セットを小型化するために熱の放散が悪くなり部品が高温に曝されたり、24時間電源が入ればなしになるような過酷な使い方が増えたり、また組み立て工程においても、超小型の電子機器に仕上げるためにリフローハンダの熱履歴を4回以上通ったりするなど、きめ細かくユーザーのニーズを把握した上でそれに対応できる電子部品を供給していくことが求められる。これらのようなニーズに対応していくためには部品の知識だけでなく、その原材料についての知識、使用されるセットやシステムについての知識、セット組み立て工程の知識などの総合的な知識を必要とし、これらの統合活用能力が差別化戦略となる。このようなきめ細かい気づきと対応は日本人の得意とする分野である。

上ではユーザー要求に対する個別対応の重要性を述べたが、すべてのユーザーに対して個別対応していたのでは経営上効率が悪くなるので、早い段階で、その中からユーザーニーズの本質的な部分を抜き出して、標準部品化する眼力が要求される。標準部品化することにより一品種の生産数量をまとめることができると事業としての競争力をつけることができる。標準化の方向をいち早くキャッチするためには、将来のメジャーな流れを作り出す実力を持ったユーザーから、技術対応力に対する信頼を得ておかないと早い段階での引合いを得られないため、普段から新しい要求に対して積極的に対応することが必要である。

4-2 高信頼性技術と環境技術

自動車の電子化の進展に伴い電子部品への高信頼性の要求が高まってきている。一般用途であっても、最近の電子回路はLSI化と周辺部品の小型化が進み、それらを高度な技術を使って基板実装しているため、故障しても故障部分や故障部品が特定し難く、また特定できたとしても不良部品だけを交換修理することが難しくなっている。したがって組立工程で発見された不良回路基板や、市場に出た後から故障した回路基板は、基板ごと交換する例が増えてきた。このことは部品に対してより高い信頼性が要求されることを意味する。日本の独壇場であった小型電子部品も台湾や中国に競合相手が育ってきているが、超高品質を実現するためには懐の広い総合技術を必要とするため一朝一夕にはキャッチアップできない。日本はもっと、高品質を前面に打ち出すべきと考える。

同様に環境問題に対して配慮した製品を開発し製造するという事は、企業として社会的責任を果たす上で重要であるが、これまた競争力として活用し、日本が先行しリードすべき点である。省エネ、省資源、環境負荷物質の削減に磨きをかけることが新興勢力に対して我が国が先を行くための重要な道となる。

5. 今後の受動部品の動向

5-1 ICとの共生

エレクトロニクス業界の発展に中心的な役割を果たしてきたIC技術との関係に着目して受動部品の将来を予想することは意味がある。実際、これまでの歴史を見ても、ICの中に集積化することが難しい、あるいは価格的に実用的でないものが受動部品としての存在価値があった。たとえば一番基本的な電子部品であるLCRでは、大容量のコンデンサやQが高く所望の温度係数を持ったLCがICにインテグレートしにくい部品の例である。性能の良い共振回路、フィルタも同様である。このような電子部品はICの高集積化や小型化・薄型化に呼応して小型・薄型化要求に対応しICと共存してきた。チップ積層セラミックコンデンサが典型例である（図2）。年代とともに、より小さい小型品が商品化され、主役が小型品にシフトしてきた（図3）。図中で1005とあるのはサイズが長辺1.0mm×短辺0.5mmという意味で、現在商品化されているもので最小サイズは0402、すなわち0.4mm×0.2mmである。

無線受信機に不可欠な部品でIC化が難しいものとして、セラミックフィルタ、SAWフィルタ、BAWフィルタなどの高性能なフィルタがある。ICが「産業の米」と言われているのに対して、これらの無調整小型フィルタは不可欠なスパイスという意味で「産業の塩」を自任している。

また、外部との入出力インターフェース部分にもICの不得意とする部分があり、その部分も部品の

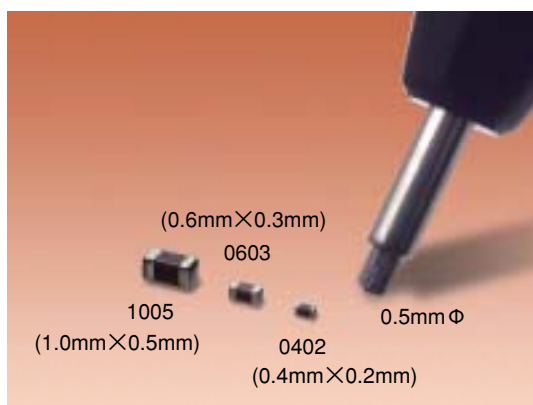


図2. 超小型チップ積層コンデンサ

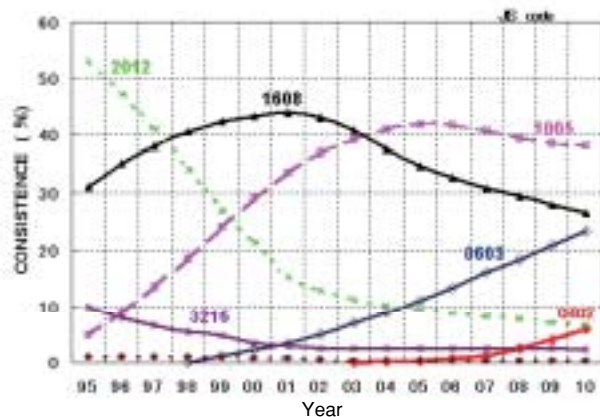


図3. チップ積層コンデンサの小型化トレンド

担当分野である。センサ、発音体、アクチュエータ、マイク、スピーカー等である。この領域での新しい技術としてMEMS技術を使った商品が活発に商品化され始めた。小型・薄型要求への対応力や製造プロセスがICに近いことによりICとモノリシックにインテグレーションすることも将来的には期待できることが魅力になっている。

5-2 イントラシステムEMI

IC技術が進展することで新たに発生した問題もある。たとえばデジタル回路のクロック周波数が高くなるに伴い電磁放射ノイズの問題は深刻度が増す。最近では1台の電子機器の中に、場合によっては1つのICチップの中にベースバンド回路と高周波の小信号回路が混在することが多くなり、相互のカップリングによる障害が問題になってきている（図4）。このような障害をイントラシステムEMIと呼んだり、機器間の妨害ではなく同じ機器の中での妨害なので自己中毒といったりしている。これに対して相互干渉を効果的に抑圧するためのEMI対策部品が重要になる。機器の小型化に伴い、EMIに対する対策部品は益々必要性が高まると考えられる。



図4. イントラシステムEMI

5-3 SoCとSiP

携帯型の電子機器では一台に複数の機能を盛り込んだりすることが多く、そのためにはそれぞれの機能ブロックをさらに小型・薄型化することが求められる。小型回路モジュールを実現する技術としてSoC (System on a Chip) とSiP (System in Package) が有力である。前者は、必要な機能をICチップにモノリシックにインテグレートするやり方で、後者は、ICチップと別チップとして、SAWやBAWのようなフィルタ等をベアチップやCSPとして用意し、パッケージングの時点でマルチチップをインテグレートする手段である。SoCだけで実現できれば、こちらのほうがシンプルで小型化・薄型化の観点でも優れているが、価格、性能、開発期間などを考慮すると、SiPの方が最適解である場合が多い。SiPの形態をとると、ICメーカー、パッケージメーカー、受動部品メーカーのいずれもが商品として事業化することが可能であり、すでに主導権争いが始まっている。

パッケージや基板に関する動向として、低温焼結セラミック多層基板と樹脂多層基板で競争しており耐熱性、耐湿性や高周波特性ではセラミックが有利であるが、樹脂多層基板もICや受動部品を基板内部に埋め込む技術が進んできてさらなる薄型化が期待されている。

6. 理工系離れとムラタセイサク君

最近、人の動きにかなり近い動きができる人型ロボットが人気で、TV等でもよく紹介されている。一方、村田製作所が開発した自転車型ロボット（ムラタセイサク君）も結構人気がある（図5）。このロボットは市販することを考えてつくったものではなくて当社の部品をエレクトロニクスの総合展示会でPRするために自社製のジャイロセンサ、赤外線センサ、超音波センサや急速充放電可能なりチウムイオン電池などをアピールするためのデモ用に開発された。発表してみるとネーミングも良かったこともあり、予想以上の反響があった。

最初から狙っていたわけではないが、他社の人型ロボットはいかに人の動きに近い動きができるか

がポイントであるが、この自転車型ロボットは、不倒静止やS字平均台走行、バック走行、超低速走行など、人のできないことができるということが皆の関心を得ているのだろうと思う。特に子供達は素直に不思議がり興味を持って見てくれる。

話は変わるが、最近の大学入試での電気電子学科の不人気ぶりや、電気電子に限らず理工系そのものが不人気であることが話題になることが増えてきている。難しい科目を勉強することを避けるとか、理由はいろいろあるだろうが、理工系を選択した自

分自身の場合を振り返ってみると子供のころに身の回りに不思議なものや面白いものがあり、それを分解して遊んだり観察したりすることを通じて、理科に対する興味が醸成されてきたように思う。しかし昨今の機器はICの塊で分解してもわかりにくく、上述のような体験をしないで育つ人が大部分であると思われる。“不思議”なものを見て、感動し、それを解明してみたいと思うことの原体験を持つことが大事である。上述のムラタセイサク君が最近の子供たちの理科離れ解消の一助になればとの思いで小中学校に出張させて、環境問題や理科に興味をもってもらうための出張講座を企画し実施しているが、反応も良くムラタセイサク君の出張予定はずっといっぱい詰まっている。



図5. 自転車型ロボット（ムラタセイサク君）

6. おわりに

技術はあるが、それが事業にうまく生かせないという会社が多い。個々の技術者レベルにおいても特定の専門領域で優れていても大きな成果につながらない人がある。目標達成までの過程で、ぶつかった課題を解決するためには、頭の引き出しにいろいろなものが入っていないとそれを生かすすべも考え付かない。若いうちに、固有技術の深堀と共に幅の広い見方や経験を積んでおくことが望ましい。企業では、これまで以上に総合的な判断をできる人材が求められている。

新設研究室紹介

電子工学専攻 量子機能工学講座 光材料物性工学分野（川上研究室）

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

「次世代固体照明デバイス ～究極のテラレーメイド光源を目指して～」

私たちの研究室では、光と物質との相互作用に基づく新物性の発現と解明、さらには、それを利用した新しい光デバイスや光応用への展開を推進しています。

具体的には、以下のようなテーマが、挙げられます。

（１）多波長発光する低次元InGaN微小光源の開発

ナノ構造の人為形成や発光遷移過程の制御によって発光スペクトルの任意合成によるテラレーメイド微小光源を開発することを目指しています。この研究は、微細加工基板への有機金属気相成長において、三次元マイクロ結晶面からの強い発光を観測したことに端を発しており、新たに見出した半極性面上のInGaN量子井戸においては、ピエゾ電界が抑制されているため、可視全域で高効率発光が可能であることを実証しました。さらに、ごく最近、各結晶面からの多波長発光を積極的に利用したバステルカラーや蛍光体フリー白色発光ダイオード（LED）の開発にも成功しています。

（２）光ダイナミクス計測による光物性の探求

光材料における機能性は、ナノ局在中心と呼ばれる微細な領域に局在する励起子などキャリアの高速な再結合過程を経て発生します。このような光機能性を評価するために、近接場光学顕微鏡を用いた時間分解発光マッピング装置を開発し、30nmの空間分解能と10psの時間分解能を実現しました。その結果、窒化物半導体の発光および非発光の再結合ダイナミクスが手に取るように分かるようになりました。さらに、近接場マルチプローブ技術や超短パルスレーザを用いた高速非線形光学分光などにも取り組んでいます。

（３）光によるバイオセンシング

近接場ファイバースコープによる生きた細胞の脈動や細胞間の協調現象を観測しその機能を探求しています。また抗原反応計測などバイオ光計測において、従来の単一プラズモン共鳴条件だけでなく多重・全反射条件付近で非常に高い検出感度が得られることを見出しました。それらアイデアを特許化するとともに企業と共同で製品化を目指しています。

（４）白色LEDゴーグルの特許化・製品化とVB起業

手術開発用の白色LEDゴーグルライトや白色LEDモジュールの照明应用を目指して活動してきました。2005年にはベンチャー企業を起業しました。清水寺の仁王像、秘仏、三重塔へのLED照明装置を納品し、夜間拝観の際に一般公開され高い評価を受けています。

上記の（１）～（４）は、個別なテーマのように見えますが、相互に依存しています。例えば、（１）は、ナノ構造制御によって任意の色、任意の大きさ、任意の場所において、効率100%で発光する究極の光材料の開発を目指したのですが、基礎光物性を材料開発にポジティブにフィードバックすることが不可欠であり、（２）とも密接にリンクしています。

また、光材料物性の応用の一例として、私たちは、バイオ医療応用では次のような展開が期待できるのではないかと思います。近未来には「ミクロの決死圏」に代表されるマイクロマシンが私たちの体内に入り込む時代が訪れるでしょう。その際には、微小な高品位固体照明と固体撮像デバイスが必ず搭載され、微妙な色合いの差を際立たせるための照明スペクトルのシンセサイズが必要とされるはずです。また、病変部にのみ選択的に取り込まれる蛍光体と固体照明との組み合わせでガン組織の診断・治療を行うなど種々の可能性が期待できるでしょう。その意味で、（１）と（２）は、（３）や（４）とも関連しています。

固体照明は、自動車のヘッドライトなどの一般照明はもとより、マイクロサイズあるいはナノサイズの光源としての可能性を秘めており、それを支える基礎光物性と材料開発、そしてバイオ応用などの研究に日夜取り組んでいます。



半極性基板上に試作した緑色LED

システム科学専攻 システム情報論講座 画像情報システム分野（石井研究室）
<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/>
 「生命と知性を理解するための融合領域研究」

2007年7月に当分野教授として着任致しました石井です。どうぞよろしくお願い申し上げます。

我々の研究の目的は、「生命」と「知性」を、まわりの環境に応じて自らを作り変える「学習するシステム」としてモデル化することでその原理を理解することです。そのためには、ボトムアップの実験科学のアプローチと、トップダウンの理論的アプローチの両輪を同時に回してゆくことが重要と考えています（図1）。

理論的アプローチによる研究としては、学習システムを計算機上で実現し、また、生命知性システムを観測データに基づき再構成します。こうした研究は、一般に情報理論、機械学習、統計的学習と呼ばれる分野をなしています。理論研究から得られる知見は、多くのシステムに対して応用が可能であり当研究室の基礎をなしています [1]。

実験科学的アプローチによる研究対象としては、複雑な学習システムである「脳」があります。脳を構成する視聴覚、運動制御、高次行動決定などの高次システム、あるいは神経細胞の分子生物学的システムの解明を目指した研究を進めています。最近では、計算論的認知心理学の新たな枠組み（図2）を構築し、不確実な状況に置かれた人間の意思決定に脳の前部前頭前野が関わることを明らかにしました [2]。

基礎研究のみならず、応用研究にも力を入れています。たとえば低解像度画像を多数集めて高解像度画像を得るベイズ超解像 [3]、遺伝子発現量と統計的学習に基づく癌診断システム [4] などは、学習システムの研究から生まれた成果ですが、産業応用も大いに期待できます。

以上のように、研究対象が複数の研究分野にわたる融合領域にありますことから、複数の研究者、学生によるプロジェクトチームを有機的に組織してゆくことが不可欠です。その中で私が最も重要と考えておりますことは、チームを担う各人が独自の深い専門性のみならず複数の分野にわたる専門性を同時に持つ研究者として育ち、そうした研究者たちがさらに相互感化反応を起こし続けてゆくことです。「融合領域研究の鍵は人にあり」の原則は、研究の拠点を京都大学に移しましても変わりはありませんし、その原則にしたがえば、深い専門性と広い視野とを併せ持つ次世代の研究者たちが育ってくれるものと信じております。

参考文献

- [1] Hirayama, J., Maeda, S., and Ishii, S. Markov and semi-Markov switching of source appearances for non-stationary independent component analysis. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **18** (5), 1326-1342, (2007)
- [2] Yoshida, W., and Ishii, S. Resolution of uncertainty in prefrontal cortex. *Neuron*, **50** (5), 781-789, (2006)
- [3] Kanemura, A., Maeda, S., and Ishii, S. Image superresolution under spatially structured noise. *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 279-284, (2007)
- [4] Ohira, M., Oba, S., Nakamura, Y., Isogai, E., Kaneko, S., Hirata, T., Kubo, H., Goto, T., Yamada, S., Yoshida, Y., Ishii, S., and Nakagawara, A. Expression profiling using a tumor-specific cDNA microarray predicts the prognosis of intermediate-risk neuroblastomas. *Cancer Cell*, **7** (4), 337-350, (2005)



図1. 帰納と演繹の両輪を重視する研究パラダイム

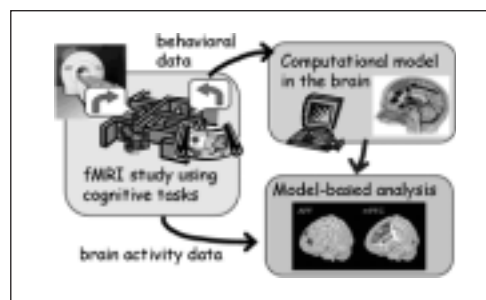


図2. 計算論的認知心理学研究の枠組み

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

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

「高パワー電磁波と荷電粒子ビームの高度制御に関する先進的研究」

2007年12月に長崎が本講座教授に着任し、増田准教授とともに新しい研究室としてスタートすることになりました。本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用を高度・高精緻に制御することにより21世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指してゆきます。特に、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、加熱・電流駆動システムの開発、超小型の核融合装置を用いたエネルギー粒子の発生と利用の研究や、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と制御を行うとともに、国内外の研究機関や大学等と研究交流・共同研究を積極的に行ってゆく予定です。

究極のエネルギー源として期待されている核融合炉において、GHz周波数帯の波を利用した波動加熱はプラズマを生成・加熱することに幅広く利用されています。安定した高温プラズマの生成・加熱・電流駆動を行うに当たり、加熱機構の理解と加熱手法の開発は重要な課題として位置付けられています。写真1に示すような高パワーマイクロ波源であるジャイロトロンを用い、電子サイクロトロン共鳴加熱によるプラズマの生成・加熱・電流駆動過程の実験及び理論解析、新古典ティアリングモードなどのMHD不安定性の抑制を進めます。また、kWを超える高パワーマイクロ波源は、コヒーレントな電磁波源として、プラズマ加熱、大型荷電粒子加速器、高品質セラミックス開発等、多岐にわたって応用がなされています。既存の実験装置のみならず、建設中のITER、JT-60SA、球状トーラスにおける主要加熱・電流駆動機器の開発に貢献するとともに、高パワーマイクロ波の応用を展開してゆきます。

核融合反応の結果として生成される陽子や中性子などの粒子は極めて高い運動エネルギーを持ちます。例えば、ヘリウムの安定同位体ヘリウム-3と重水素との反応を利用すると、従来は陽子加速器によってしか得られなかった14.7MeVもの高エネルギーの陽子を生成できます。このような反応は僅か百keV程度の運動エネルギーをヘリウム-3や重水素に与えることで生起されます。つまり、核融合エネルギーを利用することで、写真2のような超小型の装置で、印加電圧を遙かに超える高エネルギー陽子を発生させることができます。この装置は、プラズマの慣性静電閉じ込め（IEC）と呼ばれる方式で、我々は、このIEC核融合そのものの研究と並行して、中性子や陽子などの粒子源としての応用の研究も進めてゆきます。

高エネルギー電子ビームを用いることによって、従来のレーザ等にはない機能、波長領域、強度の新しい放射源が実現します。例えば、『夢の光源』と呼ばれる自由電子レーザ（FEL）は、電子ビームから放出される電磁波の相対論的ドップラーシフトを利用することで、波長が連続的に可変、熱損失がない（高効率・大出力）という特長を有します。我々は40MeVの電子ビーム生成と中赤外域FEL発振に成功しており、また、FELをはじめとする新量子放射光源の性能の鍵を握る高輝度電子銃の研究においても我々は世界をリードする成果を挙げています。

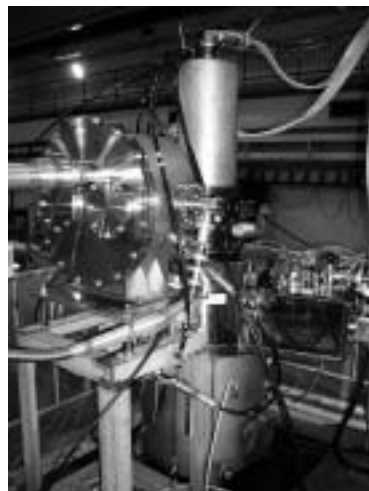


写真1. 高パワーマイクロ波源ジャイロトロン



写真2. 慣性静電閉じ込め核融合装置

情報学研究科 通信情報システム専攻 地球電波工学講座 リモートセンシング工学分野
 生存圏研究所 中核研究部 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/>
 「電離圏F領域-E領域相互作用に関する観測キャンペーンFERIX」

平成19年4月に教授に着任いたしました山本衛です。本分野は以前より、大気レーダーを中心としたリモートセンシング技術の開発と、それを用いた広範な地球大気の研究を推進してきました。生存圏研究所は滋賀県甲賀市信楽町にMUレーダー、インドネシア共和国西スマトラ州に赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) を有しており、両方を全国・国際共同利用に供しています。本分野はこれらの事業推進に密接に関わりつつ、国内外の研究者と幅広い共同研究を推進しています。一方、本分野における現在の研究テーマは、大まかには、(1) 超高層大気 (電離圏)、(2) 赤道を中心とする大気力学、(3) 大気レーダーを初めとするリモートセンシング観測機器や手法の開発、に分類されます。今回は、このうち (1) に関して、本年度に実施した観測を紹介いたします。

電離圏E領域 (高度100~120km)、F領域 (高度200~400km) においては、沿磁力線イレギュラリティ (Field aligned irregularities; FAI) と呼ばれるプラズマ不安定構造が発生します。これらは電波伝搬に影響を与えることから、最近では例えば、GPS測位の劣化要因と懸念されています。一方、電離圏では磁力線並行方向の導電率が高く、電場がほとんど減衰せずに数百kmにわたって伝播するため、E・F領域のプラズマ構造に電磁気的な相互関係があると予想されてきました。我々はFERIX (F-and E-Region Ionosphere Coupling Study) と呼ばれる統合観測を計画し、2004年と2007年に実施して (それぞれFERIX-1及び-2) 電離圏内部に働く遠隔相互作用の検証を行ってきました。

図1に本観測の概念図を示します。E領域のFAI観測のため下部熱圏プロファイラーレーダー (LTPR) を山形県酒田市に設置し、MUレーダーからF領域FAIを観測することで、同一磁力線上に発生するFAIを同時に捉えます。MUレーダーの優れた観測機能と日本の地勢を活かしたセットアップになっています。このような観測が実施できる地点は、世界中でも他に例がなく、本研究を極めてユニークなものとしています。今回のFERIX-2観測では、MUレーダーとLTPRの両方にイメージング観測手法を導入し、2004年を上回る空間分解能を狙いました。さらにLTPRからの電波を新潟市西蒲区間瀬において同期受信することで、バイスタティック・レーダー観測を実施しました。これによってE領域FAIの観測領域を拡大すると共に、2方向からのドップラー速度が観測できます。

図2と図3に、それぞれ2007年7月10日の同時時刻におけるMUレーダー (F領域) とLTPR (E領域) のFAIイメージング観測結果を示します。両者の比較を容易にするため、図2ではF領域の現象を磁力線に沿ってE領域高度にマッピングしています。F領域FAIは北西-南東に伸びる長い波面構造を示しますが、その内部にはいくつかの小領域が形成される様子が明らかになりました。F領域とE領域のFAIは空間的には相補的に分布していますが、時間とともにほぼ同じ速度で西方へ伝搬します。これらから、電離圏の分極電界の生成とそれによる電離圏の遠隔相互作用の一端を明らかにすることができました。

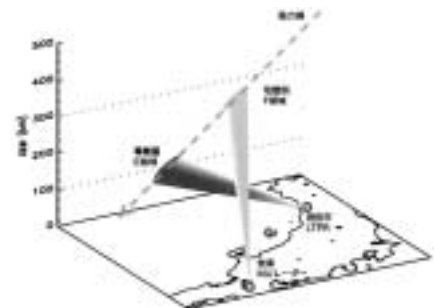


図1. FERIX観測の模式図。同一磁力線に沿う電離圏E・F領域を一気に観測する。



図2. MUレーダーによるF領域FAIイメージング観測結果 (磁力線に沿ってE領域高度に投影したもの)



図3. LTPRによるE領域FAIイメージング観測結果

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」のページに掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科

電気工学専攻

複合システム論講座

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野 (小林研) ☆

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野 (引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野 (和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野 (萩原研)

電気システム論講座電力システム分野 (大澤研)

電子工学専攻

集積機能工学講座 (鈴木研)

電子物理学講座極微真空電子工学分野 (石川研)

電子物理学講座プラズマ物性工学分野 (橋研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (松重研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研) *

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研) ☆

量子機能工学講座量子電磁工学分野 (北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野 (高岡研)

情報学研究科 (大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野 (松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野

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 (佐藤研)

システム科学専攻

システム情報論講座画像情報システム分野 (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

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 (近藤研)

エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座エネルギー応用基礎学分野 (野澤研)

応用熱科学講座プロセスエネルギー学分野

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

診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研) *

診断統御研究系大気圏精測診断分野 (津田研)

開発創成研究系宇宙圏電波科学分野 (山川研)

開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

開発創成研究系生存圏電波応用分野 (橋本研)

京都大学ベンチャービジネスラボラトリー (KU-VBL)

産官学連携センター

研究戦略分野 §

先進電子材料分野 (藤田研)

高等教育研究開発推進センター

情報メディア工学講座情報可視化分野 (小山田研)

学術情報メディアセンター

情報メディア工学講座複合メディア分野 (中村裕研)

注 § 工学研究科電子工学専攻橋研と一体運営

複合システム論講座

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

「精神疾患患者に対する電気痙攣療法の効果指標に関する研究」

電気痙攣療法は、頭部への通電により脳機能を改善する治療法であり、薬物療法による治療効果がみられない精神疾患患者に対する有効な身体療法です。現在は全身麻酔薬により患者を無意識化したうえで、筋弛緩薬を使用して体性痙攣を抑制し、痛感や受傷の危険を排して行われています。

電気痙攣療法の作用機序は明らかになっていませんが、臨床経験から治療効果を発揮するためには複数回の施行が必要であり、それぞれの施行において25秒から50秒程度の脳性痙攣持続時間が必要と考えられています。ところが、電気痙攣療法の電気刺激強度・時間・時機や複数回施行時の頻度・回数などについては、医師の経験に基づいて決定されているため、必ずしも適切に決定されているわけではないと考えられます。また、電気痙攣療法の効果についても脳性痙攣持続時間以外に参考となる客観的指標はなく、医師の経験に基づいて判断されているのが現状です。

そこで、電気痙攣療法の効果を客観的に知ることのできる指標について研究を行っています。このような指標があれば、電気痙攣療法の電気刺激強度などのパラメータを適切に設定することも可能となり、患者の負担を軽減できると考えられます。現在までに行われている研究としては、電気刺激前の脳波に基づいて脳性痙攣持続時間を予測し、電気刺激の時機の決定に利用しようとするものがあります（[1]など）。

我々は、脳波に基づいてこのような指標を構成することを試んでいます。電気痙攣療法時の典型的な脳波を図1に示します。図より、電気刺激の直後に脳性痙攣が発生し、脳波の振幅がいったん小さくなったあと、徐々に大きくなっていることがわかります。また、図からははっきりとわかりませんが、脳性痙攣直後の脳波は低周波成分が多く、その後徐々に高周波成分が増えていって電気刺激前の脳波に戻っていきます。この脳波の変化を

- ・ Spectral Entropy [2]

パワースペクトルの偏在度を示す指標

- ・ Median Frequency [3]

パワースペクトルの中央値にあたる周波数

- ・ Spectral Edge Frequency [3]

指定した割合のパワースペクトルが低周波側に含まれる周波数などのパワースペクトルから得られる指標を利用して数値化し、適当な関数で近似したときの变化速度にあたる値が、患者の回復にしたがって変化するという結果が得られています[4]。今後はさらに詳細な検討とより適切な指標の構成を行いたいと考えています。

参考文献

- [1] F. Nishihara, and S. Saito: Anaesthesia and Intensive Care, 32,661/665 (2004)
- [2] A. L. G. Vanluchene, H. Vereecke, et al.: Anesthesiology, 101,34/42 (2004)
- [3] M. Doi, R. J. Gajraj, et al.: British Journal of Anaesthesia, 78,180/184 (1997)
- [4] E. Furutani, K. Asada, et al.: SICE Annual Conference 2007,2735/2738 (2007)

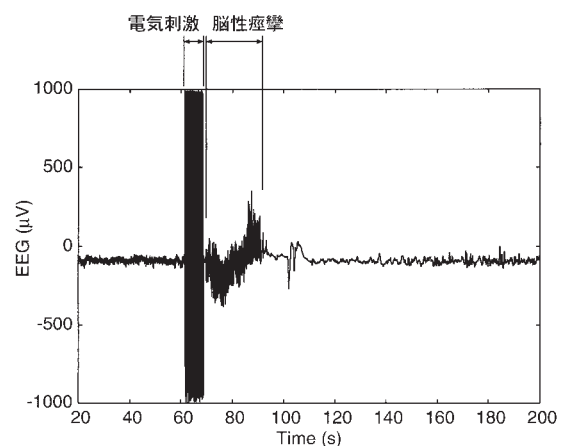


図1. 電気痙攣療法時の脳波

電磁工学講座 超伝導工学分野

<http://www-lab04.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.j.html>

「全超伝導かご型誘導/同期機の開発」

当研究室では、汎用されているかご型誘導機の超伝導化を検討しています。超伝導回転機としては、主として巻線型同期機を対象としたものがほとんどで、誘導機は効率や力率が悪いこと等の理由により、これまで超伝導化の対象としては取り上げられてきませんでした。しかしながら、筆者らはかご型誘導機がこれまで汎用されてきた歴史的背景（簡易な構造、堅牢、保守の容易性、安価、大量生産向き他）に着目し、そうしたニーズを生かした上で、独自の哲学に基づいて超伝導材料の導入を検討しています。この時、超伝導材料を過保護に扱うことはせず、そのポテンシャルを既存技術へ最大限に生かす最適導入を検討することになります。

上記哲学のもと、これまでかご型誘導機の2次側かご型巻線を高温超伝導化することにより、(1)高効率化、(2)高出力密度化、(3)同期トルクと非同期トルクの両立性、(4)定トルクに近い垂下加速特性、(5)過負荷に対するロバスト性など、既存の回転機では実現できない高性能化ならびに高機能化が達成可能であることを明らかにしてきました [1-3]。また、本回転機を高温超伝導誘導/同期機 (High T_c Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) と命名し、世界に向けて発信しています。本回転機に関しては、住友電気工業 (株) 電力・エネルギー研究所 [4] ならびに (財) 国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所 (ISTEC-SRL) [5] との共同研究を通じて、異なった高温超伝導線材についても検討を行っており、特に文献 [5] については、Institute of Physics (英国) より Excellent paper に選ばれました。

本研究では、さらに固定子までも高温超伝導線材によって製作する全超伝導化にチャレンジしています [6]。ただし、超伝導特性 = 抵抗ゼロが成立するのは直流電流に対してのみです。換言すると、どのような応用に対しても固定子巻線を超伝導化すれば良いという天下りの考え方ではなく、交流電流が流れる条件下においても超伝導化の明白なメリットが見出される応用分野にターゲットを絞る必要があります。筆者は、冷却・交流損失特性・機器特性の3課題に関して包括的に検討した結果、現状のポテンシャルとして低速回転機にのみ全超伝導化のメリットがあるという方針を立ち上げ、独自に検討を行っています。このような応用としては、大容量風力発電システムが考えられ、現在中部電力 (株) 電力技術研究所との共同研究を実施しています。

下図には、当研究室が開発したHTS-ISM試験システムの外観写真を示します。2007年度中に、世界初の全超伝導HTS-ISMの実証試験、および非線形超伝導特性を反映した可変速制御法を確立したいと考えています。さらには、超伝導機実用化に際してストレスとなる“冷やさなければならない”という課題に対しても、ブレークスルーを達成すべく精力的検討を実施しています。



図. HTS-ISMの試験システム外観図

参考文献

- [1] G. Morita, T. Nakamura et al., Superconductor Science and Technology, vol. 19, 473 (2006)
- [2] T. Nakamura, et al., Superconductor Science and Technology, vol. 20, 911 (2007)
- [3] 中村武恒, 超電導Web21 (ISTEC) , vol. 3, 7 (2007)
- [4] T. Nakamura, et al., in review
- [5] K. Nagao, T. Nakamura, et al., Superconductor Science and Technology, at press
- [6] 中村武恒 他, 2007年度秋季低温工学・超電導学会、仙台市 (2007年11月20~22日)

電気システム論講座 電気回路網学分野 (和田研究室)

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

「時間解像度と量子化レベルを関連づけた適応信号表現」

1. 波形の高精度表現

研究室ではこれまでに回路の精度保証やトランス解析に関連して、区間数やグレイコード表現などの研究を行ってきました。今回は、アナログ信号をデジタルに変換するときに、波形を精度良く表現する手法として、時間解像度と量子化レベルを関連づけた適応信号表現について紹介致します [1]。

2. $\Delta\Sigma$ 型A/D変換出力の適応デシメーション

高精度のA/D変換器として $\Delta\Sigma$ 型がよく用いられますが、この変換器の出力はオーバーサンプリングされた1bit信号となっています。この信号をマルチビット信号に変換するためにローパスフィルタを通して間引き(デシメーション)を行ないます。このとき、時間ステップ(q_t)を大きくとれば量子化ステップ(q_z)を小さくでき、量子化ステップを大きくとれば時間ステップを小さくとれます(図1左)。実際にどのような(q_t, q_z)をとれば良いかという、波形の傾きが小さいときには q_z を小さく、傾きが大きいときには q_t を小さくとればよいことになります(図1右)。つまり、傾きに基づく適応デシメーションにより、精度良く信号表現ができます。提案手法を傾きが大きい部分と小さい部分をもつ波形に適用すると図2のようになります。左が提案手法、右が固定デシメーションですが、提案手法の有効性が確認できます。また、実際にこの変換が実時間処理で実現できることをFPGAを用いて示しました。

<参考文献>

- [1] K. Hayashi, T. Hisakado: "Signal Expression Based on Equivalence of Time Resolution and Quantization Level," Proc. ISCAS2006, pp.3474-3477, 2006.

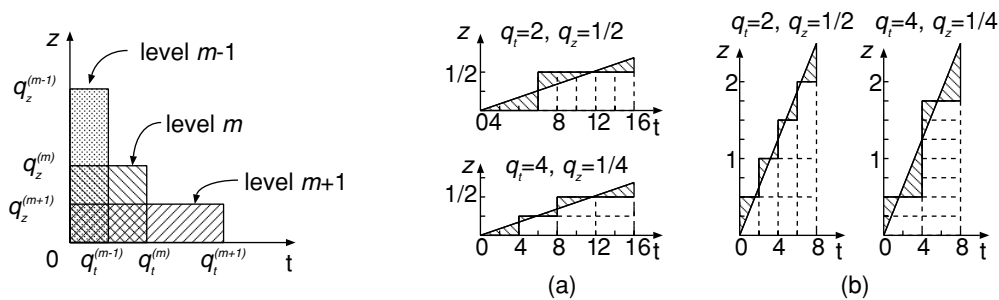


図1. 時間解像度と量子化レベル。傾きが小さい時は q_z を小さくし、傾きが大きい時は q_t を小さくする。

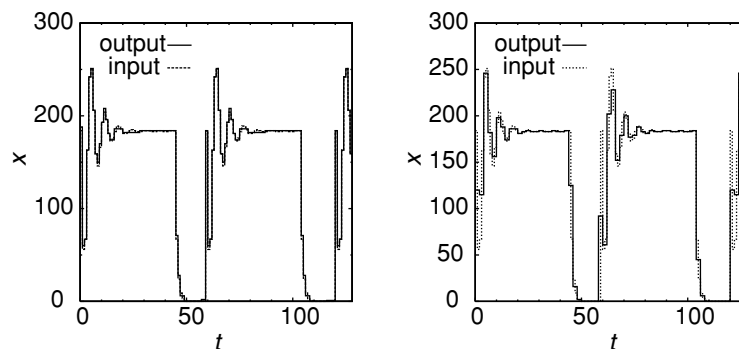


図2. 信号表現 (左が提案手法による適応デシメーション、右は固定デシメーション)

電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「ロバスト半正定値計画に関する研究」

制御工学における最も基本的な問題は、与えられた制御対象に対して最良の制御性能を発揮する制御装置を設計することです。制御対象の動特性を数学モデルで表現し、制御性能の達成度を定量的に評価するための目的関数を導入すると、この問題は制御装置のパラメータを決定変数とする数理計画問題（最適化問題）に帰着されます。とくに、線形システムに対する解析・設計問題の多くは、対称行列に関する正定値性制約（LMI）のもとで線形の目的関数を最小化する半正定値計画問題（SDP）に帰着されることが知られています。SDPは凸最適化問題であり、計算機によって効率良く解けるため、SDPへの帰着をもって制御の問題を“解けた”とみなすことができます。

しかしながら、われわれが常に直面するモデル化誤差の問題、すなわち数学モデルでは制御対象の動特性を完全には表現し得ないという問題を考えるとき、解くべき数理計画問題はより複雑な形となります。例えば、制御対象の物理パラメータの変動範囲は既知であるもののその正確な値は分からないといった現実的な状況下では、制御対象の動特性を単一の数学モデルで表現するのではなく、物理パラメータに依存する形で表現するのが自然です。このとき、物理パラメータの変動に応じた“無限個”の制御対象に対して、所望の制御性能を達成する単一の制御装置を設計することが本質的な問題となります。この問題を数理計画問題として表現すると、粗くいえば無限個のLMI制約を持つSDPとなります。このタイプの問題が、ロバスト半正定値計画問題（ロバストSDP）と呼ばれるものです。ロバストSDPで記述される問題は制御のみならず多岐の工学分野にわたり、その応用も広いため、最適化や制御理論に携わる研究者によってロバストSDPの解法に関する研究が盛んに行なわれています。現在では、本来解きたいロバストSDPの上界値を与える（通常の）SDPを順次構成し、漸近的に真の最適解を求める解法などが導かれています。本研究室では、制御における問題を定式化した際に表れるロバストSDPの特別な構造に着目し、一般には上界値を与えることしか保証されないSDPを解いて得られた解が、真の最適解と一致していることを判定するための条件を明らかにするといった重要な研究分野に取り組んでいます。

以下、研究の一例を示します。ここで考える問題は、与えられた行列 $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbf{R}^{n \times m}$ に対して $\varepsilon^* := \min_{z \in C} \sigma_{\min}([A - zI \ B])$ ($\sigma_{\min}(\cdot)$ は最小特異値) で定義される ε^* を求める問題です。 ε^* は対 (A, B) の“可制御性の強さ”と関連しており、大雑把に言って ε^* の値が大きいほど可制御性が強いということになります。この問題は、一般に局所最適解を複数有する非凸最適化問題となっており、その取り扱いが難しいことが知られています。図1に、ある行列対 (A, B) の $\log_{10}(\sigma_{\min}([A - zI \ B]))$ の値を複素平面上にプロットしたものを例示します。我々の研究では、この問題の最適値の下界値を求める問題がロバストSDPとして定式化できることを示し、さらにこの下界値を計算するための（通常の、したがって計算可能な）SDPを導いています。加えて、下界値が真の最適値と一致していることを判定するための条件を導出し、提案する下界値の計算手法を用いることで、数多くの数値例において実際には真の最適値を計算できることを明らかにしています。同様の考え方が不確かな線形システムのロバスト性能解析にも適用できることなどが明らかとなりつつあり、精力的に研究を進めています。

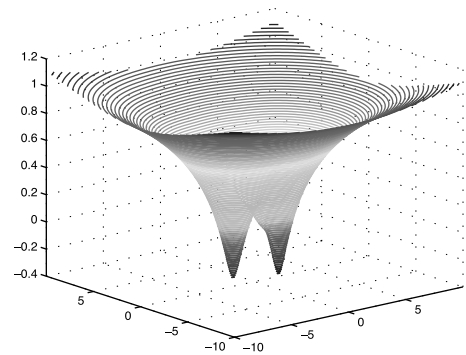


図1. $\log_{10}(\sigma_{\min}([A - zI \ B]))$ の複素平面上でのプロット

電気システム論講座 電力システム分野 (大澤研究室)

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~ohsawa/index.html>

「真空中における絶縁支持物の帯電抑制に関する研究」

地球温暖化問題を背景として高電圧技術者・研究者が近年取り組んでいる課題の一つに、SF₆（六フッ化硫黄）ガスの削減を目的とした高電圧真空遮断器の開発があります。これは、電力用遮断器の絶縁およびアーク消弧媒体をSF₆から真空に変えようとするものです。現在、80kV級までの真空遮断器が普及していますが、さらに高い電圧階級、例えば一点切りで160kV級の遮断器を開発する試みがあります。その開発には消弧方式の問題や冷却の課題もありますが、我々は絶縁、特に真空ボトルの沿面絶縁の合理化に取り組んでいます。真空中では固体絶縁物（ボトル内面）が陰極から放出される電子の衝撃を受けて帯電し、これが引き金になって沿面放電がおきます。そこで、帯電の抑制が重要になります。帯電抑制手法には種々ありますが [1]、ここでは、非常にシンプルで安価な方法について述べます。真空中の帯電現象では、気体中や液体中の帯電現象には無い特徴として、電荷分布を理論的に評価できます [2]。その理論に基づいて、絶縁物の表面に近い真空部での電子の軌道を計算してみると、電子は表面でジャンプする如くに運動しながら陽極に向かいます。絶縁物表面への衝突時には二次電子放出過程によって増殖がおこるため表面は正に帯電し、これが陰極の電界を強めるため、陰極からの電子供給がますます増えるという悪循環（正帰還）に陥ります。そこで、電子のジャンプ高さよりも高い庇を表面に設けてやると電子の運動が阻害されるため、帯電を抑制することができます（図1）。計算では、このジャンプ高さは1 μ m程度あるいはそれ以下でした。実験では円柱型のアクリルやガラスを試料として、紙やすりなどで表面をざらざらの状態にし、帯電に伴う陰極電界の変化を測定しました（図2）。図のように、材料の違いによらず、表面の粗さとともに陰極電界が低下し、粗さが3 μ m程度でほぼ帯電しなくなったことがわかります。また、この抑制効果は試料厚さ300 μ mから50mmの広範囲で確認できました。したがって、この方法は真空中の沿面絶縁を必要とする多くの機器にも応用できます。

[1] O. Yamamoto, S. Markon, H. Morii, "Depression of Insulator Charging in Vacuum by Partial Mechanical Processing", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.14, No.3, pp. 606-612. (2007)

[2] CUE, No.2, p.36 (1998)

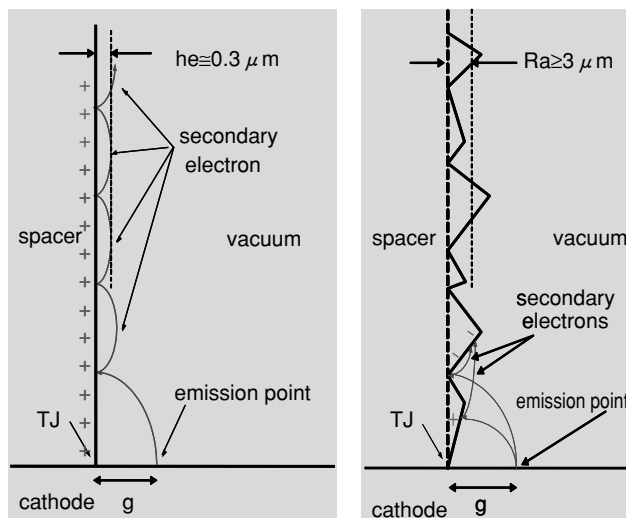


図1. 表面粗さ効果の模式図

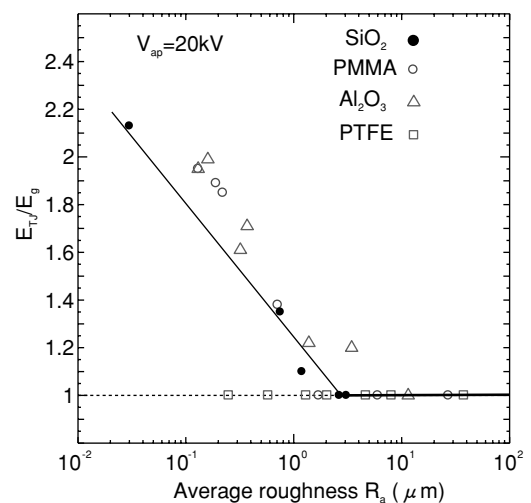


図2. 陰極電界と表面粗さの関係（試料長さ10 mm. EG:印加電界, ETj:印加電界と帯電電荷電界の和）

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野（橋研究室）
<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
 「液相が関与するプラズマの生成とその応用」

近年の持続可能社会実現という社会的要
 求に対応するべく、プラズマの応用分野も
 従来の半導体材料プロセッシングから環境・
 医療・バイオ応用を目的とした応用に変遷
 しています。従来の成膜・表面処理・エッ
 チング等を目的としたプロセスでは、プラ
 ズマ中の活性化学種、イオン、電子、紫外
 光、電磁界の気固界面相互作用を利用しま
 すが、環境・医療・バイオ応用では更に液
 体との相互作用が加わります。現在は、微
 生物・生体を含む炭素系物質の分解・改質
 に有効なOやOHラジカルが相互作用の担
 い手として注目されていますが、用途によ
 り相互作用の鍵となる因子は異なり、幅広
 い用途が期待されます。

本研究室ではこれまでに図1に示すような被覆導線
 と金属導線とが織物構造を有するファブリック電極を
 考案し安定な大気圧プラズマを得ることに成功してお
 り、このファブリック電極ともう一つの金属電極を図
 2のように電解質水溶液中で対向させ、放電用電圧
 とは別の直流電圧を印加することにより電気分解で生
 成される水素や酸素の泡中での放電が可能であること
 を見出しました。現在は、液体が電解質水溶液である
 ことや、生成されるガスがH₂またはO₂であるという制
 約はありますが、液中に外部から気体を導入する必要が
 無いという特徴を持っており、応用面では小
 型・オンサイト処理・分析等への発展性を秘めています。

図3（a）に図1の点線で示した箇所が発生した泡を、
 図3（b）にその内部での放電の様子を示し
 ます。一つの泡の中で金属導線と被覆導線が接する2カ
 所での放電（発光）が確認できます。図4に示
 す発光スペクトルには、H_α線が観測されており、この
 放電が電気分解生成ガスによる放電であることが
 確認できました。

現在は泡のサイズが大きいので、こうした研究も気相電離
 によって生じたプラズマが液相と接するという初歩的
 な研究となっていますが、将来的には微細なナノバ
 ブルを含む媒質も研究対象としてとりあげ、高密度
 の液相と低密度の気相が混在する人工的な二相媒質
 における放電（電離）過程とプラズマ生成、ならび
 にその応用へと研究を進展させたいと考えています。

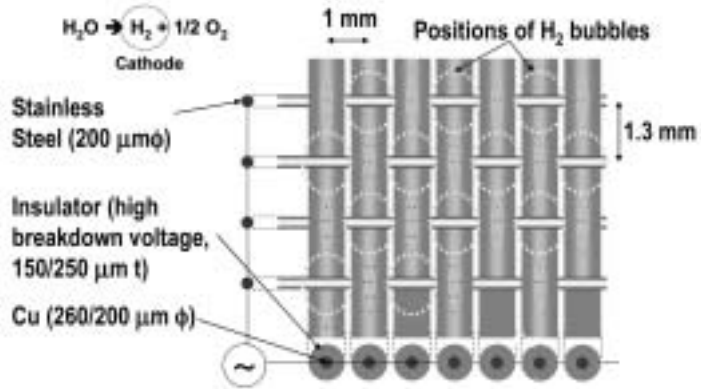


図1. ファブリック電極の構造

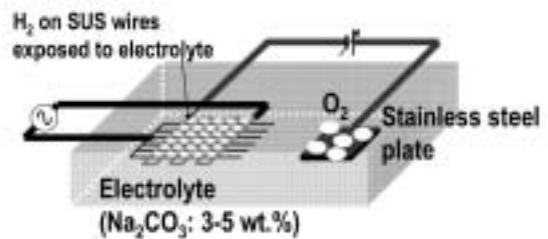


図2. ファブリック電極を電気分解電極として用いた液中泡の発生方法

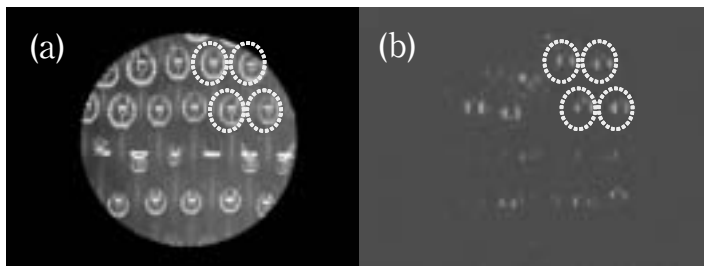


図3. ファブリック電極上に電気分解によって生成された泡
 (a) とその内部における放電 (b) の様子

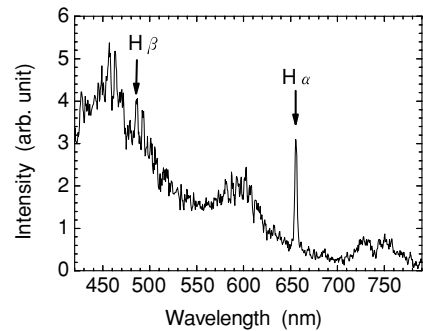


図4. 泡内放電の発光スペクトル

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室）

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

「強誘電低分子における分極反転過程の追跡とフレキシブルデバイス応用に関する研究」

フッ化ビニリデン（VDF）オリゴマーに代表される低分子系の有機強誘電体においては、単一分子内に存在する永久双極子が外部より印加される電圧の極性に応じて回転することで、分極反転が発生するとされています。究極的に言うと、強誘電性が単一分子の分子分極に帰着できる事を示しており、分極反転現象の起源を探索する上でのモデル材料の一つとして注目されています。また、有機強誘電体が有する自発分極の不揮発性を用いたメモリ応用への試みが進められ、有機材料ならではの曲げられる（フレキシブルな）低コスト不揮発性メモリの開発や、将来の超高密度分子メモリの創成が大いに期待されています。このような背景の下、本研究室では、神戸大学のグループとの共同研究の下、VDFオリゴマーを用いた薄膜形成を行い、分極反転中の電気的特性と構造変化を追跡しています。その中で、分極反転過程での個々のVDFオリゴマー分子の運動に関する知見を得ると共に、新しい不揮発性メモリや各種センサへの応用を視野に入れた研究を進めております。

本研究結果の一例を以下に紹介します。VDFオリゴマー薄膜を真空蒸着法により作製し、その薄膜に電界印加（ポーリング）処理を施す前後でのX線回折測定結果を図1に示します。電界印加処理後は、薄膜からのX線回折ピークが顕著に観測され、ポーリング処理に伴う薄膜の構造変化が示されました。この結果は、ポーリング処理により生じるVDFオリゴマー分子の結晶化の促進／分子鎖の回転を端的に示しており、強誘電低分子の分極反転機構の解明につながるデータであります。また、厚さ0.1mmのポリイミド基板上に金属/VDFオリゴマー/金属のキャパシタ構造を形成した試料において、図2に示すような明確なD-Eヒステリシスカーブが得られ、基板の種類を問わず、強誘電性を有する薄膜を作成できるまでに至っております。このポリイミド基板の極率半径が10mm程度になるまで湾曲させた状態でD-Eヒステリシス測定を行った場合でも、残留分極量と抗電界が全く変化しないことも確認済みです。このように、有機材料の大きな特徴である可塑性、柔軟性を生かした電子デバイス作製への取り組みにおいて、本研究室は進展を続けております。

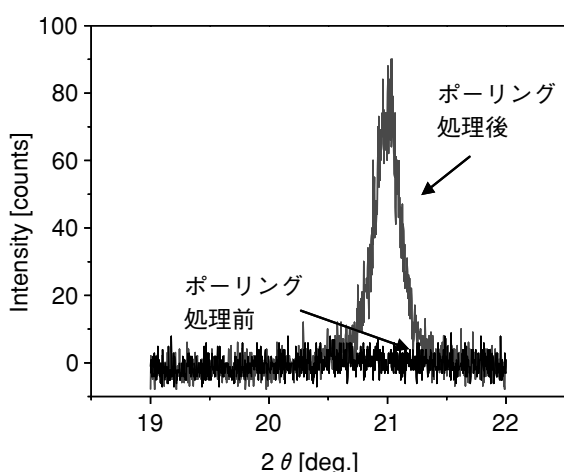


図1. 電界印加処理（ポーリング）前後におけるVDFオリゴマー薄膜のX線回折パターン

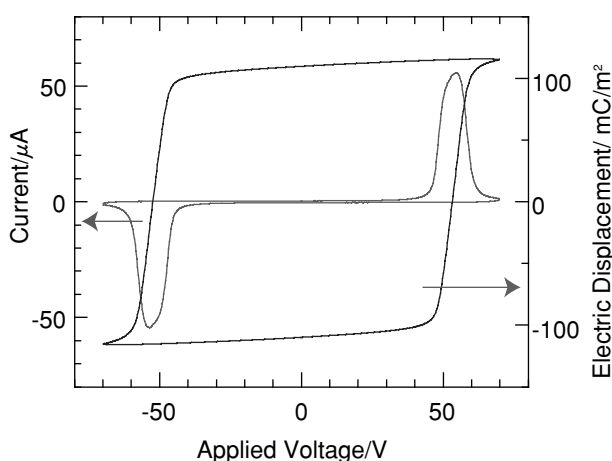


図2. ポリイミド基板上におけるVDFオリゴマー薄膜の分極反転特性

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/>
 「時計を変える光周波数コム—光分周器の開発—」

レーザーの発振周波数を安定化することによって、現在の周波数標準よりも優れた性能をもつ周波数標準、すなわち光周波数標準を実現する研究が近年盛んに行われている。この背景には、光周波数を計測する技術が超短パルスモード同期レーザーを用いる方法で2000年に確立されたことがある。現在の周波数標準は約9.2GHzのマイクロ波領域で定義されているが、ここでたとえば周波数を1秒間計測して測定のために1Hzの変動が観測されたとしよう。9.2GHzに対する相対変動、すなわち周波数安定度は約 10^{-10} となる。これがもし光周波数なら、波長600nmの周波数 5×10^{14} Hzに対して周波数安定度は 10^{-15} 台と 10^4 も改善される。このような光周波数標準の能力は以前から注目されていたが、周波数標準として実用に供するには、その周波数を計測する必要がある。 10^{14} Hzといった高い周波数はカウンタでは直接計測できないので、電氣的に計測できるマイクロ波以下の周波数と比較する必要がある。モード同期レーザーによる方法により、広い波長域のレーザー周波数をマイクロ波周波数と常時比較することがはじめて可能となり、光周波数標準が現実のものとなった。この技術の発明を大きな理由として、2005年のノーベル物理学賞はHänsch博士とHall博士に授与された。

モード同期レーザーは超短パルス光を発生させる方法として広く用いられていて、一定の時間間隔で光パルス列を出力する。この出力光を周波数軸でみた姿はフーリエ変換の関係で、一定の周波数間隔で発振している多数のレーザー光の集合体となっている。その形状から光周波数コム（comb=櫛）とよばれ、その等間隔性から各モードを光周波数の基準点として利用することができる（図1）。光周波数コムの周波数軸上の位置（図1の f_{CEO} ：carrier-envelope オフセット周波数）はスペクトル幅が1オクターブ以上あればコムだけで決定することができ、さらにパルス繰り返し周波数 f_{rep} とモード次数 n からコムの各モードの周波数が決まる。そして、マイクロ波周波数標準に対して f_{rep} と f_{CEO} を安定化しモードのひとつのビート周波数を測定すれば、レーザー周波数を決定することができる。

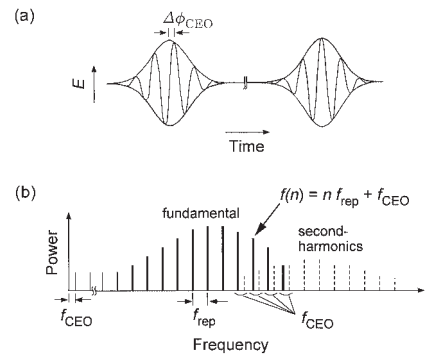


図1. (a) 時間軸 (b) 周波数軸
 でみたモード同期レーザー

この測定では周波数安定度が劣るマイクロ波周波数標準でより安定な光周波数標準を評価するため、長い積算時間が必要となる。これでは光周波数標準の安定度のよさを消してしまう。コムをレーザーに安定化し、光周波数を分周したマイクロ波周波数を f_{rep} として得る、光分周器が実現できれば理想的である。コムとレーザーとのビート周波数と f_{CEO} を、ともに f_{rep} の整数分の1に位相同期させるとこれが実現できる。また、位相同期させるレーザーに発振線幅の狭いものを用意すれば、コムの各モード線幅が狭窄化される。我々はモード同期TiSレーザーの自作からはじめて光分周器の開発に成功し（図2, 3）、30分を超える連続動作を確認した。線幅狭窄化も確認している。

今後はさらに性能向上を目指すとともに、さらに長時間動作可能なシステムを検討していく。また、基準光周波数として超高真空中に静止させた単一のイオンを利用する方法も同時に研究を進めていて、単一イオンの観測まで成功している。光周波数標準とコムを含めたシステムが完成すれば微細構造定数 α の経年変化の観測など、極限精密計測から基礎科学へのアプローチも可能となってくる。



図2. 光分周器（光源部）

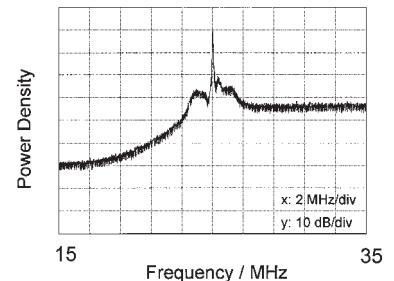


図3. 位相同期中のコムのモードとレーザーとのビート

参考文献) 杉山：レーザー研究、35 (2007) 228.

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/japanese/index.html>

「情報通信ネットワークと電力ネットワークの統合による安全・安心なエコライフの実現を目指して」

1. 電力センシング&コントロールを行う情報通信ネットワーク

コンピュータ、通信システムはこの数十年の間に、大型コンピュータ、交換機を中心とした集中型システムからPC、インターネットによる超分散型システムへと展開が図られ、いわゆる情報ネットワーク社会という従来にはなかった新たな世界が創成された。

こうした視点から見ると、現在集中型発電電が行われている電力ネットワークにおいても、今後PCに相当するものとして高性能かつ小型な蓄電池、発電装置が実用化されることによって、それらをネットワーク化した超分散型の電力ネットワークへと転換していくものと考えられ、その魁として家庭用の燃料電池、太陽電池、高性能蓄電池をはじめハイブリッド自動車、電気自動車が（モバイル発電装置として）商品化されつつある。下図は、そうした超分散型電力ネットワークの概念図を表したもので、数千万台、数億台におよぶ小型電力機器の状態をリアルタイムでセンシングし、最適な電力エネルギー授受パターンを制御する情報通信ネットワーク（ナノ・グリッド：電力エネルギーのセンシング&コントロールを行うセンサーネットワーク）を新たな社会基盤として構築しようというものである。

2. 電力センシング&コントロールネットワークによる安全・安心なエコライフの実現

現在、我々は、わが国のような先進国において、エネルギー消費が大幅に増加し続けており、地球温暖化防止に向けた障害の1つとなっている家庭におけるエネルギー消費削減を目的として、プロアクティブHEMS（Home Energy Management System）の開発を、電気工学専攻の大澤、引原両先生および総務省の情報通信研究機構知識創成コミュニケーション研究センターと共同で行っている。

このシステムの構成、特長は以下のようにまとめられる。

- (1) 家庭内の全ての電気機器に電力センシング&コントロール機能を備えた通信モジュールを付加する。
- (2) 各機器の電力使用パターンをリアルタイムに計測・蓄積し、機器の特性、配置から生活者の行動、生活環境の変化を学習・推定する。（たとえば、家族構成や生活時間帯、家庭内での人の位置・移動状況）
- (3) 学習・推定された情報に基づき、機器を制御し、生活の見守り、快適性を保ったままエネルギー消費の削減を実現する。（たとえば、風呂、トイレでの事故の発見、不要電力の削減、総消費電力の上限制御）
- (4) 小型蓄電池、発電機をホームネットワークに接続し、総合的エネルギー管理を行う。（たとえば、安価な夜間電力の活用、電力消費の昼夜間、季節間平準化、災害時、停電時の自立生活の確保）
- (5) 上記(1)～(4)の機能を実現するための、ネットワークプロトコルの設計と標準化

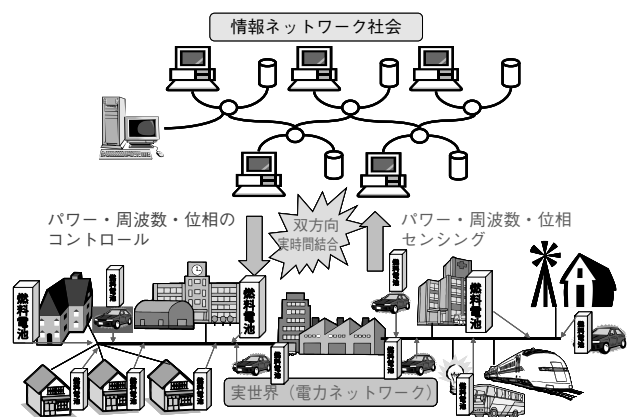


図1. 情報通信ネットワークと電力ネットワークの統合

この研究は、電力、デバイス、通信、情報に渡る電気系の全ての専門分野および産学官が一丸となって取り組むべき課題と考えており専門分野を超えた多くの方々の参画を期待しています。

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/index.html>

「データ相関を考慮した経路制御法を用いた省電力型センサネットワーク」

センサネットワークは、将来のユビキタスサービスを実現するための新しい技術として注目を集めています。センサネットワークでは、小型で消費電力の小さい多数のセンサノードを空間的に分散配置し様々なデータを測定し、マルチホップ無線ネットワークを介してそれら測定データを自律的に収集することを可能とします。これにより、例えばビルの照明・空調制御による省電力化、環境情報収集による防災システムなどの実現が期待されています。センサネットワーク技術の確立に向けた課題の一つに、センサノード間通信やデータ収集処理等における省消費電力化の実現があります。省消費電力化の実現により、センサノードの電力供給やメンテナンスを不要とすることができ、結果としてセンサネットワーク全体のシステム寿命を長くすることが可能となります。

本研究では、センサネットワークにおける測定データの相関に注目し、相関関係の特性に応じた経路制御を行うことにより省消費電力化を実現する方式の検討を行っています。測定データの相関は、空間的に近い場所にセンサノードがあるため測定値が似通ったものになる場合、あるいは周期的に測定する場合に各周期における測定値が大きくは変わらないような場合に発生します。具体例としては、空間的にも時間的にも似通った測定値になりやすい気温や湿度のようなものがそれにあたります。従来の経路制御方式では、これら測定データの相関を直接的に意識することなく、データ転送経路を決定していたため、センサノード間でのデータ転送回数は最小化されることはなく、省電力の観点からは適切なものとは言えませんでした。そこで、本研究で提案する経路制御方式では、このような測定データに相関がある場合、センシング対象となる空間内において、強い相関をもつ測定データとなったセンサノード群を抽出し、できるだけそのノード群内に閉じた経路となるようにノード間でデータ送受信を行います。図1の例では、yes/no型の問い合わせに対して、“yes”と答えるセンサノードだけを經由してデータが転送されていく様子を表します。また、図2に示した消費電力評価例から、提案経路制御方式は従来型の経路制御方式を用いた場合より省消費電力を実現していることがわかります。

センサネットワークの省消費電力化を実現するためのアプローチには、本研究のような経路制御に関するもの以外にも、センサのセンシング・エリア・カバー率を考慮したスケジューリング方式や、ネットワーク内でのデータ集約方式等おおくのものがああります。今後は、これら様々な省電力方式と提案経路制御方式との比較、あるいは提案経路制御方式との組み合わせ等を検討し、実用に供することが可能となるセンサネットワークの基盤技術の確立を目指します。

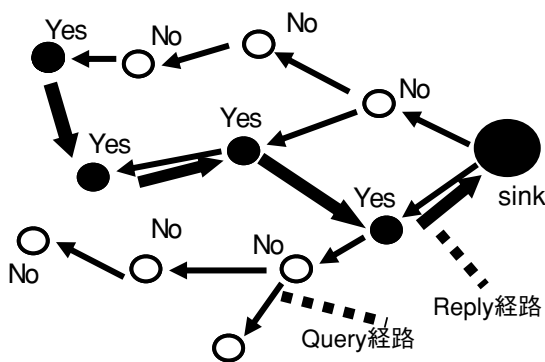


図1. 提案経路制御の例
(Yesと答えたノードだけを經由)

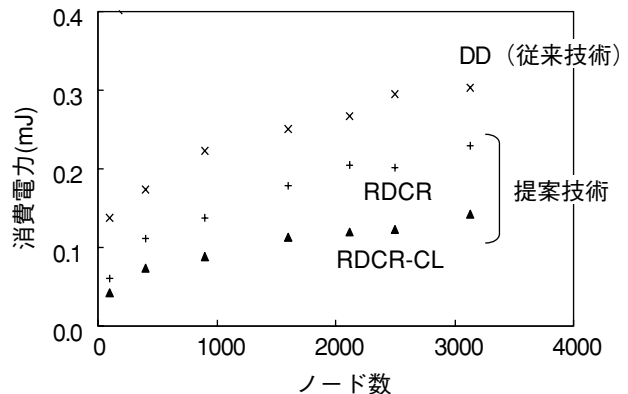


図2. 提案経路制御法の消費電力評価例

集積システム工学講座 情報回路方式分野

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

「組み込みコンピュータビジョンに関する研究」

近年、車載、ロボティクス、エンターテインメント、セキュリティ等の組み込み分野において画像認識技術の応用に対する要求が高まっている。画像認識は一般に膨大な演算量を必要とするため、それをこのような組み込みシステムにおいて実現するためには様々な問題を解決する必要がある。

一般に組み込み用途では消費電力が制限される場合が多い。動作周波数の向上は消費電力の増大を引き起こすため、動作周波数を低く抑えたまま高い演算性能を実現する必要がある。特に、画像認識のような多くの演算量が必要な処理を行う場合には、並列処理の適用が必要不可欠である。このような背景を鑑み、当研究室では並列性が高くかつ認識性能の高いアルゴリズムの研究を行い、その並列実装手法や専用プロセッサの開発を行っている。

当研究室の研究対象の1つに物体認識がある。物体認識は、物体検出と追跡から構成されるが、我々は検出過程に必要な機械学習の手法としてブースティングに着目し、追跡過程に必要な時系列信号処理手法として粒子フィルタに着目している。ブースティングは多数の弱識別器を組み合わせることによって強識別器を構築する集団学習手法の1つであり、ブースティングに基づいて構築された強識別器を用いて検出を行う場合、強識別器を構成する弱識別器はそれぞれ独立に処理を行うことが可能であり、高い並列性を有している。また、粒子フィルタにおいては粒子によって状態を表現し、多数の粒子を用いることにより多数の状態を保持し、最も確からしい状態を選択することによって状態推定を行うため、粒子の数に対応した並列性を有している。これらの手法は並列性が高いだけでなく、その性能も優れたものであり、並列性と性能の両立という目的に適している。

上述の考えに基づき、特に車載などにおいて必要となる歩行者認識アルゴリズムの検討を行った [1]。遠赤外線カメラの画像からブースティングを用いて歩行者検出を行い、スケルトンモデルを用いた粒子フィルタで歩行者の追跡処理を行った。遠赤外線画像と歩行者認識結果（画面右中央の矩形領域）を図1に示す。本手法により遠赤外線画像における歩行者を高精度に認識可能であることを示した。



図1. 遠赤外線画像における歩行者認識



図2. PlayStation3を用いた実時間物体認識システム

次に本研究室では、前述のブースティングや粒子フィルタの処理の並列性に注目し、これらの処理の並列化検討を行った。この結果を基に最新の組み込み向けマルチコアプロセッサであるCell Broadband Engine向けに本手法をソフトウェアで並列実装し、実時間で動作可能な物体認識システムの構築を行った [2]。本システムの概観を図2に示す。また上記の物体認識システムにおいて最も計算量が多い処理は、ブースティングによる物体検出処理であるため、本研究室では本処理のハードウェアの設計も行い [3]、さらなる高速化を図っている。

参考文献

- [1] R. Miyamoto, H. Sugano, H. Saito, H. Tsutsui, H. Ochi, K. Hatanaka, and Y. Nakamura, "Pedestrian recognition in far-infrared images by combining boosting-based detection and skeleton-based stochastic tracking," in *Proc. of PSIVT*, Dec 2006, LNCS 4319, pp. 483-494.
- [2] H. Sugano and R. Miyamoto, "A real-time object recognition system on Cell Broadband Engine," in *Proc. of PSIVT*, 2007, LNCS 4872, pp. 932-943.
- [3] H. Masayuki, K. Nakahara, H. Sugano, Y. Nakamura, and R. Miyamoto, "A specialized processor suitable for adaboost-based detection with haar-like features," in *Proc. of CVPR*, 2007.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤研究室）

<http://www-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「人体の歩行運動を用いたUWBレーダによる高速イメージング技術」

UWBレーダを用いたイメージング技術は犯罪やテロを防止する監視システムへの応用が期待されている。当研究室ではこうした応用において、実時間動作のための高速UWBレーダ画像化のためのSEABED法を開発してきた。SEABED法はアンテナ走査を仮定するが、人体を対象とすることで歩行運動をアンテナ走査の代わりに利用することができる。当研究室ではSEABED法を拡張し、歩行運動と人体形状を同時に推定する手法を現在開発している。

広指向性アンテナを水平方向に2つ設置し、両アンテナを用いてパルスの送受信を行う。人体がアンテナ配置方向と平行に未知の変速度と仮定する。SEABED法ではアンテナ位置 X と受信信号の遅延時間 Y の関係である疑似波面 $Y(X)$ を可逆変換IBSTにより推定形状に変換する。時刻 t におけるアンテナ1及び2の位置をそれぞれ $X(t)$ 及び $X(t)+X_0$ とすると、各アンテナで得られる疑似波面は時刻 t の関数としてそれぞれ $Y_1(t)=Y(X(t))$ 及び $Y_2(t)=Y(X(t)+X_0)$ となる。これら合成関数 $Y_1(t)$ 、 $Y_2(t)$ から $Y(X)$ を求めることで、目標形状が推定できる。目標が十分小さい場合には単純な干渉計法を適用できるが、人体の場合にはこの近似は成り立たず、人体表面の散乱中心が歩行に伴って変化することを考慮した定式化が必要となる。

提案処理法を適用して推定される像を図1に丸印で示す。ただし人体の断面形状は楕円形、歩行運動はx軸正方向に平均1m/secの3次関数のモデルを仮定し、未知であるとして処理している。同図のx印は速度推定を用いずに平均速度の等速直線運動を仮定する場合の像である。提案手法により未知速度の運動の効果を補正して正しい像が得られることがわかる。さらに、図2のように実際の歩行運動を動画撮影し、実際の移動速度を用いて提案処理法によるイメージングを行った。速度の変動成分を図3に示す。この運動を仮定した場合の推定形状を図4に示す。同図より提案手法は歩行運動に対する先験情報を一切使用せずに目標の形状を正しく推定することが可能であることが分かる。

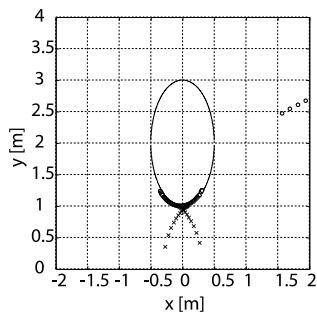


図1. 提案法による推定形状

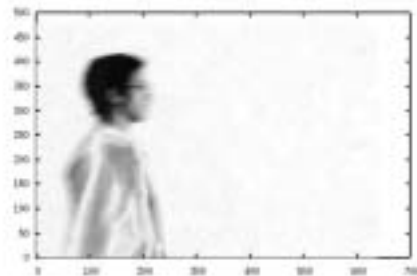


図2. 歩行運動の動画撮影の例

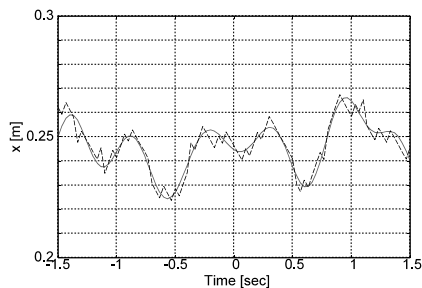


図3. 実際の歩行運動の等速直線運動との差

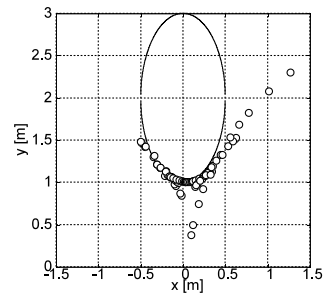


図4. 実際の歩行運動による推定形状

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (近藤研究室)

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

「ヘリカル系プラズマにおける統合シミュレーションコード開発」

太陽のエネルギー源である核融合エネルギーを地上で実現するには、一億度以上の高温プラズマを閉じ込める必要がある。その手段として磁場を用いた方法が検討されている。主に外部コイルに流す電流だけで、ドーナツ状のプラズマ（トーラスプラズマ）の閉じ込めに適した磁場配位（MHD平衡）をつくる「ヘリカル系方式」と、外部コイル系だけでなくトーラスプラズマ中に大きな電流を流すことで、磁場配位をつくる「トカマク方式」とが、有望な磁場閉じ込め方式として挙げられる。ヘリカル系プラズマの例として、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置で閉じ込められるプラズマの形状を図1に示す。一般に、トカマクプラズマは回転対称性のある軸対称プラズマであるが、ヘリカル系プラズマは非軸対称プラズマであるため、対称性を用いることができず三次元解析が必要である。このため、ヘリカル系プラズマでは、計算機を用いた数値解析の役割が大きい。

ヘリカル系プラズマの研究において、これまでも当然、個々の数値解析コードを用いた理論・実験解析が数多く行われているが、これらを輸送・加熱・MHD平衡/安定性などの観点から統合的に解析する必要性が指摘されている。当研究室では、必要に応じて取捨選択できるモジュール群を、有機的に組み合わせることのできる統合シミュレーションコードの開発を長期的目標にしており、関連したさまざまな研究を進めている。このような統合シミュレーションの例として、MHD平衡計算モジュールとプラズマ電流分布時間発展解析モジュールを組み合わせたシミュレーションの結果を図2に示す。先に述べたとおり、ヘリカル系プラズマではプラズマ電流を積極的に流す必要はないが、現実には自発電流などいろいろな要因でプラズマ電流が流れている。しかし高温プラズマの電気伝導度は大きいため、プラズマ電流分布の時間発展の時定数は長く、容易に定常状態にならない。プラズマ電流分布は磁場配位を変化させるので、ここで示したような電流分布の過渡応答解析は、プラズマの磁場閉じ込めを研究する上で非常に重要である。

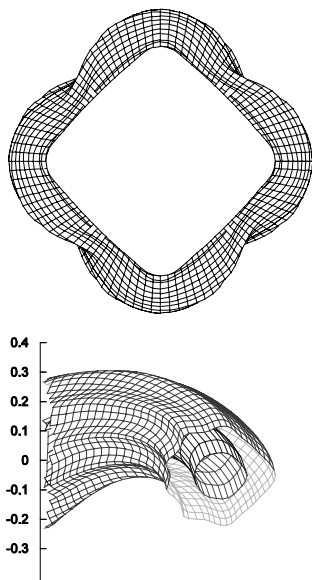


図1. ヘリオトロンJプラズマの上面図と断面図（磁気面）

$\langle \mathbf{j} \cdot \mathbf{B} \rangle$
[AT/m²]

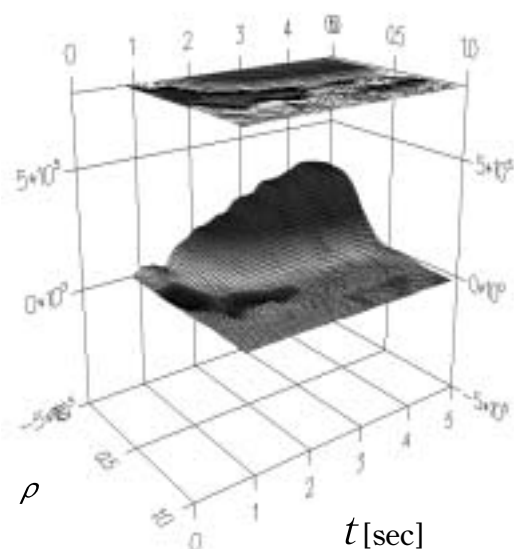


図2. 数値シミュレーションで得られたプラズマ電流分布の時間発展

応用熱科学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

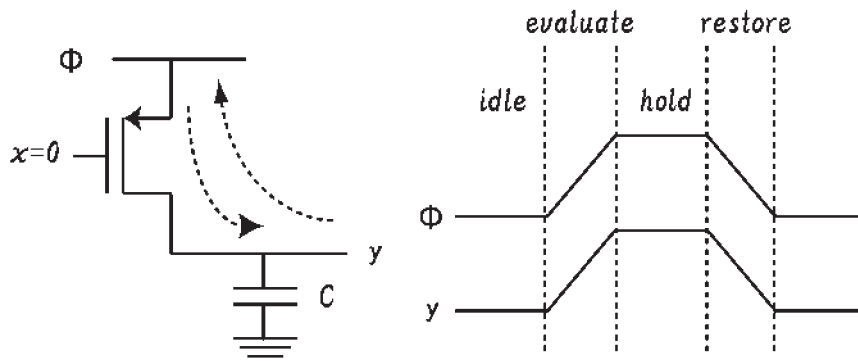
<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「Chain FRAMを用いた新強誘電体機能メモリの内部演算回路に関する研究」

Chain FRAMの概念を取り入れた高密度強誘電体機能メモリの特徴である超並列演算処理機能を最大限に利用し、新しい検索・整列アルゴリズムなどが実行可能な新しい情報処理システムを実現するためには内部演算回路のピーク電流増加に伴う消費電力の問題を解決する必要があります。そのため内部演算回路にCMOS回路を採用します。さらに加えて、1つの方法として回路動作に伴う熱エネルギーを極限にまで減少できる可能性を持つ断熱型CMOS論理（Adiabatic CMOS Logic）回路の可能性について調査・研究しています。

断熱型CMOS論理回路の原理は次のとおりです。標準的CMOS回路では、出力負荷容量 C を V_{DD} に充電するため CV_{DD}^2 のエネルギー量が供給されます。 CV_{DD}^2 の半分のエネルギーは出力負荷容量に貯えられ、残りの半分は充電プロセスで消費されます。出力負荷容量が放電する時、出力は接地に放電されると同時に $1/2CV_{DD}^2$ の量のエネルギーがトランジスタで消費されます。下図にエネルギー回収メカニズムの概念を示します。図に示すように電力供給電圧 Φ は固定されていません。それは V_{DD} に対して傾きを持ちます。PMOSデバイスは抵抗とみなします。抵抗の値が小さい場合、その抵抗における電圧降下は小さく、また抵抗で消費されるエネルギーも小さい。従ってエネルギーの大半は出力負荷容量を充電することに費やされます。電力供給電圧 Φ がrestoreモードの期間“1”から“0”に傾斜しながら低下する時、出力容量 C の電荷はPMOSを経由して Φ へと流れます。こうして出力 y に貯えられていたエネルギーは電力供給源に回収されます。これが理想に近い断熱スイッチングです。

内部演算回路としてコンパレータ（比較器）機能を有する数種類のXOR（排他的論理和）を対象に断熱型CMOS論理回路の適用を検討し、新しい回路を考案、その回路についてSPICEシミュレーションを行った結果、所期の結果を得ました。



参考文献

渡邊圭二、野澤博：電力回収回路を用いた機能メモリ内部演算回路に関する研究、電子情報通信学会2008年総合大会、予稿集

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/index.html>

「核融合プラズマにおける新しい磁場配位の開拓 ～プラズマ中を流れる電流の役割～」

京都大学で独自に創案されたヘリオトロン磁場配位は、ヘリオトロンEに代表される歴代のヘリオトロン装置により、高温プラズマ閉じ込め概念としての優位性が実証されてきました。これらの成果を発展させ、更なるプラズマ閉じ込め磁場配位最適化を目指して、私たちはヘリカル軸ヘリオトロン配位を持つプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」において、新たな磁場配位パラメータ領域を開拓し、磁場閉じ込めプラズマの理解に資するため精力的に実験研究を進めています。今回はプラズマ中に流れる電流とプラズマ閉じ込めとの関係について簡単に説明し、電流を積極的に活用したプラズマ制御に関する研究を紹介します。

プラズマは通常、電子とイオンの総電荷数は同数であるので全体的には電気的に中性です。しかしながら、イオンや電子は複雑な軌跡を描いて運動・衝突するため、両者の差によってプラズマ中に電流が生じます。磁力線が閉じた系の中（磁気面と呼ばれます）では、この電流によって生じた磁束は磁気面に影響を与えるため、それがまたイオンや電子の軌道に影響を与えます。ヘリオトロン型磁場配位は外部コイルにより作られるため、基本的にプラズマ電流を必要とせず安定な磁気面を作ることが出来ます。しかしプラズマの圧力（温度×密度）が要因でプラズマ中に電流（自発電流）が流れます。また、プラズマを“加熱”する際、同時にイオンや電子に運動量を与えるため、その結果電流（駆動電流）が流れます。電流による磁場構造の変化で特に問題となるのは有理面の出現です。有理面とは、ある点からスタートした磁力線が1周ないし数周で同じ場所に戻ってくるような、特殊な磁気面を指します。有理面はプラズマ中に不安定性を発生させ、閉じ込めの劣化を引き起こす場合があります。そのためヘリオトロンJの磁場配位は通常、有理面を避けて設計していますが、電流や圧力の影響で変化します。図1はヘリオトロンJで電流の影響を調べた実験の放電波形を示しており、駆動電流と自発電流の効果で最大2.5kAの電流がトーラス周回方向（トロイダル方向）に流れています。真空容器壁近くにアレイ状に設置した静電プローブの計測から、この電流の効果でプラズマ周辺部の磁場構造が変化していることが分かりました。実際には磁場構造の変化にはプラズマ圧力も寄与するため単純ではありませんが、数値計算からはプラズマ内部の磁場構造も変化していることが予想されています。

最近、電流や圧力の影響を逆手にとって、これらを積極的にコントロールすることで望ましい磁場配位を得ることを目的とした実験を始めました。図2は加熱による駆動電流をトロイダル方向に順方向および逆方向に流したときの実験結果です。順方向の場合、ある時刻から蓄積エネルギーが増加する事が分かり、同時に粒子閉じ込めの改善を示唆する結果が得られました。しかし逆方向の場合にはそれが見られませんでした。この様な閉じ込めの“相転移”は遷移現象と呼ばれ、経済的な核融合炉を目指すためには必要不可欠とされており、未来の発電炉にむけた設計をするためのデータベースの構築、および物理現象の解明が重要な課題となっています。今回の実験では新たに、遷移が始まるトロイダル電流にある閾値が存在するということがわかりました。実はこのときの磁場配位では、閉じ込め磁場内に有理面が存在することが数値計算から予想されています。現在、いろいろなパラメータ範囲で実験を行うことで、遷移現象の物理解明を進めると共に、有理面がプラズマ閉じ込めに与える“良い効果”についても実験的・理論的に解明しようと試みています。

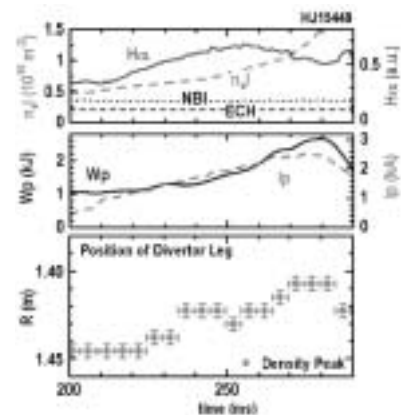


図1. プラズマ電流による磁場構造の変化。トロイダル電流 (I_p , 中) の変化と共に、周辺部のプラズマ密度のピーク位置 (下) が変化しており、周辺部の磁場構造の変化を示唆している。

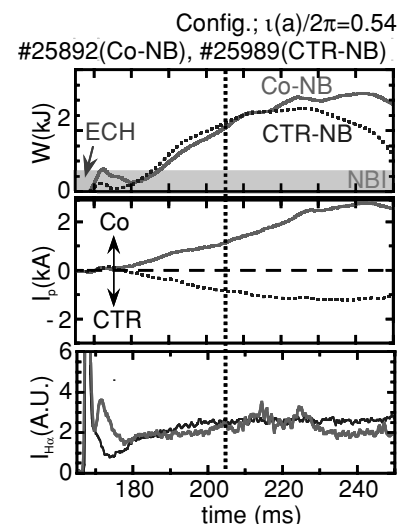


図2. 順・逆方向の駆動電流実験での放電波形。順方向に電流を駆動した場合（実線）のみ、 $t=204\text{ms}$ 付近から遷移現象が観測されている。

生存圏研究所 生存圏開発創生研究系 宇宙圏電波科学分野（山川研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/labo.html>

「宇宙圏電磁環境モニターシステム用センサーノード」

私たちの研究室では、これまで、科学衛星にプラズマ波動観測器を搭載し、地球周辺の宇宙空間におけるプラズマ波動現象を観測することによって宇宙空間がどのような電磁環境のもとにおかれているのかを探査してきました。この研究は、現在は広く惑星間空間にまで広がっており、現在は、2013年に打ち上げが予定されている水星探査機（BepiColombo計画）に搭載するプラズマ波動観測器の開発を行っています。また、その一方で、このような純粋科学的な探求を行うばかりでなく、宇宙空間への人類の本格的な進出に備え、そこでの人類活動がその電磁環境に与える状況をモニターできる装置の開発にも取り組んでいます。人間活動が宇宙電磁環境に与える擾乱をモニターするには、その活動域の多くのポイントにおいてプラズマ波動をモニターする必要があります。これは、大規模宇宙ステーションなど、人間の活動域というのは空間的に一様ではないからです。更に、日常的にモニターすることを考えると、その装置は手軽に扱えるもので、安価である必要があります。このような設計思想は従来から開発している衛星搭載観測器の「高価」、「厳密な取り扱い」、「大規模」というものとは、まったく相反するもので、その実現には、新しい技術展開が必要です。そこで、山川研究室では、数年前より、多点で宇宙電磁環境をモニターできるシステム「宇宙圏電磁環境モニターシステム」の開発に取り組んでいます。これは、図1に示すような小型のモニター装置をターゲットとなる宇宙空間に多数飛散させプラズマ波動強度などをモニターするものです（最後は大気圏に突入して燃え尽きます）。そして、このモニター装置がノードとなって宇宙空間でセンサーネットワークを確立することになります。この宇宙空間に構築されるセンサーネットワーク実現に向けては、様々な開発要素がありますが、本稿ではセンサーノード内に実現される小型プラズマ波動計測装置について述べます。山川研究室では、このノードの小型化に向けて、従来ディスクリット部品で開発されていたプラズマ波動観測器のアナログ回路部を、ASIC（Application specific integrated circuit）内部にワンチップとして実現させる研究に取り組んでいます。アナログASICの開発については、まったくゼロからスタートでした。アナログASIC研究を専門で行っている専門家の先生方に助言をいただきながら学生さん達とともに立ち上げてきました。アナログASIC内部には、差動アンプ、オペアンプ、Low pass filter、Band Pass filter、A/Dコンバーターなど合計数10チャンネルを組み込む予定です。現在は、コンポーネント毎の試作と特性を確認しつつ、その設計の難しさを痛感しながら最終的なデザインを視野に開発を行っているところです（図2）。第一回目の試作は、まったく動作しなかったのですが、今年度までに4回の試作を行い今年度は多チャンネルBPFとそのスイッチングによる多チャンネルスペクトル計測器の基礎開発にも成功しました。更に、今年度は、宇宙での利用を想定して、温度による特性変化を調べる実験も開始しており、今後、更に、宇宙圏電磁環境モニターシステム実現にむけて開発を展開していく予定です。



図1. 小型センサーノード（想像図）



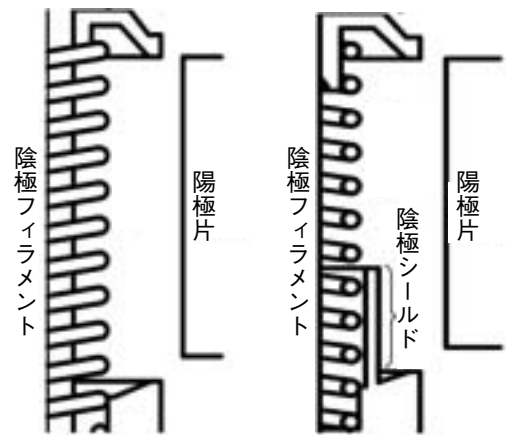
図2. 試作したアナログASIC. 7チャンネルの差動アンプ、LPFなどを実現させている。

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（橋本研究室）
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashimoto.html>
 「民生用マグネトロンの低雑音化の取り組み」

当研究室では、電気工学専攻の協力講座である研究所内の山川研究室、大村研究室と協力し、マイクロ波を用いた無線電力伝送の研究を行っている。本稿では、無線電力伝送システムの送電システムへの応用が期待されるマグネトロンに関するこれまでの取り組みについて述べる。

マグネトロンはマイクロ波電子管の一種であり、70%以上の高い直流-マイクロ波変換効率で発振するマイクロ波発振器である。また、マグネトロンは民生用のマイクロ波加熱源として世界中に広く普及しており、数百Wのマイクロ波を安価で入手することができる。一方で、マグネトロンは発振時の周波数帯域幅が広く、また様々な周波数帯でスプリアスが発生することが知られている。これらの背景から、当研究室では民生用マグネトロンの長所を生かし短所を克服すべく、民生用マグネトロンの低雑音化の研究に取り組んでいる。本研究成果は、従来の民生用途にそのままフィードバックされるだけでなく、無線電力伝送システムあるいは既存のマグネトロンレーダ装置への貢献が期待される。

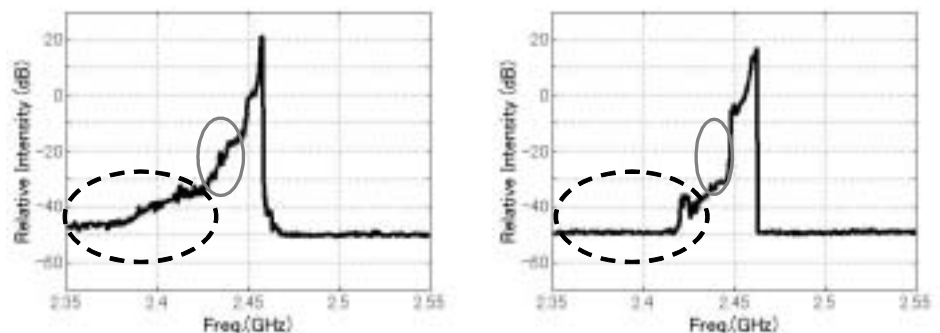
マグネトロンの低雑音化の一手段として、陰極シールド型マグネトロンを民間との共同研究により開発した。図1にマグネトロン管内の垂直方向断面図を示す。図1 (a) は従来のマグネトロン陰極構造であり、図1 (b) は開発した陰極シールド型マグネトロンである。マグネトロン管内の陰極両端部は周辺形状の影響により静電界と静磁界が必ずしも直交しない。従って陰極両端部での電子運動は所望通りとはならず、この陰極両端部での不要な熱電子放出・電子運動はマグネトロンから発生する雑音源の一つと考えられる。陰極シールド型マグネトロンは陰極端部の一方を金属筒でシールドすることにより、不要な熱電子放出・電子運動の抑制を狙ったものである。なお、他方の陰極端部は元々の陰極温度が低く熱電子放出量は少ないと考えられたため金属シールドを施していない。



(a) 従来型 (b) 陰極シールド型
 図1. マグネトロンの垂直方向断面図

図2に民生用マイクロ波加熱装置に使われる半波倍電圧電源を駆動電源としたときのマグネトロンの発振スペクトルの測定結果を示す。従来の発振周波数スペクトルで観測される周波数2.45GHz以下のスプリアスが陰極シールドを施すことにより低減されたことが分かる。

現在は、マグネトロンの低雑音化に加えて、更なる高効率化の研究を実測実験および計算機による3次元粒子シミュレーションの両面から行っている。



(a) 従来型 (b) 陰極シールド型
 図2. マグネトロンの発振スペクトルの測定結果

博士論文概要

【課程博士一覧】

吉田 弘	「ダイレクトコンバージョン方式のDCオフセット低減とソフトウェア無線機への応用に関する研究」	平成17年11月24日
土谷 亮	「A Study on Modeling and Design Methodology for High-Performance On-Chip Interconnection」(LSI内高性能配線のモデル化および設計手法に関する研究)	平成17年11月24日
松田 庄司	「マルチビームレーダーにおける目標搜索性能とビーム形成方式に関する研究」	平成18年1月23日
浅野 勝則	「高耐圧SiC FET及びダイオードの電力変換回路への適用に関する基礎的研究」	平成18年3月23日
大屋 正義	Stability of superconducting magnets cooled by superfluid helium」(超流動ヘリウム冷却超電導マグネットの安定性)	平成18年3月23日
金子 昌司	「ヘリオトロンJにおける高速イオンの挙動に関する研究」	平成18年3月23日
社家 一平	「光時分割多重信号の一括分離技術および非同期サンプリングを用いた光信号品質監視技術に関する研究」	平成18年3月23日
岸根 桂路	「光通信システム用クロックデータ再生回路の高性能化に関する研究」	平成18年3月23日
湯山 洋一	「プロセッサアレイによるシステムLSIアーキテクチャとその設計技術の検討」	平成18年3月23日
一井 崇	「周波数変調方式ダイナミックフォース顕微鏡を用いた有機超薄膜の分子スケール構造・物性評価に関する研究」	平成18年3月23日
木村建次郎	「走査型容量原子間力顕微鏡法の開発と半導体デバイスへの応用」	平成18年3月23日
植松 明久	「An Observational Study of Fog Structure and Dynamics with a Millimeter-Wave Scanning Doppler Radar」(走査型ミリ波ドップラーレーダーによる霧の構造と力学に関する観測的研究)	平成18年3月23日

室岡 孝宏	「機能可変な高速ネットワークノード構成方式の研究」	平成18年3月23日
田中 良典	「2次元フォトニック結晶への3次元構造の導入と光制御」	平成18年3月23日
森山 匠	「有機金属気相成長した酸化亜鉛薄膜の成長特性と基板依存性に関する研究」	平成18年5月23日
西塚 幸司	「半極性および無極性面InGaN量子井戸における発光遷移過程の解明」	平成18年5月23日
川上 剛史	「電子ドーピング型高温超伝導体の固有トンネル特性に関する研究」	平成18年5月23日
前島 圭剛	「有機金属気相成長法ZnOの成長形に関する研究」	平成18年7月24日
欧陽 軍	「A Methodological Study on Fault Diagnosis and Simulation of Man-Machine Scenario in Accident for Nuclear Power Plant」(原子力発電所の故障診断と事故時のマンマシンシナリオシミュレーションの方法論に関する研究)	平成18年9月25日
劉 井泉	「Analytical Study on Nuclear Energy Development from Social Policy Aspects」(原子力開発の社会政策的観点からの分析的研究)	平成18年9月25日
井上 武	「スケーラブルなネットワーク制御に向けた木構造の適用方法に関する研究」	平成18年9月25日
西村 耕司	「Functional Extension of Atmospheric Radar with Digital Receiver Array」(デジタル受信機アレイを用いた大気レーダーの機能拡張)	平成18年9月25日
服部 俊洋	「組み込み用途プロセッサにおける低消費電力化技術の研究」	平成18年9月25日
笈田 武範	「Magnetic Resonance Elastography を用いた生体組織の弾性計測に関する研究」	平成18年9月25日
東野 哲	「Study on Signal Processing and Coding Techniques for High Density Optical Information Storage Channels」(高密度光学情報記憶通信路における信号処理及び符号化技術に関する研究)	平成18年11月24日

呉 準席	「A Study on the Luminous Efficiency Improvement of Plasma Display Panels Based on Spectroscopic Diagnostics of Microdischarge Plasmas」(マイクロ放電プラズマの分光計測に基づくプラズマディスプレイパネルの発光効率改善に関する研究)	平成18年11月24日
濱本 武史	「ダイナミック型メモリLSIの高集積化回路技術に関する研究」	平成18年11月24日
五十嵐喜良	「MF Radar Studies of the Dynamics of the Mesosphere and Lower Thermosphere」(MFレーダーによる中間圏・下部熱圏のダイナミクスに関する研究)	平成18年11月24日
酒井 恭輔	「2次元フォトリック結晶レーザの結合波理論の構築」	平成19年1月23日
山田 義春	「Bi系高温超伝導体の微小構造作製とその超伝導および輸送特性に関する研究」	平成19年1月23日
梅本 泰子	「Studies on Orographic Rainbands Based on Combined Wind Profiler-Weather Radar Observations」(ウインドプロファイラ・気象レーダー複合観測に基づく地形性降水帯の研究)	平成19年1月23日
山末 耕平	「Studies on Time-Delayed Feedback Control of Chaos and its Application to Dynamic Force Microscopy」(カオスの時間遅れフィードバック制御とそのダイナミックモード原子間力顕微鏡への応用に関する研究)	平成19年3月23日
東川 甲平	「瞬時電圧低下補償用高温超伝導SMESの最適設計に関する基礎研究」	平成19年3月23日
吉武 惇二	「天然ガス市場の国際動向と日本の都市ガス事業の展開に関する分析研究」	平成19年3月23日
高松 輝久	「Research and Development of an Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device for Humanitarian Landmine Detection」(人道的対人地雷探知のための慣性静電核融合装置の開発研究)	平成19年3月23日
藤原 淳	「マルチホップ伝送における無線リソース割当法の研究」	平成19年3月23日

A.K.M.Baki	「Study on Beam Forming and Direction-of-Arrival Measurement for Solar Power Satellite」(宇宙太陽光発電所のためのビーム形成と到来方向測定法に関する研究)	平成19年3月23日
新 浩一	「Study on Electrostatic Waves in the Terrestrial Bow Shock Region via Spacecraft Observations」(衛星観測による地球磁気圏バウショック領域における静電波動に関する研究)	平成19年3月23日
外池 昌嗣	「Natural Language Processing Exploiting Topics in the Web Text Archive」(ウェブテキストアーカイブにおける文書のトピックを利用した自然言語処理)	平成19年3月23日
土屋 雅稔	「A Study on Processing of Japanese Functional Expressions and Definition Patterns」(日本語の機能表現と定義表現パターンの処理に関する研究)	平成19年3月23日
瀧 宏文	「Real-Time Three-Dimensional Acoustic Imaging System with A Reflector and Its Applications」(反射鏡を用いたリアルタイム三次元超音波イメージングシステムとその適用)	平成19年3月23日
佐野 明秀	「光ファイバ伝送における波長分散と非線形光学効果の抑圧技術に関する研究」	平成19年3月23日
久木元伸如	「没入可視化空間における注釈を用いた遠隔協調環境に関する研究」	平成19年3月23日
坂本 尚久	「ポイントに基づくボリュームデータの生成および表示技術に関する研究」	平成19年3月23日
山岡 雅直	「A Study on Low-Power SRAM Design under Process Variation of Transistors」(トランジスタのプロセスばらつきを考慮した低電力SRAM設計の研究)	平成19年3月23日
宮戸 祐治	「走査型プローブ顕微鏡を用いたカーボンナノチューブの電位評価に関する研究」	平成19年3月23日
辻野 孝輔	「A Study on 3-D Sound Processing Systems Based on Head-Related Transfer Functions」(頭部伝達関数を利用した立体音響処理システムに関する研究)	平成19年3月23日

須山 敬之	「リコンフィギャラブルコンピューティングの組合せ問題への応用に関する研究」	平成19年3月23日
宮本 龍介	「画像処理に基づく歩行者認識に関する研究」	平成19年3月23日
旦野 克典	「Epitaxial Growth of 4H-SiC and Characterization of Deep Levels for Bipolar Power Devices」(バイポーラ型パワーデバイス実現に向けた4H-SiCのエピタキシャル成長と深い準位の評価)	平成19年3月23日
川島 祥一	「3次元フォトニック結晶による光伝搬制御に関する研究」	平成19年7月23日
鄭 允道	「Basic Studies on Persistent Current Compensator for Superconducting Magnet by Use of Linear Type Magnetic Flux Pump」(リニア型磁束ポンプを適用した超伝導マグネット用永久電流補償装置に関する基礎研究)	平成19年9月25日
卞 志強	「A Study on Augmented Reality Technology for Supporting Field Work of Nuclear Power Plants」(原子力発電プラントの現場作業支援のための拡張現実感技術に関する研究)	平成19年9月25日
Sommani Piyanch	「Neuron Adhesion Patterning on Polymers by Negative-Ion Implantation」(負イオン注入による高分子表面上での神経細胞接着のパターニング)	平成19年9月25日

吉 田 弘 (佐藤教授)

「ダイレクトコンバージョン方式のDCオフセット低減とソフトウェア無線機への応用に関する研究」

平成17年11月24日授与

現在さまざまな通信ネットワークが無線化され、無線機に対する需要が極めて大きくなっている。こうした中、無線機の小型化・低コスト化に対する要求が高まっていると同時に、さまざまな通信システムに対応するために、マルチモード化・マルチバンド化という相矛盾する要求も同時に高まっている。ダイレクトコンバージョン受信方式は無線機の小型化、低コスト化に極めて適した方式であり、また、周波数に依存する受動部品が原理的に不要なため、マルチモード化・マルチバンド化に適している。一方、従来ハードウェアによって実現されていた無線機能をソフトウェア化することにより無線端末にフレキシビリティをもたせ、さまざまな通信システムへの対応を可能とするソフトウェア無線機が脚光を浴びている。小型化・低コスト化の要求に対する一つの解はダイレクトコンバージョン方式、無線機のマルチモード化・マルチバンド化に対する一つの解はソフトウェア無線機である。本研究においては、矛盾する二つの要求を満足するために、マルチバンド化に適した方式であるダイレクトコンバージョン方式をRFフロントエンドに用いたソフトウェア無線機を開発しこれらの要求を満足することが第1の目的である。また、ダイレクトコンバージョン方式の実装上の課題であるDCオフセットの抑圧と低消費電力化をおこなうことが第2の目的である。

最初に、所望システムの帯域幅を一括してデジタル信号に変換し、所望チャネルの信号はデジタル部で選択するソフトウェア無線機のコセプトを提案し、さらに本コセプトを適用したダイレクトコンバージョン方式およびLow-IF方式を用いたソフトウェア無線機基本構成を提案した。また提案したダイレクトコンバージョンおよびLow-IF方式を用いた広帯域アナログ部およびイメージ抑圧機能を持つデジタル部の具体的構成を検討し、1.5GHz帯および1.9GHz帯にて試作、評価をおこなった。その結果、帯域幅については10MHzの広帯域性が実現でき、また、イメージ抑圧比についてはダイレクトコンバージョン方式で25dB以上、Low-IF方式で61dB以上が得られた。

第2に、第3世代携帯電話であるW-CDMAをモチーフとして、DCオフセットを低減したダイレクトコンバージョン受信機を提案した。DCオフセットを抑圧するために、直交復調器にアクティブハーモニクミキサを採用し、さらに、DCオフセットの原因となる局部発振信号のフロントエンドへの漏洩量を減らすため、従来シングルエンドで構成されていたLNAやRFフィルタなどを含めて受信系を全差動化した。受信系全体の特性を評価した結果、DCオフセットを所望信号に比べて-10dB以下に抑圧することができた。さらに、このDCオフセットによる受信性能への影響を確認するために、DCオフセットの実測値に基づいたシミュレーションをおこなった結果、ビット誤り率 (BER) への影響が0.1dB以下であり、無視できるほど小さいことを明らかにした。

第3に、ダイレクトコンバージョン方式の低消費電力化をおこなうため、直交復調器にダブルバランスミキサを用いた改良したダイレクトコンバージョン受信機を開発した。その結果DCオフセットを従来と同程度に抑えつつ、消費電力を2.7Vの電源電圧で31mAと従来の約1/2に削減した。

土 谷 亮（小野寺教授）

「LSI内高性能配線のモデル化および設計手法に関する研究」

(A Study on Modeling and Design Methodology for High-Performance On-Chip Interconnection)

平成17年11月24日授与

集積回路の微細化により、急速にその性能を向上させている。現在市場で販売されているマイクロプロセッサは10年前の大型スーパーコンピュータにも匹敵する演算性能を持ち、その高性能化は今後も続くと考えられている。このような集積回路の性能向上は集積されるトランジスタのサイズを縮小していくことで実現されてきた。トランジスタは「スケーリング則」と呼ばれる法則により、サイズを小さくすることで動作速度向上、集積密度向上、消費電力低下とあらゆる面で性能が向上する。このスケーリング則を原動力として集積回路の性能は発展してきたが、一方でトランジスタとトランジスタをつなぐ配線はサイズを縮小すると性能が低下する。近年、配線のトランジスタに対する相対的な性能低下が大きな問題となっており、「配線ボトルネック問題」と呼ばれて盛んに議論されている。本論文の目的は特に性能への影響が大きいチップ内長距離高速信号伝送用配線について、モデル化および設計手法を確立することである。高速信号伝送用配線に関する問題は、大きく以下のような点が挙げられる。

1. 集積回路内は配線が高密度に集積されており、物理構造から電気的特性を抽出することが難しい。
2. 電気的特性は周波数依存性を持ち、モデル化が困難である。
3. 高速信号伝送には複数の方式があり、各方法で一長一短があるため、設計初期段階での方式決定が困難である。
4. 信号伝送を正しく行なうためには、配線の特徴と信号送出回路（ドライバ）および信号受信回路（レシーバ）を総合的に考えなければならない。

本論文では、物理構造から電気的特性への影響の大きい要素を判別する手法、および伝搬する信号波形の再現において最も重要な周波数を特定する手法を提案し、従来複雑な解析とモデルが必要であった配線特性の表現を簡易なモデルで高精度に実現することに成功した。また、その簡易なモデルを用いることで信号伝搬の性能限界を解析的に見積る手法を提案した。この手法は少数に基本的な設計パラメータから容易に性能を予測することができ、設計初期段階での指針を与える他、性能の将来動向の予測などに有効な手法である。さらに、ドライバ、レシーバ、および信号の反射を抑制する終端について検討を行ない、最適な設計方法を明らかにした。

本研究は、集積回路内信号伝送系を物理構造から回路設計まで網羅しており、物理レベルの設計から回路レベルの設計まで対応できる設計方法論となっている。また、各章で提案された手法は複雑な電気的振舞いを少数のパラメータで解析的に表現していることも大きな特徴である。各パラメータの関係が定式化されていることで、設計最適化だけでなく将来動向予測や製造ばらつきへの感度評価など非常に広範な応用が可能となっている。

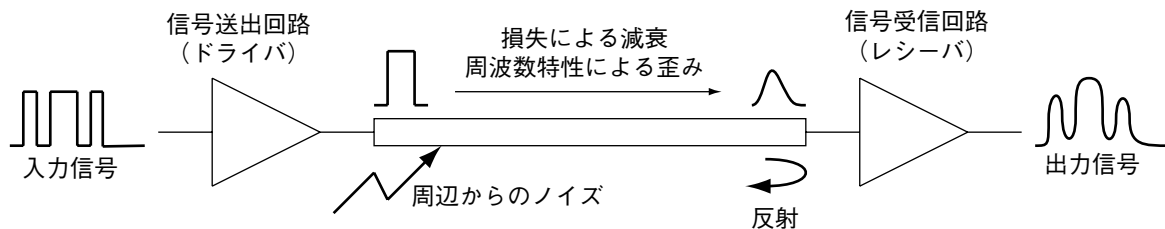


図. チップ内信号伝送における諸問題

松田 庄司 (深尾教授)

「マルチビームレーダーにおける目標搜索性能とビーム形成方式に関する研究」

平成18年1月23日

近年、フェーズドアレーアンテナ技術及びデジタルビーム形成技術の進歩を背景としてマルチビーム方式の搜索レーダー開発が進みつつある。本研究ではマルチビーム方式の搜索レーダーにおいて、その理論性能とレーダー諸元との関係を示すことによりマルチビームレーダーの特性を明らかにするとともに、非線形最適化の手法を用いた系統的な設計方法を述べた。さらに、マルチビームレーダー技術により初めて実現可能となる新しい応用例を提示し、そのビーム形成方法と理論性能を論じた。

マルチビームレーダーの第一の応用例として、バイスタティックレーダーを取り上げた。バイスタティックレーダーは送信と受信のアンテナを離隔設置する形態のレーダーであり、大規模レーダーネットワークへの発展性から近年注目されている技術である。しかし、単一ビームによる走査方法として知られている従来のパルスチェイス法では受信ビーム幅の制限や高速制御の必要があり実用化の最大の阻害要因となっていた。従って、これを解決する手段として複数の受信ビームの束を用いるマルチビーム・パルスチェイス法を提案し、目標位置と所要ビーム数及び受信信号対雑音比の関係を論じた (図1)。

マルチビームのもう一つの応用例である分散アレーレーダーは、複数の小型サブアレーを用いて高い探知性能を達成できる画期的なレーダーとして注目されるべき方式である (図2)。しかし、従来のビーム形成方法では多数のグレイティングローブが発生し搜索レーダーには適さなかった。このため、搜索用のマルチビーム合成方法として、サブアレーベースの入力相関行列の最大固有値に相当する固有ベクトルを用いたブラインドビーム形成方法を提案し、数値計算によりその性能を考察した。その結果、受信アンテナ利得をサブアレー数に比例して増加させつつ、搜索モードでの搜索効率を飛躍的に改善できることを明らかにした。また、捕捉・追尾モード用のビーム形成方法として、ノルム制約付対角荷重Capon法を提案し、グレイティングローブの抑圧とビーム幅減少の防止を両立できることを示した。

近い将来、レーダーを始めとするセンサー技術は、多様なニーズに応えるため、センサーの空間的な分散とコヒーレントな合成からなるネットワークセンサーへ進化していくものと予想される。本研究ではこのような将来のレーダーの基盤技術であるマルチビームレーダーについて、その基本的な性能と設計方法を明らかにするとともにマルチビームレーダーの新しい応用例を示した。これにより本研究が今後のレーダー及び関連分野の研究の発展に貢献するものと期待される。

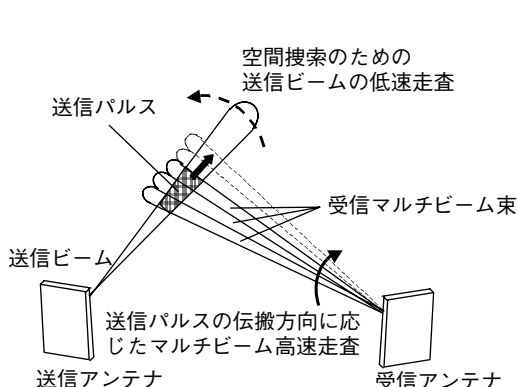


図1. バイスタティックレーダーのマルチビーム・パルスチェイス

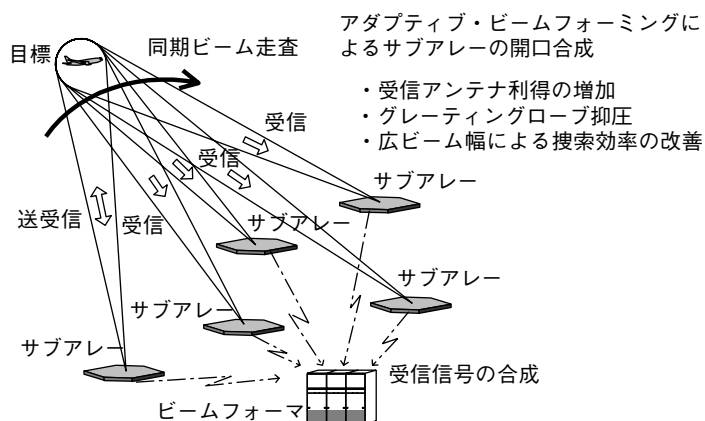


図2. 分散アレーレーダーの概念

浅野 勝 則 (引原教授)

「高耐圧SiC FET及びダイオードの電力変換回路への適用に関する基礎的研究」

平成18年3月23日授与

電気エネルギーを制御するパワーエレクトロニクス技術は基幹産業において重要性を増してきており、パワーエレクトロニクス装置に用いられるMOSFET、IGBTやGTOなどのSiパワー半導体素子はさらなる高性能化が要求されている。しかし、Si半導体のもつ物性限界に直面し始めており、その物性を凌駕する特性を有するSiC半導体が注目され始めている。特に、地球温暖化問題がクローズアップされるようになり、その主因とされるCO₂の排出を削減するため、半導体素子の低損失化が大きな課題になっている。

そこで、本研究ではSiCパワー半導体素子の電力変換装置への適用性を評価するという観点から、高耐圧SiC pinダイオードおよびSiC FETの開発と、回路設計のためのSiC pinダイオードの回路モデルの構築に取り組んだ。SiC pinダイオードでは、ダイオードのp型アノード層にはエピタキシャル膜、ターミネーションには、浅いメサ状の底面にp型領域をイオン注入により形成した新構造のメサJTEを採用した(図1)。メサJTEはメサコーナー部を覆うように形成することにより、ターミネーション領域の電界を緩和し、SiCとしては初めて5kV以上の耐圧と低オン電圧を実現した。また、SiC FETでは、埋込ゲート領域を設けたSEMOSFETとSEJFETを考案した(図2、図3)。SEMOSFETでは、埋込ゲートにビルトイン電圧以下の電圧を印加することにより、埋込ゲート周辺の空乏層を狭め、チャンネルを広げ、蓄積層ばかりでなく、チャンネル領域のより深いバルク中も導電率を高くすることができた。そのため、MOSチャンネル移動度が小さくても、オン抵抗を大幅に低減することができた。SEJFETでは、横型チャンネルおよび縦型チャンネルの2つのチャンネルを有した構造とし、p型埋込領域と最上面に形成したp型領域とによって挟まれた横型チャンネル領域に形成される空乏層をゲートで制御する構成により、高耐圧および低オン抵抗を目指した。試作した結果、Si FETの物性限界の1/230のオン抵抗とでき、SiC FETの高耐圧低損失性を実証できた。また、SiC pinダイオードの回路モデルでは、それをシンプルな回路要素により構成し、解析する回路の構成要素や定数が異なっても適用可能とした。解析波形が実測波形と一致することを実証し、回路モデル作製方法が妥当であることを示した。

このように、SiC半導体を用いたpinダイオード、MOSFETおよびJFETの高耐圧性、Siパワーデバイスに比した大幅な低損失性を実証するとともに、SiCダイオードの回路モデルを構築し、SiCパワーデバイスの電力変換回路への適用に大きく近づけることができた。

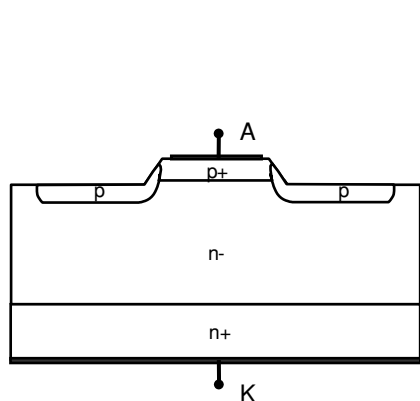


図1. メサJTE pinダイオード

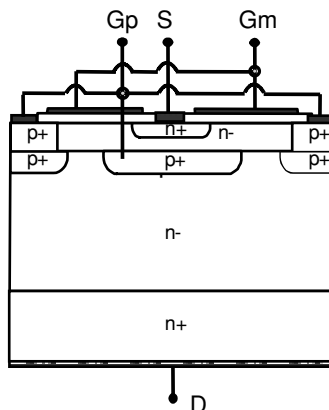


図2. SEMOSFET

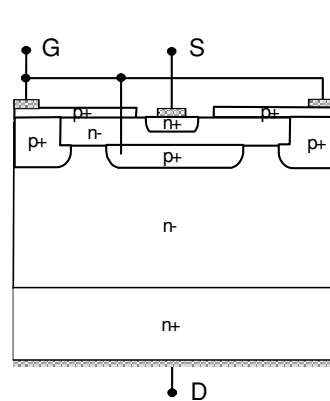


図3. SEJFET

大 屋 正 義 (塩津教授)

「Stability of superconducting magnets cooled by superfluid helium」

(超流動ヘリウム冷却超電導マグネットの安定性)

平成18年3月23日授与

本学位論文は、核融合炉や、加速器、超伝導エネルギー貯蔵装置などに用いられる大型超伝導マグネットの小型化・高電流密度化のために期待されている超流動冷却超伝導マグネットの設計に特に重要と考えられる機械的擾乱に対する安定性に関する研究結果を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) 直径0.5mmのNbTi/Cu複合超電導細線を巻いた単層試験コイルで安定性試験を行い、熱擾乱を模擬したヒータ入熱によって発生した常電導部の回復・伝播特性を明らかにするとともに、超流動冷却の有効性を定量的に示した。また、超流動冷却時には試験コイルの最大回復電流が導体表面状態に大きく依存することを明らかにした。

(2) 熱バランス方程式、分流モデル及び超流動ヘリウム熱伝達データベースに基づく1次元計算コードを開発し、発生した常電導部の回復伝播特性が上述の実験結果と良く一致することを示し、高磁場・高電流密度領域における安定性は従来基準として考えられていた液体ヘリウムの臨界熱流束よりも導体表面状態に依存するKapitza抵抗によって支配されること、より高い安定性を得るためには導体表面のKapitza抵抗を十分に考慮した導体設計を行うことが重要であることを明らかにした。

(3) 核融合科学研究所の核融合実験装置(LHD)に用いられているアルミ安定化大型導体の安定性及びこの導体特有の電磁現象について研究を行っている。まず、超流動ヘリウム中で数十kA級の大型導体の安定性試験を可能にする変圧器型電流供給法を開発している。この方法は、今後、種々の大型導体を用いて安定性試験を行う際に非常に有用なものである。各冷却モードにおける安定限界電流を比較した結果、例えば5.5Tにおいて、飽和He I (4.2K)から過冷却He I (2.2K)に移行することで15%、4.2Kから加圧He II (2.0K)に移行することで50%程度上昇し、過冷却常流動及び超流動冷却の有効性を定量的に明らかにした。

(4) LHD導体表面に施されている黒化処理を除去した試験コイルについて試験を行い、加圧He II冷却の場合、安定限界電流が黒化処理導体より50%も上昇する等、導体表面状態が過渡安定性に及ぼす影響を明らかにした。

(5) 電磁現象と超流動ヘリウムの熱伝達データベースを用いて二次元過渡安定性解析コードを開発して解析を行った結果、発生した常電導部が導体長手方向に対して非対称に伝播する現象を初めてシミュレートし、LHD導体の過渡安定性を記述することに成功している。

以上まとめると、本学位論文は超流動ヘリウム冷却超伝導マグネットの設計に重要な熱擾乱に対する冷却安定性について、NbTi/Cu複合超伝導細線と、臨界電流数十kA級のアルミ安定化LHD導体を用いた安定性試験を行い、NbTi導体を高磁場・高電流密度領域において使用する場合に共通の問題や大型導体に特有の過渡安定性に関する問題点を明らかにすると共に、数値解析によってその原因を検討し明らかにしたものである。

金子昌司 (近藤教授)
 「ヘリオトロンJ」における高速イオンの挙動に関する研究
 平成18年3月23日授与

21世紀のエネルギー源の一つの選択肢である核融合研究は国際熱核融合炉の建設に向かって新たな進展を示している。核融合につながる高温プラズマの閉じ込め研究では高速のイオンを如何に効率よく閉じ込めておくかが大きな課題であり様々な閉じ込め磁場構造が検討されている。この論文では、京都大学で長年培われてきたヘリオトロン型の閉じ込め磁場中で磁場に平行な速度成分を持った高速イオンを中性粒子ビーム入射で、また垂直な速度成分を持った高速イオンをイオンサイクロトロン周波数領域の高周波加熱で生成し、その挙動を解析したものである。

ヘリオトロンJ装置では、トロイダル方向に磁場強度が変化しているがその変化の大きさ（バンピネス）を変えることにより閉じ込めの様子が変化することが確かめられる。イオンのエネルギースペクトルは、高速イオンがプラズマ中の中性水素原子と荷電交換した高速中性粒子をエネルギー分析器によって用いて測定した。また実験結果はフォッカープランク方程式による数値解析を行った。

図1は、バンピネスを変えたときの中性粒子ビーム入射プラズマにおけるイオンのエネルギースペクトルを示している。

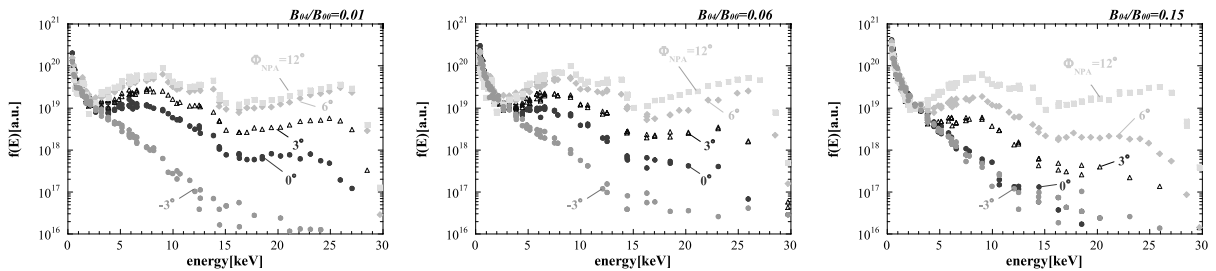


図1. 中性粒子ビーム入射プラズマにおけるイオンのエネルギースペクトル

このスペクトルの解析からバンピネスの大きい磁場配位において高速イオンの閉じ込めがよいことが示された。同様な結果が高周波加熱においても得られ、磁場方向に平行、垂直な速度成分を持つ高速イオンがともに良好に閉じ込められることが明らかになった。電子サイクロトロン周波数 (70GHz) の大出力ジャイロトロンによって生成された高電子温度、低密度プラズマでは図2に示すようにイオン温度

の上昇が認められた。衝突によるエネルギー緩和を考えるとこの密度領域では、電子、イオン間の衝突が少ないので通常はイオン温度の上昇が期待できない。この場合は低密度領域では電子の速度分布がマックスウェル分布から外れて高速度成分が生成されそれによりプラズマ中に新たな波が励起されその波を介して電子からイオンへエネルギーが伝達されたと考えられることを示した。

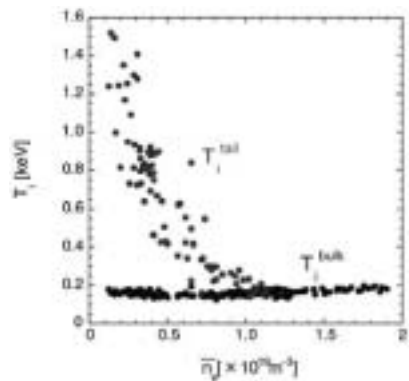


図2. イオン温度の電子密度依存性

社 家 一 平 (佐藤教授)

「光時分割多重信号の一括分離技術および非同期サンプリングを用いた光信号品質監視技術に関する研究」

平成18年3月23日授与

本研究は、光通信分野における将来技術に関するものであり、次世代光ネットワークを実現するための技術の一つである、光時分割多重技術および光信号品質監視技術の確立を目的としたものである。

本研究の前半では、光時分割多重 (Optical Time Division Multiplexing: OTDM) 技術について検討している。OTDM技術は、波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 技術と同様、光通信ネットワークにおいて多量のデータ信号が集中するコアネットワーク部分における大容量化の一手法である。N系列 (Nは2以上の整数) の光信号を時間軸上に多重し、ビットレートN倍のOTDM信号に変換することで大容量化を実現する。本研究ではその要素技術として、OTDM信号の一括分離回路の実現について述べている。従来はOTDM信号からの1系列のみの分離回路をN個並列に動作させる方法が用いられており、部品点数の増加や制御の複雑さが問題であった。本研究では、半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier: SOA) における非線形光学効果を用いた光分離技術とプレーナ型光導波路 (Planar Lightwave Circuit: PLC) 技術を利用し、複数のSOAをPLC上にハイブリッド集積した一括分離回路を作製した。SOA中の非線形光学効果として四光波混合 (Four Wave Mixing: FWM) を用いており、160GbpsのOTDM信号から20Gbpsx8チャンネルへの一括分離の伝送実験を行い、すべての分離信号において良好な特性を得ることに成功した。これにより、別に検討をすすめている多重回路と合わせて、OTDM技術における多重分離の基本機能の実現が可能となる。

本研究の後半では、OTDM等の光伝送技術において問題となる光信号品質監視技術について検討している。光伝送では、光信号ビットレート、変調フォーマット (強度変調、位相変調等)、データフォーマット (同期デジタルハイアラキ、Ethernet、等) に依存しない点 (トランスペアレント性) が大きな特徴の一つある。しかし一般には、各データフォーマットで規定される監視用ビットをモニタする方法等が用いられており、その場合はトランスペアレントな伝送が困難である。本研究ではその点に着目した新しい光信号品質監視技術としてQ値モニタ法の確立を目標とした。ここでQ値とは、光通信システムで用いられる信号品質パラメータであり、信号のビット誤り率 (BER) に1対1で対応したものと定義される。そのQ値は、従来、同期サンプリングより得られる信号のアイダイヤグラムから求めることができるが、信号とサンプリングクロックの同期に必要なクロック抽出回路がトランスペアレント性を妨げる要因となる。そこで、クロック抽出回路を用いることなく信号劣化を検出する評価方法として、非同期サンプリングを用いたQ値モニタ法を考案した。Q値に相当する信号品質パラメータである平均化Q値を新しく定義し品質評価を行う方法、および、非同期サンプリングの工夫によりクロック抽出を用いずに信号アイダイヤグラムを測定し、Q値そのものを正確に求める方法、について基礎特性を検討した。そして光信号品質監視回路を作製して、良好な品質監視特性を得ることに成功した。これらの検討より、将来の全光ネットワークの領域拡大に向けた監視法の確立が期待できる。

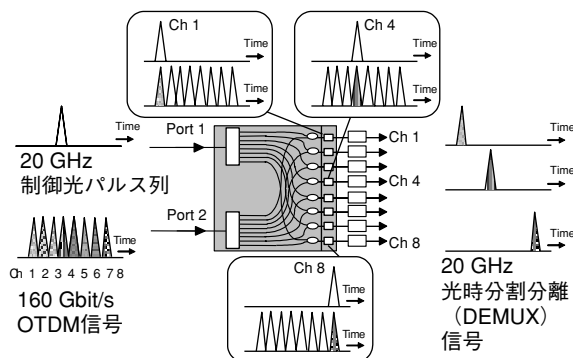


図1. OTDM一括分離回路

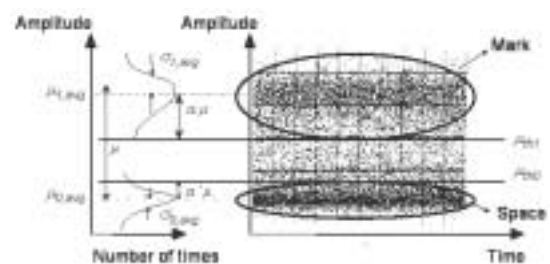


図2. 平均化Q値評価法

岸 根 桂 路 (小野寺教授)

「光通信システム用クロックデータ再生回路の高性能化に関する研究」

平成18年3月23日

SDH/OTN/SONETからGbE/10GbE/FC/10GFCまで光通信システムの発展に伴い、伝送装置・スイッチの高速・大容量化、高機能化が強く要求されている。特に、装置内受信回路(図1)は光ファイバ伝送において信号品質の劣化したデジタル信号から符号再生を行う。すなわちクロック信号を抽出し、データ信号を識別・再生する3R(Regenerate, Reshape, Retiming)機能を実現する。その際の受信回路特性が伝送特性を決定づける。光受信回路において、この機能を実現する回路がクロックデータ再生(CDR:Clock and Data Recovery)回路であり、モノリシック化したCDR-ICの特性が伝送品質を左右する。このようなことから、これまでに学術的・工学的観点からCDR-ICに関するさまざまな研究・開発が行われている。本研究は、光受信回路で用いられるPLL技術をベースとするCDR-ICの高性能化として低ジッタ・高速CDR-IC設計法・回路構成法を確立することを目的として行われた研究であり、得られた成果は以下のとおりである。

1. 国際標準であるITU-Tジッタ規格に準拠するCDR-ICを実現するためのPLLループパラメータ最適化手法の検討を行った。提案手法により、各種ジッタ特性と引き込み範囲が包括的に設計可能となる。ICの試作評価により、各種ジッタ特性をそれぞれ個別に調整していた従来手法に対し、各種特性が統一的に設計可能となることを示した。

2. CDR-ICの安定動作を実現するために、入力信号ジッタの抑圧指標であるジッタトランスファ特性のカットオフ周波数低減と、安定動作の指標である引き込み範囲/同期維持範囲の拡大という両課題がある。これに対し、トレードオフ関係を緩和する多重ループ型回路構成法を提案した。提案構成ICの試作評価により両課題が実現可能であることを実験的に確認し、従来のCDR-ICに対し、より安定動作が可能であることを示した。

3. CDR-ICの高速化設計手法の検討として、位相面解析に基づき高速安定動作の指標となる引き込み範囲/同期維持範囲を算出するモデルとループパラメータ依存特性を考慮した引き込み時間設計式を提案した。識別回路の位相マージン特性を新たに考慮した引き込み範囲設計式により、従来の設計式に対し、短時間でより正確に引き込み範囲を求めることが可能となった。また、引き込み時間設計式により、適用可能なループパラメータの範囲に制限があった従来の設計式に対し、適用可能なパラメータの値に制限がなく、さまざまな用途のCDR回路の設計式として応用可能であることを明らかにしている。さらに、高速CDR-IC回路構成法の検討を行った。従来の1/2の速度のVCOクロック信号で動作可能なハーフレートCDR-ICの検討を行っている。提案回路は線形位相検知回路により位相検知動作を実現し、高速動作可能でジッタ特性に優れている。10Gb/s級CDR-ICを試作評価し(図2)、従来のフルレートCDR-ICよりも、より低ジッタで高速動作が実現できることを実験的に確認した。また提案した引き込み範囲設計式、引き込み時間設計式の有効性を実験的に確認している。

以上、本研究において、CDR-ICの高性能化実現に伴う諸問題に対して、回路設計、回路構成の観点からいくつかの解決方法を提案するとともに、ICの試作評価を行い、それらの有効性を示した。

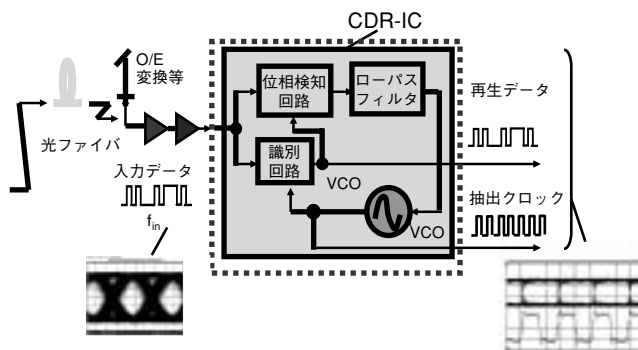


図1. 光通信システム受信回路

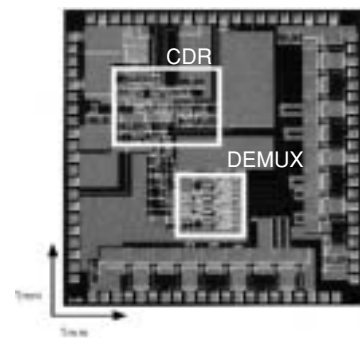


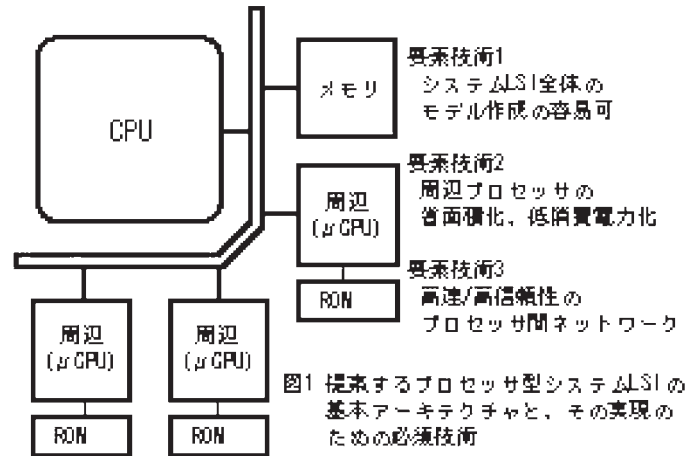
図2. 10Gb/s級 CDR-IC

湯山 洋一 (小野寺教授)

「プロセッサアレイによるシステムLSIアーキテクチャとその設計技術の検討」

平成18年3月23日

近年のシステムLSIの複雑化と、開発期間の短縮化に伴い、プロセッサを主体としたシステムLSIは高機能なものを短期間で実現する有効な方式として注目されている。そこで、本論文は、マルチプロセッサ型システムLSIを実現するために必須と言える、システム全体のモデル化、搭載するプロセッサの設計、プロセッサ間のネットワーク技術のそれぞれについて、その設計やモデル化のための一手法を提案している。



(1) 組み込みシステムのモデル化手法として、システムレベル設計言語を用いブロック間通信を抽象化しシステムをモデル化する手法について提案を行なった。提案手法では、「モジュール内の動作記述」と「モジュール間の通信記述」を分離してモデル化し、通信部分を関数として呼び出すことで各モジュール設計の容化や再利用性の向上を実現する。MPEG符号化システムのモデル化により、提案手法を実験的に評価した。その結果は約1人月でモデル化が可能であり、コード再利用性も90%と非常に高い結果を得ることができた。

(2) プロセッサ型システムLSIの基本構成要素となる省面積、低消費電力化を実現できるプロセッサとして、カスタム化が可能な小規模なプロセッサ、複数プロセッサで資源共有可能なプロセッサを提案した。カスタム化可能プロセッサでは、割り振られる機能に最適化したプロセッサを得る事ができる。資源共有型プロセッサでは、各プロセッサ間での資源を共有することで演算ユニットを効率的に利用することができる。カスタム化が可能なプロセッサにおいては 0.2mm^2 から 0.57mm^2 と用途に応じて様々なサイズのプロセッサが得られることを実証した。資源共有可能なプロセッサにおいては非共有型に対し、消費エネルギーを30~40%削減できることを確かめた。

(3) プロセッサ型システムLSIにおいては、各プロセッサ間は高速かつ高信頼性のネットワークで接続されている必要がある。高速で信頼性の高い通信の実現のための一手法として、交互自己シールド方式を提案した。この方式では符号化により致命的の遷移（隣接する配線間で反対方向に遷移すること）を抑制することで、容量性クロストークノイズによる確定的ノイズを削減することができる。従来手法に比べ符号化による配線数増加や符号化用回路面積増加などがほとんどなく実用性が高い。回路シミュレーションにより、本方式を用いた場合、他の方式に比べて10%から75%程度の性能向上を見込めることを確かめた。

以上、本論文では、マルチプロセッサ型システムLSIを実現するための重要な要素技術である「システム全体のモデル化」、「搭載するプロセッサの設計」、「プロセッサ間のネットワーク技術」におけるいくつかの解決方法を提案するとともに、計算機上での実験により有効性を示すことができた。

一 井 崇 (松重教授)

「周波数変調方式ダイナミックフォース顕微鏡を用いた有機超薄膜の分子スケール構造・物性評価に関する研究」

平成18年3月23日授与

有機分子を電子素子の材料として用いる有機エレクトロニクスが近年さまざまな研究グループによって研究されている。有機エレクトロニクスにおいては、従来のSi、GaAsなどに代表される無機エレクトロニクスと異なり、構成元素間の多様な結合様式から無限に近い材料体系を有することから、無機デバイスには無い優れた特性を有する可能性を秘めている。個々の分子に孤立性がある有機分子を素材とするデバイスにおいては、その特性は分子固有の性質と分子間相互作用によって生じる性質とが重畳していると考えられる。したがって、分子の配向性や電極との間に形成される界面の電子状態の影響を強く受ける。こうした有機デバイスの性能向上のためには、電極-有機分子界面近傍の局所的な構造・物性を分子レベルで評価できるツールが必要不可欠である。

本学位論文は上記の背景の下、走査型プローブ顕微鏡の一種である周波数変調方式ダイナミックフォース顕微鏡 (FM-DFM) を使い、電極基板上の有機超薄膜の単一分子スケールでの評価について行った一連の研究成果を纏めたものである。FM-DFMは①原子・分子分解能を有する、②試料の導電性・絶縁性を問わない、③さまざまな物性評価への応用が可能、といった優れた特徴を有しており、有機エレクトロニクス基礎研究において要求される条件を全て満たしている。その一方で、①有機材料への適用例が少ない、②物性評価において分子スケールのコントラストが何を意味するのか未解明などの課題が存在する。

このような問題を解決するため、本研究ではさまざまな導電性基板-有機超薄膜という系での観測を行ったが、ここではその一例としてAu (111) 基板上における銅フタロシアニン (CuPc) 単層膜のFM-DFM像を示す。CuPcは図1 (a) に示すような四つ葉状の平面構造を有しており、分子全体としての電気双極子を有していない。しかし、金基板上に吸着させたとき、基板との相互作用により基板の表面電位が上昇することが巨視的な系での研究により明らかになっている。図1 (b) および (c) はFM-DFMにケルビンプローブ原子間力顕微鏡 (KFM) という手法を組み合わせると同時に得られた表面形状像および表面電位像をそれぞれ示すが、いずれにおいても分子スケールのコントラストが明確に観測されており、分子直上の表面電位が分子間のそれよりも高くなっていることから、分子と基板との間に形成された個々の界面電気双極子を検出していると結論付けた。この結果は従来の巨視的な系での測定結果と矛盾しない。さらに図1 (d) に示すように、高分解能観察によりCuPcの四つ葉構造をFM-DFMを用いて直接可視化することも可能である。本研究結果で示したように、FM-DFMは有機超薄膜の分子スケール評価ツールとして極めて有用であり、今後有機エレクトロニクス基礎研究への応用が大きく期待できる。

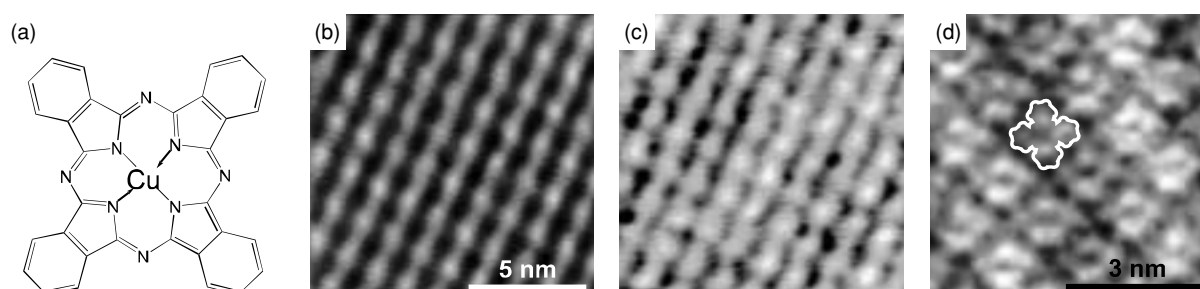


図1. (a) CuPcの分子構造, (b) Au (111) 表面上CuPc単層膜のFM-DFM像, 12nm×12nm. (c) 図1 (b) 同時に取得した表面電位像 (明るいコントラストが他表面電位を示す). (d) サブ分子分解能FM-DFM像, 6nm×6nm.

木村 建次郎 (松重教授)

「走査型容量原子間力顕微鏡法の開発と半導体デバイスへの応用」

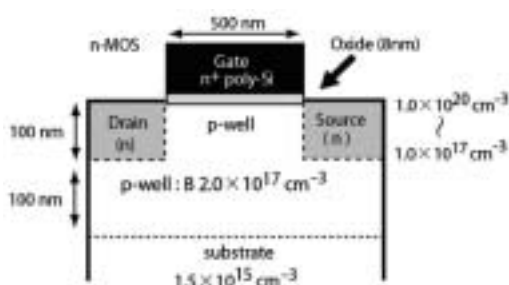
平成18年3月23日授与

半導体デバイスの微細化において、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) のチャンネル長を縮小化すると、チャンネル領域の電荷量がゲート電圧だけでなく、ソース及びドレイン領域の空乏層電荷や電位分布の影響を強くうけるようになる。その結果、ゲート電圧により制御可能な電荷量の割合が減少し、短チャンネル効果と呼ばれる不良動作が発生する。この短チャンネル効果を防ぐために、イオン注入により3次元的なポテンシャル構造をデバイス内部に作り込む。この際、超微細化デバイスにおいては、特に注入された不純物原子の分布に対する要求は一層厳しいものになってきている。ところが、デバイス研究開発又は製造の現場では、デバイスが正常に動作したか否かで設計された不純物原子配置に近い配置が作られているか否かを判断しており、不純物原子分布に由来しデバイス動作を決定するキャリア密度分布は未知のままになっているのが現状である。そのため、今後、微細化デバイスを、効率良く開発するためには、このキャリア密度分布を高精度に測定する技術が求められていた。

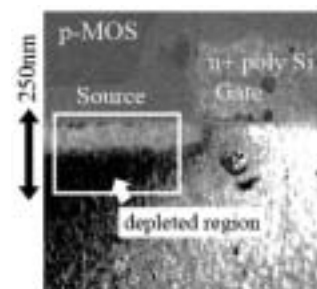
この要求に応えるために、本研究では、デバイス内部のキャリア密度分布を高精度に測定可能な、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) を応用した手法である走査型容量原子間力顕微鏡法 (Scanning Capacitance Force Microscopy: SCFM) を新たに開発し、実用化させた。その基本原理は、AFM探針と半導体試料間で構成させるMOS構造における容量を探針が受ける静電気力として計測するものである。MOS容量は、キャリア密度変化に対して単調に変化するため、MOS容量を測定することで、キャリア密度分布を得ることが可能となる。本研究で提案したMOS容量を静電気力として検出する方法は、従来の電氣的に検出する方法に比べて大きな優位性を持っている。電氣的に容量を検出する場合には、容量センサーと呼ばれる高周波LC共振回路を用いるが、容量検出性能を決定するその共振Q値は寄生抵抗等の影響で、通常数十程度である。それに対し、本研究で提案した手法の場合、AFM探針の機械共振特性を利用するため、真空環境下では、その共振Q値は数万に上り、高感度にMOS容量を測定することが可能となる。実際の測定では、AFM探針と半導体試料間に交流電圧を印加し、AFM探針に誘起される静電気力に含まれる3倍波成分を検出する。3倍波成分 $F_{3\omega}$ は以下の式で表される。

$$F_{3\omega} = \frac{1}{8} \frac{\partial^2 C}{\partial z \partial V} \Big|_{V=V_{dc}} V_{ac}^3 \cos 3\omega t$$

C はMOS容量、 z は探針-試料間距離、 V は探針-試料間電圧、 V_{ac} は交流電圧の振幅である。2倍波成分は、探針-試料間容量に比例するため、測定系の浮遊容量の影響を多大に受け、高精度な測定が困難であるが、3倍波成分は、空乏層形成に由来した半導体試料固有の成分であるため、探針直下の情報を高感度に測定することが可能となる。この原理に基づき本研究では、下図 (a) に示すSi-MOSFET内部の2次元キャリア密度分布の測定に成功した (下図 (b))。ソース領域及びチャンネル領域におけるキャリア密度に対応したコントラストが得られている。本研究における成果は、今後のデバイス開発を促進させ、半導体産業を大きく前進させるものであると期待される。



(a) SCFM測定を行ったSi-MOSFETの構成図



(b) SCFM測定による2次元キャリア密度分布

植松 明久 (深尾教授)

「An Observational Study of Fog Structure and Dynamics with a Millimeter-Wave Scanning Doppler Radar」

(走査型ミリ波ドップラーレーダーによる霧の構造と力学に関する観測的研究)

平成18年3月23日授与

霧は視程を悪化させ交通等に支障を生じるなど社会的影響が大きいことから、その発生・発達メカニズムの解明が期待されている。最近の観測やシミュレーションの研究で、霧が一様ではなく不均一に分布していることや、背景の風速場や風速シア（風速の高度勾配）といった力学場が霧へ及ぼす影響が指摘されている。しかし、これまで霧の3次元構造の観測がほとんど行われていなかったことから、実際に霧がどのような空間構造を持ち、どのような力学場によってその構造が決定されているかは十分に理解されていなかった。その最大の理由は、一般的に利用されている降雨観測用のマイクロ波帯気象レーダーが、より粒径の小さな雲霧粒子に対して感度の制約から観測困難であったからである。

本論文では、霧について十分な感度を有するミリ波帯を用い、3次元走査可能でかつ背景風を同時観測可能な35GHz帯ドップラーレーダー（図1）を利用して北海道釧路地方において霧観測を実施し、霧の3次元構造と風速・風速シアとの比較解析により得られた成果を述べた。主な成果は以下の通りである。

1. 1km程度の水平スケールのセル状構造（図2）を持つ霧の3次元構造やその時間変化を初めて捉えることに成功した。背景風と比較することにより、風速シアによって霧のセル状構造の傾きが変化すること、及びエコーパターンの動きが霧上層部の風速と一致することを示した。

2. 強い風速シアによって発生するケルビン・ヘルムホルツ不安定の影響を受けた360m程度の水平スケールを持つ霧のロール状構造を初めて観測することに成功した。

3. 大気重力波の影響を受けた1.5km程度の水平スケールを持つ霧のバンド状構造について、その水平構造や時間変化を初めて観測することに成功した。さらに、ケルビン・ヘルムホルツ不安定と大気重力波という2つの力学的要因が複合して作用し、異なる2つの水平スケールを持つ霧の構造が生成されていることを示した。

このように、背景の力学場が霧の3次元構造に及ぼす影響が観測によって初めて明らかになった。本成果は今後の霧や大気境界層のモデル化や、霧のメカニズムの更なる解明に寄与することが期待されている。



図1. 35GHz帯走査型ミリ波ドップラー気象レーダー

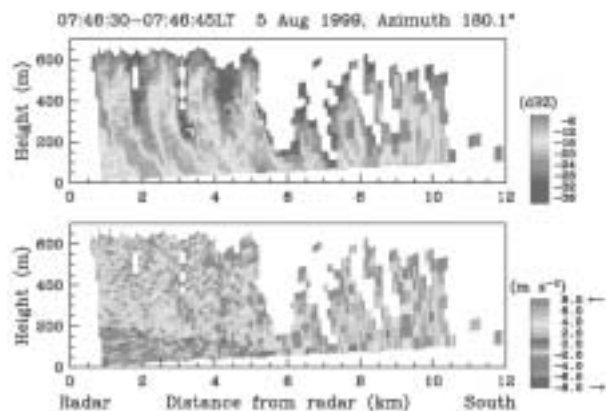


図2. ミリ波レーダーで観測されたセル状構造を持つ霧の(上)断面構造、及び(下)風速分布

室岡孝宏（中村行宏教授）

「機能可変な高速ネットワークノード構成方式の研究」

平成18年3月23日授与

ネットワークで結ばれた送信装置と受信装置間で、送信装置から発せられた情報をそのまま受信装置に渡すのが今日のネットワークの機能である。このネットワークでは情報の加工は発生しない。しかし、超高精細映像等の広帯域情報を多地点に配信するアプリケーションや、無数の小型端末からデータを収集し統計データを生成するアプリケーション等が、今後普及すると考えられる。これらのアプリケーションを、効率的にネットワークを介して実現するには、今日のネットワークの枠を超えて、図1に示す様なアプリケーション機能の一部をネットワーク内に取り込んだ新たなネットワークが必要になる。この、新たなネットワークはアクティブネットワークと呼ばれている。

アクティブネットワーク内でアプリケーション機能を実現するのは、今日のコンピュータネットワークに見られるルータ等に相当するネットワークノードであり、ここではProcessing-node (PN) と呼ぶ。PNは基本的にはコンピュータを用いても実現可能であるが、今日でも数十Gbpsに達するネットワーク回線帯域を満たすことは困難である。そこで、既存のコンピュータとは異なる手法でのPN実現が必要になる。

ここでは、ネットワーク内で流通するパケット内情報の粒度に着目した。パケット内の情報は、あて先や送出元のアドレス等の決まった要素のものと、様式が一意に定められないユーザデータで構成される。図2に示す様に、パケット自体や、様式が固定されている部分に対しては、それに合わせた粗粒度の機能要素 (Coarse-grain function) を組み合わせることで、多様な処理を実現することができる。一方、粒度、様式が一意でないユーザデータ (Payload data) については、細粒度の処理 (Fine-grain function) を行うコンピュータでの処理が適している。粗粒度機能の部分は、専用設計した回路を使用することで高速処理が実現でき、ネットワーク回線の帯域を満たすことが可能になる。

本論文では、機能の可変性と高速性を両立するために、上記の粗粒度のパケット処理の機能要素を専用回路として自由に組み合わせることで目的の機能を実現するPNの構成手法を提案すると共に、提案手法に基づいて試作した1 Gbpsのネットワーク回線を複数接続可能な装置を紹介する。さらに、装置実現に必須な部品として開発した通信処理向けのField Programmable Gate Array (FPGA) についてもその詳細を議論する。

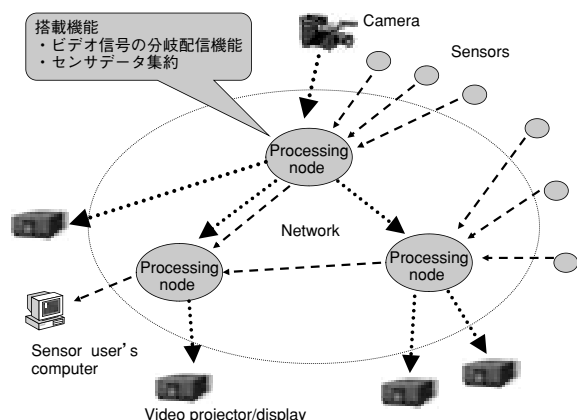


図1. アプリケーションに対応した情報処理が可能なノード装置で実現されるサービス例

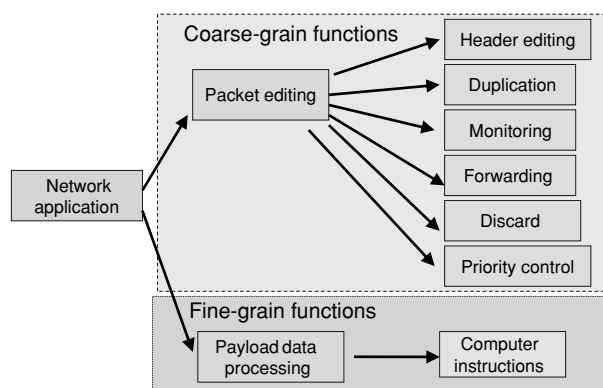


図2. 多様なパケット処理を実現する要素機能の分類

田中良典（野田教授）

「2次元フォトニック結晶への3次元構造の導入と光制御」

平成18年3月23日授与

フォトニック結晶は光を微小領域で自在に制御可能な光ナノ構造として近年大きな注目を集めている。そのうち、2次元フォトニック結晶は、スラブ構造の採用により、媒質内波長の3乗程度の非常に小さいモード体積ながら 10^6 以上の Q 値をもつ微小共振器を実現できるなど、近年著しい進展を遂げている。一般に2次元フォトニック結晶の設計には、2次元面内のパラメータに着目した検討が行われているが、本論文では、新たな自由度として3次元構造を導入するという手法の提案を行うとともに、実際に、3次元構造の導入により、点欠陥光ナノ共振器からの放射パターン制御や極微小偏波変換機能などの光制御が実現可能なことを理論と実験の両面から実証しており、3次元構造導入の有用性を明らかにした。本研究で得られた主な成果は、以下のとおりである。

1. まず、2次元フォトニック結晶中の点欠陥光ナノ共振器への3次元構造の導入に関して検討を行った。共振器からの放射パターンに着目して理論解析を行い、例えば図1に示すような適切な3次元構造の導入により放射パターンの制御が実現可能であることを示した。さらに、集束イオンビームを利用した3次元構造の導入プロセスに関して検討を行い、加工に利用するガリウムイオンが与える影響およびガリウムイオンの除去法を示した。さらにこの手法を利用して作製した試料の放射パターン特性が理論解析結果とよく一致することを示した。

2. 続いて、2次元フォトニック結晶中の線欠陥導波路への3次元構造の導入に関して検討を行った。ここでは、まず、図2に示すように導波路に隣接する空気ロッドを斜柱とすることにより、超小型偏波変換器が実現可能なことを、理論解析により実証した。次に集束イオンビームを利用し、図2に示すような偏波変換器の作製を行い、実験的にも偏波変換機能が実現可能なことを示すことに成功した。本偏波変換器の長さは $3.4\mu\text{m}$ と非常に小さく、偏波ダイバーシティ機能の実現への重要な一歩を与えるものである。

3. 2次元フォトニック結晶に3次元構造を導入した場合の影響についても検討を行っている。特に、上下非対称性が発現することに着目し、TE-likeモードとTM-likeモードの直交性が崩れ、光ナノ共振器の Q 値の低下などの損失が生じることを指摘している。また、この影響を防ぐための手段として、TE-likeモードとTM-likeモードの双方にバンドギャップを持つ構造利用の提案を行った。

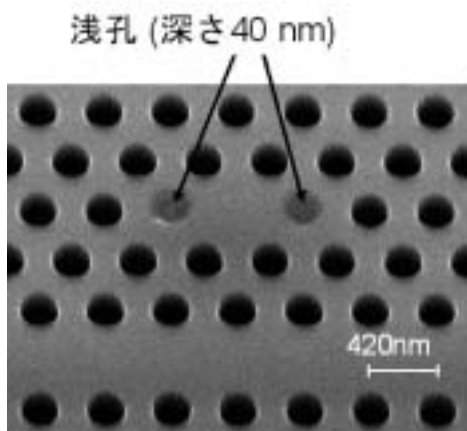


図1. 3次元構造を導入した2次元フォトニック結晶共振器の電子顕微鏡像

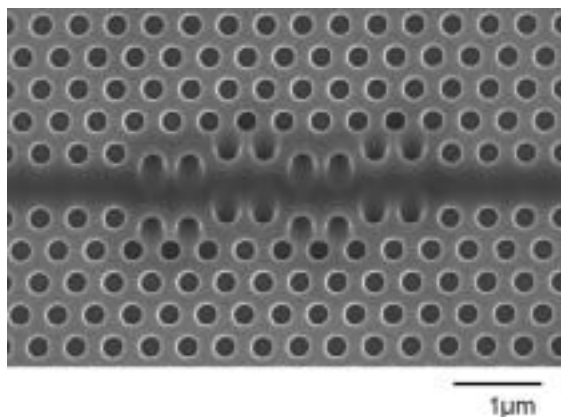


図2. 2次元フォトニック結晶超小型偏波変換器の電子顕微鏡像

森 山 匠 (藤田教授)

「有機金属気相成長した酸化亜鉛薄膜の成長特性と基板依存性に関する研究」

平成18年5月23日授与

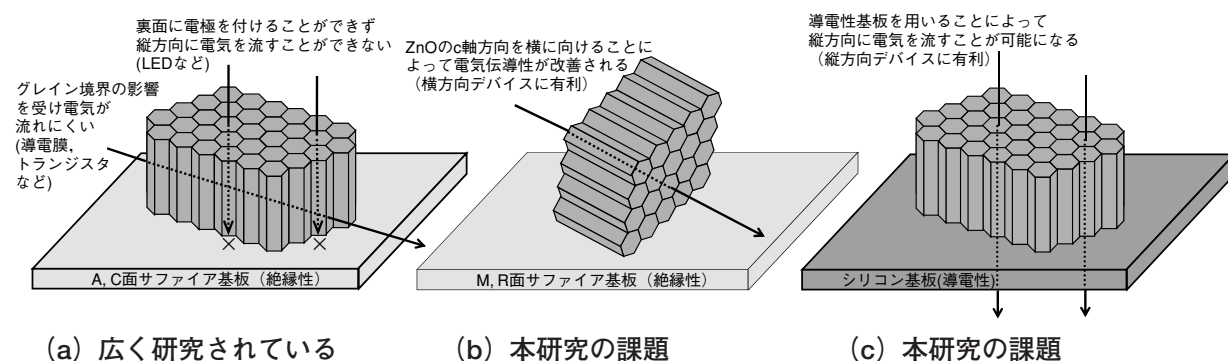
酸化亜鉛半導体薄膜は、(i) 紫外光領域に対応する広い禁制帯幅 (室温において3.37eV) を持つ、(ii) 多様な光・電子・磁気機能を示す、(iii) 酸化物であることから安定で毒性がない、(iv) 可視光に対して透明である、といったことから、紫外発光・受光デバイス、ヘテロ接合トランジスタ、ガス・化学センサ、透明導電膜等、さまざまなデバイス応用が期待されている。この材料は六方晶の結晶構造を持ち、c軸方向 (六角柱の高さ方向) への成長速度が速いため、六角柱が密集したような結晶の構造をとる。これまでの研究は、成長のし易さからA面またはC面サファイア基板を用いた成長が行われてきた。ところがこの場合、図 (a) に示すように、電流を横方向に流すデバイス (導電膜やトランジスタ) では結晶粒界のために電流が流れにくく、電流を縦方向に流すデバイス (発光ダイオード等) では基板が絶縁性のために導電性がとれない、という応用上の問題がある。そこで本研究は、前者に対しては図 (b) のように六角柱が横方向を向くような結晶構造を取り、後者に対しては図 (c) のように導電性基板上に酸化亜鉛を垂直配向させる構造を実現することを目指し、結晶成長の特性とその基板依存性に関して研究を行い、結晶性の優れた酸化亜鉛薄膜を得るための技術開発を目指して行った。あわせて、最近になって開発が進んできた酸化亜鉛基板を用いたホモエピタキシャル成長についても検討した。

結晶成長には、将来の産業応用につながる観点から、生産性の点で利点の大きい有機金属気相成長を用いた。まず図 (b) のように、酸化亜鉛のc軸を基板に平行に配向させるため、M面およびR面サファイア基板を用いてこれを実現するための成長条件を調べた。基板と酸化亜鉛との結晶配向の関係を明らかにし、それが特定方向への格子整合に起因する、成長条件と結晶成長の優先方向とに関連がある、といった知見を得て、R面基板上において表面粗さ1nm以下で欠陥の少ない酸化亜鉛薄膜を得た。

次に、図 (c) のように、導電性基板上で酸化亜鉛のc軸が基板と垂直配向して縦方向の導電性を持つ構造を検討した。基板には応用上の利点の大きいシリコンを用いたが、その表面の酸化が結晶成長を妨げる。そこで、核生成、結晶性回復の役割を持つバッファ層の上にメイン層を成長するという三段階成長法を提唱し、その効果によって、低欠陥で自由励起子発光が見られる高品質酸化亜鉛薄膜を実現した。

最後に、酸化亜鉛基板の利用が、高品質のエピタキシャル成長と不純物添加に有用なことを示した。高品質基板上に成長した酸化亜鉛では、酸素欠陥が少なく、自由励起子がLOフォノン等との相互作用なく直接発光に寄与するようなルミネセンス特性が得られ、今後の酸化亜鉛デバイス開発へ向けて酸化亜鉛の基板開発と成長実験との一体化が今後求められることを提言した。

以上、酸化亜鉛半導体薄膜の機能を多様な新規デバイスへ応用を図るための基板・結晶構造を提案し、結晶成長機構を制御して高品位の結晶成長を実証することで、結晶成長技術の進展を達成した。



西塚 幸司 (野田教授)

「半極性および無極性面InGaN量子井戸における発光遷移過程の解明」

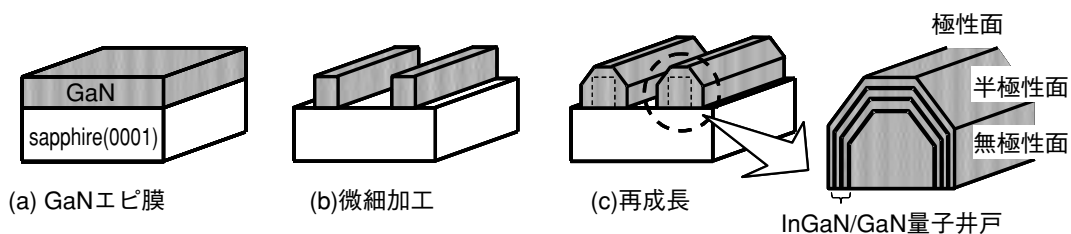
平成18年5月23日授与

本論文は、著者が電子工学専攻光材料物性工学研究室において行った研究成果を纏めたものであり、窒化物半導体におけるピエゾ分極による電界を低減するために、通常とは異なる無極性面および半極性面上へのInGaN系量子井戸構造を作製し、それらの発光機構を明らかにしている。

InGaN系量子井戸において、内部電界が誘起されると、プラスの電荷をもった正孔とマイナスの電荷をもった電子が空間的に引き離されるため、両者の波動関数の重なりが減少し再結合確率が小さくなる。したがって、これまで内部電界を抑制出来ると期待される無極性面や半極性面上への結晶成長が試みられてきたが、整合する基板がないことや、これらの面上への極性のある物質の成長が難しいことから、高品質な量子構造を得るには至っていないのが実情であった。また、半極性面では、内部電界の定量的な見積もりが困難であり、その物性的な解明がなされていないという問題点も残されていた。本研究では、これらの課題に対する詳細な検討を行い、以下のように成果を得た。

- (1) 内部電界の回避のために、C軸配向したGaNに微細加工を施し、垂直面 [すなわち $\{1\bar{1}00\}$ あるいは $\{11\bar{2}0\}$ 無極性面] や傾斜面 [すなわち $\{11\bar{2}2\}$ 半極性面] を形成し、この基板の上に、InGaN量子井戸を成長することを提案している。実際に、加工基板上への結晶成長を行い、上記、無極性面、半極性面上にて、高効率なフォトルミネッセンス (PL) を観測することに成功している。
- (2) 無極性面、半極性面上の量子構造の発光再結合寿命を定量的に評価し、C面上に形成した量子構造より、一桁～二桁程度高速な輻射再結合寿命の観察に成功している。さらに、 $\{11\bar{2}2\}$ 半極性面でのピエゾ電界はC面と比較して約1/7に低減していること、励起子の局在中心のサイズが半径約6～9nmであることを明らかにしている。
- (3) 近接場光学顕微鏡技術 (SNOM) により上記量子構造のPLマッピングを行い、In組成の分布がストライプ状ファセットに垂直方向に生じ、これが大きな不均一幅 (多波長発光) の要因になっていること、さらに、光励起キャリアの拡散長が160nm以下とC面上と比較して大幅に低減していることを明らかにすることにも成功している。

以上、本論文は半極性および無極性InGaN系量子井戸の新しい形成方法を提案・実証し、かつ再結合寿命を微視的観点から解析し、この系の発光デバイスの高効率化に対する有用な情報を提供するものである。



微細加工基板上への再成長による極性、半極性および無極性面三次元構造の作製プロセス

川上 剛 史 (鈴木教授)

「電子ドープ型高温超伝導体の固有トンネル特性に関する研究」

平成18年5月23日授与

超伝導素子は高速動作・低消費電力という点で非常に優れた次世代デバイスである。現在、金属超伝導体を用いた超伝導素子の一部は集積化の段階まで開発が進んでいるが、駆動に液体ヘリウム温度が必要であり、コストが甚大であるという欠点を有する。一方、高温超伝導体を用いた素子は冷凍機で容易に到達できる温度での駆動が可能であるが、多元素系酸化物であるがゆえに高品質薄膜の作製が困難であり、実用化が遅れている。そこで、エピタキシャル成長により薄膜を作製するのではなく、単結晶をダウンサイジングすることにより素子を形成する手法が研究されている。

高温超伝導体は結晶構造が層状であり、超伝導層である CuO_2 面が電荷供給層で隔てられた構造を有していることから、ジョセフソン接合が積層されたものと等価となる。つまり、数原子層の厚みと原子レベルで平坦・清浄な界面をもつ、人工的には作製困難な接合が結晶構造に内包されており、nmスケールの電子デバイス材料として有望である。この接合は固有ジョセフソン接合 (Intrinsic Josephson Junction: IJJ) と呼ばれ、ホールドープ型高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) で盛んに研究がなされている。BSCCOでは電荷供給層が絶縁的であり、BSCCOのIJJは固有トンネル接合であることが実証されているが、一方で、BSCCOのIJJでは従来の人工的なジョセフソン接合では説明できないような異常が観察されている。

本論文で扱う電子ドープ型高温超伝導体 $\text{Sm}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4\delta}$ (SCCO) は、超伝導転移温度 T_c こそ最高で約23Kと低いが、一般的な高温超伝導体とは符合が異なるキャリア (電子) をもち、BSCCOに匹敵するほどの高い電気伝導異方性を示す。この高い異方性から、SCCOは結晶構造に固有トンネル接合を内包すると考えられ、BSCCOの比較対象として興味深い物質である。また、BSCCO以外の系におけるIJJの研究は、BSCCOにおいて観察される異常を理解し、IJJを応用する上で有益な知見を与えるものと考えられる。

本論文は、SCCO単結晶上に作製した微小メサが内包する固有トンネル接合 (およびIJJ) の特性についてまとめたものである。微小メサは CuO_2 面方向が一辺数 μm の正方形もしくは長方形で、 CuO_2 面と直角方向 (層間方向) に数10nmの厚みをもつ微小な単結晶である。この微小メサ作製にはエレクトロニクスの微細加工技術を用いているため、素子集積化のような実用化に向けた展開も可能である。本論文では、主にSCCO固有トンネル接合の輸送特性に関する実験結果および考察を示した。特筆すべき重要な結果を以下に列挙する。

- ①電子ドープ型高温超伝導体で初めて明確なIJJ特性を直接観察した。具体的には、微小メサの面積が約 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 以下になった場合のみ、電流電圧特性に各接合の超伝導状態から電圧状態へのスイッチングを反映する複数本の電圧分枝が観測されることを明らかにし (図1)、SCCOの結晶構造がBSCCOの場合と同じく固有トンネル接合を内包することを示した。
- ②臨界電流密度が理論値に比べて1桁小さい、フラウンホーファー干渉パターンが明瞭に観測されないといった、BSCCOと同様の異常をSCCOでも確認した。これにより、電子ドープ型高温超伝導体においても超伝導の不均一性の存在が示唆された。
- ③トンネル抵抗が CuO_2 面の状態密度を反映することを用いて、SCCOにおける擬ギャップ現象の磁場依存性およびドープ量依存性を明らかにし、電子ドープ型高温超伝導体のホールドープ型高温超伝導体との高い類似性を示した。

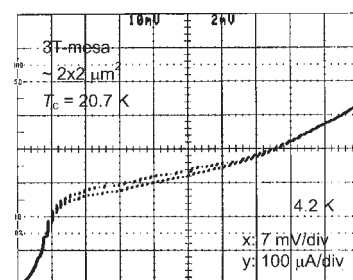


図1. SCCOの固有ジョセフソン接合特性

前 島 圭 剛 (藤田教授)

「有機金属気相成長法ZnOの成長形に関する研究」

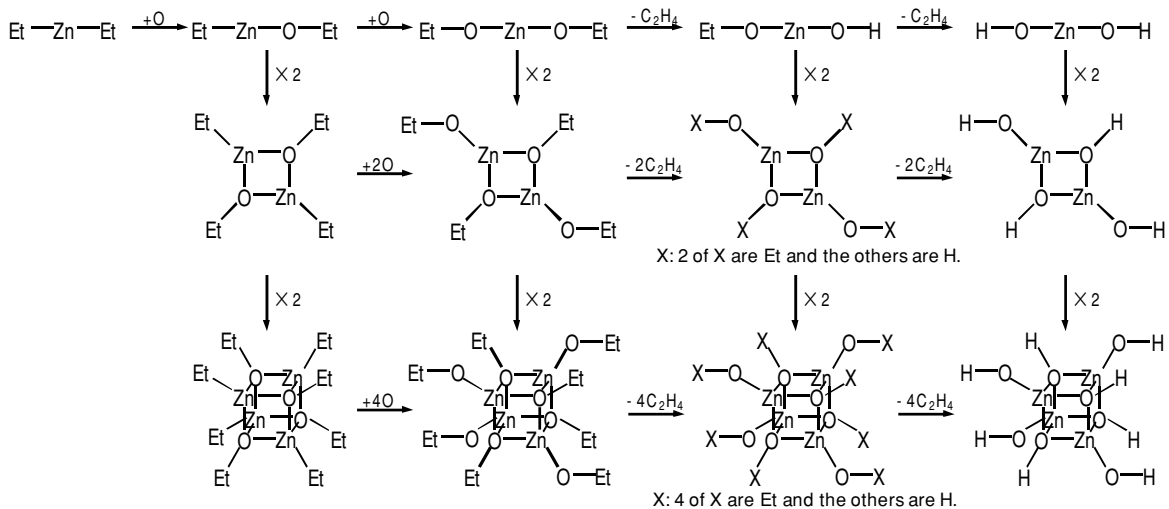
平成18年7月24日授与

酸化亜鉛 (ZnO) 半導体は、その多様な機能を生かしたさまざまなデバイスへの応用が期待されている。ZnO半導体の成長にはさまざまな技術が用いられているが、デバイス応用のための実用的な技術としては、有機金属気相成長による高品質結晶の育成が不可欠である。しかしながら、現状ではおいて、有機金属気相成長による成長は困難である。そこで本研究では、各種成長条件のもとにおける結晶成長の様子を系統的に調べ、各種方位に対する成長速度の理論的検討、気相成長中のその場観察結果をあわせ、ZnO半導体の気相成長機構を明確にしてゆくことを目指した。これにより、反応に適切な原料、成長条件の選択を通じて、ZnO半導体の高品質化やドーピングによる物性制御への貢献を目指した。

ZnO半導体の成長特性として特徴的なのは、c軸方向への成長速度が速く、六角柱状の成長が顕著に起こることである。このため結晶粒界が膜の特性に大きな影響を与え、平坦膜の成長が困難である。本研究では、まずc軸方向とその垂直方向に対する成長速度を理論的に求めた。また、ZnOの成長姿態を系統的に観測した。その結果、成長温度が500℃以下では柱状に成長し、成長温度が800℃以上では、二次元成長の促進により平坦化が進むこと、また、亜酸化窒素/ジエチル亜鉛供給比が小さい場合にはより柱状に成長する傾向があることが判明し、理論の推察と一致した。

一方、成長中のその場光反射測定の結果、まず基板上に核が形成されてc軸方向への成長が進むが、成長温度が700℃以下では表面全体を核が覆うことなく柱状成長し、温度が高い場合には柱の高さが不均一で隣接する柱と合体するという機構が明らかになった。また、700℃を超えると核の横方向成長が顕著になる。以上の成長姿態は理論的モデルと良い対応が見られた。さらに、成長中のその場赤外吸収測定を行い、成長反応を調べた。導かれた反応モデルを図に示す。ジエチル亜鉛が、亜酸化窒素の分解で生じた酸素原子と反応して気相中でZn-O結合が生じ、基板上では高温ではZn(OH)₂、低温ではZn(OH)(OC₂H₅)が生じること、またこれらの重合体が生じc軸方向の成長を促すことが明らかになった。

以上の知見をもとに、平坦なZnO薄膜を得る成長技術の提言を行った。すなわち、300-350℃で成長したナノロッドを熱処理により平坦化し、その上へホモエピタキシャル成長的に800℃以上でZnOの成膜を行うという方法で、これにより実際に高品質な膜が得られることを実証した。この結果、産業応用上価値の高い有機金属気相成長法によりZnOの機能を活かす応用に大きく寄与することができた。



欧 陽 軍 (吉川榮和教授)

「A Methodological Study on Fault Diagnosis and Simulation of Man-Machine Scenario in Accident for Nuclear Power Plant」

(原子力発電所の故障診断と事故時のマンマシンシナリオシミュレーションの方法論に関する研究)

平成18年9月25日授与

本研究では、原子力プラントの故障診断と異常事象伝播シナリオのシミュレーションについて、プラントの機能、構造および動的振舞いをグラフィカルな抽象化モデルで表現する新たな方法論を開発し、その有効性を検証した。

まず、原子力プラントを構成する設備機器の目標と機能の関係、全体と部分の関係を、プラントシステムの中の質量、エネルギー、情報の流れに着目して図形表現により抽象化するマルチレベルフローモデル (Multilevel Flow Model; MFM) を応用した故障診断アルゴリズムを開発した。ここでは、加圧水型原子力プラント (Pressurized Water Reactor: PWR) の単一故障時の異常診断について、MFMによるプラントモデルをもとに異常源から拡大波及する警報の定格値からの偏倚の因果律を用いて根本原因を高速に逆推論する方法を提案し、21種類のプラント警報信号を用いて殆どの異常の根本原因を原子炉トリップ以前に正しく同定できることを安全解析コードRELAP5/MOD2による19種類の事故シミュレーションを基に示した。さらに、この単一故障診断法を、F. Dahlstrandによる方法にグラフ理論を組み合わせて多重異常を含めて根本異常原因を統合的に説明する方法へと拡張した。当該方法をタンク2台、ポンプ1台の簡単なシステムの異常診断に適用し、その機能を確認した後、単一故障の根本原因推定法では根本原因の分離が困難だったPWR冷却材喪失事故 (LOCA) に適用し、根本原因の分離が困難であった理由は、単一故障の仮定のもとに根本原因として推定された第1候補とそれ以外の潜在的候補群が異常波及の強固な因果律で結合された同一コンポーネントにあるためであり、当該方法を用いることによりコンポーネント異常を同定できることを確認した。

次に、支援システムが自動的に同定した根本原因の正当性を運転員が確認することが求められることを指摘し、自動支援システムの診断結果をプラント緊急事態の運転員に理解しやすく提示する表現法をラスムッセンの3つの運転員モードをベースに提案した。次いで、提案したMFMによる異常原因推定をそのまま人間に提示しても自動診断と同等の診断ができないことを示すため、簡単な被験者実験を行った。実験では、学生3名を被験者にしてMFMによる異常原因診断を教示した後、インタフェース上でMFMによる根本原因診断作業を課した。その結果、MFMによる異常診断法を実際に運転員支援に適用するには、(1) 診断はコンピュータ処理の方が確実なこと、(2) その診断結果の正当性を運転員に確認させるには、MFMによる処理法をそのまま画面提示するのではなく、診断過程全体をその順序に沿ってブレークダウンし、注目すべきパラメータ間の関係を明確にすること、(3) パラメータ間の整合関係のチェックが直観的に行える表示法を導入すること、が必要であることが分かった。この結果を受け、MFMによる定性推論の結果とEIDによる主要なプラントパラメータ間の関係を可視化して表示し、運転員の直感的理解を向上させるインタフェース設計手法を提案し、PWRの異常診断用インタフェースを試作した。

その後、提案したMFMによる定性推論手法を基礎に、原子力プラントで発生した異常事象の伝播過程と、運転員による対応操作により異常事象を収束させる過程とを理解しやすいWebベースのアニメーション形式で提示できる事故シナリオ提示手法を提案し、そのプロトタイプを開発した。提案する手法は、(a) MFMの定性推論によるプラントの異常伝播過程の生成、(b) 事故の進展に伴う運転員の異常対応操作とプラント事故シナリオの変化をPetri-Netモデルにより制御、(c) 事故シナリオの変化に伴うプラント挙動進展をアニメーションとテキストにより表示するグラフィカルインタフェース、の3つにより構成している。開発したプロトタイプを用いたシミュレーションにより、提案する手法が運転員の異常診断や対応操作の訓練に適用できるばかりでなく、プラント異常時の運転員操作の心的負荷の時間的変動を推定する方法へ拡張できることを示し、原子力プラントの事故時運転技術の向上に有用な手法となりうることを示した。

劉 井 泉 (吉川榮和教授)

「Analytical Study on Nuclear Energy Development from Social Policy Aspects」
(原子力開発の社会政策的観点からの分析的研究)

平成18年9月25日授与

本研究では、欧米諸国での原子力発電発展の歴史的過程を分析し、今後の原子力の持続的発展のための進化モデルを導出するとともに、原子力開発への社会的合意形成に資する分析・コミュニケーションツールを提起した。

まず、主に市場均衡を取扱う古典的経済学では社会の変化に科学技術の発達が大きな影響を与えることを説明できないことに鑑みて、生物進化を選択・変異・継承の概念で説明する進化論を基盤とする進化経済学の観点から、世界の原子力開発国における原子力開発の歴史的、文化的経過を考察した。その結果を受け、スリーマイル島やチェルノブイリ等の原子力事故が欧米各国での原子力開発の方向転換とその後の経過にどのように影響したかを考察して、欧米各国の原子力産業の進化モデルを提案した。提案した進化モデルは、(1) 安全性、(2) 核不拡散、(3) 経済的競争力、(4) 社会的受容性、(5) 環境親和性の5つを目標に、原子力産業の競争的コンピタンスを再構成することを目的とするものであり、このモデルは、スリーマイル島やチェルノブイリ原子力事故の経験を経て、国際協力による原子力安全技術の高度化およびその技術の継承発展により、原子力産業の再生を進める欧米原子力産業の変化を、進化経済学での選択・変異・継承による進化発展のアナロジーとしてよく説明できる。さらに、提案したモデルから、今後原子力開発を推進し、その最終目標を核燃料サイクルシステムの確立に置く我が国および中国での合理的な原子力開発の社会政策として必要な社会的受容性の向上ないし政策決定の合理的な合意形成に資するため、新たな分析・コミュニケーションツール導入の必要性を提起した。

一方、原子力発電に関連する問題のうち、特に核燃料サイクルの確立が様々な技術的、社会的要因が複雑にからみ、かつ長期的視点を要する政策課題であることに注目し、核燃料サイクルシステムに関わる様々なステークホルダーが、核燃料サイクルに関わる多角的な諸問題を見通しよく理解し、問題の分析、意思決定、理解促進と合意形成に資するための分析ツールとして、従来プロセスプラントの故障検出や異常診断に適用されている、機能モデリング手法であるマルチレベルフローモデル (Multi-level Flow Model; MFM) の新たな適用方法を提起した。すなわち、核燃料サイクルシステムの各部の機能、目標、振舞いを理解し、各部の構成要素と全体システムとの関連、核燃料サイクル内の多様な物質・エネルギーの流れ、物質間の変換、長期にわたる資金投資のコストバランス、シナリオ変化の記述に資するため、従来のMFMでのグラフィカルな抽象化モデルにおいて、(1) 核反応や化学反応の変換過程、(2) シナリオの切替、(3) 金利計算などの取り扱いができるように機能を拡張した新たなモデルと記述方法を提案した。また提案した手法により、(1) 原子力発電所での核分裂性物質と親物質の生成変換過程の表現法、(2) 核燃料サイクル全体での使用済み核燃料の生成、貯蔵、再利用、廃棄処分過程の表現法、(3) 核燃料サイクルの投資フローとその平準化コストの計算法など、核燃料サイクルに関する幾つかの問題への具体的適用法を示した。またとくに提案したMFM手法を中国が計画中の原子力拡大政策の分析に適用して、中国が原子力発電容量拡大を達成する上で必要な核燃料製造工程において必要とする調達目標を達成できないなどの課題を定量的に摘出した。

さらに、核燃料サイクルに関する様々な評価指標を総合して多角的な目標を満足させ最適解を導出するための意志決定手法として、様々な外部性を簡潔に評価手法に取り込めるExternicsと呼ばれる手法の適用を提案した。この意志決定支援手法は、各指標が満足できる範囲および許容できる範囲を指定すると、これをもとに構成されるそれぞれの評価値に関する一価の相関関数を組み合わせ、総合的に有利な方策を評価できるものである。その試行例として、核燃料を再処理する場合としない場合について、二酸化炭素排出量、燃料コスト、資源利用効率、公衆への被爆量を指標として、経済性、環境要因、健康への影響要因、資源の有効活用性の4つの観点の重要性を等しくしたときにいずれの場合がより有利かを計算した。その結果、双方とも受容可能だが、核燃料を再処理するほうが再処理しない場合より有利なこと、資源の有効活用性を考慮しないと再処理しない方が有利であることが分かった。

井上 武 (高橋教授)

「スケーラブルなネットワーク制御に向けた木構造の適用方法に関する研究」

平成18年9月25日授与

本論文は、近い将来のインターネットを対象とし、木構造の適用による規模の拡大について論じた。木構造は普遍的なアイデアであり、ネットワークが規模の問題に直面したときに適用され、様々な局面を開いてきた。しかし、実際の環境において木構造を効果的に適用するためには、環境ごとの難しさがある。本研究で得られた主な成果は次のとおりである。

1. マルチキャストにおける木構造に対して、トンネルが与える影響を論じた。コンピュータ実験を行い、何千もの木構造に対して3つのメトリックを観測した。その結果、マルチキャストアイランドには臨界サイズが存在し、臨界サイズよりもアイランドが大きければ、トンネル終端ルータにかかる負荷が急激に小さくなり、無視できる程度になることを発見した。さらに、適正サイズのアイランドによって、マルチキャスト転送表を保持するルータ数が小さく抑えられることがわかった。この現象を数理モデルによって解析した (図1)。

2. マルチキャストの木構造を構成するルータを対象とし、導入の容易なルータについて検討した。マルチキャスト方式にFlexcastを採用し、WWW検索システムやGRID computingで大きな成果を挙げているクラスタシステムを用いてルータを設計した。運用中のルータあるいはスイッチに小規模なPCクラスタを接続し、システムとしてルータ機能を実現する。既存設備を有効利用し、開発コストや装置コストを抑えることで、初期投資を抑制することが可能となった。また、クラスタシステムにより、高いスケーラビリティと可用性を実現した。このルータを実装し、転送能力と障害切替性能の評価実験を行った。その結果、Giga bit/sレベルの転送能力を実現可能であること、高い可用性を備えることを明らかにした。

3. MIP (MobileIP) v6によって構成されたセルラーシステムを対象とし、MN (MobileNode) の位置管理に木構造を適用する方法について議論を展開した。MNがBinding Update削減とトンネル多重化のトレードオフを評価し、自律分散的に木構造を構成していく方法を述べた。この方法により、移動傾向の近いMNがまとめられることとなり、Binding Updateを効果的に削減する。また、MRへの遷移条件について検討し、MR数を必要最低限に抑えることで木構造構成に伴うRouter Advertisementトラフィックを抑制する方法を提案した。コンピュータシミュレーションを行い、提案方法の効果を検証した。提案方法はトレードオフのバランスをとり、HA処理コストを大きく軽減することを明らかにした。

4. 公共交通機関を対象とし、先の議論を発展させた。位置エリアの登録契機について論じ、消極戦略が最適であることを証明した。また、登録を効果的に抑制するために、エリア滞在時間に注目することによって、移動傾向の近いルータを選択するエリア方法を提案した。端末が登録をランダムに遅延することで登録の集中を分散する方法を提案し、その効果を定式化した。登録を遅延している端末へパケットを転送する方法を提案した。Fast MIPv6の枠組を利用することにより、Access RouterとMobile Routerが転送に必要な情報を取得できることを示した。提案方法は特定の無線技術を仮定することなく、既存のMIPv6メッセージとデータ構造をわずかに拡張するだけで実現可能である。

今後は、上記知見をベースに、より多くの状況に適用できるような一般性の高い議論を展開していきたい。

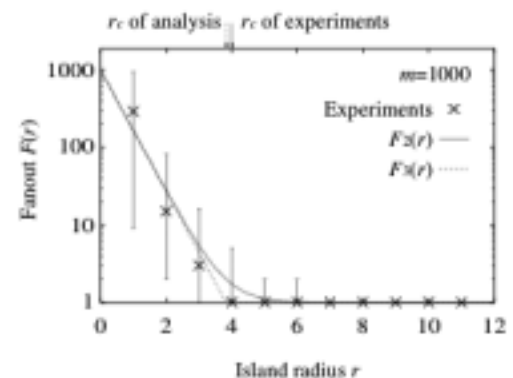


図1. アイランドサイズとルータ負荷 (実験とモデルの比較)

西村 耕 司 (佐藤教授)

「Functional Extension of Atmospheric Radar with Digital Receiver Array」
 (ディジタル受信機アレイを用いた大気レーダーの機能拡張)

平成16年 9月25日授与

大気レーダーは、強力で指向性の高い電波ビームを放射し大気中の屈折率擾乱による散乱波を受信することにより大気の運動を推定するための装置です。これを利用して上空の風速を測定するためには、ビームを鉛直および鉛直から東西南北に少し傾けた方向に順に送信し、各方向で観測されるエコーのドップラーシフトから風速の3成分を推定します。この方法により各高度における風速ベクトルを推定することが可能ですが、異なる位置で散乱されたエコーから推定される風速は空間平均的なものとなります。本研究では高分解能風速場観測を実現するため、主となるレーダー周辺の複数の地点に受信専用アンテナアレイを設置することにより、各散乱点における風速3成分を直接計測可能なマルチスタティックレーダーを中心とする技術研究を行いました (図1)。

レーダーから送信されたパルスは光速で進行するため、受信アレイから見た散乱点も光速で移動することになります。複数のアンテナにより構成される受信アレイでは十分な信号強度を確保するため、この光速で移動する散乱点からの信号を常に同位相で加算することが必要です。また受信される信号には、所望の大気散乱波に比して卓越する不要な大地反射波が重畳し、観測の妨害となります。このため受信ビーム (最大感度方向) を散乱点に追従させながら、適応的に不要波方向へヌル (低感度方向) を対応させる手法により、受信信号を損ねることなく妨害となる信号を除去することを可能としました。

受信アレイ中の各アンテナで観測される散乱波の位相と到来方向の関係は、アンテナの配置により決定されます。配置方法次第では複数の方向に対して全く同じ位相関係で受信される (グレーティングローブ) ということも起こりえます。しかし、所望の散乱点方向および不要波到来方向への感度を独立に制御するためには、受信アレイにおける視野内すべての方向に対して位相情報が縮退せず、可能な限り相関 (サイドローブ) が小さくなる配置とする必要があります。配置の最適化は、アンテナ位置を2次元平面上に限るとしても、アンテナ数に比例する自由度を持つ大変難しい問題となります。これをビーム方向空間におけるサイドローブ2乗平均値の最小化問題として定式化し、アンテナ周りの仮想ポテンシャル関数を用いて高速に解くアルゴリズムを提案しました (図2)。

本研究では、ここで提案した手法を用いたマルチスタティックレーダーシステムを京都大学赤道大気レーダー (インドネシア・西スマトラ州) において構築し、2004年9月および2005年12月に対流圏観測を行いました。これらの観測により世界で初めて赤道域対流圏風速場の局所性を明らかにすることに成功しました。

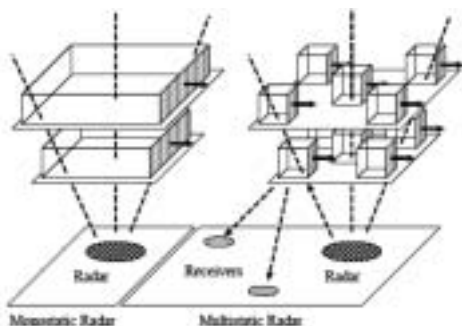


図1. マルチスタティックレーダー (右) の概念図

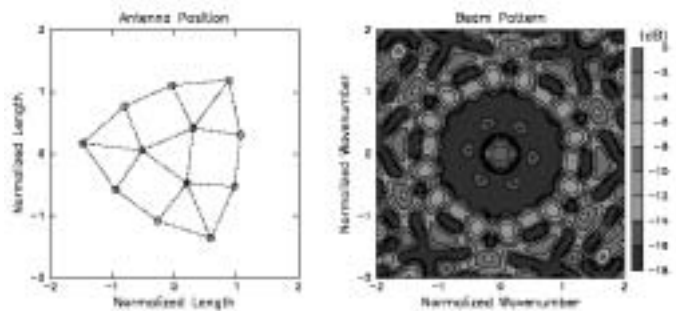


図2. 提案法により得られたアンテナアレイの例

服部 俊 洋 (小野寺教授)

「組み込み用途プロセッサにおける低消費電力化技術の研究」

平成18年9月25日授与

ディープサブミクロン時代の組み込み用途プロセッサは従来からの高性能化、低コスト化に加え、低消費電力化が重要な設計課題となっている。LSIの規模の増大と動作周波数の向上に伴い、プロセッサの動作時消費電力は増大している。また、ディープサブミクロンプロセスにおいて、トランジスタの動作電圧の低下に伴い閾値電圧の低下が必要になり、リーク電力も増大している。しかしながら、組み込み用途プロセッサは電池駆動や低コスト冷却システムのため、より低電力が求められている。

本研究では、種々に定義される消費電力に対して、低消費電力化がより重要との視点で、設計が複雑になることや面積が増大することよりも低消費電力を優先したときの技術について論じている。

はじめに、トグル回数削減による低消費電力化手法の検討を行なった。CMOS回路で構成される組み込み用途プロセッサの動作時電力で支配的なのはトランジスタのトグルによる充放電電流である。本研究では高速プロセッサの基幹となるパイプライン構造において、ポインタパイプライン方式を提案し、データ転送によるトグルの削減を提案した。ベンチマークによる評価で制御とデータをあわせた総合評価で25%のトグル削減を確認した。また、キャッシュメモリのアクセスが分岐後のサイクルタイミングでアクセスしなくてはならないメモリマクロが変わることに着目して低電力化する手法を提案し、TAGアレイで47%、DATAアレイで44%のアクセス回数削減を実証した。

次にトランジスタの基板にバイアス電圧を印加してリーク電流を削減する技術について論じた。セル構造、スイッチセル、レイアウト方式についても提案を行い、3.3Mトランジスタ規模の組み込み用途プロセッサにおいて、オーバヘッド部分も勘案してリーク電流を28分の1に低減できることを示した。

続いて、2種閾値を持つセルセットを活用して、プロセッサの動作周波数を下げずにサブスレシールドリーク電流を低減する手法について論じた。パスディレイに余裕のあるところは高閾値セルをタイミングクリティカルな部分には低閾値セルを用いることにより、5%の面積増加と高々4MHzの動作周波数増大でリーク電流が約半分に低減できることをしめした。本手法は、最新の組み込み用途プロセッサの設計手法に適用するように物理合成手法とも親和性のある手法を提案した。

続いて抜本的にリーク電流を削減するために、プロセッサの部分領域の電源を遮断する手法について論じた。実際のLSI設計で課題となる、電源遮断セル挿入技術、突入電流低減2段階駆動能力電源スイッチ制御回路技術、高速復帰可能内蔵メモリデータ保持部分回路電源遮断方式について論じた。実際のプロセッサにおいて、2.8ミリ秒で高速復帰できるモードで96%のリーク電流が削減できることを示した。また、大規模LSIでは複数機能が1チップに集積されるので、20もの電源領域を有する階層的多電源領域電源遮断技術について論じた。機能に応じた電源遮断することにより、動作時のリーク電流を36%に削減できることを示した。

また最後に、消費電力には多くの定義があり、複数の消費電力を削減することが設計の目標であることを論じ、組み込みシステムとして利用されるとき消費電力を的確に定義して、その消費電力に的を絞った低消費電力化技術の適用が重要であることを論じた。

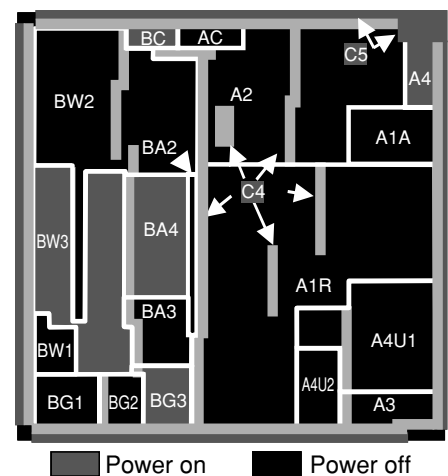


図1. 20電源領域での電源遮断例

笈 田 武 範 (松田教授)

Magnetic Resonance Elastographyを用いた生体組織の弾性計測に関する研究 平成18年9月25日授与

医療分野において、生体組織の硬さは疾患や機能障害のある組織の診断、あるいはその進行状況の把握に用いられる重要な診断指標の一つである。従来、硬さの情報は触診として臨床的に用いられてきたが、医師の経験に負うところが大きく主観的で、定量的な診断は困難であるという問題があった。また、仮想現実技術を用いることにより体内臓器の可触化を実現し、医学生の教育などに用いることが期待されているが、正確な触覚を再現するために必要な各組織の生体内における剛性率や粘性率などの粘弾性定数には定量的な計測データが少なく、定量的な硬さの計測が次第に重要視されつつある。このような背景のもと、筆者は磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging : MRI) を用いて組織を傷つけずに定量的に硬さの指標である粘弾性定数を計測できる Magnetic Resonance Elastography (MRE) 法に注目し、MRE法の臨床応用の一助となるべく研究を行ってきた。

MRE法では、計測対象に一定周波数の振動を与え、振動が計測対象内を伝播する様子を画像化する。そして、取得したMRE画像から波長および減衰率を計測し、硬い物質内では波が早く伝わり、軟らかい物質内では波がゆっくり伝わる性質 (図1) を利用して粘弾性定数を算出する。本研究では最初に、広範囲・高精度な粘弾性計測を行うためベッド型加振装置 (図2) を提案した。ベッド型加振装置は、計測対象と加振装置の接触面積を大きくすることにより、粘弾性計測に必要な横波のみの平面波を広範囲に伝播させることを可能としたシステムであり、シリコンゲルファントムを用いた実験および人体組織の計測によりこのシステムの有効性を確認した。次に、得られた波の画像から波長・減衰率を推定する手法の高精度化・高空間分解能化を目指して、位相の異なる複数の波を撮影した多重位相MRE画像を用いた粘弾性定数導出法を提案した。シミュレーション実験およびファントム実験の結果、本手法を用いて剛性率を高精度に計測することは可能であることを確認したが、粘性率についてはノイズの影響により十分な精度が得られなかった。現在、MRE法では上記の手法を含めて様々な波長・減衰率推定法が提案されているが、いずれの手法においても波の反射や屈折の影響を考慮しておらず、反射波を含むMRE画像に適用すると大きな誤差を生ずるという問題がある。この問題を回避するため、一般には、計測対象を伝播する波が反射や屈折を生じる時刻よりも前に撮影時刻を設定する撮影法を採用している。この撮影法により、反射波の存在しないMRE画像を得ることができるが、振動が定常状態に至る前の過渡状態を撮影している可能性があるため、高精度な波長・減衰率推定が困難になる可能性がある。本研究では最後に、このような問題を解決するため振動の定常状態を撮影する手法について検討し、定常振動を用いる手法が波長・減衰率推定精度の向上に有効であることを確認した。また、定常状態の振動を撮影する場合に問題となる反射波の影響を抑制するため、窓関数適用後に反射波成分を抑制するフィルタの一つである spatio-temporal directional filter を適用する手法を提案し、シリコンゲルファントムを用いた実験によりその有効性を確認した。

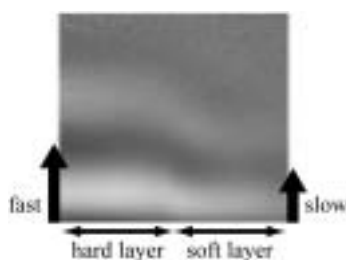


図1. 物質内を伝播する波

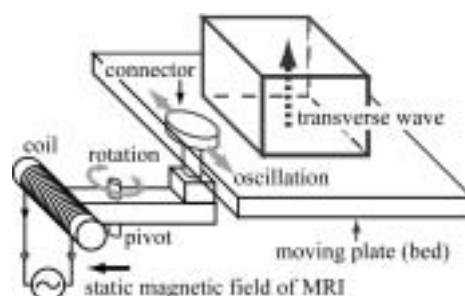


図2. ベッド型加振装置の模式図

東 野 哲 (吉田教授)

「Study on Signal Processing and Coding Techniques for High Density Optical Information Storage Channels」

(高密度光学情報記憶通信路における信号処理及び符号化技術に関する研究)

平成18年11月24日授与

Blu-ray Disc (BD) などの次世代大容量光ディスクが商品化されているが、高い記録線密度を実現するストレージ信号処理技術としてPRML (Partial Response Maximum Likelihood) が導入されている。本研究においては光記録再生信号の特性を明確にして、さらなる高密度化に必要な信号処理技術全般に関する研究を行った。特に、将来の超多層光ディスクを念頭に置いた新しい記録変調符号を考案して、それを用いたデータ検出方式による耐低SNR信号処理システムの提案を行った。

●HEPR-PFMLによる高密度35GB BD-ROMディスクの再生実証

通常の光ディスクの再生信号は、回折限界によって決まる $2NA/\lambda$ のカットオフ空間周波数以上は絶対に読み出すことができないMTFと呼ばれる高域減衰特性を持っている。これにPRMLを適用した場合、どうしても等化できない周波数成分が存在する。ビタビ検出器内で過去のパターンから等化誤差を学習することにより確率演算ジッターを少なくするデータ検出方法と、その等化誤差補正値を適応等化アルゴリズムにフィードバックする組み合わせにより、因果的な波形等化を行う方式をHybrid Equalized Partial Response Path-Feedback Maximum Likelihood (HEPR-PFML) システムとして提案した。現在BDでは単層25GBまで規格化されているが、このシステムにより35GBまで高密度化できる可能性があることを実証した。

● d 制限付きMSN符号を用いたTCPRML方式の提案

光ディスクにおける記録符号として、最短マーク長制限付き符号が用いられる。 d とは最短マーク長から1を引いた値を示す。この制限により符号のスペクトルを低域に変調してMTFを通過させやすくするという特徴がある。CD, MD, DVDでは $d=2$ で、BDから $d=1$ の符号が採用されている。一方、磁気記録においてMatched Spectral Null (MSN) 符号をPRMLに適用することによって、ノイズに対する検出ゲインを増加させるTrellis Coded Partial Response Maximum Likelihood (TCPRML) 方式が提案されている。しかし、この方式は $d=0$ のものであり、光ディスクには適用することができなかった。そこで本研究を通じて、世界初の d 制限付きMSN符号を構築することに成功した。図1は $d=1$ の符号化率 $16/26$ のMSN符号を作る為のFinite State Transition Diagram (FSTD) を示す。図2はこの符号の再生信号を検出する為のTCPRML検出器を示す。将来の超多層光ディスクのようにSNRの低い再生信号のデータ検出方式として提案することができた。

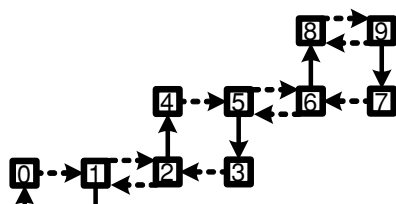


図1. $d=1$ 16/26 MSN符号のFSTD

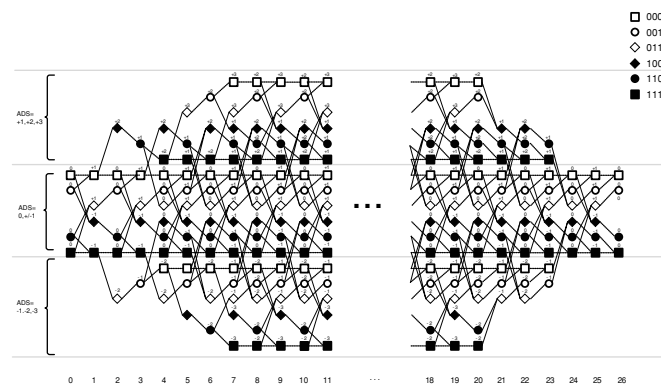


図2. PR (1,2,2,1) 用時変TCPRML検出器

呉 準 席 (橋教授)

「A Study on the Luminous Efficiency Improvement of Plasma Display Panels Based on Spectroscopic Diagnostics of Microdischarge Plasmas」

(マイクロ放電プラズマの分光計測に基づくプラズマディスプレイパネルの発光効率改善に関する研究)

平成18年11月24日授与

この博士論文は、プラズマディスプレイパネル (PDP) の発光効率改善を目指して新規のガス組成や放電セル構造における“マイクロプラズマ”の特性を、各種の分光計測法を用いて評価し、効率向上の新規の方法を提案した実験研究に関するものです。

現在、テレビを中心とした表示装置は、フラットパネル化が加速度的に進んでいます。その中で、プラズマテレビは中心的な役割を担っていますが、さらなる高画質化・低価格化・低消費電力化を目指して改善していく必要があります。そこで、本博士論文では、プラズマテレビ内の発光の主役である“マイクロプラズマ”、すなわち数百ミクロンの大きさのプラズマを診断し、プラズマ生成用のガスや電極構造・電圧印加の方法を制御することで発光効率の改善を目指しました。ここで、そのような小さなプラズマを診断するため、「顕微分光法」を開発・適用し、空間分解能でミクロンオーダー、時間分解能でナノ秒オーダーでの高分解能測定を行いました。

図1に、顕微分光法のうち、赤外線発光分光法とレーザー吸収分光法による、1画素分のマイクロプラズマの診断像を示します。これらの診断像は発光強度のピーク付近の10ns区間を示し、ガス組成は本論文で新規に検討したNe・Xe (10%)・Kr (40%)の混合ガスです。まず近赤外線発光 (830nm付近)の分布から、励起ガス粒子からの発光が左側半分を占めるアノード電極と右側半分を占めるカソード電極の間で発生していることがわかり、プラズマ生成時の放電構造の様子が高空間分解能で示されています。次に、レーザー吸収分光法によりマイクロプラズマ中に生成されているXe及びKrの励起原子の密度分布を測定しました。ここで、レーザー光をプラズマ中に通過させるとき、光学顕微鏡を介することで、レーザー光を数ミクロン径にまで絞って高空間分解能を確保しています。これらの像より、Krの準安定励起原子密度が急激に減少し、逆にXeの共鳴励起原子密度が増加していることがわかりました。これはKr-Xe粒子間のエネルギー遷移機構の1つを始めて実証したものです。これに伴い、Xe共鳴励起原子からの真空紫外線放射量は大幅に増加し、実際のPDPに適用した場合の発光効率の改善が期待できます。

本論文では、他にも、

- ・ Kr-Ne混合ガスの適用を提案し、Kr励起原子密度の測定をもとに効率改善を行った。
- ・ 新規の電極構造として、電極間の誘電体層に溝構造を形成し、放電電圧の低下を実現した。
- ・ 放電維持用の駆動電圧の周波数について、発光効率への影響を顕微分光法で評価した。

という成果が得られています。これらは、次世代PDPの設計指針に対して、有意な貢献をできるものと考えられます。

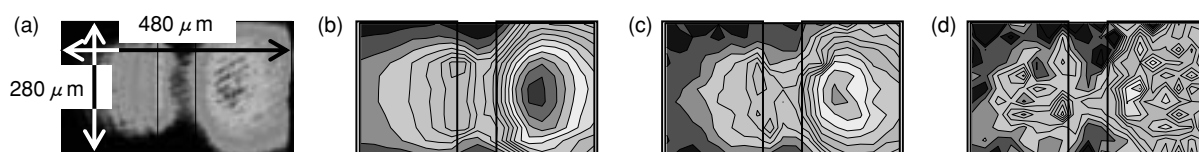


図1. 顕微分光法により測定されたPDP内マイクロプラズマの近赤外発光像 (a) と各種励起原子の密度分布 ((b) Xe準安定励起原子 (最大値 $4.8 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)、(c) Xe共鳴励起原子 (最大値 $2.6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)、(d) Kr準安定励起原子 (最大値 $8.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$))。

濱本 武史 (小野寺教授)

「ダイナミック型メモリLSIの高集積化回路技術に関する研究」

平成18年11月24日授与

ダイナミック型ランダムアクセスメモリ、いわゆるDRAMは、ワークステーションからパソコンに至るあらゆるコンピュータのメインメモリ、あるいはデジタル機器のバッファメモリ等、情報化社会を支えるメモリデバイスとして幅広く用いられてきた。1970年に1Kbitのチップが発表されて以来、3年で4倍のペースで大容量化が推し進められ、現在ではGbitクラスのチップが開発されている。一方で、大容量化に伴い大量かつ高速なデータアクセスが課題となっている。近年、ほぼ3年で2倍のペースでデータ転送レートが高速化され、現在はチップ辺り毎秒10Gbitを超えるDRAMが量産されている。本論文では、このような大容量化・高速化のトレンドを実現するために、高集積DRAMの回路設計技術に関する様々な課題について検討および提案を行った。ここではこれら課題のうち、次世代の高集積DRAMを想定した高速・広帯域なデータアクセスに適したアーキテクチャの検討について紹介する。

DRAMチップでは、単位記憶素子が2次元状に配列されたメモリアレイがチップ面積の半分以上を占有している。メモリアレイの動作周波数はLSI内部の電気的特性、すなわちトランジスタ性能、配線抵抗、寄生容量等によって規定され、DDR2-800やDDR-400として知られる汎用高集積DRAMでは200MHzが採用されている。汎用DRAMのメモリアレイは更に4バンク (Bank0~Bank 3) に分割され、任意のバンクに対してアレイ動作周波数でのライト・リードアクセスが可能である。図1にDRAMのアレイ動作周波数とチップあたりのデータ転送レートの関係を示す。転送レートはアレイ動作周波数とチップ内部のデータバス幅との掛け算である。例えばDDR2-800ではアレイ動作周波数200MHzに対し内部バス幅X64でチップ動作を行っており、転送レートは12.8Gbpsに達する。

しかしながら今後とも広帯域化要求は続くと思われ。そして従来のチップアーキテクチャを踏襲しつつ広帯域化を行った場合の懸念の一つに、チップ面積増大があげられる。内部データバス幅の拡大はチップサイズ増大に直結し、更に動作周波数高速化も配線ピッチ緩和によるチップサイズ増大を伴う。そこで本論文では、チップ面積最小化の観点から、広帯域化に適したチップアーキテクチャを検討した。その結果、図2に示す様に、バンク分割構成を最適化し、ライトとリードのアクセスパスのデータフローを同一方向に揃えるアーキテクチャを採用することで、チップサイズ増大を抑制しつつ広帯域化が可能なことを見出した。0.10 μ m世代のプロセスパラメータを用いて回路・レイアウトパターン検討および性能予測シミュレーションを行った結果、転送レート51.2Gbpsを想定した場合、従来アーキテクチャとの比較においてチップサイズ削減効果は10%以上であることを確認した。高集積DRAMのチップ内部転送レートの広帯域化は昨今の緊急課題であり、今後更にその重要性が増すと予想される。同時に、ビット単価の低減要求はメモリデバイスの宿命であり、チップサイズ縮小化は今後とも必須課題である。本検討結果はそれらの要求に対して1つの解答を与えるものであると考える。

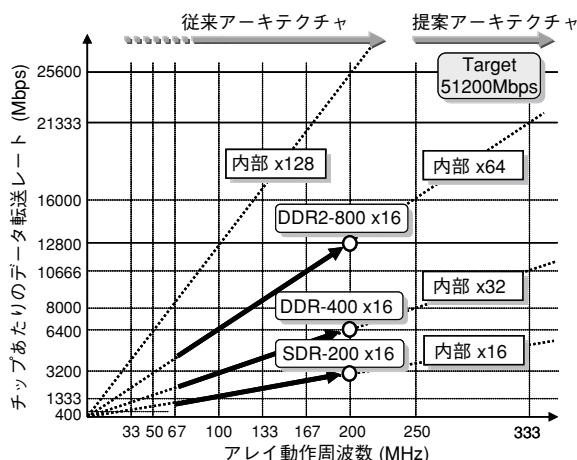


図1. DRAMのアレイ動作周波数とデータ転送レートの関係

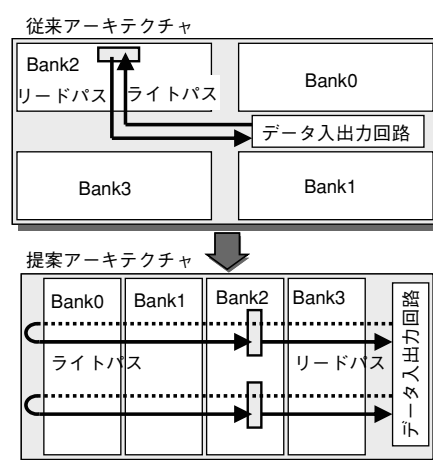


図2. チップアーキテクチャの検討

五十嵐 喜 良 (深尾教授)

「MF Radar Studies on the Dynamics of the Mesosphere and Lower Thermosphere」
(MFレーダーによる中間圏・下部熱圏のダイナミクスに関する研究)

平成18年11月24日授与

近年、地球大気の長期的な変動に対する関心が高まっており、中間圏・下部熱圏（MLT領域）の大気ダイナミクス研究に関してMFレーダーを用いたグローバルな観測の重要性が注目されている。特に従来から北緯30度付近並びに極域での観測が少なかったことから、図1に示すように、新たに九州・山川、並びに北海道・稚内及び米国のアラスカ・ポーカーフラットにMFレーダーを設置し長期間の観測を実施した。本論文は、これらのMFレーダーにより、中緯度と高緯度のMLT領域における平均風、大気潮汐波、プラネタリー波の特性を詳細に明らかにし、特に平均風や大気潮汐波について、大気モデルとの比較や他地域の観測結果との比較を論じている。得られた主な結果は以下の通りである。

1. MFレーダーによる風観測の妥当性を評価するため、信楽MUレーダーとの比較観測を実施し、MFレーダーによるMLT領域における風観測の有効性を確認した。
2. 山川と稚内における観測結果から、中緯度MLT領域における1日、半日、8時間周期大気潮汐波の構造と変動特性の詳細を明らかにした。特に、強い東向き風が卓越する際、東向き平均風の強度と1日周期大気潮汐波の東西成分振幅に逆相関の関係があることを指摘した。
3. 中緯度MLT領域における2日周期と16日周期のプラネタリー波の解析を行い、2日周期波の詳細な季節変動を明らかにした他、16日周期波の鉛直伝搬について、平均風が東向きであるときに優勢であることを示し、理論とモデルに矛盾しないことを明らかにした。さらにスポラディックE層の発生頻度の増大に伴いプラネタリー波周期が短くなることを明快に示した。
4. 北極ポーカーフラット及び南極デービス基地における比較観測により、高緯度のMLT領域における平均的な大気大循環に、南北非対称性が存在することを見出した。

本論文により、中緯度及び高緯度MLT領域における平均風、大気潮汐波、プラネタリー波の振幅と位相、並びにそれらの季節変動特性が詳細に解明された。これらの結果は、従来から観測データの蓄積の少なかった領域での特性を初めて明らかにしたものであり、MLT領域のダイナミクスのグローバルな理解に貢献するものと考えられる。

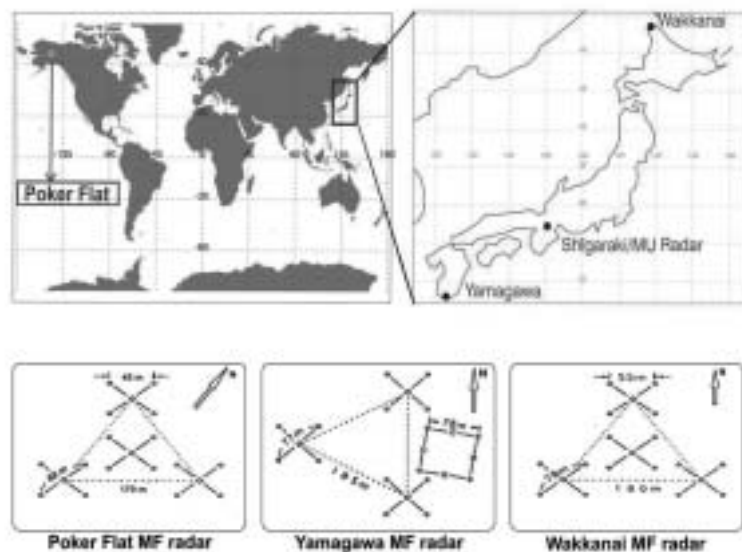


図1. 山川、稚内、米国のアラスカ・ポーカーフラットに新設されたMFレーダーの位置とアンテナ配置

酒井 恭 輔 (野田教授)

「2次元フォトニック結晶レーザの結合波理論の構築」

平成19年1月23日授与

2次元フォトニック結晶レーザは、フォトニックバンド構造のバンド端における光の定在波状態を共振器として用いるもので、既存の半導体レーザでは困難である大面積での単一モードコヒーレント動作を可能にするものと期待されている。さらに、レーザビームの形状は、フォトニック結晶を構成する格子点の形状により制御可能であり、例えば、真円形状の格子点を用いることで、不透明微粒子の光トラッピングや微小集光点の形成が可能なドーナツ状ビームを生成することが出来る。

このような特長をもつ2次元フォトニック結晶レーザの解析には、従来、平面波展開法およびFDTD法と呼ばれる数値計算法が用いられてきた。しかし、両者とも、レーザ特性の基本的な物理的機構の理解を与えるものではなく、得られた結果の解釈と妥当性の判断が困難という問題があった。本論文では、周期的屈折率分布に基づく2次元的な光の回折・結合現象を、より簡便にモデル化し、物理的に極めて見通しの良い理論の構築に成功している。さらに、実験との詳細な比較も行い、その妥当性・有効性を示すことにも成功している。本研究で得られた成果は、以下のようにまとめられる。

1、フォトニック結晶における光の回折・結合を記述する光波として、TM偏光の場合では、基本となる4波(R,S)を、TE偏光では、さらに1つ次数の高い波(F)を4波加えた8波を用いることが、現実的なデバイス動作をする上で、有効であることを見出した(図1)。これらの光波の回折・結合を表す結合波方程式を導いた後、バンド端のエネルギーを導出し、これらが、現実のデバイス特性と極めて良好な一致を示すことを明らかにした。

2、続いて、TE偏光の場合に強く表れる上下方向への光の回折(面発光機能)をも取り込んだ計算を行い、図2に示すように各モード(A,B,E)の閾値利得を導くと同時に、閾値利得と回折強度との関係を明らかにした。さらに、閾値利得と実験結果とが、うまく対応することを示すことに成功している

3、端面での反射等の影響を取り込んだ解析も行い、適切な端面反射の導入により、モードの選択性が格段に向上し、より安定な単一モードコヒーレント発振を実現することが可能になることを示した。

以上、本論文は2次元フォトニック結晶レーザを見通しよく設計・評価することが可能な、極めて有効な解析法を確立したものである。

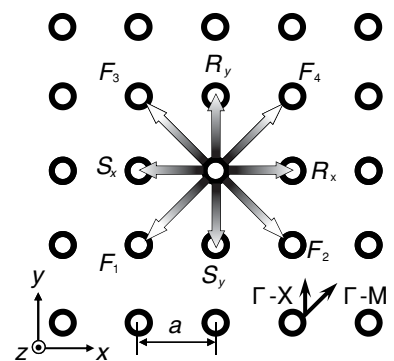


図1. 解析モデル

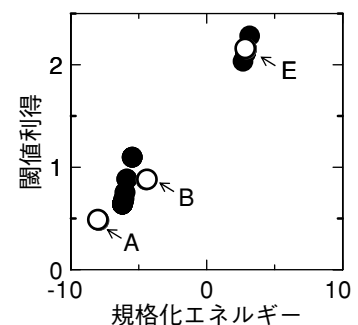


図2. 共振モード特性

山田 義春 (鈴木教授)**「Bi系高温超伝導体の微小構造作製とその超伝導および輸送特性に関する研究」****平成19年1月23日授与**

高温超伝導体に代表される強相関電子系は、現在のエレクトロニクスの主役であるSi等の半導体とは異なり、電荷、軌道、スピンの強相関しており、多彩な物性を発現し得る。これをどう理解すればよいかまだはっきりとは分かっていないが、理解できたときのテクノロジーとしての広がり大きなものとなる可能性があり、エレクトロニクスのさらなる発展が期待できる。このため、強相関電子系はその基礎的な興味はもちろん、応用も視野に入れて幅広く研究されている。電子間の強相関のために起こる現象の中でも、高温超伝導はその現象の著しさ、またその応用の広さから特に注目されている。

本研究では、Bi系高温超伝導体の固有ジョセフソン接合の応用をねらいとして、その微細加工技術の確立を目指し、また微小構造を用いて初めて可能な固有トンネル分光や劈開単結晶薄膜を用いた過剰酸素量制御によるドーピング依存性に関する研究を行った。本研究の主な成果は次の通りである。

1. フォトリソグラフィとイオンミリングを用いて、Bi系高温超伝導体単結晶に微小メサ構造を作製し、ジョセフソン接合特性の観察、さらに固有接合を用いた新しいトンネル分光法である固有トンネル分光をこの微小構造によって可能にした。さらに、固有ジョセフソン接合の応用にとって重要な課題である劈開による薄膜形成を行った。バルク単結晶から微細加工と劈開によって薄膜状に試料を切り出すことで、通常の薄膜堆積法では実現困難な単結晶と同じ品質の薄膜試料を作製した。
2. 微小メサ構造を用いて抵抗率、最大ジョセフソン電流密度を測定し、固有トンネル分光によってエネルギーギャップ構造の観察を行った。エネルギーギャップ構造の観察から、ドーピングが多いほど超伝導ギャップが小さくなることを明らかにした。またジョセフソン電流についてはドーピングが多いほど大きくなる傾向を見出した。従来のジョセフソン接合の理解では、超伝導ギャップが大きいほどジョセフソン電流も大きくなるのに対し、この一見整合しない実験結果を、本研究では超伝導領域の割合を用いて半定量的に説明し、超伝導が空間的に相分離していることを示した。
3. 元素置換によってバルク単結晶での過剰酸素量制御では実現が困難な不足ドーピング試料に固有トンネル分光を行った。この試料では最適ドーピング近傍の試料のスペクトルとは大きく異なる特徴的なスペクトルを得た。まず、鋭い超伝導ピークはみられず肩構造、または小さいピークのみが観察された。さらに、高バイアス側の微分コンダクタンスが転移温度以下で温度を下げると増大し、磁場をかけると減少した。このような特徴を説明するために、超伝導領域が擬1次元的なストリップ状に分布するモデルを考察し、超伝導の不均一性のスケールをおよそ60nmと見積もった。
4. 微細加工と劈開によって作製したBi2212の単結晶薄膜を用いて過剰酸素量の制御を行った。過剰酸素量制御で初めて絶縁体まで系統的にドーピング量の制御を可能とした。抵抗率およびホール係数を測定し、他の高温超伝導体のドーピング依存性と比較することで、絶縁体転移近傍のホール係数はBi2212のみ明らかに小さい値となっており、Bi2212で転移温度が抑制されていることを示した。この原因として、過剰酸素に伴う結晶構造の乱れ、特に頂点酸素の移動が重要であると考察した。

以上述べたように、微小構造を作製することによってBi系高温超伝導体の物性を測定するという新しい手法を用い、特に不足ドーピング領域で超伝導状態が空間的に相分離していることをバルクの特性として明らかにした。超伝導状態では電気抵抗がなくなるため、相分離があることを示すのは困難であるが、固有ジョセフソン接合というユニークな材料にさらに微小構造を用いることでこれを可能にした。この結果は、高温超伝導という物理現象の本質として重要である。

梅本 泰子 (深尾教授)

「Studies on Orographic Rainbands Based on Combined Wind Profiler-Weather Radar Observations」

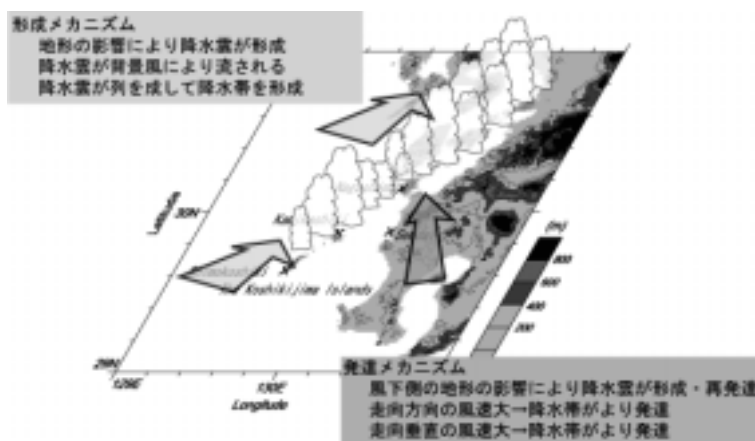
(ウィンドプロファイラ・気象レーダー複合観測に基づく地形性降水帯の研究)

平成19年3月23日授与

停滞性の線状降水帯については従来から多くの研究が行われているが、その内部構造や発生・発達メカニズムは十分に理解されていない。これは従来の気象庁現業観測等では、時間・空間的に高分解能で連続観測することが困難であったこと、数値モデルを用いた再現実験が成功していないことが主な要因である。これに対して本論文は、東シナ海・九州梅雨特別観測で得られた気象ドップラーレーダーやウィンドプロファイラ、気象ゾンデ等の時間・空間的に従来にない密なデータを用いて、地形に起因する停滞性の線状降水帯（甌島ライン）の内部構造及び発生・発達メカニズム解明を目指すものである。次いで、2001年に運用を開始したウィンドプロファイラネットワーク等の気象庁現業観測データを用いて夏季の四国東部に発生した線状降水帯の内部構造及び発生・発達メカニズムを明らかにした。

本論文により得られた成果は次の通りである。1. 甌島ラインは梅雨前線の暖域に位置する甌島列島の地形の影響を受けて発生した対流性降水雲が、対流圏下層の南西風に流されながら南西から北東に並び、細長い降水帯を形成していた事、また、甌島列島の山岳は小規模にも関わらず、持ち上げ凝結高度がこれより低く、対流不安定で、かつフルード数が大きな値を持つ大気場が甌島列島周辺に長時間持続したことでこのような降水帯が形成し得た事を観測的に明らかにした。2. 甌島ラインについて複数の事例を比較することで、甌島列島周辺やその風上の下層領域における多量の水蒸気の存在、強い南西風、及び下層に存在する降水帯の走向に垂直な風成分が降水帯の発達に寄与していることを明らかにした。また、甌島列島の風下側の地形の影響により、降水雲の形成・再発達が起り、長さ200kmもの降水帯が形成されていた。3. 夏季の四国東部で発生した停滞性線状降水帯の内部構造及び周辺の大気・風速場の特徴から、室戸岬の地形の影響を受けて発生した対流性降水雲が南風に流され、南北に伸びる細長い降水帯を形成した。また、風下側の山岳地形及び降水帯に対して流入する気流場の存在が降水を強化していたことを明らかにした。4. 梅雨期の九州西部、夏季の四国東部でそれぞれ発生した線状降水帯の内部構造や発生・発達メカニズムに関する多くの共通点から、一般的な地形性降水帯の特徴が示され、これらと同様な条件が整えば、一般に発達した降水帯ができにくいと考えられる小規模な山岳周辺でも、地域・季節に関係なく発達した線状降水帯が形成しうる事が分かった。

以上、各種観測に基づき、これまで未解明であった線状降水帯の内部構造や背景場の特徴を初めて明らかにした (図)。



山末耕平 (引原教授)

「Studies on Time-Delayed Feedback Control of Chaos and its Application to Dynamic Force Microscopy」

(カオスの時間遅れフィードバック制御とそのダイナミックモード原子間力顕微鏡への応用に関する研究)

平成19年3月23日授与

非線形力学系に「カオス」と呼ばれる不規則かつ長期予測不可能な振る舞いが生じることは、よく知られています。カオス現象は、1960年代初頭に京大電気系の上田 (現名誉教授) とMITのローレンツによって独立して発見され、1970年代から1980年代には、工学システムを含む様々な力学系にカオス現象を生じることが明らかにされました。1990年代以後、現在では、研究者の興味はカオスの工学的応用を見据えたものへとシフトしています。その端緒となったのが、1990年、Ott, Grebogi, Yorkeらが提案した「カオス制御」のアイデアです。彼らは、カオスの性質をうまく利用し、力学系のパラメータをわずかに変化させるのみでカオス振動の安定化が可能であることを示しました。

本研究は、この「カオス制御」を実現する手法の1つとして知られる「時間遅れフィードバック制御」(Time-Delayed Feedback Control; TDFC)の基礎とそのナノテク分野への応用に関するものです。本論文では、これまで未解明であったTDFCによるカオス安定化のメカニズムを、従来の目標軌道の安定性とは異なる、制御された系の位相空間の大域構造の観点から明らかにしています。また、近年、ナノテク分野で必須の計測機器であるダイナミックモード原子間力顕微鏡 (Dynamic Force Microscopy; DFM) のセンサに生じるカオス振動にTDFCを適用することを提案しています。以下に、本論文で得られた主要な成果を掲げます。

1. TDFCを適用したDuffing系に生じる複数の定常状態に関して、その力学的性質および発生消滅メカニズムを分岐理論に基づいて明らかにしました。複数の定常状態は、制御対象のカオスアトラクタに内在する目標軌道とは異なる不安定周期軌道 (共存軌道) に由来し、それらが安定化されることで、制御された系に複数の定常状態が生じることを示しました。
2. 複数の定常状態が共存する系について、相空間である関数空間上の引力圏構造を検討しました。本研究では、目標軌道の引力圏が自己相似的な境界構造を持ち、目標軌道安定化の成否を極めて難しくする場合があることを初めて明らかにしました。さらに、制御された系の関数空間上の位相構造を明らかにし、安定化できない不安定周期軌道に関わるホモクリニック構造のフィードバックゲインの増加にともなう変化と、その制御特性との関係を示しました。
3. フィードバックゲインの変化に伴う大域構造の変化と共存軌道の消滅との関連をハーモニック・バランス法を用いて考察し、共存軌道が対消滅する場合と目標軌道に合致する場合のメカニズムを明らかにしました。
4. DFMのセンサであるカンチレバーに生じるカオス振動の安定化にTDFCを適用しました。カンチレバーの数式モデルに基づき、TDFC適用の効果を数値的に検証し、2つの異なるメカニズムで生じるカオス振動の安定化が可能であることを示しました。

上記のように、本論文はTDFCの制御特性の詳細な検討、およびそのDFMへの応用に関して提案したものであり、非線形力学の基礎的研究とその工学的応用への具体的な展開を図ったものです。現在、筆者は、京都大学VBLに博士研究員として所属し、電子工学専攻・松重研究室と連携して、TDFCの実機DFMへの適用を進めています。最後になりましたが、常日頃、御指導頂いている先生方、御議論頂いている研究室メンバーの皆様に厚く御礼申し上げます。

東川甲平 (引原教授)

「瞬時電圧低下補償用高温超伝導SMESの最適設計に関する基礎研究」

平成19年3月23日授与

近年の高度技術社会の進展に伴って電力品質への要求が高まる一方、主に落雷を原因とする瞬時電圧低下（瞬低）は現在のところ不可避な現象として認識されている。この瞬低は停電と比較して極めて高い頻度で生じる現象であり、また例えば半導体関係の工場では瞬低1回当たりの被害が億円単位にも及ぶことから、特に最近では瞬低対策のニーズが高まっている。一方、超伝導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES）は、超伝導コイルに電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵するものであり、大電力の高速出し入れが可能といった特長を有している。従って、同装置は瞬間的な電力の供給を必要とする用途に極めて有効な装置であり、工場を丸ごと瞬低から守るような形態で実用化も開始されている。

本論文は、上記SMESの高温超伝導（HTS）化を目指すものであり、その設計手法の確立を目的としている。HTS化によってスイッチ一つで冷却できる冷凍機伝導冷却HTSコイルを実現できれば、現状のSMESで採用されている高価で取り扱いに熟練を要する液体ヘリウムによる浸漬冷却の必要はなくなり、同装置の導入拡大が飛躍的に進展すると期待される。得られた成果は以下のとおりである。

まず、現状のSMESに適用されている低温超伝導（LTS）コイルと同様の設計手法、すなわち臨界電流を基準とする手法をHTSコイルに採用した場合、冷凍機が冷却しきれない程度の発熱が生じる可能性を指摘した。これは、HTS線材では図1に示すように工学的に決定される臨界電流以下の通電電流に対しても若干の発熱が生じる場合が存在するためである。そこで、このような非線形通電特性から得られる発熱に制限を設けたHTSコイルの最適設計手法を、有限要素法と遺伝アルゴリズムを連携して開発した。また、この際には上記通電特性の温度・磁界・磁界印加角度依存性まで定量評価できるパーコレーション遷移モデルを適用した。以上により、温度環境・磁界環境といった運転条件の選択肢の広いHTSコイルに関して系統的に設計を行える画期的な手法が開発されたことになる。さらに、同手法によってSMES用HTSコイルの最適コイル構成・運転温度まで検討した結果、図2に示すように、従来SMESで採用されているマルチポール型ではなくトロイダル型が適しており、また運転温度を25K程度とすれば高付加価値が得られることも提案した。

現在、本論文の成果は、次世代HTS線材を適用したSMESを開発するNEDOのプロジェクトに採用されている。電磁力等の問題まで取り扱って検討を進めた結果、次世代HTS線材を適用すれば更なる高エネルギー密度化が実現される見通しが得られるなど、研究は順調に進んでおり、同プロジェクトの方向性に影響を与える様々な成果が得られているところである。

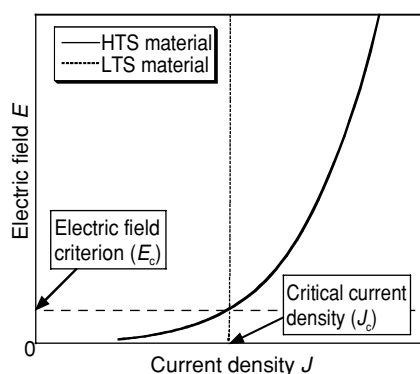


図1. HTS材料とLTS材料の電流輸送特性比較

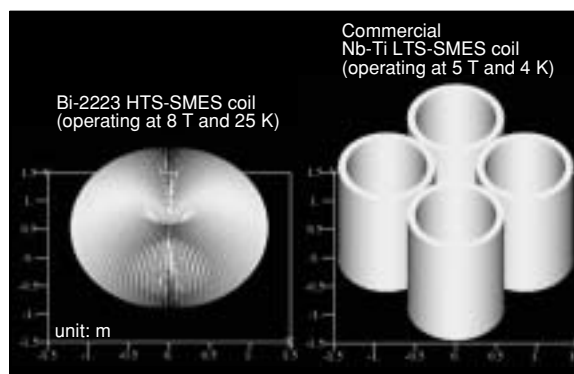


図2. HTSコイルとLTSコイルの形状比較 (20MJ)

吉 武 惇 二 (吉川榮和教授)

「天然ガス市場の国際動向と日本の都市ガス事業の展開に関する分析研究」

平成19年3月23日授与

本研究は、地球温暖化対策やエネルギー供給安定性向上のための重要な選択肢となる天然ガスの利用拡大について、アジア太平洋地域における今後の天然ガスの需給を予測し、未開発天然ガス資源の開発スキームを提案するとともに、将来における天然ガスの輸送・分配インフラのあり方、克服課題およびその対応策を提案するものである。

まず、日本に輸入される天然ガスの8割を依存しているアジア太平洋地域のエネルギー消費動向や経済成長とエネルギー消費との関連を分析し、特に天然ガスの生産・需給動向について分析した。その上でこの地域での将来のLNG（液化天然ガス）需給状況を供給安定性の視点を重視して予測する方法として、将来における供給が確実にされるLNGプロジェクトによる供給可能量を積算する方法を提案し、実際に2010年と2015年におけるLNGの需給予測を行った。さらに、予測した需給予測に基づき、我が国が今後LNGを安定的かつ経済的に輸入するための課題について考察した結果、①LNG供給元の多様化、②取引契約条件の柔軟性の向上、③資源開発・輸送事業への参画、④天然ガス生産国との協力体制の構築が必要不可欠であることが分かった。

その後、天然ガス生産国との協力体制の構築に着目し、アジア太平洋地域の発展途上国での未開発天然ガス資源を開発し、都市ガス事業を創成する協同スキームを提案した。具体的には、まず、未開発天然ガス資源保有国での都市ガス事業創成の成功例として、日本の技術支援によるマレーシアの事例を分析し、これを元に事業創成のために必要な6つのサブスキームからなる新しい協同スキームを提案するとともに、このスキームの適用条件を検討した。提案する協同スキームは、(1)天然ガス事業の事前検討のための需給予測サブスキーム、(2)都市ガス事業推進母体の設立サブスキーム、(3)需要家のための業務確立サブスキーム、(4)インフラ整備のための資材調達サブスキーム、(5)ガス事業関連法律の制定サブスキーム、(6)産ガス国への技術移転サブスキームの6つから構成される。また、この提案する協同スキームを適用するための条件として、(a)天然ガスの埋蔵量が十分であること、(b)ガス田から需要地までの距離が短いこと、(c)これまで都市ガス事業が存在していないこと、(d)都市ガス事業を推進する母体が存在すること、(e)需要が十分も込めること、(f)政情が安定していること、の6つを挙げた。また、アジア太平洋地域で上記の条件を検討した結果、フィリピンとベトナムが要件を満たしており、両国について提案スキームを適用して都市ガス事業を創成できる可能性があることを導出した。

一方、日本国内における天然ガスの普及拡大を支える輸送・配給インフラのあり方を検討するため、まず、日本における天然ガスインフラの発達形態を分析した。その結果、日本では、天然ガスを輸入する際には船により沿岸部に建設された受入基地にLNGの形態で輸入され各需要地へ輸送されるが、これまで各受入基地を中心にしてサテライト基地のあるローカル市場へと配給先が広がるようにインフラが発達してきているという特徴があることが分かった。さらに、今後の天然ガスの普及拡大を考慮し、将来の天然ガス輸送形態のあり方を検討するため、ローリートラック、鉄道コンテナ、LNG内航船、パイプラインの4つの輸送方法について、経済性、環境負荷、安全性、信頼性等の観点から評価した。これらの評価結果をもとに、今後はローカル市場同士をパイプラインで連結する方法が有効であることを示すとともに、これを纏めて新たに「滲み出し・連結方式」という発達形態の概念を導出した。

さらに、欧米と日本の天然ガス生産、形態変換、輸送、需要の流れを図式表現法の一つであるマルチレベル・フロー・モデル (Multi-Level Flow Model; MFM) で表現することにより比較し、欧米がインサイドアウト型&サプライ・プッシュ型に対して、日本がアウトサイド・イン型&デマンド・プル型とする新たな分析結果を導出した。これをもとに欧米と比較して日本が特異的な天然ガス供給構造を有することを明らかとし、この構造が日本における天然ガス高価格化の一因となっていることを示した。そして、日本で天然ガス普及拡大を図るための克服課題として、①天然ガスパイプラインの整備、②LNG売買契約や価格決定方式の改善、③燃料電池やガスタービン等の新たな利用形態の推進、④電力部門、都市ガス部門、運輸部門における需要拡大のあり方などを論じ、その具体策を提案した。

高松 輝久 (吉川潔教授)

「Research and Development of an Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device for Humanitarian Landmine Detection」

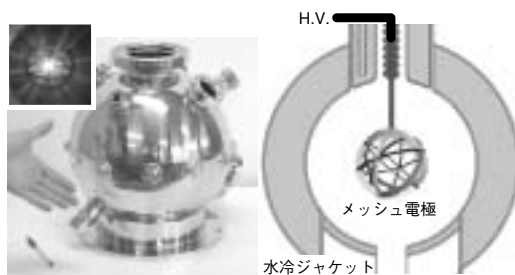
(人道的対人地雷探知のための慣性静電核融合装置の開発研究)

平成19年3月23日授与

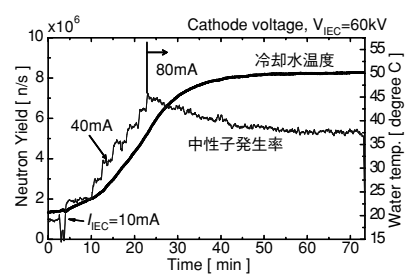
近年、放射線は医療、産業などの幅広い分野で利用されており、中性子線も様々な分野への応用が考えられています。例えば、中性子が原子核に吸収されることで発生するガンマ線を測定し元素の同定を行うことで、隠された爆発物などを探知することが可能で、革新的な地雷探知法としての応用が期待されています。このように、中性子線は優れた特徴を持ちますが、その利用例はX線など他の放射線に比べると限られたものでした。その大きな理由のひとつに、利用しやすい中性子源がなかったということがあげられます。現在、利用されている中性子源には研究用原子炉などの大規模施設利用、 ^{252}Cf などの核分裂性放射性物質、重水素核融合反応を用いた小型装置があげられますが、原子炉は経済性、放射性物質は安全性、小型核融合装置は中性子強度と寿命の点で利用しにくいものでした。現在研究が進められている中性子を用いた微量元素の測定やがん治療をはじめ、特に地雷探知への応用では、小型で安全性に優れた扱いやすい中性子源の開発が求められています。

そこで私は、慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合の原理を応用した、高性能中性子源の研究開発を行いました。IEC装置は前述の小型核融合装置の一種ですが、一般的な装置が小型の直線状加速器によって生成した重水素イオンビームをターゲット電極に衝突させるという原理であるのに対し、IECでは球状の構造、かつメッシュ状の電極を採用しています。そのため、単純な構造ながら重水素イオンの生成、加速、収束を同時に行い、重水素ビーム同士を直接衝突させることができるため、原理的に高効率、長寿命で、安全性にも優れています。

研究ではIEC装置の性能をさらに高めるため、まず、マグネトロン放電による外部イオン源をIEC装置に付加する実験を試みました。その結果、IECの動作ガス圧力を低減できること、それにともない規格化中性子発生率が改善されることが分かりました。さらに、分光計測法を用いてイオンエネルギー分布を測定し、平均エネルギーが30%程度向上していることを明らかにしました。また、超小型のIEC中性子源を設計、製作し、メッシュ状電極の高電圧導入端子部に窒化硼素絶縁体を併用、装置本体への水冷ジャケットの設置といった独自の改良によって、従来の大型のIEC装置以上の中性子発生率と、大出力運転時における安定した動作を達成しました。さらに、この水冷却ジャケット部分を生成中性子の減速材ならびに反射材として利用する方式を考案し、実験とMCNPコードを用いた解析によって、上部の厚い冷却部により中性子が減速、反射され、その結果、薄い冷却部の下部方向に中性子束が集中し、中性子の空間分布に指向性を持たせることができると分かりました。以上の研究成果を元に、人道的対人地雷探知装置のための超小型高性能IEC中性子源を製作し、模擬爆薬を用いた実験の結果、爆薬中に含まれる窒素原子の検出に成功し、IEC中性子源が地雷探知用中性子源に応用可能であることが分かりました。



慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合装置



IEC装置の運転特性

藤原 淳 (吉田教授)

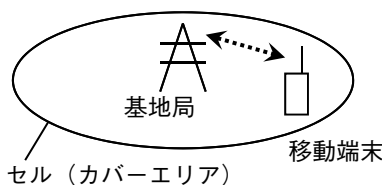
「マルチホップ伝送における無線リソース割当法の研究」

平成19年3月23日授与

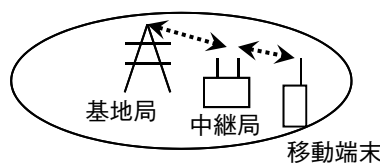
日本における公衆移動通信サービスは、1979年に始まった自動車電話からおよそ30年になる。この間、提供されるサービスは音声通話から高速データ伝送へと大きな進化を遂げ、無線伝送方式もFDMA方式からTDMAやCDMA方式へと変遷している。しかし、主な無線接続形態としては、携帯電話端末とネットワークに接続されている近隣の基地局との接続に限られていた（基地局がセルと呼ばれる小エリアをカバーすることから、セルラ方式と呼ばれる：図（1））。一方、セルラ方式によるネットワークと異なり、複数の無線局が相互に無線接続し構成されるメッシュネットワーク（あるいはアドホックネットワーク）は、送受信局が直接接続できない場合に、両局の間の無線局が伝送を中継する「マルチホップ伝送」により容易なエリア展開が可能なることから、研究から実用に至るまで幅広く検討が行われている。

このような、無線伝送方式や無線接続形態について検討する際には、空間的な周波数利用効率が重要となる。無線周波数資源は有限であるため、場所や用途に応じて利用できる周波数帯域が（公的な機関等により）規定される。このように規定された周波数帯域のもとで、どの程度の空間的伝送容量（例えば単位面積・時間あたりに伝送できるビット数）が可能となるかが検討方式の評価基準の1つとなる。この空間的伝送容量は様々な要因に影響されるが、例えばカバーできるエリアの大きさ（エリアカバレッジ）と相反する傾向がある。これはマルチホップ伝送において、エリア拡大に伴い、空間的伝送容量が低減することを意味している。よって、マルチホップ伝送やメッシュネットワークにおいて特性評価を行う際には、空間的伝送容量やエリアカバレッジなどを単独で評価するのではなく、これらの複数の評価指標の関係も含めた評価を行うことが重要となる。本研究では、第3世代移動通信の標準方式の1つであるCDMA方式にマルチホップ伝送を適用した場合（図（2））の空間的伝送容量およびエリアカバレッジを評価した。CDMA方式は受信信号に含まれる干渉が大きくなるにつれて伝送容量およびエリアカバレッジがともに小さくなる特徴があるが、この干渉の大きさに大きな影響を与える周波数の割当方式について着目した上で、空間的伝送容量をエリアカバレッジとの関係を定量的に明確にした。

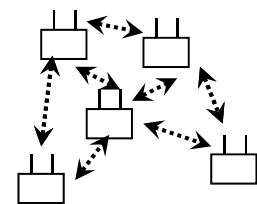
さらに本研究では、無線LANにおいて広く用いられているCSMA/CA方式により構成されるメッシュネットワーク（図（3））において、伝送容量を低下させる要因として知られる「さらし端末問題」について検討した。複数の無線チャンネルが利用できる場合に、特定の条件に基づいてチャンネル割当を行うことにより、さらし端末問題は回避できるが、チャンネルの設定法は各無線局における接続可否の状況に依存する。本研究では、さらし端末問題を回避するためのチャンネル割当の条件が彩色問題と等価であることを示した上で、メッシュネットワークにおいて必要となる無線チャンネル数を明らかにした。彩色の対象となるグラフが平面グラフ（平面地図の彩色問題など）である場合には4色で十分であることはよく知られているが、メッシュネットワークにおける彩色グラフは平面グラフとはならないことから4色（すなわち4つの無線チャンネル）では十分とはならず、メッシュネットワークの構成の複雑さに依存する。



(1) セルラ方式



(2) マルチホップ伝送を適用したセルラ方式



(3) メッシュネットワーク

A. K. M. Baki (橋本教授)

Study on Beam Forming and Direction-of-Arrival Measurement for Solar Power Satellite

(宇宙太陽光発電所のためのビーム形成と到来方向測定法に関する研究)

平成19年3月23日授与

An area of continuing uncertainty is the “energy resources”. A huge and clean power source is needed for sustainable economic activities. One source of huge and clean power is the space solar power. Solar Power Satellite (SPS) can send enormous power to the Earth as the form of microwave (MW). Precise MW power beam steering is a most critical goal for SPS because without precise beam steering the higher efficiency of MW power can not be assured at the rectenna location.

Microwave Power Transmission (MPT) system designers must be concerned with Beam Collection Efficiency (BCE), Side Lobe Levels (SLL), size, weight, and cost among many other factors. BCE and Maximum Side Lobe Level (MSLL) are used for an evaluation of the MW beam. Reduction of SLL is of paramount importance especially for the MPT in order to achieve the highest possible BCE and to reduce interference to other communication systems. Isosceles Trapezoidal Distribution (ITD) edge tapered antenna, which is a new concept, is studied for the first time for SPS as an optimization. ITD is better than full edge tapering and uniform amplitude distribution. It was found that the highest BCE and lowest SLL are possible to achieve in ITD edge tapering. Different amplitude distribution systems like uniform, Gaussian, Dolph-Chebyshev and the newly derived ITD method have been compared. The SLL reduction in ITD is even higher than those of other kinds of edge tapering.

A statistical method of achieving minimum SLL with random element spacing was also studied. Different properties of large antenna arrays with randomly, uniformly and combined spacing (uniform with little perturbation) of elements were studied. A new unified approach in searching for reducing SLL by exploiting the interaction of deterministic and stochastic element spacing was studied. The models indicated an advantage with respect to side lobes in the large area around the main beam and strongly reduced SLL in the entire visible range.

Though it is possible to reduce SLL with statistically thinned array or combined stochastic algorithm but it does not guarantee higher BCE and needs edge tapering to achieve high efficiency. The performance of ITD was further improved from the perspective of both Maximum Side Lobe Level (MSLL) and BCE by using unequal spacing of the antenna elements. The MSLL for ITD with Unequal element spacing (ITDU) was found to be the lowest when it was compared with Gaussian, ITD and uniform amplitude distribution. The MSLL of ITDU is much lower than that of ITD. Moreover the BCE is found to be the highest in newly derived ITDU. The unequal spacing was derived from the ITD concept and by using the sinc function. Both ITD and ITDU are new concepts. The merits of ITDU over ITD and Gaussian edge tapering were also studied. Experimentation on ITDU was also done and it was found that the experimental results agree well with the simulation results (Figure).

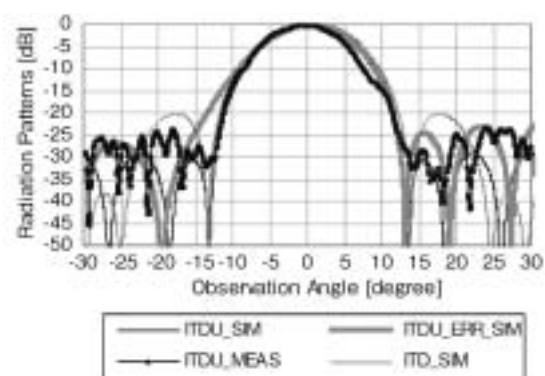


Figure 5 Simulated, measured and simulated (with error) radiation patterns of ITDU and simulated radiation pattern for ITD with 11 phased array antenna elements. (Experimental verification is done after submitting the dissertation).

新 浩 一 (橋本教授)

「Study on Electrostatic Waves in the Terrestrial Bow Shock Region via Spacecraft Observations」

(衛星観測による地球磁気圏バウショック領域における静電波動に関する研究)

平成19年3月23日授与

本研究では地球磁気圏バウショック近傍で観測される静電プラズマ波動、特にバウショック下流で観測される準正弦静電波動ならびにバウショック上流で観測される静電孤立波に注目し、科学衛星Geotailに搭載の波動観測装置 (PWI)、特に波形観測装置 (WFC) と低エネルギープラズマ観測装置 (LEP) のデータを用いた波形解析ならびに統計解析の結果から、その伝搬や励起機構について議論した。

1. 地球磁気圏近傍のバウショック下流領域においては、1kHz帯で準正弦静電 (EQM: Electrostatic quasi-monochromatic) 波動 (図1) が頻繁に観測される。これまでこの波動はドップラーシフトしたイオン音波であると考えられてきたが、一般にこの領域では電子温度がイオン温度より低く、この励起条件を満たさない。Geotail衛星で観測を行ったところ、EQM波とともに速度約2000km/sの電子ビームが観測された。また統計解析からEQM波の電界強度がバウショックのショックポテンシャルと相関が良いことが分かった。以上の結果からEQM波がバウショックによって加速された電子ビームによる電子音波であることを示した。
2. バウショック上流のフォアショック領域で観測される静電孤立波 (ESW: Electrostatic solitary wave) に注目し励起機構の検討を行った。統計解析からESWがバウショックの近傍で多く観測される結果が得られるとともに、図2に示す、ショック面の法線方向と外部磁場とのなす角であるショック角に対するESWの発生頻度から、準平行衝撃波上流でESWが多く観測されることが分かった。電子フォアショック領域では、バウショックで加速された電子ビームと同時に観測されることから、電子2流体不安定性によるESWの可能性を示した。一方イオンフォアショック領域では、非熱的イオンと共にESWが観測されることや上で示した統計解析の結果から、このESWが電子-イオン2流体不安定性で励起されている可能性を示唆した。
3. 上で示したバウショック上流で観測されるESWは、一般に外部磁場に対し平行な電界ベクトルを持つが、これらとは異なる外部磁場に対して斜めの電界成分をもつESWを新たにイオンフォアショック領域で観測した。統計解析から、これらESWの電界方向とショック面の法線方向に良い相関があることを示すとともに、バウショックからの反射イオンによってバウショック面に平行方向に一樣な外部磁場に依存しないポテンシャル構造が発生し、これが上流に伝搬する過程において、外部磁場に斜めの電界成分をもつESWとして観測されることを提案した。

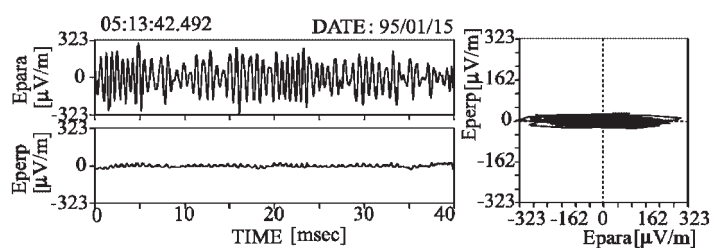


図1. バウショック下流で観測したEQM波の波形 (外部磁場に平行な電界成分 (左上図)、垂直な電界成分 (左下図)) とホドグラフ (右図)

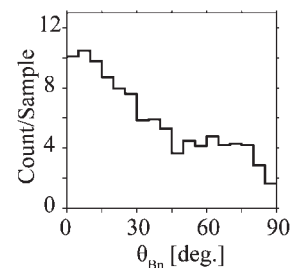


図2. バウショック上流で観測した、ショック角に対するESWの発生頻度

外 池 昌 嗣 (黒橋禎夫教授)

「Natural Language Processing Exploiting Topics in the Web Text Archive」
 (ウェブテキストアーカイブにおける文書のトピックを利用した自然言語処理)
 平成19年3月23日授与

ウェブは、大規模かつ、様々な言語の文書を含む言語資源・知識源であるため、これまでの自然言語処理研究で広く利用されてきた。ただし、ウェブ上にある文書のトピックは実に様々であり、これらの文書を有効に利用するためには、目的のトピックの文書のみをうまく扱う仕組みを導入する必要がある。例えば Google AdSense というインターネット上の広告システムにおいては、興味を持ちそうな人に広告文を見てもらうために、広告文のトピックに関連するウェブページに広告が表示されるような工夫が行われている。本論文では、このようなウェブ文書のトピックを利用し

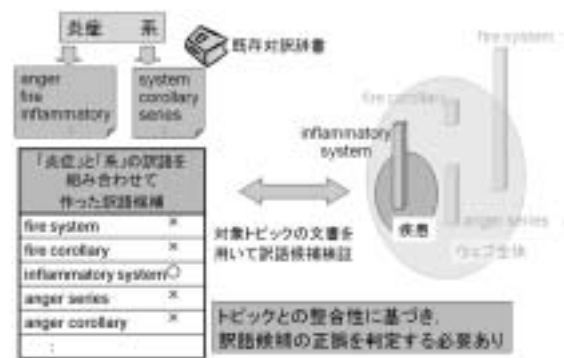


図1. 疾患トピックの用語「炎症系」の訳語推定

た自然言語処理のケーススタディとして、専門用語対訳集を自動生成するタスクと、人間の言葉で書かれた質問文に対して、与えられた答えの候補の中から適切な答えを選ぶタスクについて研究を行った。

専門用語対訳集を自動生成するタスクは、大きく2つの問題に分けて考えることができる。一つは、対訳集に掲載する用語を収集・選定する問題であり、もう一つは、これらの用語を翻訳する問題である。

前者の用語の収集・選定の問題に対しては、与えられた用語が対象トピックに属するか否かを、ウェブを利用して判定する手法を提案した。従来、用語のトピック判定を行うには、一定量の対象トピックの文書を準備する必要があるが、対象トピックの文書が準備できないトピックは扱えなかった。また、用語が文書に出現する頻度を利用していただけのため、安定した性能でトピック判定をすることが困難であった。提案手法では、ウェブを用いることにより、多様なトピックに適用可能とし、また、用語のトピック判定の課題を、用語を含む文書のトピック判定の問題に置き換えることにより、安定した性能を達成した。そして、対象トピックの新しい用語を発見する実験により、その有効性を示した。

一方、後者の、用語の翻訳の問題に対しては、訳語推定対象用語の構成要素の訳語を対訳辞書で調べ、これらを結合して訳語候補を生成し、文書によって訳語候補の検証を行う方法(図1)を採用した。従来手法では、ウェブ全体を利用して訳語候補の検証をしているが、この方法では、トピックによって訳語が違う場合、そのトピックで使われている訳語を正しく選択することができない。これに対して、提案手法は、ウェブからあらかじめ自動的に収集した対象トピックの文書を用いて訳語候補の検証を行うことにより、そのトピックで使われる訳語候補を正しく選ぶことを可能にしている。実験の結果、ウェブ全体を用いる場合に比べ、ウェブから自動収集した対象トピックの文書を利用すれば、検証できる用語の数は少なくなるが、高い精度を達成できることを示した。

そして、最後の、人間の言葉で書かれた質問文に対して、与えられた答えの候補の中から適切な答えを選ぶタスクにおいては、質問文のトピックと答えの候補の間の語彙的な関係の強さを、ウェブを利用して測定し、答えの選択を行う手法を提案した。提案手法は、質問文のトピックと解候補の語彙的な関係の強さをサーチエンジンのヒット数を用いて測定するだけでよいので、計算コストがかからず、ウェブ全体の知識を用いることができる。4択クイズ「クイズ\$ミリオネア」の問題を対象とした実験により、質問文のトピックと解候補の語彙的な関係の強さを利用して、79%の問題に答えられることを示した。

なお、本研究は宇津呂武仁先生(筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授)の指導のもとで行い、佐藤理史先生(名古屋大学大学院工学研究科教授)、黒橋禎夫先生にも数々のご助言を頂きました。お世話になった先生方に感謝の意を表します。

土屋 雅 稔 (黒橋教授)

「A Study on Processing of Japanese Functional Expressions and Definition Patterns」

(日本語の機能表現と定義表現パターンの処理に関する研究)

平成19年3月23日授与

本論文は、日本語の機能表現と定義表現の言語処理の方法について論じたものであり、機能表現の処理を研究するための基礎資料として機能表現用例データベースを作成する問題、さらに、機能表現と同一の表記を持つ表現の曖昧性を解消して機能表現を検出する問題、および、小学生用の国語辞典の定義文を対象として定義表現パターンを発見する手法について述べている。

機能表現とは、複数の形態素がひとかたまりとなって、ひとつの機能語相当語として働く表現である。例えば、「出発に**あたって**持ち物を再確認した」という文中の「**にあたって**」の部分が相当する。機能表現には、同一の表記でありながら内容的な働きをする表現が存在することがある。例えば、「壁**にあたって**跳ね返ったボール」という文中の「**にあたって**」は、先の例文における「**にあたって**」とは明らかに異なる働きをしている。このように、機能表現として働く可能性がある表現を含む日本語文の構造を把握するためには、その部分の用法の曖昧性を解消しなければならない。本論文では、機能表現として働いている用例と内容的に働いている用例の両方を収録し、用例中において機能表現として働いている可能性のある候補部分が、実際にはどのような働きをしているかを表す情報を付与したデータベース(図1)を作成し、作成上の問題点について検討した。加えて、得られたデータベースを分析することにより、新聞記事における機能表現の用法の偏りなどを明らかにした。次に、機能表現検出タスクを、形態素を単位とするチャンク同定問題として定式化し、機械学習手法を適用することにより、機能表現の検出を実現する方法を提案し、高い精度で検出できることを示した。

辞書定義文には、見出し語を説明するための典型的なパターンがしばしば出現する。本論文では、辞書定義文から定義表現パターンを発見し、類義語集合と、その集合に属する類義語間の差異を同時に抽出する手法を提案した。この手法では、辞書定義文を構文解析して辞書をグラフ集合に変換し、MDL原理に基づいたグラフ圧縮を行うことによって、定義表現パターンを自動的に発見する(図2)。この手法によって得られた定義表現パターンには、定型表現部分と可変部分とがあり、類義語集合を規定すると同時に、類義語間の差異を示すためのテンプレートとして使うことができる。得られた定義表現パターンを既存のシソーラスと比較し、得られたパターンの内、約1/3のパターンは、定義表現パターンとして利用できることを示した(図3)。

今後は、上記知見に基づき、複数の単語が複合的に働くような言語表現についての研究を行う予定である。



図1. 機能表現データベース

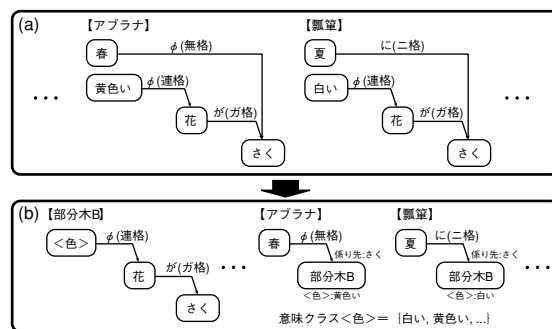


図2. 部分木としての定義表現パターンの発見

桔梗 野山にはえ、庭にも植える 草花。
 ひいらぎ 山地にはえ、庭にも植える 常緑樹。
 オランダ ヨーロッパの北部、北海に面する 国。
 鳥取県 中国地方の北東部、日本海に面する 県。

図3. 発見された定義表現パターン例

瀧 宏 文 (佐藤教授)

「Real-Time Three-Dimensional Acoustic Imaging System with A Reflector and Its Applications」

(反射鏡を用いたリアルタイム三次元超音波イメージングシステムとその適用)

平成19年3月23日授与

今日先進国では心疾患が主な死因の1つとなっている。心疾患の医療診断技術を向上させるため、リアルタイム3次元高分解能超音波イメージング技術の実現が強く望まれている。現在1次元素子アレイを用いた3次元イメージングシステムが実用化されているが、1平面毎に測定を行うため時間分解能が不十分であり心臓など動きの速い臓器を測定することが困難である。さらに、音響レンズなどを用いて送受信ビームを1平面内に集束させるため、音響レンズの焦点の前後で空間分解能が劣化する。

我々は指向性の低い送信波を測定空間全体に送信し、目標からのエコーを反射鏡を用いて小規模2次元素子アレイ上に集束させ、受信信号からバックプロジェクションを用いて3次元画像を再構成するハイブリッド法を提案してきた。提案システムは反射鏡、2次元素子アレイからなり、両者の間には人体とインピーダンス整合がとられた液体が満たされている。図1は提案システムのxz平面における断面図である。提案法では超音波パルスを測定空間全体に送信し、測定空間内の全目標から返ってきた反射エコーを図1のように凹面鏡によりアレイ上に集める。凹面鏡とアレイは固定されているため、アレイ上には焦点を結ばずにじんだ像が得られるが、計算機上でバックプロジェクションを行いアレイ上に得られた受信信号から像の再構成を行う。

提案法では凹面鏡に到達するエコーの多くを受信できるため、2次元アレイのみで受信するときと比較し空間分解能、信号対雑音比を改善できる。そのため提案法では有効開口と同じ大きさの大規模2次元アレイで受信した場合と同等の空間分解能、信号対雑音比が得られる。また、提案法では1回の送受信により全測定空間の像が再構成されるため毎秒5000回の3次元像の更新が可能である。よって心臓など動きの速い臓器に対してリアルタイム3次元超音波イメージングが実現できる。

1回の送受信データを用いた場合、または16回の送受信データを用いて開口合成技術を用いた場合の提案法の空間分解能を図2に示す。ただし、点目標がxz平面内の距離7cmにおいて $x = -1.5, 0, 1.5$ cmに存在するとし、各測定領域における推定電力を求めた。開口合成技術により等価的に開口面が広がり円形に近くなるため、空間分解能が改善されるとともにサイドローレベルも抑圧される。3次元空間を1秒間に300回測定するとき、提案法は従来法と比較し素子数を1/7.5に減らすことができる。

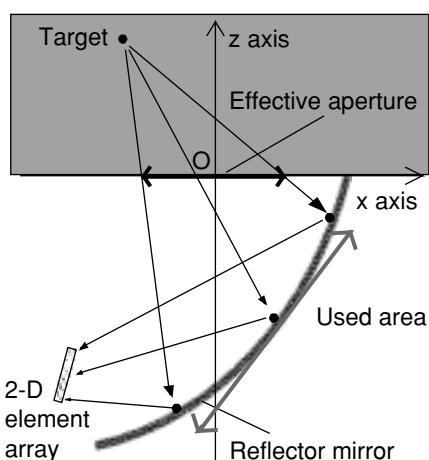


図1. 提案イメージングシステムの概略図

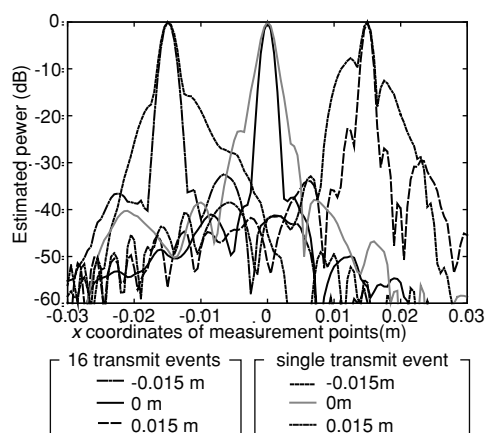


図2. 16回、または1回の送受信を行ったときのxz平面内、距離7cmにおける方位分解能

佐野明秀（佐藤教授）

「光ファイバ伝送における波長分散と非線形光学効果の抑圧技術に関する研究」

平成19年3月23日授与

基幹系超高速光伝送システムでは、光ファイバの波長分散や、光ファイバ中での自己位相変調効果（SPM）、相互位相変調効果（XPM）、四光波混合（FWM）等の非線形光学効果により伝送可能距離が制限される。本研究では、波長分散及び非線形光学効果による伝送品質劣化を抑圧し、光伝送システムの長距離化、低コスト化を実現することを目的とする。

伝送速度が40Gbit/s以上となる次世代超高速光伝送システムでは、波長分散補償は不可欠な技術である。特に陸上システムでは、伝送路切替によるルート変更や、伝送路の温度変化などにより波長分散値が変動するため、受信端において自動的に分散変動を検出して補償する自動分散補償技術が必要となる。本研究では分散変動のモニタ方式に注目し、ルート変更等のシステム再設定時の自動分散補償に向けたモニタ方式として、クロックレベルモニタ法の適用を検討した。本方式により、簡易な構成でありながらSPMなどにより最適補償量に変化する場合にも対応が可能となり、高精度な分散補償が可能となることを明らかにした。また、伝送路の温度変化などに対してインサービス中に適応的に波長分散を補償するモニタ方式として、波長多重された信号間のクロック位相差をモニタすることにより分散変化を高精度に検出する位相差法を用いた適応分散補償方式を提案し、40Gbit/s伝送において実際に適応分散補償が可能であることを実証した。

光伝送分野で従来用いられているNRZ-OOK（Non-Return-to-Zero On-Off Keying）符号に対して、RZ（Return-to-Zero）-OOK符号はSPMの抑圧に対して有効であることが知られている。本研究では、RZ-OOKを用いた光伝送システムの更なる長距離化に向けて、パルス幅マネジメント方式を提案した。本方式は、送信側でデューティ比の大きなRZパルスを用いてファイバ入力パワー制限を緩和し、受信側でパルス圧縮を施すことにより高感度化を達成するものである。さらに、送信光パルスにプリチャープを重畳することによるSPMに対する耐力向上を検討した。また、WDM伝送においてSPM及びXPMによる波形歪を抑圧する手法として、プリチャープに加えて、伝送ファイバの局所分散値及び分散補償量を最適化する分散マネジメント方式の適用を検討した。プリチャープ量、分散補償量、及び伝送ファイバの分散値を最適化することにより、非線形効果による波形歪を抑圧し、長スパン化が可能であることを40Gbit/s/chのWDM伝送系において理論解析及び実験により実証した（図1）。

さらに、光挿入分岐多重装置（OADM）等の狭帯域光フィルタが多段に接続された伝送系における高密度WDM伝送に適した変調方式として、DQPSK符号の適用を検討した。特に、40Gbit/s/ch、50GHz間隔という高密度WDM伝送におけるDQPSK（Differential Quadrature Phase-Shift Keying）信号の伝送特性に関して、RZ化方式に着目して詳細に解析した。このような帯域制限の強い伝送系の場合、partial-RZ化により光パルスのduty比を最適化することによって伝送特性を大幅に改善可能であることを明らかにした。

将来のフォトニックネットワークでは、伝送距離、通過ノード数が波長チャンネルごとにダイナミックに変化することが想定されている。本研究で検討した自動分散補償技術や非線形効果抑圧技術は、このようなネットワークにおける柔軟な波長運用の実現に向けた必要な一歩となり得るものと考えられる。

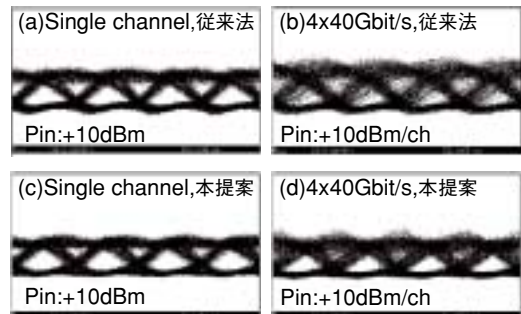


図1. 40Gbit/s受信アイパターン

久木元 伸 如 (小山田教授)

「没入可視化空間における注釈を用いた遠隔協調環境に関する研究」

平成19年3月23日授与

科学技術の進歩は専門領域の細分化が進む一方で、数多くの高度な問題を解決するために学際的な研究連携が必須となる。研究連携を行うために物理的距離や組織を超えて共通の問題に取り組む遠隔協調作業への取り組みが活発化している。

また、コンピューティング能力の向上に伴い、様々な計算結果は複雑で膨大な量となる。これらのデータを直感的に解りやすく提示する方法として、Virtual Reality (以下、VR) 技術を活用した三次元可視化が有効である。

VR空間をネットワークで接続して構築する遠隔協調作業環境では、三次元データの観察にとどまらず、各研究者や研究機関が所有している知をいかして共有して新しい知識を創造するかが課題となる。

本研究ではユーザの周囲をスクリーンで囲むVRシステムを京都と福岡の2拠点に設置し、ネットワークを介して思考や知的発見などの遠隔協調作業を支援する環境を構築した。この環境では可視化画像で構成された空間を共有しつつ、PDAを用いて共有されたVR空間へのインタラクションや注釈付与、音声によるコミュニケーションが可能である。

これによって遠隔地の協調作業間の確然とした意図の伝達が可能となり、可視化画像から知的発見を行う協調作業が実現されることを本論文は示した。

三次元データを三次元空間に表示し、さらに文字や図、音声を用いた協調作業を可能とする本研究の成果は、学際的な問題解決の分野に大きく貢献できると考える。

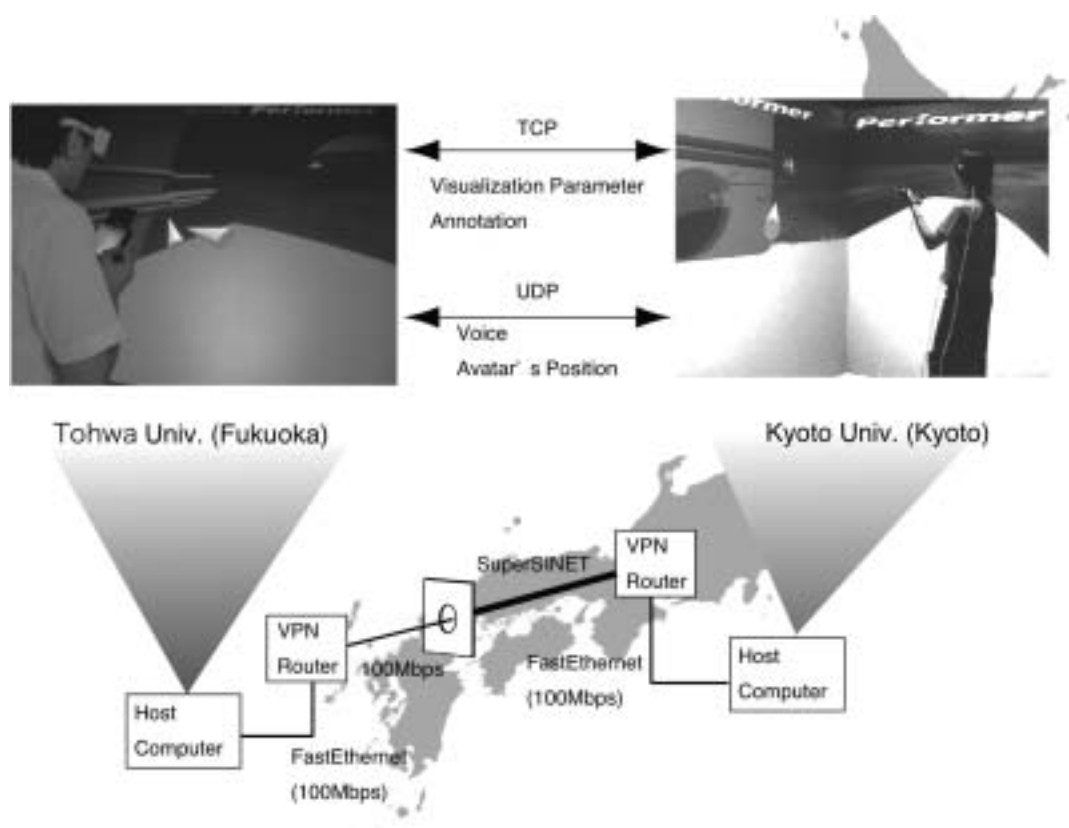


図1. 福岡—京都間で構築した没入型可視化空間

坂本 尚久 (小山田教授)

「ポイントに基づくボリュームデータの生成および表示技術に関する研究」

平成19年3月23日授与

計算科学技術の進歩に伴い、複雑高度化する問題解決の手段として期待されるシミュレーション技術は、高精度・高分解能化されていく傾向があり、そのシミュレーション結果（ボリュームデータ）も大規模化しています。また、計測技術の進歩により高機能・高性能化する画像診断装置（CT/MRI装置）からも大規模なボリュームデータが生成されるようになってきています。ボリュームデータを対象とした可視化手法であるボリュームレンダリングは、医用分野や工学分野だけでなく様々な分野でその有効性が示されていますが、大規模・複雑ボリュームデータに対してはまだ十分な技術が開発されていないのが現状です。本論文は、物体を構成する最小要素である点要素（ポイント）に着目し、ボリュームデータ向けのインタラクションを可能とするボリュームデータ生成技術・新しい原理に基づくボリュームデータ表示技術についてまとめたものです。

本論文では、ボリュームデータ生成技術として、多視点カメラで得られる複数枚の映像データから人物像に関するポイントデータを効率よく生成する視点非依存型の並列ボクセルカラーリング法を提案しました。提案手法は、従来必要とされていたポリゴン表現を前提としたデータ生成手法とは異なり、データをポイント（ボクセル）の集合として扱い、ボクセルごとに多視点カメラから得られる光学情報を計算し、視点位置に依存しないデータ生成法です。本手法を用いて人物映像を高速に計算機内に取り込み、遠隔に設置された全方位型表示装置に3次元映像を映し出すシステムを開発し本手法の有用性を示しました。

次に、ボリュームデータ表示技術として、表示対象とするボリュームデータを不透明なポイント（発光する粒子）の集合体として表現し描画（レンダリング）を行う粒子ベースボリュームレンダリング法を提案しました。本手法は、従来のボリュームレンダリング法において計算上のボトルネックとなるアルファ合成およびソート計算を必要とせず、単純な奥行き比較とサブピクセル化処理のみで半透明効果を得ることが可能です。さらに、本論文では、粒子ベースボリュームレンダリング法を拡張し、非構造格子型ボリュームデータや複数のボリュームデータを効率よくレンダリングする手法を提案しました。複数ボリュームデータのレンダリングでは、粒子ベースボリュームレンダリング法において利用される粒子の格納領域（粒子バッファ）を、ボリュームデータごとに生成し、奥行き比較のみからなる粒子バッファの単純比較演算のみで合成画像を生成することが可能となりました。本手法の医用分野への適用事例としてCTデータと陽子シミュレーションデータ（Dose分布データ）との合成表示を行った結果を示しました。また、構造解析や数値流体力学分野などで利用される非構造格子型ボリュームデータを対象としたレンダリングにおいては、対象データのボクセル化処理を行い、粒子を発生させることで、効率よくレンダリングを行うことが可能となりました。

本研究は、ポイントという最も基本的なグラフィックス要素を用いることにより、高度インタラクション技術・画期的な可視化技術が必要とされるボリュームデータ処理に対して共通のフレームワークを与えるものと期待されます。

山岡 雅直 (小野寺教授)

「A Study on Low-Power SRAM Design under Process Variation of Transistors」
(トランジスタのプロセスばらつきを考慮した低電力SRAM設計の研究)

平成19年3月23日授与

本研究は、複数の機能を有する大規模集積回路 (LSI) に搭載される混載メモリであるSRAMの低電力化を目的とし、半導体加工技術の微細化にともない増加するトランジスタのプロセスばらつきを考慮したSRAM動作の解析、SRAMの回路技術の提案、新しいトランジスタ構造の提案とそれを用いたSRAM回路技術の提案を行ったものである。半導体集積回路の加工技術は年々微細化が進展している。しかし微細化の進展に伴い、トランジスタのサイズが小さくなることにより製造時のプロセスばらつきの影響が増加し、トランジスタの性能のばらつきが回路動作に与える影響が無視できなくなる。現在、LSIの主流をなすSoC (System-on-a Chip) の最も重要な構成要素の一つであるSRAMは、集積度向上のため加工できる最小のトランジスタが多く用いられている。そのためトランジスタの性能ばらつきの影響を大きく受け、SRAMの動作性能が劣化しSoCの動作性能を律速する原因の一因となっており、SRAMの性能向上が強く望まれている。本研究ではトランジスタの性能ばらつきがSRAM性能に与える影響を明らかにする解析方法を提案し、さらにその解析結果をもとに、SRAMの性能を向上させる回路技術を提案する。

本研究では、SRAMメモリセルの性能とトランジスタの性能ばらつきの関係の解析を行った。SRAM動作はメモリセルを構成する6つのトランジスタの性能のバランスの上に成り立っている。そのため、トランジスタ製造時のプロセスばらつきによりトランジスタの性能が変動すると、SRAM動作を決定している6つのトランジスタの性能のバランスが崩れ、SRAMの動作性能が大きく劣化する。本研究では、このトランジスタのプロセスばらつきとSRAMの動作性能の関係の解析を行い、半導体の製造プロセスやトランジスタのパラメータを決定してトランジスタの性能ばらつきがわかれば、SRAMの動作性能の予測を可能とする手法を提案した。本解析手法を用いることによって、SRAMの設計段階において、要求された性能を満足できるかどうかの予測が可能となる。さらに、性能解析手法を用い、不足する性能を補う回路技術を提案した。SRAMメモリセルに印加されている電圧を動作によって適切に変化させることで、それぞれの動作マージンを向上させる回路技術を提案した。本回路技術を搭載した試作チップを作成し動作特性を実証した。さらに製造プロセスの微細化に伴いSRAM回路での消費電力が問題となる。本研究では、動作に必要な電力およびトランジスタの漏れ電流をともに低減する回路技術を提案した。本技術は、試作チップの測定により効果の実証を行った。

今後の製造プロセスの微細化にともなうトランジスタのプロセスばらつきを考慮すると単なる回路技術の開発では今後SRAM動作は行き詰まることが予想される。本研究では、新しいプロセスばらつきの影響の少ないトランジスタを提案しさらにそのトランジスタに最適なSRAM回路を提案した。本技術は、シミュレーションによって性能を解析し、今後の微細化を可能とする見込みを得た。

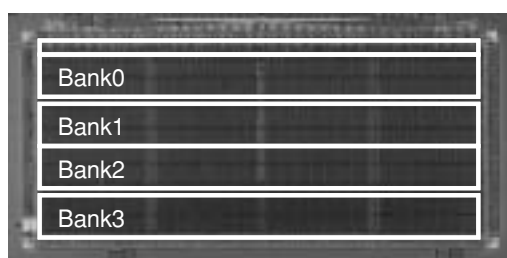


図1. 試作した1Mbit SRAMモジュール

宮戸 祐治 (松重教授)

「走査型プローブ顕微鏡を用いたカーボンナノチューブの電位評価に関する研究」

平成19年3月23日授与

本論文は、ナノ新素材のカーボンナノチューブ (CNT)、特に単層カーボンナノチューブ (SWNT) を対象に、電極間に少数のSWNTを架橋させる誘電泳動法、および走査型プローブ顕微鏡 (SPM) による電位分布計測法の確立を目的に研究を行った結果を纏めたものである。

誘電泳動法は、溶液中に存在する微粒子に交流電場を加えることで微粒子を泳動させる手法であり、交流電場により微粒子中に双極子が誘起され、その結果として微粒子自体が電場勾配に応じて力を受け溶液中を泳動することになる。この手法を応用し、基板上に作製した特定の対向電極間に少数のSWNTの架橋を可能とする条件を確立した。電場の周波数が1MHz程度までは金属および半導体的SWNTがともに架橋すること、またOn/Off比の良好なカーボンナノチューブ電界効果トランジスタ (CN-FET) を作製できることがわかった。ところが、シリコン酸化膜上に作製したCN-FETは、加えたゲートバイアスに依存してドレイン電流に大きなヒステリシスを示した。その低減を目的として、ゲート酸化膜上に気相蒸着法により自己組織化単分子膜 (SAM膜) を形成したところ、基板への電荷注入が抑制されることでドレイン電流のヒステリシスが大幅に低減できることが判明した。

さらに、SWNTを架橋させる電極金属の種類を変えたCN-FETを作製し、原子間力顕微鏡 (AFM) の表面電位評価技術として良く知られるケルビンプローブ原子間力顕微鏡 (KFM)、特に周波数検出法を適用したFM-KFMによりそれらの特性を評価した。SAM膜で修飾した基板上的Au-Ti異種対向電極の場合には、整流性および両極性 (ambipolar) 特性が、またゲートバイアスに依存して表面電位が両電極端で大きく変化することが観察された。この結果から、観察された整流性は各電極金属のSchottky障壁高さの違いに、また両極性はゲートバイアスによって障壁薄さが変調を受けることでキャリア注入が制御されたことに起因すると示唆され、「Schottky障壁変調モデル」に対応する電位変化を直接観察したと考えられる。

ところで、FM-KFMは高分解能な電位測定方法ではあるが、探針試料間の接触電位差に由来する静電気力を検出することで電位を測定するという原理上、SWNTのようにAFM探針の曲率半径よりも測定対象が小さい場合には、基板に注入された電荷やゲートバイアス印加時の静電気力等の背景的影響を受けやすく、測定誤差を生じやすい。そこで、本研究ではSWNTのような微小な測定対象の表面電位をより正確に測定するため、既存のAFMポテンシオメトリ (AFMP) の概念と点接触電流イメージング原子間力顕微鏡 (PCI-AFM) の手法とを組み合わせたPoint-by-point AFMPという新規電位測定手法を提案した。この手法は、撮像する画像範囲の1pixelごとにカンチレバーの励振・停止を繰り返すもので、励振時に探針/試料間距離制御および表面形状の取得を行い、カンチレバーをすばやく停止させた後に一定距離だけ試料に探針を接近・接触させて、接触した点の電位を測定するというものである。さらに、カンチレバーの励振にQ値制御法を適用することで真空環境下でも電位測定を可能とした。こうした手法を用い、同一SWNT試料に対し電位測定した結果を比較し (図1参照)、KFMの電位測定誤差を見積もるとともに、両手法は互いに相補的な評価方法として重要であることを示した。

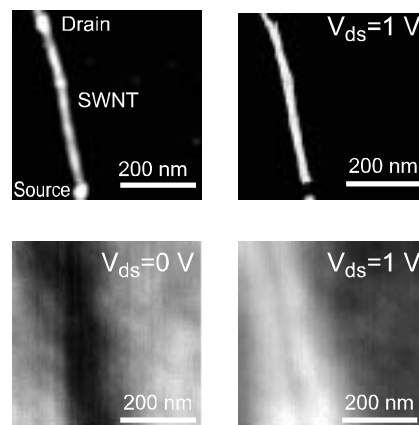


図1. Point-by-point AFMPおよびFM-KFMで測定したSWNTの表面電位

(a) 表面形状像 (b) AFMP像 ($V_{ds}=1V$) (c) KFM像 ($V_{ds}=0V$) (d) KFM像 ($V_{ds}=1V$)

(c) と (d) を比較するとSWNTの周囲が明るいが、SWNTから周辺の SiO_2 へ電荷が注入されたことを示唆する。

辻野孝輔（中村行宏教授）

「A Study on 3-D Sound Processing Systems Based on Head-Related Transfer Functions」(頭部伝達関数を利用した立体音響処理システムに関する研究)

平成19年3月23日授与

近年、信号処理技術を利用して高臨場感の音声再生を行う立体音響処理がオーディオやエンターテインメント分野において注目を集めている。特に、2チャンネル方式の立体音響処理は、音声再生に広く用いられているヘッドホンやスピーカをそのまま利用することができるため、幅広い機器への適用が可能である。

2チャンネル方式の立体音響処理は、多くの場合頭部伝達関数を利用したバイノーラル処理によって実現される。バイノーラル処理により、三次元空間内の任意の位置の仮想音源から音声が生じているかのような仮想的感覚を入力音声に付与することが可能である。本研究では、低演算量でバイノーラル処理の実現が可能で、図1に示す構成をとる信号処理手法に着目し、組込みシステム上での実現に適した立体音響処理手法を構築した。また、同手法を利用した立体音響処理システムの設計を行った。

立体音響処理の一般的な応用においては仮想音源の時間経過に従った移動がしばしば要求されるため、バイノーラル処理の実現においては音源移動を可能とした実装を行う必要がある。本研究ではIIR (Infinite Impulse Response) フィルタのAR (Auto Regressive) 係数とMA (Moving Average) 係数を各々線形補間して音源移動を実現することにより、従来主流であったFIRフィルタを用いた場合と比べ、バイノーラル処理に必要な演算量とメモリ量を削減することができることを示した。また、本研究では従来用いられてきた勾配法に基づくデジタルフィルタの設計法を改良し、係数補間を伴う音源移動に用いた場合にFIRフィルタに近い特性が得られる設計法を構築した。これらの成果を検証し、提案手法を利用した立体音響処理が組込みシステムにおいて実現可能であることを示すために、図2の構成をとる、DSP・組込みCPUを利用した立体音響処理システムの設計を行った。提案システム上では聴取者に対する仮想音源の相対的移動を実時間で自由に操作することが可能であり、入力された移動情報は実時間の立体音響処理に利用される。このシステムを用い、提案する立体音響処理手法が組込みシステム上で十分に実時間処理可能であることを示した。

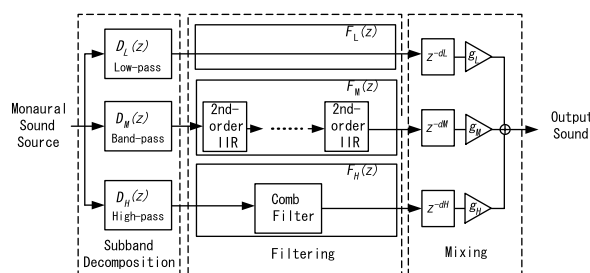


図1. 低演算量バイノーラル処理

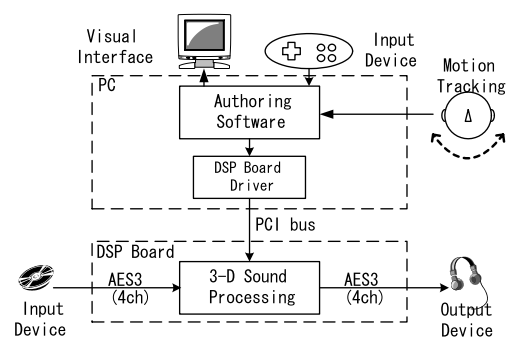


図2. 設計システム

須山 敬之 (中村行宏教授)

「リコンフィギャラブルコンピューティングの組合せ問題への応用に関する研究」

平成19年3月23日授与

近年、ほとんどの家電製品などにVLSIが搭載されており、その動作をコントロールするためには不可欠な要素となってきている。また集積技術の発達により集積度は驚くほど高くなってきており、今後ますます増大することが予想される。そのような状況下においては、VLSIを正確かつ短期間に設計するためのハードウェア記述言語による論理合成技術が必須の技術となっている。また論理合成技術の発達と時期を同じくして、内部論理が再構成可能なハードウェアFPGA (Field Programmable Gate Array) の技術が進展してきた。本論文では論理合成システムとFPGAを用いたリコンフィギャラブルコンピューティングとその組合せ問題への応用について論じている。

組合せ問題とは変数がいくつかの値を取る時に条件を満たす変数の値の組み合わせを求める問題である。この問題は原理的には変数を取る値の全ての組み合わせを探索することにより、解くことが可能であるが、その組み合わせは変数の数が増えるにつれて指数オーダーで増加するため、現実的な時間で解くことが困難となる問題である。本論文ではリコンフィギャラブルコンピューティングにより、問題毎に回路を合成し、FPGA上にその問題専用の論理回路を実現することにより、問題を高速に解く手法を述べている (図1)。またこの手法では論理回路の並列性を用いることにより、汎用計算機上で用いられるアルゴリズムとは異なる新たなアルゴリズムを適用することが可能となる。本論文では新たにこの手法に適したアルゴリズム (図2) について述べ、効果的に問題を解くことができることを示している。

一方、組み合わせ問題の応用例の一つとしてインターネットオークションのプロトコルがあげられる。ネットワークの発達によりネット上の取引が急速に発達してきているが、単一の入札者が複数のIDを用いて入札額を操作する架空名義入札が問題となってきている。またオークションプロトコルはマルチエージェントの重要な研究分野の一つとなってきており、特に組み合わせオークションの分野は重要ないくつかの研究がなされている。組み合わせオークションとは複数のアイテムを同時に入札する方式であり、アイテムの組み合わせ方により価値が上下する。本論文では、組み合わせオークションを行う場合に、更に個々のアイテム毎に複数の属性を持つ多属性のオークションのプロトコルについて考察し、架空名義入札に頑健なオークションプロトコルを考案、その有効性を証明している。

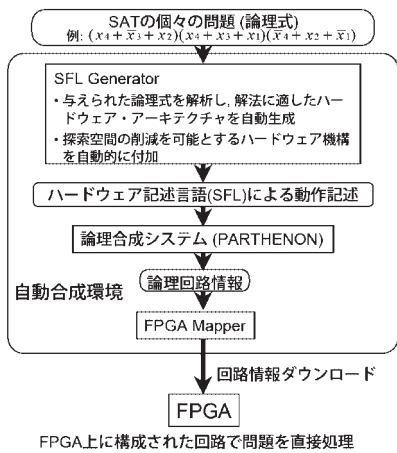


図1. 処理の流れ

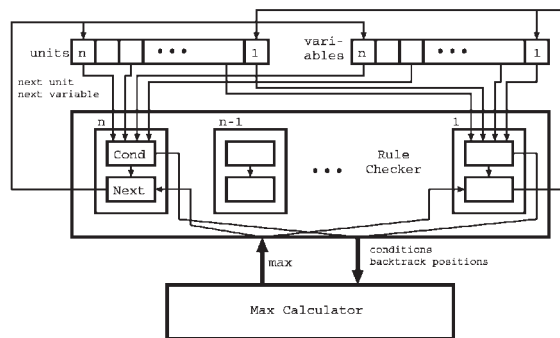


図2. アルゴリズムの実現例

宮本龍介(中村行宏教授)

「画像処理に基づく歩行者認識に関する研究」

平成19年3月23日授与

近年、夜間における歩行者と車両との衝突事故の増加が問題となっている。これは、昼間と比較し夜間においては歩行者の視認性が悪く、そのため運転者が歩行者を見落とす可能性が高くなることに起因している。そこで、画像処理を用いた歩行者認識を行い、運転を補助する機構の研究が行われている。歩行者認識においては、歩行者を検出し、一度検出された歩行者を追跡し続けることによって認識が実現される。検出過程においては、粗い前処理を行い、2次元画像平面から歩行者が存在する可能性の高い領域を抽出する場合が多く、一般に、候補領域抽出、検出、追跡の3つの段階から構成される。従って、精度良く歩行者を認識するためには、候補領域の抽出も含めた検出処理ならびに追跡処理の精度を向上させる必要がある。

一方、このような歩行者認識実時間処理が要求される。半導体技術の進歩によってプロセッサの演算性能は向上したが、周波数向上による性能向上は限界に近付いており、並列処理による性能向上が求められている。特に、車載という組込み用途で実現するためには、動作周波数を下げることが求められるため、並列処理の適用が不可欠である。また、同時に高い認識性能を実現することも求められる。このような背景を鑑み、検出過程に必要な機械学習の手法としてブースティングに着目し、追跡過程に必要な時系列信号処理手法として粒子フィルタに着目した。ブースティングは多数の弱識別器を組み合わせることによって強識別器を構築する集団学習手法の1つであり、ブースティングに基づいて構築された強識別器を用いて検出を行う場合、強識別器を構成する弱識別器はそれぞれ独立に処理を行うことが可能であり、高い並列性を有している。また、粒子フィルタにおいては粒子によって状態を表現し、多数の粒子を用いることにより多数の状態を保持し、最も確からしい状態を選択することによって状態推定を行うため、粒子の数に対応した並列性を有している。これらの手法は並列性が高いだけでなく、その性能も優れたものであり、並列性と性能の両立という目的に適している。

本研究では、検出過程においては、図1に示すようなHaar-like特徴を用いブースティングに基づいて構築された検出器を利用し、候補領域の抽出は行わない手法とした。追跡過程においては、車載カメラから得られた画像において歩行者を追跡するのに適した歩行者の表現手法として図2に示すようなスケルトンを用い、スケルトンを表現するパラメータを状態空間とし、追跡対象を歩行者とすることにより状態遷移に制約を加え、粒子フィルタを用いて追跡を行った。図3は検出後、追跡を開始する際の初期状態を示している。図4および図5に認識結果の一部を示す。このように、ブースティングに基づく検出と粒子フィルタを利用した追跡を組み合わせることにより、高精度な歩行者認識を実現した。

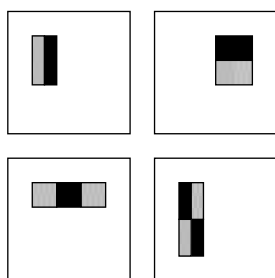


図1. Haar-like特徴

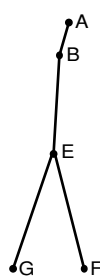


図2. スケルトン

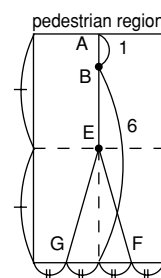


図3. 初期状態



図4. 認識結果(検出)



図5. 認識結果(追跡)

且野克典 (木本教授)

「Epitaxial Growth of 4H-SiC and Characterization of Deep Levels for Bipolar Power Devices」

(バイポーラ型パワーデバイス実現に向けた4H-SiCのエピタキシャル成長と深い準位の評価)

平成19年3月23日授与

はじめに：ワイドギャップ半導体であるSiC (Silicon carbide: 炭化珪素) は、Si (Silicon: 珪素) と比べて、絶縁破壊電界が約10倍高いという特徴のため、高耐圧、低損失デバイスの実現に有望である。したがって、SiCはパワーエレクトロニクスの分野において、Siにとって代わる半導体材料として期待されている。このような特徴を有するSiCといえども、数kV以上の高耐圧、低損失デバイスを実現するためにはバイポーラ型デバイス (pin ダイオード、IGBT等) が必要となる。

本論文は、化学気相堆積 (CVD) 法によるバイポーラ型デバイス実現に必要な高純度・高品質成長層の形成と物性評価に関する研究をまとめたものである。特にn型およびp型4H-SiCにおける深い準位の基礎評価に重点を置き、その性質や起源の解明と密度制御に取り組んだ。以上の研究により得られた知見を元に、4H-SiC厚膜成長層における少数キャリア寿命を評価し、その制限因子について考察した。

主な研究内容：Deep level transient spectroscopy (DLTS) により、n型およびp型4H-SiCの深い準位を調べた。成長直後のn型成長層では図1に示すよう、 $Z_{1/2}$ センター ($E_C-0.65\text{eV}$) [1] と $EH_{6/7}$ センター ($E_C-1.55\text{eV}$) [2] が支配的であった。この成長層に、SiC構成元素のうち質量の軽い炭素原子の変位のみを引き起こす低エネルギー (100-200keV) にて電子線を照射したところ、これらの準位密度が増加した。この結果より、これらの準位は炭素原子の位置変位 (格子間原子または空格子) に関連する欠陥である可能性が高いと分かった。同時にこれらの準位密度を電子線照射により制御することができた。

p型成長層についても同様に評価を行った。電子線照射前の成長層では図1に示すようにDセンター ($E_V+0.49\text{eV}$) [3]、HK0 ($E_V+0.79\text{eV}$)、HK2 ($E_V+0.84\text{eV}$)、HK4センター ($E_V+1.44\text{eV}$) を検出した。このうちHK4センターは低エネルギー電子線照射実験により、炭素原子の位置変位に関連する欠陥である可能性が高いことが分かった。

差動マイクロ波光導電減衰 (μ -PCD) 測定により、成長層における少数キャリア寿命を調べ、少数キャリア寿命を制限する因子の特定を試みた。 $Z_{1/2}$ センター密度が $2 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ よりも高い時、少数キャリア寿命は $Z_{1/2}$ センター密度に反比例して減少した。この時 $Z_{1/2}$ センターは少数キャリア寿命を制限する因子として働いていると考えられる。また、電子線照射実験により $Z_{1/2}$ センターを意図的に導入することにより、少数キャリア寿命を制御可能であることが分かった。

参考文献:

- [1] T. Dalibor et al.: Phys. Stat. Solidi (a), 162 (1997), p. 199.
- [2] C. Hemmingson et al.: J. Appl. Phys., 81 (1997), p. 6155
- [3] T. Troffer et al.: Phys. Stat. Solidi (a), 162 (1997), p. 277.

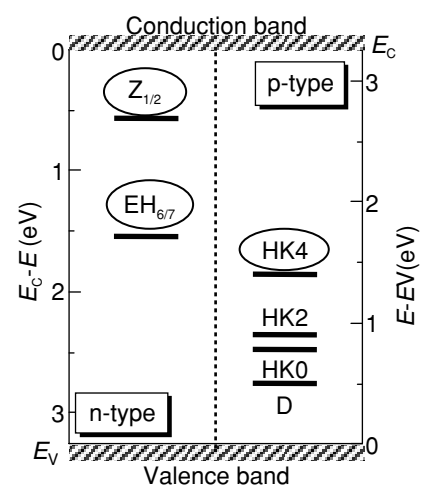


図1. 4H-SiCに存在する深い準位のエネルギー準位図。丸で囲まれた深い準位はC原子の位置変位関連欠陥

川 島 祥 一 (野田教授)

「3次元フォトニック結晶による光伝搬制御に関する研究」

平成19年7月23日授与

本論文は、3次元フォトニック結晶による光伝搬制御に関する研究成果をまとめたものである。3次元フォトニック結晶内に、線欠陥を導入して得られる光導波路は、微小空間において自在な光伝搬制御が可能な光学素子として期待されている。本論文では、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶導波路に関して、数値解析による構造設計から、実際の導波路作製、そして光学特性評価までの一連の研究成果を報告している。本研究で得られた主な成果は、次のようにまとめられる。

1. まず、結晶内の複数層に線欠陥を導入した3次元フォトニック結晶面内導波路に関して、数値解析を行っている。その結果、空気領域に光が強く局在する導波路や、積層方向への伝搬損失が少ない導波路の設計に成功している。
2. 続いて、ストライプ積層方向へ光が伝搬する3次元フォトニック結晶垂直導波路の数値解析を行っている。その結果、導波路を構成する基本周期を適切に設計することで、伝搬光の偏光制御が可能であることを明らかにした。
3. さらに、これら解析した面内導波路と垂直導波路を、高い精度で実現するため、従来の作製手法に改良を加えている。その改良した作製手法を用いて、3次元フォトニック結晶の作製を行い、70nm以内の積層精度が定常的に達成できることを示した。
4. 最後に、本論文で解析した面内導波路と垂直導波路の作製結果、および光学測定結果について述べている。面内導波路に関しては、線欠陥が複数層に精度良く積層された9層面内導波路の作製に成功している。また、積層数8層の垂直導波路を作製し、垂直方向への光伝搬と、基本周期構造による偏光制御の結果を同時に示している(図1)。これは、3次元フォトニック結晶垂直導波路を初めて実証した成果である。さらに、それら面内導波路と垂直導波路を互いに接続した3次元光配線構造の試作にも成功し、特定帯域の光が伝搬したことを観測している。これは、フォトニック結晶による3次元光伝搬制御を、光通信波長帯域において、初めて実証した成果といえる。

以上、本論文は、3次元フォトニック結晶による光伝搬制御を世界に先駆けて実証したものである。

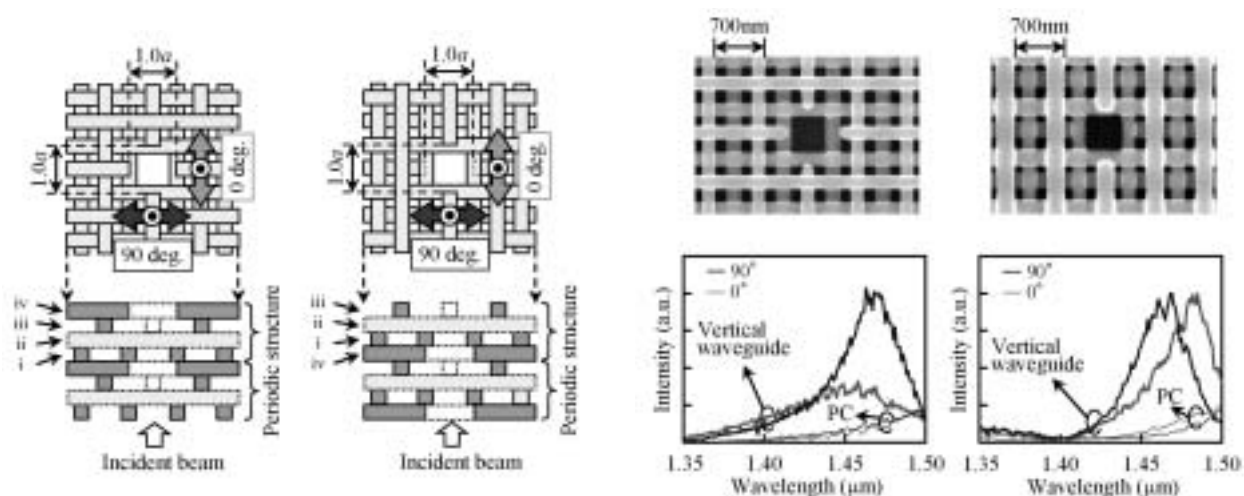


図1

鄭 允 道 (引原教授)

「Basic Studies on Persistent Current Compensator for Superconducting Magnet by Use of Linear Type Magnetic Flux Pump」 (リニア型磁束ポンプを適用した超伝導マグネット用永久電流補償装置に関する基礎研究)

平成19年9月25日授与

近年、磁気共鳴断層撮影 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) 装置や核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) 分析器などにおいて、超伝導マグネットの高磁場化への期待が高まっている。例えば、現在国内で臨床応用として認められているMRI用マグネットの最大発生磁場は3Tであるが、海外では検査分解能を上げるべく、より高磁場を発生可能な超伝導マグネットの検討が進められている。また、NMRの分野においてもより高磁場が求められており、1GHz (23.5T) 級あるいはそれ以上の高磁場を目指した検討が世界的に進められている。一方、MRIやNMRに適用されているマグネットの主流は低温超伝導線材を使用しているが、高磁場・高温運転をターゲットとした場合、高温超伝導線材の適用が不可欠である。しかしながら、高温超伝導線材のいわゆる超伝導接続 (ゼロ抵抗接続) は未だ実現されておらず、超伝導マグネットを永久電流モードで運転した場合に電流減衰が問題となる。従って、高磁場MRIあるいはNMRの実現を左右する重要な技術開発課題の一つは、永久電流モード高温超伝導マグネットの成否にあると考えられる。

本論文では、高温超伝導マグネットの永久電流運転モードにおける微小電流減衰を補償する非接触電源の開発を目的とした。即ち、上記微小電流減衰を非接触でノイズレスに補償する電源としてリニア型超伝導磁束ポンプ (LTMFP) を提案し、その基礎特性の理論的かつ実験的検証を行った。

まず、高温超伝導線材ならびにマグネットの開発現状、および同マグネットにおける超伝導接続 (ゼロ抵抗接続) 技術が確立されていない実情を説明した。次に、超伝導ニオブフォイルを適用したリニア型磁束ポンプの動作原理を説明し、3次元有限要素法によってその特性を解析した。特に、超伝導ニオブ中を移動する量子化磁束の侵入領域 (常伝導スポット) が周波数依存性を有することを明らかにし、既存モデルを拡張する評価式を提案した。また、解析結果に基づいてLTMFPを設計・試作した。さらに、現状長尺の高温超伝導線材を使用したマグネットを製作することが困難であることから、技術的に成熟しているニオブチタン低温超伝導マグネットを設計・試作し、高温超伝導マグネットの電流減衰を模擬するようにコイル接続抵抗を積極的に持たせ、同抵抗値に起因する電流減衰を補償することに成功した。

現在、より高温かつ大電流において動作可能なLTMFPの検討を行っているところである。

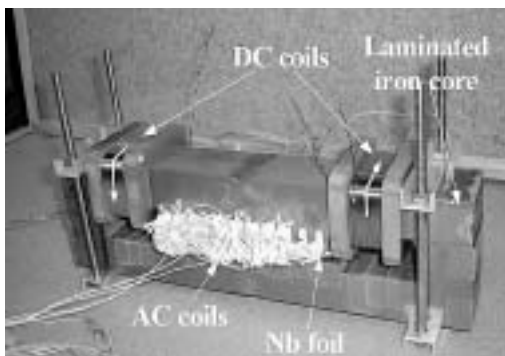


図1. 試作したLTMFPの外観写真

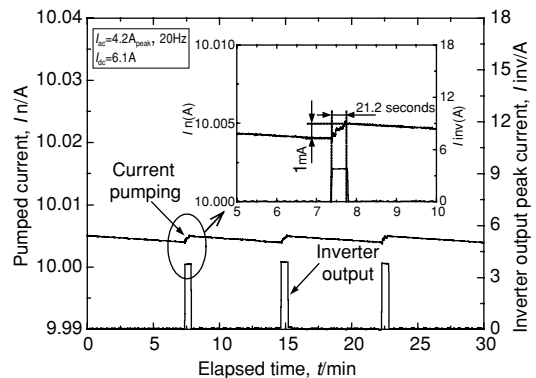


図2. 超伝導コイルにおける電流減衰の補償例 (電流変化率0.01%の定電流運転に成功した)

卞 志 強 (吉川榮和教授)

「A Study on Augmented Reality Technology for Supporting Field Work of Nuclear Power Plants」

(原子力発電プラントの現場作業支援のための拡張現実感技術に関する研究)

平成19年9月25日授与

地球温暖化防止対策に重要な役割を担う原子力発電に関し、電力市場自由化による発電コスト削減の要請、高経年化による保守作業の複雑化、熟練保守作業員の減少等の問題が起きつつある。その対策のためには、現実の世界に情報や仮想の物体を重畳表示させる拡張現実感技術を利用してプラント現場作業を支援することが有効である。拡張現実感技術をプラント現場という特殊環境下で利用するためには、実空間とユーザの視線との位置関係をリアルタイムで計測する新しいトラッキング技術が不可欠である。本研究では、従来の人工マーカ方式に代わる方法として、(i) トラッキング可能範囲の拡大、(ii) トラッキング精度の向上、(iii) トラッキング信頼性の向上を実現する技術を開発した。

(i) トラッキング可能範囲の拡大では、新しいラインマーカ法とハイブリッドトラッキング手法を提案し、実験によりその有効性を検証した。具体的には、プラント現場と従来の人工マーカ法の特徴を考察し、図1に示すようなプラント内に多数あるパイプ等に貼付しやすい線形のラインマーカ（以下、マーカ）を新たに考案し、これを用いてトラッキング可能距離とトラッキング精度を評価した。その結果、提案したラインマーカ手法のトラッキング可能距離が10m以上に伸び、トラッキング可能範囲を拡大できることを確認した。また同時に、貼付するマーカの配置がトラッキング精度に大きな影響を与えることもわかった。さらにトラッキング可能範囲を拡大するため、複数のカメラと半導体ジャイロセンサを用いるハイブリッドトラッキング手法を提案し、実際のプラント現場において評価実験を行うことにより、その有効性を確認した。

(ii) トラッキング精度の向上では、環境に貼付するマーカの配置がトラッキング精度に大きな影響を与えることに着目してマーカ配置を最適化する手法を開発し、計算機シミュレーションによりその有効性を検証した。まず、トラッキング誤差を定量的に評価する手法として、従来手法より格段に高速なWTEC (Wheel Tracking Error Computation) アルゴリズムを考案し、これを評価関数としてGA (Genetic Algorithm) によりトラッキング誤差を最小にするマーカ配置を決定する方法を提案した。提案手法を評価するため、プラント構内にマーカを配置する場合を考え、計算機シミュレーションを行った。その結果、ランダムなマーカ配置に比べて最適なマーカ配置により最大トラッキング誤差を大幅に減少させることが可能であり、トラッキング精度が著しく向上できることを確認した。

(iii) トラッキング信頼性の向上では、ラインマーカ手法のトラッキングの信頼性向上のため、トラッキング結果の誤差をリアルタイムで推定する手法を提案し、その効果を評価した。ここでは、ラインマーカが線形であることの特徴を活かしてマーカ認識の際の誤差を計算し、さらにプロジェクション誤差を考慮してWTECアルゴリズムにより誤差を高速に評価することを可能にした。評価の結果、プロジェクション誤差のみを用いてトラッキング誤差を評価した場合に比べて精度良くトラッキング誤差を推定できることを確認した。これにより、トラッキング誤差が大きい可能性があるときに、間違った位置に情報を重畳表示されることを避けることができ、支援情報表示の信頼性を向上させることができる。

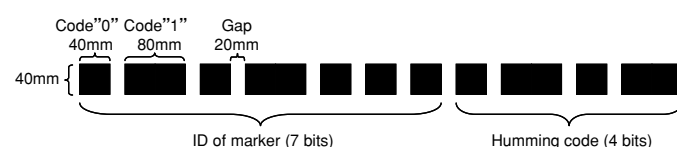


図1. ラインマーカのデザイン

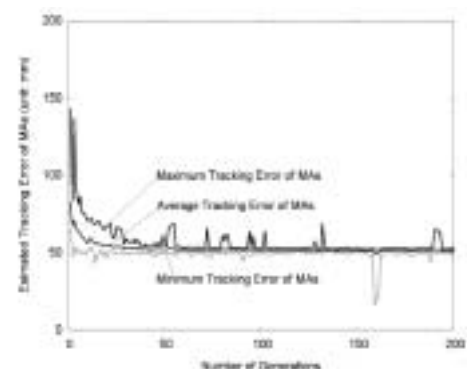


図2. GAを用いたマーカ配置最適化によるトラッキング最大誤差の世代変化

Piyanuch Sommani (石川教授)

「Neuron Adhesion Patterning on Polymers by Negative-Ion Implantation」

(負イオン注入による高分子表面上での神経細胞接着のパターニング)

平成19年9月25日授与

神経細胞を人為的にデザインした形で配列させて神経回路網を形成する試みとして、負イオン注入処理により局所的に高分子材料表面の改質を行い、この基材上で神経細胞を自発的に所望のパターンに配列させて、人為的な神経回路網の形成方法の開発を行った。高分子材料は一般に絶縁物であり、正イオンを注入する場合には表面帯電による処理条件の再現性やパターンの劣化が懸念される。これに対して、負イオンを注入粒子として用いる負イオン注入法では、負イオンの負電荷の流入と二次電子による負電荷の流失によりほぼ無帯電という特長があり、高精度で再現性のある表面処理が出来る利点がある。

炭素負イオン注入をポリスチレンやシリコンゴムに施すと、表面にヒドロキシル基やカルボニル基などの有極性官能基が導入され、注入量に応じて材料表面の親水性を向上できることを示した。また、この親水化は、細胞培養液中ではタンパク質の吸着性が向上することを示した。

ポリスチレンやシリコンゴムに幅50 μ m幅のスリット列を有するパターンマスクを介して炭素負イオン注入を行い、その上で神経様細胞(PC12hラット副腎髄質褐色腫細胞)を培養した結果、注入処理領域上に注入パターンに沿って細胞の自発的な配列接着と神経突起の伸長が得られた。縦横の格子状に配列させた例を図1に示す。

ラット骨髄液間葉系幹細胞を用いた場合でも、PC12h細胞よりも少ない注入量でポリスチレンやシリコンゴム表面をパターン処理することにより、注入パターンに沿った自発的な選択接着が得られた。ポリスチレン上でのパターン接着を図2に示す。次いで、 β メルカトルエタノールを分化誘導の刺激剤として用いる手法で、配列接着した間葉系幹細胞の神経細胞への分化誘導を行った。その結果を図3に示す。分化した細胞は、丸い細胞体と細長いフィラメントを有しており、神経細胞と形態的に極めて似たものとなった。分化した細胞からは神経特異エノラーゼを検出したので、分化細胞は神経細胞と考えられる。また、分化後の神経細胞も元の間葉系幹細胞の接着パターンを保持していた。

このように本研究において、炭素負イオン注入処理法により、注入パターンに沿った自発的な神経細胞の配列とそのパターンでの神経回路網の形成を達成した。

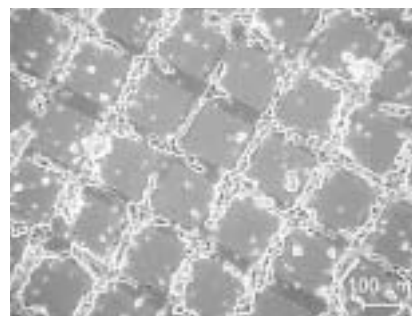


図1. 格子パターンに自発的に配列接着したPC12h細胞

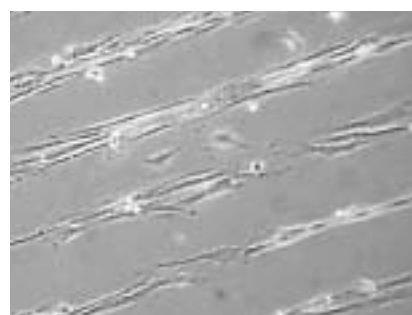


図2. ポリスチレン上にパターン接着した間葉系幹細胞

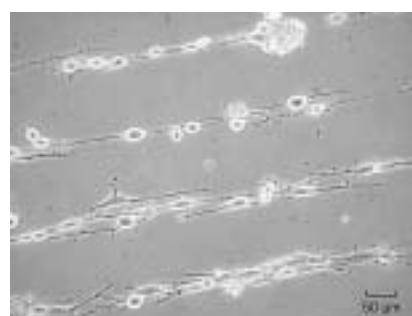


図3. 接着パターンを保持して間葉系幹細胞から分化した神経細胞

【論文博士一覧】

楊 小晶	「A Study of Simulation-based and Human Factors-centered Design Methods for Advanced Main Control Rooms in Nuclear Power Plants」(原子力発電所の新型中央制御室のシミュレーションベースの人間工学設計手法に関する研究)	平成17年11月24日
濱 勝彦	「Film Boiling Heat Transfer in Various Liquids Under Natural Convection and Forced Convection Conditions」(自然対流及び強制対流の状態での種々の液体における膜沸騰熱伝達の研究)	平成18年3月23日
久郷 明秀	「高レベル放射性廃棄物の地層処分に関するリスクコミュニケーションモデルの研究」	平成18年3月23日
横山 浩之	「サービス要求対応型通信網資源の動的割当に関する研究」	平成18年3月23日
古屋 裕規	「Timescale Properties of Aggregated IP Traffic and Their Application to Network Dimensioning」	平成18年3月23日
三谷 友彦	「Study on Noise Features of Magnetron and Low Noise Wireless Power Transmission」	平成18年3月23日
三神 泉	「Study on New Concept of Space-Solar Power Station (SPS)」	平成18年3月23日
山下 史洋	「Study on digital signal processing techniques for high scalable mobile satellite communications」	平成18年3月23日
Findy Renggono	「Study on precipitating clouds over Kototabang, West Sumatra observed by wind profilers」(ウインドプロファイラ観測に基づく西スマトラ州コトタバンにおける降水雲に関する研究)	平成18年3月23日
中西 徹	「モバイル電子機器の熱・構造問題に対する数値解析手法適用に関する研究」	平成18年5月23日
天野 雅彦	「大規模電力系統の安定度解析と安定化制御に関する研究」	平成18年7月24日
阿部 友紀	「ZnSe系II-III族ワイドギャップ半導体超格子の量子準位制御とその光デバイス応用に関する研究」	平成18年7月24日

波部 齊	「Geometric Information Processing Methods for Elaborating Computer Vision Algorithms」(コンピュータビジョンアルゴリズムの高度化のための幾何情報処理手法)	平成18年11月24日
山本 真之	「Wind observations around the tropopause over Sumatra, Indonesia by the Equatorial Atmosphere Radar」(インドネシア・スマトラ島における赤道大気レーダーによる対流圏界面近傍の風速観測)	平成19年1月23日
大穀 晃裕	「表面永久磁石型同期モータの製造誤差並びに素材特性の不均一性に起因するコギングトルクに関する研究」	平成19年1月23日
川嶋 宏彰	「Interval-Based Hybrid Dynamical System for Modeling Dynamic Events and Structures」(動的事象と構造のモデル化のための時区間ハイブリッドダイナミカルシステム)	平成19年3月23日
武宮 博	「大規模グリッドアプリケーションソフトウェアの開発と実行に関する研究」	平成19年3月23日
岡本 康宏	「化合物半導体高出力電界効果トランジスタとマイクロ波増幅器に関する研究」	平成19年3月23日
足立アホロ	「An observational study of mesoscale phenomena with UHF wind profilers」(UHFウィンドプロファイラーによるメソスケール現象の観測的研究)	平成19年3月23日

脳の謎に挑み医療や福祉に貢献する脳機能工学

工学研究科電気工学専攻
生体機能工学分野
小林哲生

1. 科学と工学のフロンティア “高次脳機能”

皆さんは”両眼視野闘争”と呼ばれる視知覚現象を知っているだろうか。DNAの2重らせん研究でノーベル賞を受賞したことで知られるクリック博士が中心となって、「両眼視野闘争は意識の一階層であるアウェアネス、なかでも視覚的アウェアネスを科学的に研究するのに適した稀少な現象である」と、盛んにその重要性を主張したことが契機になって、近年この両眼視野闘争が、脳科学の重要なテーマとして脚光を浴びているのである。ここで、視覚的アウェアネスとは眼で見ている外界の景色や物などが何であるかが”分かる”、あるいは曖昧に見えるものが意味のあるまとまったものであることに”気づく”といった過程である。抗体の化学構造の解明でノーベル賞を受賞したエーデルマン博士もこの両眼視野闘争が意識研究の鍵になるとして実験的、理論的研究を行っている一人である。

こう聞くと皆さんは、「そのように著名な科学者達を引きつける魅力のある両眼視野闘争とは、果たして何なのだろうか？」と思われるに違いない。両眼視野闘争とは「左右の眼に異なる競合する視覚刺激が独立に呈示された場合、交互に見える」という現象である。この現象自体は、実体鏡の発明者であるホイットストーンが、今から約170年も前の1838年に、立体視と共に発見した現象で、古くから視覚心理の研究対象とされてきたものである。この170年間の科学の歴史を振り返る時、物理学の分野では相対性理論や素粒子論による物質・空間・時間の概念の理解が、生命科学の分野ではDNAの構造解明に引き続く遺伝・免疫機構の理解が格段に進んできたことを考えれば、いまだに解けないこの現象の本質が如何に難解であるのかが分かると思う。逆に言えば、難しいからこそ知的的好奇心をかき立てずにはおかず、多くの研究者をひきつけ続けているのである。

それでは、この両眼視野闘争の何がいったい重要なのかというと、“物理的には左右の網膜上には視覚刺激が与えられ続けているにも拘わらず、一方の刺激が見えている時、他方の刺激が見えない”という事実である。このことは”見える”あるいは”分かる”ということ、すなわち視覚的アウェアネスとは、網膜に与えられた視覚情報が単にボトムアップ的に処理されて実現するものではないことの証拠となっているからである。

両眼視野闘争をはじめとして、認知、言語、思考、さらには創造性といった人間の高次脳機能のメカニズムは、未だに多くの謎に包まれ解明が待たれている難問である。この人類に残された知的フロンティアである高次脳機能の解明は、認知症をはじめとする多くの精神疾患の早期診断や治療といった医療分野や、病気や怪我で感覚や運動機能に障害を負った人のための機能代行技術あるいはサイボーグ技術の開発といった福祉分野に貢献するものと多くの期待が寄せられている。このような高次脳機能の解明に役立つ計測・解析・イメージング技術や、脳内から抽出した情報に基づき失われた機能を代行する技術などを含めた研究分野は“脳機能工学”と呼ばれている。本稿では、私達の研究室で行なっている脳機能工学研究の中から高次脳機能を探る最先端の技術である機能的磁気共鳴画像法と脳磁図を中心に概説し、その研究の醍醐味を少しでも知ってもらえればと思う。

2. 磁気共鳴画像で脳機能を探る

高次脳機能に関わる極めて複雑な脳内プロセスを解明するためには、中枢神経系のどの部位が、如何に連携をとりながら関わっているのかを明らかにすることが重要になる。現在、最も広く用いられている計測・イメージング技術といえば機能的磁気共鳴画像（MRI）法と呼ばれるものである。ただし、その原理を正確に理解するには大学に入って学ぶ量子力学の知識が欠かせずとても難解であるので、ここでは数式を使わず高校で習う知識の範囲で理解できるよう厳密性は多少犠牲にしてなるべく分かり易く説明したいと思う。

皆さんは原子が原子核と電子から構成されていることはご存知であろう。機能的磁気共鳴画像法を理解する基礎はこの原子核にある。原子核は陽子と中性子からなり、質量数が奇数、または原子番号が奇数の核は、ある軸を中心に自転（スピン）しているようなものと考えることができ、この原子に静磁界を加えるとその磁界の方向に対してトルク（回転させる力）をうけて回転運動を始める。この時、さらにその回転の周波数と同じ周波数の回転磁界を加えると、回転している原子核は加えた回転磁界のエネルギーを吸収して励起状態となる。これが磁気共鳴現象である。この現象は1946年に、ハーバード大学のパーセル博士らとスタンフォード大学のブロッホ博士らによりほぼ同時に発見された。

原子核の励起後、回転磁界を加えるのを止めると、今度は吸収していたエネルギーを同じ周波数の磁界として発生しながら定常状態に戻る。そしてこの励起状態から定常状態に戻るまでに要する時定数（緩和時間）が物質の性質によって異なるので、この発生する磁界を計測することにより緩和時間の差を画像化することができる。これが磁気共鳴画像（MRI: magnetic resonance imaging）であり、医療の現場で画像診断に広く用いられている。このMRIの実用化への道を拓く基本技術の開発に対して、米イリノイ大学のローターバー博士と英ノッチングム大学のマンズフィールド博士に2003年のノーベル医学生理学賞が与えられ、テレビや新聞などでたくさん報道されたのでご存知の方も多いと思う。

図1は、脳機能イメージングに用いられる静磁界強度1.5T（テスラ）のMRI装置の例である。脳神経活動計測に際しては、MRIの頭部用コイルに取り付けられたミラーを介してスクリーンに背面から投射された視覚刺激を観察する。



図1. 超伝導磁石による1.5Tの静磁界強度を有する磁気共鳴画像装置。下図は視覚刺激観察時の脳神経活動計測の様子。被験者は磁気共鳴画像装置のベットに仰向けに寝た状態で頭部用コイルに装着されたミラーを介して足側に設置されたスクリーンを観察する。

1990年に、アメリカのベル研究所に勤めていた小川誠二博士により血液中の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの磁氣的性質の違いを利用して脳神経活動を反映する画像を得る計測技術が初めて報告された。その違いとは、酸素化ヘモグロビンが反磁性（磁石の性質がないこと）であるのに対し、脱酸素化ヘモグロビンは常磁性（磁石のようなもの）であるという事である。常磁性である脱酸素化ヘモグロビンは、小さな磁石とみなせるので、その周囲にかけられている均一な磁界を局部的に乱し、これにより緩和時間に差が生じることになる。その差を利用し脳の神経活動に伴う局所的な血行動態を画像化する事ができるのである。

脳の神経活動に伴い、その活動部位の血管中の血液流量の増加によって血液中の脱酸素化ヘモグロビン濃度が減少することになり、水素の原子核であるプロトンの緩和時間が長くなり、信号強度が増すのである。この信号は、分かりやすく言い換えると血液がどれくらい酸素化しているかというレベル、英語で言うとBlood Oxygenation Levelに依存（Depend）して変化するので、その頭文字をとってBOLD信号と名付けられている。このBOLD信号をもとに脳機能をイメージングする技術が機能的MRI（fMRI）と呼ばれる。fMRIにはBOLD以外にも、局所血流量変化そのものをイメージングする方法や神経活動に伴う磁場発生による緩和時間変化を直接検出する試みもあるが、現時点ではfMRIのほとんどがBOLD信号に基づくものである。

fMRIによる高次脳機能研究の一例として、図形自体は何も変化しないにもかかわらず、見ている人には複数の異なる見え方が交互に知覚される“多安定知覚”と呼ばれる視知覚現象に関わる脳活動部位をイメージングした例を図2と図3に示す。図2では、6名の被験者の脳の解剖画像から、個人ごとの脳をコンピュータで描き、各自の脳の上に活動部位（赤で示してある部位）を重ね合わせて表示している。図3ではさらに脳内の任意の断面の活動（黄色やオレンジ色で示してある部位）を表示している。こうしたイメージングを行うことで、そのメカニズムを解明してゆく手がかりが得られるのである。

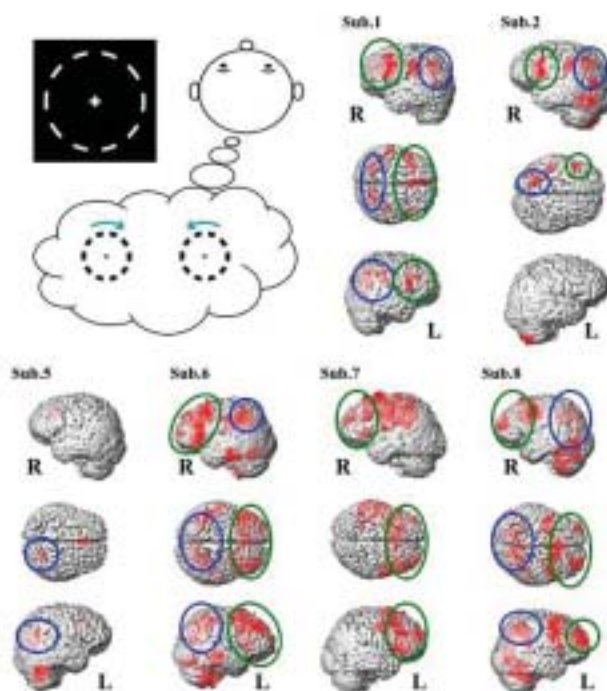


図2. 多安定知覚時の脳活動をfMRIにより計測した結果の例。6名の被験者の結果を表示している。青丸と緑丸の部位で共通の活動が見られる。左上の円の円周の白と黒を繰り返し反転させると円が時計回りまたは反時計回りといった2つの安定な知覚状態が生じる。

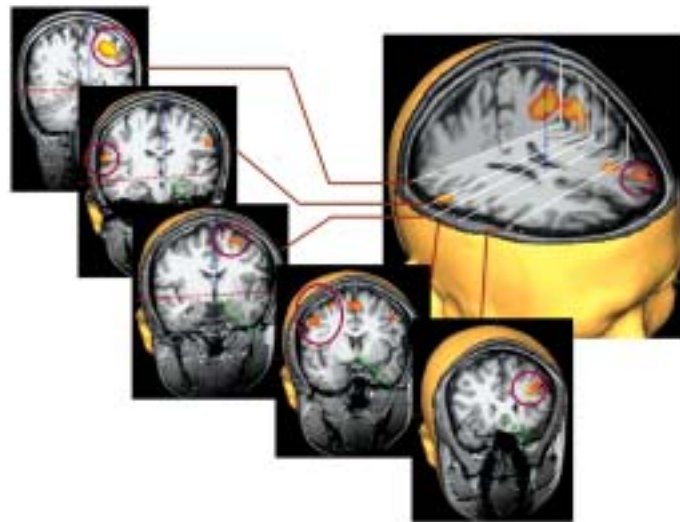


図 3. 多安定知覚時の脳活動を fMRI により計測した結果の 3 次元表示の例。

3. 超伝導量子干渉素子と脳磁界計測

次に説明するイメージング技術は、脳から発生する非常に微弱な磁気信号を捉える脳磁図 (MEG: magnetoencephalogram) と呼ばれるものである。脳磁図を理解するためには、超伝導という物理現象のことを知っておく必要がある。超伝導とは、簡単に言うと電流が流れても電圧が発生しない状態である。特定の金属やセラミクスを冷やして行くとある温度以下で超伝導になるものがある。超伝導状態にある 2 つの物質の間を、薄い絶縁体や半導体で接合したり、超伝導体を狭くくびれさせたりして、弱い結合状態を作ったものをジョセフソン接合という。ジョセフソン接合を含む超伝導リング内での量子干渉効果を利用した素子を SQUID (Superconducting Quantum Interference Device、スクイッド) という。超伝導状態にある電子は電子波と呼ばれ、波としての性質を考えて、その波の干渉を利用したデバイスが SQUID と呼ばれる超高感度の磁気センサである。ここで、ジョセフソン接合という名称は、1973 年に江崎玲於奈博士らとともにノーベル物理学賞を受賞したジョセフソン博士の名から取られている。ジョセフソンはケンブリッジ大学の大学院生の時に超伝導金属間のトンネル効果の理論式を導出し、これが受賞の対象となったのである。現在は、このジョセフソン博士も意識や精神現象の理論的研究を行なっている。

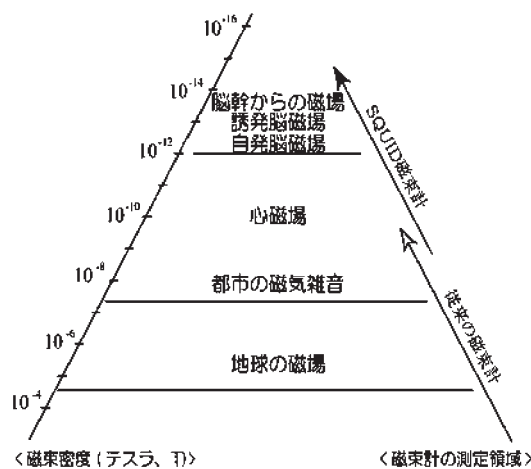


図 4. 脳から発生する磁場の大きさの比較と SQUID 磁束計の感度

SQUIDを用いた計測技術は、1980年代に入り生体から発生する微弱な磁気信号の検出に応用されはじめ、心臓や脳の機能を非侵襲的に調べる研究に強力な手段として用いられており、近年さらに、医療にも用いられ始めている。このSQUIDを用いて計測される脳磁界の時間波形が脳磁図と呼ばれるもので、当初1チャンネルのセンサを用いたシステムによってセンサの位置を変えながら磁束密度分布を計測していたものが、37チャンネル、64チャンネルと次第にそのセンサ数を増し、現在では、図6に示すような全頭に配置した数百のセンサからの同時計測を行えるシステムが普及するに至っている。脳磁図計測においては、大脳皮質の神経活動に伴って発生する磁束密度が 10^{-14} Tのオーダーであり(図4)、極めて微弱なため、SQUIDが唯一実用に供することのできる磁気センサである。

脳磁界の発生源は、大脳皮質にある錐体細胞と呼ばれるニューロンである。このニューロンの入力部である尖樹状突起において、ナトリウム、カルシウム、塩素、カリウムといったイオンが流入あるいは流出することによって電位差が生じ、尖樹状突起内に電流が流れる。電流が流れるとアンペールの法則といわれる物理の法則に従って磁界が発生し、これがMEGの起源である(図5)。一方、この電流が脳内に巡回することにより頭皮表面の電位差となって現れる。これが脳波(EEG: magnetoencephalogram)の起源である。大脳皮質は、特定の部位が特定の機能に関わっていることが知られており、どの部位がどのような時間関係で活動したかを探ることにより、脳内プロセスを推定することが可能となるのである。脳波に比べ脳磁図は比較的新しい方法であり、1972年にアメリカMITのコーエン博士が初めて計測した。一方、脳波は、1929年にドイツ、イエナ大学の精神科医ベルガーが人間の脳から発生している、ほぼ一定の周波数をもつ電位変動を観測したのが最初と言われている。

SQUIDは液体ヘリウム温度(4.2K)で超伝導性を示す金属系の低温SQUIDと液体窒素温度(77K)で動作する酸化物超伝導体を用いた高温SQUIDに分けられ、脳磁図計測には感度の高いニオブ系の低温SQUIDが主に用いられている。また、低温SQUIDを用いた胎児用の脳磁図・心磁図(MCG)計測システムも実用化されている。一方、高温SQUIDは、低温SQUIDに比べ感度は低いが液体窒素の価格が安く取り扱いが簡易で、低コストのシステムを構築できる可能性があるため、現在開発が進んでおり、脳磁図に比べ信号強度が一桁以上大きい心磁図計測システムは既に実用化されている。

脳磁図で計測される磁界は、微弱であるが、生体組織によって歪められることなく計測可能であり、多数回繰り返し計測されたデータを加算平均することにより得られる誘発応答成分の磁束密度分布から脳内の信号源を高精度で推定する事が可能である。従って、脳磁図では、信号源推定を継時的に行い、神経活動部位の同定と移動を調べることが可能であり、脳の機能のなかでも特に感覚情報の処理の研究に威力を発揮してきた。

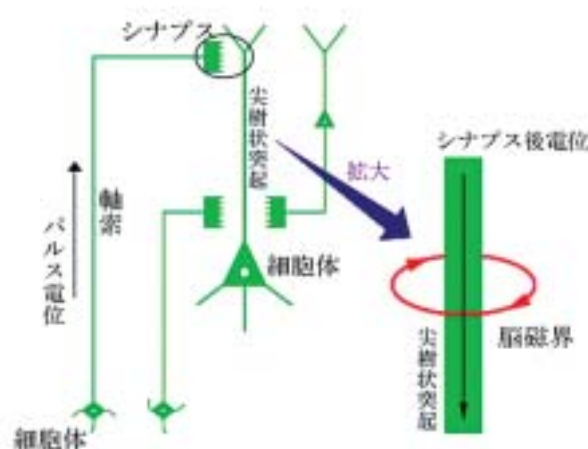


図5. 脳磁図の発生メカニズム。大脳皮質にある神経細胞の樹状突起部に電流が流れることで磁場が発生。

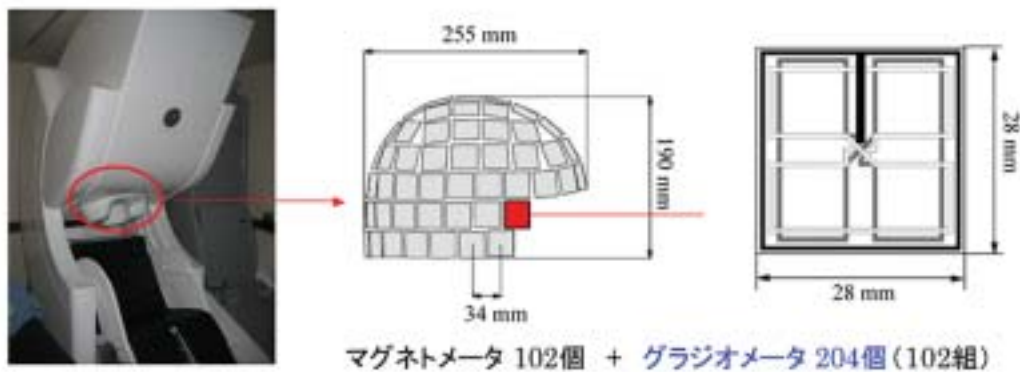


図 6. 306チャンネル全頭型システム（上）と102個のマグネトメータと204個の平面型グラジオメータ

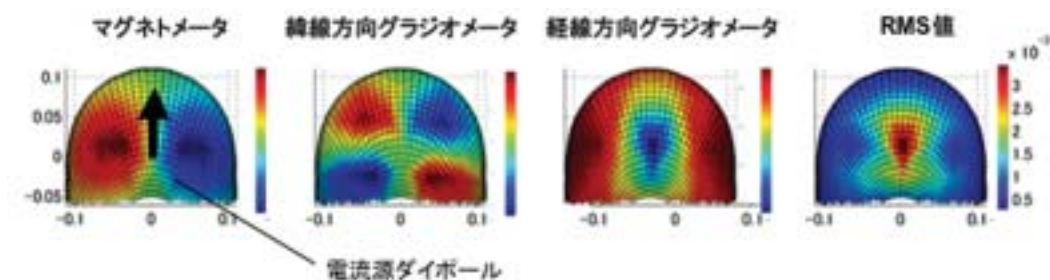


図 7. 102個のマグネトメータと204個の平面型グラジオメータで計測される視覚刺激誘発脳磁界の例（下）。

図 6 に示した装置は全頭の回り 102カ所に配置した 306個のセンサから一度に脳磁界信号を測定することができる。図 7 に、視覚刺激呈示時に後頭部の視覚野と呼ばれる視覚情報を処理する大脳皮質が活動した場合（左端の図中にある電流源ダイポールが神経活動に対応）を想定して、この全頭型の装置で計測される脳磁界分布をシミュレーションで求めた結果を示す。この図では、マグネトメータならびにグラジオメータと呼ばれる、脳の表面に平行な面内での磁界の変化を捉える 2つのタイプのセンサ（図 6）によって計測される脳磁界分布の例をセンサ面の後方から見たものとして描いている。脳磁図では、特定の時刻におけるこの図の様な脳磁界分布を計測し、それを基に逆問題計算と呼ばれるコンピュータ解析を行うことによって、磁界の発生源（図中の電流源ダイポール）を解析することができる。図 8 はこの脳磁図を用いて、仮現運動と呼ばれる視知覚時の脳活動を計測し、磁気信号の発生源を解析してイメージングした一例を示してある。ここで、仮現運動とは位置の少しずれた同じ図形が連続して呈示されると、実際には動いていないにもかかわらず動いて見えるという、映画やテレビの動画のものになっている良く知られた現象である。図の上側が顔面、下側が後頭部であり、センサで頭を真上からみた配置で描いてある。図中、緑とオレンジの四角で囲まれた部分に仮現運動に誘発された視覚野と呼ばれる視覚情報の処理に関わる部位における神経活動にともなう磁気信号が捉えられていることがわかる。この図の左下に示す脳の断面上には逆問題解析によって推定した信号発生源（赤の点）の位置を、先に述べた fMRI によって求めた脳活動部位（黄色）と共に示している。両者は良く一致しているのが分かると思う。

ただし、この例のように視覚的認知といった高次脳機能の場合には、活動時刻によっては複数の、しかも空間的広がりをもった活動部位が同時に関与することが多く、信号源推定が必ずしも上手く行かない。そこで、fMRI 等の他の手法と組み合わせ、相互の計測技術の欠点を補い合う方向に向かっている。

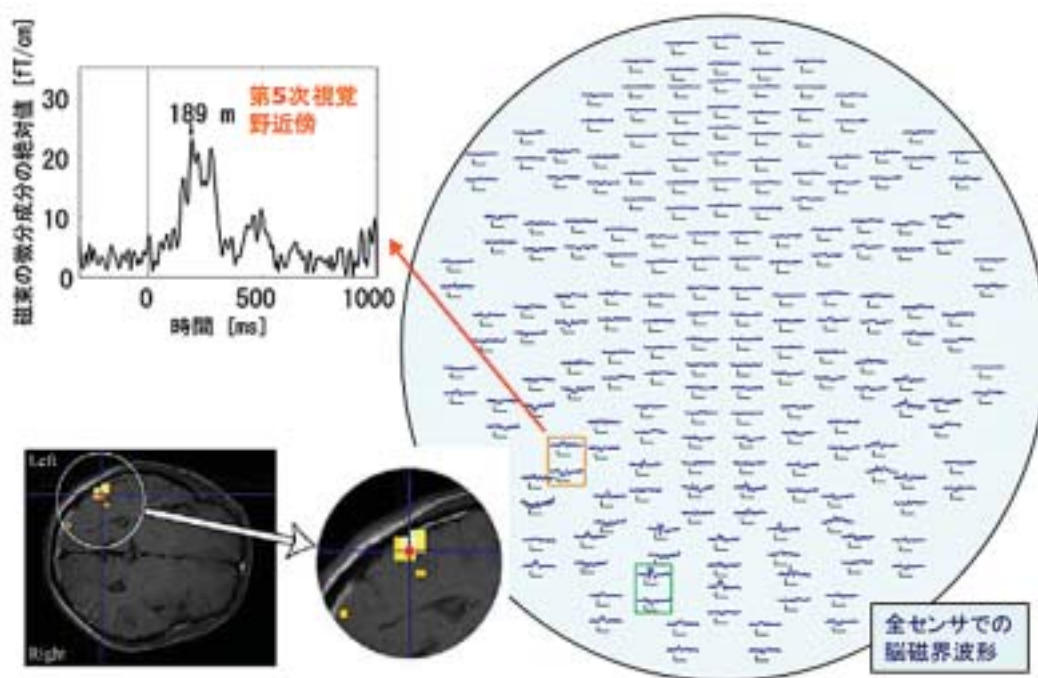


図 8. 仮現運動視知覚時の脳磁界の全頭型MEG装置による計測結果と逆問題解析で推定された信号源(左下の脳断面図中の赤の点)の例。脳断面図中に黄色で示すのはfMRIの結果。

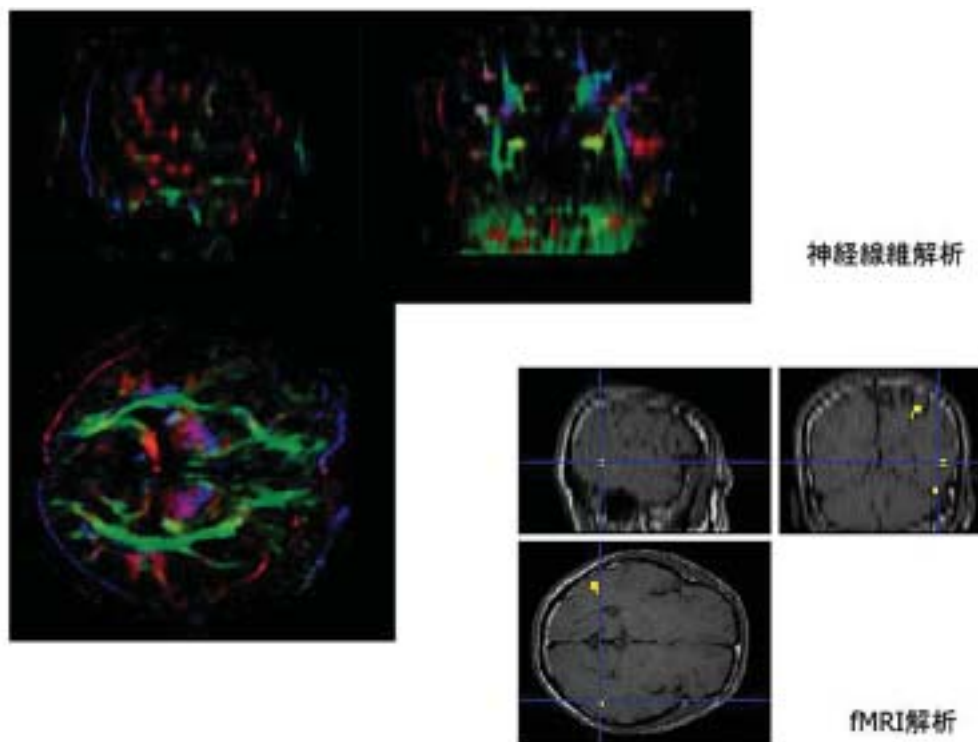


図 9. MR-拡散テンソル画像計測により神経線維の方向を解析しイメージングした例(右下に示すfMRIの結果と同じ断面での結果)。

私達の研究室では、現在さらにfMRIとMR拡散テンソル画像（MR-DTI）というイメージング手法の統合による脳活動解析に関しても検討を進めている。MR-DTIとは、脳内に存在する水分子の拡散異方性（特定の方向に水分子が拡散し易いこと）を計測する手法である。このMR-DTI計測により神経と神経のつながりを示す神経線維を解析することができる。図9に示したのがこの神経線維をMR-DTIから解析してその方向を上下（青）、左右（赤）、前後（緑）方向で色分けした例である。このような手法は、例えば統合失調症などといった精神疾患を発症した患者さんの脳内病変を定量的に計測し診断や治療に役立てることを可能にするものと考えられ、現在、精神神経科の先生方と共同で研究を進めている。また、MR-DTIの計測により得られる白質部の神経線維情報とfMRIにより得られる大脳皮質の活動部位情報、さらにMEGにより得られる活動時間情報を統合的に用いる事で信頼性の高い高次脳機能計測を行なうことが期待できる。

4. おわりに

本稿で述べた高次脳機能の計測とイメージングに関する研究は、今後益々その重要性を増して行くと考えられる。高齢化社会において、幾つになっても脳の機能を正常に保ち精神的にも肉体的にも健康で暮らして行くことに役立つ技術の開発は医療や福祉に多大な貢献をするものと期待されている。しかし、なによりこうした人間の高次脳機能の働きを知ることは、人間が他の動物も含めて、このかけがいのない地球に共存し平和に暮らせる未来のために欠かすことのできない“心とは何か”を教えてくれる。

本稿では紙数の関係で割愛したが、不幸にして病気や怪我で脳の機能に障害を負ったり失ったりした人を支援することに貢献するブレイン・マシン・インターフェースや人工感覚器やサイボーグ医療を含めた、医学と工学や情報学との学際領域である“脳機能工学”は、今後さらなる進化を求められているのである。

学生の声**「博士課程学生として思うこと」**

工学研究科 電気工学専攻 大村研究室 博士後期課程2年 三宅 洋平

私は現在、大村善治教授の下、科学衛星搭載用電界センサーの宇宙プラズマ環境中特性の研究に取り組んでおります。大村研究室は工学研究科に所属しながらも、その活動は地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)等のどちらかといえば理学寄りの学会にも軸足を置いています。その中で自然と私は、自分の研究が工学か理学かどちらの研究コミュニティに対してアピールするものなのかを、常に考える必要性に迫られ、そのために悩むことも多くありました。その反面、工学研究科にしながら、理学的な研究コミュニティも観察できる機会に恵まれたともいえます。

そういった環境で何年か研究をしてきて最近感じるのは、ただ一つの学会では集まるコミュニティが意外に小さく、人の入れ替わりも思った以上に少ないということです(そのため学術会議のため世界の各地に飛び回っても、その先で毎回見知った顔と出くわすという面白い現象が起きます)。それはつまり一つの研究コミュニティ、研究分野の内部のみに限定してしまうと視野が小さくなってしまう危険性があるということです。学部4年生、修士の間はその研究分野における自身の研究の位置づけの理解に努めていましたが、博士課程ではそこから発展して自身の所属する研究コミュニティ、分野が社会の中でどういう位置づけにあるか、またはあるべきかを理解することが必要ではないかと感じ初めています。その理解の上に、将来自分がいるべき場所や、分野の発展のために貢献できることを考えていけるのではないかと思います。

さて、ようやく現在の自分をとりかこむ研究分野の概形をつかむ努力を始めたつもりですが、その中で(またはそれ以外の分野なのかもしれませんが)自身が根をおろすべき位置を見定める作業に関してはまだまだこれからという感じです。博士取得後の定職を得るためには、実績はもちろんのこと、きめ細かい情報、そして運やタイミングも必要であるという事情は近年よく言われるところです。自分がその分野に割り込んでいきたいという強い志向性を持つことが、研究成果のみならず、「運やタイミング」をも引き寄せてくれることを信じて、さらに思考を深めていきたいと思えます。

「新材料の魅力」

工学研究科 電子工学専攻 藤田研究室 博士後期課程1年 大島 孝仁

私は、酸化ガリウム(Ga_2O_3)の研究を行っている。これは、二元系酸化物で最もバンドギャップが大きい半導体で、4.8eVもある。世を賑わせているGaN(3.4eV)やSiC(3.2eV:4H)よりも遙かに大きい値である。しかしながら、そのバンドギャップを活かしたデバイスは作製されてこなかった。研究人口も非常に少ない。2対3の元素化合物や、複雑な結晶構造が敬遠されたのだろうと推測できる。私もこの新規半導体材料を博士のテーマに選ぶべきかどうか迷った。周りの博士課程の方々を見渡しても、新規材料に賭ける人はいない。最終的に Ga_2O_3 をテーマに選んだが、その選択が正しいのかどうか分からなかった。最悪、結果がでないこともあり得ると考えていた。

この Ga_2O_3 には他のワイドギャップ半導体を大きくリードしている点がある。単結晶基板がFloating Zone法で作製できるのである。Floating Zone法はSi単結晶基板作製にも用いられ、基礎的な単結晶成長方法である。ただ、需要が無いので、商品として作製しているメーカーはない。まず私は、単結晶基板を試験的に作製しておられる企業の方と交渉し、共同研究という形で単結晶基板を入手した。そして、現在までに分子線エピタキシーによるステップフロー成長や、深紫外光検出器作製などを行った。ともに世界初である。特に、光検出器は、競合するAlGaIn、ダイヤモンド光検出器を作製プロセス、コスト、性能で大きく上回っている。まさに物質の勝利である。近い将来、世の中に標準的深紫外光検出器として出回ると期待している。この結果は博士としては小さいが、今後の研究の弾みとなった。

研究には、新テーマの開拓と、その発展の2つに分かれると思う。今後の動向しだいであるが、今回 Ga_2O_3 を用いた新テーマが開拓出来たと思う。このように、新材料はリスクが伴うが、大きな魅力を持っている。恐らくこのような冒険的な研究は企業では出来ないであろう。京都大学の挑戦的な姿勢に私は感謝したい。

教室通信

昨18年度に学科長を仰せつかった際に16号のこの欄に寄稿させて頂いてから早くも1年半が経過し、学科長としての2年目も終盤にさしかかりつつあります。前回の拙稿を読み返して、あたかも申請書に対する報告書を求められているようで、はなはだ忸怩たる思いながら、学科の近況をお伝えします。

学科運営については、昨年度より学科長公選制を導入いたしました。前回に書きましたように学科のあり方を根本的に再検討することが必要となっており、そのためには従来の回り持ちの当番としての学科長ではなく、ある程度の期間継続性を持って全体を見渡すことが必要との考えからです。まず教室会議の構成員を助手（今年度より教員制度が変わって助教となりました）に拡大し、全教員が教育組織としての学科の運営に参加することをお願いしました。負担が増えて迷惑にお感じの方もおいででしょうし、多数の教授・准教授の前で発言するのは難しいとも承知しておりますが、少なくとも何が問題とされ、どういう議論を経て何が決定されたかを知って頂くだけでも価値があると思っております。次に、学科長の任期を2年（1年の再任可）とし、全教員による1次投票と教授による2次投票の2段階で選出することをお認め頂きました。これには賛否両論がありましたが見直しを前提に試行いたしました。19年度に継続が承認され、投票の結果非力ながら私が3年目をお引き受けすることになりました。

新たに設置した2委員会のうち、将来構想委員会（小野寺委員長）では、当初入試制度や学科名の変更までを視野に入れて学科のあり方を考えることを目指しましたが、本学ではAO入試導入は困難という状況もあり、当面の活動を「中高校生の電気離れ対策」に絞つつあります。理科離れ、工学離れ、電気離れという三重苦（？）のもと、今年度は電気電子工学科の入試成績が工学部で最低となり、なんとか学科の実際の姿を中高校生にアピールすることが焦眉の課題であると考えています。特に、我々教員が想像する「高校生が思い描く電気系像」には大幅な修正の必要がありそうです。最近の高校生の多くは、例えば携帯電話を実現するためには工学が不可欠である、ということすら理解できていないらしく、工学部が何をするとどこかイメージがつかめなようです。まずは学生の理解を理解することから始めるべく、毎年の新入生にアンケートを行い、高校生の持つ電気電子工学科像を調べると共に、高校や中学との交流を深める方策を模索しています。特にwebによる広報の重要性が明確になり、須田准教授に担当をお願いして受験生向けページの充実にも力を入れています。「工学がなければ何も実現しない」ことを主張することから始める必要がありそうです。

教務委員会（引原委員長）においては、カリキュラムの大幅な見直しを進めています。現状では卒業に必要な専門科目数の約2倍が開講されており、多数を登録して取れるものだけ取る、という傾向が強いようです。アドバイザーが登録科目を制約するよう指導しようとしても「不要なのはどれか」と問われて困るという状況です。3回生までの講義内容を学科に共通の基本的項目に精選して科目数を減らし、すべてを取得するよう指導する方向で検討を進めています。また研究室配属を4回生の講義開始前に決定していますので、各研究分野で必要な知識は4回生科目で取得させる方針です。各専門分野のワーキンググループでシラバスを詳細にご検討頂き、その結果に基づいて全体の構成を検討しているところで、平成21年度よりの実施を目指しています。

入学後の学生の教育については、カリキュラム構成以前の問題として、受動性が根本的問題として指摘されています。例えば、工学部教育シンポジウムで紹介された「学生の評価の高い科目」は、いずれも小テストやレポートへの丁寧な対応など、手取り足取りの行き届いた指導が共通しており、担当教員の間でも「自由の学風」とのギャップに苦慮する声があります。工学部では、今年度より文部科学省の理数学生応援プロジェクトに採択されたグローバルリーダーシップ教育プログラムがスタートしました。これはプロジェクトベースの少人数教育などを核とした、学科横断的なリーダー育成を目的とする試みで、今後4年をかけてコースを制定しようとしています。これとは別に、電気電子工学科内では最近の学生が小中学校時代に工作の楽しみを経験していないことも問題であるという指摘が多く、上記のプログラムの経費を用いて、自主的な工作や実験を促す課外活動支援を行うことも検討しています。

いずれの課題も一朝一夕には解決しない重要かつ長期的な継続性を要求される課題であるにもかかわらず、昨今厳しさを増す教員の評価には結びつきにくいことも大きな問題です。ボランティアの熱意のみでは継続が困難であり、体制の整備が必要です。皆様のご理解と一層のご支援をお願いする次第です。
(文責：佐藤 亨)

賛助会員の声

鉄鋼業（新日本製鐵）における電気技術・制御技術紹介

新日本製鐵株式会社 大分製鐵所 生産技術部長（昭和56年卒業） 新田 博之

1. はじめに

鉄鋼業界を取巻く需要環境は、2002年以降、中国を始めとするBRICsと呼ばれる経済新興国の著しい経済成長等を背景に、世界規模で急速に好転しました。一方で、近年の世界的な鉄鋼メーカーの合併・再編により、従来「国内」産業的なイメージだった鉄鋼業界は、世界規模でめまぐるしく変化しています。その中で、長い鉄鋼業の歴史において世界的に技術優位性を培ってきた当社は、高い技術を要する「高級鋼」の分野を中心に、さらなる技術開発を図り、今以上の競争力強化を目指しています。まさに鉄鋼業は、今なお進化し続ける業界なのです。

そもそも電気系の学生の皆さんにとって、鉄鋼業は電気屋とは疎遠な産業で材料工学や機械工学専攻者で占められているという印象が強いと思います。この要因は製品が一般消費者向けでなく、馴染みが薄いためではないでしょうか？意外に思うかもしれませんが、電気技術無くして鉄鋼業は成り立ちません（当然、材料・機械といった他要素技術も必要ですが）。今回、この場をお借りして、鉄鋼における電気技術・制御技術を紹介します。少しでも鉄鋼業を身近に感じてもらえると幸いです。

2. 鉄鋼製造プロセス紹介

簡単な鉄鋼製造プロセス模式図を図1に示します。（製鉄工程）原料の鉄鉱石、石炭を高炉と呼ばれる反応炉で還元して、銑鉄（炭素飽和鋼）を作ります。（製鋼工程）銑鉄は硬くてもろく、次工程の転炉で成分調整を行い、連続铸造機で固めて鋼鉄とします。（加工工程）熱間圧延、冷間圧延、メッキ処理といった加工工程を経て注文の製品を作ります。

各プロセスにおけるアクチュエータはモータや油圧シリンダ、調節弁でほとんど電気品です（油圧シリンダの油圧源がモータ駆動のポンプであることを考えると、全て電気品であるといえます）。例えば熱延工程には10,000kWを超える容量のモータがあり、電気品は非常に大きなスケールとなります。また、プロセス全体を通じて消費電力量が多いため、一部プロセスで発生する水素や一酸化炭素などのガスを利用した自家発電設備を設け、製鉄所内の電力を全て供給しています。

これら電気品の設計に電気技術が必要であることはもちろん、これらをどう制御するかという技術も必要になります。次項では鉄鋼制御システムについて紹介します。

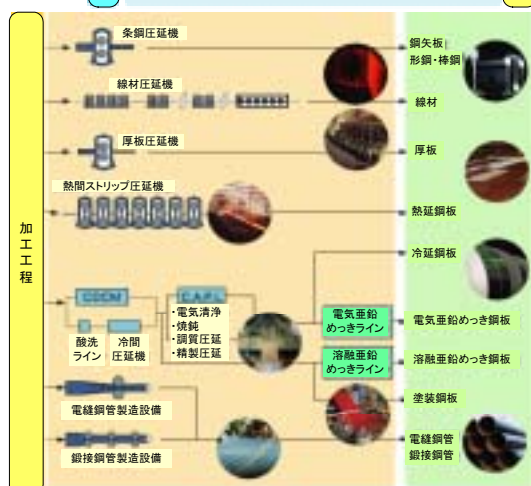
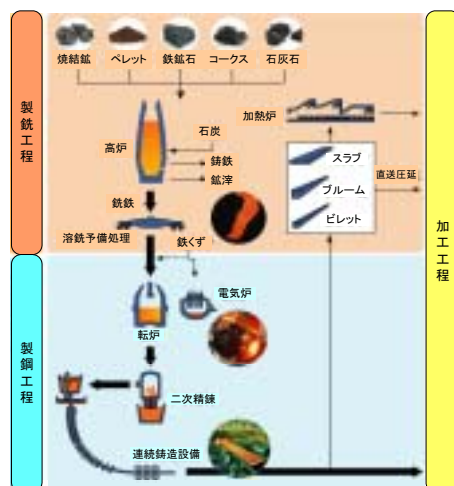


図1. 鉄鋼製造プロセス模式図

3. 鉄鋼制御システム概要

制御システムの特徴を下記に示します。

- ①対象が多様（反応系/加工系、粉体⇒流体⇒固体）
- ②管理が複雑（受注生産、小ロット大規模プロセス）
- ③レンジが広い（温度：常温～1600℃、速度：～40m/s）
- ④要求精度が厳しい（寸法、温度、表面品位）
- ⑤人が非常に少ない

以上の点で、自動制御への要求レベルが非常に高いものとなっています。①、②について図2に各工程別の特性及び適用制御則例を示します。対象の多様さがよく現れていると思います。特に生産品種が多く、工程管理や各工程間の物流管理は大規模、複雑になるため、システム最適化ニーズも多くあります。次に④について図3に各工程別の代表的な要求精度を示します。熱延における板厚精度は±50μmでこれだけでも十分厳しい印象があると思います。しかし、実際にはこれより高い精度を90km/hという圧延速度で実現しています。

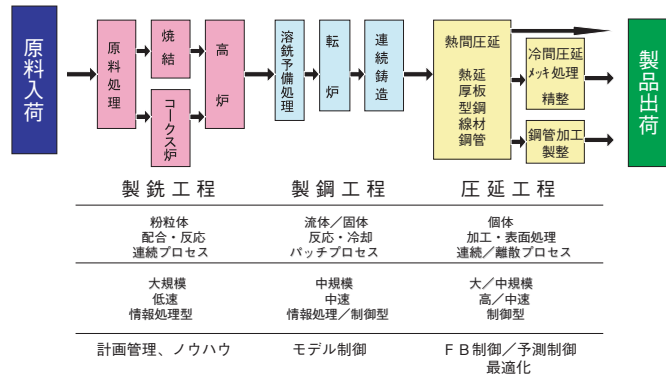


図2. 鉄鋼プロセス工程別特性及び適用制御則例

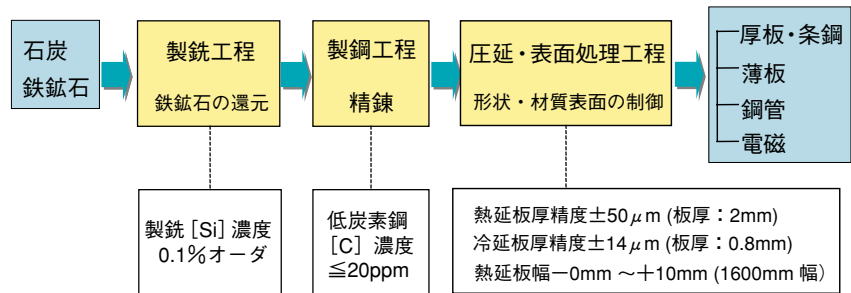


図3. 鉄鋼プロセス工程別の代表的な要求精度

このような制御を実現するため、電気・制御・情報技術は必要不可欠な存在です。特に現在は、鉄鋼業が世界的な競争の中にあり、要求レベルがさらに高まっている状況で、電気技術者が活躍するフィールドは無限にあるといっても過言ではありません。

4. おわりに

鉄鋼業において電気技術・制御技術が重要な位置を占めていることを感じてもらえたと思います。特に24時間365日フル稼働という過酷な状況でも耐えられる電気品の選定や、他要素技術者と協力しながらプロセスを作り上げていく、改良していくという仕事は非常にやりごたえがあります。百聞は一見にしかずですから、是非一度見学に来て実感してみてください。

(新日本製鐵株式会社 <http://www.nsc.co.jp/>)

編集後記

2007年は暑くて長い夏から、短い秋を挟み、一気に冬になりました。紅葉やかえでも、紅くなるべきか、茶色になって枯れてしまうべきか迷っているようでした。気候変化への対応手段に限られる植物は、地球温暖化の被害を人間以上に受けているようです。

さて、第19号からcueの表紙右上にISSN番号が付いたことにお気づきでしょうか。ISSN (International Standard Serial Number) は、単行本でおなじみのISBN (International Standard Book Number) とともに、雑誌などの逐次刊行物に付される国際標準のシリアル番号です。番号はISSNネットワークが管理し、日本国内では、国立国会図書館が日本国内のセンターとして登録・管理にあたっています。cueに与えられた番号は、ISSN1882-5214で、最初の4桁は国毎に割り当てられ、次の3桁が雑誌タイトルの識別です。最後の一文字はモジュロ11のチェックコードです。ISSNへの登録は、国立国会図書館長の長尾先生（洛友会長）のご提案によるものです。cueのバックナンバーが国会図書館にも収蔵されています。編集委員会も、これまで以上に、①魅力的な記事の収集、②オンタイムの発行、③ミス削減などの編集の質の向上、に心がけて参りたいと考えています。

[T.T.記]

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

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

