ISSN　1882- 5214

cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.30　SEPTEMBER 2013

[第30号]

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

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

cue 30 号 目次

巻頭言

電気・電子および情報通信技術者の使命と責任

昭和35年卒　名誉教授　池　田　克　夫

電気・電子および情報通信技術（以下でEE&ICTと記す）は、国の興亡にも関わる先端技術産業を支えている。その進展速度は他の如何なる技術分野にも見られないほど大きく、社会の行動規範（パラダイム）の大きな変化をもたらしている。EE&ICTが大量殺戮兵器に匹敵するような影響力を持つに至った現在、それに関わる技術者の使命と責任は極めて重大なものであることを改めて認識する必要があると思う。この大きな課題を諸賢に対して述べるのに小生の能力不足を承知しながら、敢えて筆を執った。

● 若い研究者・技術者に期待する

先日、吉田進教授定年退官記念会で、若手の卒業生から、夢の情報通信技術について話を聞く機会があった。夢は直ちに実現できるものばかりではないが、大きな希望を抱かせるものであった。また、インターネット技術の研究会で、若手の研究者から、最新の技術動向を聞くことができた。情報・通信技術の進展は、他の技術と比較にならないほど急速で、短期間のうちに社会の全ての分野でパラダイムを大きく変化させている。

若い人達が情熱を持って取り組んでいる姿が誠に心強く、今後の発展を心から祈念したい。物心の両面から人々の満足度と生活の質とを高めると共に、モラルの向上にも大いに寄与することを願う。

● 科学技術の影響には好ましい面と好ましくない面とがある

産業革命以後の技術の歴史は、一言で表すと合理化・効率化であった。

科学技術は、人類の輝かしい未来を期待させ、物質的な豊かさ、利便性をもたらした。人々の暮らしは物質的には確かに豊かになった。

しかしながら、高度に発展した科学技術を駆使した経済活動は、自然環境を破壊して地球規模の環境問題を顕在化させている。余りにも合理化・効率化を重視した結果、多くの局面でゆとりを奪っている。貧富の格差を生じ、失業問題が深刻である。また、科学技術の知識が悪用されたとき、その被害が甚大で陰惨なものとなることもしばしば経験してきた。近代の世界戦争や9.11テロ事件など、枚挙にいとまがない。科学技術は、諸刃の剣なのである。

科学者・技術者はそれぞれの専門分野において夢を追い、新しい原理の発見・発明に日夜努力を重ねている。新しい知見がどのような利点があるかを知っていると同時に、負の面に関してもそれなりの認識を持っていることが多いであろう。

一方、専門外の人達にとって、新しい知見が全ての局面において直ちに完全に理解されることはむしろ少なく、負の側面の指摘が遅れ勝ちである。負の側面が明白になってからようやく社会の注目を引くことも多い。とりわけEE&ICT分野に関してはその傾向が著しい。

これまで科学技術の負の側面に目を向けた活動は甚だ低調であったのではないだろうか。そして発言

力も世間の注目度も大変低い傾向があった。その分野が国の経済政策としてクローズアップされているときには尚更で、負の側面に関する発言をする人達は国の政策遂行を妨害するとして、敬遠されることもしばしばであった。その結果が災害を拡大させてしまい、国民の生命と財産に莫大な損害を与えてしまった事例を我々は最近経験したばかりだ。国よりももっと小さな企業などの集団においても、同様なことはしばしば起こっている。

科学技術は多くのことを解決してきたが、必ずしも万能ではないし、その成果の恩恵を享受する人々にとっても、各人の価値観によって評価が分かれることも多い。神ならぬ人の過誤を根絶することは不可能に近いであろう。また、人は自分のしていることを否定することはなかなかできないものである。しかし、科学者・技術者は、結果が生じる社会的影響が大きいが故に、謙虚な態度で広い視野を持ち、歴史に学び、人文・社会科学分野と連携協力して、科学技術の利点を追求するのみならず、その限界と負の面をも明らかにし、何とかして負の面の影響を最小限に留めるよう努力することも求められている。専門家としてのモラル向上を計ることが今後ますます重要なのである。

EE&ICT を上手に使うと社会にとって大きな利益をもたらすが、使い方を誤ったときには取り返しの付かないような被害をもたらし人々を不幸にしてしまいかねない。

ソーシアル・ネットワーキング・システム（SNS）を介した大衆の発言がもとで、独裁政権が倒れた例があるし、国民の自由な発言を封じ込めようと躍起になっている国においても、大きな動きが起こりかけているらしい。

有名タレントに「つぶやい」て貰うと人気抜群となり、無名な泡沫候補でも国政選挙で当選できるようになるという。こんなことで国会議員を選んだらこの国の将来はどうなるのであろう。欲に目が眩んで人気取り策を幇助する WEB 技術者の責任は重い。

多数の言うことは正しいか？賢い国民となり、大衆の人気におもねる政治（ポピュリズム）を廃してゆく不断の努力が必要と思うが、読賢はどう考えるだろうか。

人間としての倫理観の育成、専門家としての倫理観の育成、更には専門家としての啓蒙活動をも今一度見直しておくべきではないだろうか。

● 技術の継承について

20 年も経たないうちに同様の事故が繰り返されることが多いのに気付く。

40 年も経つと多くのことが忘れ去られる。人々の暮らしの知恵から大事故や大震災の記憶が忘れ去られる。科学技術分野においては重要な Know How が忘れ去られる。それは、人が現役で働いている期間は 40 年くらいで、文献等に記録が留められてはいるが、日常的な行動において、それらが有効に機能する知恵として活かされることなく、蓄積された知識や経験則が「身をもって」伝承されないことによるのではないだろうか。

大規模集積技術によって知識がブラックボックス化され陳腐化してゆく。時間が経つにつれて、それらの知識の再利用が極めて困難になる。

歴史は繰り返すと言われているが、失敗は繰り返して欲しくない。進展してきている大量データの活用技術によって情報が真に役立つようになることも大いに期待したい。

大学の研究・動向

イオンビームの「3本の矢」：ナノ粒子イオンの魅力

工学研究科　附属光・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
教授　高　岡　義　寛
講師　龍　頭　啓　充
助教　竹　内　光　明

1. はじめに

工学研究科附属光・電子理工学教育研究センターは、旧工学研究科附属イオン工学実験施設が改組され、平成19年4月1日に発足しました[1]。本センターは、旧イオン工学実験施設の研究成果および21世紀COE「電気電子基盤技術の研究教育拠点形成」の研究成果をさらに持続・発展・展開させ、グローバルCOE「光･電子理工学の教育研究拠点形成」の受け皿となるために設立された教育研究センターで、外国人客員部門を含めた6部門からなっています。その中の「ナノプロセス部門」の「ナノプロセス工学分野」では、イオン工学実験施設で四半世紀に渉ってミッションとして携わってきたクラスターイオン工学の研究を発展させ、新しいナノプロセス工学への展開を図る研究活動を行っています。

「何の粒子？」と良く質問を受けるナノ粒子とは、大きさがナノメートル程度の超微粒子であって、原子が数個集まった多原子分子（微小クラスター）を含め、原子・分子が数十～数万個集まった超微粒子（巨大クラスター）を指します。図1に示すように、特にメゾスコピック領域に属するクラスターは、バルク状態と異なる性質を示す粒子で、固体、液体、気体あるいはプラズマ状態でもない第5相状態の材料として、現在も注目されています[2,3]。また、種々の官能基を含む多原子分子は、官能基の種類によって異なる化学的性質を示すナノ粒子で、分解・置換によって多様な化学反応を示します。こうしたメゾスコピック領域のクラスターをイオン化して生成されたナノ粒子イオンビームは、従来のモノマーイオンビーム照射では得られない照射効果を顕し、次世代の材料プロセスに応用されています。

一方、高度情報化（IT）時代に入って、デバイスの高密度・高集積化が進む中で、材料・デバイスからのプロセス技術に対する要求は、益々厳しくなっています。材料の物性のみならず、その表面・界面も原子レベル（ナノレベル）で制御できるナノプロセス技術の開発が求められています。我々は多種・多様なイオン種の中にあって、微小・巨大なクラスターイオンの特異性に着目し、荷電粒子としての特質を活用したナノプロセス技術の開発を行っています。本稿では、当研究室で行ってきたナノ粒子イオンおよびナノプロセスの研究・動向について紹介します。

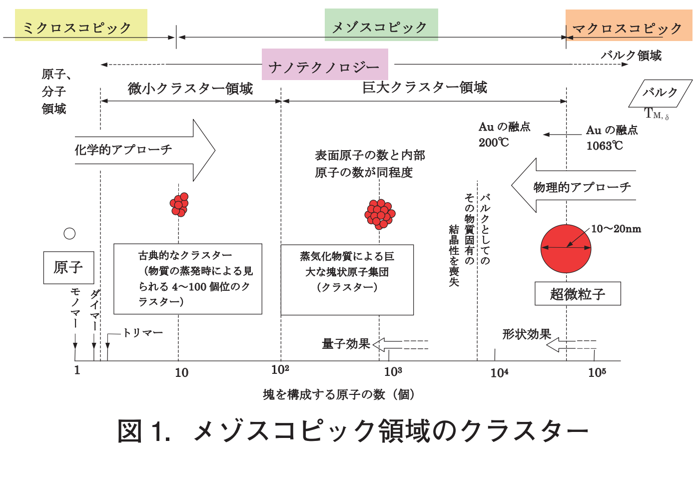


図1. メゾスコピック領域のクラスター

2. イオンの特質

イオンは多種・多様な荷電粒子としてよく知られています。このイオンの特質について、それぞれ3つの視点から考えてみます。図2に示すように、イオンは電子と同様に電荷をもった粒子ですので、電圧を印加することによって、①エネルギー（x軸）を自由に制御できます。また、②電流量（y軸）として1個ずつ計測でき、さらに③走行するビームの形状や大きさ（z軸）を電界や磁界によって制御でき、集束ビームや大面積ビームとして活用できます。そのため、エネルギーや物質を輸送できるビーム応用技術として、例えば蒸着・加工・注入技術、あるいは分析・評価技術として、様々な学問分野や産業分野で利用されています。一方、図3に示すように、基本的に1種類しか存在しない電子と異なり、①原子核の周囲の電子軌道に存在する電子の総数、②電子軌道に供与・受容される電子の数、および③電子軌道の形状や重なりによって、多種・多様なイオンが存在します。周期律表に表される各原子（元素）の正イオンは、1価イオンとしても100種類以上あります。また、同じ原子でも電子が付加されると負イオンになり、電子が2個以上取り出されると正の多価イオンになり、イオンの利用範囲が広がります。さらに、原子状や分子状のイオン、あるいはクラスター状のイオンなど、電子軌道の違いによって多様なイオンが存在します。このようなイオンの特質を踏まえ、イオンビームをナノプロセスに応用する上で、①イオンビームのエネルギー・電流・サイズの制御、②多種・多様なイオン種の活用、および③種々のイオンビームプロセスの併用と云った「3本の矢」が重要となります。

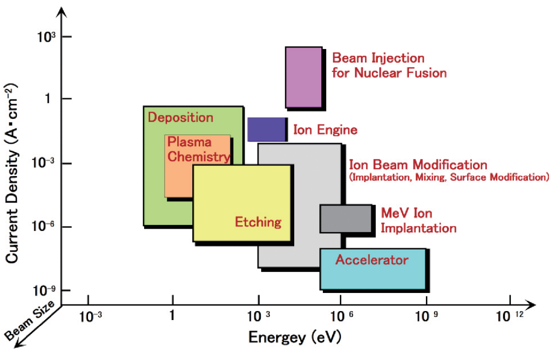


図2. イオンビームの応用分野

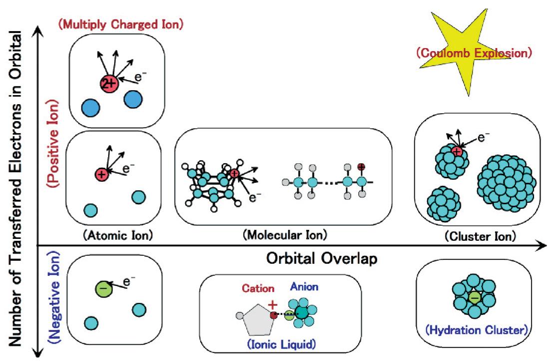


図3. 多種・多様なイオン種

3. ナノ粒子（クラスター）イオンの生成

当研究室では、これまでに金属、半導体の固体材料やアルゴン、酸素などの気体材料、あるいは水やアルコールといった液体材料から、多種・多様なクラスターイオンを生成しています。その中で、液体材料には種々の官能基を有する多原子分子（微小クラスター）が多く含まれています。液体材料から多原子分子のクラスターを生成する方法として、当研究室で独自に開発したノズルビーム法や電界放出法が挙げられます[4-7]。例えば、図4に示すIonic Liquids（イオン液体）のように、蒸気圧が極めて低い液体材料の場合、テーラーコーンを形成する電界放出法を用いて、サイズが比較的小さな正（赤色曲線）や負（青色曲線）のクラスターイオンを生成しました。また、BMIM-PF_6のようなイオン液体は、透明で電気伝導性を有しており、熱的

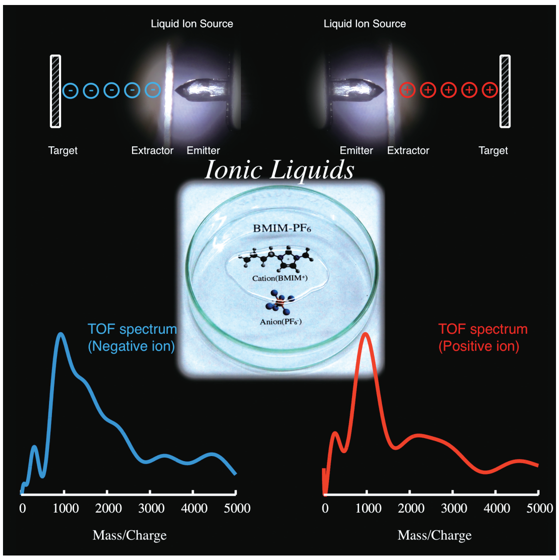


図4. イオン液体イオンのサイズ分布

に安定で、水やアルコールなどの他の溶媒とは混ざらない性質を持っています。さらに、イオン液体は電気化学、触媒化学、合成化学などの分野で、新規な溶媒材料として注目されており、図5に示すように、FETトランジスター用の高機能素材としても適用されています[8,9]。当研究室では、イオン液体クラスターイオンのエネルギーを制御し、蒸着・注入併用法を用いて、高付着性のイオン液体薄膜の形成に成功しています。

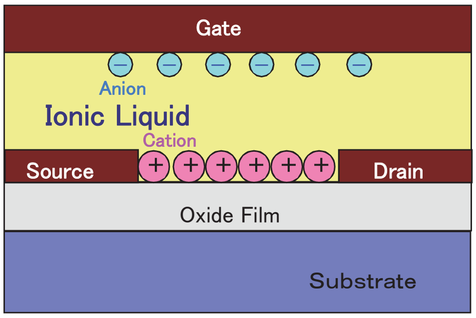


図5. イオン液体を用いた FETトランジスターの概略図

一方、蒸気圧の高い液体材料では、ノズルビーム法を用いて水、アルコール、アセトンなどの多原子分子クラスターを生成しました。本手法では、加熱された液体物質の蒸気を、ソースの一端に接続されているノズル喉部の小孔を通して真空中に噴射させます。このとき、断熱膨張によって塊状分子集団、すなわちクラスターが生成されます。さらに、生成されたクラスターは、形状がコーン状のスキマーを通過してイオン化部に導入され、電子衝撃によってイオン化されます。イオン化されたクラスターイオンは、イオン化部から引き出された後、加速されて基板に照射されます。

1個のクラスターを構成する分子数（クラスターサイズ）を明らかにするために、飛行時間（TOF）型質量分析法によってサイズ測定を行いました。TOF法では、クラスターイオンのサイズの違いによる走行時間の違いを検出することによって、サイズ分析を行うことができます。ここでは、クラスターイオンは1価イオンと仮定しており、殆どの構成分子は中性分子と考えています。図6に示すように、ピークサイズは蒸気圧（加熱温度）の増加と共に増加し、クラスターサイズは数百～数万分子に分布しています。ピークサイズとしては、水クラスターイオンでは約2500分子、エタノールクラスターイオンでは約1000分子であることが分かります。エタノールは水に比べて表面エネルギーが小さく、安定に存在できる最小の核（臨界核）ができやすいため、比較的小さなサイズのクラスターが生成されます。なお、生成されたクラスターは、水（アルコール）であって水（アルコール）でない新奇な水（アルコール）として、注目を集めています。

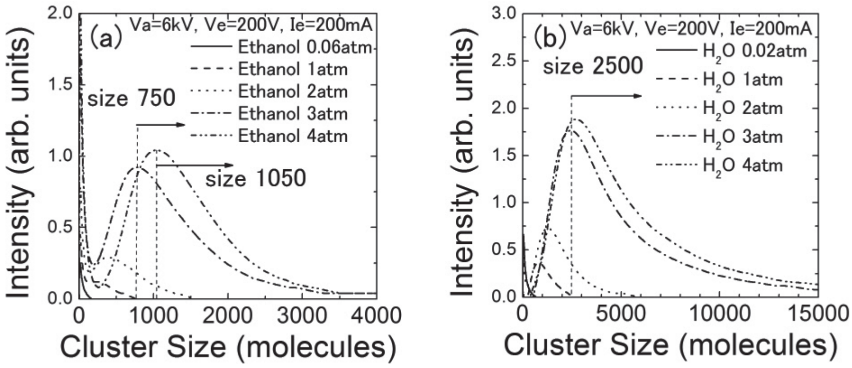


図6. (a) エタノールおよび (b) 水クラスターのサイズ分布

4. ナノ反応場の形成

クラスターイオンは質量・電荷比が大きいため、少電流でも多量（クラスターサイズ倍）の原子・分子（質量）が輸送でき、等価的に大電流輸送が可能です。しかもイオンの運動エネルギーを利用することができるので、固体表面の特定の原子結合を切断したり、表面を局所加熱したりすることが可能となります。図7に示すように、固体表面への1個のクラスターイオンの照射領域は、ナノメーターオーダー

の極微細領域でナノ反応場を形成します。また、高密度照射効果や多体衝突効果、あるいはラテラルスパッタリング効果や低エネルギー照射効果など、従来のイオンビームプロセスでは得られないクラスターイオン特有の表面照射効果が得られます[10]。例えば、高密度状態のクラスターが固体表面に衝突すると、表面原子と多体衝突が起こります。このとき、クラスターイオンの加速エネルギー（eV）は熱エネルギー（kT）に効率的に変換され、多体相関反応によって表面が高温状態となります。さらに、局所的な表面温度は加速電圧によって制御できます。そのため、クラスターイオン照射は表面化学反応を加速エネルギーによって制御できる特徴を有しています。また、クラスターイオンを構成している分子の入射エネルギーは、衝突時に固体表面に平行な方向の運動量に変換されるため、ラテラルスパッタリング効果が顕れます。さらに、クラスターを構成する1分子当たりのエネルギーは、加速エネルギーをクラスターサイズで割った値になります。例えば、10kV加速のサイズ1000分子のクラスターでは、1分子当たり10eV程度のエネルギーになります。したがって、極めて低いエネルギーで固体表面に照射できます。

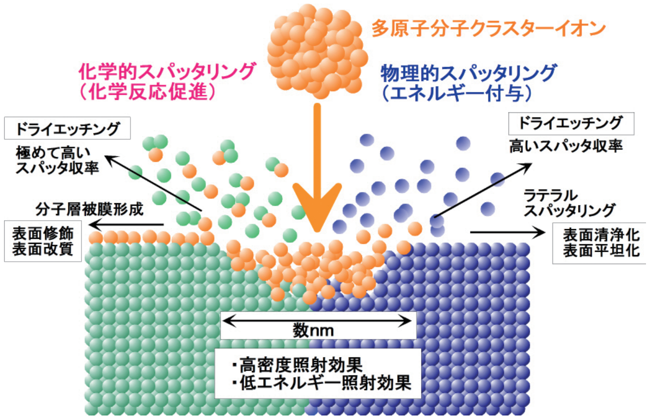


図7. クラスターイオン照射効果

クラスターイオン照射の低エネルギー照射効果を明らかにするために、例えば、エタノールおよび水クラスターイオンを加速して照射したシリコン（Si）基板表面の照射損傷を調べました。比較のため、アルゴン（Ar）のモノマーイオン照射した場合についても調べました。図8に示すように、エタノールおよび水クラスターイオン照射では、同じ加速電圧で照射したArモノマーイオン照射に比べて損傷量（変位原子数）は小さくなります。また、損傷量は加速エネルギーの減少と共に減少し、エタノールクラスターイオン照射では、1 keVの加速エネルギーにおいて未照射基板と同程度となります。これは、1分子当たりの入射エネルギーが10 eV以下となるため、照射損傷が抑制されたためと考えています。なお、無損傷照射でも加速エネルギーの一部は基板表面の局所加熱に使われるので、表面化学反応を促進する効果が期待できます。

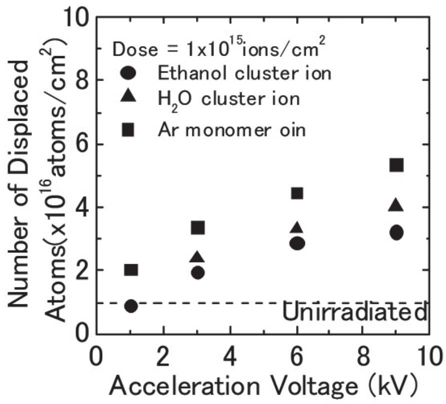


図8. Si基板の照射損傷量の
加速電圧依存性

分子動力学法を用いた計算機シミュレーションによると、ナノ粒子（クラスター）イオンと固体表面との相互作用はピコ秒からナノ秒の瞬時の多体相関反応となります。特に、官能基を含む多原子分子クラスターイオンの場合、その化学的性質を併用することによって、瞬時の反応速度にも対応できる化学反応の活性化や選択性の制御、あるいは固体表面の親・疎水性や潤滑性などの制御、付加・置換反応による表面改質などを行うことができます。こうしたナノ反応場での表面反応ダイナミックスは、非熱平衡状態の化学反応過程であり、従来のウエットプロセスでの表面反応とは全く異なっています。ナノ粒子イオンの表面反応ダイナミクスを理論的・実験的に明らかにすることは、学術的、工学応用的にも極めて重要であり、新しい化学反応論の構築が期待されます。

5. ナノプロセスへの応用

官能基を含む多原子分子クラスターイオン照射では、クラスターイオンの運動エネルギーおよび化学的性質の併用によって、室温でも材料表面を物理的あるいは化学的にスパッタリングできます。また、材料表面を高速スパッタリングすることによって、表面加工やパターニングへの応用が可能となります[10,11]。図9は、種々の金属や半導体表面にエタノールおよび水クラスターイオンを照射したときのスパッタリング率を示します。イオンの入射エネルギーは9 keVで、比較のためにアルゴン（Ar）のモノマーイオンを照射した場合も示します。ここで、スパッタリング率とは、1個のイオンが固体表面の原子と衝突したとき、その表面から飛び出す原子の数であります。図に示すように、クラスターイオン照射では、高密度照射効果や多体衝突効果によって、Arモノマーイオン照射に比べて10倍から数百倍のスパッタリング率が得られています。特に、エタノールクラスターイオンをシリコン（Si）、アルミニウム（Al）、チタン（Ti）などに照射した場合、極めて高いスパッタリング率が得られており、固体表面で化学的スパッタリングが生じたためと考えています。半導体分野におけるウエットプロセスでは、水やエタノールは固体表面の洗浄によく用いられますが、表面をエッチングすることはできません。官能基を含む多原子分子クラスターイオン照射では、照射領域が等価的に極めて高い温度になるため、化学反応が促進されて表面エッチングが生じやすくなると考えています。

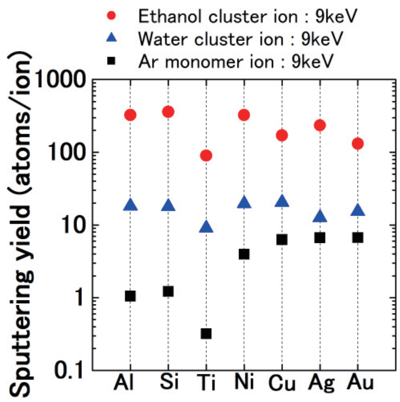


図9. 各種基板のスパッタリング率（入射エネルギー：9 keV）

クラスターイオン照射特有の高密度照射効果や低エネルギー照射効果を上手く活用することによって、固体表面を無損傷でエッチングする試みを行いました。その結果、加速エネルギーを制御することによって、極めて低損傷でシリコン表面をエッチングすることに成功しました。図10は、ナノプロセスへの応用として、フォトマスクを用いてシリコン（Si）基板上に形成したマイクロパターニングを示します。エッチング深さは約1 μmで、エッチング表面は1 nm以下の表面平坦性を保っています。また、エッチング面は低損傷で、線幅が数μm程度のラインパターンや周期的構造のパターンが形成されています。従来のプロセス技術では、表面をエッチングすれば必ず損傷が生じ、エッチングと損傷は比例関係にあります。エッチングしても余り損傷が生じない、あるいは極めて低損傷でエッチングできるプロセス技術は、魅力ある材料プロセス技術として注目されています。

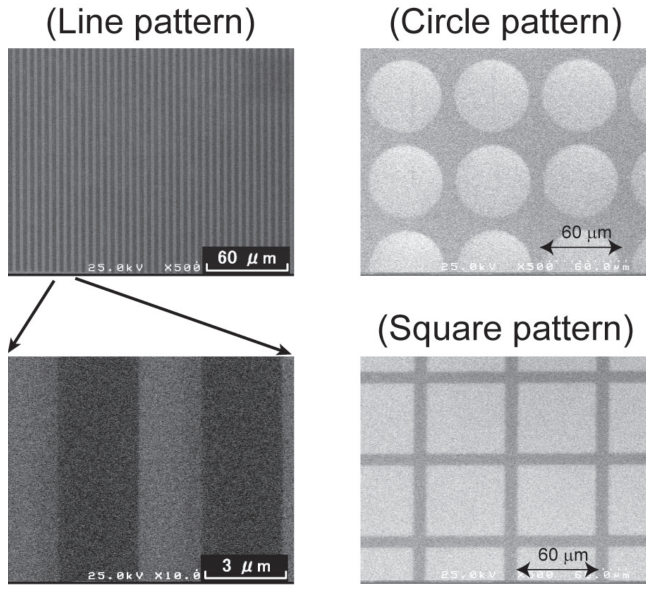


図10. Si基板上に形成されたマイクロパターン

材料表面の機械的研磨では、平均粗さが10nm以下にすることは極めて困難です。さらに、ガラス基板表面では平均粗さは原子レベルで平坦であっても、局所的に10nm程度の凹凸が存在し、その超平滑化が求められています。ナノレベルで表面を磨く技術は、次世代の電気・電子、磁気、光学デバイスの研磨に必要なプロセスとなっています。クラスターイオン照射では、特有のラテラルスパッタリング効

果によってナノレベルでの表面平坦化が可能です。例えば、金属、半導体、絶縁物の固体表面の平均粗さ（Ra）は、加速電圧やドーズ量の増大と共に増大します。しかし、いずれの場合も Ra ＝ 1 nm 以下に抑えることができ、原子レベルでの表面平坦性が得られています。例えば、水クラスターイオンの入射角を変えてガラス基板表面に照射し、その表面状態を原子間力顕微鏡（AFM）によって測定しました。図 11 に示すように、未照射基板と比較して、平均粗さは Ra ＝ 0.2 nm と同程度となり、Peak-to-Valley の粗さは Rpv ＝ 2.5nm 以下となりました。クラスターイオン照射の物理的スパッタリングによってガラス基板表面はエッチングされ、加えて斜め入射によってクラスターイオン照射特有のラテラルスパッタリング効果が促進されるため、局所的な凹凸が除去されて表面平坦化が促進されたと考えています。

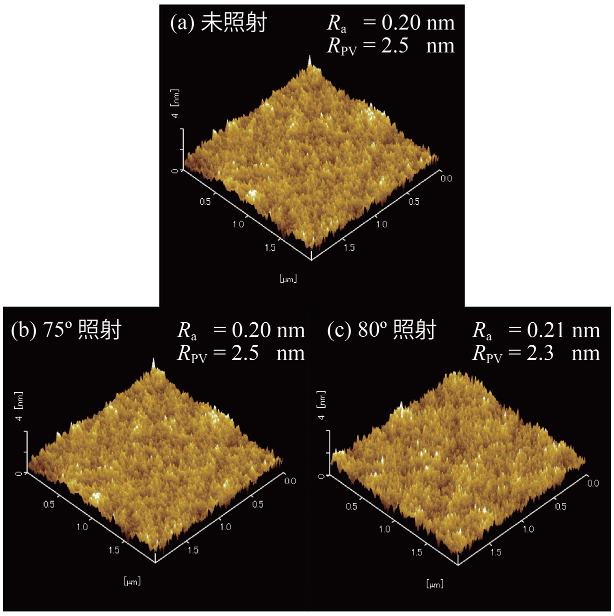


図 11. （a）未照射および（b）、（c）照射ガラス基板の AFM 像

6. おわりに

多種・多様なイオン種の中で、バルク状態と異なる性質を示すメゾスコピック領域のクラスターイオンの魅力は、新奇な材料として注目を集めています。また、ナノ反応場を形成し、クラスターイオン特有の照射効果を有したナノ粒子イオンとして注目を集めています。また、ナノ粒子イオンビームはナノレベルでのビーム制御性に加え、官能基を含んだ化学的に活性なイオンビームで、次世代の材料プロセス技術として注目されています。尤も、プロセスの研究には材料やデバイスの研究と併せ、三位一体の研究が求められます。その中で、ナノ粒子イオンビーム技術は、①新奇な材料・デバイスの創製、②エネルギー変換型の多体相関プロセスの開発、③モノづくり技術としてのナノテクノロジーへの適用と云った「3 本の矢」の実現に、有望・有用なビーム技術と云えます。

参考文献

[1] 石川順三：“教室通信：光・電子理工学教育研究センター”、CUE　No.21, March 2009, p.68.
[2] T. Takagi: Pure & Appl. Chem., **60**（5）, pp.781-794（1988）.
[3] 近藤保、市橋雅彦：“クラスター入門：物理と化学でひも解くナノサイエンス”（裳華房、2010 年 10 月）.
[4] G.H. Takaoka, M. Kawashita and T. Okada: Rev. Sci. Instrum. **79**（2008）02C503.
[5] H. Ryuto, K. Tada and G.H. Takaoka: Vacuum **84**（2010）501.
[6] G.H. Takaoka, M. Takeuchi and H. Ryuto: Rev. Sci. Instrum. **81**（2010）02B302.
[7] M. Takeuchi, H. Ryuto, and G.H. Takaoka: in 18th Int. Conf. on Ion Implant. Technol.（AIP Conf. Proc., 2010）p.456.
[8] J.H. Cho, J. Lee, Y. Xia, B. Kim, Y. He, M.J. Renn, T.P. Lodge and C.D. Frisbie: Nature Mater. **7**（2008）900.
[9] A.S. Dhoot, C. Israel, X. Moya, N.D. Mathur and R.H. Friend: Phys. Rev. Lett. **102**（2009）136402.
[10] G.H. Takaoka, H. Ryuto and M Takeuchi: J. Mater. Res. **27**（2012）806.
[11] 高岡義寛：ケミカル・エンジニヤリング、2008 年 8 月号、p.24.

産業界の技術動向

スーパーコンピュータ「京」[1] 搭載CPUの開発について

富士通株式会社　プロセッサ開発統括部
清　田　直　宏

1. はじめに

独立行政法人理化学研究所と富士通株式会社が共同開発したスーパーコンピュータ「京」が、LINPACKベンチマークにより世界のスーパーコンピュータ演算性能をランク付けするTOP500において、2011年6月に8.16PFLOPS（FLOPS:1秒間に処理する浮動小数点演算数）を記録して世界一を奪取し、更に同年11月には「京」の名の由来となった10ペタを超える10.51PFLOPSを記録し、二期連続世界一を果たした。

この成果は、全864筐体の中に88,128個におよぶCPUを搭載した大規模システム（図1）の上で、LINPACKベンチマークのプログラムを走行させ、実行効率93.2%で、29時間以上停止することなく動き続け、その演算性能を極限まで絞り出して得られた。これを実現した理由は、CPU「SPARC64™[2] VIIIfx[1]」の高性能・低消費電力化設計技術、インターコネクト「Tofu[2]」の新アーキテクチャ技術、システムボードの水冷技術、筐体の高密度実装技術等を駆使したハードウェアと、オペレーティングシステム、ファイルシステム、コンパイラ等の大規模並列システムを実現するソフトウェアを、それぞれ高いレベルで開発し、かつ、初期の仕様検討時からシステム全体の演算性能を最大限に引き出すことが出来るようにそれらのバランスを最適化し続けたことにある。

本稿ではこれらいずれも重要な各要素技術の中で、私が携わったCPU「SPARC64 VIIIfx」の開発について述べる。

図1 スーパーコンピュータ「京」

[1]「京」は独立行政法人理化学研究所の登録商標です。

[2] SPARC64は、米国SPARC International,Inc.のライセンスを受けて使用している同社の登録商標です。

2. SPARC64 VIIIfx の開発目標

「京」が目標としたシステム性能は10PFLOPSで、世界最先端の非常に難度の高い数値であった。それと同時に、納入先の制約条件により、システム全体で使用可能な電力や設置面積の上限が定まっていた。このシステム要件から導き出されたSPARC64 VIIIfxの開発目標は、前機種比3倍以上の高性能化と2分の1以下の低消費電力化の両方を実現することになり、そこには途方もなく大きな課題が立ちはだかっていた。

しかし、これまで脈々と受け継がれてきた技術と経験、ノウハウといったものに、若い技術者の新しい発想が加わり、高いハードルをひとつずつ乗り越えていった。その結果、この目標がただ無謀な盲進ではなく、世界一のCPUを実現するという強い信念と挑戦意欲へと、皆が次第に変わってゆき、誰一人として諦める技術者はいなかった。

こうして確定したSPARC64 VIIIfxの仕様（図2）と、ダイ写真（図3）を下記に示す。

項目	諸元
動作周波数	2GHz
コア数	8
プロセステクノロジー	富士通セミコンダクター（FSL） 45nm CMOS
ダイサイズ	22.7mm x 22.6mm
トランジスタ数	約7億6000万個
ピーク演算性能	128GFLOPS
メモリ帯域	64GB/s（理論ピーク値）
消費電力	58W（プロセス条件TYP,30℃）

図2 SPARC64 VIIIfxの仕様

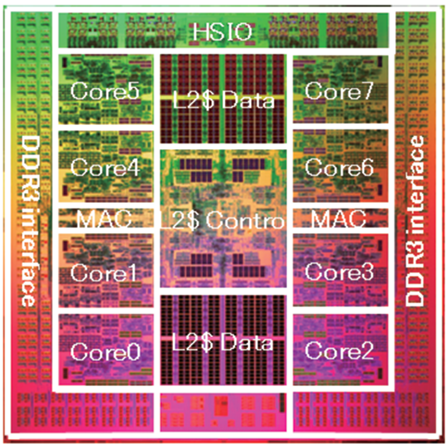


図3 SPARC64 VIIIfxのダイ写真

3. SPARC64 VIIIfx の特長 [3] [4]

このSPARC64 VIIIfxを開発中に常に念頭に置いていたのは、高性能、低消費電力、高信頼性、という三つのキーワードであった。これらの課題解決のためにとった各施策は絶妙なバランスの上で成立した。

3.1. 高性能

SPARC64 VIIIfxの開発においては、理論ピーク性能だけを追い求めた、単なるベンチマークマシンとせず、実際の研究で用いられるアプリケーションでの高い実効性能を実現する汎用スーパーコンピュータとすることを目指した。そのために、SPARC-V9アーキテクチャの拡張を行い、科学技術計算を効率良く実行可能とする命令セットHPC-ACE（High Performance Computing-Arithmetic Computational Extensions）を新たに開発した。HPC-ACEは、レジスタ数の拡張、SIMD演算、セクタキャッシュ機構、条件付き実行、三角関数の高速化、除算・平方根近似の機能を有しており、いずれの機能も動作周波数を上げることを要せずに性能向上を可能としている。これにより2GHz動作で理論ピーク性能128GFLOPSとなり、SPARC64 VIIIfxの電力あたり性能の向上に大きく寄与している。

またチップ上の8つのコアによる並列処理を高速化するために、全てのコアで2次キャッシュを共有し、さらにコア間の同期処理をハードウェアで行う機能も備えた。これに富士通の自動並列コンパイラを組み合わせることで、ユーザはプログラミングの際に複数コアであることを特に意識せずに、複数コ

アをあたかも高速なひとつのCPUとして扱うことが可能となる。富士通は、この技術方式をVISIMPACT（Virtual Single Processor by Integrated Multi-core Parallel Architecture）と呼んでおり、SPARC64 VIIから継承している。

この高い実効性能を目指した開発を行った結果、LINPACKベンチマークの記録だけでなく、より総合的な性能を評価するベンチマークであるHPCチャレンジにおいても、2011年には4部門すべてで1位を獲得し（図4）、更に、2012年にはTOP500では3位に後退したにも関わらず、4部門中3部門で1位を獲得した（図5）。また、性能ベンチマークでなく実際のアプリケーションでの性能や成果を評価するゴードン・ベル賞も二年連続で「京」を使用したグループが受賞しており、その汎用性と高い実効性能を証明した。

TOP500				
	システム名	設置機関	性能値(TFLOPS)	実行効率(%)
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**10510**	**93.17**
2	天河1A号	天津スパコンセンタ	2566	54.58
3	Jaguar	オークリッジ研	1759	75.46
Global HPL				
	システム名	設置機関	性能値(TFLOPS)	
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**2118**	
2	Cray XT5	オークリッジ研	1533	
3	Cray XT5	テネシー大学	736	
Global RandomAccess				
	システム名	設置機関	性能値(GUPS)	
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**121**	
2	IBM BG/P	ローレンスリバモア研	117	
3	IBM BG/P	アルゴンヌ研	103	
EP STREAM(Triad) Per system				
	システム名	設置機関	性能値(TB/s)	
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**812**	
2	Cray XT5	オークリッジ研	398	
3	IBM BG/P	ローレンスリバモア研	267	
Global FFT				
	システム名	設置機関	性能値(TFLOPS)	
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**34.7**	
2	NEC SX-9	海洋研究開発機構	11.9	
3	Cray XT5	オークリッジ研	10.7	

図4 TOP500とHPCチャレンジの上位3位一覧（2011年11月）

TOP500				
	システム名	設置機関	性能値(TFLOPS)	実行効率(%)
1	Titan	オークリッジ研	17590	64.88
2	Sequioia	ローレンス・リバモア研	16324.8	81.09
3	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**10510**	**93.17**
Global HPL				
	システム名	設置機関	性能値(TFLOPS)	
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**9796**	
2	Cray XT5	オークリッジ研	1534	
3	IBM Power775	IBM(社内設備)	1344	
Global RandomAccess				
	システム名	設置機関	性能値(GUPS)	
1	IBM Power775	IBM(社内設備)	2021	
2	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**472**	
3	IBM BG/P	ローレンスリバモア研	117	
EP STREAM(Triad) Per system				
	システム名	設置機関	性能値(TB/s)	
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**3857**	
2	IBM Power775	IBM(社内設備)	525	
3	Cray XT5	オークリッジ研	398	
Global FFT				
	システム名	設置機関	性能値(TFLOPS)	
1	**京**	**理研 計算科学研究機構**	**205.9**	
2	IBM Power775	IBM(社内設備)	132.7	
3	NEC SX-9	海洋研究開発機構	11.9	

図5 TOP500とHPCチャレンジの上位3位一覧（2012年11月）

3.2. 低消費電力

高性能と低消費電力の両立は非常に困難であったが、それぞれのバランスから動作周波数を2GHzと設定し、低リークのトランジスタの採用と、冷却方式に水冷を採用してジャンクション温度を通常の85℃から30℃まで低下させることで、リーク電力をチップ全体の電力の10%に抑えた。更に高周波動作する各ラッチへのクロック信号に対する徹底したクロックゲーティングや電力削減に効果的な回路構成・制御方式を採用し、不要回路の動作を可能な限り抑止するといった地道な省電力対策の積み重ねにより、動作時に消費するダイナミック電力も大幅に削減した。

その結果、理論ピーク性能128GFLOPSという高性能ながら、チップばらつきの平均で58Wという低消費電力を実現し、電力当たりの高い性能も達成した。

3.3. 高信頼性

システムとしての稼働率を高めるためには､8万個以上搭載されているCPUの信頼性を高めることは、最も重要な事項となるが、SPARC64 VIIIfxには、ミッションクリティカルな社会基盤システムで使用

されるビジネスサーバに搭載するCPUの開発で培った高信頼性技術をそのまま継承している。つまり、CPU内の大部分の回路にエラー検出機能を備えており、エラー検出時にはエラーが発生した命令をハードウェアが自動的に再実行する命令リトライ機構が働き、また、プロセッサ内で使用しているRAMや固定小数点、浮動小数点レジスタの1ビットエラー検出時にはハードウェアが自動訂正処理を行っている。これにより宇宙線の衝突などで信号が一時的に変化する間欠エラーが発生しても、システムを停止させずに運用することが可能となっている。更に、これらハードウェアによる自律的な故障回復機能でエラーを修復できない場合であっても、故障箇所を正確に特定し縮退させることにより継続運用を可能としている。また、低消費電力のために採用した水冷方式によりジャンクション温度が30℃にまで下がったことは、故障率低減に大きな効果があった。

これら高信頼性機能の効果は数値化しにくいが、その実力はLINPACKベンチマークの29時間無停止走行が証明している。

4. おわりに

これまで述べたように、SPARC64 VIIIfxの開発は非常にチャレンジングな目標を実現するために数々の困難な課題を克服していく必要があったが、それを乗り越えたときの喜びを原動力に開発を進めていったように思う。

今回取り上げたSPARC64 VIIIfxを搭載しているスーパーコンピュータ「京」の上で行われるシミュレーションや解析により、今後様々な謎や課題が解決されていくことを期待しつつ、我々は次期プロセッサにむけた各要素技術の高性能・低消費電力化を更に進めていきたい。

参考文献

[1] T. Maruyama et al, "SPARC64 VIIIfx : A New-Generation Octocore Processor For PETASCALE Computing", IEEE Micro, vol.30 Issue2, p.30-40, 2010.

[2] Y. Ajima, S. Sumimoto, T. Shimizu, “Tofu: a 6D mesh/torus interconnect for exascale computers,” Computer, vol.42, no.11, pp.36-40, Nov. 2009.

[3] "スーパーコンピュータ「京」", 情報処理, Vol.53, No.8, 2012.

[4] "スーパーコンピュータ「京」", 雑誌FUJITSU, Vol.63, No.3, 2012.

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は、下記のうち太字の研究室が、それぞれ１つのテーマを選んで、その概要を語ります。
（☆は「大学の研究・動向」、＃は「高校生のページ」に掲載）

電気関係研究室一覧

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

電子工学専攻
集積機能工学講座
電子物理工学講座極微真空電子工学分野
電子物理工学講座プラズマ物性工学分野
電子物性工学講座半導体物性工学分野（木本研）
電子物性工学講座電子材料物性工学分野
量子機能工学講座光材料物性工学分野（川上研）
量子機能工学講座光量子電子工学分野（野田研）
量子機能工学講座量子電磁工学分野（北野研）

光・電子理工学教育研究センター
ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野（高岡研）☆
デバイス創生部門先進電子材料分野（藤田研）

情報学研究科（大学院）
知能情報学専攻
知能メディア講座言語メディア分野（黒橋研）
知能メディア講座画像メディア分野（松山研）

通信情報システム専攻
通信システム工学講座ディジタル通信分野
通信システム工学講座伝送メディア分野（守倉研）＃
通信システム工学講座知的通信網分野（高橋研）
集積システム工学講座情報回路方式分野（佐藤高研）
集積システム工学講座大規模集積回路分野（小野寺研）
集積システム工学講座超高速信号処理分野（佐藤亨研）

システム科学専攻
システム情報論講座論理生命学分野（石井研）
システム情報論講座医用工学分野（松田研）

エネルギー科学研究科（大学院）
エネルギー社会・環境科学専攻
エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野（下田研）

エネルギー基礎科学専攻
エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野（中村祐研）

エネルギー応用科学専攻
エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野（土井研）
エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野（白井研）

エネルギー理工学研究所
エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野（長崎研）
エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野（水内研）
エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野（佐野研）

生存圏研究所
中核研究部
生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野（山本研）
生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野（津田研）
生存圏開発創成研究系宇宙圏航空システム工学分野（山川研）
生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野（大村研）
生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野（篠原研）

国際高等教育院
教養教育部（小山田研）

学術情報メディアセンター
教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野（中村裕研）

先端電気システム論講座　（引原研究室）
http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「非線形 MEMS 共振器を用いたメモリー及び演算素子の開発」

近年、非線形 MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）共振器を用いたメモリー及び演算素子に高い注目が集まっている。MEMS とは、半導体微細加工技術により可動機械要素と電気要素を一体化した微小デバイスである。本研究室では MEMS の中でも、共振器に着目している。外部から強制的に励振された MEMS 共振器は、機械的な共振特性を利用し、センサやフィルタなどに応用されている。この MEMS 共振器においては、デバイスの材質による異方性などにより、外部励振力と振動の変位間の比例関係が保たれない場合が存在する。すなわち、MEMS 共振器は非線形特性をもつ [1]。本解説では、本研究室で実施している非線形 MEMS 共振器を用いた、新しい機能を有する先端的なデバイスの開発に関する研究の一端を紹介する。

上述の様に非線形 MEMS 共振器の応用の一つとして、本研究室では、メモリー及び演算素子（以後、MEMS メモリー及び MEMS 演算素子）の原理検証を進めている。MEMS メモリー及び MEMS 演算素子は、従来の半導体が使用できない高温環境や宇宙空間などにおいて使用可能、すなわち過酷環境に適している。また、ナノレベルの構造においては、既存の半導体メモリーや演算素子より消費電力が低くなると期待されている。さらに、複合論理回路と同等の演算を単一の MEMS 演算素子で行うことができるなど、次世代のキーデバイスとなる可能性がある。

図 1 に作製した MEMS 共振器の一例を示す [2]。中央にマス部を、そのマス部の左右に櫛歯状の電極を配している。この電極に電圧を印加することにより、櫛歯電極間に駆動力が発生し、中央のマス部が振動する。ここで、非線形特性により MEMS 共振器は、大振幅振動と小振幅振動の共存状態を持つ。この 2 種類の振動を “1” と “0” に定め [3]、MEMS メモリー及び MEMS 演算素子として使用する。なお、櫛歯電極は、駆動及び計測に使用し、外部の計測系は一切用いない [3]。

図 2 に、前述の非線形 MEMS 共振器を 2 つ使用し、結合することにより 2 ビットバイナリカウンタを実現した結果を示す。同図に示すように、共存する大振幅振動及び小振幅振動の切り替え制御により、カウンタ操作を実現した。すなわち、クロック毎に、2 つの非線形 MEMS 共振器の振動状態が 00、01、10、11 の順に切り替わっている [4]。この結果は、非線形 MEMS 共振器を用いた順序回路（演算素子）の基礎原理となることに加え、結合振動子系が制御できることを示した。従来忌避されて来た MEMS 共振器における非線形特性の応用の大きな一歩を提案することになった。

最後に、本関連研究は、京都大学グローバル COE プログラム、文部科学省地域イノベーションクラスター事業及び JSPS 科研費＃ 21656074 の研究助成を受けたものであることを記す。

参考文献
[1] V. Kaajakari, Practical MEMS, Small Gear Publishing, Las Vegas (2009).
[2] S. Naik and T. Hikihara, Characterization of a MEMS resonator with extended hysteresis, ELEX, 8 (5), 291–298 (2011).
[3] A. Yao and T. Hikihara, Reading and writing operations of memory device in micro-electromechanical resonator, ELEX, 9 (14), 1230-1236 (2012).
[4] A. Yao and T. Hikihara (submitted).

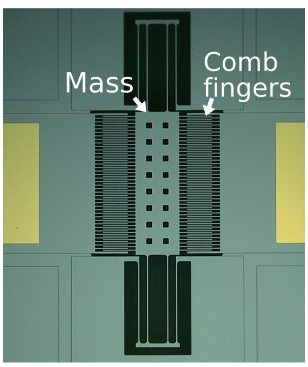


図 1 MEMS 共振器の概略

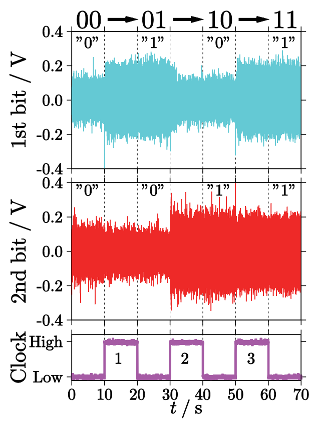


図 2 カウンタ操作

電磁工学講座　超伝導工学分野　（雨宮研究室）
http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html
「薄膜超伝導線の電磁界解析」

イットリウムなどの希土類元素の銅酸化物の薄膜を金属テープの上に製膜した薄膜超伝導線（図 1）の開発が世界中で進められ、それを応用した電磁石や電気機器の開発が活発化してきています。例えば、液体窒素中で 300 A 近い電流を流すことができる幅 5 ミリ、厚さ 0.2 ミリの薄膜超伝導線も市販されています。線全体の厚さは 0.2 ミリですが、実際に電流が流れている超伝導層の厚さは 2 ミクロン程度であり、100 分の 1 平方ミリメートルの断面積に 300 A 近い電流が流れることになります。このような高密度で、さらには無損失で電流を流すことは銅線では考えられず、これをうまく使いこなすことができれば電気工学の分野で様々なイノベーションを起こすことが期待されます。

さて、様々な電気機器の開発において電磁界解析は今や必須の技術になっています。薄膜超伝導線を使った電気機器の研究開発においても電磁界解析の利用が期待されますが、話は簡単ではありません。例えば、銅線においては電流と電圧の間に比例関係が成立しますが（オームの法則）、超伝導線の電流と電圧の関係は極めて非線形です。つまり、電流が小さいときは電圧はほとんど零で、臨界電流という、いわば「電流の天井」付近で急激に大きな電圧が発生します。強い非線形性は計算の収束性を悪くします。また、幅 5 mm、厚さ 2 ミクロンといった非常に大きな断面アスペクト比も数値解析を行う上で障害となります。

われわれの研究室では、薄膜超伝導線の非線形な電流と電圧の関係や、電気機器の中における薄膜超伝導線の 3 次元的な形状を取り込みつつ、計算負荷をなるべく小さくするような解析手法について研究し、超伝導送電ケーブル、核融合装置や加速器に用いられる大型高磁界電磁石を構成するための大電流導体、さらにはそれらの電磁石そのものの電磁界解析を進めています。図 2 は薄膜形状、3 次元形状を考慮しつつ解析を行うためのモデルの例です。大ざっぱに言えば、超伝導薄膜に沿った 3 次元曲面上に格子を作り、その格子の上でファラデーの法則やビオサバールの法則に従って電磁界を計算します。図 3 は超伝導送電ケーブルの形状モデルの例、図 4 は大電流超伝導導体の立体形状の例です。

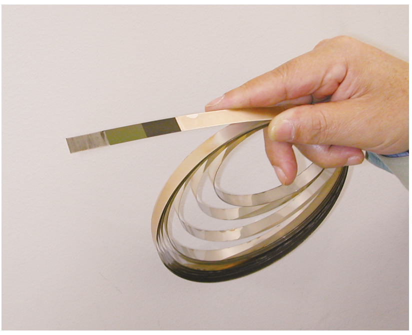


図 1　薄膜超電導線

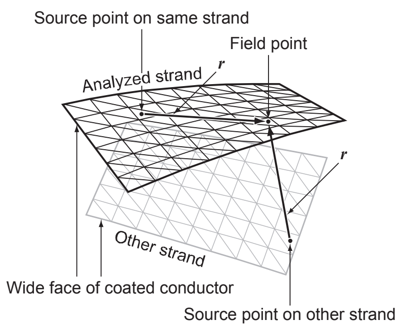


図 2　解析モデルの概念図

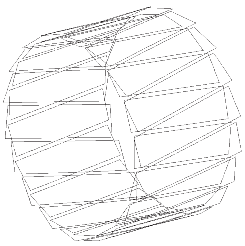


図 3　超伝導送電ケーブルの
形状モデル

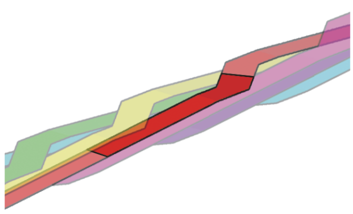


図 4　大電流超伝導導体の
立体形状

電磁工学講座　電磁エネルギー工学分野　（松尾研究室）
http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/
「有限要素解析に基づく電磁力計算」

計算機による有限要素電磁界解析は、現在では、様々な学術研究に広く利用されるとともに、電気電子機器の設計・開発におけるコスト削減・開発サイクルの短縮への貢献など、産業界において大きな役割を果たしています。本研究室では、主な研究テーマの一つとして、有限要素電磁界解析技術の理論・応用に関する研究に取り組んでいます。ここでは、有限要素解析に基づく電磁力計算に関する最近の研究例を紹介します。

有限要素解析に基づいて誘電体・磁性体に作用する電磁力を計算する手法として、これまで様々な方法が提案・開発されてきました[1]-[3]。その中でも、誘電体あるいは磁性体全体に働く合力だけでなく、力の局所的な分布を求める有力な方法として、マクスウェルの応力テンソルに基づく節点力法[2]があります。

ここで節点力法を使用した際の問題点を説明するため、図 1 に示す簡単な 2 次元テストモデルを考えます。このテストモデルについて節点力法を用いて電磁力を求めた結果が、図 2（磁性体の角部を拡大）です。マクスウェルの応力テンソルから求められる電磁力は、理論的には真空部分には現れないはずですが、図 2 では、有限要素解に含まれる誤差が原因となって、磁性体角部周辺の真空部分に力が現れています。本研究では、上述の問題を解消するための新しい電磁力計算法を提案しています。図 3 に示されるように、提案手法によって求めた電磁力分布からは、図 2 にみられるような不自然な振る舞いが取り除かれています。図 4 では、有限要素解析の格子の細密さを変化させながら、提案手法および節点力法を用いて磁性体全体に働く力を求めた結果を比較しています。提案手法では、比較的粗い格子を用いたときにも、細密な格子のときに近い結果が得られていることが分かります。

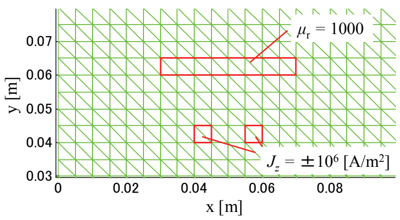


図 1: テストモデル

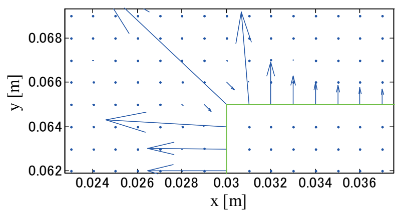


図 2: 角部周辺の分布力（従来手法）

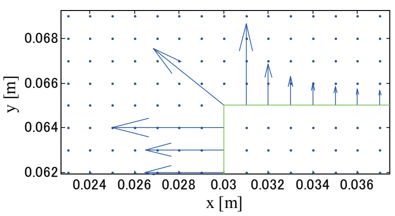


図 3: 角部周辺の分布力（提案手法）

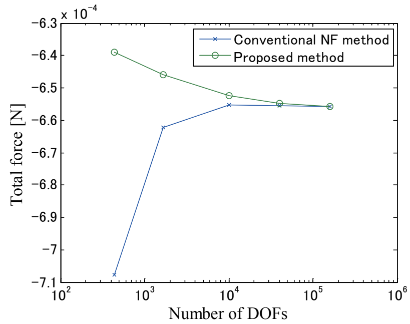


図 4: 磁性体全体に作用する力

[1] Z. Ren, "Comparison of different force calculation methods in 3D finite element modeling," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 30, no. 5, pp. 3471-3474, 1994.

[2] A. Kameari, "Local force calculation in 3D FEM with edge elements," *Int. J. Appl. Electr. Mater.*, vol. 3, pp. 231-240, 1993.

[3] A. Demenko, W. Lyskawinski, and R.M. Wojciechowski, "Equivalent formulas for global magnetic force calculation from finite element solution," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 195-198, 2012.

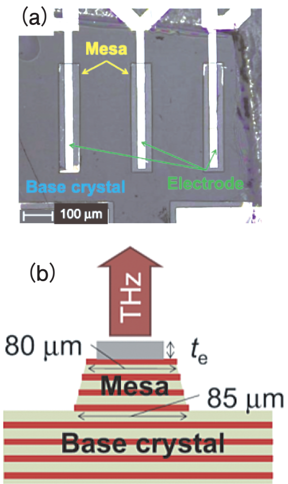
集積機能工学講座

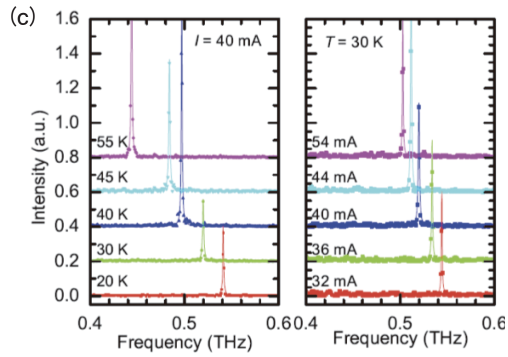
http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp

「高温超伝導体固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ発振」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ（THz）領域はこれまでにコヒーレントな光源が得られていませんでした。電子の振動を利用するにも半導体の易動度の上限から周波数が制約され、量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは 10 ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要であるからと考えられてきました。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態（プラズマモード）が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。特に、高温超伝導体の典型物質の一つである Bi2212 では、結晶構造に由来するジョセフソン接合（固有ジョセフソン接合）により 100 GHz のプラズマ周波数と高い超伝導転移温度に由来する 50 meV に及ぶ超伝導ギャップのために、プラズマモードは安定に存在し、テラヘルツ領域に達する強力な電磁波が得られることが予言されてきました。様々な試みがなされた結果、2007 年に高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+d}$（Bi2212）からの結晶外への THz 波が初めて観測されました。THz 発振のメカニズムは、交流ジョセフソン効果により励起された電磁波が Bi2212 単結晶からなる空洞共振器の共振条件に一致した時、積層するジョセフソン接合で同期した振動が起こり、0.3-1 THz の単色・コヒーレントな電磁波が発振されると解釈されています。

これまでの研究で、発振には積層するジョセフソン接合の位相が同期して振動することが必要であると指摘されていますが、交流ジョセフソン効果と空洞共振条件が満たされたときに常に発振するわけではなく、接合間の同期をもたらす条件は明らかになっていませんでした。そこで我々は、Bi2212THz 素子にバイアス電流を加える電極が素子内部で発生するジュール熱の逃げ道にもなっていることに注目し、電極の厚さを 30 – 400 nm の範囲で変えた素子を作成し、THz 発振の有無と発振条件を比較しました。図は電極厚さが 70 nm の素子から発振された電磁波の FT-IR 分光スペクトルです。50K において、400 GHz の中心周波数で装置の分解能以下の線幅を持つ単一のスペクトルが得られました。また、電極の厚さを厚くしていくと、発振が検出される温度範囲は狭くなり、400nm の厚さの電極を持つ素子では発振を検出することができませんでした。このことは、発振をもたらす同期現象にとって、薄い電極を持つ素子で実現されている温度の不均一な状態が必要であることを示しています。このように、超伝導体において温度の不均一性を積極的に活用するデバイスはこれまでになく、非常に興味深い研究対象であるといえます。





図：(a) 高温超伝導 THz 素子の写真。3 つ見える個々のメサに電圧を加えて発振させる。(b) 素子の断面概念図。(c) 発振スペクトルの温度依存性およびバイアス電流依存性。

電子物理工学講座　極微真空電子工学分野
http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab16/index_j.html
「静電拡大投影法による軽元素含有材料の原子尺度構造解析の試み」

近年、分析の分野では、ナノ領域における元素分析と構造解析が同時に行うことのできる手法が望まれている。例えば、現代の大規模集積回路におけるトランジスタの大きさは数十ナノメートル程度になっており、MOS-FET の酸化膜厚は数原子層といった薄さまで来ている。このようなデバイスにおける故障解析においては、酸化膜中のどの位置にどの元素があるかを、原子一つ一つを手に取って調べるような分析が求められている。一方で、医学・薬学の世界でも、アミノ酸やタンパク質分子の構造を調べることが必要となっている。このためには、やはり原子ないしは最小の基単位の位置を同定する必要がある。金属材料に関しては、このような課題を克服する方法として、三次元アトムプローブと呼ばれる手法があり、現在では市販の装置も販売されている。三次元アトムプローブとは、針状の試料と対向電極を同心球構造とみなせるように配置し、表面の原子をイオンの形で脱離させたときにイオンの取る軌道が放射状となり、結果的に針上に近接して存在する原子が対向電極付近に飛来したときにその位置が大きく異なることを利用する。これを当研究室では静電拡大投影法と呼んでいる。金属の場合、針の表面に数十 V nm^{-1} 程度の強電界を印加すると、電界蒸発機構により金属表面の原子をイオン化することができることが知られている。この電界蒸発機構は金属に対してはある程度の理解が得られているが、軽元素に対してはほとんど理解が得られていない。この軽元素のイオン化をいかに行うかが重要なポイントとなる。

有機分子の三次元アトムプローブ分析を実現するためには、上記の静電拡大投を用いて有機分子の拡大像を得ることが当面の課題となる。金属の場合、電界イオン顕微鏡と呼ばれる手法で、針上の原子配置をスクリーンに映し出すことができる。この手法は、真空装置内に設置した針を液体窒素等で冷却したうえで、ヘリウムガスを流し、針に高電圧を印加することで導入したヘリウムをイオン化するものである。このとき、ヘリウムがイオン化する場所はタングステン表面にある原子位置となるため、ヘリウムによってタングステンの原子位置がスクリーンに拡大投影されることになる。図1はこのような手法で観察したタングステン表面の原子像である。個々の明るい輝点が原子一つに対応している。この手法により、現在、エタノールなどの有機分子をタングステン針上に塗布して観測するべく検討を重ねている。現時点でエタノールに由来すると考えられる輝点を観測しており、この輝点の詳しい分析を進めているところである。

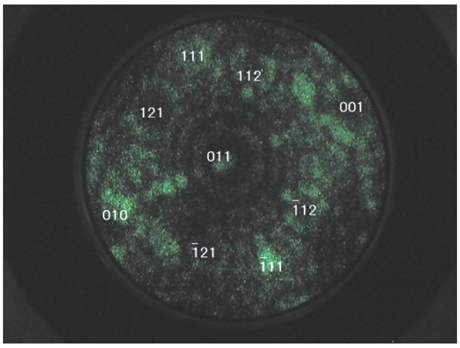


図 1. タングステン針の電界イオン顕微鏡像。数字はタングステン表面にみられる面方位のミラー指数。

電子物性工学講座　半導体物性工学分野　（木本研究室）
http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「超高耐圧 SiC ダイオードの設計と作製」

変電所等の電力インフラ用変換器には、超高耐圧のパワーデバイスが要求されます。例えば、国内における配電系統の電圧は 6.6kV で、高圧直流送電では 150 ～ 250kV という超高電圧の電力が扱われます。このような電力を変換（交流→直流、直流→交流など）する際、現在は、耐圧 6kV 級の Si サイリスタが用いられていますが、変換時の電力損失が大きく、発熱に弱いという問題を抱えています。このような超高耐圧応用では、少数キャリアの注入を活用する SiC（炭化珪素）バイポーラデバイス（PiN ダイオード、サイリスタ、IGBT 等）が有望です。

しかしながら、高電圧応用に有利な SiC と言えども、実用化の目処が立っているのは約 1kV 級のデバイスであり、10kV 超級のデバイスを実現するためには、結晶およびデバイス作製の両面において、様々な課題が屹立しています。例えば、厚さ 100 μm 以上、残留不純物密度 10^{14}cm^{-3} 以下、キャリア寿命 10 μs 以上の高品質結晶を作製する必要があります。また、デバイス作製においても、10kV 超級は未踏領域であり、その高電界による異常放電や端部での破壊の抑制が大きな研究課題です。そのような超高電圧でデバイス特性を精密に計測する技術も確立しなければなりませんし、SiC の特徴である高温動作も実証する必要があります。本研究室では、近年、高純度 SiC の結晶成長に成功し、点欠陥低減によるキャリア寿命の大幅な増大を達成しました。今回は、SiC 超高耐圧ダイオードの原理実証を行った結果について紹介いたします。

まず、PiN ダイオードを取り上げて、接合端部における電界集中を緩和する構造の研究を行いました。SiC では表面制御技術が未成熟であるために、高密度の表面電荷が存在しますが、このような状況でも、簡易な作製プロセスで安定して高い耐圧を達成できる構造を考案しました。数種の有望な構造について二次元数値計算を用いて設計し、最適な接合終端構造を実デバイスに適用しました。また、高耐圧を得るために、ドナー密度 2 × 10^{14}cm^{-3}、厚さ 140 ～ 180 μm の高純度 SiC 結晶を準備し、エピタキシャル成長により pn 接合を形成しました。ドライエッチングによる改良ベベル構造、イオン注入を用いた上述の接合終端構造の形成を経た後、電極形成、表面保護膜を形成してダイオードを完成させました。

図 1 に作製した 12kV 級 SiC PiN ダイオードの逆方向特性を示します [1]。漏れ電流は pA ～ nA レベルと小さく、直流測定にも関わらず、絶縁破壊を起こしても素子の物理的破壊に至らない堅牢さを実証することができました。図 2 に 180 μm の SiC 厚膜結晶を用いて作製したダイオードの電流—電圧特性を示します [2]。このダイオードで得られた 21.7kV の耐圧は、いかなる固体素子の中で最も高い耐圧です。このような超高耐圧素子にも関わらず、高い順方向電流が得られており、SiC デバイスが超高耐圧応用で有望であることを示す結果となっています。

[1] H. Niwa et al., IEEE Trans. Electron Devices **59**, 2748（2012）.
[2] H. Niwa et al., Appl. Phys. Express **5**, 064001（2012）.

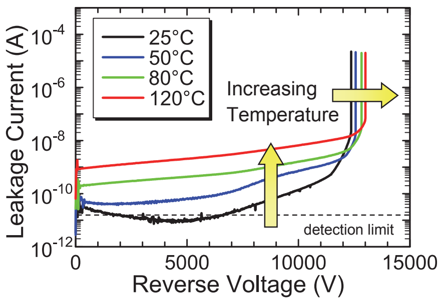


図 1 12kV 級 SiC PiN ダイオードの逆方向特性

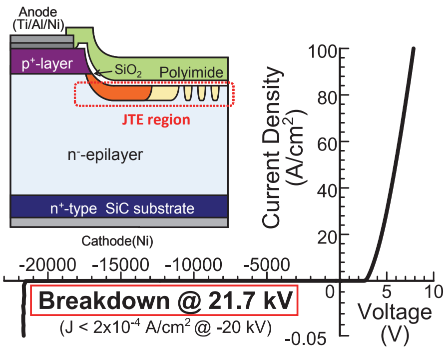


図 2 SiC 厚膜結晶を用いて作製した
PiN ダイオードの特性

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
「二探針近接場光学顕微鏡によるプラズモン導波の観測」

金属中に存在する自由電子の集団的な振動をプラズモンという。この振動は、電子の疎密波なので、プラズモンの伝搬方向と電場の方向が平行な縦波である。そのため、光などの伝搬方向と電場が直交する電磁波とは相互作用しない。一方、金属表面や金属と誘電体の界面では、プラズモンの伝搬方向と空気中、あるいは誘電体中に染み出した電場の方向が直交するため、光との相互作用が可能となる。このようなプラズモンは物質表面に局在しているため表面プラズモンと呼ばれ、また、光と結合した状態は表面プラズモンポラリトンと呼ばれる。表面プラズモンの最大の特徴は、波数が常に自由空間中の光のそれよりも大きく、さらに、速度が常に光よりも遅いことである。近年、この特徴を利用し、ナノ光回路、高感度ナノ分光、高効率光デバイス、ナノ加工、バイオセンサー（DNA・タンパク質・ウイルス・抗体などの検出）など、表面プラズモンが幅広い分野へ展開されつつある。また、このようなプラズモンと光の相互作用を利用した科学技術は、プラズモニクスと呼ばれ、新しい光科学技術分野として注目されている。

上述の様に、表面プラズモンは、伝搬光よりも波数が大きいため、金属に伝搬光を直接照射しても相互作用は起こらない。そのため、表面プラズモンポラリトンを形成するためには、エバネッセント波や近接場光を介する必要があり、通常、全反射減衰（ATR）法、グレーティング結合法、ナイフエッジ法、近接場光学顕微鏡（SNOM）が用いられる。これまでのナノ光導波路における表面プラズモンの伝搬特性の観測には、(1) ATR 法により光照射し SNOM により観測する方法や (2) SNOM により光照射し、導波路端からの散乱光を観測する方法が用いられてきた。しかし、(1) の方法では、数十から数百平方マイクロメートル以上の領域に光が照射されるが、表面プラズモンをナノ光導波路に利用するためには、ナノメートル領域で表面プラズモンを励起する必要があるので適さない。また、(2) の方法では、ナノ光導波路を伝搬した後の情報しか観測できず、途中の光導波路上の表面プラズモンの伝搬特性が分からないため、不都合である。そこで、我々は、開口型の近接場プローブを二本備えた SNOM（本研究室にて開発）を用いて、局所的に表面プラズモンを励起し、伝搬する表面プラズモンを局所的に検出することで、表面プラズモンの伝搬特性の詳細な評価を試みた。

表面プラズモンの伝搬を二探針 SNOM によって観測した結果の一例を図 1（a）と（b）に示す。図 1（c）と（d）は、表面プラズモンの伝搬を有限差分時間領域（FDTD）法によって計算した結果である。また、図 1（a）と（c）は 200×200 μm^2 の銀平板構造、（b）と（d）は幅 3.4 μm、長さ 30 μm の銀細線構造の結果であり、図中の丸は光励起した点を示している。銀平板構造と銀細線構造の表面プラズモンの伝搬の観測結果を比較すると、銀平板構造では表面プラズモンが励起点からほぼ同心円状に広がって伝搬していた。それに対し、銀細線構造では、表面プラズモンの伝搬に干渉縞が形成されていた。さらに、銀細線構造では、銀平板構造に比べ、プラズモンの伝搬距離が長くなっていることが分かった。これは、細線の両端で表面プラズモンが反射し、元の表面プラズモンの波と干渉したためである。これらの結果は、計算結果と良く一致しており、表面プラズモンの伝搬の実測に成功したと言える。

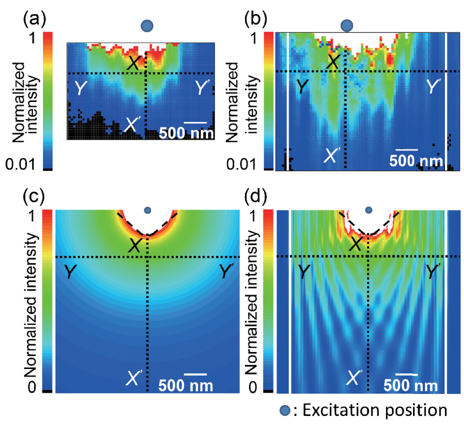


図 1（a）銀平板構造と（b）銀細線構造の表面プラズモンの伝搬を観測した結果。（c）銀平板構造と（d）銀細線構造で表面プラズモンの伝搬を FDTD 法により計算した結果。

参考文献
[1] R. Fujimoto, A. Kaneta, K. Okamoto, M. Funato, and Y. Kawakami, *Appl. Surf. Sci.* **258**, 7372（2012）.
[2] A. Kaneta, R. Fujimoto, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato, and Y. Kawakami, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 083709（2012）.

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門　先進電子材料分野　（藤田研究室）
http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html
「第 4 のパワーデバイス材料を目指して：酸化ガリウム半導体の研究」

電気の利用における省エネルギーを達成することはわれわれ研究者・技術者の使命であり、電力変換・電力制御や高周波増幅に用いられる高耐圧・パワーデバイスの開発・進化には大きな期待が寄せられている。いまこの分野をリードしている半導体材料は SiC で、SiC を用いたパワーデバイスが地下鉄車両やエアコンに搭載され、省エネルギーを実現[1,2]したとともに、その安全性の実証につながっている。また、耐圧 21.7kV ときわめて大きい pin ダイオードも報告されている[3]。もう一つ実用化されている半導体材料が GaN である。GaN は基板の問題で SiC のように大電流を流すようなデバイスには不向きであるが、高周波増幅や低電流の電力制御を担うパワーモジュールに用いられている[2,4]。一方、耐圧やオン抵抗について極限性能を目指す観点でダイヤモンドを用いたデバイスの研究開発が行われている[5]。

新しい半導体デバイスの進展は、新しい半導体材料の開発に負うところが大きい。その観点でわれわれはパワーデバイスのための第 4 の半導体材料として、酸化ガリウム（Ga_2O_3）に注目した研究を進めている。表 1 に各種半導体材料の基本特性を示す。Ga_2O_3 は SiC や GaN に比べてバンドギャップが大きいことから絶縁破壊電界が高くなる。また Ga_2O_3 の大きな特徴として、サファイア基板の育成に用いられるのと同様の溶融法により基板が作製できるという点が挙げられる。半導体デバイスにおいて基板＝基盤であり、薄膜の結晶成長とデバイス作製が先行して基板の開発が後発となった感のある SiC や GaN と違い、Ga_2O_3 には基板の開発が先行したという特徴がある。この点に注目し、われわれは、（株）タムラ製作所、（株）光波、情報通信研究機構、東京工業大学との共同研究体制により、2011-2013 年度にわたり NEDO からの助成を受け、Ga_2O_3 を用いたパワーデバイスの可能性を明らかにするフェーズで研究を行っている。これは世界的に例がない日本発の特徴ある研究で、基盤技術が着実に蓄積されつつある[6, 7]。日本の独自技術として世界をリードし、従来研究されている材料に何かを加える貢献をなしたいと願っているとことである。

1) 三菱電機（株）: プレスリリース 2011 年 2 月 16 日、2012 年 9 月 27 日 .
2) 高須秀視 : 応用物理 **82**, 227（2013）.
3) H. Niwa, J. Suda, and T. Kimoto: Appl. Phys. Express **5**（2012）064001.
4) （株）安川電機 : プレスリリース　2012 年 10 月 31 日 .
5) 鹿田真一 : 応用物理 **82**, 299（2013）.
6) M. Higashiwaki *et al.*: Appl. Phys. Lett. **100**, 013504（2012）; K. Sasaki *et al.*: Appl. Phys. Express **5**, 035502（2012）.
7) K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito, and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys. .51, 020201（2012）.

図 1　各種半導体材料の基本特性

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond	ß-Ga_2O_3
バンドギャップ (eV)	1.1	1.4	3.3	3.4	5.5	4.8-4.9
電子移動度 (cm^2/Vs)	1,400	8,000	1,000	1,200	2,200	300（推定）
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	0.4	2.5	3.3	10	8（推定）
比誘電率	11.8	12.9	9.7	9.0	5.5	10

知能情報メディア講座　言語メディア分野　（黒橋研究室）
http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/
「自動獲得した大規模言語知識に基づく情報検索基盤」

Web 上には膨大な量の情報が存在しており、私達は、調べものや意思決定のために検索エンジンを日常的に使っています。しかし、言語のもつ多様性、曖昧性のために、既存の検索エンジンには大きな問題があります。たとえば「スマートフォンの電池切れを防ぐ方法」を調べるために、検索エンジンに「スマートフォン 電池切れ 防ぐ」というクエリを入力することを考えます。検索エンジンは、これらのキーワードが含まれるページのリストを返します。ここにおいて、たとえば「スマホのバッテリーを長持ちさせるには…」という文を含むページは、「スマートフォン」「電池切れ」「防ぐ」というキーワードがひとつも含まれていないために検索結果に現れないという検索漏れの問題があります。また、「スマートフォンの電池寿命の劣化を防ぐ方法」に関するページがこれらのキーワードを含んでいるために検索結果に現れてしまうという検索誤りの問題があります。

本研究室では、これらの問題を解決するために、大規模言語知識の自動獲得と、獲得した言語知識に基づく情報検索基盤の研究開発を進めています。ここにおける言語知識とは、人がもっているような常識的な知識で、ひとつには次のような**同義語・句**の知識です。

- スマートフォン ＝ スマホ
- バッテリー ＝ 電池
- 電池切れを 防ぐ ＝ 電池を 長持ちさせる

もう一つの言語知識として、次のような**格フレーム**とよばれる知識を学習しています。格フレームとは、「誰がいつどこで何をどうした」を表す**述語項構造**を集約したものです。

- {機能 , 方法 , …} が {低下 , 切れ , …} を 防ぐ
- {途中 , タイミング , …} で {電池 , バッテリー , …} が 切れる

このような格フレームに基づき、上記の例文から「方法が スマートフォンの電池切れを 防ぐ」「スマートフォンの電池が 切れる」のような述語項構造を認識することができるようになります。これらの言語知識は、Web から収集した 100 億文規模の超大規模なテキストデータから、数千 CPU のスーパーコンピューターを利用して獲得しています。これによって、幅広い言語現象をカバーする知識となります。

我々は、さらに、これらの言語知識および述語項構造に基づく情報検索基盤 TSUBAKI を開発しています。TSUBAKI は、クエリとして自然文を入力することによって、キーワードに基づく既存の検索エンジンよりも正確な検索結果を返すことができることが特徴です。TSUBAKI の利用例として、本学の講義のスライドや映像を公開している京都大学オープンコースウェア（京大 OCW; http://ocw.kyoto-u.ac.jp/）の検索エンジンとして使われています（図 1）。

TSUBAKI は、単体の検索エンジンとしてのみならず、さまざまな Web サービスの中に組み込むことも可能です。たとえば、独立行政法人情報通信研究機構の情報分析システム WISDOM（http://wisdom-nict.jp/）の検索エンジンとして使われています。WISDOM は、「風力発電」や「クローン技術」のような賛否両論がある問題に対して、情報の発信者、多数・少数意見、肯定・否定意見などさまざまな角度から俯瞰的に調べることができるシステムです。

探すということは人間にとって本質的な知的行為です。また近年、スマートフォンを中心に音声インターフェースが急速に普及しつつあり、自然文で検索する機会が増えています。本研究室では、今後も、より正確かつ柔軟な情報検索基盤の研究開発に取り組んでいく予定です。

図 1 京大 OCW における TSUBAKI による検索例

通信システム工学講座　ディジタル通信分野
http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/
「グループモビリティを活用した Massive MIMO の研究」

携帯端末（3G HSDPA 系、LTE）や無線 LAN（IEEE 802.11n、802.11ac）では、周波数利用効率を向上する MIMO 多重伝送が実用化されています。ある瞬間に同じ周波数を利用するのは 1 つのユーザ端末のみであるためシングルユーザ MIMO と呼ばれており、LTE、802.11n に共通して 20MHz 帯域幅あたり 1 ストリーム（同じ周波数の情報 1 系統）最大 75Mbps の伝送が可能となっています。LTE では 2 ストリーム（同じ周波数で情報を 2 系統）伝送が、802.11n では 3 ストリーム伝送までが一般に普及しつつあります。

MIMO 多重伝送に利用できるストリーム数は伝搬環境に依存しており、多くのストリームを効率よく利用するためには伝搬路の多様性が必要です。実際、無線 LAN 802.11n の例でも、2 ストリームまではおおむね利用可能ですが、3 ストリームが可能な機器を用いてもストリーム数増加による伝送速度改善効果は強く環境に依存することが体験できます。同時に効率よく利用できるストリーム数を拡大し周波数利用効率を向上させるには、受信アンテナ数を増加させることやアンテナ間相関低減を狙ってアンテナを空間的に離して配置することが効果的です。しかし、これらでは物理的なサイズが増大してしまうため、携帯端末等では現実的ではありません。

このため、基地局から多ストリームを送信しつつ、少ないアンテナ数の携帯端末を複数同時に収容するマルチユーザ MIMO が盛んに研究されています。マルチユーザ MIMO では携帯端末側での信号分離を補助するために基地局側においてプリコーディングが行われます。このプリコーディングは伝搬路状況に合わせて行う必要があるため伝搬路の変化に弱く、携帯端末の移動速度が大きく制限されてしまう課題があります。

移動による伝搬路変化がユーザ間干渉を引き起こしますが、十分な受信アンテナ数（受信信号数）が利用できれば無線信号処理によりこの干渉を効果的にキャンセルできます。ユーザが密集している電車・バス内では対地速度は速いもののユーザ間の相対位置関係に大きな変化はなく、携帯端末間には安定した通信が期待できます。このことを利用して、各ユーザの携帯端末間に近距離の安定した協力関係を築き、グループとして利用することによって同一移動体内に超多素子の仮想アレイアンテナを構成すれば飛躍的に伝送特性が向上する可能性があります。近年の携帯端末は複数の無線インタフェースを備えることが多く、これらを活用して携帯端末間の協力関係を築くこともできるでしょう。本研究では、グループモビリティを活用したマルチユーザ MIMO 実現への基礎実験として、既に開発済みの 4×6 マルチユーザ MIMO 伝送実験装置を活用し、実際に屋外伝送実験を行いその改善効果を実証することに取り組みます。

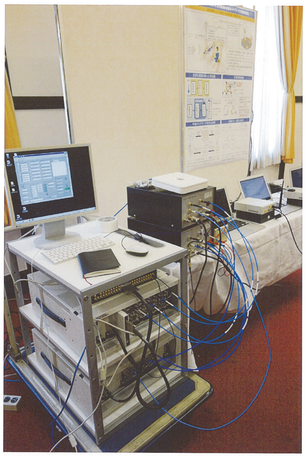


図 1 実験装置

図 2 概念図

集積システム工学講座　大規模集積回路分野　（小野寺研究室）

http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「ランダム・テレグラフ・ノイズが集積回路の遅延に及ぼす影響の評価」

高度情報化社会を支える基幹デバイスである集積回路は、多大な研究開発努力により微細化、大規模化、高機能化が図られてきました。しかし、デバイスの寸法がナノスケールとなり、微細化に伴う各種の物理限界が顕在化しています。ゲート絶縁膜は物理限界近くまで薄膜化され、動作に伴う特性や信頼性の劣化が深刻になっています。当研究室では、原子レベルの揺らぎが存在しても安定に動作しうる集積回路の実現に向けて、微細デバイスに内在する本質的な特性ばらつきや製造性の劣化、信頼性の低下などの物理的フォールトを克服する設計技術に取り組んでいます。ここでは、トランジスタ特性の時間的な変動を引き起こすランダム・・テレグラフ・ノイズ（RTN）の影響を評価した結果を説明します。

RTN とは、トランジスタを移動するキャリアが、ゲート酸化膜に存在する原子レベルの構造欠陥（トラップ準位）に捕捉または放出されるのに連動して、トランジスタを流れる電流が離散的に変動する現象です。回路的な視点で見ると、トランジスタのしきい値電圧が時間とともに離散的に変動する現象と見ることができます。微細化によりチャネル内を流れるキャリアの数が減少し、RTN の影響が顕在化してきました。微細な素子が高密度に集積される CMOS イメージセンサ、フラッシュメモリ、SRAM では特に深刻な問題となっています。一方、ディジタル論理回路では、大きな寸法のトランジスタが使われることもあり、RTN の影響について深く検討されたことはありませんでした。しかし、集積回路を低い電源電圧で動作させる場合には、しきい値電圧のわずかな変動が大きな遅延変動に継ります。今後、低消費エネルギー化への強い要請より、動作電圧の一層の低減化が進むものと思われます。今回、実際にテストチップを試作して、RTN の影響を評価しました。

ディジタル回路を模擬する回路として、インバータで構成したリング発振回路を採用しました。発振周波数の揺らぎを観測することで、遅延時間の揺らぎを評価します。40 nm の製造プロセスを用いて、1 チップ上に色々な種類のリング発振回路をそれぞれ 840 個ずつ集積しました。最小のトランジスタ寸法で設計した 7 段のリング発振回路を 0.75 V で動作させたところ、10% 以上の回路で 1% を越える離散的な周波数変動を観測しました。その一例を図 1 に示します。明確な 2 値変動が生じています。周波数変動量の最大値（Δ F）を最大発振周波数（Fmax）で正規化し、840 個の回路について変動量の累積密度分布をとったものが図 2 です。この図には、段数やトランジスタ寸法の異なる回路の結果も示しています。論理段数の増加により、遅延揺らぎの影響は減少します。また、トランジスタ寸法を大きくすることで、その影響は大きく減少することがわかります。一方、電源電圧を下げると揺らぎ量は増大します。電源電圧 0.65 V では、最大 10.4 % の遅延揺らぎを観測しました。低電圧動作において、RTN が深刻な影響を及ぼす可能性がある事を確認しました。今後、RTN の影響を考慮した設計指針の開発に取り組みます。

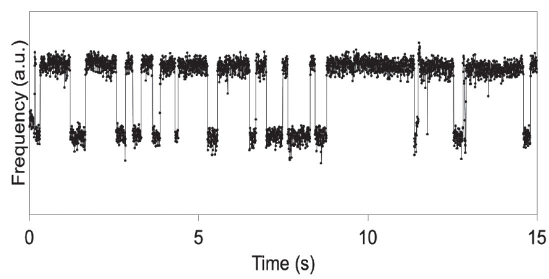


図 1. RTN による発振周波数の時間的揺らぎ

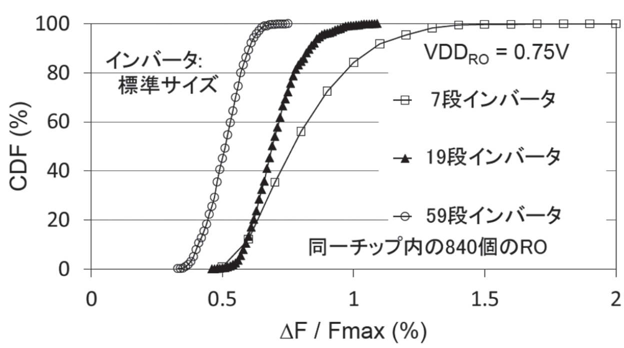


図 2. 発振周波数揺らぎの論理段数やトランジスタ寸法依存性

システム情報論講座　医用工学分野　（松田研究室）

http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/

「計算機シミュレーションによる薬剤誘発性不整脈の解析」

重大な心臓疾患に不整脈がある。不整脈が発生すると心臓の収縮と拡張の正常なリズムが失われ、血液を全身に送り出す機能に障害が生じ、最悪の場合は死に至る。薬剤の副作用によって不整脈が偶発的に発生する薬剤誘発性不整脈は大きな問題となっており、本来心臓とは無関係であるべき抗アレルギー薬が不整脈を誘発するという副作用の恐れがあることが明らかとなり、発売中止に至った例がある。薬剤誘発性不整脈の主要な原因は、薬剤投与が心臓を構成している心筋細胞に影響を与え、早期後脱分極（EAD）や遅延後脱分極（DAD）と呼ばれる心筋細胞の異常な電気的活動を生じることである。心筋細胞の異常な電気的活動が発生する過程は複雑であり、未だ十分には解明されていない。また、薬剤の副作用による不整脈は薬剤投与により必ず発生するわけではなく、薬剤の投与量や個人の遺伝的形質あるいは生理状態に応じて発生確率が変化する。しかしながら、実際の細胞や組織を用いた実験によって様々な状況を詳細に解析することは困難である。そこで、当研究室では、不整脈の原因である心筋細胞の異常電気活動について、計算機シミュレーションを用いて発生メカニズムや発生条件を推定する研究を行っている。

心筋細胞の機能・活動を詳細に再現可能な数理モデルとして、京大医学部生理学教室で開発されたKyotoモデルがある。Kyotoモデルは細胞活動を形成するイオンチャネルをはじめとした主要な機能要素について、各々を分子実体に基づいて連立常微分方程式として定式化し、それらを統合することで細胞の活動を再現する。また、細胞実験結果に基づいて定められた分子実体に対応する様々なパラメータが含まれており、これらのパラメータを変化させることで、EAD、DADなどの異常電気活動を再現可能である。そこで本研究では、Kyotoモデルを用いて細胞の異常活動に起因する薬剤誘発性不整脈について解析を行った。

正常状態のKyotoモデルに対して、薬剤投与の影響を反映するようパラメータを変化させるとともに、個人差や生理状態に関係する複数のパラメータを同時に変化させ、網羅的にシミュレーションを行うことによって、KyotoモデルにおいてDADが発生する条件に関する検討を行った。異常活動が生じるまでの時間や経過などを指標として不整脈発生の危険度を数値化し、実際の異常電気活動が発生する条件と危険度の推定を試みた。また、実細胞実験では測定できない生理活性物質の濃度変化などについても計算機シミュレーションでは取得可能であり、特定の実験結果に至った要因とプロセスに関する解析も行ったところ、DADの発生については、興奮が生じる前の静止状態における細胞内カルシウムイオン濃度が極めて重要な指標であるとの知見が得られた。このようなシミュレーションにより、実細胞における異常電気活動の発生メカニズムの推定が可能となり、医薬品の開発段階における副作用の危険性の事前予測や、患者に応じた治療薬の選択などに繋がることが期待される。

図1 細胞モデルによる不整脈解析

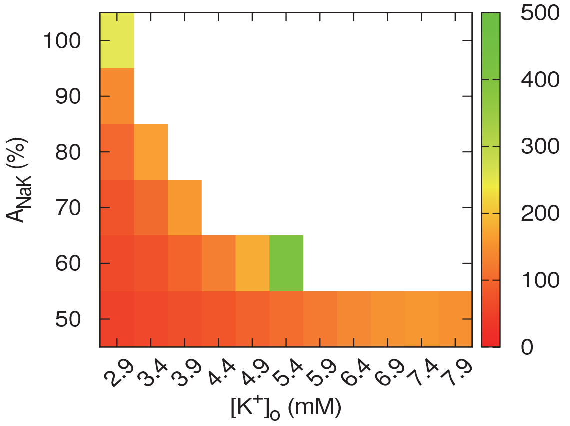


図2 不整脈危険度マップ（一例）

エネルギー社会環境学講座　エネルギー情報学分野　（下田研究室）

http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/

「原子力発電プラント解体作業支援への拡張現実感技術の適用」

福島第一原子力発電所の事故以来、我が国では多くの原子力発電プラントが停止しており、特に1970年代に建設された発電プラントは運転開始からすでに30年以上経っているため、その解体・廃炉も検討されている。原子力発電プラントの解体の際には、放射性廃棄物を取り扱うことから十分な安全性と作業効率の向上を同時に実現する必要がある。しかし、原子力発電プラントには無数の機器や配管が存在し狭隘な場所も多く、解体の際には機器同士が干渉する等、作業スペースの確保が難しい。そのため、解体工程で発生する機器同士の干渉を3DCADと仮想現実感（Virtual Reality; VR）を用いたシステムにより評価することも検討されているが、評価に用いる3DCADデータは実際の現場状況を正確に反映していない場合が多いため、正確な評価が難しい。

そこで、本研究室ではレーザレンジファインダを用いた3次元形状計測および拡張現実感技術（Augmented Reality; AR）を利用した解体機器の干渉を評価するシステムを開発した。これにより、解体作業計画立案者は現状を正しく反映したモデルで干渉を評価でき、接触箇所は現実の映像に重畳表示され示されるため、状況の直観的な理解が可能になる。提案するシステムは図1に示すように2つのサブシステムにより構成される。1つは作業環境の形状を計測し、作業環境および機器の形状モデルを取得するシステムである。もう1つはタブレットPCをキャスタ付三脚に固定し、カメラで撮影した画像内に、取得した機器の形状モデルを重畳表示することで、機器の仮置・運搬される様子を把握することができるシステムである。作業環境および機器のモデルの相対位置を計算することにより干渉の有無を評価する。

さらに、開発したシステムの作業現場での有用性および受容性を評価するため、現在解体作業が行われている「ふげん」原子力発電所の解体作業担当者らに使用してもらった。評価手法にはヒューリスティック法を用い、アンケートおよびインタビューにより評価した。その結果、機器の形状モデルを現場に重畳表示することにより、仮置・運搬作業の様子が直感的に理解しやすいこと、および、仮置・運搬作業シミュレーションに用いるモデルとして、実際の解体作業現場を測定することにより得たモデルを用いることが有効であることが分かった。また、解体機器のモデルを立方体のオブジェクトの動きに合わせて移動する方法は直観的で簡単であることが分かったが、一方で、細かい操作指示は出しづらいこともわかった。今後は、このような拡張現実感技術を産業応用するための基盤技術のさらなる開発を進めていきたい。

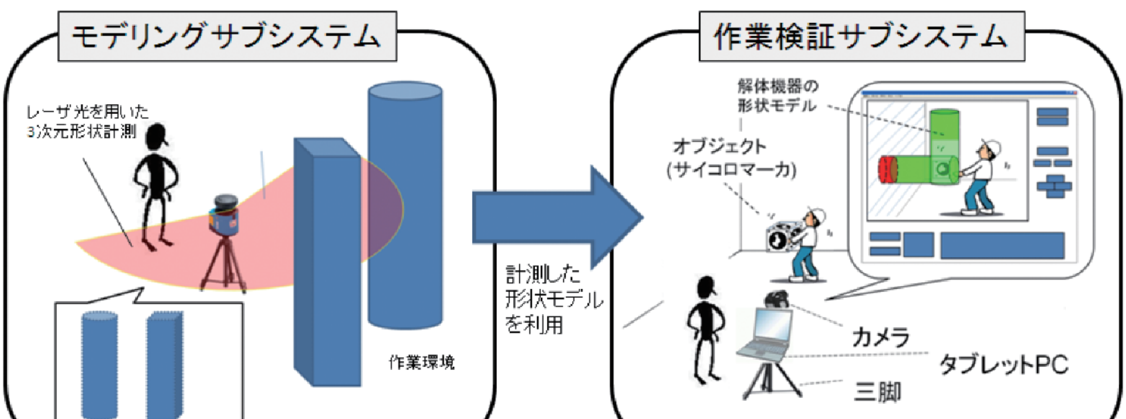


図1. 拡張現実感技術を利用した原子力発電プラント解体作業支援システム

エネルギー材料学講座　エネルギー応用基礎学分野　（土井研究室）

http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/

「集合組織金属を活用した高性能高温超伝導線材の開発」

超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器、リニアモーターカーなどの様々な製品が作り出されています。

超伝導体の中でも、特に高温超伝導体と呼ばれる１群の材料はどこでも入手可能で安価な液体窒素に漬けて冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、この高温超伝導体を用いた電線（超伝導線材）を実用化できれば、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導線材の使用が広がることが確実視されています。また、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、それらの太陽光発電装置群を高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込んでしまえば、地球上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算もあります（GENESIS 計画：Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [1] ）。

我々は材料加工技術と成膜技術を融合することで、安価で工業生産に向いた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数 km の長さに渡って単結晶のように（３軸結晶配向）揃える新技術の開発に成功しています。具体的には圧延と加熱によって３軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体（$YBa_2Cu_3O_7$）の３軸結晶配向膜をエピタキシャル成長させた高温超伝導線材の開発に成功しました（図１）。この線材を液体窒素に漬けて冷却（77 K）したところ、断面積 1 mm^2 当たり 200A 以上の電流を電気抵抗ゼロで流せることが確認できています。現在、企業との共同研究等を通じて、実用化に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は高温超伝導体に限らず、様々なエネルギーデバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めています。現在、太陽電池や熱電発電素子、燃料電池などへの応用も研究中です。

参考文献　[1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8**（2000）53-60.

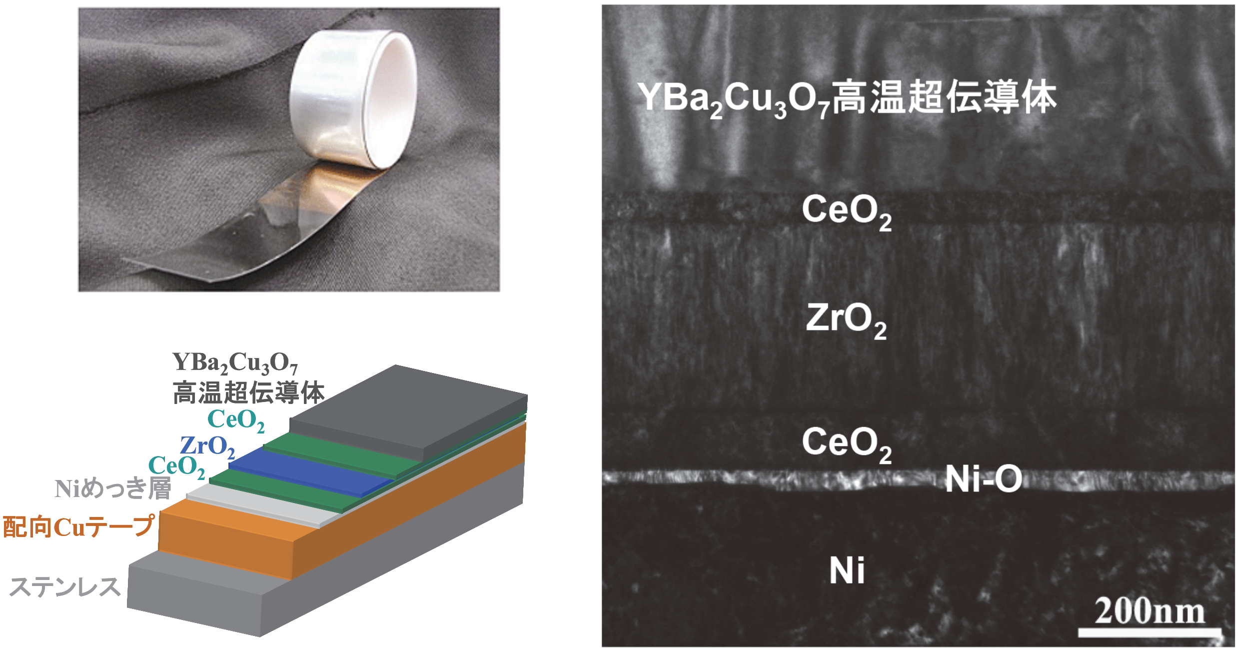


図１ 開発した高温超伝導線材の概観、構造の概略図および断面の透過型電子顕微鏡写真

エネルギー材料学講座　プロセスエネルギー学分野　（白井研究室）

http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/

「液体水素冷却高温超伝導線材の磁場下特性測定」

1. はじめに

現在、科学技術振興機構 JST-ALCA のプロジェクトとして、電力・水素協調エネルギーインフラをめざした液体水素冷却超電導機器に視点を移し新たな実験を進めている。本研究では、液体水素の冷媒としての特性把握からスタートし、高温超電導機器冷却形態の検討とその冷却システムの設計、および、冷却システム要素技術開発、さらに、液体水素中での高温超電導線材特性、導体設計を段階的に進め、要素機器の検証モデル開発とその実証試験までを視野に入れている。今回は、液体水素で冷却した超電導材料の磁場下での特性測定試験を目的とした試験装置を設計製作したので概要を紹介する。

2. 液体水素冷却超電導材料特性試験装置

図に開発した液体水素冷却超電導材料特性試験装置の写真と主な仕様を示す。液体水素実験槽は、内径約 310mm で最大 61L の液体水素を貯液できる。トップフランジには、500A の電流導入端子を 3 端子設けた。この実験槽の下部に、外部磁場を発生させるため、液体ヘリウム槽に超電導マグネットを設置した。超電導マグネットは、175A で中心磁場最大 7T が発生できる。内径、高さとも 400mm で、この空間の中の水素槽がテストセクションとなる。14K から 31K の温度範囲でサブクール度を設定できるようにしている。磁場印加用マグネットの漏洩磁場によるバルブや計測・制御系への影響を検討し、適宜シールドなどを実施した。これらは JAXA 能代ロケット試験場に設置され、バルブ操作、電源操作、計測制御、モニターはすべて光 LAN を用いた遠隔操作で行えるようにし、安全に十分留意して実施している。

Table 1 Specification of Cryostats and magnet

Liquid Hydrogen Cryostat	
Inner diameter	309.5 mm
Height (bottom to top flange)	2218 mm
Volumetric capacity	61 L max
Withstand Pressure	2.0 MPa
Liquid Helium Cryostat	
Inner diameter	350 mm
Outer diameter	630 mm
Height (bottom to top flange)	1625 mm
Volumetric capacity	175 L max
Superconducting Magnet	
Material	NbTi
Inductance	112.36 H
Rated current	175A
Max. magnetic field	7 T

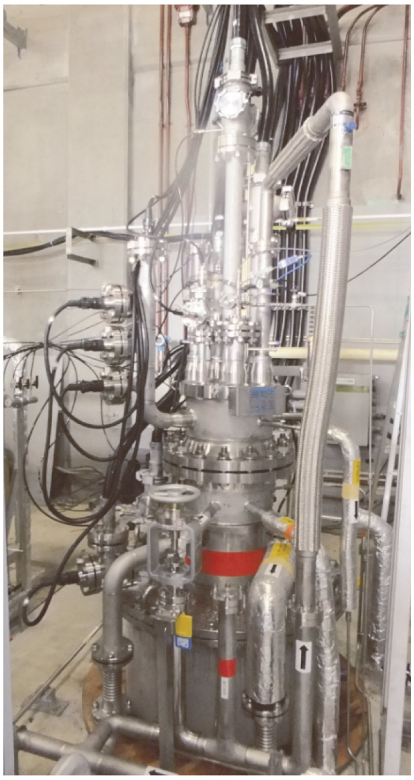


図　液体水素冷却超電導材料特性試験装置の写真

エネルギー機能変換研究部門　複合系プラズマ研究分野　（佐野研究室）

http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/sanok/index.html

「ヘリオトロン J における少数イオンモードでの ICRF 加熱による高速イオンの解析」

核融合発電を目指す磁場閉じ込め方式のプラズマ研究は国際協力による ITER を中心として各国で進展しています。重水素、三重水素による核融合を考えた場合、反応によって生成される α 粒子の閉じ込めは重要な課題です。外部磁場のみで閉じ込め磁場を形成する単純なヘリカル系装置においては無衝突領域のリップル損失が存在するため、これを低減する磁場配位を考える必要があります。エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J 装置では、この損失を低減する磁場配位を考案し実験を進めています。ここでは、磁場成分のうちトロイダル方向の磁場リップル（バンピネス）を変化させた場合の高速イオン閉じ込めについて、イオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）加熱を用いて実験的に調べた結果について紹介します。

プラズマは少数イオンの軽水素と多数イオンの重水素の混合プラズマを用いており、ICRF 入射前のイオン温度は 0.2keV 程度です。このような 2 種イオンのプラズマに ICRF 加熱を行うと主に少数イオンにエネルギーが吸収されるため、高速イオンを容易に生成することができます。プラズマ中のイオンは中性原子との荷電交換反応によってプラズマ外へ排出されるので、これらの粒子を解析すればプラズマ中のイオンについて調べることができます。ヘリオトロン J では水素、重水素を同時に計測することができる荷電交換中性粒子エネルギー分析装置が設置されており、様々な磁場配位に対して、計測視線角度を変えることでトーラス断面の水平方向、垂直方向の分布を観測することができます。下の図は軽水素のサイクロトロン共鳴層をプラズマ中心にした条件で、バンピネスを変えて、少数イオン高速成分のエネルギースペクトル変化を示したものです。ここでは水平角を固定して垂直角を変化させています。この加熱法では ICRF による加熱エネルギーはほとんど軽水素イオンに吸収され、加速された軽水素イオンとのクーロン衝突により、重水素イオン、電子が加熱されます。図（a）はバンピネスが高い場合で、全体的に高速イオンが多く生成されているのが分かります。また、垂直角によってエネルギースペクトルが大きく変化します。また、このときバルクのイオン温度も最も高くなることが分かりました。図 (b) は中バンピネスの場合でエネルギースペクトルの傾きは（a）の場合より急で、垂直角による変化も小さいという結果でした。図（c）は低バンピネスの場合で高速イオン生成が最も少なく、バルク加熱についても最小であることが分かりました。これらから、閉じ込め磁場成分の一つであるバンピネスの制御によって、高速イオンの生成・閉じ込めが変化することが実験的に明らかになりました。今後はさらに実験で得られた分布が、どのような物理機構で得られたかを明らかにするためにモンテカルロシミュレーションをもとに解析を進める予定です。

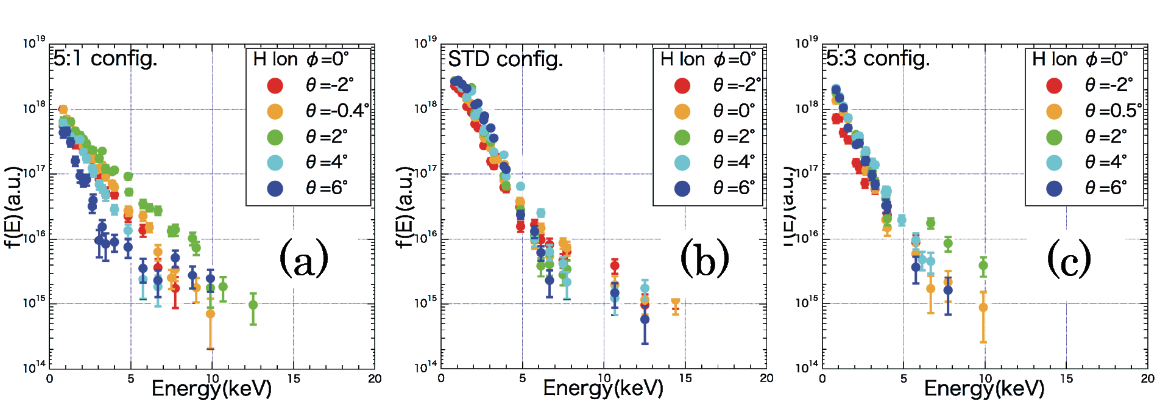
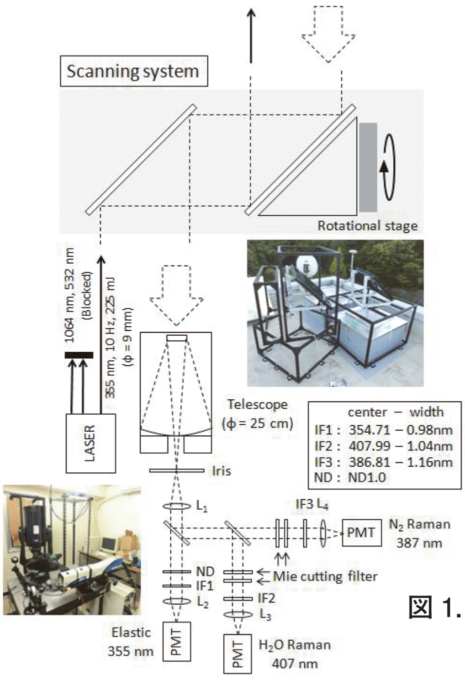


図 1　実験で得られた少数イオンのエネルギースペクトルの垂直角（θ）に対する変化。(a) は高バンピネス、(b) は中バンピネス、(c) は低バンピネスに対する実験結果。

生存圏診断統御研究系　大気圏精測診断分野　（津田研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda_lab
「ライダーで捉える大気物質の時空間変動」

大気中に浮遊する人為起源および自然起源のガス状および粒子状の物質は、大気環境を考慮する際の重要な要素となっています。例えば、大気中の主要な成分である水蒸気は、雲降水過程や大気物質の変質過程を通じて、気候変動や環境影響に寄与する因子として知られています。また最近では、中国からの越境輸送に伴う粒子状物質（エアロゾル）の増大が、社会的にも大きな注目を集めました。エアロゾルは、気管支や肺胞への沈着過程を経て喘息や肺がんのリスクを高めるなど、ヒトの健康にも影響を及ぼすことが懸念されています。安全で安心な大気環境を維持していくためには、大気の質を決める成分の動態を詳細に把握し、将来的な変動を正しく予測することが重要となります。発生源から放出された大気物質は、化学的性状を変化させながら、より空間的に広範囲な領域へと輸送･拡散されていきます。そのため、大気質の変動特性を精緻に理解するためには、変質に寄与する複数の大気成分と、輸送・拡散に影響する気象要素の時空間分布の把握が必要となります。

京都大学生存圏研究所信楽 MU 観測所（滋賀県）には、大気レーダーやラジオゾンデ放球設備など、上空の気象要素を観測する設備が充実しています。その利点を活かし、本研究課題では、MU 観測所を拠点として、大気成分の時空間変動の把握を目的としたライダーの開発を行ってきました。ライダーは、レーザーを用いたレーダー手法であり、光と物質の相互作用に伴う散乱現象を抽出することで、ある一方向の大気物質や気象要素の距離分布を得ることができます。我々のグループでは、入射光と散乱光の波長が変わらない弾性散乱と、入射光に対して散乱光の波長がシフトする非弾性散乱を、それぞれ検出するライダーを構築して、エアロゾル、水蒸気、気温の高度プロファイル観測に利用してきました。今までに、高度 10 km 以上の遠距離まで各成分を高精度で計測できる大型のシステムや、野外観測用に可搬性を高めた小型のシステムなど、観測条件に合わせた複数のライダーが開発されています。平成 24 年には、観測視野角を走査することでエアロゾルと水蒸気の鉛直断面分布を同時に計測する、走査機能を付加したライダーの運用を開始しました。走査型ライダーは、従来の一方向のみの観測では理解が難しかった、地表付近の水蒸気の拡散・輸送過程や、粒子の吸湿に関連したエアロゾル変質状態の空間的な不均一性など、局所的な大気現象の解明に役立つ観測を可能とします。



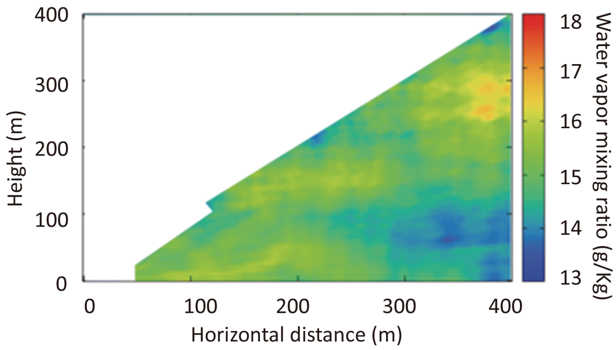


図 2：走査型ラマンライダーで取得された水蒸気混合比の鉛直断面構造（2012 年 8 月 28 日 22:17 JST）

図 1. 走査型ラマンライダーの概要

生存圏開発創成研究系　生存科学計算機実験分野　（大村研究室）

http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/omura-lab/

「低周波プラズマ波動による地球放射線帯電子のピッチ角散乱」

地球を取り囲む宇宙空間（ジオスペース）には、様々なプラズマ波動が存在している。図1は、クラスター衛星によって観測された数Hzの低周波プラズマ波動である電磁イオンサイクロトロン（EMIC）波のダイナミックスペクトルである[1]。最初一定であった周波数から新たに周波数が大幅に上昇する強い電磁放射が見られるが、これをEMICトリガードエミッションと呼んでいる。このような強い電磁放射は内部磁気圏に運ばれてくる数keV～数10keVの高エネルギープロトンとのサイクロトロン共鳴によって生成される。従来の研究においては、電子サイクロトロン周波数以下の数kHzにおいて同様の周波数変動を示すホイッスラーモードのコーラス放射が注目され多くの観測や統計解析が行われているが、ここで紹介する低周波のEMICトリガードエミッションは過去の衛星観測でも注目されておらず観測例は少ない。我々の研究グループでは、コーラス放射研究の経験を生かして、EMICトリガードエミッション発生の非線形理論の構築[2]と計算機シミュレーション[3]を世界に先駆けて実行し、観測されているような周波数上昇を伴うエミッションの発生メカニズムを定量的に解明することに成功した。高周波のコーラス放射が放射線帯のMeVのエネルギーを持つ相対論的電子を生成していることが分かってきているが、この相対論的電子は、EMIC波と異常サイクロトロン共鳴して、図2に示す様に波の電磁的なポテンシャルにトラップされて非常に効率の良いピッチ角（α）散乱を受けることが分かってきた[4]。すなわち地球磁場に捕捉された相対論的な電子は最初大きなピッチ角をもっているが、EMIC波が作る空間的な電磁波の波束を電子が光速に近い速度で通り抜ける過程において、波の電磁界の空間的なスパイラル構造と電子のサイクロトロン運動が共鳴し、波の共鳴速度の上昇と共に、ピッチ角が急速に小さくなり、磁力線にガイドされて極域大気へと降下してゆくことが分かった。図1の左下の一つのEMICトリガードエミッションの継続時間は40秒程度であるが、その短時間に同じ磁力線沿いに捕捉されている1～6MeVの相対論的電子の約50%がピッチ角散乱を受けて極域大気に降下することが分かってきた[5]。放射線帯電子は、キラーエレクトロンとも呼ばれ、人類の宇宙活動に大きな障害となっているが、人工的にEMICトリガードエミッションを発生させることが出来れば、地球放射線帯の電子フラックスを制御出来ることを示唆しており、将来の宇宙利用の技術開発に通じる可能性のある重要な研究課題である。

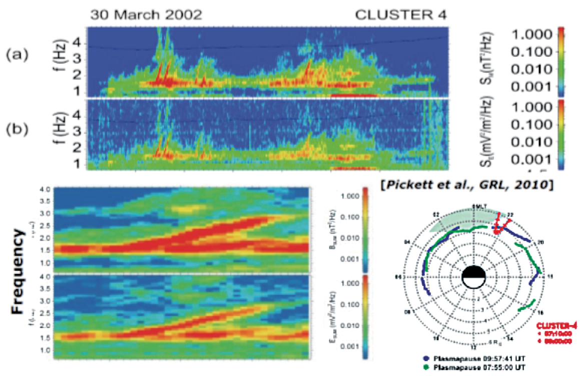


図1. EMICトリガードエミッション（Cluster衛星観測）

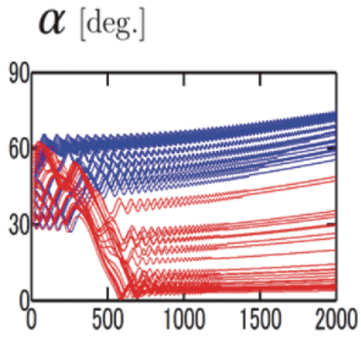


図2. EMICトリガードエミッションにトラップされた相対論的電子（赤色）のピッチ角の時間変化

参考文献

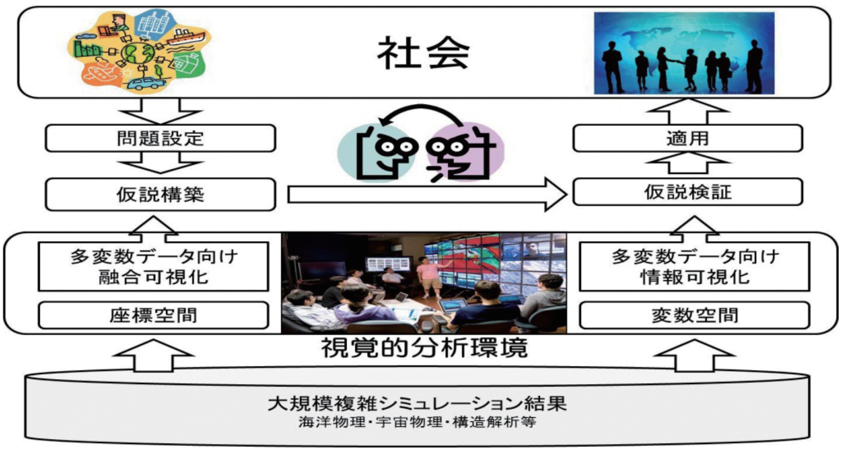
[1] J. S. Pickett, et al., Geophysical Research Letters, 37, L09104, doi:10.1029/2010GL042648, 2010.
[2] Y. Omura, et al., J. Geophys. Res., 115, A07234, doi:10.1029/2010JA016280, 2010.
[3] M. Shoji and Y. Omura, J. Geophys. Res., 116, A05212, doi:10.1029/2010JA016351, 2011.
[4] Y. Omura and Q. Zhao, J. Geophys. Res., 117, A08227, doi:10.1029/2012JA017943, 2012.
[5] 趙慶華 , 京都大学工学研究科電気工学専攻修士論文（平成25年2月）

国際高等教育院　（小山田研究室）
http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/
「科学的発見を促す視覚的分析技術」

計算科学シミュレーション結果から生成されるビッグデータは、多くの科学的発見をもたらす可能性を持ちながら、「ポスト」や「図化処理」といわれる可視化処理による定型的な現象確認に終わっています。この可視化は、科学的可視化と呼ばれ、シミュレーションモデルが定義される座標空間において実行されています。近年の計算機能力の向上によりシミュレーション結果のサイズは膨大となり、可視化において試行錯誤が困難となることがこの傾向を加速しています。

一方、ソーシャルネットワークや高性能センサーから得られるビッグデータからの知見を発掘するために可視化技術が広く用いられるようになってきました。これらは、情報可視化技術と呼ばれて、変数空間において、変数間の相関を確認するために利用されていますが、計算科学シミュレーション結果の可視化にはあまり活用されていません。

この問題を解決するために、本研究室では、右図に示すように、情報可視化と科学的可視化を連携させ、科学的発見を促す視覚的分析（VA:Visual Analytics）[1-2] 技術を開発・整備しています。この技術を活用すれば、社会の声を可視化して問題を顕在化し、それらに対する仮説構築・検証を支援し、検証された仮説を社会に還元することを支援することができます。



文科省は、「科学技術イノベーション政策のための科学」に関する国際的な水準の研究・人材育成拠点を構築し、客観的根拠に基づく政策形成のための政策担当者、「政策のための科学」という新たな研究領域の発展の担い手となる研究者等の人材育成を行うことを決め、国内で五つの拠点が採択されました。京都大学も大阪大学とともにそのうちの一つの拠点（http://www.stips.kyoto-u.ac.jp/）を担っており、本研究室もその教育研究に関わっています。科学技術イノベーション政策のための科学では、社会が直面する課題というものを抽出して、その中で科学技術がカバーできるものと社会システムの変革が必要なもの、と絞り込んでいって、それを政策メニューに落とし込み、社会に提供するという政策策定プロセスに注目しています。例えば、NSF（アメリカ国立科学財団、National Science Foundation）のジュリア・レーン（Julia Lane）は、投資に対してどの程度科学技術イノベーションが起こっているか、実際に投資したお金がどのように有効に使われているかを、VA 技術を使って可視化しています[3]。社会的課題を抽出し、政策メニューを社会に提供する上で、VA 技術は、大いに期待されています。

参 考 文 献

1） J.J. Thomas and K.A. Cook（Eds.）, Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics. IEEE Press, 2005.

2） Daniel Keim, Jörn Kohlhammer, Geoffrey Ellis and Florian Mansmann（Eds.）, Mastering the Information Age – Solving Problems with Visual Analytics, Eurographics Association, 2010.

3） J Lane, Let's make science metrics more scientific, Nature 464（7288）, 488-489

教育支援システム研究部門　遠隔教育システム研究分野　（中村裕研究室）
http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/
「筋電位計測と画像による姿勢計測を用いたリハビリテーション支援システムの設計」

リハビリテーションの場では、患者自身で判断しながらトレーニング運動を続けなければならない場合がある。このような場合には、指示された運動を維持し続けることが難しいだけでなく、見かけ上似ているのにトレーニング効果の得られない代償動作が発生することが多い。自分の状態を客観的に把握するのが難しいために、「正しい姿勢」を保ちながら「正しい筋肉の収縮」を発生させること、またそれを繰り返すことが困難になるからである。我々は、京都大学附属病院と協力し、この問題を緩和するために、肩関節拘縮のリハビリテーションの支援システムの設計を行った。このシステムでは、画像による三次元姿勢計測と筋電位計測を組み合わせ、現在の状態のチェックや逸脱動作の認識を行うことによって、訓練者に正しいトレーニングが行われるようにフィードバックを与える。

リハビリテーションの現場でよく行われるのは、医師や理学療法士が正しい動作、または、可能な範囲で最も望ましいと考えられる動作を患者に指示し、それを患者が繰り返し再現する努力をすることである。そのため、本研究でも手本となる動作（以下、「基準動作」と呼ぶ）を時系列で記録しておき、利用者がそれを再現するように努力することを基本とした。

トレーニング時には、利用者が以下の様な情報提示を受けながら運動を行う。

- 姿勢・筋収縮の状態、基準動作との重畳・比較
- 動作の逸脱、代償動作の検出結果と逸脱箇所、修正方法の提示

その提示情報の例を図に示す。支援システムは、計測結果を提示することにより、利用者が客観的に自分の状態を把握する補助を行うとともに、基準動作との差を意識させる。逸脱が起こっている場合には、該当箇所や理由・修正方法等を提示する。これにより、利用者が動作の修正を行いながら、所定のトレーニング動作を継続することを補助する。

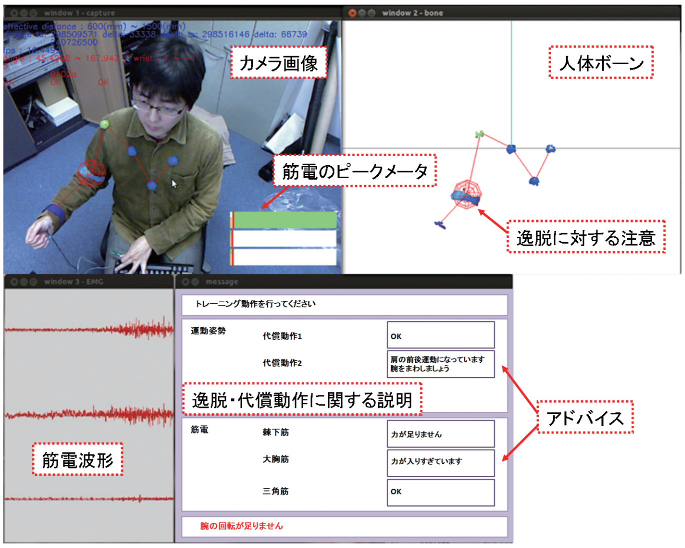


図 1.　利用者への情報提示： 現在の状態とともにアドバイスが提示される。

試作システムに対する患者、理学療法士の意見を得たところ、計測、情報提示、システム構成について、概ね良い評価を得た。情報提示については、説明の不足が指摘されたものの、図のような複数の提示方法を用意することの妥当性は示された。ただし、これらは、対象を肩のリハビリテーションに絞り、比較的単純なトレーニング動作を扱ったことに因るところも大きい。今後、より多様なトレーニング動作を扱うことによって、様々な検証を行なっていくことが必要である。 なお、本研究はシステムの設計と試作の段階にあり、治療効果に対する継続的な評価は今後の課題となっている。

平成 24 年度修士論文テーマ紹介

工学研究科　電気工学専攻

北　森　勇太朗（引原教授）「多段接続された電力ルータによる交流配電システムの構成に関する研究」

本研究では、分散型電源の導入された家庭内における交流配電システムの構築を目指し、構成の検討を行った。システムの基本構成である電力ルータの直・並列接続をもとに、回線切り替え動作の実現とその影響を評価し、家庭へのシステム導入の実現可能性を示唆した。

田　代　圭　司（引原教授）「直流配電に用いる電力パケット伝送システムの開発」

本研究では、電力の由来を区別したマネージメントを実現するために、電力パケット伝送システムの原理確認とその開発を行った。基本構成およびそれを拡張した構成におけるパケットの伝送を実験的に確認するとともに、システムの同期を余分な線路を必要としない方法で達成した。

文　野　貴　司（引原教授）「パワー MOSFET の高周波スイッチングのための高速ゲートドライブ回路に関する研究」

本研究では、電力変換回路のスイッチング周波数を高周波化するために、ゲートドライブ回路の検討を行った。ゲートドライバ IC の入出力特性、ゲート抵抗、MOSFET のオフ時の駆動電圧に着目し、10MHz のスイッチングを達成した。

宮　武　　想（引原教授）「リチウムイオン電池を用いた組電池の放電特性と構成切り替え制御」

本研究では、エネルギー密度の高いセルとパワー密度の高いセルを組み合わせた組電池システムを提案した。組電池の構成と放電特性の関係を明らかとし、周期変動負荷に対して構成を離散的に切り替える制御を適用し、高出力エネルギーと高出力パワーを同時に実現した。

齊　藤　勇　来（萩原教授）「状態遷移作用素のノルムに基づくむだ時間系の安定解析および離散時間安定化制御器設計」

むだ時間系の安定条件が系の状態遷移を表す作用素のノルムによって記述できることを示し、それに基づき、安定性を厳密に判別する方法を提案した。さらに、むだ時間系を安定化する制御器の設計法を与えた。また、数値例検証を通して、それらの有効性を論じた。

山　崎　達　矢（萩原教授）「非線形時変微分差分方程式のむだ時間フィードバック系による表現法」

非線形時変微分差分方程式の解の定義を明確に与え、解の存在と一意性を保証する十分条件を導いた。さらに、この方程式の解を非線形時変系と時不変むだ時間要素のフィードバック結合により構成されるむだ時間フィードバック系の内部信号として表現する方法を与えた。

蒲　原　聖　治（萩原教授）「線形周期時変系に対する古典的ゲインスケジューリング制御器設計と最適レギュレータの比較」

線形周期時変系に対して、古典的ゲインスケジューリングに基づく状態フィードバック制御器設計法を考え、簡単な制御対象について、この制御器による閉ループ系が安定となることを示した。また、構

成された閉ループ系と最適レギュレータの性質の比較を数値例を通して行った。

吉　村　治　輝（萩原教授）「ポリトープ型不確かさを含むサンプル値系の準有限ランク近似誤差を考慮したロバスト安定解析」

ポリトープ型不確かさを含むサンプル値系のロバスト安定解析問題を、近似離散時間系のロバスト安定解析問題に帰着させ、近似的に解析する手法を提案した。さらにその際に用いる準有限ランク近似の誤差評価を通して、サンプル値系のロバスト安定性を厳密に保証する条件を与えた。

青　野　周　平（土居教授）「遅延フィードバック制御法における周期軌道安定化機構の Pade 近似を用いた解析」

遅延フィードバック制御法は簡便なカオス制御法であるが、無限次元の力学系であるため、そのダイナミクスは複雑である。パデ近似を用いて有限次元に縮約することで、比較的低次元でも無限次元の場合と同様の制御性能が得られることを示した。

恒　木　亮太郎（土居教授）「神経振動子の大域結合系における遅い同期振動の発生機構に関する研究」

神経振動子のような非線形特異摂動系を結合すると、単一振動子の固有周期とは大きく異なる同期振動が創発する。このような同期リズム発生メカニズムの解明を目指し、ファン・デア・ポル型の神経振動子結合系を用いて、平衡点の安定解析及び分岐解析を行った。

中　山　　裕（土居教授）「麻酔薬に対する鎮静度応答特性の経時的変化のモデル化と鎮静度・鎮痛度制御の研究」

全身麻酔下の手術における患者の鎮静度および鎮痛度の自動制御システムの開発を目的として、麻酔継続時間による麻酔薬の効果の変化を考慮に入れたモデルを提案するとともに、適切な鎮静・鎮痛状態を維持できる薬物濃度の推定法とそれを用いた制御方法の検討を行った。

三　好　巧　人（土居教授）「マルチカーエレベータシステムにおける運行決定問題の数理モデル化および解法の研究」

1本のシャフトに複数台のかごを設置するマルチカーエレベータシステムにおいて、かご同士が衝突しないよう運行を決定する問題を数理計画問題としてモデル化するとともに、分枝限定法による解法を構成し，モデルの妥当性と解法の有効性を数値実験で検討した。

Claudia Cecilia Yamamoto Noguchi（土居教授）
「Mathematical Model of Postprandial and Postabsorptive Glucose-insulin Metabolism in Type 1 Diabetes（食後及び空腹時における1型糖尿病のグルコース・インスリン代謝の数理モデル）」

血糖値制御への利用を目的として、食事のグリセミック指数と炭水化物の消化速度を考慮に入れたグルコース吸収モデルを提案し、それを従来のインスリン動態およびグルコース代謝モデルと組み合わせた1型糖尿病患者の食後および空腹時におけるグルコース・インスリン代謝モデルを作成した。

赤　松　功一郎（小林教授）「視運動性眼振と脳波および機能的 MRI による両眼視野闘争に関連する皮質神経活動の研究」

左右眼独立に競合する方向にドリフト運動する視覚刺激を呈示した場合と、両眼に同方向に運動する刺激を呈示した場合の視運動性眼振、脳波、機能的 MRI を計測し比較することで、両眼視野闘争における知覚交替に関連する大脳皮質神経活動の部位とダイナミクスに関する新知見を得た。

大　西　宏　征（小林教授）「K-Rb ハイブリッドセルを用いた光ポンピング原子磁気センサに関する研究」

光ポンピング原子磁気センサを用いた生体磁気計測を目的に、K と Rb の 2 種類のアルカリ金属原子を用いたハイブリッドセルを利用したセンサを提案した。ハイブリッドセルを用いた光ポンピング原子磁気センサについて理論的・実験的に検討し、最適な動作条件について示した。

草　薙　卓　也（小林教授）「脳波と機能的 MRI を用いた呈示様式の異なるスタンバーグ記憶走査課題遂行時の脳活動の検討」

記憶における呈示様式の影響の検討を目的に、記憶項目を同時・継次的に呈示するスタンバーグ記憶課題中の脳波を測定し、機能的 MRI により得た賦活部位を用いて統合解析を行った。この結果、複雑な記憶過程における脳神経賦活位置とそのダイナミクスに関する新たな知見を得た。

土　田　昌　宏（小林教授）「光ポンピング原子磁気センサを用いた MR 信号直接計測のための磁場分布解析」

超低磁場 MRI においてポンピング原子磁気センサを用いた MR 信号の直接計測を目指し、フェライト磁気シールドおよびアクティブ磁気シールド型減磁コイルを用いた直接計測法について磁場分布解析により検討を行い、その有効性が確認できた。

大　竹　宏　明（雨宮教授）「高温超伝導薄膜線材で巻かれた二極マグネットにおいて線材磁化が多極磁場へ与える影響の実験的研究」

高温超伝導テープ線材を用いて加速器用二極マグネットを巻いたときに線材磁化が磁場精度に与える影響について実験的に評価し、数値解析結果と比較検討した。線材磁化が多極磁場成分に与える影響には再現性があり、また、ドリフトも比較的小さいことを明らかにした。

北　野　紘　生（雨宮教授）「次世代車載システムを指向した高温超伝導誘導同期機の可変速制御に向けた基礎検討」

車載応用を指向した高温超伝導誘導同期回転機について、起磁力依存非線形超伝導抵抗を利用した自律安定回転制御性を実証するとともに、同制御性を適用した最大効率ベクトル制御コードを開発した。さらに、上記制御コードのトルク応答改善方法を提案した。

二　井　雅　裕（雨宮教授）「転位構造を考慮した解析モデルによる高温超伝導 Roebel ケーブルの電磁特性の研究」

高温超伝導薄膜線材を集合化した大電流導体である Roebel ケーブルの転位三次元構造を考慮した数値電磁界解析モデルを構築した。構築したモデルを用いて Roebel ケーブルの交流損失を計算し、Roebel ケーブルの構造がその交流損失特性に与える影響を明らかにした。

三　澤　慎太郎（雨宮教授）「高温超伝導誘導同期機の全超伝導化に向けた固定子巻線に関する基礎研究」

直接駆動車載システムを目標とした高温超伝導誘導同期回転機について、高効率化ならびに高トルク密度化のための高温超伝導固定子巻線に関する実験的・解析的研究を実施した。その結果、大電流容量

化ならびに低交流損失化に関する指針を明確化した。

出　原　　　歩（和田教授）「オンチップ電源供給ネットワークの電圧変動を反映したLECCS-core モデルの構築」

LSI の電源系高周波電流をシミュレートするEMC マクロモデル（LECCS-coreモデル）の内部等価電流源を電源電圧変動を反映して補正することで正確な電源系高周波電流を再現し、またサブブロック単位で構築したモデルを統合して計算コストを下げる手法について提案した。

風　岡　諒　哉（和田教授）「双方向AC-DCコンバータを用いた交流ネットワークの電力フロー設計」

双方向AC-DCコンバータを用いた交流ネットワークを設計し、電力の送り手と受け手が協調動作するためのモデルとして、スイッチング回路の等価回路表現を導出した。また、電力フローを明確化するためにテレゲンの定理に基づく電力フローについて検討を行った。

西　本　太　樹（和田教授）「パッケージ受動配線系及び平面アンテナの電磁現象表現に重点を置いた等価回路」

LSIパッケージ等の共振時の電磁エネルギーから等価回路キャパシタンスとインダクタンスを導出し、さらに低周波における励振インダクタンスを定義して少ないモード数で収束する等価回路を示し、その応用として2周波共用平面アンテナのインピーダンス整合例を示した。

吉　田　敬　祐（和田教授）「導体球と導体線から成るメタマテリアルの等価回路モデル」

導体球を導体線により接続する構造のメタマテリアルについて、マテリアル内の空間結合や外部との結合を考慮した等価回路をMaxwell方程式から系統的に導出する方法を提案した。また具体的な構造に対して、接続を変化させた場合の現象について検討を行った。

須　藤　正　人（松尾教授）「単純化磁区構造モデルとその集合を用いた電磁鋼板磁化過程表現に関する研究」

単純化磁区構造モデルを用いて電磁鋼板の磁区 / 結晶粒スケールの磁化過程解析を行い、基本的な磁化特性を明らかにした。次に、単純化磁区造モデルの集合によりマクロな磁化過程解析を行う手法を開発し、電磁鋼板の磁気特性を定性的に表現することを可能にした。

光　岡　隆　平（松尾教授）「ベクトルプレイモデルを用いた鉄芯材料交流磁気特性の有限要素モデル化に関する研究」

プレイモデルにて表現される異方性ベクトルヒステリシス関数の微分を導出し、有限要素磁界解析に応用した。動的渦電流損係数の導入により電磁鋼板の高精度な交流ベクトル磁気特性表現を得た。鉄芯コイルの磁界解析ではニュートン法の実用的な収束特性を得た。

工学研究科　電子工学専攻

小　森　祥　央（鈴木教授）「$Pb_{1-y}Bi_ySr_2Y_{1-x}Ca_xCu_2O_{7+\delta}$ 単結晶エピタキシャル薄膜の成長とその基礎的物性に関する研究」

高温超伝導体 $Pb_{1-y}Bi_ySr_2Y_{1-x}Ca_xCu_2O_{7+\delta}$ のエピタキシャル薄膜を高温アニール法により世界で初めて

育成することができた。超伝導は x > 0.3 で発現し、x = 0.37、y = 0.28 で最高の超伝導転移温度である 50 K を得た。これまでに報告されている 90K を超える超伝導転移は不純物相の Bi2212 に由来する可能性が高いことを示した。

平　山　伸　夫（鈴木教授）「Bi 系固有ジョセフソン接合テラヘルツ光源における発振周波数の温度・バイアス依存性」

$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ からのテラヘルツ波発振について、素子直下の超伝導基板の有無によって発振周波数の温度依存性が異なることを示した。このことは、発振周波数の温度依存性がロンドン侵入長の温度依存性に由来し、バイアス電流依存性は実効的な温度の変化に起因することが分かった。

水　野　孝　昭（鈴木教授）「Bi 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合のスイッチング確率分布に関する研究」

高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ および $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ に含まれる固有ジョセフソン接合についてスイッチング確率分布を 0.4 K まで測定したところ、巨視的量子トンネルを示す振る舞いについて、物質間の系統的な違いが観測され、電荷結合と呼ばれる接合間相互作用の存在を示す結果が得られた。

水　田　慎　吾（鈴木教授）「テラヘルツ波発振する $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ メサ構造内部における局所的温度上昇」

$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ メサ構造からテラヘルツ発振が観測される条件で、温度分布の数値計算を行い、素子上部に厚い Ag 電極を持つ素子からは発振しない現象が、温度分布の違いに由来することを明らかにした。また、素子に複数の電極を作製したとき、温度分布が異なる電流注入の条件を見いだした。

安　友　佳　樹（後藤准教授）「過酷環境下における能動素子としての窒化ハフニウムフィールドエミッタアレイの動作特性」

窒化ハフニウムを陰極に持つフィールドエミッタアレイを製作し、低温や放射線照射に伴う動作特性の変化を評価した。-130℃の低温や陽子線・α 線照射後でも電子放出特性は室温・照射前と変わりないことを確認した。新たに電極を付加したデバイスを試作し、周波数混合器としての動作を確認した。

宮　川　　　豪（後藤准教授）「貴金属負イオン注入法を用いたナノ粒子形成による二酸化チタン光触媒の高効率化に関する研究」

負イオン注入により Ag や Pt ナノ粒子を表面下に形成したルチル TiO_2 結晶は、蛍光灯光下での光触媒性能が 2 ～ 3 倍に増大した。表面直下に Ag ナノ粒子を有するガラス基板上に TiO_2 膜を成膜してその光触媒性能を評価した結果、表面プラズモン共鳴に伴う電界増強効果で光触媒効率が向上することを確認した。

秋　山　知　英（酒井准教授）「二酸化チタン薄膜を用いた多層型光電気化学効果セルの設計と作製」

二酸化チタン薄膜と可視光応答層の組み合わせによる光電気化学効果セルを作製した。二酸化チタン薄膜成膜において、スパッタリングプロセス時の窒素ガス混入量により窒素ドープ量を調整し、紫外光から可視光の領域での光吸収プロファイル制御により光電流と水素発生量の増大を確認した。

平　岡　　　悠（酒井准教授）「大気圧プラズマ中によるN_2H_4生成とフレキシブル透明導電膜のための銀粒子フラクタル状構造形成」

大気圧プラズマによりアンモニアガスからヒドラジンを生成し、さらに銀粒子還元析出に応用した。ヒドラジンの生成量を絶対値として紫外吸収分光法により測定し、その気流を硝酸銀水溶液の還元処理に適用したところ、フラクタル状微小構造として銀が析出して透明性と導電性が同時に確保できた。

奥　田　貴　史（木本教授）「SiC バイポーラトランジスタの増幅率向上を目指した p 型 SiC のキャリア寿命および AlGaN/SiC ヘテロ接合の評価」

SiC バイポーラトランジスタのベース領域に相当する p 型 SiC 中のキャリア寿命を、光導電減衰測定により調べ、アクセプタ密度依存性や温度依存性を明らかにした。次に、エミッタに AlGaN を用いたヘテロ接合の電流―電圧特性を調べ、界面制御を施したヘテロ接合では良好な電子注入が生じていることが分かった。

丹　羽　弘　樹（木本教授）「超高耐圧 SiC 素子を目指した接合終端構造の設計および衝突イオン化係数の測定」

SiC パワーデバイスにおける様々な接合終端構造を考案し、数値計算と実験を行って、高電圧印加時の電界集中を有効に緩和できる構造を見出した。この構造を適用することで、20kV 超級の高耐圧 SiC PiN ダイオードを実現した。さらに、独自の素子を用いることで高電界時の衝突イオン化係数の精密決定に成功した。

森　　　誠　悟（木本教授）「Ge ナノワイヤの伝導帯の電子状態および電子輸送特性の解析」

次世代 CMOS 素子のチャネル材料として有望な Ge ナノワイヤのバンド構造を強束縛近似法により計算し、電子の有効質量や状態密度のナノワイヤ形状、結晶方位依存性を明らかにした。さらに、フォノン散乱を考慮してナノワイヤ中の移動度および MOSFET 特性を解析し、素子応用に適するサイズと方位を決定した。

池　田　尚　弘（山田准教授）「カーボンナノチューブ FET のチャネル内局所欠陥評価及び多角的評価に向けた試料構造作製」

高周波静電気力顕微鏡と走査ゲート顕微鏡を用いて、カーボンナノチューブ内の構造欠陥部における電気応答の評価を行った。そして、構造欠陥部の電気応答がどのような原子構造の欠陥に由来するのかを透過電子顕微鏡で評価するための試料構造を提案し、その作製を試みた。

北　浦　宏　祐（山田准教授）「FM-AFM を用いた有機超薄膜における分子双極子と表面電位の相関に関する研究」

原子間力顕微鏡を用いて有機超薄膜を観察し、双極子をもつ分子の配向および層数と表面電位の相関を解明することに成功した。さらに、分子の配向や層数から表面電位を予測可能であることを示した。また、表面電位の起源について議論を行い、電位を与える支配的な要因を特定した。

木　村　知　玄（山田准教授）「点接触電流イメージング原子間力顕微鏡による有機半導体薄膜の局所電気特性評価」

有機半導体薄膜のナノスケール電気特性評価に向けた点接触電流イメージング原子間力顕微鏡（PCI-AFM）の装置開発を行い、その PCI-AFM を用いた測定により特定のグレインおよびグレイン境界に

おける電気特性への影響の可視化、評価を行った。

宮　本　一　輝（山田准教授）「原子間力顕微鏡を用いた微少液滴堆積技術の開発とその応用」

原子間力顕微鏡による微少液滴堆積技術を用いた各種分析、素子作製への応用のために、機能性微粒子の堆積量制御を行う新規手法を開発するとともに、微少イオン液体液滴の物性評価とそれを用いた有機薄膜トランジスタの作製を行った。

山　岸　裕　史（山田准教授）「極薄ゲート絶縁バッファ層への分子ドーピングによる有機トランジスタのデバイス特性制御」

有機トランジスタのゲート絶縁膜表面修飾に用いられる高分子絶縁バッファ層に対して分子ドーピングを行う手法を開発し、本手法でデバイスのしきい値電圧制御が可能である事を示すと共に、導入されたドーパントがキャリア挙動に対して与える影響の評価を行った。

井　上　航　平（川上教授）「過渡レンズ法を用いた窒化物半導体における内部量子効率の定量解析」

注入キャリアに対する生成光子数の比（内部量子効率）の定量は、発光素子の特性を決める重要なパラメータである。従来その測定は困難とされてきたが、過渡レンズ法とその数値解析により定量的な評価が可能であることを、紫外～可視発光材料として重要な窒化物半導体を用いて示した。

重　森　崇　志（川上教授）「二探針近接場光学顕微鏡を用いたプラズモニック導波路の基礎検討」

二探針近接場光学顕微鏡（DSNOM）の装置構成に検討を加えることにより、nm スケールでの試料およびプローブ走査の安定性を向上し、歪みの少ない像を得ることに成功した。さらに、DSNOM による測定の対象としても期待される、プラズモニック導波路による光分波器の設計を行った。

高　木　義　徳（川上教授）「長波長発光を目指した SCAM 基板上 InGaN 系量子井戸の特性解析と結晶成長」

窒化物半導体によって赤色など長波長発光を目指す上で、GaN を下地とした従来構造に対して、InGaN に格子整合する新規 SCAM 基板を用いることが優位であることをシミュレーションにより明らかにした。その構造を実現すべく結晶成長技術の開発を行い、高品質な InGaN を得る指針を得た。

林　　　佑　樹（川上教授）「表面ステップ制御による AlGaN/AlN 量子細線の作製と評価」

微傾斜サファイア基板上に結晶成長した AlN 薄膜の表面構造を実験的に明らかにし、物理的背景を弾性理論により説明した。その AlN 表面構造を利用して AlGaN 量子細線構造を試作した。偏光特性や発光の内部量子効率を測定し、発光素子としての高いポテンシャルを明らかにした。

川　本　洋　輔（野田教授）「フォトニック結晶による広帯域・高効率光トラップに関する研究 ―高効率薄膜太陽電池の実現に向けて―」

高効率薄膜 Si 太陽電池の実現に向けて、光吸収の増大を図るべく、フォトニック結晶のバンド端共振モードの利用を検討した。Si 膜厚 400nm の薄膜 Si 太陽電池に、感度解析法を用いて設計したフォトニック結晶構造を導入することで、太陽光に対する光吸収量を 2 倍程度増大させることに成功した。

芝　原　達　哉（野田教授）「太陽光熱光発電に向けた狭帯域 Si 熱輻射光源に関する研究」

Si フォトニック結晶を用いて、太陽光熱光発電に応用可能な近赤外波長域のみで熱輻射する光源を設

計し、空気孔型では 0.8 ～ 1.8 μm、ロッド型では 0.8 ～ 1.2 μm 程度の狭帯域な熱輻射が理論的に得られた。また、前者については実験的検討も行い、理論計算と対応する形状の熱輻射スペクトルを得ることに成功した。

瀬古口　　洋（野田教授）「2 次元フォトニック結晶共振器の損失原因究明と高 Q 値化に関する研究」

2 次元フォトニック結晶を利用したナノ共振器の損失の主要因と考えられる光散乱損失と光吸収損失について、定量的検討を行い、両者が同程度の影響をもつことを見いだした。さらに共振器表面の水分、酸化膜を除去することにより吸収損失を低減し、Q 値 900 万をもつナノ共振器を実現して、従来の記録を更新した。

西　本　昌　哉（野田教授）「MBE 法による空気孔埋め込み 2 次元フォトニック結晶の形成　―大面積コヒーレントレーザ実現に向けて―」

従来のフォトニック結晶レーザにおいて、高出力化を阻害していたフォトニック結晶層と上部層との融着界面に発生する界面準位による光の吸収や熱の発生を回避するため、結晶成長による上部層の形成を試み、フォトニック結晶空気孔形成後に MBE 法によって空気孔を保持したまま上部層を積層する技術の開発に成功した。

彦　山　和　久（野田教授）「フォトニックナノ共振器・量子ドット結合系における発光制御メカニズムの解明と新規制御手法の提案」

フォトニックナノ共振器の Q 値制御による量子ドットの発光制御について、その制御メカニズムを解析的に明らかにすることで、制御構造の設計指針を明快に示すことに成功した。さらに、共振器のモード体積を制御するという新たな概念を考案し、これにより、Q 値制御によるものとは異なる発光制御を実現できることを示した。

大　谷　武　裕（北野教授）「メタマテリアルにおける狭帯域透明化現象の動的制御」

メタマテリアルに可変容量ダイオードを導入することで、狭帯域透明化現象を動的に制御する方法を研究した。電磁界シミュレーションに基づき設計したメタマテリアルを実際に作成し、連続波の振幅変調と電磁波の保存と再生の実験的実証をおこなった。

小　川　和　久（北野教授）「3 状態系における幾何学的位相の測定」

本研究では高次元の幾何学的位相について、その直観的描像を構築し、そこから幾何学的位相の新たな非線形変化を予想した。さらに 2 光子の偏光状態を用いて 3 状態系における幾何学的位相を測定し、予想した非線形変化を観測することで構築理論を実証した。

西　　　達　也（北野教授）「$^{171}Yb^+$ $^2S_{1/2}$ ― $^2D_{3/2}$ 時計遷移用狭線幅レーザーの開発と量子跳躍観測」

同位体 171 の Yb^+ は磁場に鈍感な時計遷移をもち、光時計の基準として有望である。 時計遷移を駆動する半導体レーザーを、高フィネス光共振器の共鳴に対して線幅 11 Hz に狭窄化した。第 2 高調波を発生させて単一 $^{171}Yb^+$ に照射し、時計遷移駆動にともなう量子跳躍を観測した。

原　　　好　広（北野教授）「Ba^+ 冷却用レーザーの周波数安定化」

光時計の基準として有望な Ba^+ を長時間冷却しつづけるために、冷却用レーザーを周波数安定化した。波長 650 nm 冷却遷移では、近傍にある沃素分子の吸収線を modulation transfer 分光でドップラー効果

なく検出し、レーザーを安定化して基準とした。これに周波数差を与えて位相同期させた冷却用レーザーを実現した。

光・電子理工学教育研究センター

今　中　浩　輔（高岡教授）「炭化水素多原子分子イオンビームの生成と固体表面照射効果の研究」

多原子分子イオンとしてテトラデカン（$C_{14}H_{30}$）のフラグメント（C_3H_7、C_6H_{13}、$C_{12}H_{25}$）イオンを分離し、シリコン基板やガラス基板に照射して、固体表面照射効果の入射エネルギー依存性や分子量依存性を明らかにした。さらに、イオンビームミキシングによるDLC薄膜形成やイオンビームエッチングによる表面改質を室温で行った。

大　村　祐　貴（高岡教授）「多原子分子クラスターイオンと固体表面原子との相互作用に関する研究」

水クラスターイオンやエタノールクラスターイオンをマイカ基板やシリコン基板などに照射し、クラスターイオンと固体表面原子との相互作用をXPS測定などによって明らかにした。また、AFMによる原子像観察に成功し、多原子分子クラスターイオン特有の照射効果を明らかにした。

福　島　大　貴（高岡教授）「酸素クラスターイオンビーム援用蒸着法による酸化亜鉛薄膜の作製と特性評価に関する研究」

酸素クラスターイオンビーム援用蒸着法によって低基板温度で、低損傷な酸化亜鉛薄膜の作製に成功した。また、電気的特性、光学特性、光触媒特性などの特性評価を行い、優れた透明導電性や高活性な触媒機能を持った酸化亜鉛薄膜を得ることができた。

山　口　英　樹（高岡教授）「水クラスターイオンのサイズ分離・分析と機能探索に関する研究」

純水や食塩水を用いて水クラスターを生成し、サイズ分離・分析を行った。また、ガスバブリング法によって炭酸ガスの水和クラスターの生成に成功した。さらに、生成した水和クラスターをイオン化・加速して固体表面に照射して、クラスターイオン特有のナノ反応場を明らかにすることができた。

赤　岩　和　明（藤田教授）「Snドープしたコランダム型構造酸化ガリウム薄膜の電気特性に関する研究」

サファイア基板上のコランダム型酸化ガリウム薄膜に対する電気伝導制御を目指し、Snドーピングによりn型結晶が得られることを実証した。しかし母体結晶の不純物の影響が大きく10^{19} cm^{-3}台のドーピングに限られるという課題が残され、博士後期課程においてこの問題に対する研究を継続することにした。

原　田　大　資（藤田教授）「Cross-sectional scanning electron microscopy of boron-diffused p^+-layer of textured crystalline silicon solar cells（テクスチャ構造を有する結晶シリコン太陽電池におけるボロン拡散 p^+ 層の走査型電子顕微鏡による断面評価）」

Energy Centre of the Netherlands（ECN）に滞在して行った研究をまとめたものである。n型Si基板太陽電池の断面SEM観察におけるコントラストの起因、加速電圧の影響に考察を加えて、pn接合深さを求める手法を実証し、テクスチャ構造太陽電池における接合深さの局所分布を明確にした。

情報学研究科　知能情報学専攻

Denny Cahyadi（黒橋教授）「Bilingual Terminology Acquisition from Keyword Lists Using Constrained HMM and a Pivot Language（制約付き HMM とピボット言語を用いたキーワードリストからの対訳用語抽出）」

科学技術論文から二種類の言語で書かれたキーワードリストペアを抽出し、そこから制約付き HMM によりキーワード対訳を高精度に獲得した。さらに本手法で獲得された日英および中英のキーワード対訳から、英語を中間言語とすることで、日中のキーワード対訳も獲得した。

石　川　恵理奈（松山教授）「提示コンテンツのデザイン構造を用いた視線運動の意味理解論文タイトル」

本研究では、多数のコンテンツが表示されたディスプレイを見ている人物の注視行動のモデル化法として，視線運動のダイナミクスに基づいた構造を持ち，コンテンツの意味的性質を各ノードのラベルとして持つような注視行動の木構造表現を提案し，この木構造表現から，吟味や比較といった意味を持つ視線パターンを抽出する手法を考案した。

加　畑　博　也（松山教授）「電力カラーリング：複数電源の分散協調制御アルゴリズム」

複数電源－電気機器間の電力授受を協調的に制御する「分散協調型電力カラーリング」の実現法として、複数電源の内１台を電圧制御、他の電源を電力制御と役割分担することで、電気回路としての安定性を保ちつつ、各電源に指定された電力供給機能を実現する手法を提案した。

山　田　祐　輔（松山教授）「生活行動と家電電力消費パターンの相互変換アルゴリズム」

家庭内に設置された家電群の電力消費パターンと、人間の生活行動パターンとの間の相互変換を目的とし、特定の個人の生活を対象とした場合の相互関係モデル、モデルパラメータの学習法、電力消費パターンからの生活行動推定法、生活行動からの電力消費ハ゜ターン生成法を提案した。

湯　浅　健　史（松山教授）「単一電源環境におけるオンデマンド型電力制御システムの実現と評価」

家庭・オフィス・工場といった電力需要家において、生活・活動の質を維持しながら、予め指定された瞬時電力・積算電力の上限値を保証する、オンデマンド型電力制御システムを提案し、単一電源環境における消費電力調停アルゴリズムの設計、開発、評価を行った。

情報学研究科　通信情報システム専攻

上　山　雄　一（吉田教授）「マルチユーザ MIMO における伝搬路線形予測手法の実測伝搬路への適用に関する研究」

マルチユーザ MIMO で重要となるプリコーディングに用いる伝搬路推定精度の改善に取り組んだ。伝搬路推定精度の改善のために伝搬路線形予測手法を導入し、実測の屋外伝搬路データを用いてマルチユーザ MIMO 伝送特性が改善されることを明らかにした。

熊　川　成　正（吉田教授）「自律分散無線リソース制御の基地局連携 MU-MIMO 伝送への適用」

地理的に離れて設置された基地局アンテナ群が連携して MU-MIMO 伝送を行う際の、送信電力や周波数チャネルなどの無線リソース制御法を検討した。特に、基地局アンテナやユーザ端末をある程度の

範囲で自律分散制御する手法を検討し、その有効性についても評価した。

宮　越　　　淳（吉田教授）「多段協力通信システムのソフトウェア無線機による実装と伝送特性に関する研究」

ソフトウェア無線機を用いてマルチホップ協力通信システムを試作し、フェージングエミュレータを用いた10ホップ伝送実験と、屋外3ホップ伝送実験を通じて、伝送特性を評価した。結果から、協力通信によりエンドツーエンド伝送特性が改善することを確認した。

大　田　智　也（守倉教授）「ヘテロダインマルチバンドMIMO受信機におけるアナログ回路の不完全性推定」

コグニティブ無線のためのヘテロダインマルチバンドMIMO受信機において、フィードバックループにおけるアナログ回路の不完全性を補償する方法を提案した。ベースバンドAGC増幅器を備えたヘテロダインマルチバンドMIMO受信機を更に提案した。

三軒谷　勇　貴（守倉教授）「WLANにおける仮想連続CWmin制御の研究」

IEEE 802.11のパラメータであるCWmin値を実数値に適用可能なCWmin制御方式を提案し、理論検討を含めて特性を評価した。また、隠れ端末存在下の無線LAN中継NWでフレームロスを低減し伝送速度を向上可能なCWmin制御方式を提案した。

田　谷　昭　仁（守倉教授）「基地局協調通信のためのターボ符号化MIMO受信機」

基地局協調型MU-MIMOにおけるチャネル情報のフィードバック量を削減するためのプリコーディング法と、それに伴う信号干渉に対処できる対数尤度比を用いて繰り返し復号を行う受信機を提案した。また、これら提案方式の特性を計算機シミュレーションにより評価した。

花　田　光　平（守倉教授）「Coordinated Multibandwidth Channel Selection and Association for Next Generation Wireless LAN（次世代無線LANのための基地局連携アソシエーション・チャネル選択）」

IEEE 802.11acを用いた通信において、自分たちが管理することの出来ない基地局が存在する状況を想定し、自分たちが管理している複数の基地局を集中制御することにより、集中制御された基地局群の総スループット向上が可能なことをゲーム理論的解析により示している。

三　村　智　彦（守倉教授）「Mechanism Design for Multi-Operator Heterogeneous Networks（オペレータ共用ヘテロジニアスネットワークのためのメカニズムデザイン）」

複数のモバイルネットワークオペレータが基地局設備や周波数帯域を共用する場合について、無線リソーススケジューリング法をゲーム理論及びメカニズムデザインの概念を用いて提案した。また、提案法のトータルスループット改善効果を理論評価により明らかにした。

植　田　一　暁（高橋教授）「ツリー型コンテンツセントリックネットワークにおける経路情報集約方式」

コンテンツセントリックネットワークでは、コンテンツ名を用いてルーチングを行うため、経路情報の増加が課題である。本稿では、コンテンツ名のプレフィックスやコンテンツの複製配置を用いた集約手法を提案し、シミュレーションで効果を確認した。

木　田　明　宏（高橋教授）「センシング情報からのソーシャルな関係性推定手法の研究」

人々に関するセンシング情報から関係の強さを定量化し、サービス選出に応用することが期待されている。本論文では、センシング情報から関係の強さを自動的に推定する関係性形成システムを提案し、実データにより有効性を検証した。

真　木　尚　也（高橋教授）「A Method of Traffic Reduction with Combination of Content in Peer-Assisted Content Delivery Networks（ピア補助型コンテンツ配信におけるコンテンツの組み合わせを用いたトラヒック制御）」

ピア補助型コンテンツ配信において、トラヒックの局所化が期待されるコンテンツを利他的ユーザがダウンロードすることを促すため、コンテンツを組み合わせて1コンテンツと同一の価格で提供する方式を提案した。シミュレーションにより提案方式の有効性を示した。

山　下　雄　規（高橋教授）「遅延耐性ネットワークにおける消失訂正符号を用いた情報共有プロトコル」

移動端末のすれ違い通信を利用してデータ転送を行うDTNでの情報共有について、データの分散配置を行う際に、Erasure codeを使用する手法を提案し、シミュレーションにより大容量データ共有時のデータ取得の遅延時間を短縮できることを確認した。

ンウンギ　バシリサ（高橋教授）「Privacy Issues in Social Networking Services（ソーシャルネットワーキングサービスにおけるプライバシー問題に関する研究）」

本論文は、ソーシャルネットワーキングサービスにおけるプライバシー情報に関する未解決の問題について論じている。特に、リスクに関する知識とユーザ行動との関係をモデル化し分析した。さらに、性別による違いについても検討を行った。

粟　野　皓　光（佐藤（高）教授）「統計的機械学習によるランダムテレグラフノイズのモデルパラメータ推定」

微細トランジスタの信頼性に影響するランダムテレグラフノイズの解析手法を提案した。一般的に雑音源は複数存在し、独立に分離・解析を行うことは困難である。本研究では統計的機械学習を応用し、観測信号を説明できるように雑音源を推定することで、複数雑音の分離を実現した。

池　辺　　　卓（佐藤（高）教授）「CMOS集積回路のための高効率インターリーブ型太陽電池の研究」

単一のCMOSプロセス基板上に集積できる高効率の太陽電池回路を提案した。種類の異なる2種の直列接続太陽電池とチャージポンプ機能を組み合わせることで寄生バイポーラトランジスタによる損失を回避し、従来手法と比較して約2.3倍の出力電力を得られることをシミュレーションで確認した。

川　島　潤　也（佐藤（高）教授）「フリップフロップに着目した最小動作電圧の高速予測手法と回路消費エネルギー最小化設計手法の提案」

回路の極低エネルギー動作に向けて、回路中のFlip-Flopに着目した最小動作電圧の高速な予測手法と最小動作電圧の改善手法を提案した。試作チップの測定により、回路の最小動作電圧を約10mVの誤差で予測できること、およびトランジスタサイズ調整による最小動作電圧の改善を実証した。

森　下　拓　海（佐藤（高）教授）「共役勾配法による電源回路網解析の高速かつ省メモリなGPU実装」

大規模電源回路網解析の高速化を目的として、共役勾配法のGPU実装を行った。また、巨大な疎行

列をGPUで効率良く扱うためのデータ構造を提案した。実際に直流解析および交流解析を行い、CPU実装と比べて最大で17倍の高速化が達成されたことを確認した。

三　木　淳　司（小野寺教授）「オンチップ評価回路を用いたNBTI劣化回復特性の統合的モデル化」

PMOSFETの経年劣化現象であるNBTIには、ゲート電圧印加による特性劣化と、ゲート電圧除去による特性回復が生じる。65nmプロセスにて劣化特性と回復特性の高速測定が可能なオンチップ評価回路を開発し、劣化現象と回復現象の統合的モデル化を行った。

川　中　啓　敬（小野寺教授）「クロックデータリカバリ用定常発振型ゲーテッドVCO」

高速光通信において、PLLよりもはるかに短かい時間でクロック同期が可能なゲーテッドVCOが注目されている。ジッタ特性と最大動作速度を両立する回路を提案し、設計パラメータと性能の関係について検討した。設計実験により提案回路の有効性を示した。

榎　並　達　也（小野寺教授）「伝達特性の解析モデルを用いたインダクティブピーキング回路の設計手法」

インダクティブピーキングを用いた高速回路について、パルス応答を重ね合わせるモデルによって周波数特性とアイダイヤグラムにおけるジッタ、電圧開口の関係を明らかにした。これにより、複数のインダクタヲ用いた回路でも系統的な設計を可能にした。

小宮山　敦　史（小野寺教授）「適用箇所に応じたフリップフロップの選択による回路の低消費電力化」

フリップフロップは、その構造によって消費電力や遅延時間が異なる。回路中でフリップフロップが使用される箇所に応じて適切な構造のフリップフロップを適用することにより消費電力を削減する手法を開発した。商用プロセッサを用いてその効果を確認した。

陳　　世　鵬（小野寺教授）「信号波形の多様性を考慮した遅延解析の高精度化」

信号遅延解析の精度はその解析に使用する信号波形に依存する。回路中で使用される基本セルの入力信号波形を正確に表現する信号波形モデルを開発した。開発したモデルを65nmプロセスで設計した回路に適用して遅延解析を行い、解析精度の改善を確認した。

伊　神　皓　生（佐藤亨教授）「壁面多重反射波を利用した仮想マルチスタティックUWBレーダによる任意運動目標イメージング」

室内監視システムへの応用を想定したUWBレーダによる形状推定アルゴリズムの開発を行った。壁面による送受信アンテナの鏡像を用いて仮想的なマルチスタティックレーダを構成することにより、任意の運動を行う目標の高精度な画像化を実現した。

情報学研究科　システム科学専攻

井　本　康　裕（石井教授）「二次元顕微鏡画像からの三次元ベイズ超解像法の提案」

二次元顕微鏡画像からボケの大小をもとに焦点からのズレを表す深さ情報を推定する手法を提案した。特に、顕微鏡画像の特性を生かして背景領域と細胞領域の推定を同時に行うことで深さ輝度の両方でエッジが一致した画像超解像を可能にした。

田　中　　　匠（石井教授）「ベイズ推定を用いた動き補正 X 線 CT 画像再構成法の研究」

通常の X 線 CT では対象物の静止を仮定するため、呼吸・拍動などの対象物の動きがある場合、アーティファクトが生じる。そこで対象物が徐々に変形すると想定し物質クラスの事前知識を用いたベイズ CT 再構成アルゴリズムを導出することで、アーティファクトを抑えた。

中　野　太　智（石井教授）「状態非依存の方策を用いた新しい強化学習手法の提案」

強化学習では高次元状態空間をもつ問題に対しては、学習に必要となるサンプル数が膨大になる問題があった。本研究では状態に依存せず時刻のみに依存する方策を用いることを提案し、初期状態が固定された問題に対しては高速な学習が可能であることを示した。

李　　　玉　哲（石井教授）「Persons tracking based on color and depth images（カラーおよび深度映像に基づく人物追跡）」

カラーおよび深度映像の情報を用いて画面上複数歩行者の位置を追跡する方法を提案した。異なる性質を持つ特徴量を統合するために、クラスタ化した度数分布特徴を特徴量群ごとに構成したことで、追跡性能が安定した。

王　　　潔　心（石井教授）「An exproration of developing learning robots based on Android platform（アンドロイドプラットフォーム上の学習ロボット開発について）」

アンドロイドプラットフォーム上で、強化学習アルゴリズムによる非線形制御方策学習を行うロボットの実現可能性を検討した。ロボットを内製し、カートポールモデルにおけるアルゴリズムを MATLAB で実装した。バネつきカートポールモデルを新たに提案した。

細　川　　　守（松田教授）「下顎骨再建術における形状評価指標を備えた術前計画システム」

下顎骨再建術における手術法の定量的表現と術前計画支援を目的として、医師の知見に基づく形状評価指標を与えると共に、三次元画像の直接的な編集を可能とする術前計画システムを提案した。症例 CT データを用いて提案指標の有効性を確認し、試作システムによる計画例を示した。

山　田　浩　輝（松田教授）「医用三次元画像を対象としたジェスチャ入力による任意断面操作手法」

手術室中の執刀医による医用三次元画像の対話操作の実現を目指して、ジェスチャ入力による任意断面操作モデルを提案した。被験者実験を通して、任意断面の位置・姿勢の制御には手首の操作に基づくモデルが、姿勢のみの制御には手指の操作に基づくモデルが有効であることを示した。

エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

大　石　晃太郎（下田教授）「知的生産性評価のための客観的集中指標の開発」

知的生産性の定量的な評価手法として、集中に着目した評価指標を開発した。本手法では２種類の認知タスクの応答時間から全作業時間に対する集中時間の比率を求める。本指標は習熟の影響を受けないため、環境変化の知的生産性に対する影響を従来よりも短期間で評価できる。

エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻

嶋　田　祥　宏（中村（祐）教授）「大型トカマク装置 JT-60U におけるマイナーコラプス時のプラズマ電流時間発展」

マイナーコラプスは、MHD 不安定性により温度の損失が起こり、電流のクエンチは発生するが電流の減少が途中で止まり、再び元のプラズマ電流まで回復する現象である。本研究では、大型トカマク装置 JT-60U におけるマイナーコラプスの機構を、電流の拡散方程式、並びに MHD 平衡の時間発展コード DINA を用いて解析し、電子温度分布の時間変化の重要性を示した。

橋　本　紘　平（中村（祐）教授）「ヘリオトロン J における径方向多チャンネルプローブを用いた周辺プラズマ計測」

径方向多チャンネルプローブをヘリオトロン J 装置に導入し、計測を行った。その結果、最外殻磁気面外側で磁場構造の違う位置におけるイオン飽和電流分布に違いがあることが分かった。さらに、静電的特徴を有する 10 ～ 30 kHz の揺動について相関長が磁気面外側で短くなっていくことを示した。また、輸送を生成する揺動の機構が、場所により異なっている可能性を示した。

花　園　雄　三（中村（祐）教授）「3 次元 MHD 平衡計算コード HINT2 における境界条件の影響」

3 次元 MHD 平衡計算コード HINT2 において、計算境界が完全導体壁であるという仮定の代わりに、より現実的な境界条件として、計算境界の磁場をビオサバール則に基づき計算するように改善した。その結果、プラズマの中心付近では従来と大きな違いは見られなかったが、プラズマ中心から離れた周辺領域では有為な差が見られ、HINT2 を磁気計測などに応用する場合には新しい境界条件が必要になることが明らかになった。

藤　田　直　己（中村（祐）教授）「ヘリオトロン J における O-X-B モード変換を用いた EBW 加熱のレイトレーシング」

ヘリオトロン J プラズマにおける O-X-B モード変換を介した電子バーンシュタイン波の加熱解析を行った。O-X 変換アルゴリズムを導入し、変換効率窓の描図、及び最適入射角の自動探索を行い、最適入射を行った場合での電子バーンシュタイン波の加熱吸収分布について解析を行った。その結果、現在のヘリオトロン J の ECH 加熱装置を用いて、O-X-B 変換を介した電子バーンシュタイン波加熱が可能であることを示した。

山　野　貴　之（中村（祐）教授）「MHD平衡を考慮したSDCプラズマの一次元輸送シミュレーション」

密度、温度分布の自己無撞着な時間発展をシミュレーションすることで LHD 装置の Super Dense Core（SDC）プラズマの輸送特徴を解析した。その結果、SDC プラズマ実験を完全には再現できなかったが、内部密度障壁の形成要因に関わる周辺領域の乱流輸送と中心部での新古典輸送の役割やヘリカル系高密度プラズマの輸送の特徴を明らかにした。

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

西　村　健太郎（土井教授）「相転移を利用した β-$FeSi_2$ ナノ結晶の作製と発光増強」

環境半導体として注目されている β-$FeSi_2$ の実用化のためには発光強度の増強が必要である。イオン

ビーム合成法で作製した試料に400～500℃の前アニールと800℃の後アニールを組合せて施すことでγ-$FeSi_2$→β-$FeSi_2$への相転移を起こさせ、発光強度を従来の3.6倍に向上させることに成功した。

何　　燁（白井教授）「Study on power system characteristics of DFIG wind generator connected with superconducting magnetic energy storage system（超電導エネルギー貯蔵装置を併設した二重給電誘導風力発電機の系統特性に関する研究）」

二重給電誘導発電機を用いた風力発電機の系統連系特性に関して、特に事故時の応動をシミュレーションにより解析評価した。特に、超電導エネルギー貯蔵装置を併設し、適当な制御を行う事で、系統事故時の不要な風力発電機の脱落を防ぐことを示し、必要な装置容量などを検討した。

藤　坂　拓　道（白井教授）「Cooling Property Improvement of Superconducting Wire with Cooling Fins　in Liquid Nitrogen（液体窒素冷却超電導線材の冷却フィンによる冷却特性の改善）」

超電導故障電流限流器など、超電導の相転移を利用した機器では、臨界電流値を超えた過電流通電特性とその冷却特性が重要となる。液体窒素冷却における超電導線材の沸騰冷却特性を改善するため、種々の冷却フィンを取り付け、その冷却特性改善効果について、実験と解析により検討を行った。

西　村　一　輝（白井教授）「Study on Characteristics of Power Fluctuation Compensation in Hybrid Offshore Wind and Tidal Turbine Generation System（風力・潮力ハイブリッド発電システムにおける出力変動補償に関する研究）」

風力発電と潮力発電を組み合わせた洋上ハイブリッド発電について、それぞれの出力変動特性を利用し、出力変動補償を行うことを目的として、適切な回路構成と制御を検討した。シミュレーションと小形模擬実験によって、その効果と出力変動の周波数の関係を示した。

山　中　大　輔（白井教授）「System Identification of Distribution System for Dynamic Stability Analysis（動態安定度解析のための負荷系統のシステム同定）」

能動的な制御特性を持つ負荷や分散型太陽光，風力発電システムを含む配電系統の動特性を評価するため、微小電力注入によるオンラインの応答特性から、誘導機負荷の割合を変化させた種々の負荷に対して動特性モデルを導出した。そのモデルを用いて負荷を模擬して、過渡応答シミュレーションを行い、実際の負荷での応答と比較、妥当性を示した。また、小形の実機模擬系統を製作しこれらを検証した。

樋　川　恭　輔（白井教授）「Heat Transfer Characteristics of Liquid Hydrogen and Current Carrying Properties of High-Tc Superconductors Cooled by Liquid Hydrogen（液体水素の熱伝達特性及び液体水素冷却高温超電導体の通電特性）」

液体水素冷却超電導機器の設計において、高温超電導体の過電流特性を明らかにするため、過渡加熱法MgB2線材の過電流特性を評価した。また、液体水素の熱伝達特性について、浸漬冷却および強制対流熱伝達特性を種々の圧力、温度（サブクール度）、流速に対して、実験により取得した。

村　上　嵩太郎（白井教授）「液体水素用熱線式流量計の基礎検討」

液送中の液体水素の流速を高精度に計測することを目的として、発熱体（マンガニン線）を強制対流により冷却し、その冷却特性から流速を求める流速計モデルを設計製作した。このモデルを実際の液体

水素流路に設置し、～ 5m/s の液体水素の流れで検証実験を行った。発熱体温度を一定にするように電流制御を行い、流速と加熱電流の関係を示した。

エネルギー理工学研究所

井　門　秀　和（長﨑教授）「三極管型熱陰極高周波電子銃用同軸共振空胴の開発」

熱陰極への逆流電子の抑制により出力電子ビーム特性の向上が期待される三極管型高周波電子銃のための同軸共振空胴を開発した。試作機の結果に基づいて固有モード解析により空胴形状を再設計して改良機を製作し、要求仕様を満たす高周波共振特性が得られた。

中　村　雄　一（長﨑教授）「ヘリオトロン J における電子密度揺動計測用 AM マイクロ波反射計の開発」

25-42 GHz 周波数帯域の電子密度揺動を計測する AM マイクロ波反射計システムを設計・構築した。ヘリオトロン J プラズマ実験において、磁気プローブやビーム放射分光法で計測された信号とコヒーレンスの高い高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性を観測することが可能となった。

橋　本　元　輝（長﨑教授）「グロー放電型慣性静電閉じ込め核融合装置の中性子ラジオグラフィへの応用」

小型で安全な可搬型中性子線源としての慣性静電閉じ込め核融合装置のラジオグラフィへの適用性を実験的に検討した。実用可能なコントラストと空間分解能の撮像が可能であることを示すとともに、必要な撮像時間や、撮像可能な対象物の厚さの制約等の課題を明らかにした。

荒　井　翔　平（水内教授）「ヘリオトロン J における Nd:YAG トムソン散乱計測のための散乱光分光システムの開発」

ヘリオトロン J プラズマ分布の時間発展を計測する Nd:YAG トムソン散乱計測装置開発において、散乱光分光システムの高性能化に関する研究を行った。これにより、輸送改善現象に伴うプラズマ分布の微細構造変化を解明するのに十分な精度を有する分光システムを開発できた。

釼　持　尚　輝（水内教授）「ヘリオトロン J における高時間分解 Nd:YAG トムソン散乱計測のためのレーザーシステムの開発」

ヘリオトロン J プラズマ分布の時間発展を計測する Nd:YAG トムソン散乱計測装置開発において、高時間分解計測のためのレーザー制御研究を行った。これにより、閉じ込め改善遷移にともなうプラズマ分布変化を観測するために十分短い時間間隔でのレーザー発振制御を実現した。

永　栄　蓉　子（水内教授）「ビーム放射分光計測によるヘリオトロン J プラズマ中の密度揺動分布特性の研究」

ヘリオトロン J プラズマの中心部から周辺部までの密度揺動空間分布を一放電で計測できるシステムを構築した。これにより、電子サイクロトロン電流駆動によるプラズマ電流制御が、高速イオン励起 MHD 揺動の発生位置並びに揺動強度の制御に有効であることを見いだした。

福　島　浩　文（佐野教授）「Heliotron J における TV トムソン散乱装置を用いた電子温度・密度分布計測」

Heliotron J の低トロイディシティ磁場における高強度短パルスガスパフを用いた中性粒子ビーム入射（NBI）加熱実験において、中心部での密度が $1.0 \times 10^{20}m^{-3}$ 以上の高密度となっていること（電子温度は 200 eV 近傍）をトムソン散乱計測によって実験的に検証し、閉じ込め改善の端緒を開拓した。

杉　本　幸　薫（佐野教授）「ヘリオトロン J におけるブートストラップ電流の磁場配位依存性」

ブートストラップ電流の駆動機構解明を目的とし、EC 波を磁場に垂直に入射する ECH 加熱実験で、磁場コンポーネントの１つのバンピネスに関する依存性を実験的に調べ、概ね理論予測と良く一致することを検証したが、特に低バンピネス条件では理論値との相違が大きくなり、径電場効果の可能性を考察した。

和多田　泰　士（佐野教授）「ヘリオトロン J における ICRF 加熱による高速イオンエネルギースペクトルの空間・磁場配位依存性に関する研究」

ヘリオトロン J における高速粒子閉じ込めの最適化を目的に、ICRF 加熱の少数イオン加熱モードの実験において磁場のバンピー成分による少数イオンのエネルギースペクトルおよびバルクイオン加熱を調べ、中心加熱の条件下でも高バンピネスの場合には高速イオンが局所的に高密度に分布することを検証した。

生存圏研究所

藤　田　俊　之（山本教授）「コンフィギュラブルな大気レーダー用ソフトウェア受信機の開発」

汎用ソフトウェア無線機（USRP2）とパソコンで構成される大気レーダー用ソフトウェア受信機を開発した。リアルタイム信号処理を C++ で実装したため、信号処理の開発・変更・再利用が容易である。フィールド測定により、受信機が高精度乱流観測に有用であることを示した。

浜　口　良　太（津田教授）「大気環境変動の統計解析システムの開発に関する研究」

大学関連携事業で開発されているデータ解析ソフトウェアには未整備である、多様な観測データ間の相関に関する統計検定、及び周波数特性解析ツールを開発した。本ツールをインドネシアの赤道上２地点の流星レーダー観測データに適用した結果、流星飛跡の高度分布がお互いに一致することが示された。

松　田　　　真（津田教授）「Development of a scanning Raman lidar for observing the spatio-temporal distribution of water vapor（水蒸気量の時空間分布観測のための走査型ラマンライダーの開発）」

一点における高度プロファイルを時間連続で計測してきたライダーを基礎に、水蒸気混合比とエアロゾルの鉛直断面分布を同時に計測する走査型ラマンライダーを開発した。実証観測では、地表面高度や土地被覆の違いを反映した、大気物質の空間不均一性の時間変動を捉えることができた。

石　井　宏　宗（山川教授）「プリアンプ一体型プラズマ波動波形捕捉受信器システムの小型化に関する研究」

プラズマ波動観測装置の電界計測系を構成するプリアンプと波形捕捉型受信器のアナログ ASIC によるワンチップ化に成功した。また、電界センサーのインピーダンス計測回路も同じチップ内に実現した上で、開発したチップが科学衛星での観測に十分な性能をもつことを実証した。

長　崎　　　陽（山川教授）「磁気セイル搭載用高温超伝導コイルの最適設計に関する研究」

磁気セイル宇宙機の高推力化を目的として、高温超伝導コイルの通電特性や熱安定性を数値解析および実モデルにて評価した。高磁気モーメント化という観点で、レーストラック型コイルが最適な形状であることがわかり、その結果、最大で従来の5.3倍の磁気モーメントの増加が得られた。

片　山　由美子（山川教授）「月周辺で観測される電子サイクロトロン高調波の研究」

月周辺で電子サイクロトロン高調波が観測されることを初めて示し、その励起条件を、衛星観測、線形分散解析、計算機実験によって明らかにした。特に、「月磁気異常の存在」と「月面の帯電」が励起につながる環境を形成していることを発見し、更にそのパラメータ依存性についても論じた。

趙　　　慶　華（大村教授）「Test Particle Simulation of Relativistic Electron Microbursts Induced by EMIC Waves in the Earth' s Radiation Belts（地球放射線帯におけるEMIC波による相対論的電子マイクロバーストのテスト粒子シミュレーション）」

電磁イオンサイクロトロン（EMIC）波トリガード放射と放射線帯の相対論的電子の相互作用のテスト粒子シミュレーションを行い、周波数上昇と外部磁場勾配の効果により、効率良くピッチ角散乱されて、大量の電子が極域へ降下することを理論的に解明した。

久　保　勇　太（篠原教授）「車両上部へのマイクロ波無線給電システムにおける送電アンテナの研究」

大型冷却冷凍トラックを想定したマイクロ波無線給電用送電アンテナを遺伝的アルゴリズムおよびFDTD法により設計した。電力密度平坦化および漏洩電磁波の最小化を目的関数とした計算機実験により、169素子の送電アンテナアレー・送電距離6 mにおいて受電面1.2 m角内への伝送効率67.5 %を達成した。

長　濱　章　仁（篠原教授）「Study on a Magnetron-based Microwave Power Transmission System for a Mars Observation Airplane（マグネトロンによる火星飛行探査機へのマイクロ波無線電力供給システムの研究）」

マイクロ波送電システムとして用いる位相振幅制御マグネトロンの位相同期外れに関する実験的研究を行い、注入信号電力の増強により同期外れを回避できることを示した。また飛行機に対する自動ビーム制御システム、飛行機の受電電力安定化を目指した受電電圧制御ループ回路を開発した。

長谷川　直　輝（篠原教授）「木質バイオマスリファイナリーを目指したマイクロ波照射装置の研究開発」

木質バイオマスからのバイオエタノール生成を目指したマイクロ波照射前処理装置を電磁界シミュレータで設計し、マグネトロン8台・マイクロ波総出力12 kWのパイロットプラント実証において装置の有効性を示した。また、木質由来の化成品精製を目指した広帯域電磁波照射装置を設計・開発した。

波多野　　　健（篠原教授）「24 GHz帯レクテナの開発およびMMIC化に関する研究」

マイクロストリップ線路の表面波モードの考慮、線路損失の評価、コネクタおよびダイオードのモデル化により、最大変換効率57.4 %の24 GHz帯レクテナの開発に成功した。また、MMIC化整流回路を実装した24 GHz帯無線電力伝送によるmW級小型モータの駆動デモ実験に成功した。

高等教育研究開発推進センター

Zhang Chi（小山田教授）「Visual Analytics System Toward Effective Development of Predictive Habitat Model for Migratory Fish（視覚的分析技術を使った回遊魚漁場予測のための好適度推定モデルの開発）」

回遊魚の好適度推定モデルの開発を支援するために、視覚的分析技術の構成要素として、因果関係の推測に有用な平行座標表示機能を開発した。海洋物理シミュレーション結果を使って開発されたモデルにより、漁獲量データを精度よく予測できることを確認した。

Kun Zhao（小山田教授）「Compression for Large-scale Time-varying Volume Data Using Spatio-temporal Feature（時空間での特徴を使った大規模時系列ボリュームデータ向け圧縮のための一手法）」

立方格子群をより少数の4面体格子で圧縮表現し、その圧縮率と画質劣化の関係を明らかにした。また、時系列で変化のない格子に対して、連続するタイムステップでのデータ値の差が無視できるときは前ステップのデータ値を使うようにしてデータ圧縮を実現した。

前　田　直　哉（小山田教授）「逆関数法を利用した高精度融合可視化」

粒子ボリュームレンダリングにおいて、視線と格子の交差部分に粒子を確率的に配置する必要がある。交差部分で粒子配置がポアソン分布に従う場合、粒子間の距離が指数分布に従うことを利用して、効率よく視線と格子の交差部分に粒子を配置する手法を開発した。

学術情報メディアセンター

朝　倉　　僚（中村（裕）教授）「筋電位計測と画像による姿勢計測を用いたリハビリ支援システムの設計」

リハビリテーションにおいて、深度情報を取得できる画像センサにより姿勢を計測するとともに筋電位により筋張力を計測し、それを患者にフィードバックすることにより、正しい姿勢で正しい筋張力を発生する支援を行うシステムを設計した。

高　瀬　恵三郎（中村（裕）教授）「個人視点映像を用いたグループ活動分析のための視線分布ビューの自動生成」

頭部に装着したカメラで学習・訓練のためのグループ活動を記録し、それを活用する映像解析手法の一つとして、複数人の視線方向を3次元的に計測し、それを一つの映像に統合表示することにより、グループにおける注目や興味を可視化する手法を提案した。

高校生のページ

あらゆる物との通信を実現する未来社会

情報学研究科　通信情報システム専攻　通信システム工学講座　伝送メディア分野
守　倉　正　博

1. はじめに

電磁波はイギリスのマクスウェル（J.C.Maxwell）がその存在を理論的に予言し、ドイツのヘルツ（H.R.Herz）によってその存在が実験的に確認されました。この電磁波を通信の実用化に貢献したのはイタリアのマルコーニ（G.Marconi）であり、1899年にイギリス～フランス間での通信実験などに成功しています。その後100年余りの研究開発により、無線通信システムは飛躍的な進歩を遂げています。日本で携帯電話の前身となる自動車電話方式が実用化されたのが1979年であり、その後、掌で扱える携帯電話が実現されました。「何時でも、何処でも、誰とでも」というのが、通信における1980年代の目標で、テレビアニメで主人公が腕時計型の無線電話を使っているのを何とか実現しようという意気込みが強くあった時代です。またインターネットを利用する際に用いられるウエブブラウザーが登場したのも1993年で、従来の電話利用の通信からデータ利用の通信に大きく変化した時でした。

各家庭にはメタリックケーブルで高速通信を行う方式や2000年頃に商用化された光アクセス方式により各家庭に高速データ通信サービスが利用可能な時代に入りました。その際、ケーブルを部屋内や部屋間で引き回すのは工事が大変で、壁の中に収容しないと子供がケーブルに足を引っかけて危険であるし、美観上も問題でした。そこで、1990年代から無線LAN（Local Area Network）が研究開発されました。無線LANは世界中のどのメーカが製造しても互いに通信できるようIEEE 802.11シリーズの国際標準規格として種々定められています。大手量販店に行くと「IEEE 802.11a,b,g,n規格準拠」等の表示を見かけることがあると思います。無線LANはノートパソコンだけではなく、ゲーム機、タブレット端末、プリンター、カメラ等種々の機器に使われて、非常に便利になっています。家だけでなく会社、学校、街角のコーヒーショップ、ホテル、空港、駅等様々な場所で公衆無線LANが利用可能になっており、多くのコンピュータ端末がインターネットに接続され、「人と人との通信」に加えて「人と機械との通信」が実現され、今日に到っています。

これまで、通信システムは有線･無線のいずれの方式にしても、多くの情報を伝達するための研究（ブロードバンド化）を推進してきました。その一方、将来の通信システムとして次に世界中が注目しているのが伝送する情報は小さくても端末の数が膨大な「機械と機械の通信」です。この通信システムはM2M（Machine to Machine）システムと呼ばれています。では、なぜ、M2Mシステムが注目を浴びるのかと言いますと、人類が直面する大きな課題であるエネルギー問題や環境問題に加えて、地域社会で安心安全なコミュニティを実現することが要望され、そこにM2Mシステムが利用されようとしているからです。

2. 機械と機械との通信

世界的に化石燃料の使用によるCO_2排出は地球温暖化等の環境問題が生じます。特に現代社会は電気エネルギーが重要となっており、いかに化石燃料使用を減らし、持続可能な社会を築けるかが重要です。そのためには風力発電や太陽光発電といった再生可能エネルギーを組み合わせ、時々刻々変動する発電量と電力使用量を制御しなければなりません。このような目的のために研究開発が進められている

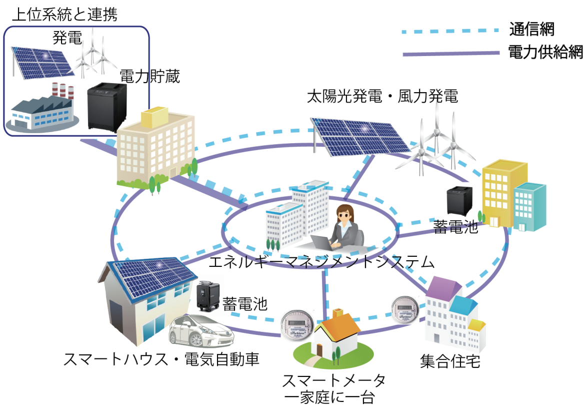


図１　スマートグリッド

図２　スマートグリッド用ワイヤレスアクセス

のが図１に示すスマートグリッドと呼ばれる電力需給システムです。スマートグリッドの特徴は電力供給網と通信網を融合させたシステムです。このシステムは情報通信という仮想世界（Virtual World）と電気エネルギーという実世界（Real World）を結びつけるものでもあります。通信ネットワークの中核は光ファイバーネットワークを中心とした高品質で高速な通信システムとそれらの末端部分で多くの情報収集を行うワイヤレスアクセスネットワークから構成されます。末端部分でワイヤレス方式が採用される理由は設置の簡便性とコストの点で優れるからです。我々の研究室では無線通信方式という観点からこのスマートグリッド用のワイヤレスアクセスシステムの研究を進めています。

図２にはスマートグリッドを構成する重要な要素であるスマートメータと双方向の通信を実現するスマートグリッド用ワイヤレスアクセスの実現例を示しています。このワイヤレスアクセス方式に用いられる無線周波数は 2.4 GHz 帯域や 920 MHz 帯域の利用が想定されています。ワイヤレスアクセスシステムはスマートグリッドに限らず、災害対策用システム、環境保全監視システム等の様々な監視制御アプリケーションに対応できるプラットフォームとして望まれます。このプラットフォームで使用されるワイヤレス端末の長年にわたる保守を簡易化するためには、どうしても電池の交換を無くすことが重要です。これまで一人で数台の無線端末を保有している状況で、電池交換を行うのであれば現実的です。しかし一人で数百、数千台といった無線端末を保有する時代になると、電池交換するだけで大変です。この問題を解決するため、我々は ENTERPRICE M2M ネットワーク（M2M network consisting of Enormous Number of TERminals without PRImary CElls）と名付けたワイヤレスアクセスシステムの研究を行っています。このシステムは、数百台から数万台に及ぶ端末数 , 数 kbit/s から数 Mbit/s に及ぶ伝送速度、これら全ての監視制御アプリケーションの要求を統一的に扱え、エネルギー供給も電池ではなく、エナジーハーベストやマイクロ波給電といった技術を用いて実現しようと考えています。

研究対象となる ENTERPRICE M2M 無線ネットワークの要求条件の一つは、従来の無線 LAN で想定されていたアクセスポイント（基地局）毎のサービスエリア半径と比較して非常に大きいことです。また , サービスエリア半径が大きいため , 競合型の媒体アクセス制御を用いる場合にデータフレームの送信権獲得に際して互いに 競合（contention）する端末数が膨大となります。

2. 1　媒体アクセス制御

ENTERPRICE M2M 無線ネットワークを実現するために用いられる媒体アクセス制御は CSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance）と呼ばれる方式です。この方式の原理について図３を用いて説明します。この方式は別名 Listen before Talk 方式と呼ばれる方式です。会議で人

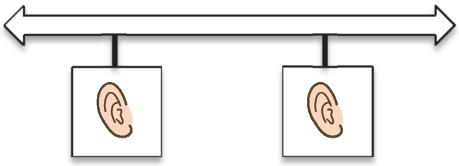


図３　Listen before Talk 方式

が発言する場合のルールと同じです。つまり、「話す前には必ず、他の人が話していないか確かめてから話せ」ということです。他の人が話している最中に自分も話しだすとそれ以外の人は音声が混ざって何を言っているのか分からなくなるからです。しかしこの方法でも一人の人が話している時に、次に話そうとする人が二人以上いると、最初の人が話し終えた途端に次の二人の人が話し始めて、音声が混ざって困ります。同じことが M2M 無線システムでも起こりえます。この事象を少なくするために考えられたのが下図に示す CSMA/CA 方式です。

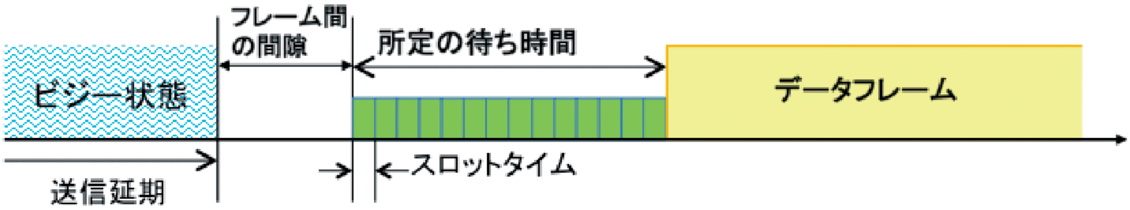


図４　CSMA/CA 方式

図３の場合と同様に、他の端末がデータフレームを送信している時は、じっと聞いている必要があるので「ビジー状態」となります。そのビジー状態が終了するのを待って直ぐに自分のデータフレームを送信しようとすると、他にも送信したい端末がある場合に、データフレームが互いに衝突してしまいます。それを避けるために、フレーム間の間隙分だけ送信を待った後に、各端末はスロットタイムの整数倍となるランダムな時間だけ待つことが要求されます。つまり各端末は 0 ～ CW（Contention Window）までの大きさを持つサイコロを振り、出た目の数だけスロットタイムを単位として待ちます。もし、自分の端末が待っている間に他の端末が送信を始めたら、待ち時間を次ぎに持ち越して再度同じ動作を行います。こうすることによって、ビジー状態で待っている端末同士が同時にデータフレーム送信をする事象を少なくしています。偶然にも同じサイコロの目が複数の端末で出た場合は、仕方がありませんがデータフレームの衝突になってしまいます。

2. 2　仮想グループ化

膨大な端末数の無線システムで、CSMA/CA を用いる際の課題として , トラヒック輻輳時のスループット劣化があります。スループットとは無線システムの入力として送信しようとしたデータ量に対して実際に受信されて運ばれたデータ量のことを言います。想定されるシステムでは 1 台のアクセスポイントに 6000 台以上のセンサ端末を同時に収容する必要があります。この時、例えばショッピングモールに設置されたセンサ端末で火災が発生した時に煙センサ等が一斉にデータフレーム送信を行います。端末からアクセスポイントへの輻輳が起こり、結果としてスループット劣化に至ります。この現象は CSMA/CA の原理を考えれば容易に想像できます。つまり端末台数が多くなればなるほど、サイコロを振る時に同じ目の端末が多くなるからです。

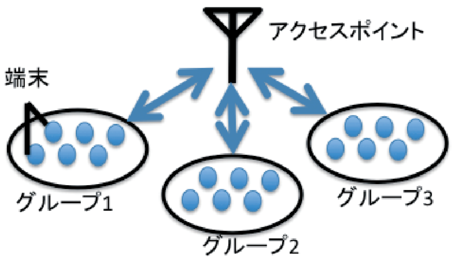


図５　端末のグループ化

この課題を解決するためには、端末からのトラヒックの輻輳を緩和することが必要であり、同時にデータフレーム送信を試みる端末数を意図的に減らすグループ化が有効です。図５に端末のグループ化を示します。こうすれば、6000 台の端末があったとしても、グループ化をすることにより、トラヒックの輻輳によりデータフレームが衝突する確率は下げることができます。ただし、この方式ではアクセスポイントから端

末に対して、どのグループに属してどのような期間だけ通信すれば良いかということを集中制御する必要があり、アクセスポイントや端末の機能が複雑になるという欠点があります。

当研究室ではこの問題を解決するために、図4の「フレーム間の間隙」部分を工夫することにより、端末を仮想的にグループ化する方式を見いだしました。仮想グループ化が実現できれば、アクセスポイントが端末を集中制御することから解放され、装置の複雑さが軽減されます。「フレーム間の間隙」部分の動作は、ランダム AIFSN（Arbitration Inter-Frame Space Number）方式を用いています。AIFSN を用いる元々の目的は送信優先度の設定であり、優先度に応じて固定的に AIFSN の値を設定します。例えば、優先度の高い端末には小さな AIFSN を設定し、早く通信が開始できるようにします。一方、本ランダム AIFSN 方式では、各端末はサイコロを振る際に、AIFSN の値を [2, AIFSNmax] の範囲で一様ランダムに再設定します。これにより、図6に示されるように、全員が同じ AIFSN の値を用いる場合と比較し, 競合に参加する端末の数が減ります。これは、グループ化によって競合に参加する端末を少なくすることと等価であり、仮想グループ化と呼んでいます。

図7に、ランダム AIFSN 方式のスループット特性を示します。本図は、入力トラヒックが増加し輻輳状態になったとしても、AIFSNmax ＝ 20 程度に設定すれば、仮想グループ化によりスループット特性が劣化しないことを示しています。

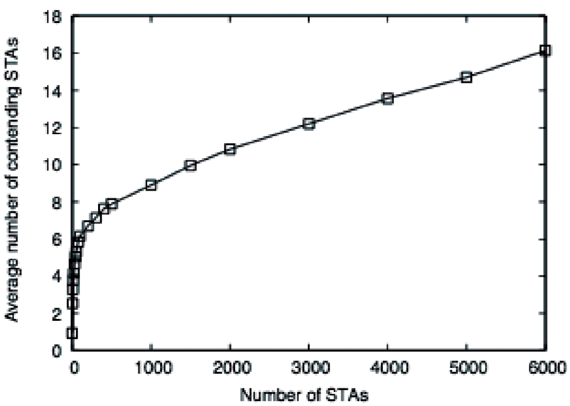


図6　競合に参加する平均端末数

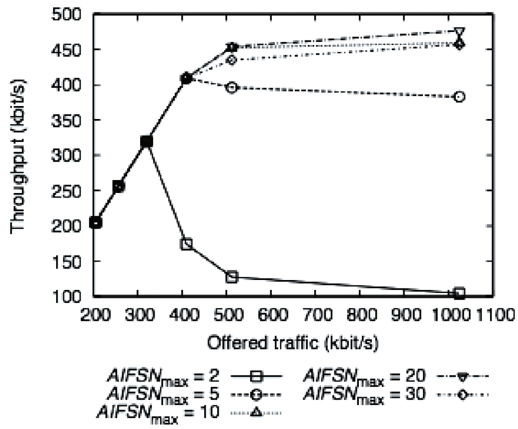


図7　ランダム AIFSN 方式のスループット特性

3. 電池無しのワイヤレス端末

既に2章で述べたように、多数のワイヤレス端末から構成されるシステムでは通常運用時のメンテナンスの点で端末のバッテリーレス化が望ましいです。したがって電灯線以外の何らかの手段により、コンデンサ等に充電しながら行う給電が必要です .

図8は、例として病院内における M2M 無線ネットワークを示しており、多数のセンサを必要とすることと、近距離の通信であることからマイクロ波送電によりワイヤレス端末のコンデンサへの給電を行うシステムです。

マイクロ波電力伝送には、電波防護指針により空間内の電力に 1.5 GHz 以上 て゛は 1 mW/cm2 という制約があるものの、1 cm 四方の面積で原理的には最大 1 mW の給電が可能です。今後、省電力化された無線 LAN チップの消費電力として、送受信動作時に 100 mW、スリープ時に数 μW と想定すると、単純にはデューティ比を 1/100 程度に抑えれば良いことになります。周波数の有効利用の観点からマイクロ波伝送の無線帯域と通信用無線帯域の共用を考えた場合、時間的に給電と通信を分離した動作（間欠動作）が必要となります。

図9に電波暗室の実験風景を示します。左側から 2.4 GHz のマイクロ波送電を行い、右のレクテナア

ンテナを有する無線LAN端末で受電するシステムです。無線信号とマイクロ波送電は間欠動作を行っており、センサ端末は、10.24 s おきに送信されるビーコンの受信タイミングの前後 2 s 以外はスリープさせています。図 10の上はセンサ端末の消費電流の実測値であり、ビーコンの受信タイミングの前後で大きな消費電流が計測されています。図10の下は送電装置からの送電の有無の実測値であり、ビーコンの前後を除外して送電していることが確認できます。

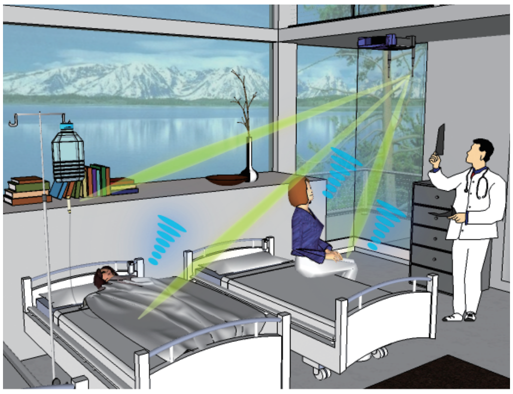


図8　病院内のENTERPRICE M2Mシステム

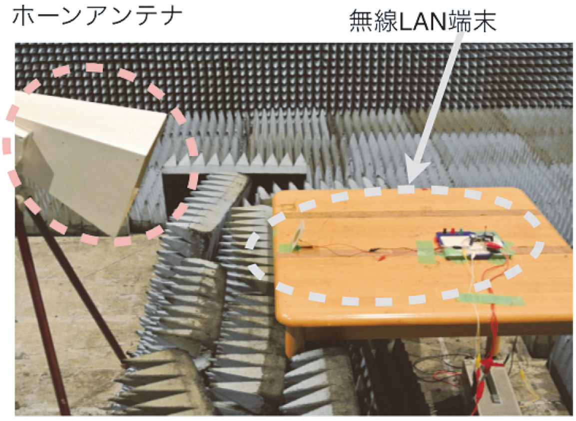


図9　電波暗室内での実験風景

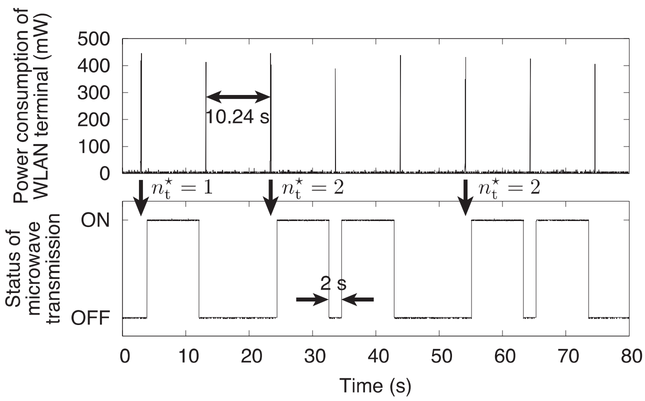


図10　マイクロ波給電と通信のスケジューリング

4. 今後の研究の方向性

エネルギー問題や環境問題、メディカルケアといった課題を解決する手段としてあらゆる物に通信機能を付け、機械と機械の通信を行うシステムの概要について述べました。国際的にも無線LANやセンサネットワークの標準化組織であるIEEE 802.11ahにてタスクグループを形成し鋭意標準化が進められているところです。伝送速度は低速ながら1 km程度のセル半径で膨大なセンサ端末を信頼性高く、いかに簡易に管理運用を行うかが鍵となるでしょう。センサネットワークに対して世界各国の無線帯域が920 MHz帯で統一される状況で、通信規格も統一が図られると、無線LANと同様に広く普及することが期待されます。

また、マイクロ波伝送については太陽光発電や様々なエナジーハーベスティング技術とともに、適材適所で研究開発が進められていくものと考えられます。

学生の声

「伝える」

情報学研究科　知能情報学専攻　松山研究室　博士後期課程１年　石　川　惠理奈

研究者として生きていくためには、当然ながら得られた成果を論文として正しく言語化することが不可欠です。しかし近ごろ、それだけでは足りず、さらに相手に「伝わる」形で出力する力が必要だと痛感しています。論文や研究費の申請書上だけではなく、研究コミュニティの中で自分の研究をアピールして「こいつはこういう研究をこういうアプローチでやってるんやな」と、まず他研究者に知ってもらわないことには好機が育たないということです。

例えば、会議の場での研究発表において、「うまくいった」と言えるのはどういう場合でしょうか。ミスせず穏便に済めば御の字でしょうか。もともと私もその程度の考えでした。しかし研究者のタマゴとしては、決してこれではいけません。淡々と棒読みで発表する学生の話を、会場のどれだけの人が集中して聞いてくれ、後で思い出してくれるでしょうか。研究発表の場は、見方を変えれば「会場の研究者に問題・アプローチの妥当性を一緒に考えてもらえる貴重な時間」だと言えます。わかりやすい発表に成功すれば、有益な議論・フィードバックの獲得に結びつきます。さらに言えば、研究に興味を持ってもらうことで研究者間の繋がりをつくり、新たな道が開かれる可能性もあります。他者に「伝える」ためには、相応の努力を要します。まず注意を引き付けるため、「見せ方」にもこだわる必要があり、理解してもらうために聞き手の立場に合わせた表現を選ぶ力が必要です。これらは一朝一夕で身につくものではありません。日頃から積極的に議論の場に立って、試行錯誤の中で訓練していくしかないと考えます。そして最後に、伝わったものを記憶に残すため、勇気を出して積極的に他研究者に話しかけるべきです。たとえ未熟者でも、一合とっても武士は武士、時には胸を張って自分の研究を発信する必要があると考えています。

「留学生からの教訓」

工学研究科　電気工学専攻　引原研究室　博士後期課程２年　窪　田　まど華

大学に入学してから常に留学生と接する機会があった。そしてこの冬、私も短期ではあるが海外の大学で過ごす機会を得ている。それに向けて心掛けなければならない事について、今迄一緒に過ごしてきた留学生の振る舞いから学んだ事を私なりに要約する。

まず英語や現地の言葉を流暢に話す能力を持っているに越したことは無いが、それが最大の武器ではない。自分の考えや伝えたい事を持っていなければ、つまり自分自身の研究について十分に理解していなければ、どんなに素晴らしい言語変換能力も滑稽に映る。伝えたい事さえしっかり持っていれば、言語は後から付いて来るのではないかと考える。また現地の食べ物を頂く（出来れば美味しく）というのはある種、入村の儀式のようなものであると思う。自分たちの食べ物が相手に受け入れられると、何となく自分達自身も受け入れられた気になり、じゃあ私達もあなたを受け入れましょうとなる。

さらに多くの留学生が、来日した当初は惨めな気持ちなるそうだ。周りは誰もそんな事を思ってないのに、疎まれているバカにされていると思って息を潜めてしまうらしい。ここで優しく働き掛けてくれる人物が登場すれば良いが、いない場合すれ違いが始まり、鬱屈とし始めた感情は自然と学業への気持ちも蝕んでしまう事がある。誰かに相談したり、はったりでも良いから人と関わる姿勢を持っていた彼らは本当に強い。

他にも留学生が教えてくれた事を挙げれば限りが無い。まだまだ彼らの教訓を実行できてはいないが、彼らと一緒に過ごす環境を整えてくれた大学と彼らに感謝する。

教室通信

大学改革と電気電子工学科

通信情報システム専攻教授　情報学研究科長　佐　藤　　　亨

大学改革が政権の主要政策の一つに位置付けられ、文部科学省からは大学のミッション再定義をはじめとして、矢継ぎ早にさまざまな政策が提示されています。先号の教室通信で北野工学部長がご指摘の通り、予算や人員の破壊的な削減と並行して、プロジェクトバブルともいうべき状況も現出しています。本来、教育は最も長期的視点の要求される社会施策であるべきものですが、それが一層困難になりつつあります。

MITとハーバードの主唱する公開オンライン講座edXへの参加など、大学がいやおうなく世界的競争の渦中に巻き込まれる一方、足元では学生の基礎学力低下と、それ以上に大きな問題である学習意欲の低下が進行しています。6月の教育研究評議会では「2by2020」と題して、2020年までに外国人教員比率や学生の海外留学数など、さまざまな指標の倍増を目指す京都大学の新国際戦略が決定されました。大学教育に抜本的改革が必要であることを否定する人はいないでしょうし、大規模な機能の改革は組織の改革をも必要とするのが通例ですが、それが外圧のままに進むことがよい結果を生むとは考えられません。教員の一人一人が自分のこととして組織の在り方を真剣に考えることが重要と思います。国政などと同じことで、自分一人が何をしても大勢に影響はないと、皆が思ってしまったときに組織の崩壊が始まります。卒業生の皆様にも、広い社会の見地からご支援、ご助言を賜れれば幸いです。

京都大学では現在、大学改革特別委員会が設置されて全面的な組織改革が議論の俎上に上がっています。大学執行部から提示される改革案には、激しい議論を反映してたびたび大幅な改訂が加えられていますので、最終形態がどのようなものに落ち着くかは不明ですが、教員組織を教育研究組織から分離することの是非が議論の焦点となっています。電気系教室について過去の組織改革を見ると、平成7年の大学院重点化に伴い電気電子工学科が設立されたという先例があります。これは単に3教室が統合されたということにとどまらない体制の変更を伴っていました。その時点では、教員の肩書が工学部から工学研究科に移っただけでしたが、翌年以降エネルギー科学研究科、情報学研究科が相次いで設立され、複数の大学院研究科に分散した教員が、学部教育組織である学科を構成することになりました。

この改組によって会議の数が倍増するなど、運営の負荷は明らかに増えましたし、電気系2専攻の桂移転の後は、物理的な距離も影響して学科の一体感が低下していることは否定できません。今回の組織改革がさらに構造を複雑化することを懸念する声が強いのもよく理解できます。しかし、複数研究科への分散の影響の小さかった他学科に比べて、電気電子工学科の運営に問題が生じているかというと、決してそうではなく、むしろ学科が教育組織として機能している点では工学部の模範といえるでしょう。学生実験など負荷の高い科目にも多くの教員が献身的に参加していますし、アドバイザ制度など学生へのケアの面でも他学科に先んじてきました。それぞれの部局での教員選考においても学科兼担の重要性は十分に認識されていると思います。結局は学科構成員としての帰属意識の問題であって、適正な教育組織は適切な学術理念の区分のもとに構成されねばならないということと考えます。

上記の国際戦略の一環として、外国人教員の重点的配置が進められようとしています。主たる目的は全学共通教育における英語科目の増強ですが、学部専門教育の英語化も避けては通れない課題です。現在の学生の英語力を考えると、科目の単純な英語化は学習内容の低下を招きかねない面もあり、学力低下に対応しつつ英語力をつけさせるという、極めて難しい課題に取り組む必要があります。再び基本に戻って電気電子工学科の教育の在り方を再検討することが求められています。

編集後記

cue は 30 号という区切りの号を迎えました。このような区切りの号で編集後記を書かせて頂く幸運に感謝しております。編集後記を書くにあたり、いくつかの号を拾い上げげて、掲載記事より教室の動向を調べてみました。記念すべき創刊号である 1 号（1998 年 6 月）では、情報学研究科の発足について報告されています。2 号（1998 年 12 月）では電気教室創立百周年記念行事について報告されており、前年（1997 年）の京都大学創立百周年記念事業も含めて当時の様子を思い出させます。3 号（1999 年 6 月）では、大学院重点化に伴い 1 研究室あたりの面積が減少し、研究環境の息苦しさを感じるとの記事があり、過渡期の教室の状況を垣間みることができます。5 号（2000 年 6 月）では桂キャンパスの新設と移転について報告されており、物理系の移転が昨年度（2012 年度）実施されたことからも長期にわたるキャンパス移転の困難な道のりを感じます。20 世紀最後の発刊となる 6 号（2000 年 12 月）では、新世紀（21 世紀）においても記事を充実させていく旨が述べられています。10 号（2002 年 12 月）には、21 世紀 COE プログラムの採択と拠点概要について報告されています（ちなみに、筆者はサポートを受けた学生の一人です）。15 号（2006 年 1 月）では、電気系の人気が下降していることについて記事が掲載されていますが、現在ではどうでしょうか。このように、適当な（どのような？）サンプリングの下でも、電気関連教室の重要な記事が掲載されており、cue が電気系教室や卒業生の最新の話題を提供するメディアとして機能してきたことを実感した次第です。今後共 cue 及び電気関係教室への変わらぬご支援をお願い申し上げます。最後になりましたが、ご多忙のところ 30 号にご寄稿頂いた皆様をはじめ、多くの皆様のご援助に厚く御礼申し上げます。

（Y.S. 記）

協 力 支 援 企 業

新 日 本 製 鐵 株 式 会 社
ダ イ キ ン 工 業 株 式 会 社
鉄道情報システム株式会社
株 式 会 社　村 田 製 作 所
ロ ー ム 株 式 会 社
（アイウエオ順）

発　行　日：平成25年９月

編　　　集：電気系教室 cue 編集委員会
雨宮　尚之、佐藤　　亨、大村　善治、
浅野　　卓、掛谷　一弘、石原　　亨、
薄　　良彦、荒木　光彦（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発　　　行：京都大学電気関係教室
援　　　助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会
電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社　田中プリント