

cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.24 SEPTEMBER 2010

[第24号]

.....
卷頭言

田丸 啓吉

.....
大学の研究・動向

.....
超伝導応用のエネルギー・環境分野、医療分野、産業・交通分野への展開トピック：粒子加速器の高機能・高効率・小型化：粒子線がん治療装置の小型化などを狙って—
電磁工学講座 超伝導工学分野

.....
産業界の技術動向

.....
三菱電機株式会社 情報技術総合研究所
松井 充

研究室紹介

平成 21 年度修士論文テーマ紹介

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

編集後記

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

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

cue 24 号 目次

巻頭言

素朴な疑問

.....京都大学名誉教授 田丸 啓吉..... 1

大学の研究・動向

超伝導応用のエネルギー・環境分野、医療分野、産業・交通分野への展開

—トピック：粒子加速器の高機能・高効率・小型化：粒子線がん治療装置の小型化などを目指して—

.....電気工学専攻 電磁工学講座 超伝導工学分野..... 3

産業界の技術動向

身近になった暗号技術

.....三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 松井 充..... 9

研究室紹介..... 15

平成 21 年度修士論文テーマ紹介 35

高校生のページ

固体照明が拓く明るい世界

.....電子工学専攻 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 川上 養一, 船戸 充..... 52

学生の声

インターンシップのすすめ

.....情報学研究科 知能情報学専攻 博士後期課程 2 年 原島 純..... 58

宇治・エネ科での暮らしを紹介します

.....エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻 博士後期課程 1 年 金城 良太..... 58

教室通信

.....光・電子理工学教育研究センター 高岡 義寛..... 59

賛助会員の声

鉄鋼業の省エネルギー対策における電気・制御技術事例について

.....新日本製鐵（株） 麻生 賀法..... 60

編集後記..... 63

巻頭言

素朴な疑問

昭和 33 年卒 京都大学名誉教授 田丸 啓吉



cue は 1998 年の創刊以来 12 年がたった。創刊にかかわった当時の個人的な印象では、資金的に 10 年以上は続かないのではないかと思っていたので、無事に 10 年がたち、このたび cue24 号の巻頭言の執筆依頼をいただいたことには大変感慨深いものがある。そこで最初に創刊の事情を簡単に紹介する。

京都大学工学部電気工学科は 1898 年（明治 31 年）に創設され、1998 年（平成 10 年）創立 100 周年を迎えた。創立 100 周年の記念行事として記念式典、記念講演会、電気教室百周年記念誌の発行などの行事の他に、将来を指向するものとして、100 周年の募金の中から諸行事の費用を除いた残額を使用して京都大学電気関係教室技術情報誌の発行が企画された。内容の検討は 1996 年 4 月頃より始まり、年 2 回発行 A4 版 50 頁程度で構成も現在の形がきまり 1998 年 6 月に創刊号が発行された。この冊子の目的は 21 世紀に向けて電気関係教室の研究活動に関する情報を産業界に提供して研究成果を広く PR するとともに、産業界の技術情報も吸収して、両者のより緊密な交流関係を作ることにある。そのため原稿も大学教員側の研究動向とともに、各界で活躍する卒業生に依頼した産業分野の最新技術動向が 2 本柱になっている。誌名については、検討段階の名前は洛友技報となっていたが、より親しみやすい名前の方が良いということになり公募の結果私が提案した cue が編集担当者の会議で選ばれた。cue の表紙の裏にも書いてあるように、cue とは「きっかけ」「合図」という意味があり、次の 100 年である 21 世紀への出発の合図の意味が込められており、この点が評価されて選ばれたものと思っている。ちなみに他の名前の候補としては「あかれんが」「交流・直流」などがあつた。そういうわけで cue は 21 世紀の技術の方向を示す狼煙の役が期待されているので、21 世紀を記録する書誌として育ててほしいと願っている。

次にその 21 世紀の技術について少し考えてみる。21 世紀もはや 10 年たち、環境が今後の産業のキーワードの一つになることが見えてきた。現在の問題は炭酸ガスの排出による地球温暖化である。このようなことが問題になるそもそもの原因は、20 世紀になってこの数十年の先進国が排出する炭酸ガスの量が増加したことによる。20 世紀の特徴は技術の急速な進歩とそれによる生活の快適化である。そもそも技術の目的は既存の知識を応用して人間の欲望の充足、生活の快適化を実現することにある。技術の進歩により快適な生活が実現すれば、人間はさらなる次の欲望の充足をも求め、そのため技術進歩がさらに促進されることになる。その結果 20 世紀における先進国の人々の生活は、過去に例のないスピードで快適化したが、一方では地球温暖化のような環境問題を発生させた。

現在この問題に対して炭酸ガスの排出規制が議論されているが、私には単純な疑問がある。この問題の解決の難しい点は、その根本原因が我々人間の活動による排出物（この場合は炭酸ガス）が地球の浄化・回復能力を超えてきたことにある。したがってこの問題の根本解決法は、排出量を地球の処理能力以下に減らすことである。しかしこれには二つの難しい問題がある。一つは自然に害を与えていると気付かずに、あるいは知っていても快適さに負けて日常生活の中で出している害の問題である。炭酸ガスの排出量を減らす必要があることは、先進国の中では広く知られるようになってきたが、一般論では解っていても日常生活の具体的な場面で実行されているとは言い難い。自動車による炭酸ガス排出量を減

らすためには、自動車の使用を減らさなければならないことは知っていても、休日に家族旅行に行くときに電車にするか車にするかという実際の場面では快適性や便利さなどにひかれて車で出かけることは多い。さらに世界全体を考えれば炭酸ガス排出量削減の必要性を知っている人の数は先進国を中心にまだ少数派と言える。世界の人口の多数派が炭酸ガス削減の必要性を理解し、日常生活の中で実行することは気が遠くなるほど難しい。

二つ目は人口増加の問題である。2007年の世界の人口はおおよそ67億で先進国は15億、発展途上国は52億である。現在炭酸ガス排出量の削減は先進国の分が問題になっているが、この分が削減されたとしても、今後発展途上国が先進国の生活水準になると、同程度の削減ができたとしても地球全体の排出量は確実に増えることになり減る見込みはない。したがって現在議論されているような対処方法だけでは問題の解決にならないではないかと言うことが表題の素朴な疑問である。そうすると対応策は現在の排出量を減らすだけでは不十分で、先進国流の生活スタイルを根本的に変えて排出量を減らすとともに、炭酸ガスを排出しても取り除く技術を開発するしかない。空気中の炭酸ガスを地中に閉じ込める技術も検討されているがこれも限界がありそうなので、最終的には炭酸ガスを分解して無害化する技術の開発しかない。要するに人口が増加しても地球の許容容量以上は排出しないという原則を守るための技術が必要になると思われる。

我々の関係する電気・電子・情報系の技術は、材料、部品、機器、システムまでを含む技術であるから、21世紀技術の土台の技術として諸問題の解決に直接的分野から間接的分野まで広い範囲で重要な役割を持っていることは言うまでもない。電気・電子・情報系の技術者の一層の活躍を願う所以である。しかしここに今後の技術について真剣に反省すべきことがある。技術は快適な生活を求める人間の欲求を充足することが目的である。一方欲求のままに技術開発をしたことが現在の問題を生み出したことを考えると、21世紀にもそのままの延長で進めて良いのかが問題になる。技術が人間の欲求と結びついているかぎり、さらなる欲求を充足する新しい技術が要求されることは避けられない。現在の問題解決に対する技術にせよ新技術にせよ、20世紀が残したのと同じ問題を発生させる技術はもはや許されない。これからの技術開発に携わる技術者には、常にその技術が地球の負荷を増やさないという視点を頭に置くことが必要になるので、専門以外に自然や人間についての深い知識を持つことが望まれる。

大学の研究・動向

超伝導応用のエネルギー・環境分野、医療分野、産業・交通分野への展開 — トピック：粒子加速器の高機能・高効率・小型化：粒子線がん治療装置の小型化などを目指して —

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

教授 雨宮 尚之
amemiya@kuee.kyoto-u.ac.jp

准教授 中村 武恒
tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 超伝導工学分野（雨宮研究室）における研究の概要

我々の研究室では、超伝導線、その中でも比較的高い温度で超伝導状態となる高温超伝導線を、エネルギー・環境分野、医療分野、産業・交通分野など、多様な分野に展開するための研究を行っています。

我々の研究の先に想定される超伝導応用には様々なものがありますが、主な例としては、超伝導送電ケーブル、重粒子線がん治療装置などに用いる高温超伝導加速器、高温超伝導かご型誘導／同期機の三つが挙げられます。

超伝導送電ケーブル（図1）は、コンパクトで大容量、しかも低損失での送電を可能にするものであり、世界的にも超伝導の電力応用の最右翼として活発に研究開発が繰り返されているものです。我々の研究室では、超伝導送電ケーブル実用化の鍵となる交流損失低減に関する研究を実施しています。

重粒子線がん治療は、正常な組織を温存しながらがん細胞だけを壊す放射線がん治療の一種で、粒子を加速する加速器にマグネット（電磁石）が用いられます。加速器用マグネットを高温超伝導化して、加速器を小型・高機能化し、重粒子線がん治療その他の加速器応用の新展開を目指す研究を行っています。

超伝導かご型誘導／同期機（図2）は、我々の研究室の独自のアイデアによる、車載用や液体水素燃料移送用他の応用が期待されるコンパクト・高トルク・高効率なモータです。高温超伝導線の非線形電磁特性に基づく第一原理的特性解明、全超伝導化、各種応用、制御法等の研究を推進しています。

これらの三つの応用のうち、超伝導送電ケーブルについては *cue* 第22号18ページにて、超伝導かご型誘導／同期機については *cue* 第19号18ページにて紹介させて頂いております。そこで、本稿では、粒子線がん治療装置などに用いる加速器の、高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型化について、以下に紹介させて頂くことに致します。



図1 超伝導送電ケーブル



図2 超伝導かご型誘導／同期機

2. トピック：高温超伝導による粒子加速器の高機能・高効率・小型化

2.1 背景

荷電粒子を電場による力で加速する装置が加速器ですが、粒子をある程度高い速度（エネルギー）まで加速しようとした場合、電場による加速部（高周波加速空洞など）を有効に利用するために、粒子を周回させ同じ加速部を繰り返し通過させるということが行われます。これが円形加速器です（図3）。荷電粒子を周回させるためには、磁場によるローレンツ力を利用しますが、粒子のエネルギーが一定であるならば、磁場が強いほどローレンツ力は大きくなり軌道半径、すなわち円形加速器も小さくできます。しかし、銅線で巻いたマグネットでは発生できる磁場はたかだか2 T程度であり、粒子のエネルギーが大きくなるにつれ装置は大型化してしまいます。また、銅線で巻いたマグネットではジュール損失も大きく、運転には膨大な電力と冷却水が必要です。

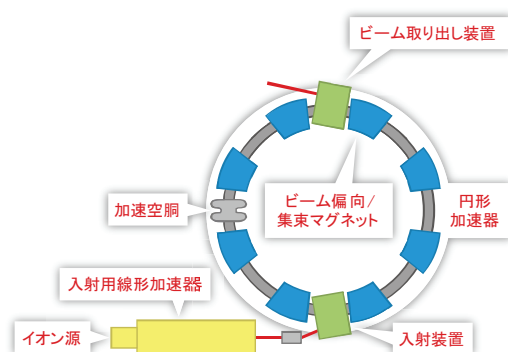


図3 円形加速器

これまで、医療用や産業用の中小型加速器には、主に銅線で巻いたマグネットが用いられてきました。一方で、高エネルギー物理学研究用の大型加速器では、エネルギーが極めて大きい粒子を周回運動させるためには高い磁場が必要なことから液体ヘリウムで冷やす低温超伝導線で巻いた超伝導マグネットも用いられています。このような超伝導マグネットは、液体ヘリウム温度での冷却効率が数百分の一であることを考慮しても、消費電力を銅マグネットより小さくできます。原理的には、医療用や産業用の中小型加速器においても超伝導マグネットは魅力的ですが、冷却システムが複雑になり超伝導化してもトータルではメリットを享受しにくいこと、低温超伝導マグネットではクエンチ（超伝導が突然壊れる現象）の呪縛から逃れられないことなどが、超伝導マグネットの利用を妨げてきました。

高温超伝導も発見から二十余年が過ぎ、材料科学分野の研究開発努力により、ようやく長くて性能のよい高温超伝導線が製造されるようになってきました。イットリウム系などの高温超伝導線を用いれば、冷却効率の高い高温度領域で運転できること、高温度領域では物質の比熱が大きいため超伝導状態の安定性もよくなることから、超伝導化の敷居をずっと低くできます。しかし、高温超伝導線で加速器用の超伝導マグネットを巻いた例はなく、また、固有の技術課題も多く、それらを解決しなければ加速器用高温超伝導マグネットは実現できません。

2.2 目指す応用の例

1) 小型・高機能な重粒子線がん治療装置

重粒子線がん治療は、放射線治療の中でも特に副作用が少なく治療効果も高い治療法です。高温超伝導の適用により治療装置（図4）を小型化できれば、この治療法の普及を促進できます。重粒子線がん治療装置は、各県1台として国内50台、人口に比例するとして世界で2500台の需要が期待されています。建屋コスト含め1台150億円の建設コストが超伝導による小型化で半減できるとすればその効果は大きく、また、1台年間10億円を超えるランニングコストの過半は電気使用料で、超伝導化によるその削減効果も大きいと期待されています。

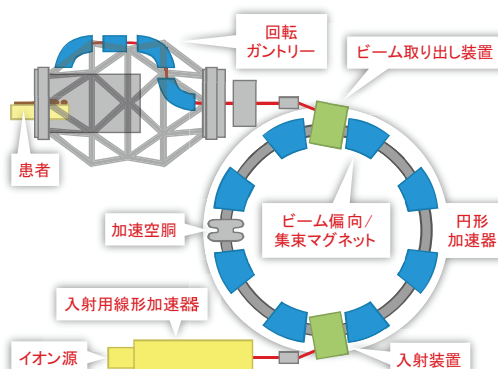


図4 重粒子線がん治療装置

2) 加速器駆動未臨界炉

加速器駆動未臨界炉（図5）とは、未臨界の核燃料体系に中性子を注入することにより中性子が注入している間だけ核反応を起こさせる原子炉の一種で、エネルギーの発生のほか、長寿命の高放射性核廃棄物の短寿命化が可能なことから注目されています。加速器駆動未臨界炉では、加速器で加速した陽子をターゲットにあてて中性子を生成しますが、加速器システムの効率が低いと、核廃棄物を処理するために、処理する以上の核廃棄物を出す軽水炉で発電して加速器を運転するようなことになり実用上意味がなくなってしまう。最低でも30%程度のビーム電力効率が必要とされ、このような高効率の加速器を実現するためには、高温超伝導の適用が必須であると考えられます。

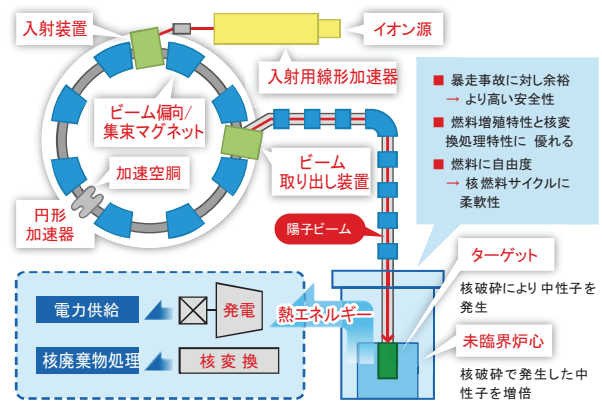


図5 加速器駆動未臨界炉

3) ニュートロニクス用中性子源

中性子の生成には、これまで原子炉や大型加速器といった大型装置が必要とされてきたため、X線や放射光利用に比べて普及が遅れているのが現状であり、様々な分野（例えば硼素中性子捕獲がん治療など）で小型で高強度の中性子源の開発が望まれています。すなわち、中性子利用を限られた科学研究ではなく、世の中で広く役に立つ工学（ニュートロニクス）にするためには、小型で高強度の中性子源の実現が必要です。高温超伝導を使った小型で高強度な陽子加速器で生成された陽子ビームをターゲットにあてて中性子を生成する、小型加速器中性子源の開発が期待されています。

4) ミュオニクス用ミュオン源

高温超伝導を用いた小型で高強度な陽子加速器により小型ミュオン源が開発できれば、未来の工学としてのミュオニクスの展開が期待できます。すなわち、現在既に行われている物性研究の高度化の他に、ミュオンビームの高い透過性を利用した核物質検知（核拡散防護）や火山の内部構造探査（火山噴火予知）等、従来のプローブ技術では実現不可能な検知能力を利用した環境・安全分野への貢献が期待されます。また、非常に高効率でミュオンが生成できるようになれば、未来のエネルギー源としてのミュオン触媒核融合の実現につながる可能性もあります。

2.3 加速器用マグネットに高温超伝導を応用するために必要な要素技術

高温超伝導を加速器用マグネットに応用するためには様々な技術課題がありますが、中でも、我々は以下のような要素技術に着目しています。

- ① 高温超伝導による機能結合型マグネット技術：偏向、集束といった複数の機能をひとつのマグネット以实现する技術
- ② 高精度磁場発生技術：粒子軌道制御に必要な高精度の磁場を発生する技術
- ③ 高精度3次元巻線技術：加速器マグネット特有の立体的巻線を高精度で実現する技術
- ④ 高効率伝導冷却マグネット技術：加速器特有の発熱を考慮した伝導冷却マグネット技術
- ⑤ 放射線環境対応技術：ビーム損失による放射線負荷に対応する技術
- ⑥ 高温超伝導加速器システム技術：ビーム光学など加速器としてのシステム設計技術

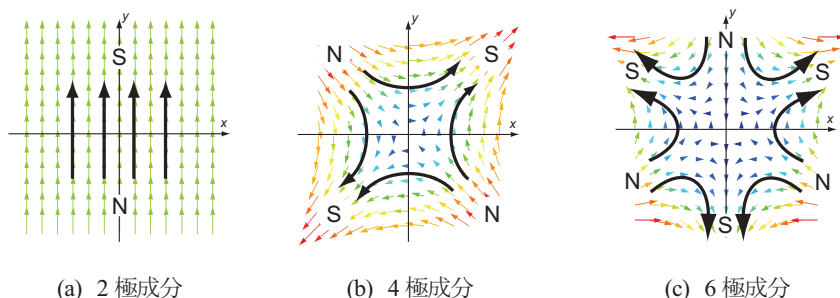
これらの要素技術の確立を目指して、雨宮研究室を中心として、京都大学、東芝、高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、日本原子力研究開発機構からなる研究開発チームにより、科学技術振興機構の研究費を得て、平成22年1月から10年計画の研究開発プロジェクトがスタートしています。

2. 4 超伝導工学分野（雨宮研究室）における研究の具体例

1) 高温超伝導テープ線内部のミクロスケールの電磁現象に起因する付加的磁場

実用的な高温超伝導線は、イットリウムやビスマスの銅酸化物から構成されていますが、これらの銅酸化物の結晶の向きをそろえないと超伝導電流をうまく流すことができません。結晶の向きをそろえるために、超伝導線製作プロセスにおいて様々な工夫がなされますが、その結果として、高温超伝導線はテープ形状をしています。このテープ形状ゆえ、マグネットを励磁した際にテープ面に垂直な磁場が加わると、この磁場を遮蔽する超伝導電流が流れ、この超伝導電流による付加的な磁場（マグネットの設計の際には、通常は考慮されない磁場）が、誤差磁場となって、加速器用マグネットにおいて重要な磁場精度を損なうおそれがあります。通常の銅線ですと、電気抵抗によって遮蔽電流は速やかに減衰してしまうので問題になることはありませんが、超伝導体は抵抗が極めて小さい（近似的に零と扱われることも多い）ため、遮蔽電流は実質的にはほとんど減衰せず、その結果、付加的磁場もほとんど減衰しない可能性があります。

ここでは、実験結果、解析結果について紹介する前に、磁場の多極展開による表現について説明します。加速器のビームが通過する領域をビーム方向から見て、その領域の磁場を周方向にフーリエ展開し、その重ね合わせで表現するのが磁場の多極展開による表現です（図6）。多極成分は、それぞれ粒子ビームを制御するマグネットの機能と密接に結びついています。例えば、粒子ビームを一方向に偏向させるためには粒子の周回軌道面に対して垂直な磁場成分が必要ですが、これは2極成分ということになります。さらに、2極成分にも、周回軌道面に垂直な2極成分とそれとは90度ずれた2極成分がありますが、これらをそれぞれノーマル2極成分、スキュー2極成分と呼びます（図7）。

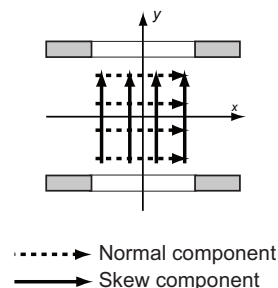


(a) 2極成分

(b) 4極成分

(c) 6極成分

図6 磁場の多極展開による表現



..... Normal component
 ——— Skew component

図7 ノーマル2極成分とスキュー2極成分

さて、ビスマス系の高温超伝導線で図8に示すような2極マグネットを製作し、その発生磁場を回転ピックアップコイルで測定し、多極成分に変換した結果を図9に示します。図9(a)はマグネットに通電中の測定結果で、図9(b)はマグネットの通電電流を遮断した後の測定結果です。マグネットの通電電流遮断後もマグネットが磁場を発生していることを示しており、これが遮蔽電流による付加的磁場です。マグネット通電中にも、同じような付加的磁場が誤差磁場として重畳していると考えられます。平行して行った超伝導特性を考慮した非線形電磁場解析によれば、テープ線の幅方向に図10のような分布で遮蔽電流が流れていることが理論的に示されており、それが図9(b)に示すような付加的磁場を発生していると考えられます。

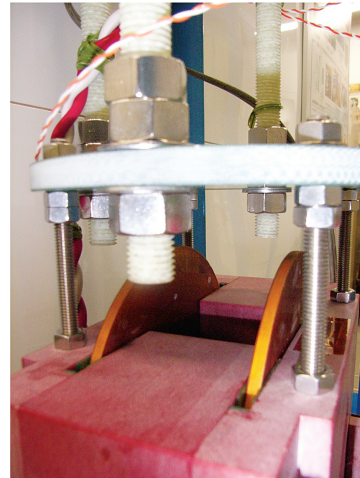
以上のように実験的検証に成功した遮蔽電流に起因する付加的磁場ですが、次のステップの研究として、この付加的磁場の抑制について、複数のアプローチにより取り組みつつあります。

2) イットリウム系高温超伝導線の通電特性実測に基づいた高温超伝導加速器用マグネットの設計

イットリウム系高温超伝導線は、液体ヘリウムのような高価な冷媒を用いなくても、冷凍機と呼ばれるスイッチオンで低温が得られる装置（冷蔵庫の高級品と考えて下さい）を使って冷却すれば優れた超伝導特性を示す超伝導線で、近年、ようやく市販される水準まで製造技術が進歩したものです。我々は、

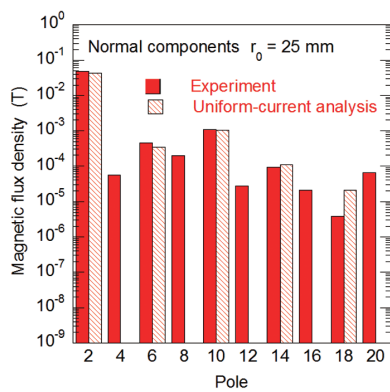


(a) 全体写真

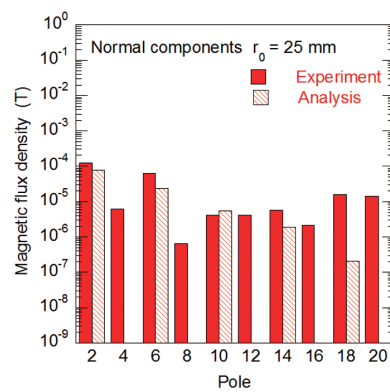


(b) 端部の拡大写真(左右の2枚の半円形に見えるものが2枚のレーストラックコイルの端部)

図8 ビスマス系高温超伝導線材で作製した2極マグネット



(a) 通電中



(b) 電流遮断後

図9 試作2極マグネットの磁場の多極成分

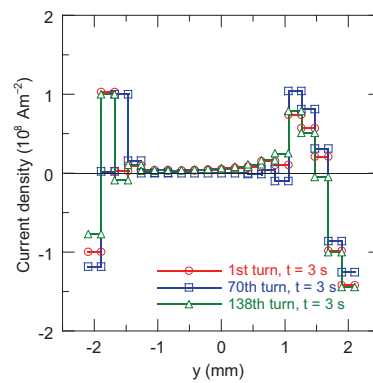


図10 テープ線幅方向の遮蔽電流分布 (図9(b)に対応)

冷凍機で冷却できる温度を想定してイットリウム系高温超伝導線の臨界電流（超伝導状態で輸送できる電流の上限）を様々な大きさの磁場下で測定し（図 11）、その結果をもとに高温超伝導加速器マグネットの設計研究を行っています。図 12 は、我々が設計した高温超伝導加速器用ビーム偏向マグネットの断面の一例です。今後、さらに多様な高温超伝導加速器用マグネットの設計を進め、企業と共同して、試作、評価試験を進めていく予定です。

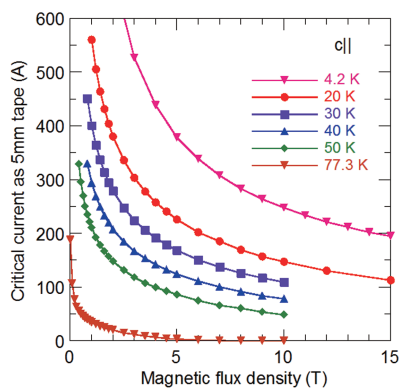


図 11 イットリウム系高温超伝導線の磁場中での臨界電流

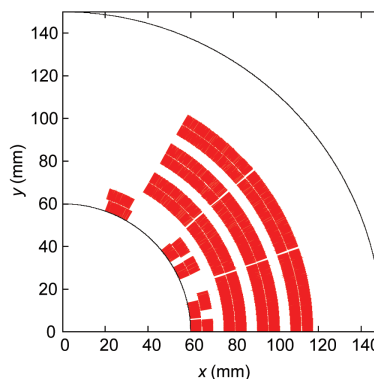


図 12 高温超伝導加速器用マグネットの設計例 (断面における超伝導線の配置)

3. まとめに代えて

応用を見据えつつも、すぐには「商売にならない」基礎的、先端的な研究を行うことが、大学工学部（工学研究科）の重要な使命のひとつですが、そのためには、税金によって賄われる公的な研究資金の支援を仰ぐ必要もあります。昨今、税金を使って研究を行う上で、その意義を社会に理解して頂くことがますます重要になってきております。その意味でも、本稿が、電気系教室における研究活動、国の資金（紹介した例では、科学技術振興機構を funding agency とした研究資金）による科学技術研究を理解して頂く一助になれば幸いです。

産業界の技術動向

身近になった暗号技術

三菱電機株式会社 情報技術総合研究所
情報セキュリティ技術部長

松 井 充

1. はじめに

暗号技術は、かつては軍事・外交のための道具でしたが、今ではプライバシーを保護する技術としてきわめて身近なところで利用されています。今や携帯電話、ICカード、車の電子キーなど私たちのかばんの中に暗号が2つや3つ入っているのはあたりまえ、逆に暗号を一度も使わずに一日を過ごすことの方が少ないという時代になりました。

三菱電機は1980年代前半に暗号技術の研究開発を開始しましたが、当時のPCは16ビットDOSの時代、もちろん個人用携帯電話はまだ影も形もなく、暗号技術の応用製品といってもごく限られたものでした。しかし1990年代のインターネットの広がりやプライバシー保護意識の高まり、そして情報通信機器の小型軽量化により、暗号技術が爆発的にさまざまな製品に適用されるようになりました。最近ではクラウド時代の情報セキュリティのキーテクノロジーとして暗号技術が注目されています。

本稿では、三菱電機における暗号技術の研究開発の例をいくつかご紹介しながら、暗号技術の広がりや可能性について述べてみたいと思います。

2. 現代暗号と暗号解読

現代暗号と呼ばれる、オープンな暗号研究が本格的にはじまったのは1970年代のことです。1976年には米国で連邦政府標準暗号DES (Data Encryption Standard) が制定されるとともに、その仕様が完全に公開されました。また、インターネットにおけるプライバシー保護に欠かせない公開鍵暗号や、その応用である電子署名の技術が発明されたのも1970年代です。ここから現代暗号が情報科学の一分野としてスタートしたと言えます。

現代暗号では、暗号の設計技術と暗号の解読技術が等しく重要視されます。学会などで仕様が公開された暗号アルゴリズムは、世界中の研究者が(学術的な)解読を試み、その結果は論文として公開されます。そして何年にもわたる解読研究に耐えて生き残ったアルゴリズムこそが世界からの信頼を獲得できるのです。この意味で、世界標準を目指すレベルの暗号は、その設計指針を含め仕様を公開することは必須であるとのコンセンサスが研究者の間であります。

三菱電機は現代暗号の研究を解読技術からスタートしました。その結果生まれたのが「線形解読法(linear cryptanalysis)」と名付けた新しい暗号解読手法です[1]。この原理は、与えられた暗号アルゴリズムを線形近似し、もとのアルゴリズムを解読するかわりにこの近似された、より簡単なアルゴリズムを解読するという考え方です。もちろんもとは違うものを解読している以上、この解読が常に成功するとは限りませんが、解読に利用できるデータ量が多ければ、それによってアルゴリズムの差を補うことができ、成功確率が高まっていきます。

筆者は1993年に線形解読法をもちいて世界ではじめてDESの解読実験に成功しました[2]。第1図はその時にもちいた12台の計算機のうちの1台です。これは、当時最新鋭のワークステーションコン

ピュータでしたが、現在の PC は価格性能比（例えば 10 万円あたりの性能）で見ると、これより 1000 倍以上高速です。当時 12 台で 50 日かかった計算も、今では 1 台の PC で 1 日か 2 日あれば同じ実験が再現できるでしょう。暗号解読技術における計算機の役割はきわめて大きいものがあります。

3. MISTY の開発と標準化

次にわれわれが取り組んだのは、新しい暗号アルゴリズムの開発でした。線形解読法でも解読できない暗号、しかもソフトウェアでもハードウェアでも小型かつ高速に実装できる暗号を目標にしました。この結果生まれたのが MISTY です [3]。MISTY は線形解読法で解読することが困難であることが数学的に証明されていることが大きな特徴のひとつです。

ところでこの当時 1990 年代半ばは、PC の急速な高性能化と低価格化にともない、PC 上のソフトウェアで高速な暗号化が求められていた時代でした。しかしながら MISTY は高速化もさることながら、小型化にも力点をおいて設計されました。これは半導体部門からの要請があったことによるのですが、当時の暗号の設計指針としてハードウェアを考慮したのは珍しい部類にはいると思います。小型というキーワードはのちに携帯電話の暗号標準化において、消費電力の低減の観点から重要な役割を果たすこととなります。

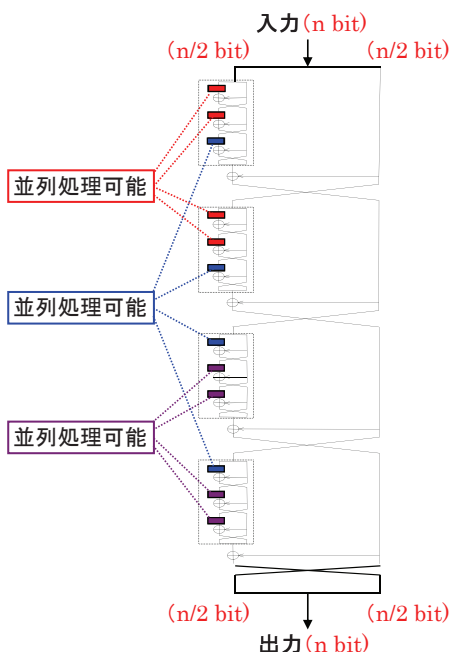
第 2 図は MISTY の基本構造をあらわしています。MISTY の特徴は入れ子構造（Recursive Structure）にあります。小さな関数を何回も繰り返して全体の暗号アルゴリズムを構成しているため、小型化したい場合には、この最小のコンポーネントを 1 つだけ持たせてそれを繰り返し用いることで暗号化することができますし、またこのコンポーネントを複数持たせてそれらを並列処理させることにより高速化することも可能です。

MISTY の解読困難性の数学的証明や、ハードウェアでの小型・低消費電力が評価され、2000 年には MISTY を携帯電話用にカスタマイズした KASUMI 暗号が第三代携帯電話（W-CDMA）の世界標準暗号に採用されました [4]。この規格は標準化団体 3GPP により制定されたもので、日本では NTT ドコモ、SoftBank の携帯電話に採用されています。さらに 2002 年には欧州現世代（第二世代）の携帯電話通信規格 GSM の標準暗号のひとつにも KASUMI が採用されました。現在 KASUMI 搭載の携帯電話の総加入数は世界中で数十億に達すると報告されています [5][6]。このほか、MISTY は日本の電子政府推奨暗号（CRYPTREC）や ISO 標準暗号（ISO/IEC 18033-3）にも採用されています。

情報通信機器の小型化にともなって、そこで使われる暗号には、高速化よりも小型・低消費電力が強く求められる時代になったことが、小型を設計指針のひとつとしていた MISTY の世界標準採用につながったと言えると思います。



第 1 図 DES 解読にもちいた計算機



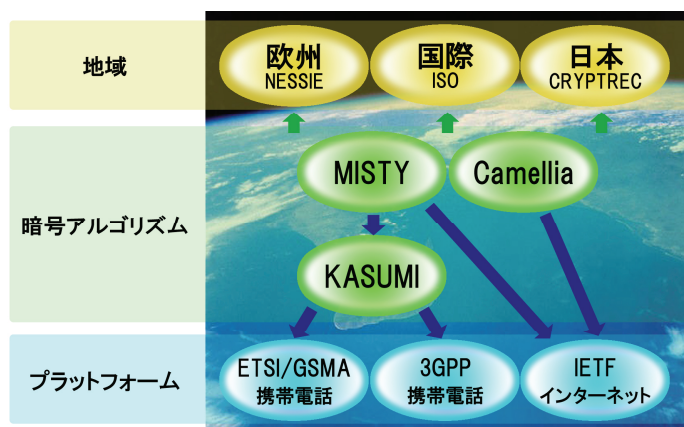
第 2 図 MISTY の再帰構造

4. Camellia 暗号の開発

MISTY が世に出たのち、米国では DES にかわる新しい連邦政府標準暗号の制定プロジェクトが開始され、2000 年には Rijndael と呼ばれる暗号が米国政府新暗号 AES (Advanced Encryption Standard) に選定されます。MISTY はデータの暗号化が 8 バイト単位であるなど、DES と同じくいわば旧世代に属するインターフェースをもっているのに対し、AES は 16 バイト単位の暗号化や 256 バイトなど長い鍵のサポートなど新しいインターフェースをもつものです。

NTT と三菱電機は 2000 年に、共同で AES と同じインターフェースをもつ次世代暗号 Camellia を開発し、その仕様を公開しました [7]。Camellia はインターネットでの標準暗号化を目指しており、現在まで ITU-T, ISO/IEC, IETF など数多くの標準化団体で認定されています [8]。また商用製品とともに、さまざまなオープンソースプロジェクトでも採用されています。これには世界中で用いられているブラウザである FireFox が含まれます。

なお、MISTY, Camellia ともその基本特許は無償化されています。これは DES や AES など米国政府標準暗号の多くが無償で利用できることになったもので、実際、暗号の標準化においては無償化が要求されることも少なくありません。暗号開発にコストをかけた企業にとっては、特許の無償化は勇気のいることですが、一方で、無償化することによりユーザーが増え、第 3 図に示すような標準採用で知名度が高まったことは、結果的にビジネスの機会が増えることに結びついたため、無償化の意味は十分あったと考えています。



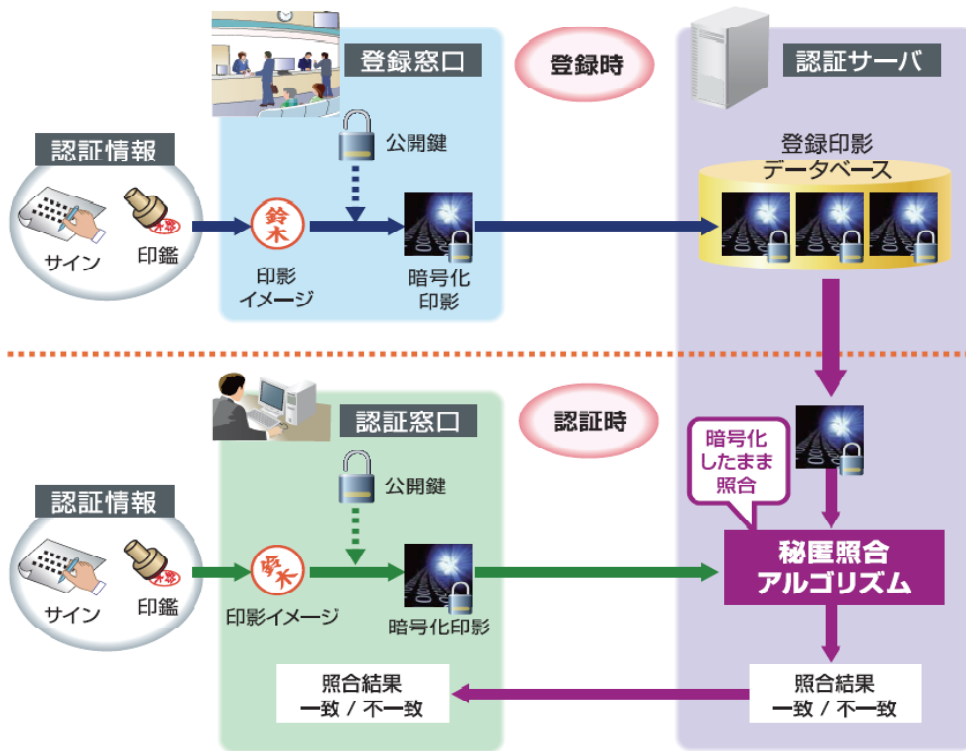
第 3 図 MISTY, Camellia の標準化

5. クラウド時代の暗号技術

昨今のクラウドコンピューティングの普及にともない、情報資産やその利用環境を自前で維持管理するのではなく、アウトソースすることにより、運用コストを削減する動きが盛んになっています。一方でこれにともない、データセンターなどサービス提供者側のセキュリティリスクの増大に対する対策がこれまで以上に重要となっています。このリスクには、設定のミスや機器の障害によるものだけでなく、データセンターの管理者による意図的な情報操作も含まれています。

三菱電機では、クラウド時代の暗号技術として、暗号化したまま情報処理を行うことにより、プライバシー保護とクラウド環境での情報サービスの利便性の両立をはかる技術開発にとりくんでいます。このモデルでは、プライバシー情報は常に暗号化してからデータセンターに登録され、データセンター側は、ユーザーからのリクエストに応じてこの暗号化された情報を復号することなく、所定のサービスを行います。この技術が実現すると、データセンターは情報流出のリスクを最小限に抑えたサービスの提供が可能になります。

第 4 図は、2009 年に三菱電機が開発した「秘匿照合」技術の概要を示したものです [9]。これは個人を特定するための情報（認証情報）を暗号化したまま個人認証を行う技術で、図では印影の例で示していますが、指紋などの生体認証にも応用することができます。まずユーザーは登録窓口で認証情報を暗号化してからデータセンターの認証サーバーに登録します。そして本人認証が必要になったら認証窓口でふたたび認証情報を暗号化して認証サーバーに送信します。認証サーバーは、登録時と認証時の（暗号



第4図 秘匿照合の例

化される前の) 認証情報が類似していたかどうかを、暗号化された2つのデータだけから、秘匿照合アルゴリズムを使って判定します。

登録時の認証情報と認証時の認証情報(図では印影イメージ)はデジタル情報として完全には一致しませんので、類似しているかどうかを暗号化したまま判定しなければならないことに注意してください。ここでは2つのベクトルの内積を暗号化したまま計算できるという、新しいタイプの暗号技術が利用されています[10]。このような技術の必要性は、今後のクラウド環境の広がりとともにますます高まってくるものと考えられます。

6. 耐タンパー技術

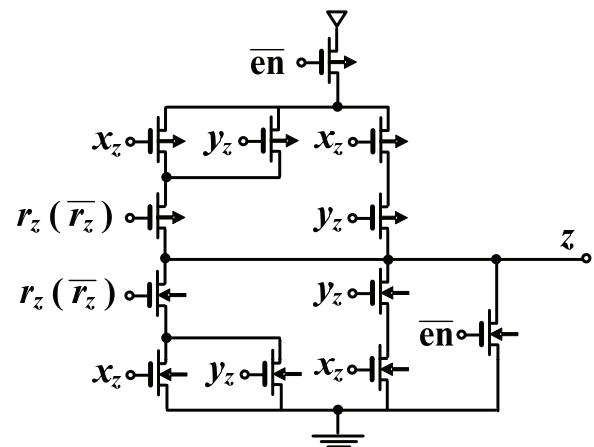
暗号技術の応用範囲が広がり、個人がもつ情報通信機器に暗号が搭載されることが普通になるにつれ、暗号を搭載した半導体に対する不正アクセス対策も重要になってきています。特にサイドチャネル攻撃と呼ばれる、暗号システムの外側から観測可能な物理現象をもとに非破壊で秘密情報を暴く手法が、ICカードなどの実システムで有効であることが示されて以来、暗号ハードウェアを物理的に守る耐タンパー技術が現代暗号において重要な研究分野として確立されるようになりました。

サイドチャネル攻撃として有効な物理現象にはさまざまなものがありますが、例えば秘密情報の値によって暗号化時間が変化するような実装を行っている、逆に暗号化時間から秘密情報が推定できることとなります。このような手法はタイミング攻撃と呼ばれ、これを防ぐためには、どのような入力に対しても同じ時間で暗号化が終了するようなプログラムあるいは回路を設計する必要があります。

さらに高度で有効なサイドチャネル情報として、半導体の電流消費量があります。電流消費量を何度も観測して得られた情報を統計処理すると秘密情報が得られるという電力攻撃は、強力なサイドチャネル攻撃手法として知られています。この解読を防止するためには電流消費量が一定になる、あるいはランダム化される必要がありますが、三菱電機ではRSL(Random Switching Logic)と名付けた

ハードウェア回路とそのシミュレーション技術を用いることにより、電力攻撃を有効に阻止することに成功しています [11]。第5図はRSLによる NAND/NOR 回路の一例です。乱数入力による電力情報のランダム化と、信号の伝達速度を一定するメカニズムから構成されています。

また最近では PUF (Physical Unclonable Function) と呼ばれる、半導体素子の物理的なばらつきを利用してチップ個々に異なる情報をとりだし、それを暗号化に有効に利用する回路設計技術が注目を集めています。これは半導体のいわば指紋認識技術ともいえますが、このような高度な暗号ハードウェアの技術は今後ますます重要になると思います。



第5図 RSL を用いた NAND/NOR 回路

7. 究極の暗号：量子暗号

量子暗号は、現在我々が利用している暗号技術とは全くその原理が異なった、量子物理の法則を解説困難性の根拠とする暗号です。量子暗号は基本的には光通信なのですが、光の粒1つ1つに情報をのせて伝送するという点で従来の光通信とは根本的に異なっています。光の粒、すなわち光子は観測をうけると物理状態が必ず変化するという量子力学的特性をもっています。このことは、単一光子レベルで情報のやりとりをした場合、第三者による盗聴がおきると通信路のノイズが必ず増えるので、盗聴行為そのものがほぼ即座に検知できることを意味しています。このことから量子暗号は解説が不可能な究極の暗号と呼ばれているのです。

現代暗号のほとんどは、その解説困難性の根拠を計算量においています。たとえば解説するにはスーパーコンピュータで1億年かかるから実際には解説はできませんというわけです。しかし、将来量子コンピュータのような、超並列計算を瞬時に行ってしまう計算機が実現したら（いつ量子コンピュータが実現するかには楽観的な意見から悲観的なものまでさまざまありますが）、現代暗号は簡単に解説されてしまうかもしれません。特に現在インターネットで広く用いられている公開鍵暗号は、量子コンピュータができると多項式時間でその解説ができてしまうことが理論的に知られています。

このような背景のもと現在量子暗号の研究開発が世界的に行われており、当社も2000年ごろから量子暗号の研究開発にたずさわっています。第6図はわれわれが現在開発している量子暗号装置であり、今のところ現代暗号のように安価なものとはいえないものの、量子暗号はもはや未来の暗号ではなく、その技術はすでに実用レベルに到達したということが出来ます。

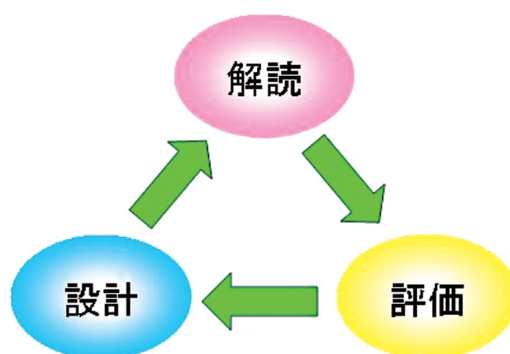
一方で量子暗号は単一光子によって情報を伝送するため、通信距離が増えると損失も増加し、伝送速度が低下するという特性をもっています。たとえば50kmで1Mbps程度が現在の世界記録です。また量子暗号でできることは、正確には2点間の乱数の共有であり（ただし乱数が共有できればそれを鍵として暗号通信ができる）、速度や距離を向上させるとともに、量子暗号の応用プロトコルを増やしていくことも今後の研究課題となっています。



第6図 現在開発中の量子暗号装置

8. まとめ

本稿では三菱電機における暗号技術の研究開発の実例を紹介しながら、現代暗号におけるいくつかのトピックを取り上げました。われわれが暗号の解読技術からスタートしたというのは今考えると重要であったと思います。暗号を解読するということは、別の見方をすると暗号の安全性を評価しているとも言えるわけで、この点では新しい暗号解読法を考案することは、新しい暗号評価指標を考案することと同じといえます。そして新しい暗号評価指標が打ち立てられれば、その評価指標でよいスコアが出るような新しい暗号方式を設計するまでの道のりは遠くありません。第7図のように解読、評価、設計のサイクルをまわしていくことは、暗号技術だけではなく、実はあらゆる新技術開発で有効なのではないかと考えています。



第7図 暗号技術研究開発のサイクル

参考文献

- [1] M. Matsui: "Linear Cryptanalysis Method for DES Cipher" , Proceedings of Eurocrypt' 93, Lecture Notes in Computer Science 765, Springer Verlag (1993)
- [2] M. Matsui: "The First Experimental Cryptanalysis of the Data Encryption Standard" , Proceedings of Crypto' 94, Lecture Notes in Computer Science 839, Springer Verlag (1994)
- [3] M. Matsui: "New Block Encryption Algorithm MISTY" , Proceedings of FSE' 97, Lecture Notes in Computer Science 1297, Springer Verlag (1997)
- [4] "KASUMI (block cipher)", [http://en.wikipedia.org/wiki/KASUMI_\(block_cipher\)](http://en.wikipedia.org/wiki/KASUMI_(block_cipher))
- [5] UMTS Forum, <http://www.umts-forum.org/>
- [6] GSM World, <http://www.gsmworld.com/>
- [7] K. Aoki, T. Ichikawa, M. Kanda, M. Matsui, S. Moriai, J. Nakajima, and T. Tokita, "Camellia: A 128-Bit Block Cipher Suitable for Multiple Platforms - Design and Analysis" , Proceedings of SAC 2000, Lecture Notes in Computer Science 1297, Springer Verlag (2000)
- [8] Camellia Homepage, <http://info.isl.ntt.co.jp/crypt/camellia/index.html>
- [9] 服部充洋, 柴田陽一, 伊藤隆, 松田規, 高島克幸, 米田健: "2-DNF 準同型暗号を用いた秘匿生体認証" , 信学技報, vol.109, no.271, ISEC2009-68 (2009)
- [10] T. Okamoto, K. Takashima: "Homomorphic Encryption and Signatures from Vector Decomposition" , Proceedings of Pairing 2008, Lecture Notes in Computer Science 5209, Springer Verlag (2008)
- [11] D. Suzuki, M. Saeki, T. Ichikawa: "Random Switching Logic: A New Countermeasure against DPA and Second-Order DPA at the Logic Level" , IEICE Transactions 90-A (1): 160-168 (2007)

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

電気工学専攻

複合システム論講座(土居研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)☆

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野

電子工学専攻

集積機能工学講座(鈴木研)

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(松重研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研) #

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

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ジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(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

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

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(野澤研)

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電波科学分野(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)

京都大学ベンチャービジネスラボラトリー(KU-VBL)

高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(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(中村研)

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/>

「折畳み前処理による辺要素電磁界シミュレーションの高速化」

計算機による電磁界シミュレーションは、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における開発コストの削減・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。現在では計算機性能と計算手法の進歩にしたがって、数十万～数百万自由度といった中規模のシミュレーションをPC上で行うことも可能となってきていますが、中規模以上のシミュレーションに費やされる計算コストは依然として大きく、その高速化・効率化のための新しい計算技術の開発が強く望まれています。そこで、本研究室では、先進的な電磁界シミュレーション技術の理論・応用に関する研究に取り組んでいます。以下では、最近の研究例 [1][2] について説明します。

電磁界シミュレーションに広く用いられている計算手法の一つに、有限要素法と呼ばれる手法があります。有限要素法による大規模電磁界シミュレーションでは、例えば自由度の数が一千万を超えるような大規模連立方程式の求解を行う必要があります。それには多大な計算時間を要します。このため、この求解を効率的に行うことがシミュレーション全体の効率化につながります。有限要素法に現れる連立方程式の係数行列はスパース（疎）であることから、その解法としては、ガウスの消去法などの直接解法と比べて、ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 法などの反復解法が有力です。

有限要素法による電磁界シミュレーションでは、マクスウェル方程式の数理的な性質を適切に扱うために、辺要素と呼ばれる関数を使用されます。このとき現れる連立方程式には、特異性（無数の解が存在する）があることが知られています。これは例えば、磁束密度 \mathbf{B} をベクトルポテンシャル \mathbf{A} を用いて $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ と表すときに、 \mathbf{A} が一意に定まらない性質に対応しています。特異な連立方程式については、適当に未知数を消去することによって、無数の解の中のある特定の解が満たす方程式を導くことが可能です（クーロンゲージ $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ などになぞらえてゲージ固定と呼ばれます）。この方法では未知数を消去することにより反復解法の反復当たりのコストを削減できるのですが、収束に必要な反復回数が致命的に増加してしまう（表1の※1）ことが知られていました。本研究室では、この問題を回避し反復回数の増加を防止する（表1の※2, ※3）折畳み前処理という解法の提案を行いました。これにより、通常の解法と比較して大幅な性能改善を得ることができます。

参考文献

- [1] Y. Takahashi, T. Mifune, T. Iwashita, K. Fujiwara, and Y. Ishihara, "Folded IC Preconditioning in Quasi-Static Field Analysis Taking Account of Both Tree-Cotree and Phi = 0 Gauge Conditions," 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010.
- [2] T. Mifune, Y. Takahashi, and T. Iwashita, "New Preconditioning Technique to Avoid Convergence Deterioration due to the Zero-Tree Gauge Condition in Magnetostatic Analysis," IEEE Trans. Magn., vol. 46, no.7, pp. 2579-2584, 2010.

表1 静磁界シミュレーションの計算コストの比較

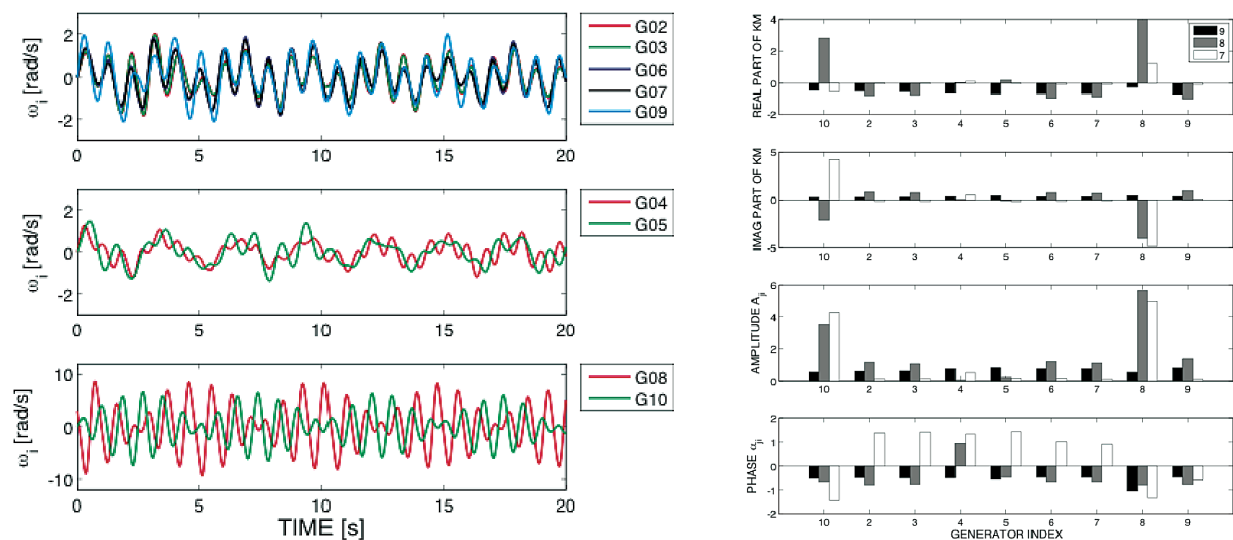
未知数消去	行わない (通常の方法)	行う (ゲージ固定)		
		ICCG	FICCG (提案法1)	A_C-A_T block ICCG (提案法2)
解法	ICCG	ICCG	FICCG (提案法1)	A_C-A_T block ICCG (提案法2)
収束までの反復回数	1180	10000 以上 ※1	1178 ※2	1151 ※3
計算時間 [s]	234.1	— (未収束)	197.5	140.3

電気エネルギー工学講座 電力変換制御工学分野（引原研究室）

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「データから力学を理解する～非線形モード分解と電力系統解析への応用～」

近年、計測技術の飛躍的向上に伴い、実世界に生起する複雑な物理現象を測定し大規模時系列データとして利用することが可能になっている。例えば、建物内の室温分布や消費エネルギー、海洋における流速・風速分布、電力系統の電圧・周波数・潮流分布等が挙げられる。システム工学の観点では、大規模時系列データの現象の背後にある力学（メカニズム）の解明が対象となるシステムの深い理解のために必要であり、力学として意味のある情報をデータからどのように抽出するかが課題である。このとき重要な概念の一つが「モード」であり、工学的解析に多用される運動の単位としてのモードの同定がシステムの理解に向けて重要になる。本研究室では、非線形力学系のスペクトルから定義されるクープマンモードに着目し、大規模時系列データから力学を理解するための方法論の開発に取り組んでいる。クープマンモードは、非線形力学系に対して定義されるクープマン作用素に基づく概念であり、時系列データから単一周波数で振動する空間モードを同定できる [1]。クープマン作用素は、不変集合等の非線形力学系の大域構造とも関連し、大規模時系列データを再現する力学系の同定も可能にする。下図はクープマンモードを多機電力系統の動揺現象から同定したものであり、単一周波数で動揺する空間モードに相当する [2]。現在は、過渡状態を含む時系列データから意味のある力学的情報をどのように抽出するのかという課題に取り組むとともに、エネルギーマネジメントへの応用研究を進めている。文献 [1] C. W. Rowley et al., J. Fluid Mech., vol. 641, pp. 115-127 (2009) [2] Y. Susuki and I. Mezic, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会（2010）



図：New England 39 母線系統の動揺現象（左図）からクープマンモード（右図）を同定。システム为非線形性により動揺現象は線形化固有値に基づく周波数とは異なる運動を示している。クープマンモードは動揺周波数（7：1.3Hz, 8：1.0Hz, 9：0.37Hz）と動揺の空間モード（AMPLITUDE, PHASE）を正確に与えるので、コヒーレントに運動する発電機の同定が可能になる。

集積機能工学講座（鈴木研究室）

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

「高温超伝導体 / 強磁性体 2 層エピタキシャル構造における偏極スピン注入効果」

一部の特別な超伝導体を除くと、超伝導はスピンの反対の方向を向いている 1 対の電子が、クーロン反発力を上回る電子間の引力を媒介として、対を作ることから生じます。対を作るにはある条件が必要であって、電子全体の中にこのような条件を満たして対を作る電子の数は一般にそれほど多くありません。例えば金属超伝導体の場合、その割合は 0.01% という場合も珍しくありません。つまり、全体の電子の中で極々一部の電子が対を作っているわけですが、それにも拘わらず、超伝導状態になると、電気抵抗ゼロ（完全導電性）、磁束の排除（完全反磁性、あるいはマイスナー効果）それに、顕著な巨視的量子効果を示すようになります。

これまで超伝導を制御するには、温度、磁場、電流などが用いられてきました。超伝導は、担っている電子対の数が少ないにも拘わらず頑健であるので、このような方法では制御が大変なところがありました。超伝導体の一部に弱い部分を形成して制御する（ジョセフソン接合）方法も考えられました。当研究室では、新しい超伝導の制御方法として、超伝導体の中にスピンの 1 方向に揃った電子（準粒子）を注入することにより超伝導を制御する方法を研究しています。電子対は、熱力学的揺らぎによって破壊されては形成されるというプロセスを通して平衡状態にありますが、それにスピンの揃った電子（準粒子）を注入することで対の相手方を少なくして平衡状態を不安定にするというのがねらいです。

このようなスピンによる超伝導の制御には 100%スピンの揃った強磁性体（ $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 略して LSMO）と高温超伝導体（ $YBa_2Cu_3O_7$ 略して YBCO）の 2 層エピタキシャル薄膜を使用します。図 1 はこのような 2 層薄膜の断面で、当研究室岸本昌也君が修士論文の研究で作製したものです。STO は基板の $SrTiO_3$ です。強磁性体の厚さが 85nm、超伝導体が 75nm あります。この 2 層薄膜から図 2 のような素子を形成し、それにスピン偏極電流を注入した時に超伝導が破壊される実験結果を示したのが図 3 です。この場合の超伝導層の厚さは 35nm です。LSMO 強磁性体を通さないで Ag 電極から直接電流を注入した場合に比べて超伝導の抑制が大きくなり、スピン偏極した準粒子電流を注入することにより顕著な効果が見られています。

このように超伝導体と強磁性体を組み合わせると、新しい機能素子の形成が可能になります。三層エピタキシャル構造を形成すれば強磁性層によるジョセフソン接合などを通して量子ビットなどへの応用が可能になります。

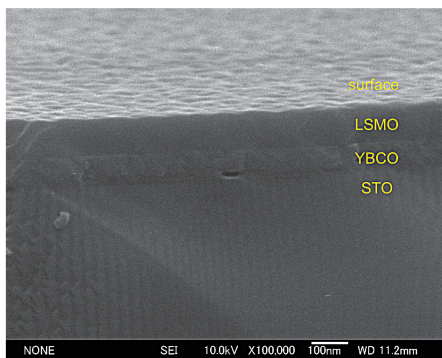


図 1 二層エピタキシャル構造の断面 SEM 写真

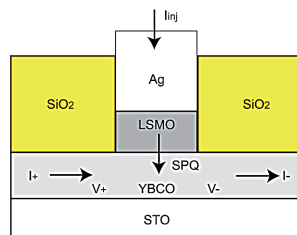


図 2 注入素子模式図

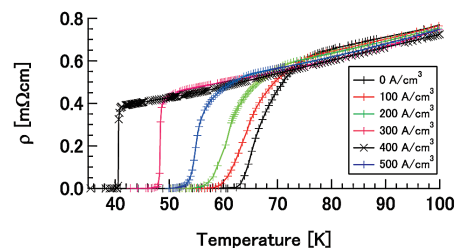


図 3 偏極スピン注入による超伝導転移の変化

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

「高分子材料への炭素負イオン注入による幹細胞のパターン配列と神経細胞への分化」

イオン注入技術は、表面・表層の物性を微細なパターンで改質する制御性の良い技術であり、半導体素子製造過程で利用されていますが、まだまだ多くの可能性を持っています。本研究室では、絶縁物でも制御性良く改質できる負イオン注入技術を開発して来ており、現在その応用として、紫外-青色の発光材料開発及び人為的な神経回路網形成などに取り組んでいます。最近、成体幹細胞のパターン配列接着とその神経細胞への分化誘導に成功しましたので、本稿では、高分子材料への炭素負イオン注入による細胞のパターン化接着について記述します。

医学・生物分野でよく利用されるポリスチレン PS や生体に無害な柔らかいシリコンシート SR に炭素負イオンを幅 $50\ \mu\text{m}$ 、長さ $5\ \text{mm}$ のスリット列を多数有するパターンマスクを介して注入し、パターン注入した材料上で各種の細胞を培養して、接着状況を調べました。図 1 は炭素負イオンを 2 回スリット列マスクを介して注入した PS 上で培養した PC12h 細胞で、格子状パターンに接着しています。図 2 はパターン注入した SR 上で培養した間葉系幹細胞 MSC で、細長い細胞形状で線状に接着しています。これに、 β メルカプトエタノールを用いて分化誘導した結果を図 3 に示す。細胞は丸い細胞体とフィラメントを持ち、ニューロン様形態になっています。ニューロン特異酵素 NSE が細胞全体で検出されていますので、分化した細胞は神経細胞であることが判明しています。このように、幹細胞を人為的形狀に自発接着させ、かつ、神経細胞に分化させる実験は、世界に類のない試みで、神経バイオインターフェイス^(注1)の開発や記憶メカニズムの解明などへの応用が期待されています。

基本的に細胞は足場となる粘着性タンパク質の上に接着し、そのタンパク質は適度に親水性表面に吸着します。このメカニズムも既に解明しており、水の接触角が 86° や 100° のポリスチレン PS やシリコン SR では、炭素負イオン注入の条件に依存するが、 70° 程度に低下し、つまり、親水性化します。また、培養培地からのタンパク吸着を X 線光電子分光法でその窒素吸着量を調べると、注入領域に特異的に多く吸着していることも判明しています。注入パターンに沿った自発的な細胞のパターン配列接着に必要な炭素負イオン注入処理条件は、高分子材料や細胞の種類によって異なりますが、概ね、注入エネルギー $10 \sim 20\ \text{keV}$ 、注入量 $1 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{15}\ \text{ions/cm}^2$ であることが判明しています。

注 1: 神経細胞の活動をパターン電子情報として取り出すものが神経バイオインターフェイスで、多数の配列した検出素子上に神経細胞を位置させることが求められます。事故などで手足を無くした人にとって、神経端から指令情報をこのインターフェイスで取り出して、高度な義手、義足の操作に利用できることとなります。検出素子上 (ゲート酸化膜直上) に神経細胞の配置することが求められています。

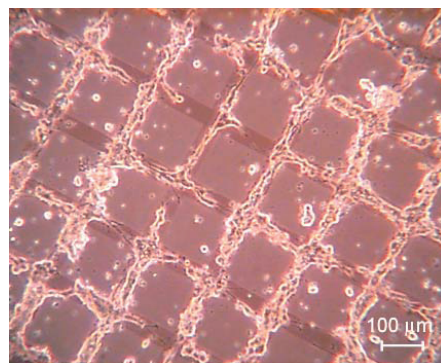


図 1. ポリスチレン上で格子状に自発的に接着した PC12h 細胞

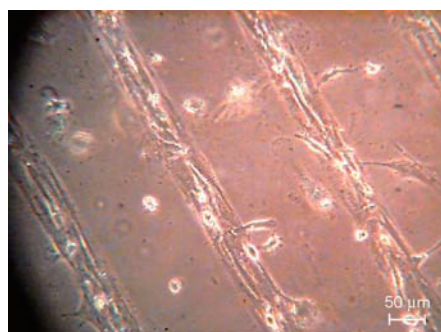


図 2. シリコン上で注入パターンに沿って配列した間葉系幹細胞 MSC

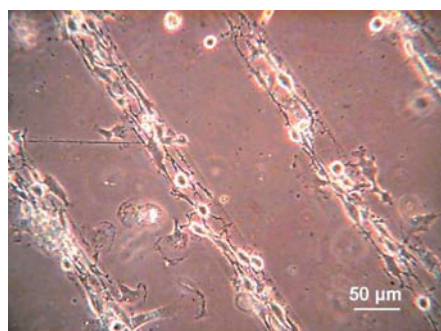


図 3. シリコン上に配列した間葉系幹細胞 MSC を分化させた神経細胞

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>

「NiO 薄膜を用いた抵抗変化型不揮発性メモリ構造の作製と評価」

フラッシュメモリが登場して約 20 年が経過しました。今では、さらなる技術革新や大量普及によって大容量・低コスト化が進み、各種メモ리카ードやオーディオプレーヤーに当然のように組み込まれています。また、従来のハードディスクに変わり、衝撃に強いフラッシュメモリを記憶装置として搭載されたパソコンも普及段階にあります。しかし、なお進化し続ける高度情報化の波は、そのフラッシュメモリの仕様ですらかき消してしまいつつあり、より高速かつ低消費電力でのメモリ動作を渴望しています。

最近本研究室で注目している遷移金属酸化物は、特定の金属で挟んで電圧印加を繰り返すと高い抵抗と低い抵抗の状態を往復する、抵抗変化特性を示す材料としても知られています。ここで、我々が反応性スパッタリング法で作製したニッケル酸化物 (NiO) 薄膜を白金 (Pt) 電極で挟んだ積層構造 (Pt/NiO/Pt 素子) の抵抗変化特性を図 1 で説明します。まず、50k Ω 程度の高抵抗状態 (HRS) の素子に電圧を印加していくと、2V 程度で約 50 Ω の低抵抗状態 (LRS) へと変わります (セット: set)。次に、再び電圧を印加していくと 1V 弱で低抵抗状態から高抵抗状態に戻ります (リセット: reset)。この繰り返し可能な抵抗変化特性は、電源を切っても抵抗状態を保持、リセット電圧以下での抵抗値判別による読み出し、セット・リセット動作による書き換えが可能となる、不揮発性メモリとして機能を有するわけです。とりわけ、フラッシュメモリに比べて高速かつ低電圧で動作することから、来るユビキタス社会の要請に応える次世代不揮発性メモリとして大いに期待されています。

しかし、一見単純そうなこの抵抗変化特性ですが、実はその発現メカニズムはよくわかっていません。酸素イオン伝導が要因であるという報告がある一方で、類似の抵抗変化特性を示す原子スイッチの動作は金属イオン伝導によるとされるなど、伝導性ひとつとっても統一の見解が得られていない状況です。

我々は、NiO の半導体としての物性に着目して、抵抗変化特性の基礎研究を進めています。安定した抵抗変化特性を示す NiO_{1.07} 薄膜にアドミッタンス法という欠陥評価法を適用したところ、価電子帯端から深さ 0.17eV の位置に単一の欠陥準位の存在を確認できました。また、図 2 の高抵抗状態での抵抗値のアレニウスプロットより活性化エネルギーが 0.17eV と算出され、この状態では先の欠陥準位から熱励起された正孔をキャリアとするバンド伝導が支配的であることが示唆されました。他に、様々な条件や雰囲気下での熱処理の影響なども精査しています。こうした基礎研究を着実に進めていき、抵抗変化特性の発現メカニズムを解明して、抵抗変化型不揮発性メモリの実用化に貢献することを目指します。

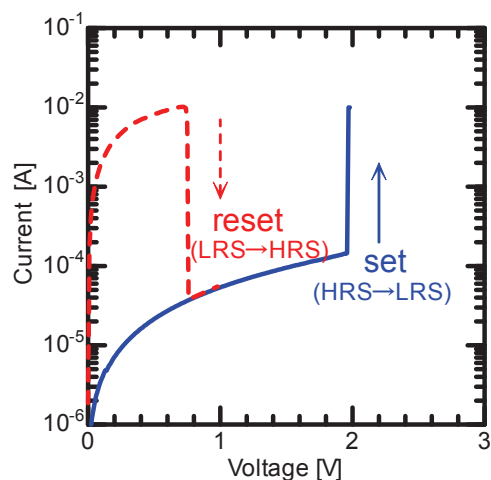


図 1 Pt/NiO/Pt 素子の抵抗変化特性

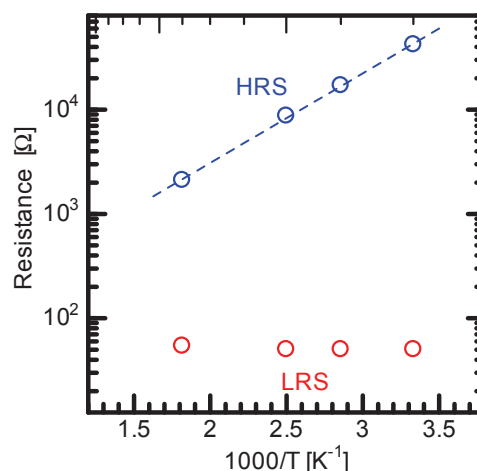


図 2 Pt/NiO/Pt 素子の抵抗値の温度依存

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 (高岡研究室)
http://cib.kuee.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html
 「新しい水利用技術の開発」

水は生体内や地球上で最も多量に存在する液体であり、生命や地球環境にとって必要不可欠な物質であります。また、半導体産業分野では、様々な材料やデバイスの洗浄に用いられている溶媒ですが、酸やアルカリ溶媒と異なり、材料表面との化学反応は起こさない物質です。近年、新しい水利用技術として水クラスターのイオンビーム技術が注目されています。水分子イオンを固体表面に照射すると、中性状態の水分子とは異なり、ヒドロキシル基や水素原子の励起種が反応種として働き、表面化学反応を活性化することができます。所謂、水のような多原子分子のイオンビームは、イオンの運動エネルギー、電荷、質量の輸送に加えて、多原子分子を構成する官能基（ヒドロキシル基）特有の化学反応を付与できます。さらに、クラスターイオンビーム照射では、クラスターイオンの運動エネルギーを熱エネルギーに変換でき、照射表面を局部的に加熱できるので、基板温度が室温でも化学反応を促進できます。当研究室では、新しい水利用技術の開発を目指しており、こうした特徴を有する水クラスターイオンを固体表面に照射して、従来のウェットプロセスでは得られない表面原子との化学反応を明らかにしましたので、その結果を紹介します。

水を導入した液体容器を加熱し、高圧の水蒸気をノズル喉部の小孔を通して真空中に噴射します。このとき、断熱膨張によって水分子の塊状集団すなわちクラスターが生成されます。生成された水クラスターは、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。イオン化された水クラスターイオンは、イオン化部から引き出された後、減速電界法によってサイズ分離されます。サイズ分離された水クラスターイオンは加速され、ファラデーカップ内に装填された基板に照射されます。生成された水クラスターのサイズは、ピークサイズが約 3000 分子で、数十分子から数万分子に分布しています。

図1は、水クラスターイオンの照射量（ドーズ）を変えて照射したシリコン基板および SiO_2 基板のスパッタ深さを示します。照射量の増加と共にスパッタ深さは増加しています。特にシリコン基板では、照射量 1×10^{14} ions/cm² で SiO_2 基板より 10 倍程度深く削られ、照射量 1×10^{16} ions/cm² では同程度削られているのが分かります。これは、照射直後では表面に現れているシリコン原子と水分子の水素が反応して、揮発性のシリコン化合物が生成されたためと考えています。また、照射量の増加と共に、水分子の水酸基との反応によってシリコン表面が酸化されるため、シリコン基板は SiO_2 基板と同程度に削られると考えています。同様の化学反応が、水クラスターイオンの入射角を変えて照射したシリコン基板表面でも生じています。図2に示すように、ある入射角でシリコン基板のスパッタ深さは最大値を示し、 SiO_2 基板より 4 倍程度深く削られています。水蒸気をクラスターイオン化することによって、中性状態の水では得られない化学反応性を示し、従来のモノマーイオンビーム照射の 50 倍以上のスパッタリング率を得ることに成功しました。

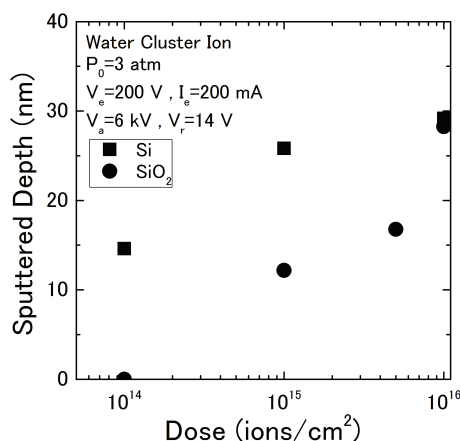


図1. スパッタ深さのドーズ依存性

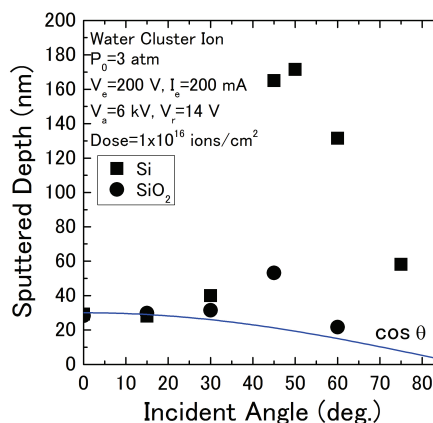


図2. スパッタ深さの入射角依存性

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>
 「環境に優しい物質創成技術を目指して」

半導体デバイスの製造には相当の電力が必要であるし、原料に毒物や危険物を用いる際の保護対策や廃棄物処理、不純物混入を避ける高度の真空システムなど、総じてエネルギー消費が大きい。地球環境の問題を考えると、デバイス材料、原料、製造技術にわたり環境への優しさを求めることが必要である。われわれは、酸化物半導体を多機能性、新機能性を備えた Green Materials として注目し、高品質結晶の育成と機能創成の研究を行っているが [1]、同時に酸化物であることを活かした環境に優しい物質育成技術 Green Chemistry を実現し、総じて豊かな暮らしと地球環境への貢献を期している。

酸化物半導体がこれまで一般に用いられている半導体と根本的に異なることは、従来最も避けるべき不純物とされてきた酸素が、半導体を構成する元素であるという点である。したがって、酸素の混入という問題にややゆとりをもって育成システムを構築できると考えられる。また水やアルコールが良い酸化剤であるため、従来の半導体育成装置では考えられなかったこのような原料がむしろ「望ましい」訳である。この観点で、われわれは金属の酢酸塩やアセチルアセトナトの水溶液、アルコール溶液を原料とし、これを超音波で霧化して得られたミスト（直径 $2\text{-}3\mu\text{m}$ の粒子）をキャリアガスで輸送して半導体の育成に用いるという「ミストデポジション法」の開発を行ってきた。初期には透明導電膜としての ZnO の育成に着手し [2,3]、その後、新たな機能が期待される酸化物単結晶薄膜の育成へと展開を図っている。

図 1 は、ZnO 基板の上へ ZnO 単結晶薄膜をこの技術によって成膜した際の表面である。表面は単分子層に相当する 0.26 nm の段差を持つ原子的に平坦なテラスで覆われており、また結晶性も優れている。図 2 はサファイア基板に Ga_2O_3 単結晶薄膜を成膜し、断面を透過型電子顕微鏡で観察した結果である。欠陥がほとんどない成長層が得られている。従来金属化合物の成膜には、超高真空下での分子線を利用したり、有機金属化合物を原料にすることが一般的であったが、われわれの技術では危険で高価な有機化合物を用いることなく高品質の結晶成長が可能で、これは酸化物ならではの特徴である。現在、この技術は企業との共同研究による普及を目指しているとともに、この技術を用いた新しい酸化物半導体の育成と新しい機能の創成を進めている。

[1] 京都大学電気関係教室技術情報誌 cue 22 (2009) 24.

[2] <http://www.kulib.kyoto-u.ac.jp/modules/wordpress2/index.php?p=28> のうち No.6

[3] <http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/57270>

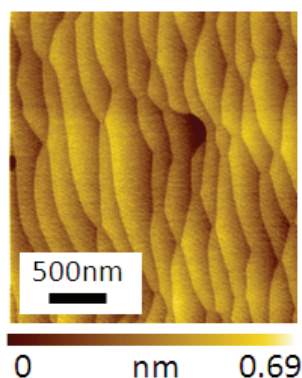


図 1 ZnO 基板上に成膜した ZnO 薄膜表面の原子館力顕微鏡像。

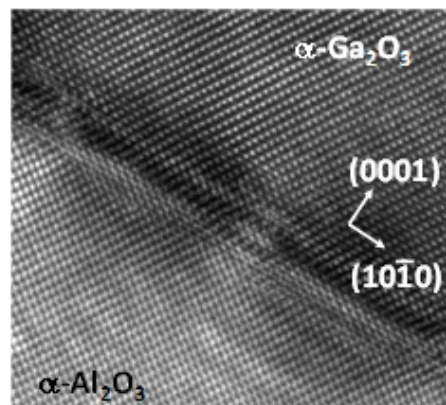


図 2 サファイア基板上 Ga_2O_3 薄膜の透過電子顕微鏡像（格子像）。

知能メディア講座 言語メディア分野 (黒橋研究室)

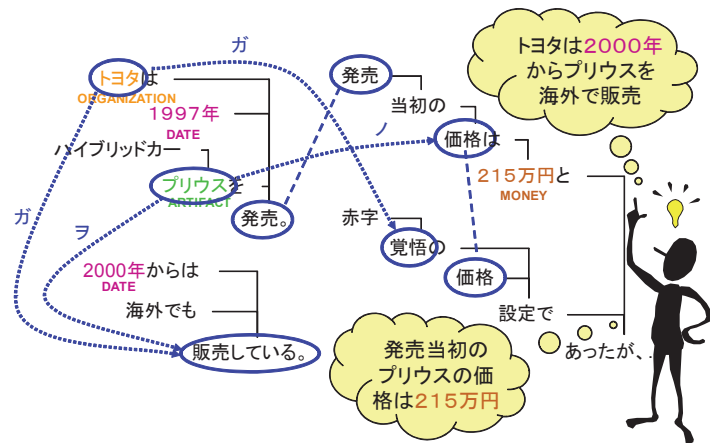
<http://nlp.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「自動獲得した世界知識に基づくテキスト中の関係性の認識」

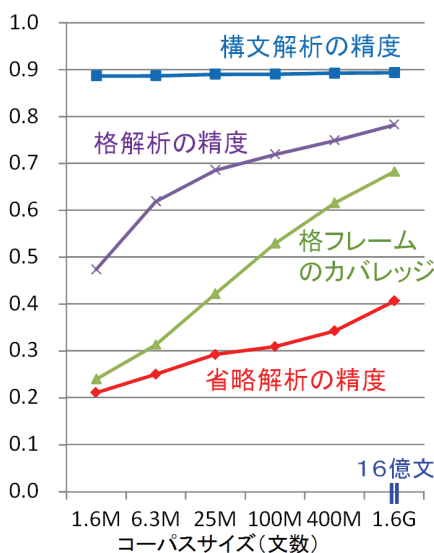
自然言語テキストは一次元の文字列で記述されます。しかし、その中に出現する語と語の間には様々な関係が存在し、計算機による言語理解を行うためにはこれらの関係性を認識する必要があります。

「トヨタは1997年ハイブリッドカー、プリウスを発売した。2000年からは海外でも販売している。発売直後の価格は215万円と赤字覚悟の価格設定で…」

例えば上記のようなテキストでは、係り受け関係にある語に加えて、2文目の「販売」と1文目の「トヨタ」は用言とその主体（ガ格）の関係にあり、また、1文目の「プリウス」と3文目の「価格」は商品とその価格という関係にあります。このような離れた語と語の関係性の認識は、情報検索や質問応答、機械翻訳などといった多くの自然言語処理アプリケーションの高精度化において重要な技術であると言え、本研究室では特に「販売」に対する「トヨタ」のような用言の省略された格要素を高精度に認識することを目指した研究を行っています。



用言の省略格要素の認識を行うために必要となる知識は、用言とどのような位置関係にある語が先行詞となりやすいかなどの“談話構造に関する知識”と、各用言がどのような格を必要としその格はどのような表現で埋められるかといった“語彙に関する知識”の2つに大きく分けられます。このうち“談話構造に関する知識”は多くの照応関係に適用できる一般的な知識であり、正しいゼロ照応関係の情報が人手で付与された比較的小規模のコーパスから獲得することができます。一方、“語彙に関する知識”は用言ごとに個別の知識が必要となり、また、ある格を埋めることのできる語の種類も多岐に渡るため小規模のコーパスから獲得することは困難です。そこで本研究室では用言ごとにどのような格を必要としその格がどのような用例によって埋められるかを記述した格フレームと呼ばれる知識を16億文にも及ぶ大量のウェブテキストから自動的に獲得し活用することで、様々な語彙に対応した省略解析システムを作成しました。



また、格フレーム獲得に用いるコーパスサイズの解析精度に与える影響を調べるため、160万文から16億文までの異なるサイズのコーパスから格フレームを獲得し、格フレームに基づく構文・格解析（「は」などの副助詞によって「が」「を」などの格助詞が消えている場合にその格を推定する処理）モデル [1] や、省略解析モデルに適用しました。その結果、より大規模なコーパスを用いることで格解析・省略解析の精度が向上すること、16億文を利用した場合でもその精度は飽和していないことを明らかにしました [2]。今後はより大規模なコーパスから格フレームを獲得し、種々の新しい手掛かりを用いることで、さらに高精度な構文、格、省略解析システムの構築を目指していく予定です。

[1] 河原, 黒橋, 自動獲得した大規模格フレームに基づく構文・格解析の統合的確率モデル, 自然言語処理, Vol14, No.4, 2007

[2] Sasano, Kawahara, Kurohashi. The Effect of Corpus Size on Case Frame Acquisition for Predicate-Argument Structure Analysis, IEICE-Transactions on Info and Systems, Vol.E90-D, No.6, 2010

通信システム工学講座 デジタル通信分野 (吉田研究室)

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

「Cooperative 分散無線中継ネットワークのフィールドトライアル」

携帯電話では、すぐ近くの人との通話でも必ず離れた無線基地局を経由する非効率さがある。今後、人が意識して「連絡」や「情報取得」を行うことが通信の主体である社会から、人を取り巻く環境が常に情報交換を行って安全・快適・高効率な社会活動を支える社会に移っていく中で、身の回りの「物」が効率良く高い信頼性で近距離の通信を行う必要がある。

人口にほぼ匹敵する台数の高度な無線送受信機が街中にあふれている。必要に応じてこれら送受信機の助けを借りて近距離の通信を行う Cooperative 無線中継ネットワークが脚光を浴びている。特に複数の中継局の協力を得ることによって各中継伝送の通信品質を大幅に改善することができる。このネットワークでは、無線通信で実用化が進みつつある MIMO (Multi-Input Multi-Output) 伝送技術が分散した中継局間で実現され、ダイバーシチ効果による伝送品質改善や、空間多重伝送による伝送容量拡大が可能となる。

本研究は、Cooperative 分散無線中継ネットワークの優れた伝送特性を屋外 (フィールド) において実証することを目的としている。世界的にもこれまで Cooperative 分散無線中継ネットワークの実際の伝送特性はほとんど明らかにされていない。これは、伝送実験に要する装置数が従来の単純な一対一通信よりも大幅に増加してしまい伝送実験の難易度が高くなるためである。

吉田研究室では独自にデジタル IF 方式送受信機を開発し [1]、無線局免許を取得した上で京都市街におけるフィールド実験を実施している。この実験では、伝送する無線パケットの送信元である発呼無線局を搭載した車両と、構内に設置した無線中継局 2 局、および最終的にパケットを受け取る宛先無線局を搭載した車両の合計 4 地点からの実験データをリアルタイムに収集して可視化を行う等の工夫によって効率化を図っている。図 1 は中庭において車両準備中の様子であり、図 2 はビット誤り率の測定結果である。御影通り付近を走行した発呼車両からの 1.3GHz 帯無線信号は、近衛通り付近を走行した宛先車両では全く受信できない状況であったが、3号館南棟屋上の中継局 1 を経由した場合 (via Relay 1) や、文学研究科屋上の中継局 2 を経由した場合 (via Relay 2) には通信が可能となり、さらに STBC (Space-Time Block Code) 技術によって両方の中継局を利用した協力中継 (Coop.) では大きく伝送特性が改善されている。

参考文献

[1] Hidekazu Murata, Yuji Oishi, Koji Yamamoto, Susumu Yoshida, "FPGA implementation of STBC based cooperative relaying system," IEICE Transactions on Communications, Vol.E93-B, No.8, Aug. 2010.



図 1. 無線装置を積み込んだ発呼車両と宛先車両。この他構内に中継局を 2 局設置した。

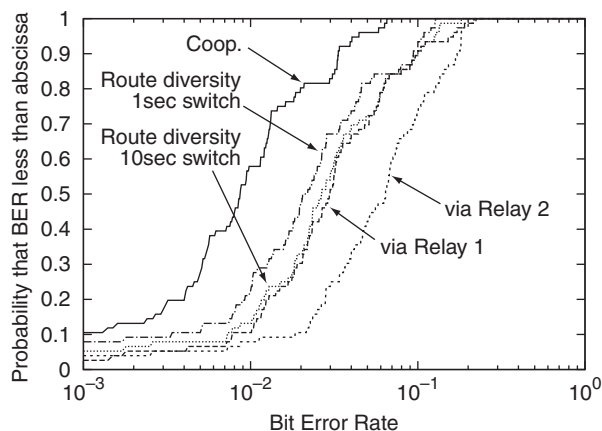


図 2. 協力中継 (Coop.) のビット誤り率 (BER) がもっとも優れる

通信システム工学講座伝送メディア分野（守倉研究室）

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

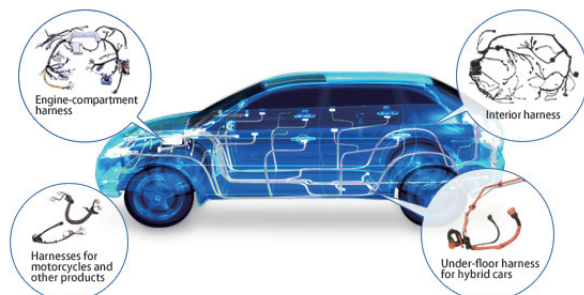
「低遅延・高信頼な車載電力線ネットワークシステムの構築」

自動車の制御に代表されるものはステアリング操作やブレーキ操作などがあり，私達の安心・安全に関わる重要な遠隔制御です．これらの自動車内の遠隔制御を効率的かつ信頼性高く実現するために，機械制御から電子制御に移行してきました．そのため，自動車内で電子制御ユニット間の制御信号を伝達するために人体における神経網と同様に，自動車内に低遅延・高信頼な制御信号ネットワークシステムを構築しなければなりません．車載ネットワークシステム技術は Steering-by-Wire や Braking-by-Wire で代表される X-by-Wire 技術として注目を集めています（図1）．

しかし，現在，車載ネットワークシステムでは新たな問題に直面しています．現在の自動車の中には，車載ネットワークシステムを構築するため，最大で数千本から成る信号線及び電力線が搭載されています．これらの信号線及び電力線は車載ネットワークシステムを複雑にし，コンパクトな自動車内で快適なスペースを提供することを困難にしています．そこで，当研究室では，自動車内の電力線と信号線を統合し，電力と制御信号を同一の伝送メディアで利用可能な車載電源線ネットワークシステムの構築を目指しています．本研究は，住友電気工業株式会社との共同研究として進められています．

車載電力線ネットワークシステムには，私達の安心・安全を提供する必要があるため，低遅延かつ高信頼な通信の実現が求められます．しかしながら，車載電源線の伝送特性及び雑音の測定実験から，ドアロック，パワーウィンドウ，ワイパーなどの駆動中のアクチュエータから生じる突発的かつ高レベルのインパルス性雑音によりシステムの信頼性が大幅に低下することが判明しました．そこで，当研究室では車載電源線に重畳されるインパルス性雑音を検出する方式 [1] を考案し，提案方式の性能が従来の検出方式に比べて大幅に検出誤りを低減することを明らかにしました．図2に示すのは，検出されたインパルス性雑音の一例で，図3ではその振幅スペクトル密度を示しています．図3の結果から，アクチュエータから発生するインパルス性雑音は背景雑音に比べてエネルギーが特定の周波数に集中することが分かります．今後，車載電源線上のインパルス性雑音の有する特徴量を抽出することにより，車載電力線ネットワークシステムからインパルス性雑音の影響を低減する方式を提案していく予定です．

参考文献 [1] D. Umehara, M. Morikura, T. Hisada, S. Ishiko, S. Horihata, "Statistical impulse detection of in-vehicle power line noise using hidden Markov model," Proc. IEEE ISPLC 2010, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 341-346, Mar. 2010.



<http://www.sws.co.jp/en/product/wireharness/car.html>

図1：車載ネットワークシステム

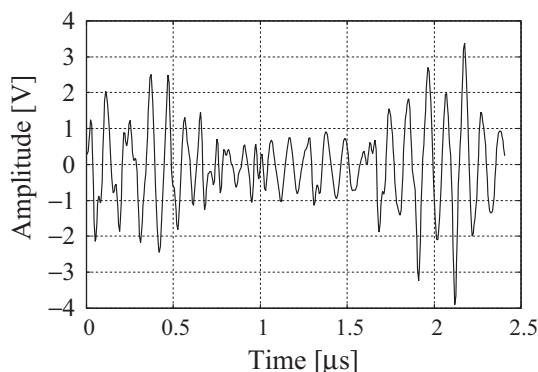


図2：検出されたインパルス性雑音

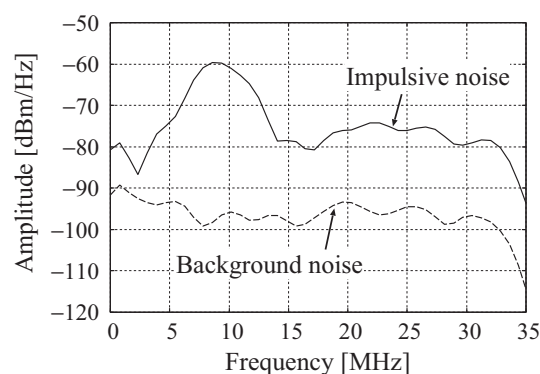


図3：インパルス性雑音の振幅スペクトラム密度

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>

「光通信向け高速・低消費電力 CMOS 集積回路の開発」

本テーマでは、光通信に用いる集積回路について研究している。光ファイバ網は現代の通信の基幹であり、その性能は日々向上している。しかし一方でインターネットの普及などで通信量も爆発的に増大しており、その性能向上への要求はますます強くなっている。また、通信の基幹部分だけでなく家庭まで光ファイバ網が普及しており、量的な需要も拡大している。このような背景から、光通信のためのシステムでは高性能・低コスト・低消費電力化への期待が強い。本研究はこのような期待に応えるべく、優れた集積回路を実現するための回路設計技術を研究している。通信システムではいたるところで集積回路が利用されているが、本テーマで扱うのはレーザーダイオードドライバ (LDD) と呼ばれる回路である。これは信号を送信する回路の最後に位置し、レーザーダイオードを駆動することで電気信号を光信号に変換する。レーザーダイオードを動作させるには (集積回路にとっては) 大電流である 100mA 近い電流を流さなければならない。しかし、電流が大きいほど高速な動作は難しくなる。また、多くのトランジスタが必要となるためコストは上がり、消費電力も増えてしまう。

回路の高速化にはインダクティブピーキングという手法が一般的に用いられる。回路の動作速度を制限している主な要因はキャパシタである。この手法はインダクタ (コイル) によってキャパシタの影響を相殺することで回路の動作速度を向上させる。しかし、集積回路でこの手法を使おうとすると集積回路の中にインダクタを作らなければならない。集積回路内でインダクタを作るための構造としてスパイラルインダクタが一般的だが、スパイラルインダクタはトランジスタの最小単位が数 $\mu\text{m} \times$ 数 μm であるのに対して数百 $\mu\text{m} \times$ 数百 μm の面積を占有する。しかも、効果的なインダクティブピーキングを施すには複数のインダクタを配置しなければならないためその面積は膨大なものになってしまう。最近の研究成果の一つとして、このインダクタの改良が挙げられる。これは複数のインダクタを絡み合うように一箇所に巻き込み、面積を削減すると同時に相互インダクタンスも活用するという手法である。この手法には設計が難しくなるという欠点があるが、計算機シミュレーションを活用することで 16Gbps 動作可能な LDD を設計することに成功した。より効果的な設計手法について現在研究を進めている。図 1: 試作した集積回路の顕微鏡写真。中央に 2 つある八角形の部分がインダクタであり、大きな面積を占めていることが分かる。従来はこの数倍の面積を必要とした。図 2: オシロスコープを接続した動作試験において観測された 16Gbps の波形。実際にレーザーダイオードを接続した場合は 20Gbps 以上の動作が予想されている。

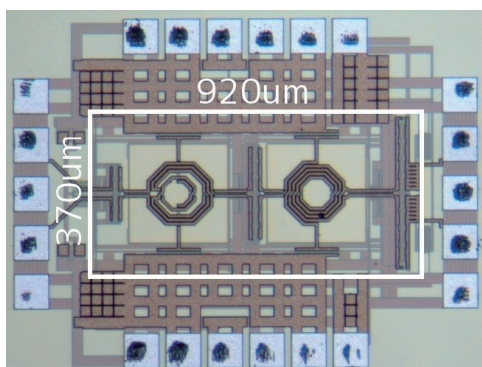


図 1: 試作した集積回路の顕微鏡写真。中央に 2 つある八角形の部分がインダクタであり、大きな面積を占めていることが分かる。従来はこの数倍の面積を必要とした。

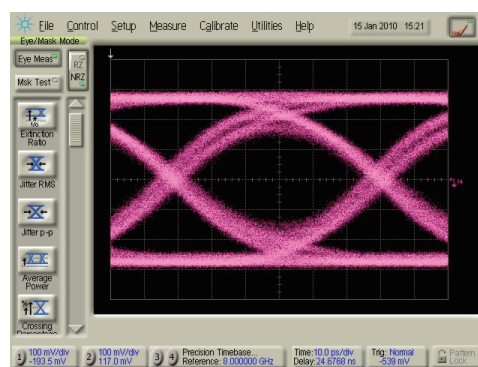


図 2: オシロスコープを接続した動作試験において観測された 16Gbps の波形。実際にレーザーダイオードを接続した場合は 20Gbps 以上の動作が予想されている。

システム情報論講座 医用工学分野 (松田研究室) 「ヒト循環動態シミュレーションシステムの構築」

呼吸器系、消化器系、骨格系など、様々な機能単位が複合したシステムである人体の各組織の中でも、神経系や循環器系はそれらの電気生理学的あるいは運動力学的な機能を定量的に計測することが比較的容易であり、早くから生体機能の数理モデリングの対象として研究が進められてきた。従来の循環動態シミュレーションは、主として血管内の圧力や血流速度、血管壁の弾性などの指標を用いて流体力学的計算を行うものが中心であったが、近年では様々な測定法の進歩により計測が可能となった各臓器の循環特性を個別にモデル化し、全身の血管系を電気回路として表現する試みも報告され始めている。一方、循環系の駆動源である心臓についても、細胞レベルの発生張力のみならず心臓全体の力学的・形態的挙動を加味してポンプ機能のシミュレーションを行う研究が並列計算の進歩などにより現実化しつつある。当研究室では、医学部生理学教室で開発された心筋細胞の数理モデル：KYOTO Model を用い、その特長である生理学的な正確さを損なうことなく心臓モデルと全身の血管系モデルを統合することによって、心血管系の生理学的挙動を忠実に再現できる循環動態シミュレーションの実現を目指している。

循環系は姿勢変化などの刺激に対して血圧を調節する自律神経系の制御機構が備わっており、仰臥位から立位に変化する際の血圧変化は自律神経機能検査として臨床に用いられている。角度が変化するベッド上の被験者に対し仰臥位から頭部を上昇させるような様々な角度にベッドを傾斜させ、血圧や心拍数の変化を測定する検査を起立負荷 (HUT: Head Up Tilt) 試験というが、我々は心筋細胞の KYOTO Model と Heldt らの血管系モデルを組み合わせ、両モデル間の様々なパラメータや制御機構の整合性を生理学的根拠に基づいて調節することにより心臓を含むヒト循環動態モデルを構築した。心臓では、交感神経が刺激されると神経細胞末端からカテコールアミン (アドレナリンなどの総称) が放出され、心筋細胞におけるカテコールアミン β 受容体が刺激されて収縮力が増大し血圧が上昇するとともに心拍数も増加する。KYOTO Model には、このカテコールアミン β 刺激系モデルが備わっており、交感神経刺激により収縮力の増加を再現することが可能である。また、Heldt らの血管系モデルは、肺循環、内臓や四肢の循環など 12 の区画で構成され、頸動脈や大動脈弓に存在する圧受容体からの刺激により動脈圧を変化させる動脈圧反射系モデルが備わっている。さらに、モルモットの心筋細胞をモデル化した Kyoto Model は安静時の心拍数が 150 拍/分で、生後 6 ヶ月、体重約 8kg のヒト乳児の心拍数とほぼ等しいため、成人の血管系をモデル化した Heldt らのモデルに対して、文献的に報告されている体重や体表面積などを用いた生理的なスケール係数を適用し、ヒト乳児の循環動態シミュレーションモデルとした。

まず、安静時循環動態シミュレーション実験により心血管系の圧や心拍数などが生理学的な範囲にあることを確認した後、HUT 試験に関するシミュレーション実験を行った。姿勢変化によって一旦血圧は減少、心拍数は増加した後に回復し始め、負荷前後で脈圧 (最高血圧と最低血圧の差) は 29% 減少、心拍数は 13% 増加して安定化した。このような一連の挙動は実際の乳児を対象とした生理学実験に関する報告と一致し、定量的にもそれぞれ 23% の減少および 14% の増加という文献値と同程度で、ヒト乳児の循環動態を忠実に再現できることを確認した。本シミュレーションシステムでは、生体での計測が困難な心筋における酸素やエネルギーの消費量を推定できるため、今後、様々な負荷に対するエネルギー効率を検討することによって病態の解明や新たな治療法の提案に結びつけることができると期待される。

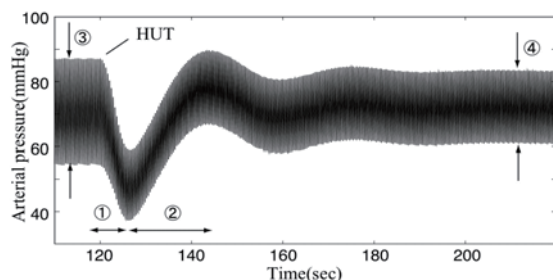


図 1: HUT 試験の血圧変化シミュレーション

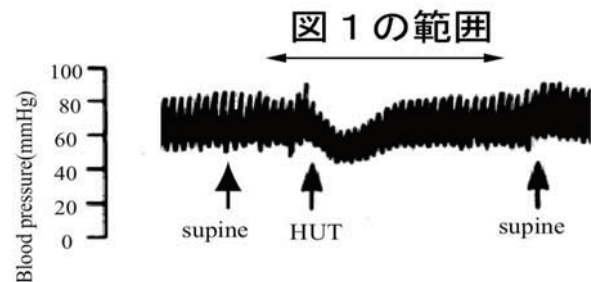


図 2: ヒト乳児の HUT 試験による血圧変化

参考文献: 天野晃他, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 8, pp.2177-2197, 2008

エネルギー科学研究科 エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野

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

「知的生産性変動のモデル化とシミュレーション」

近年の情報社会の進展により、従来よりもデータ・情報・知識・アイデアが価値を持つ社会となり、オフィスでの知的作業の重要性がますます高くなってきている。このような背景から、オフィス環境や労働条件を改善することにより知的作業の生産性を向上させようとする取り組みが行われている。本研究室でも、オフィスの照明を改善することで知的生産性が数%向上することを被験者実験により確かめている。これらの研究では、オフィス環境を改善する前後で標準的なタスクを被験者に与え、その向上率から知的生産性の向上率を推定するアプローチを採っており、様々な要因により知的生産性が変動するメカニズムまでは考慮されていなかった。本研究室でのこれまでの被験者実験の結果を詳細に分析すると、被験者はタスクに取り組み続けているわけではなく、時折、意識的に、あるいは無意識的に休んでいるブロッキング期間があり、その期間の長短がタスクの成績に大きな影響を与えていることがわかってきた。すなわち、オフィスで働く作業員も常に作業に集中しているわけではなく、精神的な疲労の蓄積により、時折休んでいる時間があり、その時間の長短が作業の効率に影響を与えていると言える。

そこで、本研究室では、図1に示すような作業に集中している「作業状態」と作業を休んでいる「非作業状態」の2つの状態が、図2に示すような遷移確率関数に従って確率的に遷移するモデルを考案した。作業状態では知的作業が進行するとともに精神疲労がある速度で蓄積する。一方、非作業状態では知的作業は進行せず精神疲労がある速度で解消される。作業状態-非作業状態間の遷移確率は、精神疲労の蓄積/解消の程度に依存する。このモデルは、疲労の蓄積/解消速度や状態遷移確率関数をパラメータとすることで、コンピュータシミュレーションが可能であり、オフィス環境条件や労働条件からパラメータを推定することができれば、従来のように被験者実験を実施することなく、それらの条件下での知的生産性がシミュレーションにより予測可能となる。

本研究室では、このモデルの妥当性の検証や条件によるモデルパラメータの推定方法開発のための基礎検討として、難易度が均一で単純なタスクを用いた被験者実験を実施している。具体的には、タスクに対する心的負担やモチベーションを変化させ、その際のタスク1問あたりの解答時間を記録しておき、それらが前述のモデルでシミュレーション可能かどうかを調べた。図3にタスク1問あたりの解答時間の頻度分布について、実験結果とシミュレーション結果の比較例を示す。この図では、解答時間が長くなかった問題ほど非作業時間が長いことを示している。このような基礎検討の結果、知的生産性の変動がシミュレーションにより予測可能であることが示唆された。今後は、モデルの精緻化や創造的な知的作業へのモデル適用方法の検討を進めていきたい。

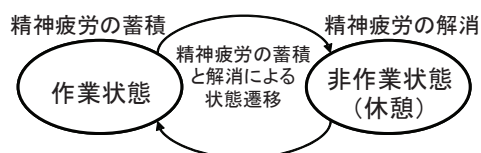


図1 作業状態と非作業状態の遷移モデル

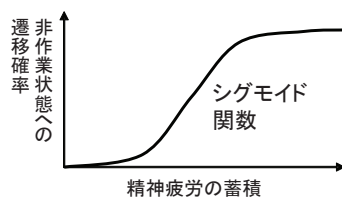


図2 状態遷移確率関数の例

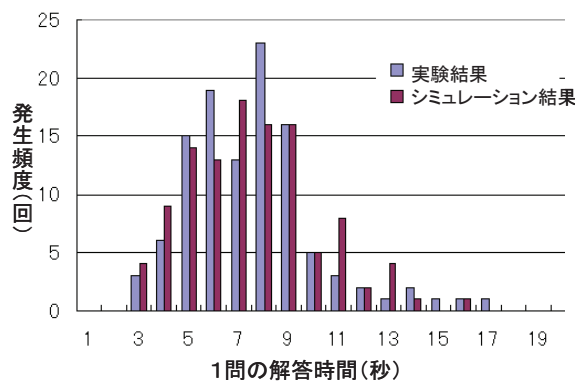


図3 解答時間の頻度分布の例

エネルギー科学研究科（応用科学専攻）プロセスエネルギー学分野（白井研）
<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>
 「洋上風力・潮力ハイブリッド発電システム」

1. はじめに 再生エネルギーの重要性が高まっている昨今、風力発電は有力な発電方法の一つであるが、風況により出力が大きく変動する風力発電の特徴は、系統連系する上で大きな問題となる。一方、欧米では広大な大陸棚を利用して大規模な洋上風力発電ファームが出現している。そこで本研究では、洋上風力発電に小容量潮力を組み合わせて、その出力特性の違いを利用して出力変動を吸収・低減するハイブリッド発電（図1イメージ図）を提案し、その可能性について検討している。



図1 システムイメージ

2. 洋上風力・潮力ハイブリッド発電の概要 風力発電に比べ、潮力発電は、その出力変動周期が大きいと考えられるので、風力発電の出力変動に合わせて、潮力発電の出力を制御することを考えている。作成した風力・潮力ハイブリッド発電の実験モデルの回路図を図2に示す。風車、水車はそれぞれサーボモータで模擬した。風力発電は、三相コアレス同期発電機で構成し、その出力はシンプルにダイオードブリッジで整流しDC変換される。一方、潮力発電は誘導発電機を用い、その出力は双方向コンバータを通してDCに変換される。それぞれDCに変換された出力を連結し、MPPTインバータによりAC変換し系統連系する。トータル出力変動の補償制御は、潮力発電の誘導発電機を双方向コンバータで制御することで行う。

3. 今後の展開 洋上風力・潮力ハイブリッド発電システムの提案と実験モデルの作成を行った。今後の課題としては、DC側の出力、AC側の出力等を制御信号に用いた、自動制御系の構成を行い、応答速度を含めたシステムの有効性の検討を進める予定である。

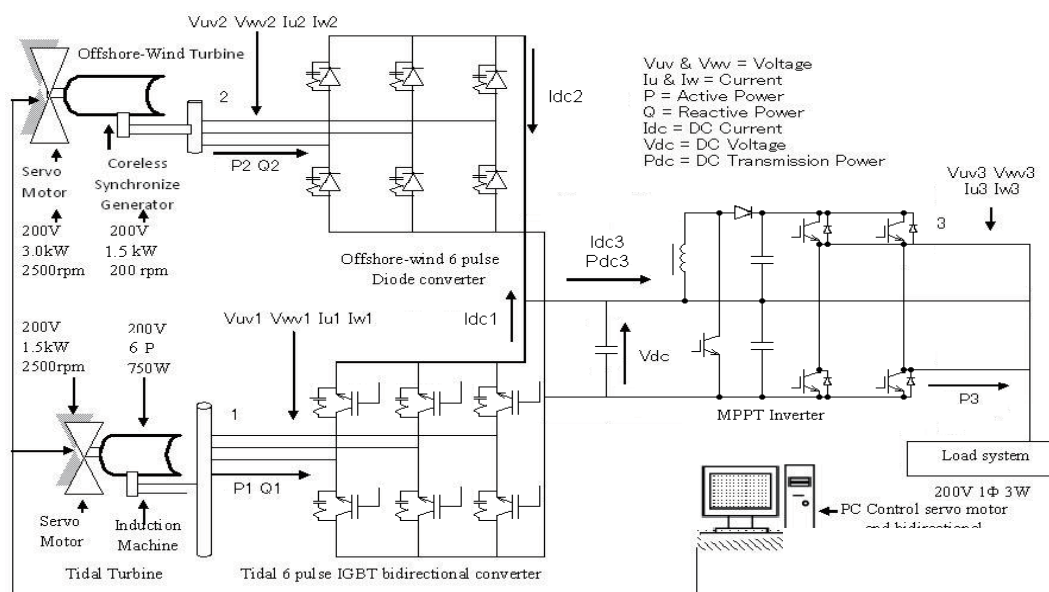


図2 実験モデルの回路構成

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>

「非軸対称磁場がプラズマ輸送へ及ぼす影響のモンテカルロ法による定量評価」

核融合燃焼プラズマの実現を目指した環状磁場閉じ込め装置として、トカマク方式とヘリカル方式が研究されている。この2つの方式を幾何学的に特徴づけるのがトーラスの主軸に対する対称性の有無で、これによりプラズマの平衡、輸送、安定性や高エネルギー閉じ込めに本質的な差異が生じる。特に近年わが国をはじめとして、磁場配位の対称性・非対称性の影響を定量的に理解することで、実験的なプラズマ閉じ込めの高性能化につなげる研究が活発に進められている。こうした研究に関連して、2つのトピックをあげる。一つは長年ヘリカル型装置で追求された磁場配位最適化の研究から生まれた準対称磁場配位である。複雑な3次元環状磁場の幾何形状をプラズマのMHD平衡や粒子軌道と直接結びつけた座標系(磁気座標系)で表現し、外部コイル系を逆問題として解くことで、磁気座標系における対称性を有する配位が構成できる。このような準対称配位はトカマク方式とヘリカル方式の中間に位置する概念として興味深く、米国ウィスコンシン大学では、準ヘリカル対称概念に基づいて設計された小型装置HSXを用いてプラズマ中の粘性や熱拡散に対称性の破れが及ぼす影響が実験的に検証されている。もう一つは、軸対称のトカマク方式におけるトロイダルコイルの離散性に起因した軸対称性の破れである。トカマクの軸対称性の破れがプラズマ閉じ込めに及ぼす影響の研究は早くから進められていたが、最近の新しい流れとして、非軸対称性を摂動磁場コイルによって積極的に導入して、境界局在モード(ELM)や抵抗性壁モード(RWM)の安定化に利用する研究が活発に行われている。

輸送の観点からみると磁場配位の対称性が破れると、磁気面に沿ったあらゆる方向に粘性が働きプラズマ流を減衰させる。その結果として磁気面に沿った流れ \mathbf{U} と「新古典」粘性 \mathbf{V} は $\mathbf{V}=\mathbf{M}\cdot\mathbf{U}$ なる線形関係で記述できることが知られている。この線形輸送行列 \mathbf{M} は3次元磁場配位中の捕捉粒子の複雑なダイナミクスから決定されるため、従来は粗い近似を用いて解析式で評価するのが常であった。

これに対して、われわれ(松山顕之、花谷清)は新古典輸送行列を複雑な磁場配位に対しても高精度で決定できるモンテカルロ計算コード(MONO)を世界で初めて開発した[Matsuyama & Hanatani, Phys. Plasmas 17, 032501 (2010)、他]。これら一連の研究では、グリーン・久保公式やアインシュタイン公式などの線形応答理論を用いて新古典粘性を計算するためのアルゴリズムが示され(図1)、同時に配位に対称性を与えたときに対称方向の粘性がゼロになることが解析的に保証されるという特長がある。後者の利点は、トカマクにおける弱い対称性の破れや準対称配位の取り扱いに有効である一方で、モンテカルロ法の並列計算によって従来収束解を得るのが困難であった強い非対称性を持つ系にも有効である。現在この計算コードの実験解析への適用が進展中であり、今後、環状磁場閉じ込め装置中のプラズマ回転に対する磁場配位の非対称性の役割の解明などに応用したいと考えている。

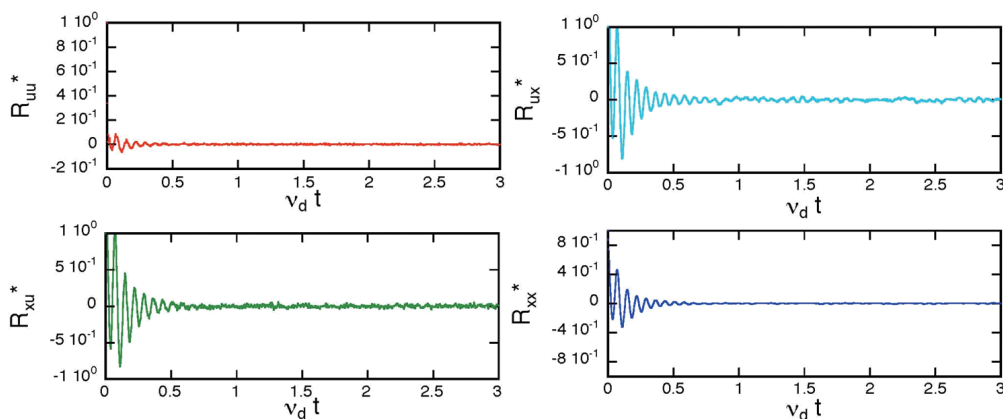


図1. グリーン・久保公式における微視的新古典フラックスの自己相関、相互相関関数 R_{ij} ($i, j=x, u$) のシミュレーション。ここで x は径方向、 u は磁力線方向の粒子フラックスを表す。

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

「超高層大気の地上観測データに関するメタ情報データベースの開発」

超高層大気中のグローバルな諸現象は多様なプロセスが複雑に絡み合った結果として観測されるため、超高層大気における長期変動のメカニズムを解明するためには、全球規模の地上観測ネットワークにおける様々な観測データを組み合わせる総合的な解析が必要になります。しかしながら、これまでは、このような超高層大気の地上観測データは、観測を行った機関ごとにデータベース化され、公開されるものの、その多くは個別の観測・研究に関係する特定分野での利用に留まっていた。また、一部の観測データについては、観測者と周辺の限られた研究者のみによる利用に終始し、公開されないまま記録メディアの中に埋もれるケースもありました。

平成 21 年度よりスタートした特別教育研究費プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」（略称：IUGONET）では、京都大学をはじめ、国立極地研究所、東北大学、名古屋大学、および九州大学の 5 機関が連携し、観測データからメタデータを抽出してネットワーク上で広く共有するシステムの構築（図 1）を目指しています。メタデータは「データについてのデータ」と呼ばれ、地球観測の分野でいえば、例えば気温や風速のような測定されたデータそのものではなく、観測時刻や位置、測器の種類、データの置き場、データフォーマット、データに関する連絡先、等の情報にあたります。このようなメタデータをデータベース化して共有することで、様々な機関に分散して存在する観測データに関する横断的な検索を実現し、分野の異なるデータの取得・利用を容易にします。メタデータのデータベースによって、多種多様な観測データを用いた総合解析が促進され、超高層大気の長期変動の解明に大きく貢献できると期待しています。

プロジェクトでは、平成 23 年度中のメタデータ・データベース公開を目指し、現在、メタデータのフォーマット策定およびメタデータの抽出、データベースのシステム開発、解析ソフトウェアの開発を精力的に進めています。本研究室は、メタデータ・データベース構築の統括を担当し、連携機関と緊密に連絡をとりながら、開発（図 2）を進めています。

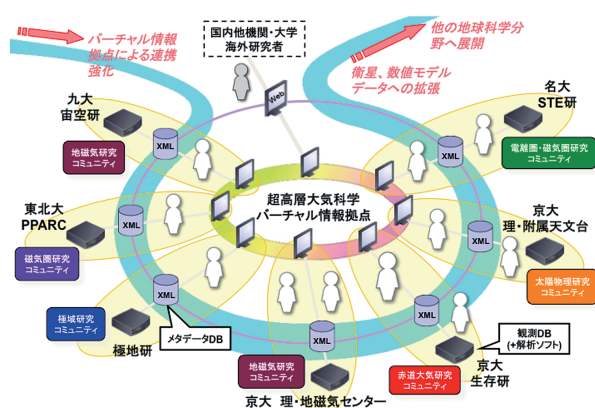


図 1：プロジェクト体制の模式図

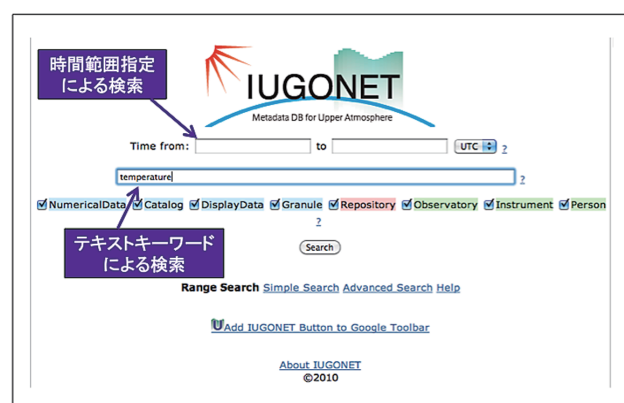


図 2：開発中の検索インターフェース

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研）

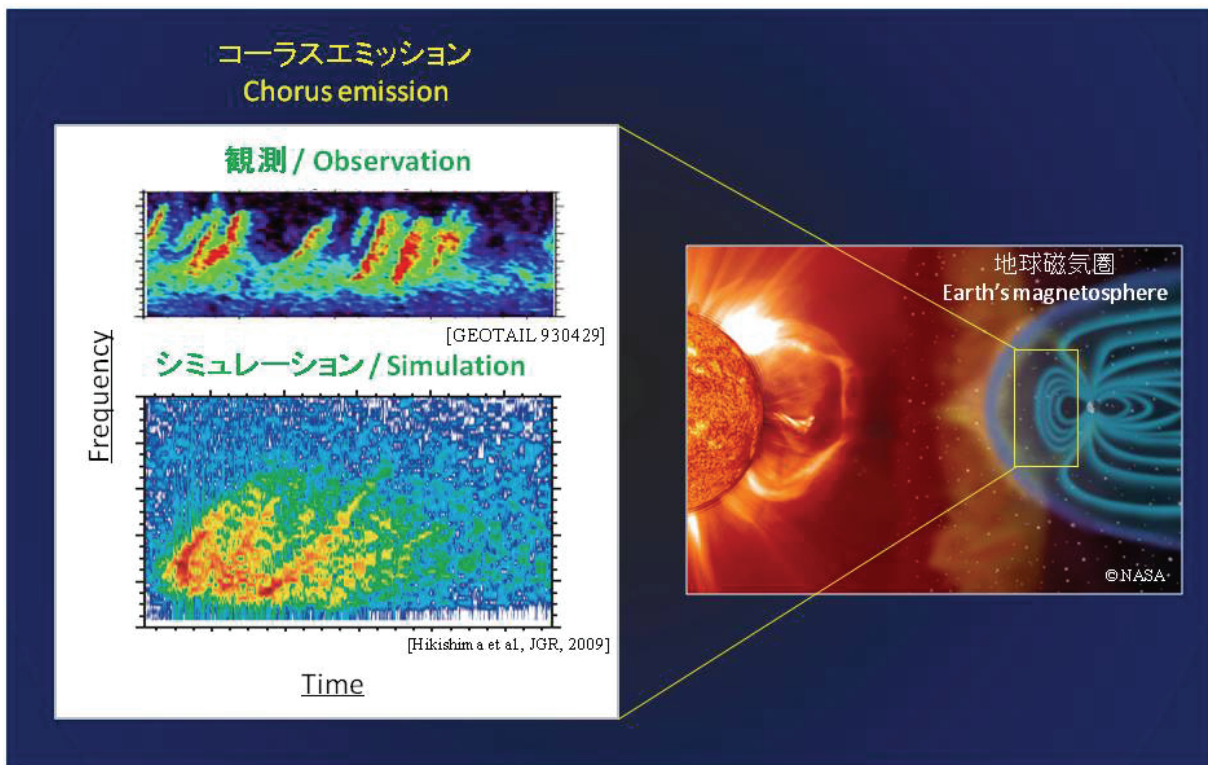
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp>

「地球磁気圏でのコーラス放射の発生と放射線帯形成過程の研究」

宇宙環境は希薄なプラズマで満たされているのみならず、宇宙線に代表される高エネルギー放射線が飛び交う場であり、通信衛星や宇宙ステーションを構成する部品はこれらの放射線の影響を受けて、劣化や様々な障害を起こしている。本研究分野では人類がその生活の場を宇宙空間へ拡大し、宇宙環境を有効利用してゆくことを前提として、地球周辺の宇宙空間の電磁プラズマ環境を計算機シミュレーションにより定量的に評価することに取り組んでいる。

地球周辺は磁気圏と呼ばれる地球の固有磁場が勢力を及ぼす領域が存在する。この磁気圏には太陽風から流入してくるプラズマ粒子が存在しており、また多様なプラズマ波動が存在する。なかでもコーラスエミッションと呼ばれるプラズマ波動は半世紀前から衛星観測・地上観測によってその存在が確認されてきたが、その詳細な発生機構は明らかにされていなかった。しかし、最近のスーパーコンピュータを駆使した大規模シミュレーションによって、コーラスエミッションは本質的に非線形な波動-粒子相互作用によって生成されることが明らかになってきた。

また磁気圏には放射線帯と呼ばれる領域が存在し、地球のダイポール磁場に捕捉された高エネルギー粒子が存在する。この高エネルギー粒子は太陽活動に起因して生成・消失するという特異な面を見せる。この粒子のダイナミクスにはコーラスエミッションが大きく関与していると考えられているが、まだ詳細には明らかにされていない。本研究室では、大規模計算機シミュレーションを用いて、コーラスエミッションの発生機構、およびコーラス波動が関与する放射線帯粒子フラックスの形成過程について解明し、同時にその理論解析を進めている。



地球磁気圏で観測されるコーラスエミッションの周波数スペクトルとその計算機シミュレーション

情報メディア教育開発部門（小山田研究室）

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

「階層型応答曲面法による最適化システム」

本研究室で開発した階層型応答曲面法は、近似を用いた最適化手法で、回帰分析の一種である応答曲面法を改良した手法です。応答曲面法は、品質工学などの分野で広く使われており、計算が容易になるため近似式には一般的に二次多項式を用います。単峰性の場合には少ない計算コストで近似ができるという利点がありますが、多峰性のような複雑なパラメータ空間の場合には、うまく近似できないという問題があります。そこで、階層型応答曲面法では、近似精度の度合いを表す決定係数の値に基づき再帰的にパラメータ空間を分割し、分割された各空間で応答曲面を再構築します。このようにパラメータ空間を分割することで複雑な解空間であっても精細に近似することが出来るのが階層型応答曲面法の特徴です。パラメータ空間全域を複数の応答曲面で近似するので、大域解が複数ある場合であっても最適解を探索することができます。

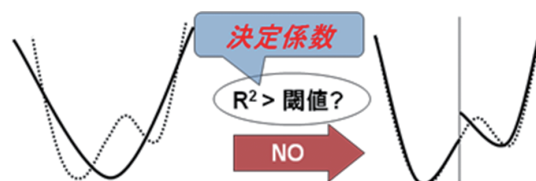


図1 パラメータ空間の分割例

階層型応答曲面法では、パラメータ空間を分割することで解の探索精度を向上させますが、計算コストが大きくなるという問題があります。これは、決定係数の値がユーザの指定する閾値を満たすまで、大域解が存在しない空間も含めて分割を繰り返すからです。この問題を解決するために、階層データ可視化技術と階層型応答曲面法を組み合わせ、ユーザに分割領域を選択させる最適化システムを提案しました。階層型応答曲面法では、再帰的に空間を分割するため、木構造のデータが出力されます。このシステムでは、利用者は、ちょうど植栽のように、無駄な木の枝を刈り取ることができます。この最適化システムを細胞シミュレーションのパラメータ最適化問題に適用した結果、短時間で高精度のパラメータ探索を行うことに成功しました。一般に、人による判断は曖昧で誤ることが多いため、最適化計算に用いられることはありません。しかし、階層型応答曲面法は、単に応答値だけで判断している遺伝的アルゴリズムなどと異なり、木構造データの各葉ノード毎に二次多項式を用いたパラメータ空間の近似を行なうので応答値の局所的振舞いを確認することができます。

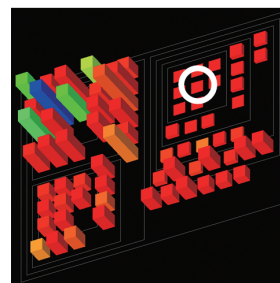


図2 平安京ビューを用いた細胞シミュレーションの結果

また、本システムをフォトニック結晶によるナノ共振器の高Q値化のための構造最適化にも適用した結果、従来約1.5倍のQ値を求めることが出来ました。ここでQ値とは、光の閉じ込める能力の指標です。現在は、まだ二次元パラメータによる構造最適化が対象ですが、今後さらなる高次元のパラメータの最適化に取り組む予定です。その際に問題となるのが、パラメータ数の増大に伴う絞り込みの困難さです。平安京ビューでは、高さや色、輝度などでデータを表現していますが、1度に表現できる次元には限界があります。そこで、今後は、多次元パラメータの可視化技術のひとつである、平行座標 (Parallel Coordinates) を用いてパラメータの絞り込みを行うことを検討しています。

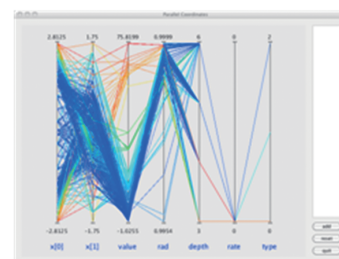


図3 Parallel Coordinatesの例

教育支援システム研究部門 遠隔教育システム研究分野（中村研究室）

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

「筋電位計測の高精度化とユーザインタフェース設計」

筋繊維が収縮する際に、数 m ~ 数十 mV 程度の膜電位の変化が現れる。これを筋電（筋電位、筋電図とも呼ばれる）として計測し、筋肉の状態、負荷/疲労、筋肉の効率的な使い方を解析することが、医療や福祉、人間工学やスポーツ科学の分野で行われてきた。最近では、筋電義手やパワードスーツのように、体に装着した機器を実時間で動作させることも行われている。さらに、ゲームやエンターテインメントのための入力デバイスとしての利用も期待されている。このような背景から、我々は筋電を実時間インタフェースに用いるための基礎的な研究を行っている。その本質的な問題は、人間が手足を動かす意思をできるだけ正確に計測し、その意図を外部機器にできるだけ自然に反映させることである。しかし、皮膚表面において電位を計測する表面筋電位計測では、電極の接触状態、雑音などの影響を大きく受けること、計測される信号は多数の運動単位（MU）等から発生する電位変化の重ねあわせであること、体表から遠い（内部の深いところにある）筋肉による電位変化を計測しにくいこと、動作が複合した場合には発生する筋電が単純な足し合せにならないこと等の難しい問題を抱えている。

我々は、精度が良く使いやすい筋電インタフェースを実現するために、二つの面から検討を行ってきた。一つは、導電布と多電極を用いた筋電信号計測、もう一つは、人間と機械の間のプロトコルとしての筋電信号の整理である。

前者は、金属糸を編み込んだ服やサポータなどに計測電極を多数配置することによって、外部ノイズの影響を抑えること、多数の電極から得られた信号の振幅と位相を基に信号の取捨選択を行ったり、運動の方向を推定することなどを検討してきた。従来の手法に比べて精度良くかつコストが小さい計測装置ができている。後者に関しては、EMGUIと名付けたインタフェース構築指針を提案した。現在の技術では、上記の理由から、全く任意の動作（またはその意図）を機械が自動認識することは難しいため、人間にとって発現しやすく、機械にとって認識しやすい動作を「部品」として選び、それにあわせて認識アルゴリズムを構成する。筋電の性質を考慮し、基本部品の型としてボタン型、レバー型、スライダ型を設定し、瞬時動作、ある程度の時間継続する動作、力加減が重要な動作を対応づけた。ボタン型については短時間の窓特徴量で、レバー型、スライダ型については短時間の窓特徴量と時系列パターンを用いて動作認識を行い、いくつかの情報を得る（図1）。肩・腕、手（指）の動作のいくつかを基本部品として定義し、SVM（サポートベクターマシン）とHMM（隠れマルコフモデル）を併用すれば、精度の良い認識が行えることを確認している（図2）。

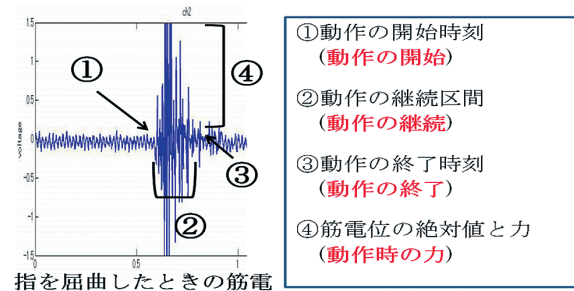


図1：筋電位から抽出する情報

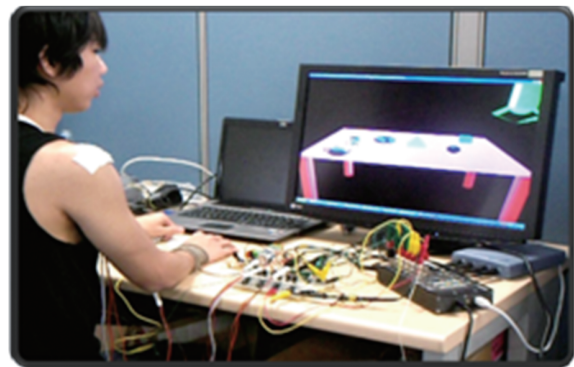


図2：筋電位で UFO キャッチャーを動かした例

平成 21 年度修士論文テーマ紹介

工学研究科 電気工学専攻

渡 邊 昌 志 (土居教授) 「マルチカーエレベータシステムにおける最適化に基づく衝突回避方法の提案と呼び割り当て方法の検討」

各エレベータ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、かご間の衝突回避を最適化に基づいて行う手法を提案した。また、各かごに呼びを割り当てる方法の検討も行った。そして、シミュレーションによりそれらの有効性を検討した。

廣 谷 迪 (松尾准教授) 「高周波電磁界の大規模高速有限要素解析のための並列幾何マルチグリッド法」

数億自由度以上の大規模高周波電磁界有限要素解析を可能にする並列幾何マルチグリッド法の開発を行った。マルチグリッド法のプロセス/スレッド並列処理のための計算手法を提案し、高周波解析におけるマルチグリッド法の収束性改善についても検討を行った。

山 崎 由 也 (松尾准教授) 「周期境界マイクロ磁気学シミュレーションを用いた磁化過程解析に関する研究」

周期磁化構造を仮定したマイクロ磁気学計算手法を開発した。周期条件下では平均磁化の影響が大きくなるので、大域的減磁界係数を定義することにより磁化率や保磁力が説明されることを示した。また、空孔に磁壁がピンニングされる現象を模擬した。

西 村 敏 治 (雨宮教授) 「高温超伝導誘導同期機の全超伝導化と車載用モータとしての高効率化に向けた検討」

高温超伝導巻線を適用したかご型誘導機について、その車載応用を指向した効率マップ解析コードを開発し、既存の永久磁石モータに対する優位性を明確化した。また、レーストラックダブルパンケーキコイルを適用した固定子巻線を試作し、世界初となる回転試験に成功した。

松 村 一 弘 (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出力特性に関する基礎研究」

高温超伝導かご型誘導機を適用した次世代車載システムを目指し、その出力特性を明らかにした。また、上記誘導機の革新的高トルク密度化を明確化し、トランスミッションを省略できる直接駆動の可能性を実証した。さらに、開発したモータを可変速制御するためのモデルを開発し、実験結果と良く一致することを示した。

飯 田 智 陽 (小林教授) 「頭部ボクセルモデルを用いたノイズ白色化付 EEG ビームフォーミング」

EEG 信号源の再構成問題に関し、被験者の MR 画像から作成したリードフィールド計算用頭部モデルに基づき、プリホワイトニングと fMRI 賦活領域の線形制約とを施したベクトル型 MV ビームフォーミング手法を開発した。この手法により、手首反復運動時の律動データ解析に成功した。

杉原靖幸 (小林教授) 「生体磁気信号計測を目指し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による生体磁気信号計測を目的とし、生体ファントムから生じる磁場分布とラットの心磁計測によりセンサの性能について検討した。1つのセンサによる2軸方向磁場の同時計測手法を提案し、理論と実験により有効性を示した。

夏川浩明 (小林教授) 「脳磁界と視運動性眼球運動計測による奥行き注意下の運動透明刺激に誘発される皮質活動の検討」

奥行き注意下で運動透明刺激を呈示した際の脳磁界を計測し、奥行き順序が決定される過程に関与する皮質活動を検討した。その結果、奥行き順序が決定される過程の視覚情報処理を反映する第5次視覚野から頭頂連合野、外側後頭皮質に至る皮質活動を捉えることができた。

山本詩子 (小林教授) 「MR 拡散テンソル画像を用いた線維追跡法による統合失調症患者の脳白質病変の解析」

統合失調症の定量評価を目指し、患者と健常者の拡散テンソル MRI を用いて患者の脳白質における異常について検討した。上縦束を対象に神経線維追跡を行い特徴的な評価値について比較し、線維束の追跡断面積において患者・健常者間の有意な差が見られることを示した。

OH JIMIN (引原教授) 「Fundamental Studies on Vibration Characteristics of Micro Cantilever by Laser Irradiation (マイクロカンチレバーの固有振動へのレーザ光照射による作用に関する基礎的研究)」

半導体微細加工技術発展と共に、機械と光を応用したデバイス開発が盛んに行われている。それらの間で発生する現象を明確していくため、レーザ光照射によるカンチレバー振動への影響を実験的に検討した。さらに、影響の原因を実験パラメーター依存性により明らかにした。

松廣慎一郎 (引原教授) 「表面 - 粒子間相互作用ポテンシャルの推定に基づく粒子操作に関する検討」

新しいデバイスをもたらすなどの観点から、原子間力顕微鏡による粒子操作が注目されている。本研究では粒子と物質表面との相互作用に基づき、粒子の操作に共振が関わっているとの観点から検討を行った。その結果粒子が共振に基づき特異な運動を示し得る実験パラメータを見出すことができた。

南政孝 (引原教授) 「非線形力学系の位相構造に関するパワースペクトルに基づく数値的検討」

非線形力学系の解は位相構造により決定する。したがって、解のパワースペクトルを検討することにより非線形力学系の位相構造の情報を抽出することが可能である。本研究では、低次元の非線形力学系を対象に、パワースペクトルに基づいて位相構造を数値的に検討した。

田中広志 (和田教授) 「過渡領域のノートン等価回路による LECCS モデルの構築法と LSI 電源系のデカップリング設計」

LSI の電源系マクロモデル (LECCS モデル) を用いた EMC 設計実現のために、過渡領域で物理的に正しい LECCS-core モデルを解析的に導出し、パワーインテグリティとノイズ電流デカップリングを両立させる設計手法を提案し、実際の LSI を用いて有用性を示した。

野村勝也 (和田教授) 「プログラム依存性を考慮した 8 ビットマイコンの電源電流解析」

マイクロコントローラ (マイコン) の電源ノイズ電流のプログラム依存性を考慮したシミュレーショ

ンを目的として、マイコンの各機能ブロックの動作により生じる電流を電流要素として抽出し、要素の合成により時間領域および周波数領域で解析する方法を示した。

松田 昂 (和田教授) 「回路基板とパッケージの統合設計を目的としたパッケージ等価回路モデルの高速抽出法」

パッケージとプリント回路基板間の寄生結合を含んだ高速シミュレーションを実現するためのモデル (Stand-Alone Package Modeling 法) について、新たなキャパシタンスモデルを提案し、詳細構造を用いて解析した場合と同程度の結果が得られることを示した。

安原 昌克 (和田教授) 「多電源ピン LSI の内部結合を考慮した線形等価回路モデルの構築」

LSI の電源系高周波電流シミュレーションのためのマクロモデル (LECCS-core モデル) について、測定データから LSI 内部およびパッケージの寄生結合を含む等価回路モデルを作成する方法として、Symbolic Analysis とパラメータ最適化を用いる方法を提案した。

乾 貴行 (萩原教授) 「作用素リアプノフ不等式の離散化手法の一般化に基づくむだ時間系の安定解析法」

作用素リアプノフ不等式の離散化に基づく漸近的に厳密なむだ時間系の安定解析法について、その保守性を低減するために離散化手法を一般化するとともに、従来法よりも保守性の低い漸近的厳密性を保証するための 2 段階法を提案した。さらに、数値例を通してその有効性を検証している。

藤原 佳典 (萩原教授) 「実証実験用航空機における操縦特性模擬と外乱抑圧を達成する 2 自由度制御系設計」

多目的実証実験機 MuPAL- α に対して、逆システムを用いた目標値フィードフォワード型 2 自由度制御系を適用することで、MuPAL- α における操縦特性模擬と外乱抑圧を同時に達成可能であることを、実機を用いたシミュレーションならびに数値シミュレーションにより実証している。

守岡 賢一 (萩原教授) 「サンプル値系における compression 作用素に対する準有限ランク近似の改善とロバスト安定解析への応用」

サンプル値系の解析において現れる compression 作用素は、その無限次元性ゆえに取り扱いが厄介となる。本論文ではこの作用素の準有限ランク近似に関して保守性や計算時間などの観点から改善を行い、さらにロバスト安定解析へ応用する手法を提案し、数値例を通してその有効性を検証している。

松田 雄介 (萩原教授) 「双対 LMI と緩和問題の漸近的に厳密な階層的構成に基づく線形時不変系のロバスト性解析」

線形時不変系のロバスト性解析問題に対し、ロバスト性を破るパラメータの抽出という観点から双対線形行列不等式に基づく定式化を提案している。さらに、定式化された問題を漸近的に厳密な形で解析するために緩和問題を階層的に構成する手法を与え、数値例を通してその有効性を検証している。

神崎 明日香 (大澤教授) 「サポートベクトルマシンを用いた電力系統過渡安定度判別」

パターン認識手法の一つであるサポートベクトルマシン (SVM) による電力系統過渡安定度判別の

高速化を目的として、2つの例題システムを用いてSVMの適切なパラメータを探索するとともに、ニューラルネットワークと比較しながら判別精度などを検証した。

工学研究科 電子工学専攻

品田 真二郎 (鈴木教授) 「 $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_{2-y}\text{La}_y\text{CuO}_{6+\delta}$ 単結晶薄膜の混合状態におけるホール効果とドーピング量依存性に関する研究」

高温超伝導体 $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_{2-y}\text{La}_y\text{CuO}_{6+\delta}$ 単結晶を微細プロセス加工と両面劈開手法により厚さ 50nm の単結晶薄膜を形成し、熱処理により酸化還元して広範囲でドーピング量制御を行った結果、混合状態のホール効果などで新しい結果を得た。

立木 孝典 (鈴木教授) 「Bi系高温超伝導体固有ジョセフソン接合の巨視的量子トンネル現象に関する研究」

量子ビット素子などへの応用をねらいとして、高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ および Pb 置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の単結晶から 2 層程度の固有ジョセフソン接合を含む大きさ $1\mu\text{m}$ 角の微小メサ構造を作製してそのスイッチング確率分布を 0.4K まで測定した結果、4K という高い温度でクロスオーバーする新奇な現象を見出した。

遠藤 恵介 (後藤准教授) 「冷陰極材料としての遷移金属窒化物薄膜と表面炭素化シリコンの仕事関数評価」

各種遷移金属窒化物薄膜や炭素化したシリコンを陰極とする微小電子源の電子放出特性を調べる目的で、上記試料表面の仕事関数を大気中及び真空中で評価した。真空中において加熱することによる仕事関数の変化を測定し、その原因について議論した。

河崎 道人 (後藤准教授) 「切片傾き解析法による電界放出電子源の評価を目指した動的電流電圧特性と電界放射顕微鏡像の同時記録装置の開発」

Fowler-Nordheim プロットの切片及び傾きの時間変化が示す挙動の表面現象との関係を明らかにする目的で、直流に交流を印加して得られる動的な電流電圧特性と表面現象を観測する電界放射顕微鏡像を同時に記録する装置を開発し、その基本的特性を調べた。

大野木 圭太 (酒井准教授) 「 $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ 薄膜を用いた抵抗変化メモリー素子における薄膜物性に着目した電気パルス誘起抵抗変化特性解析」

$\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ 薄膜を用いた抵抗変化メモリー素子を作製し、その特性を交流インピーダンス法により解析し、抵抗スイッチングの機構解明を行った。Ca ドーピング量ならびに結晶成長様式の制御により、抵抗スイッチング特性が調整可能であることを明らかにした。

下村 卓也 (酒井准教授) 「動的媒質中のマイクロ波伝搬特性診断法の開発ならびにプラズマメタマテリアルへの適用」

動的な媒質に対する信号応答の複素数成分測定に有用なマイクロ波回路と診断法を提案し、プラズマを含んだメタマテリアル構造の診断に適用した。屈折率等の巨視的パラメータの時間発展が明らかとなり、プラズマの複素誘電率変化による電磁波の伝搬制御例を示した。

古川 龍 (酒井准教授) 「パラメータ分布を考慮に入れたマイクロ波及びテラヘルツ波帯電磁波によるプラズマ内部パラメータの診断」

測定対象のプラズマが勾配や周期性といった内部パラメータ分布を持つ場合に有効な、マイクロ波及びテラヘルツ波帯電磁波による電子密度等の診断法を開発した。位相・振幅変化の周波数依存性を分散関係と対照して解析することで、パラメータの空間分布を推定した。

森田 直祐 (酒井准教授) 「液中気泡内におけるプラズマ生成とそれに伴う還元及び酸化反応の評価」

液中の水素及び酸素気泡内でプラズマ生成を行うことで、溶質に対する還元／酸化作用を制御し、生成物により評価した。特に、溶解二酸化炭素に対して水素プラズマを作用させることで、一酸化炭素ならびにメタンの生成を確認し、炭素循環系構築の可能性を示した。

川原 洸太郎 (木本教授) 「デバイスプロセスによって 4H-SiC 中に生成される点欠陥の解析および低減」

SiC デバイス作製時には、イオン注入および反応性イオンエッチングが必須のプロセスとなる。本研究では、このようなプロセスによって SiC 中に生成される深い準位の挙動を系統的に調べ、熱酸化と不活性ガス中での高温熱処理により欠陥密度を大幅に低減できることを示した。

南園 悠一郎 (木本教授) 「堆積酸化膜を活用した立体ゲート構造 SiC MOSFET の作製」

SiC の熱酸化において発生する炭素残留の問題を克服するため、堆積酸化膜の活用に取り組み、大幅な界面準位密度の低減と移動度の向上に成功した。さらに、フィン FET 的な立体ゲート構造を作製することにより、従来構造に比べてドレイン電流を約一桁増大した。

渡辺 直樹 (木本教授) 「ワイドギャップ半導体光 MEMS 実現に向けた熱光学係数の決定およびブリッジ構造の作製」

可視光に対して透明な性質を活用するワイドギャップ半導体光 MEMS の実現に向けて、SiC、GaN、AlN の熱光学係数を広い温度範囲で決定した。また、伝導型による選択エッチングが可能な光電気化学エッチングを用いて単結晶 SiC のブリッジ構造を作製し、その静電駆動に成功した。

井戸 慎一郎 (松重教授) 「液中動作周波数変調検出方式 AFM を用いた生体分子の高次構造および水和構造計測」

FM 検出方式 AFM を溶液中生体分子構造計測へと応用し、DNA が有する右巻き二重螺旋構造を溶液中で分子分解能観察することに成功した。また bR 蛋白質分子の 2 次元結晶膜の表面構造を固液界面に存在する水分子の秩序構造とともに分子スケールで計測した。

上田 洋行 (松重教授) 「電気化学トランジスタ構造を用いたナノ多孔質酸化チタン薄膜の電子伝導評価」

色素増感太陽電池における新しい電子輸送特性評価法の開発を目的として、電解液と多孔質酸化チタン (TiO₂) の混在系から構成される電気化学トランジスタ構造において、TiO₂ 中の電子移動度評価を試み、TiO₂ 内の電子注入／蓄積、電子伝導に関する知見を得た。

金子 勝 弘 (松重教授) 「密度勾配遠心分離法で処理した単層カーボンナノチューブの配向制御と電子物性評価」

密度勾配遠心分離法および誘電泳動法を用いて on-off 比の高いカーボンナノチューブトランジスタを作製することに成功し、その電流 - 電圧特性評価と原子間力顕微鏡ポテンショメトリ評価から、電極接触抵抗とナノチューブ構造欠陥が移動度を抑制していることを明らかにした。

谷 田 真 司 (松重教授) 「極薄高分子絶縁膜による有機電界効果トランジスタのキャリア伝導制御と低電圧動作化」

有機薄膜トランジスタ (OTFT) において、極薄高分子膜によるゲート絶縁膜表面修飾と電気特性との相関を評価し、OTFT における電子トラップ挙動や大気下動作安定性について、詳細に議論した。また、高分子ゲート絶縁膜の極薄膜化により、OTFT の低電圧動作を達成した。

水 上 貴 博 (松重教授) 「単接合型ナノギャップ電極の狭窄化と抵抗スイッチング現象に関する研究」

ナノギャップ電極におけるギャップ狭窄化プロセスにおいて、狭窄化に伴う構造変化を、低温環境下における電流制御により大幅に低減することに成功した。また、低温環境での抵抗スイッチング挙動から、スイッチングメカニズムに強く関連するギャップ狭窄化メカニズムを提案した。

石 井 良 太 (川上教授) 「一軸性応力下における分光法による GaN 励起子変形ポテンシャルの同定」

自作の一軸応力印加装置を用いて、さまざまな面方位の GaN バルク基板に一軸応力を加えたときの、光学遷移過程の変化を観察した。その結果を、Bir-Pikus ハミルトニアン of the expansionにより、フィッティングした結果、GaN のすべての変形ポテンシャルを実験的に求めることに成功した。

橋 本 恒 明 (川上教授) 「デュアルプローブ近接場分光によるキャリアダイナミクスの可視化に関する研究」

光励起用と光検出用の 2 本のプローブを持つ近接場光学顕微鏡について、回路上の工夫と、信号検出手法の創出により、プローブ間、および、それらと試料表面との距離制御性を格段に向上させた。その結果、InGaN 系量子井戸における励起キャリアの拡散を数百 nm のオーダーで観察することに成功した。

藤 本 毅 (川上教授) 「AlN 系半導体における深紫外発光と転位の相関に関する研究」

深紫外発光材料である AlN 系半導体について、貫通転位と微視的な発光の不均一性に関する検討を行った。貫通転位は、非輻射再結合として機能すること、貫通転位による歪みの緩和がポテンシャル揺らぎを引き起こすため、発光の不均一広がりが増大し、発光位置も変化することがわかった。

渡 邊 圭 二 (川上教授) 「GaN 系半導体の光学特性における表面パッシベーション効果」

GaN 系半導体の表面保護層として、光電気化学法により形成した酸化ガリウムの効果を検討した。デバイスプロセスに必須である熱処理によって形成された表面準位が、本手法による表面パッシベーションによって抑制されることが、時間分解分光により明らかになった。

渡 辺 充 (川上教授) 「大面積 (11 $\bar{2}$ 2) GaN 実現に向けた r 面サファイア上への GaN 核形成に関する研究」

大面積の (11 $\bar{2}$ 2) 面 GaN を形成する手法として、表面が傾斜した r 面サファイアにおける分子層ステップとテラスを利用することを提案した。c 面ステップと r 面テラスが形成できる熱処理条件を見出

し、さらに、GaNの成長条件の検討により、単一相の(11 $\bar{2}$ 2) GaNが得られることを実証した。

山田 翔太(野田教授)「ワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたフォトニック結晶に関する研究」

ワイドギャップ半導体 SiC を用いた新規なフォトニック結晶共振器を開発した。波長 550 ~ 1550nm の広波長範囲に渡る動作が可能なこと、従来の Si フォトニック結晶共振器の動作限界の 100 倍の入力光に対しても非線形現象が発生せず、飛躍的なハイパワー動作が可能なこと等が実証された。

高山 直樹(野田教授)「ベクトルビームの位相操作とその集光特性に関する研究」

断面内で偏光方向の分布を有する伝搬ビーム(ベクトルビーム)が、一般に +n 次の右円偏光ラゲールガウス(LG)ビームと -n 次の左円偏光 LG ビームの重ね合わせで表現できることを見出した。また位相操作を施すことによって集光点においてその2つのビームを空間的に分離できることを示した。

鈴木 克佳(野田教授)「トップダウン型3次元フォトニック結晶の形成と光制御」

Si に対して2回の斜め方向プラズマエッチングを施すことで3次元フォトニック結晶の作製を行った。さらに、作製した3次元フォトニック結晶の表面及び内部に厚さ 30nm の発光層を導入し、発光層の導入形態の違いによる発光の増強と抑制を観測した。

岩橋 清太(野田教授)「2次元フォトニック結晶レーザの単一モード高出力化に関する研究」

2枚のフォトニック結晶を半周期シフトさせ重ね合わせた構造をレーザ共振器として用いることで、従来の2-3倍の放射効率が得られることを明らかにした。さらに、面心長方格子と呼ばれる新しい格子を導入し、より単一モード性が向上する条件を見出した。

佐藤 義也(野田教授)「光ナノ共振器間の強結合状態形成とその動的制御に関する研究」

83 μ m 離れた光ナノ共振器(モード体積 = 0.12 μ m³)を適切な条件下で導波路を介して結合させることで、ナノ共振器部に光が80%以上集中した状態のままの共振器間の長距離強結合を実現することに成功した。またその結合の動的制御に向け、導波路部に反射鏡を動的に形成することに成功した。

児島 貴徳(野田教授)「量子ドット・ナノ共振器融合系における電子・光子相互作用の制御に関する研究」

単一量子ドットの発光輝点の空間分布を高感度カメラで撮影し、その位置情報を元にフォトニック結晶ナノ共振器を形成することで、共振器内部に量子ドットを配置することに成功した。両者の結合効果を反映して、共振器形成の前後で量子ドットの発光強度が30倍に増大していることを確認した。

玉手 修平(北野教授)「幾何学的位相に基づく弱測定理論」

量子状態の事後選択を含む量子的な干渉現象として、量子消去・弱測定の2つの現象の考察を行った。事後選択を含む干渉においては、干渉縞の移動量に幾何学的位相が寄与することを示した。さらに、幾何学的位相を用いて弱測定理論の再定式化を行った。

若狭 恭裕(北野教授)「結合共振器型メタマテリアルによる狭帯域透明化現象」

電磁波の速度を制御する方法として研究されている電磁誘起透明化現象を、電気ダイポールアンテナと磁気四重極共振構造を結合させたメタマテリアルを用いて実現する方法を考案した。研究は電磁界シミュレーションと実験の両方を行い両者の間に良い一致が見られた。

西崎 公智 (北野教授) 「小型 RF トラップに捕捉した単一 Yb⁺ のレーザー冷却」

単一イオン光時計では、光の波長以下の領域にイオンを閉じ込めて 1 次ドップラーシフトを消す。これを可能とする 1mm 立方サイズの小型イオントラップを実現した。不要静電場を打ち消すことにより、波長サイズ閉じ込めの達成が推定される温度、20mK まで単一 Yb⁺ をレーザー冷却した。

川尻 将 (北野教授) 「光イオン化により同位体選択した Yb⁺ の RF トラップへの導入」

光イオン化で用いる遷移の同位体シフトを利用して、天然同位体混合の Yb から特定の同位体を選択してイオン化しトラップする技術を確認した。不要静電場を打ち消す方法を確認するとともに、磁場によるシフトが小さい ¹⁷¹Yb⁺ の選択的トラップとレーザー冷却を実現した。

守谷 隆司 (北野教授) 「リニア RF トラップを用いた ¹³⁸Ba⁺ の結晶化と量子跳躍の観測および ¹³⁷Ba⁺ のレーザー冷却」

複数個のイオンを冷却可能な小型リニア RF トラップで Ba⁺ のレーザー冷却をすすめ、複数個のイオンが配列を作って静止する、結晶化を観測した。単一 Ba⁺ を導入する技術を確認し、量子跳躍信号を観測した。光時計に重要な奇数同位体 ¹³⁷Ba⁺ のレーザー冷却に成功した。

光・電子理工学教育研究センター**久保 雄大 (高岡教授) 「多原子分子クラスターイオンのサイズ分離・分析と表面反応に関する研究」**

本研究では、多原子分子のエタノール分子や酸素分子のクラスターのサイズ分離・分析を、Q-Mass 法や TOF 法によって行った。また、入射エネルギーを制御してマイカ基板表面にエタノールクラスターイオンを照射し、AFM による原子レベルでの表面観察を行い、クラスターの崩壊、多原子分子の分解、表面原子との化学反応などの理論的、実験的解明を行った。

奥野 剛也 (藤田教授) 「ミスト CVD 法による酸化スズの作製と評価」

サファイア基板上に酸化スズ単結晶薄膜半導体を作製し、低抵抗 n 型の制御と共に鉄ドーピングにより p 型伝導を示唆する結果を得た。またガラス基板上の透明導電膜としての機能を実証した。さらに酸化マンガンの混晶化によるバンドギャップエンジニアリングを示した。

金子 健太郎 (藤田教授) 「コランダム型構造酸化物半導体薄膜の作製と評価」

サファイア基板上のコランダム酸化物混晶系による機能創出を提案し、基盤材料であるコランダム型酸化ガリウムと酸化鉄の高品質単結晶、および混晶薄膜の作製に成功した。また混晶薄膜の 110K における磁化特性にヒステリシスを獲得し、今後の磁性応用を示唆した。

亀山 直季 (藤田教授) 「超音波噴霧ミスト CVD 法を用いた酸化亜鉛透明導電膜の成膜とその特性」

亜鉛アセチルアセトナトを原料とした大気開放型溶液プロセスにより、酸化亜鉛透明導電膜の成膜と低抵抗化の研究を行った。アミンおよびガリウムのドーピングにより非真空プロセスでは前例のない低抵抗化に成功し、ITO を代替する光センサの試作で有用性を示した。

情報学研究科 知能情報学専攻

船山 弘 孝 (黒橋教授) 「Web ページの構造解析とメタデータの抽出」

Web ページを複数の領域に分割し、各領域に対してヘッダやフッタ、本文などの領域名を付与する構造解析を行なった。そして、構造解析の結果を利用し、Web ページからサイト名・タイトル・情報発信者のメタデータを自動的に抽出する手法を提案した。

河野 洋 志 (黒橋教授) 「大規模コーパスからの名詞格フレーム構築」

テキスト中の名詞間の関係性認識には名詞格フレームと呼ばれる名詞の語彙的知識が有用である。本研究では名詞句「A の B」とそれに共起する語に対し、2種類のクラスタリング手法を適用することにより、大規模コーパスから名詞格フレームの構築を行った。

萩行 正 嗣 (黒橋教授) 「辞書定義文の漸進的解釈による語彙知識獲得」

国語辞書に記述された知識を自然言語処理で利用できる形に整理し、高頻度語に対して人手による整備を行なった。その知識を利用することで、国語辞書の定義文を漸進的に解釈し、国語辞書に記述された知識を自動で獲得する手法を提案した。

石川 裕 貴 (黒橋教授) 「大規模単言語コーパスと基本語対訳辞書を用いた専門用語の訳語獲得」

原言語および目的言語の大規模単言語コーパスと基本語対訳辞書を用いて、専門用語の訳語を自動的に獲得する手法を提案した。本手法は各単語の辞書引きによる組み合わせでは訳語が生成不能な語でも訳語が獲得できる。実験の結果本手法の有効性を示した。

堀井 悠 (松山教授) 「口唇運動-音声間のタイミング構造を利用した雑音環境での発話音声推定」

発話時の口唇運動と音声との間には、複雑なタイミング構造が存在する。本研究では、学習された口唇運動-音声間のタイミング構造に基づいて観測された口唇運動から音声信号を生成し、それと観測された音声信号との整合性評価を行うことによって、雑音環境においても発話音声を安定に分離・抽出する手法を提案した。

山添 弘 晃 (松山教授) 「合意形成対話における内的状態の相互推定に基づいたターンテイキング生成モデル」

本研究では、合意形成対話を例として、自律的に状態変化をする二つのシステムを相互に接続し、各システムが相手状態の推定を基に自己状態の遷移、送受信制御、情報要求を行うモデルを構成し、発話や情報要求頻度の偏り、ターンテイキングの発生などの点において人間同士の対話と類似する特性を示すことを確認した。

情報学研究科 通信情報システム専攻

大石 裕 司 (吉田教授) 「マルチホップ協力通信システムの試作と屋外伝送実験」

マルチホップ協力通信はマルチホップ通信の伝送特性を改善できる。本論文では実験装置の試作、フェージングエミュレータによる基礎特性測定および実際に電波の送信を行う伝送実験について述べられている。実験の結果、マルチホップ協力通信による特性改善が確認されている。

大澤 良介 (吉田教授) 「双方向伝搬路推定法を用いた MIMO プリコーディングに関する研究」

双方向伝搬路推定法を用いた MIMO プリコーディングに関して、計算機シミュレーションおよび室内伝送実験により特性評価が行われている。その結果、線形プリコーディングとトムリンソン-原島プリコーディングの伝送特性は優劣は許容される PAPR (ピーク対平均電力比) レベルに依存して変化することが実験的に示されている。

大野 卓人 (吉田教授) 「コグニティブ無線におけるスペクトルセンシング系の試作と実伝搬路での特性評価」

コグニティブ無線におけるスペクトルセンシングを用いた帯域共有の可能性を実伝搬路及びハードウェアの制約の視点から検討を行っている。屋外実験により協力スペクトルセンシング及び周期定常性検出の有効性を確認した。また高利得アンテナを用いる既存システムとの共存の課題を指摘している。

木村 和也 (吉田教授) 「Distributed Resource and Interference Management for Spectrum Sharing (スペクトル共用のための分散リソース・干渉制御手法)」

協力中継ネットワークのための分散リソース制御手法が提案されている。また、高優先度無線システムに与える干渉が許容範囲内であれば低優先度無線システムも同時に送信するスペクトル共用システムのための自己組織的な干渉制御手法が提案され、その有効性が確認されている。

佐伯 高明 (吉田教授) 「双方向協力中継における中継局選択及び送信方向制御による容量向上」

非対称トラフィック時における最適な中継局選択やリソース割当について検討されている。特に、双方向協力中継において各送信方向の平均通信品質が異なる性質に着目し、時間平均値及び瞬時値に応じたリソース割当法が提案されている。

黄 俊翔 (守倉教授) 「無線中継 CSMA/CA システムにおけるネットワークコーディングの研究」

本論文では、各無線局のメディアアクセス制御副層にランダムアクセスの CSMA/CA プロトコル及びパケットを合成するための技術であるネットワークコーディングを実装した無線中継ネットワークの特性を理論解析及び計算機シミュレーションで解明した。

武井 香織 (守倉教授) 「ネットワークコーディングを用いた無線中継システムに対する回線品質の影響」

本論文では、各無線局のメディアアクセス制御副層にパケット合成を行うネットワークコーディング技術を実装した無線中継ネットワークを対象とし、その特性に対して受信機で生じる熱雑音及び同一システムからの干渉が与える影響を理論及びシミュレーションで解明した。

渡辺 慶太 (守倉教授) 「電力線通信における周期時変通信路状態検出方式」

本論文では、電力線通信システムの問題点の一つである電源に同期した伝達関数の切り替わり (周期時変通信路) に対して、切り替わり時の過渡状態を検出するための初期捕捉方式及び追従捕捉方式を提案し、提案方式の特性を計算機シミュレーションにより明らかにした。

玉置 真大 (守倉教授) 「MMSE マルチバンドアレー受信機の構成法」

本論文では、高速に収束を達成するヘテロダイン方式のマルチバンドアレー受信機構成法として、イメージバンド干渉と同時に同一チャネル干渉を抑圧する適応アレーアンテナ、及び MMSE-MIMO 受信

機を提案し、計算機シミュレーションにより優れた特性を明らかにした。

劉 珂 (守倉教授) 「ベースバンド AGC 増幅器を備えたヘテロダイナマルチモード受信機の構成法」

本論文では、デュアル周波数変換を用いたヘテロダイナマルチモード受信機の課題であるベースバンドのダイナミックレンジを制御する AGC 増幅器による特性劣化を改善するため、新たな受信機構成法を提案し、計算機シミュレーションにより有効性を明らかにした。

岩 井 真 人 (高橋教授) 「光パケットネットワークにおけるファイバ遅延線バッファの構成法」

ファイバ遅延線を用いた光パケットバッファで発生するパケット間の無効な隙間時間を短縮し、ネットワークの効率を上げるために、可変遅延線と固定遅延線を併用するバッファ構成法と制御法を提案し、その特性解析を行った。

中 河 隆 仁 (高橋教授) 「Unstructured 型 P2P ファイル共有アプリケーションにおける検索効率を向上させる手法の検討」

ファイル検索のヒット効率向上とピア間の負荷分散を目的とし、ユーザ毎の嗜好を考慮したセマンティック型の検索手法と、ピアとコンテンツをクラスタリングすることにより検索範囲を実効的に拡大する検索手法の提案とその性能評価を行った。

西 出 皓 一 (高橋教授) 「無線 LAN における MAC レベルの品質劣化要因検出補償手法」

無線 LAN で用いられているアクセス制御方式では、隠れ端末・さらされ端末といった端末間の関係が品質に大きく作用する。そのためこれら劣化要因の検出手法と新たなアクセスメカニズムを提案し、シミュレーションにより提案手法の有効性を示した。

橋 本 遼 (高橋教授) 「ソーシャルネットワークにおけるインセンティブによる情報伝播制御」

人の友人関係のネットワークにおけるクチコミ情報伝播において、情報を広く伝播させるだけでなく情報に対する反応行動を促進させることができるインセンティブ報酬付与方式を提案した。その有効性を社会実験により実証した。

横 田 健 治 (高橋教授) 「IP ネットワークにおける過剰トラフィック制御技術の研究」

サイズの異なるフロー間のサービスの公平性を実現するためのパケットスケジューリング方式と、特定のサーバーに短時間にアクセスが集中するフラッシュクラウドに対応するための負荷分散方式の提案と性能評価を行った。

今 川 隆 司 (越智准教授) 「粗粒度再構成可能アーキテクチャ向け信頼性評価環境及びそれを用いた設計空間探索」

様々な粗粒度再構成可能アーキテクチャを対象として、ソフトエラーに対する信頼性の定量的な比較を可能にする評価環境を構築した。本環境により、LSI システムの適応的高信頼化に向けた、配線構造や部分的多重化の方式等に関する設計空間の探索が容易になる。

服 部 幸 市 (越智准教授) 「JPEG XR 符号器の並列パイプラインアーキテクチャ」

本論文では静止画像符号化方式 JPEG XR に関して符号器のハードウェアアーキテクチャを提案する。

データの依存関係解析に基づく処理のパイプライン化及び並列化により、提案アーキテクチャは高スループット並びに高い面積対性能比を実現する。

RAKOSI ENDRE ZOLTAN (越智准教授) 「Hot-Swapping Architecture for Mitigation of Permanent Faults in Arrays of Coarse-Grained Functional Units (永久故障対策のための粗粒度演算器群向けホットスワップ機構)」

粗粒度演算器アレイの永久故障対策のため、ホットスワップを用いて故障箇所の診断および換装をシステムの正常動作を遮ることなく自動的に行う方式を開発した。三重化に比べ、遥かに低いオーバーヘッドでより高い信頼性を達成できることを示した。

砂川 洋輝 (小野寺教授) 「LSI 製造ばらつきへの耐性を高めたスタンダードセル設計手法」

スタンダードセルの設計において、製造ばらつきの影響を抑制する方法について検討した。単純化した規則的なレイアウトの採用と、ばらつきに特に敏感な回路部分の素子寸法拡大が有効である事を示し、ばらつき耐性を強化した D-FF を開発した。

牧野 紘明 (小野寺教授) 「サブスレッショルドリーク電流による CMOS 回路経年劣化測定法」

PMOS トランジスタの経年劣化現象である NBTI について、その劣化現象と回復現象の測定とモデル化に取り組んだ。ストレス開放直後のサブスレッショルドリーク電流を高速にモニタする回路を考案し、短い測定遅延で NBTI の特性評価を可能にした。

奥村 佳弘 (小野寺教授) 「相互結合インダクタを用いたトランスインピーダンスアンプの帯域向上手法」

相互結合インダクタを用いた高速光通信用トランスインピーダンスアンプの帯域向上手法を開発した。提案手法を用いた回路を 0.18 μm CMOS プロセスで試作し、直流利得 52dB Ω 、遮断周波数 5.2GHz の回路を消費電力 7.2mW で実現した。

岡野 慎也 (乗松准教授) 「光振幅位相変調—直接検波方式における最適消光比と誤り率特性」

振幅 2 値及び振幅 4 値の光振幅位相変調 (APSK) 方式の誤り率特性について検討を行った。光 SN 比に対する平均誤り率を最小にする最適消光比及び受信感度を求め、検討を行った変調方式では、振幅 2 値、位相 4 相または 8 相 APSK がシャノン限界に最も近いことを示した。

片岡 祐介 (佐藤亨教授) 「周波数・空間領域干渉計法を用いた UWB レーダ車両イメージング」

車載レーダにおける解像度向上の手法を開発した。まず距離分解能について周波数領域干渉計法を用い、通常の分解能範囲内に存在する複数目標の分離に成功した。次に角度分解能について、距離方向に分離した目標のそれぞれについて干渉計法で正確な位置決定を行った。

北村 堯之 (佐藤亨教授) 「室内における多重散乱波を利用した単一アンテナによる UWB レーダイメージング」

室内に置いた単一のアンテナにより、壁面反射波を利用して未知目標の位置決定を行う手法を開発した。最初に区分的直線運動を行う目標により壁面の位置を推定し、その後壁面による鏡像アンテナを用いて未知目標の正確な位置決定が行えることを明らかにし、精度を評価した。

佐 保 賢 志 (佐藤亨教授) 「UWB ドップラーレーダを用いた運動目標の高解像度イメージング法」
人体のように、各部分が異なる運動を行う目標について、ドップラー効果により目標の各部分を分離した上で、干渉計法を用いることにより、3素子で高精度な3次元目標形状の推定が可能であることを示した。時間周波数解析手法を用い、速度が変化する物体の分離に成功した。

松 本 浩 志 (佐藤亨教授) 「波形情報最適化による複数目標物体の高精度 UWB レーダイメージング」
複雑形状の目標のイメージングに際して必要な目標各部からの散乱波の分離手法について研究した。従来の到来時間に加えて波形情報を利用し、目標形状をパラメータ化した上で大域最適化の手法を用いて、複数物体から構成される目標の形状推定を行い、その特性を評価した。

情報学研究科 システム科学専攻

福 田 航 (石井教授) 「階層化ベイズモデルを用いた画像超解像と画像再構成」
階層ベイズモデルは推定すべき対象の性質をより正確に表現することを可能とする。本研究では、画像中を遷移する遮蔽や人体の組織毎のCT値を階層ベイズモデルで表現し、変分ベイズ法に基づく統計推定を行うことで従来法に比べて精度の高い推定ができることを示した。

富 澤 弘 貴 (石井教授) 「拡張型コンボリューショナルネットワークによる囲碁の学習エージェント」
囲碁の盤面評価は盤面に置かれる碁石のパターンに依存するが、その盤面のパターンが膨大な数にのぼるため盤面評価の適切な設計は難しい。本研究では、コンボリューショナルネットワークを用いてエキスパートの対戦棋譜から盤面評価を学習し、その有用性を示した。

西 岡 誠 司 (石井教授) 「機械学習による9自由度ロボットアーム制御」
本研究では、実時間での軌道計画とその目標軌道を達成するための逆動力学を機械学習の手法を用いて学習させた。これによって、動力学の同定の難しい26本のマッキベン型空気圧アクチュエータを用いた9自由度のロボットアームに握手動作を行わせることに成功した。

堀 田 真 路 (石井教授) 「視覚的注意の移動特性における復帰抑制の影響に関する研究」
人間の視覚的注意の移動は、視覚を引きつける背景要因のほか過去に注意を向けた場所や特徴を避ける復帰抑制の影響を受ける。本研究では人間の視線移動を計測し、復帰抑制における各種視覚情報因子(色・輝度等)の影響を判定する統計的検定方法を提案した。

井 上 智 仁 (松田教授) 「MR 拡散テンソル法における線維方向推定精度の実験的評価」
MRIにより計測される水分子の拡散の異方性から生体組織構造の推定を行うMR拡散テンソル法において、線維方向推定精度と画像データ収集・処理方法との関係をシミュレーションおよびファントム実験にて解析し、異方性の強さがある程度予測できる場合に最適な画像データの収集および処理法の組み合わせを提案した。

王 裕 雯 (松田教授) 「循環系生理学特性を忠実に再現するヒト乳児循環動態シミュレーションモデル」
従来のヒト乳児循環動態シミュレーションモデルに対して、改良された心筋細胞モデルと生理学デー

タに基づいて作成した左心室モデルを導入し、新たなモデルを開発した。本モデルは左心室収縮特性を忠実に再現するとともに ATP 消費量の推定も可能であることをシミュレーション結果にて確認した。

萩谷俊幸 (松田教授) 「位置・速度空間での自動反力計測に基づく力覚提示システムの構築と心理物理学的評価」

本研究では、位置・速度空間での自動反力計測に基づいた力覚提示システムを構築し、ここで用いた計測条件数の低減による高精度かつ効率的な計測について、微小力の識別に関する generalized Weber's law を基準とした評価を行った。

三島充晴 (松田教授) 「構成的モデルで再現される左心室圧容積関係の線形性に対する数学的解析」

心臓の収縮特性を表す代表的な法則であるフランク・スターリング則の成因を明らかにするため、ヒト循環動態シミュレーションモデルを用いて数学的解析を行った。本法則には Ca イオン濃度の時間的変動が負荷に依存せず、また左心室容積の変動は拡張末期容積で決まることが重要であることを明らかにした。

矢野政輝 (松田教授) 「能動触において形状条件が段差知覚に与える影響の解析」

本研究の目的は、器具を用いて柔軟物体表面を能動的に走査した際に、対象形状の条件が物体形状の知覚特性に与える影響を解析することである。本研究では段差形状の知覚に関し、段差形状の上昇・下降による差異、凹凸形状の知覚と段差形状知覚との関係、および走査面の傾斜の影響を評価した。

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

青柳西蔵 (下田准教授) 「原子力発電所におけるヒヤリハット活動促進手法の提案と実践」

ヒヤリハット活動は原子力発電所組織成員の安全意識向上に有効であるが、活動が停滞することがあるという問題がある。本研究では、活動活性化を依頼した積極的参加者の導入を核としたヒヤリハット活動促進手法を提案し、実際の原子力発電所で実践・評価した。

宮城和音 (下田准教授) 「作業 - 非作業状態間の遷移を仮定した知的生産性変動モデルの作成」

認知プロセスの観点から、人間の知的作業の生産性が変化する過程を検討し、計算機シミュレーション可能なモデルを構築した。また、被験者実験の結果を再現するためのモデルパラメータを導出・比較し、モチベーションの違いが知的生産性に与える影響を解釈した。

土屋勝也 (下田准教授) 「個人の消費・社会生活に関する価値観を考慮した環境配慮行動推薦手法の提案」

環境配慮行動を促進する手法として、従来のように環境啓蒙を行うのではなく、個人の消費・社会生活に関する価値観や社会的属性を元に各人が実行しやすい環境配慮行動を割り出し、それを推薦する環境配慮行動推薦手法を提案し、その有効性を定量的に評価した。

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

北 村 祐 一 (中村准教授) 「三次元 MHD 平衡計算の高精度化とその適用」

入れ子状磁気面の存在を仮定しない三次元 MHD 平衡計算コード HINT2 において、用いる座標系を回転ヘリカル座標系からより単純な円柱座標系へ変更し、計算の高精度化を図った。その結果、座標系の変更でより少ないトロイダルグリッド数で十分な精度が得られることを示した。

田部井 優 (中村准教授) 「ヘリオトロン J プラズマの粒子軌道における磁場高調波成分の影響」

非線形最適化コード STELLOPT を用いてヘリオトロン J プラズマの粒子閉じ込めに関する最適化を行った。また、ヘリオトロン J 標準磁場配位及び最適化された磁場配位における磁場高調波成分の影響を調べることで、捕捉粒子閉じ込めに対する磁場高長波成分の役割を明らかにした。

廣 岡 瞬 (中村准教授) 「モーメント法による非軸対称プラズマの新古典輸送解析」

非軸対称ヘリカル系プラズマにおいて初めて、複数種のイオンが存在する場合の新古典輸送解析を、モーメント法に基づき行った。この方法は、求められた結果が運動量保存を満足することに特長がある。計算により、重いイオンの存在は電子の粒子や熱輸送を誘起することを明らかにした。

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

吉 川 浩太郎 (白井教授) 「Experimental and Analytical Studies on Steady-State Heat Transfer in Liquid Hydrogen and Superfluid Helium (液体水素および超流動ヘリウムの定常熱伝達に関する実験的・解析的研究)」

超伝導機器の冷却を目的として、液体水素の広範囲の圧力条件下サブクールにおける浸漬 / 強制対流熱伝達試験のための装置を製作し、定常熱伝達のデータを得た。超流動ヘリウムに関しては、冷却路を簡易的に模擬した領域における流体の三次元的な振る舞いや熱伝達を調べた。

宇 田 涼 介 (白井教授) 「Estimation Method for Dynamic Characteristics and Operating Conditions of Distribution System by Injecting Small Disturbance (微小擾乱注入による配電システムの動特性及び負荷構成推定手法に関する研究)」

分散型電源や各種制御負荷の導入増加により、動特性を考慮した新しい負荷モデルの構築が必要とされている。このような理由から電力系統に微小な擾乱を注入しその応答データから配電システムの動特性や状態を推定する手法を提案し、電力系統シミュレータにより手法の有用性を検証した。

周 暁 飛 (野澤教授) 「機能メモリ内部論理の断熱ダイナミック CMOS 回路シミュレーション」

ドミノ論理の断熱動作を実現するため、ADL 方式の CMOS 回路を提案し、SPICE 回路シミュレーションで、回路動作及び消費電力の低減を確認するとともに、出力状態と入力遷移による消費電力の基礎データを作成し、N ビット従属接続回路の消費電力の平均値を確率論的に計算した。

エネルギー理工学研究所

南 桂 史 (長崎教授) 「ヘリオトロン J における電子サイクロトロン波入射システムの開発と電流駆動実験」

ヘリオトロン J 核融合プラズマ実験装置において、70GHz 電子サイクロトロン (EC) 入射システムを改良し、ビーム集束、入射角制御を可能とした。レイトレーシング計算によりパワー吸収分布を評価するとともに、EC 電流駆動が最大となる条件を実験的に求めた。

梶 原 泰 樹 (長崎教授) 「2重グリッドを用いた慣性静電閉じ込め核融合の電子エネルギー回収」

慣性静電閉じ込め核融合中性子源において、新たに陽極を追加した2重グリッド方式を提案して実験を行った。提案方式が X 線発生抑制と消費電力の低減に有効であることを示すとともに、電極形状や二次電子放出の与える影響を実験的に明らかにした。

金 城 良 太 (長崎教授) 「高温超伝導バルク磁石を用いた短周期アンジュレータの原理実証実験および数値的検討」

高温超伝導バルク磁石を用いた新型アンジュレータを提案、試作機を製作して正弦関数的磁場生成の原理を実証した。また、第二種超伝導の Bean モデルに基づく磁場計算モデルを構築して実用機の性能予測を行い、短周期・強磁場化の可能性を示した。

李 炫 庸 (水内教授) 「ヘリオトロン J における中性粒子入射加熱ビームの吸収パワー分布解析」

ヘリオトロン J 装置で行われているプラズマの中性粒子入射 (NBI) 加熱における加熱ビームの吸収パワー分布を解析する数値シミュレーションコードを構築し、実験条件に近いパラメータ領域でプラズマ密度依存性や密度分布依存性、バンピー磁場成分依存性を明らかにした。

高 畠 優 (水内教授) 「高速カメラ可視光計測によるヘリオトロン J 周辺プラズマの揺動解析」

ヘリオトロン J において、高速ビデオカメラを用いて周辺プラズマ揺動の可視化を試みた。プラズマ揺動が、磁力線方向に伸びたフィラメント状構造を持つことを見出した。また、その構造の時間変化を説明するため、バルクプラズマのポロイダル回転に乗って回転しているモデルを提案した。

岸 真太郎 (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依存性」

ヘリオトロン J のイオン加熱効率の向上を目的として、ICRF の少数イオン加熱モードの高速イオンの空間偏在性に係わる加熱位置依存性を調べた結果、特に強磁場側加熱時に、負のポロイダル方向への空間的偏在が検証され、主イオン温度が中心加熱と比較し、高くなる可能性を示した。

生存圏研究所

森 谷 祐 介 (山本教授) 「大気境界層観測用レンジイメージング・ウィンドプロファイラーの開発」

ウィンドプロファイラーに多周波送受信機能を付加し、周波数領域干渉計 (FDI) 法により、大気境界層を含む下層大気のレンジイメージング観測を可能にした。大気境界層の発達の詳細が観測でき、大気境界層と雲底高度との関連などが明らかとなった。

太田 修史 (津田教授) 「小型ラマンライダーを用いた地表付近の水蒸気分布のフィールド観測」

可搬性を高めた小型ラマン・ライダーを用いて、火山や森林上空等の地表付近の水蒸気分布観測を行い、各観測サイトでの観測手法や観測結果の検証を行った。火山観測では、噴気及び火口湖面起源の2種類の水蒸気を捉えられた。一方、森林上空の垂直断面観測では、水蒸気量と後方散乱比に地形の影響を受けていると示唆される変化が見られた。

福原 始 (山川教授) 「Miniaturization and Integration of the System for Measuring Space Electromagnetic Environments (宇宙電磁環境計測システムの小型集積化)」

宇宙プラズマにおける波動粒子相互作用を、科学衛星機上で直接観測する新しいシステムである波動粒子相互作用解析器の開発に成功した。プラズマ波動観測器のアナログ回路部のASIC化を進め、温度に対する回路特性の補償と波形受信器の1チップ化を行った。

小泉 昌之 (大村教授) 「電気自動車のマイクロ波無線充電における送受電システムの研究」

本研究ではマイクロ波を用いた電気自動車無線充電システムの充電効率改善を目指した結果、44.7%の送受電・整流効率の実験結果を得た。また、DC-DCコンバータ及びキャパシタ蓄電池を接続しての総合充電実験では33.2%と、先行研究の結果から約12ポイント改善するという結果を得た。

橋谷 真紀 (橋本教授) 「かぐや衛星で観測された静電孤立波に関する研究」

本研究では、月周辺で観測される静電孤立波 (ESW) を解析し、ESWの励起機構や特徴を理解することを目的とする。その結果、1) 磁気異常磁場による電子のミラー反射がESWの発生に関連している、2) 磁気異常と関係のない日照領域でもESWは生じている、等が分かった。

学術情報メディアセンター**鐘ヶ江 将詩 (中村 (裕) 教授) 「観測・編集・提示機能の統合による環境記憶の構成と行動支援」**

人間を取り巻く情報システムに、人間の行動や周囲の状況を観測し、得られたデータを編集・提示する機能を持たせることにより、「環境記憶」を実現する枠組みについて基礎的な検討を行い、キッチンでの調理支援を目的とした簡単な実装を行った。

西谷 英之 (中村 (裕) 教授) 「人間とのインタラクションを用いた協調的物体認識」

ユーザとしての人間が存在する環境において、画像による物体認識の精度や頑健性を高めるために、システムがその場の状況の良さもセンシングし、状況の改善方法などを提示することによって人間と協調する枠組みを提案し、その効果を確かめた。

高校生のページ

固体照明が拓く明るい世界

工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 光材料物性工学分野
川上 養一, 船戸 充

はじめに

19世紀末期のエジソンによる電灯の事業化 [1] 以来、わたしたちは、電気による照明の中で生活をしています。NASA のホームページには、夜の地球の衛星写真が掲載されています [2]。それを見ると、照明によって、夜が、いかに明るく照らされているのかを実感することができます。

さて、この照明ですが、あまりに身近にあり、しかもエアコンなど他の家電製品よりも電気を使わないように見えるため、その消費電力にまでなかなか思いが至らないのではないのでしょうか。実は、人類が製造する全電力のうち約 20% が、照明によって消費されています。しかも、蛍光灯の発光の効率は約 30% (つまり、70% は熱や赤外線・紫外線として浪費されている)、白熱ランプのそれは約 5% であることから、最も楽観的な見積もりとして、すべての照明を蛍光灯が担っていると仮定しても [3]、全電力のうち $20\% \times 70\% = 14\%$ は、熱や赤外線・紫外線になって捨てられていることを意味しています。省エネが全世界的な課題である現在、この浪費されている電力を極力小さくすることが重要であり、実際に、大手家電メーカーは、効率の悪い白熱ランプの製造を中止しつつあります。

白熱ランプやさらには蛍光灯に代わる新しい照明光源として最近注目を集めているのが、窒化物半導体 InGaN を用いた白色発光ダイオード (LED) です。白熱ランプや蛍光灯が、いわゆる真空管を用いているのに対して、LED は固体である半導体を利用していることが特徴のひとつで、固体照明とも呼ばれます。白色 LED は小型、堅牢、長寿命、高効率といった特長を持っています。さらに、構成する元素は無害なものばかりですので、水銀を使う蛍光灯と異なり、環境負荷も小さくすることができます。

このような背景から、最近、ランプ型の白色 LED 電球が市販されました。また、携帯電話やパソコン、さらにはテレビの液晶画面のバックライトなど生活のさまざまな場面に浸透してきていますし、今後もその傾向は強まると予測されています。図 1 は、白色 LED を含め、さまざまな発光色の LED の発光効率 [4] が、年々いかに改善されてきたのかを示す図です。蛍光灯の発光効率は、おおよそ 100 lm/W ですが、白色 LED のそれは、市販レベルで同程度、研究室レベルでは、すでに 250 lm/W に達しようとしています。

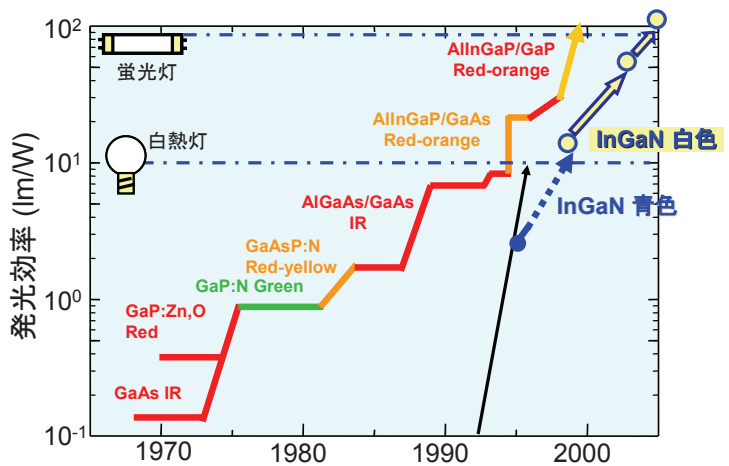


図 1 さまざまな LED の発光効率の年次変化。

この白色 LED の問題点を指摘する前に、私たちがいかに物体の色を認識しているのかという話をしたいと思います。図 2 は、同一のりんごをさまざまな照明光源下で撮影したものです。(b) の太陽光での発色が基準だとすると、(a) の蛍光灯ではやや黒ずんで見え、(c) の白熱ランプが混じると明るい赤

が強調されていることがわかります。このように、物体色が異なって見えるのは、光源に含まれる発光成分が異なるからです。例えば、よく知られているように、太陽光は、あらゆる可視光を含んだ光で、それらの加色混和の結果、白色に見えています。それに対して蛍光灯は、主として、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) 色の発光成分を持っており、

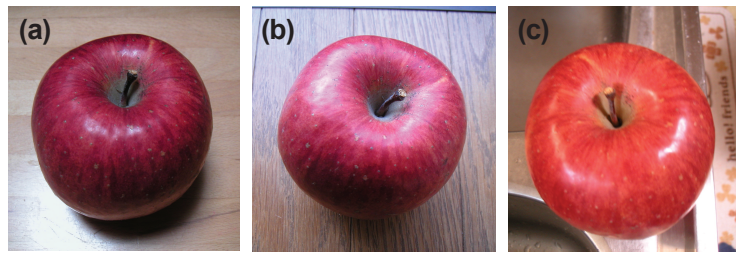


図2 異なる照明下で撮影した同一のりんご。(a) 蛍光灯、(b) 太陽光、(c) 太陽光+白熱ランプ。

それら RGB の加色混和によって擬似的な白色を出しています。私たちは、それらの照明光が物体にあたって反射した光を物体の色として認識するわけですが、光源がもともと含んでいる発光成分が違うので、それが、図2のような物体色の違いとなって現れます。

このことは、逆に、光源の発光成分を調整してやれば、物体を所望の色に見せることができることを意味しています。例えば、日常生活における部屋の照明としては人間の肌の色が自然に（できれば健康的に）見える光源が望ましく、展示の照明としては（青々した野菜など）展示物の特性がよく現れる光源が望ましく、外科医療用照明としては臓器などの正常部位と腫瘍などの異常部位をより明確に区別できる光源が望ましいと考えられます。つまり、究極の光源とは、「所望の物体色を強調するための発光成分の調整ができ、かつ効率 100% の光源」であり、私たちはそのような光源のことを「テイラーメイド光源」と呼んでいます。

白色 LED の話に戻しましょう。この LED は、窒化物半導体 InGaN による青色 LED とそれによって励起される黄色 YAG 蛍光体で構成され、補色の関係にある青と黄色の加色混和により擬似白色を出力しています。ですので、緑や赤色成分が原理的に弱く、開発当初は、物体色は不自然になりやすいという問題を抱えていました。蛍光体の開発の結果、その問題点は解決されつつありますが、物体色を自然に見せようとするとう発光効率が低くなり、逆に、高発光効率化を目指すとう物体色が不自然になるというトレードオフの関係があり、それらを両立させることはいまだ困難です。これは、蛍光灯でも同じことが言えます。私たちは、究極のテイラーメイド光源の実現を目指し、光材料開発から基礎物性評価、さらには、新たな応用分野の開拓も行っています。取り組みの一例として、窒化物半導体を用いたナノメータ (10^9m) レベルで制御された構造の作製とその評価を以下で紹介します。

窒化物半導体を用いた新しい LED の開発

まず、窒化物半導体の結晶構造を図3に示します。窒化物半導体は、六方晶系のウルツ鉱構造をとります。従来は、図3(a)に示す(0001)面が主に用いられてきましたが、この他にも、図3(b)に示した(11 $\bar{2}$ 2)面に代表される半極性面や、図3(c)に示した(1 $\bar{1}$ 00)と(11 $\bar{2}$ 0)面に代表される無極性面を定義することができます。これらの面は、(0001)面とのなす角 θ で分類され、半極性面は $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 、無極性面は $\theta = 90^\circ$ を満たします。私たちのLEDでは、これらさまざまな結晶面が活躍します。

図4(a)に、既存の白色LEDの概略図を示しました。一般的には、サファイアの(0001)面という結晶面を基板とし、その上に、有機金属気相成長法と呼ばれる結晶成長法により、n型の窒化ガリウム(GaN)、InGaN発光層、p型GaNの単結晶を順次積層します。GaNはpn接合ダイオードを形成し、実際に発光するのは、それらに挟まれたInGaN層だけです。InGaN発光層の膜厚は3nmが標準で、量子効果が発現するほど薄いため量子井戸と呼ばれます。発光強度を増強するため、それを何層か繰り返し積層することもあります。InGaNにおけるInとGaの構成比やInGaN層の膜厚を適当に調整することにより、発光色を原理的には370から2,000nm程度まで変化させることができます。(ちなみに、可

視光は380から780 nmです。)白色LEDでは、発光波長は約450 nmの青色LEDが利用され、それと黄色に発光する蛍光体を組み合わせることにより擬似白色を得ていますが、上述のように、物

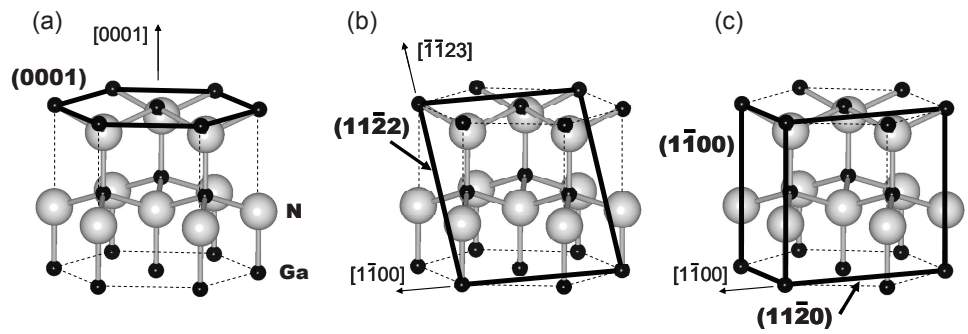


図3 窒化物半導体の結晶構造である六方晶ウルツ鉱構造の概略図。(a)では(0001)面、(b)では(11 $\bar{2}2$)面、(c)では(1 $\bar{1}00$)と(11 $\bar{2}0$)面を太線で示した。

体色の制御と効率の両立に関して問題を残しています。この問題の要因は、蛍光体において青色LEDの光を吸収し黄色を発するという色変換が行われているため、その際にエネルギー損(ストークス損)が発生することにあります。ストークス損は蛍光体を使う以上不可避であり、効率100%を原理的に不可能にしています。しかも、蛍光体の発光は、多くの波長成分を含むため、微妙な発光色の制御が困難です。テイラーメイド光源の実現には、さらなるブレークスルーが必要とされています。

この命題に対して、私たちは、蛍光体を使わず、窒化物半導体だけから任意の発光色を得ることを目的とし、図4(b)に示したような構造をした白色・多色LEDを提案しています。従来構造[図4(a)]との大きな違いは、私たちのLEDが三次元的な構造をしていることです。このようなGaN微細構造は、有機金属気相成長法により、次のように作製します。まず、サファイア(0001)面基板上に数 μm のn型GaNを形成します。いったん反応炉から取り出してシリコン酸化膜(SiO_2)を別の装置で堆積した後、それを、フォトリソグラフィによって、ストライプ状に加工します。ストライプは、ある特定の結晶方位に向けておきます(図4(b)の場合、[1 $\bar{1}00$]方向)。再度、有機金属気相成長装置に導入し、適当な成長条件のもとでGaNの結晶成長を行うと、GaNは SiO_2 上に堆積しない特性を持っているため、(0001)および{11 $\bar{2}2$ }ファセット結晶面で構成された微細構造を得ることができます。最後に、その微細構造上にInGaN量子井戸発光層とp型GaN層を結晶成長しLED構造とします。複数のファセット面を利用するためマルチファセットLEDと呼んでいます。(断面がかまぼこ状なので、「ナノかまぼこ」と呼ぶ人もいます。)InGaN量子井戸発光層の結晶成長条件は、平坦な(0001)面上に形成したときに膜厚2-4 nm, In組成20-25%となるように設定していますが、それらはファセット面方位や構造に強く依存し、通常、(0001)ファセット上では設計に比べて膜厚、In組成とも大きくなる傾向にあり、{11 $\bar{2}2$ }ファセット上では逆の傾向となります。その結果、発光色はファセット面方位に依存するようになります。つまり、このマルチファセットLEDでは、さまざまな発光色を持ったLEDが電氣的に並列に接続されていることになり、それにより、白色・多色発光が実現されるわけです。しかも、ファセット構造は SiO_2 マスクの構造に依存することから、発光色の制御性を高めるために図4(b)に例示したようにAおよびBのよう

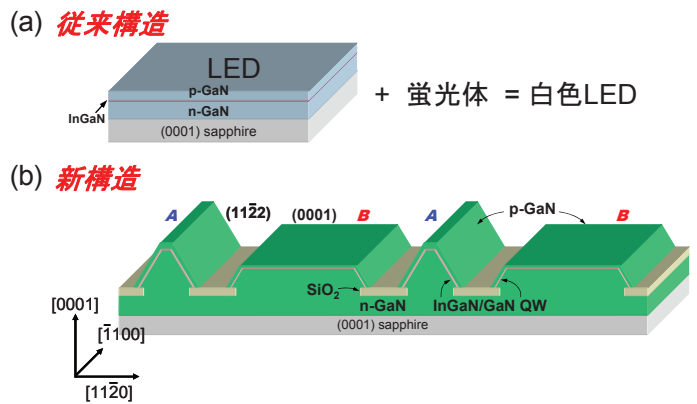


図4 (a) 既存の白色LEDの基本構造。InGaNを発光層とする青色LEDと黄色の蛍光体を組み合わせている。(b) 私たちが提案している微細構造を用いた白色・多色LED。

異なる微細構造を一つのLEDチップの中に適当な比で混在させてみました。これにより、結晶の成長条件に加えて、この構造の混在比によっても発光色が制御できるようになると期待されます。本研究では、構造AのためのSiO₂マスク開口幅は5 μm、Bのためのそれは15 μm、マスク幅はいずれについても5 μmとしました。

まず、蛍光体フリーのマルチファセット白色LEDを紹介しましょう。図5に、(a) LEDの発光スペクトルと(b) CIE (1931年)色度座標を示しました。通常の赤、青、緑などの単色系LEDであれば、スペクトルには、一つの発光バンドしか観察されないはずですが、マルチファセットLEDでは、複数の発光バンドが同時に存在する多色発光をしていることがわかります。顕微鏡で確認したところ、AおよびBの(11 $\bar{2}$ 2)面LEDから青色、Bの(0001)面LEDから黄色、Aの(0001)面LEDから赤色発光していることがわかりました。これらの加色混和の結果、いずれのLEDも外部から見たときには白色発光しており、しかも、図5(b)に示したように、色度座標上では黒体輻射の軌跡上の白色となっていました。従来の単色系LEDを同じ色度座標上にプロットすると、それらは馬蹄形の周辺部に位置するのですが、マルチファセットLEDの発光は、窒化物半導体だけで(蛍光体を使うことなく)白色を発し、馬蹄形の中心部分に位置することが大きな特徴です。色温度は、(i)が4000 K、(ii)6000 K、(iii)15000 Kであり、通常の蛍光灯の色温度の範囲である3000 Kから6500 Kや、従来の白色LEDの典型値5500 Kをほぼカバーすることができます。また図5(b)には、色温度5000 Kで光っている白色マルチファセットLEDの写真を示しました。

研究の途中で、このマルチファセットLEDの発光色は、駆動する電流値によって変化することがわかってきました。原因は、各ファセットの電気的特性に違いにより、電流値によって、優先的に電流が流れるファセットが代わるためです。この特性は、発光色の安定性という観点からすれば欠点ですが、一方で、これを積極的に利用すれば、電流値による発光色制御、つまり、外部からの発光色制御が可能になることを示唆しています。ただし、電流値を増加すると、通常、発光強度も増加しますので、発光強度を一定に保つために、電流を間欠的に供給するパルス駆動とし、電流値が増すに従い、電流パルスの幅を小さくする必要があります。図6にA:B = 2:1のマルチファセット白色LEDを、パルス電流で駆動したときの色変化を示しました。5 mAで色温度4000 Kであり、電流を増加させると、ほ

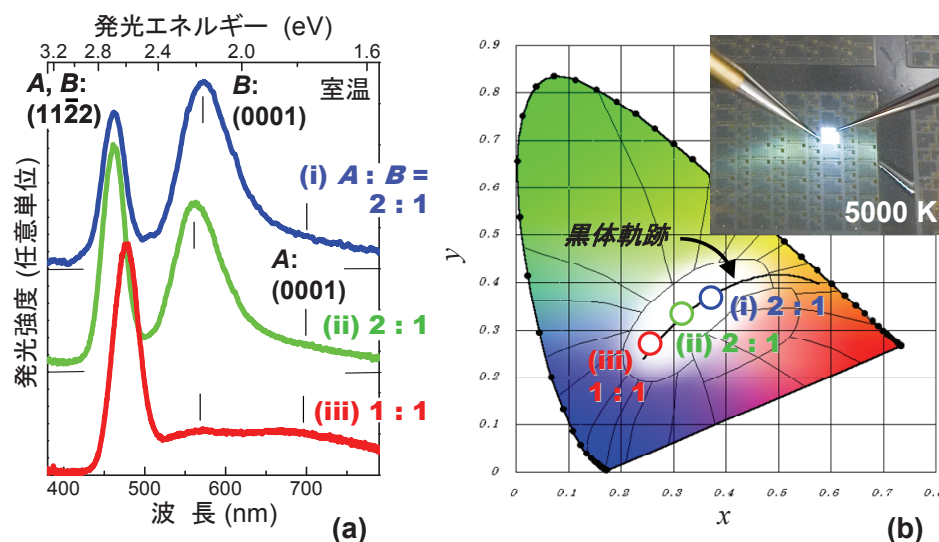


図5 微細構造を用いたマルチファセット白色LEDの(a) ELスペクトルと(b) CIE (1931年)色度座標上へのプロット。再成長に使用するマスクのパターンや成長条件を調整することにより異なる色温度の白色が得られている。(b)の内挿図は5000 Kで発光するLEDの写真である。

ほ黒体輻射の軌跡に沿って発光色が変化していることが見て取れます。

ここでは、白色LEDだけを紹介しましたが、同じ手法により、例えば淡い青色などのパステル調の発光を得ることも成功し、さらに、この発光色の電流値による制御にも成功しています。このように、新しい構造のLEDを、新しい駆動方式により発光させることにより、従来にないいくつかの機能、(1) スペクトルの外部調光、(2) 蛍光体を用いない白色・多色発光を実現することができたことを強調しておきたいと思います。

その他の研究課題について

上記のLEDの開発過程において、 $\{11\bar{2}2\}$ 面上のInGaN量子井戸における発光の確率が、従来用いられている(0001) 面上の量子井戸よりも桁違いに高いこともわかってきました。つまり、高い発光効率を実現するポテンシャルを持っていることを意味しています。このような物性を理解するには、基礎的な光物性評価が重要であり、私たちの研究室では、時間・空間分解した発光機構の解明を行っています。時間的には、10 ps (ピコ秒= 10^{-12} 秒) のスケールで、電子と正孔が再結合して発光する様子(ダイナミクス)を捉える技術を蓄積してきました。さらに、近接場光学顕微鏡と呼ばれる、光学顕微鏡の空間分解能(数百nm)よりも小さな空間分解能(数十nm)を持った顕微鏡を研究室独自で開発しています。

また、この $\{11\bar{2}2\}$ 面InGaN量子井戸の高い発光確率を利用したLEDの実証実験も行い、新聞などでも報道されています。

さらに最近では、発光波長の短波長化を目指し、AlGaInという別の材料系の開発と物性評価も行っています。発光波長は、250nm前後であり、殺菌、消毒、微細加工、表面改質などの応用が考えられる深紫外域に位置しています。現在のところ、この波長域の光源は、例えば水銀ランプなど有害な物質を利用しているため、その置き換えが期待されています。結晶成長法の開発の結果、世界最高レベルの結晶品質が実現され、それによる高効率発光も観測されています。

今回は、これらのテーマの詳細を述べることはできませんでしたが、研究の一部は、研究室のホームページ [5] にも掲載されていますし、また、CUEでも別の機会に紹介できればと思います。

まとめにかえて

光材料物性研究室では、以上のように、究極の光源「テイラーメイド光源」の開発を目指し、材料開発と物性評価を、いわば車の両輪として研究を進めています。これは、新しい機能の創出には材料開発が必須であり、材料開発の原動力には、その物性解明が必須であると信じているからです。自分たちがアイデアを暖め、苦勞して成長・作製した光材料・デバイスから、どのような光が放出されるのかを観測・測定することは、大変心ときめくことです。この感動を味わうために、研究室のメンバーは日々研究に励んでいます。そのような努力の結果として、半導体による照明光源が飛躍的に発展し、地球環境の維持に貢献することができれば、私たちの大きな喜びです。

参考文献

[1] 白熱ランプの発明は、エジソンではなく、ジョゼフ・スワン (1828-1914) によるものですので、

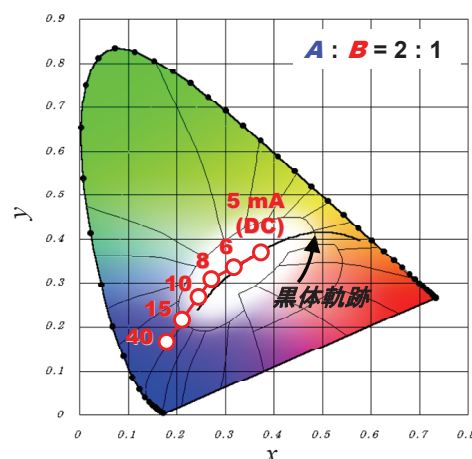


図6 パルス駆動したマルチファセット白色LED (A:B = 2:1) からの発光色変化の色度座標上へのプロット。

ここでは敢えて「事業化」と書きました。

- [2] <http://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/NIGHTLIGHTS.html>
- [3] 白熱ランプや蛍光灯の国内における年間生産・販売統計は日本電球工業会のHP, <http://www.jelma.or.jp> に開示されていて、まだ相当数の白熱ランプが用いられていることが分かります。
- [4] ここでの発光効率とは、投入した電力に対して、人間の眼がどれだけの光を感じることができるのか、という指標で、lm (ルーメン) /W という単位で記述されます。
- [5] 研究室ホームページ：<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

学生の声**「インターンシップのすすめ」**

情報学研究科 知能情報学専攻 言語メディア分野 黒橋研究室 博士後期課程2年 原 島 純

この「学生の声」、博士課程の方が順番に寄稿を依頼されているそうです。「今回は情報学研究科の方に」ということで、私に順番が回ってきました。せっかく「情報学研究科の方に」ということなので、私が所属する情報学研究科知能情報学専攻に特徴的な制度について紹介し、その中で推奨されているインターンシップについてお話したいと思います。

知能情報学専攻には、修士一回生のとき、どこかの企業にインターンシップに行かなければならないという制度があります。行かなければ「特殊研究」という必須単位が取得できません（正確にはインターンシップに行かなくても「特殊研究」を取る手段はありますが）。インターンシップは応募等の手続きが面倒ですし、一ヶ月程度本業から離れなければならないというデメリットがあります。しかし実際にインターンシップに行ってみると、デメリットを大きく上回るメリットがあることが分かります。

まず、インターンシップなので当然ですが、就業経験を詰めるというのは大きなメリットです。何時に出社して何時に退社するという社会人としての生活はもちろん、企業の雰囲気などは実際に行ってみないと分からないと思います。またインターンシップに来ている他の大学の学生と交流できるというのも大きなメリットだと思います。同じ業種に興味がある同世代の学生と交流するのは大きな刺激になります。さらに、企業によってはお給料まで貰えることもあります。このようにインターンシップにはたくさんのメリットがあります。

知能情報学専攻のほとんどの学生は、制度上どこかの企業にインターンシップに行きます。一方工学研究科にはこのような制度はなく、インターンシップに行く学生も少ないと聞いています。しかし、上で述べたようなたくさんのメリットもあるので、修士をとって就職される予定の方はもちろん、博士に進学することを決めている方も、インターンシップに行くことを一度検討してみてもいいのではないでしょうか。

「宇治・エネ科での暮らしを紹介します」エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻 長崎研究室
博士後期課程1年（2009年10月進学）金城良太

宇治キャンパスは、京阪・JRまで徒歩5分以内にある上、徒歩で通える場所に住むところがたくさんあります（しかも坂はありません）。また自転車で5分圏内にコンビニ3、スーパー3、ホームセンター（実験部品が急に必要になったときに重宝）も揃っています。

学生が多くないためか、一つのテーマ（装置）が一人に割り当てられることが多いです。一人で何でも取り組むことで研究者としての成長ができますし、研究の面白さがよくわかんと思います。僕も高温超伝導バルク磁石を用いた新型放射光発生装置の研究というチャレンジングなテーマに取り組んでいます。専用の実験室で、実験装置の設計をしたり、アルミ材を加工して真空チャンバーの架台を組み立てたり、磁場計測用のホール素子を動かすモーターの駆動回路をFETを組み合わせて作ったり、液体窒素循環用の配管をしたり、ソレノイド用の300Aケーブルを天井に敷設したり、流行のGPGPUを使って超伝導磁石の磁場シミュレーションをするプログラムを作ったり、何でも自分で時には研究室の仲間や先生の助けを借りてやります。さすがに超伝導体の焼結には失敗し（それでも磁石片は浮きました！）、専門家から提供して頂いています。

外国人も多く、研究会や他研究室とのミーティングは英語ですが、厳しくはなく、わからなければ聞き直してもいいし、やっぱりわからなければ先生が日本語で教えてくれます。日本語混じりの拙い英語でもみんな我慢強く聞いてくれます。それでも、研究室配属当初は全く英語ができなかった後輩達がみるみる成長し、驚かされるぐらいです。

研究内容は、ほかの京都大学の研究室と同じく世界最先端を行っており、B4から研究している学生はほとんどM1で国際会議に出ますし、博士課程の学生は学振特別研究員として多く採用されています。

教室通信

セミナー道場

光・電子理工学教育研究センター 高岡 義寛

京都大学が国立大学法人となり、中期目標・中期計画を策定する中で、電気系教室の関連組織の改組に伴って、附属光・電子理工学教育研究センターが平成19年4月1日に設立されました。また、本センターを核として受け皿となったグローバルCOE「光・電子理工学の教育研究拠点形成」がスタートして、本年度は4年目になります。その活動の中で、人材育成プログラムとして、「自立型研究者の育成」、「幅広い専門知識を持つ研究者の育成」、「国際的に通用する研究者の育成」を目標として、若手研究者の育成を支援しております。教育と研究は車の両輪と云われ、新しい研究分野の開拓と共に、人材育成は大学に課せられた重要な課題となっています。「優れた研究、優れた人材、優れた環境」をキーワードに、目標のひとつである「幅広い専門知識を持つ研究者の育成」を行うために、セミナー道場を平成20年度から毎年開催しております。本稿では、このセミナー道場の開催趣旨、プログラムおよび特色について紹介致します。

本セミナー道場では、学生が主体となって会議を企画・運営し、様々な専門知識を持つ大学院学生の育成と融合研究の芽生えを目的としており、グローバルCOE関係の大学院博士後期課程の学生および電気系教室連携教育プログラムの大学院学生を対象としています。昨年度は、平成21年10月30日(金)～31日(土)、淡路夢舞台国際会議場で開催しました。素晴らしい自然環境の淡路夢舞台で、本格的な国際会議ができる会場の雰囲気刺激を受け、留学生を含んだ参加学生は高揚した気分で熱心にセミナー発表を行っていたのが印象的でした。また、型苦しい雰囲気になりがちなスクール形式とは異なり、学生が主体となった1泊2日の泊り込みの議論を通して、同じ道場の仲間と云った意識が芽生えたようです。セミナー発表はショートプレゼンテーション付のポスター形式で行い、最初の30分間は発表者と質問者のペアを組み、それぞれ議論を行いました。参加者は大学院学生45名を含め、教職員併せて56名でした。

初日のセミナー発表では、大学院博士後期課程3回生および2回生の上級生の学生がそれぞれの研究の背景や目的を含めて、重要かつ先端的な研究の成果についてポスター発表を行い、下級生との質疑応答を行いました。議論を通して、それぞれが幅広い専門知識を習得することができたと感じています。

夜のランプセッションでは、企業から講師を招いて特別講演を企画しました。化学気相成長法を用いた薄膜形成の実例を挙げながら、研究の成功例や失敗例についての熱弁に、聴講した学生は大きな感銘を受けておりました。休憩を挟んだ後、セミナー発表でもう一度聞いてみたい発表について3件を選出し、それぞれの研究内容をさらに詳しく発表してもらいました。その後、飲み物を手にしながら自由討論形式で懇談し、議論は消灯時間の深夜まで行われました。

2日目のセミナー発表では、主に大学院博士後期課程1回生の学生および連携教育プログラムの修士課程の学生がポスター発表を行い、上級生との質疑応答を行いました。昼食の後、短い時間でしたが、お互いの交流の場として会場周辺の庭園散策を行い、様々な研究分野の学生が上下関係の壁を越えた交流や散策を楽しんでいました。

このように、セミナー発表では電気工学専攻、電子工学専攻、通信情報システム専攻の大学院学生および光・電子理工学教育研究センター、化学研究所、生存圏研究所に所属の大学院学生が、それぞれの研究を異なる専門分野の学生にも分かりやすく説明を行ない、活発な質疑を通して幅広い専門知識を習得することができたと感じています。さらに、一昨年度に神戸セミナーハウスで開催したセミナーに引き続き、同じ志を持った研究者同士が集まり、切磋琢磨する場としてのセミナー道場の開催は、その企画・運営を通して、学生自身の主体性や創意工夫の涵養にも貢献したと確信しています。今年度(平成22年度)は、他流試合の意味合いで、東京大学や大阪大学のグローバルCOEとの共同開催を企画しており、平城遷都1300年を迎えた奈良で開催を予定しています。関係する皆様方には、セミナー道場に対するより一層のご支援とご教示を、引き続き賜れば幸いに存じます。

賛助会員の声

鉄鋼業の省エネルギー対策における電気・制御技術事例について

新日本製鐵（株） 名古屋製鐵所 設備技術企画グループリーダー（昭和60年卒）
麻生 賀法

1. はじめに

近年、「エコ」や「省エネ」というキーワードは世界の重要な政治課題として挙げられるようになり、我々ひとりひとりがこれらを意識して生活しなければならない時代になりました。企業も同様で、「いかに事業を通じて地球環境保護に貢献しているか」という点が、大いに問われています。

当社の鉄鋼生産の現場でも、プロセス改善等により数多の省エネ対策を行っていますが、今回はこの場をお借りして、当社が電気・制御技術を通してこれまでに行ってきた取り組みをご紹介します。

2. 新日鉄の30年間にわたる省エネルギーへの取り組み

新日鉄では、第一次石油危機以降、1990年頃までに工程連続化・排エネルギー回収などを徹底して推進し、20年間で20%を超える大幅な省エネルギーを達成しました。1990年以降もさらなる設備対策や廃プラスチックの活用等を進めることで、2008年度の新日鉄グループのCO₂排出量は1990年度比で15.1%削減するに至っております。

現在も世界最高水準の技術開発力を活かして、3つのエコ、すなわち「エコプロセス」（環境に配慮した製造工程）、「エコプロダクツ*」（環境に優しい鉄鋼製品）、「エコソリューション」（省エネ・環境問題を解決する提案）を柱に省エネ対策を推進しています。（※エコプロダクツは新日鉄の登録商標です）

3. 当社の省エネルギーへの取り組み事例

今回は3つのエコのうち、鉄鋼生産の現場におけるエコプロセスとして「エネルギーを使わない」省エネ、「エネルギーをリサイクルする」省エネを、エコプロダクツとして「高機能製品の提供による」省エネをご紹介します。

(1) エネルギーを使わない省エネ ～ファン・ポンプの可変速運転～

鉄を製造するのに欠かせないのが、高炉や圧延機といった巨大な設備です。これらの設備駆動には油圧やモータを主に使用しますので大量の電力を消費します。また、製造プロセスが高温であることが多く、製品や設備自体の冷却に、ファンやポンプを使用しています。一例として表1

に名古屋製鐵所の大型ポンプファン用のモータ台数内訳を示しますが、数百～数千kWのモータが多数使用されており、電力消費量は非常に大きなものとなっています（所内消費電力では約400MW）。

表1：モータ台数内訳

容量[kW]	台数
500～2,000	308
2,000～3,000	71
3,000～	21

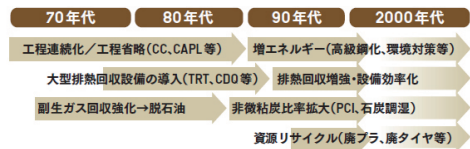


図1：当社における省エネルギーの取り組みの推移

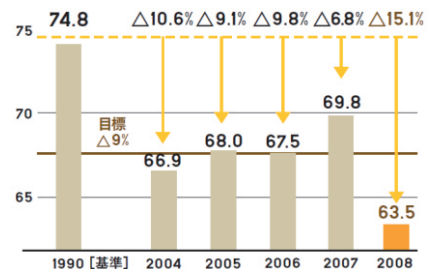


図2：新日鉄グループのCO₂排出量推移 (百万t/年)

これらのモータを商用電源（電圧 220 ～ 6,600V）で 24 時間駆動することなく、操業モデル（負荷、パスタイム）と最新インバータ技術を組合せて VVVF^{※1} 制御による可変速運転を行うことで、消費電力を極限まで抑える機能を所内全域に導入しています。例えば図 3、4 に示すように圧延材ごとの設備アイドル時間にポンプ運転速度を落とすことで、1,700kW の冷却水ポンプ 1 台あたりで年間 2,000 トンの CO₂ 削減を達成しました。

※ 1 : Variable Voltage Variable Frequency



図 3 : 圧延機概観

(2) エネルギーをリサイクルする省エネ

～コークス乾式消火設備 CDQ (Coke Dry Quenching) ～

鉄鋼の原材料はもちろん鉄鉱石 (Fe₂O₃) ですので、このままでは製品としての良質な鉄にはなり得ません。その酸素成分を還元するために、還元剤として使用されるのがコークスです。コークスは、製鐵所内のコークス炉で石炭を乾留することにより作られますが、乾留を終えたコークスは 1000℃ 以上の赤熱状態ですので、ベルトコンベヤ等で運搬可能な温度 (200℃ 程度) まで冷やす必要があります。

新日鉄では、単に水をかけて冷却するのではなく、冷却で失われる莫大な熱エネルギーを、赤熱コークスを入れる巨大なチャンバーとボイラの組合せにより蒸気エネルギーに変換し、所内に設置された発電機の駆動源として利用することで、電気エネルギーとして再利用 (リサイクル) しています。この設備はコークス乾式消火設備 (CDQ) といい、全てのプロセスは自動制御により 24 時間連続無人運転で稼動しており、かつ高効率でエネルギーを回収するため、ボイラ内では 1000 ループを超える PID フィードバック制御 (圧力制御・流量制御) が CDQ の安定稼動を支え、省エネを実現しています。この CDQ1 機から発電される電力は、約 30,000kW に上り、これは風力発電設備の約 100 基分に相当するものです。

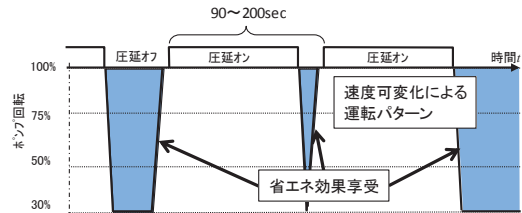


図 4 : 可変速運転例

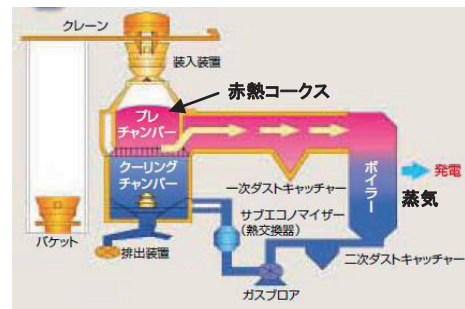


図 5 : CDQ プロセス概要



図 6 : CDQ 設備外観

(3) 高機能製品の提供による省エネ ～高張力鋼板、ハイブリッドモータ用電磁鋼板～

エンジンとモータをあわせ持ち、高燃費で走行するハイブリッドカーを支えているのが、新日鉄の高機能製品です。自動車の重さの約 7 割は鉄が占めるため、燃費向上のための鋼板軽量化は必須条件です。特にボディーは、強度と加工性という、相反する機能を実現するために、薄くて強い鋼板「ハイテン」を開発しています。また、モータの鉄心としてエネルギーロスを減らす「ハイブリッドモータ用電磁鋼板」なども

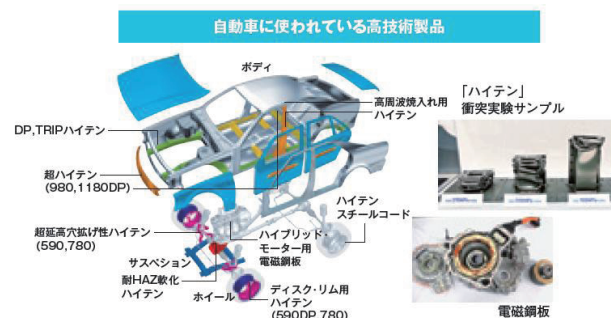


図 7 : 自動車に使われている高度機能製品

当社で開発しています。これらの製品による CO₂ 削減量は約 810 万トンにのぼり、日本全体の総排出量の約 0.7% に相当します。高性能製品を作りこむ上では、現代制御理論（最適制御）を駆使した圧延・冷却制御技術や、有限要素法（FEM）を活用した電磁界シミュレーションによる解析は必須であり、当社の技術力の結晶と言っても過言ではありません。

4. おわりに

鉄鋼業の生産現場では電気・制御技術を通して、いかに省エネに大きく貢献できるかがご理解いただけたかと思います。今回ご紹介した事例はその一端に過ぎません。百聞は一見に如かずですから、ぜひ一度製鉄所を見て実感していただけたら幸いです。

（新日本製鐵株式会社 <http://www.nsc.co.jp/>）

出典：「Nippon Steel Corporation Nagoya Works」新日本製鐵

「環境・社会報告書 2009」新日本製鐵

「NIPPON STEEL MONTHLY vol.198」新日本製鐵

編集後記

昨年から編集のお手伝いをさせて頂いています。担当は「教室通信」と「賛助会員の声」ですが、どの原稿も興味深く、また考えさせられる内容ばかりで、校正しながら、良い勉強をさせて頂いています。学生の教育については、教室の先生方の熱意に頭が下がりますし、社会に出て活躍する卒業生の声からは、産業界のホットで新鮮な息吹とともに、時代を牽引している「元気」をいただいています。Cueが、読者の仕事や人生の悩みを解決する「きっかけ」や、あるいは仕事を「きわめる」何らかの手がかりを与えてくれる... そのようなことが、決して夢ではなく、ここに実現しているのでは... と、目の前の校正を読みながら思っている次第です。

[F.S. 記]

協力支援企業

NTTコミュニケーションズ株式会社
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
日立電線株式会社
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22年9月

編集：電気系教室 cue 編集委員会
高橋 達郎、雨宮 尚之、佐野 史道
船戸 充、越智 裕之、後藤 康仁、
中村 武恒、木村 磐根（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp

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

