

CUE

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.38 SEPTEMBER 2017

[第38号]

.....
卷頭言

英保 茂

.....
大学の研究・動向

結晶配向制御による高温超伝導線の高性能化
エネルギー科学研究科 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

.....
産業界の技術動向

星和電機株式会社
竹之内 光彦

新設研究室紹介

研究室紹介

平成 28 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 38号 目次

巻頭言

AIのもたらすもの

…………… 昭和39年卒 京都情報大学院大学副学長・京都大学名誉教授 英保 茂…………… 1

大学の研究・動向

結晶配向制御による高温超伝導線の高性能化

……………エネルギー科学研究科 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…………… 3

産業界の技術動向

照明器具におけるLED化とそれに伴う高度化への取り組み

……………星和電機株式会社 竹之内光彦…………… 8

新設研究室紹介……………

15

研究室紹介……………

16

平成28年度修士論文テーマ紹介……………

36

高校生のページ

人に寄り添う安全安心なコンピュータの実現を目指して

情報学研究科 通信情報システム専攻 集積システム工学講座 大規模集積回路分野

……………石原 亨、小野寺秀俊…………… 58

学生の声

“仲良くなるため”の物理

……………工学研究科 電子工学専攻 白石研究室 博士後期課程1年 重松 英…………… 63

博士課程: レールに乗らない人生

……………情報学研究科 通信情報システム専攻 佐藤高史研究室 博士後期課程1年 辺 松…………… 63

教室通信

桂キャンパスで電気系教室の新たな歴史を

……………電気工学専攻長・電気電子工学系長 小林 哲生…………… 64

賛助会員の声

JR 旅客販売総合システムマルスの発展とその安定稼働維持について

……………鉄道情報システム(株) 藤井 和彰…………… 65

編集後記……………

68

巻頭言

AIのもたらすもの

昭和 39 年卒 京都情報大学院大学副学長・京都大学名誉教授 英 保 茂



最近情報技術の進歩に関連して、話題となり、社会の興味をかき立てているものに、ビッグデータ、IOT、およびそれらを用いた、AI、ディープラーニングなどがあります。これらは、ひとくくりについて人工知能（AI）と言っていると思いますが、電気・電子・情報分野における基盤技術の着実な進展に基づき、それらの応用技術の飛躍的な発展の結果として出現してきたものといえるでしょう。その進歩が、あまりにも急激で驚異的なことから、高度に知的な人工知能マシンが出現することに対する、恐れや不安を抱く論調（学術的なものを含め）も多く見られます。

もともと、計算能力（精度・速度）、正確な大容量の記憶、超大規模なマシンの連合体とデータ伝送能力など、これらは、どれをとっても私たち人間が太刀打ちできるものではありません。考えてみれば、昔はもっぱら専門家が利用していたコンピュータ（システム）は、現在では、ネットワーク機能を含めて、ほとんどの人が、普通に携帯し、簡単に利用しています。まさにユビキタス社会が到来しており、その恩恵を、子供から大人まで、多くの人々が享受できる状態そのものは、高度な知的マシンの一般への解放という観点からみても、大きな革新の時代に入っているといえるものでしょう。

IOT（Internet of things）についても、電気・電子関連の素子の開発・発展により、高機能・高速プロセッサシステムが安価な小型・省電力システムとして利用可能になったことと、インターネットにおける高速・高信頼データ通信がハードとソフトの発達と絡めて、実現できたなどという、これも電気関連の技術の輝かしい成果と誇れるものであり、機器同士が取り決めに従って情報を交換し、定められた適切な動作を自動的に行うような仕組みも実現されており、疲れを知らないものたちのサポート社会は私たちに明るい未来を提供してくれるだろうと期待される場所でもあります。

囲碁や将棋などの世界で、AIといわれるものが人間に勝利したとしても、それは、評価できる目的が設定できるような問題に対しては、人間より遙かに高い機能を持っているマシン群を使いまくれば、当然の結果として、（一人の）人間を打ち負かす結果が出たとしても、それほど驚くことではないでしょう。開き直って、ビッグデータや膨大な資源を用いた AI の繰り出してきた手法を改めて眺めたときに、過去の経験や論理立てからは見過ごしていた新しい攻め方や対象に対する新たな深い理解が進むこともあるでしょう。

このように、人工知能そのものは、基本的には私たちの生活を豊かにするものとして存在しているはずですが、もう少し正確に言えば、そのような動機に基づき設計・製作されてきたものでしょう。しかし、その能力が強大なものになってきたため、利用の仕方によっては、オーウェルの小説「1984 年」（60 年以上前の SF 小説）に描かれている世界——双方向情報伝達システムを用いて、個々人の動向が把握され、また、繰り返し提示される管理された形での情報の刷屏込みや歴史の改ざんなども行われるような管理社会——になる恐れがないわけではありません。ネットワーク上の情報は、気づかぬうちに収集され分析され加工されて流布されるといったことが行われている部分があるのも事実です。正しい（？）目

的に運用されている場合は、それも許容されるものであるのかもしれませんが・・・。

もう少し身近なところで見えますと、疑問点や調べたいことがあると、ネットで検索をすれば、直ちに多くの情報が出てきます。ちょっとした知識の確認を含め、極めて有効なそして高度な百科事典として便利なものです。ネットにアクセスできれば、ほとんどのことがわかるという時代になってきたという感じもします。AIはここでも使われていて、情報の出現順位なども制御しているともいわれています。ここにも、情報操作に関連した不安要素は存在しています。さらには、発信されている情報も、玉石混淆であり、時には間違いや偽情報も含まれています。こういった状況のなかで、真の正しい情報を獲得することはできるのでしょうか・・・。不確かな知識の確認のための検索であれば、基本的なことを知っているわけですから、おかしな情報、間違っただ情報は容易に検出できます。このことを少し拡大しますと、ネットからの情報のみに頼るのではなく、常日頃、技術的な事柄に限らず、いろいろな分野の基本的な知識・常識を蓄えるように、ネット以外の（旧来の）媒体からの地道な情報獲得（学習）を心がけることが大事です。さらに学術・技術分野の知識にとどまらず、文化・芸術などを含むオールラウンドな知識・教養を身につけておくことが、正しい判断の基本となるのではないのでしょうか。学生諸君・技術者の皆様方には広い知識と教養を身につけ、真実を見定める力を持った社会人として活躍していただきたいと願っています。

結晶配向制御による高温超伝導線の高性能化

エネルギー科学研究科 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
教授 土井俊哉
准教授 堀井 滋

1. はじめに

超伝導物質（超伝導体）は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な物質です。この性質を使うことによって強力な安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器、超伝導磁気浮上列車などの様々な製品が作り出されています。現状はニオブチタン合金（NbTi）と Nb₃Sn 金属間化合物を使用した電線（超伝導線）を用いて強力な磁場を発生するマグネットを作製し、これらの実用製品が作られています。しかしながら NbTi、Nb₃Sn の超伝導臨界温度は 9.8 K、18.3 K と極めて低く、これらの製品は高価で資源的制約の大きい液体ヘリウムを使って冷却して運転する必要があるため、運転コストが高く、極めて限られた分野でしか利用されていません。

しかし 1987 年以降、臨界温度が高い超伝導物質が続々と発見され、現在では液体窒素（沸点 77.3 K）による冷却で超伝導状態が実現できる高温超伝導体が多数存在しています（YBa₂Cu₃O₇、GdBa₂Cu₃O₇、EuBa₂Cu₃O₇、SmBa₂Cu₃O₇、Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀、Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃O₁₀、TlBa₂Ca₂Cu₃O₉、HgBa₂Ca₂Cu₃O₉ など）。これらの高温超伝導体を用いた電線（高温超伝導線）が実用化されれば、入手が容易で安価な液体窒素に漬けて冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導線の使用が広がることが確実視されています。

高温超伝導体の実効的臨界磁場（不可逆磁場）はその結晶構造（内部の電子状態）に強く依存するため、高温超伝導線開発の対象物質は RBa₂Cu₃O₇（RBCO、R は Y、Gd などの希土類元素）にほぼ収斂しています。RBCO は 77 K での不可逆磁場が高く、高磁場中でも高い臨界電流密度（ J_c ）を有していることから様々な電力機器への応用が期待されています。しかしながら RBCO は結晶同士のなす角が 10° 以上になると J_c が急激に低下するという欠点を持っています。それ故、実用的な J_c を有する RBCO 超伝導線を得るためには単結晶のように RBCO 結晶の a 軸、 b 軸、 c 軸の向きを全て揃えた（3 軸配向）状態を実現しなければなりません。超伝導物質をマグネットなどに利用する際には、数百 m ~ 1 km 程度の長さの超伝導線が必要となるので、つまり RBCO を用いた高温超伝導線を実用化するためには数百 m もの長さに渡って RBCO 結晶を 3 軸配向させなければならないことになります。

この難題を解決するために、半導体分野で発展した薄膜作製技法、エピタキシャル成長技術を用いて金属テープ上に 3 軸配向した高温超伝導薄膜を作製する手法が考案され、研究開発が進められています。RBCO 薄膜を 3 軸配向させる方法は大きく分けて 2 種類あります。まず初めに、ハステロイテープ上に斜め方向からイオンビームを照射しながら 2 軸配向した酸化物バッファ層を形成してテンプレート層（半導体デバイスにおける単結晶基板の役割を果たす層）とする方法（IBAD 法）[1] が考案され、次に金属板に適切な条件で圧延と熱処理を施して金属結晶方位を 3 軸とも揃えたテープをテンプレートとして使用する手法（集合組織金属基板法）[2] が提案されました。何れの手法を用いた高温超伝導線もそ

の研究開発は比較的順調に進み、現在では複数の線材メーカーから数百 m 長の高温超伝導線が市販されるに至っています。そして最近はこれら市販の高温超伝導線を用いた超伝導機器の開発も盛んに行われており、技術的・性能的には高温超伝導線はほぼ実用レベルに到達したと考えられます [3-5]。しかしながら、高温超伝導線の販売価格は実用超伝導機器で使用されている NbTi 合金線に比べて 2 桁程度も高いため、まだ実製品に受け入れられる状況にはありません。

図 1 (a)、(b) に IBAD 法および集合組織金属基板法で製造された市販高温超伝導線の概略構造を示します。IBAD 線では基材として成膜時の高温引張強度を高く保つ必要があることとバッファ層物質との熱膨張率差を考慮して、Ni 基耐熱合金の 1 つである Hastelloy[®] が使用され、その上に反応（拡散）防止層として Al_2O_3 と Y_2O_3 等の酸化物がスパッタリング法などによって堆積されます。その上に Ar イオンビームをテープ面に 45° の角度で照射しながらイオンビームスパッタ法で MgO を成膜することで、全ての MgO 結晶の結晶方位を $2\sim 5^\circ$ 以内に揃えた MgO 層を形成し、3 軸配向のテンプレート層としています。この単結晶的な（3 軸配向した） MgO の上にスパッタリング法やレーザー蒸着法によって MgO をホモエピタキシャル成長、その上に LaMnO_3 や CeO_2 等の酸化物をバッファ層としてヘテロエピタキシャル成長させ、その上に RBCO 高温超伝導体を $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 厚ヘテロエピタキシャル成長させることで 3 軸配向させた RBCO 高温超伝導層を形成しています。更にその上に保護層として Ag 層と $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 厚の Cu 層が形成されます。常伝導状態の RBCO は $1\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ 程度の抵抗率を有する為、RBCO 高温超伝導層中に何らかの要因で局部的に超伝導状態が破れて抵抗が発生した部分が生じた場合、大きなジュール熱が発生して超伝導線が溶断するので、この抵抗の低い保護層（安定化層と呼ぶ）に電流をバイパスさせて、短時間に大きなジュール熱が発生しないようにしています。また、図 1 (b) に示した集合組織金属基板法で作製した高温超伝導線では、5% 程度の W を添加した Ni 合金に冷間圧延と熱処理を施すことで、金属結晶の $\{100\}$ 面をテープ面にかつ $\langle 001 \rangle$ 方向を長手方向にどちらも $4\sim 7^\circ$ 以内に平行に揃えた Ni-W テープを基材に使用しています。その上にスパッタリング法などによって Y_2O_3 、 Y_2O_3 安定化 ZrO_2 (YSZ)、 CeO_2 を順にヘテロエピタキシャル成長させたバッファ層を形成し、その上に金属有機化合物分解法 (MOD 法) により RBCO 高温超伝導体をヘテロエピタキシャル成長させています。そしてその上に IBAD 法と同様に Ag と Cu 層を形成して、高温超伝導線として完成させています。

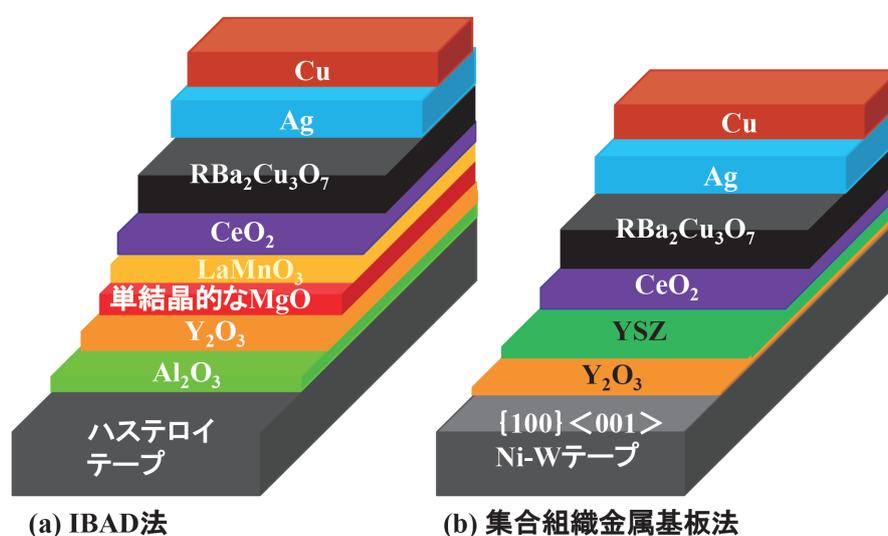


図 1 現在市販されている高温超伝導線の断面構造

どちらの高温超伝導線も多量のレアメタルと貴金属 (Ag) を使用していることから、量産時においても価格は十分に下がらないことが容易に想像できます。更に、IBAD 法では 3 軸配向テンプレート層を形成する為に、イオンビームを使った真空中の成膜が必須であることから、製造コストの大幅な低減も本質的に難しいと思われれます。一方、集合組織金属基板法は基材テープの金属結晶を冷間圧延と熱処理のみの簡単な方法で 3 軸配向させる為、将来的には全ての製造工程を MOD 法などの常圧下で実施できる可能性があり、工業生産により適した手法であると考えられます。つまり、レアメタルと Ag を使用せずに、集合組織金属基板法によって RBCO 線を作製することに成功すれば、高温超伝導線の大幅な価格低減が期待できます。

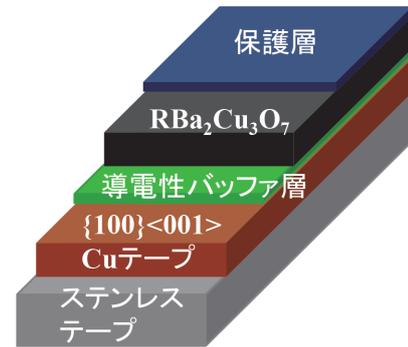


図 2 低コスト高温超伝導線の概略構造

2. 低コスト高温超伝導線

2.1 低コスト高温超伝導線の構造

そこで我々は {100}<001> 圧延再結晶集合組織 Cu テープ上に導電性バッファ層を介して RBCO 層を形成することで、レアメタルと Ag を使用しない低価格な高温超伝導線の開発を進めています。図 2 に我々が提案している低コスト型高温超伝導線の概略構造を示します。実用超伝導線においては、超伝導層に何らかの擾乱が発生して部分的に超伝導状態が破れた際に、電流をバイパスさせてその部分を超伝導状態に復帰させるための安定化層が必須です。安定化層に用いる金属の抵抗は小さい程好ましいので、Cu もしくは Ag のみが候補となりますが、コストを考えると Ag を用いることは非現実的です。現在市販されている IBAD 線、RABiTS 線では基材金属テープの電気抵抗が高く安定化層の役割を担うことはできない為、RBCO 層上に Cu 層を形成せざるを得ませんが、酸素透過性の問題からまず数 μm 厚の Ag 層を形成した後に Cu 層を形成しなければなりません。この Ag の素材価格と Ag および Cu 層の製造コストは市販高温超伝導線の価格の中でかなりのウェイトを占めていると予想されます。図 2 に示す様に 3 軸配向テンプレートとして {100}<001> 集合組織を有する純 Cu テープを使用し、バッファ層を導電性物質とすることができれば、基材の Cu テープに安定化層の役割も兼ねさせることができます。つまり、高価な Ag やレアメタルを多量に用いる必要のない低コスト REBCO 線の作製が可能になると考えられます。Cu テープの 3 軸配向は通常の圧延と熱処理のみで得られるため、3 軸結晶配向層 (テンプレート層) を得るために真空プロセスを必要としません。従って、MOD 法やミスト CVD 法などの



図 3 RBCO/Sr(Ti_{0.95}Nb_{0.05})O₃/Ni/Cu テープ試料断面の透過型電子顕微鏡観察結果

ような常圧プロセスで導電性バッファ層およびRBCO超伝導層をエピタキシャル成長させることができれば、素材費も製造費も低く抑えた高温超伝導線の製造が可能になります。この新規構造では Hastelloy や Ni-W 合金に比べて価格が2桁程度安いステンレステープによって、超伝導線の機械的強度を保つことにしています。

2.2 研究開発の現状

廉価な高温超伝導線を作製するためには酸化物である RBCO 高温超伝導体を酸化され易い金属 Cu 上にヘテロエピタキシャル成長させる必要があります。RBCO の成長は酸化雰囲気中、800℃程度の高温で行う必要があるため、ダイレクトに成長させると Cu テープは簡単に酸化されて界面に CuO が形成されてしまいます。また基材である Cu テープと RBCO が激しく反応してしまいます。その為、両者の間にバッファ層が必要となります。このバッファ層には Cu および希土類元素 R、Ba、酸素の拡散をブロックすることが求められるだけでなく、Cu の上に自身がヘテロエピタキシャル成長し、そのバッファ層の上に RBCO がヘテロエピタキシャル成長できるものでなくてはなりません。RBCO 層の成長がかなり酸化性の強い条件下で実施されねばならないので、バッファ層は酸化物から選ばれることになります。しかしながら、酸化されやすい Cu テープ上に、Cu テープとの界面に CuO を生成させずにヘテロエピタキシャル成長するバッファ層物質は少なく、また更に導電性を有する必要があるため、その候補はかなり限られてしまいます。我々は、様々なバッファ層物質とそれらの組合せを詳細に検討した結果、Ni と Sr(Ti_{1-x}Nb_x)O₃ の2層バッファ構造が有望であることを見出しました。

図3に、SUS316と貼合せた [100]<001> 集合組織 Cu テープ上に、0.5 μm の Ni をめっき法で、0.4 μm の Sr(Ti_{0.95}Nb_{0.05})O₃ をパルスレーザー蒸着法、0.2 μm の RBCO をパルスレーザー蒸着法(図4)で、順にヘテロエピタキシャル成長させた試料断面の透過型電子顕微鏡観察結果を示しました。各層同士の界面が明瞭に観察されていて、各層間で構成元素の拡散や化学反応は生じていないことが確認できます。また、各層の電子線回折結果から、

$$(001)_{\text{Cu}} // (001)_{\text{Ni}} // (001)_{\text{Sr}(\text{Ti}_{0.95}\text{Nb}_{0.05})\text{O}_3} // (001)_{\text{RBCO}}$$

$$\text{かつ } [100]_{\text{Cu}} // [100]_{\text{Ni}} // [100]_{\text{Sr}(\text{Ti}_{0.95}\text{Nb}_{0.05})\text{O}_3} // [100]_{\text{RBCO}}$$

の方位関係を保って、エピタキシャル成長していることが確認できました。また、X線回折測定および電子線後方散乱回折測定結果から、最上層の RBCO は90%以上の結晶粒の方位が ±3° 以内に揃っている(3軸配向している)ことが確認できました。バッファ層の抵抗率を直接測ることはできませんが、同一条件で絶縁性の MgO 単結晶基板にヘテロエピタキシャル成長させた Sr(Ti_{0.95}Nb_{0.05})O₃ 薄膜の導電率は $8 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ と良好であることが確認できています。この試料を液体窒素に浸漬して 77 K にて電気抵抗ゼロで流れる電流の電流密度を測定したところ、20,000 A/mm² 以上に達しており、市販の高温超伝導線と同等レベルであることが確認できました。

現在、科学技術振興機構の先端的低炭素化技術開発事業の支援を受け、「高効率エネルギー機器システム実現のための先進的産業用電気機器の開発」プロジェクトの中で、電力中央研究所、物質・材料研究機構、青山学院大学と共同で、「低コスト

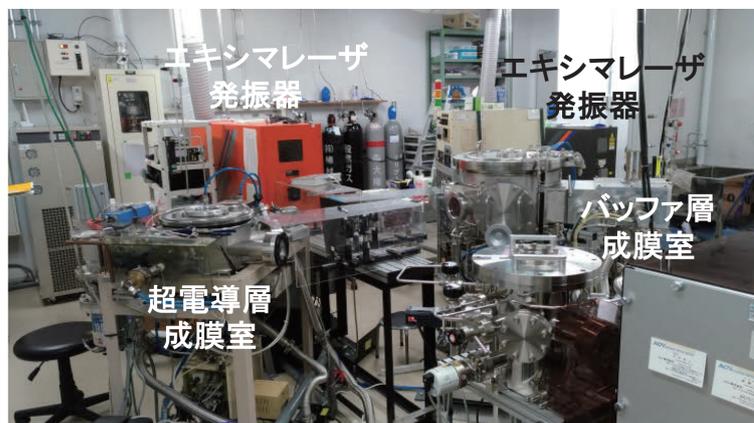


図4 パルスレーザー蒸着装置の外観

高温超伝導線材」という課題名で研究開発を推進しています。本研究課題では、全てのバッファ層および高温超伝導層を常圧下で製造するための新規製造法の開発や長尺線製造が可能であることの実証、および機器設計に必要な各種の超伝導線特性データの収集に取り組み、H33年度からの製品化を目指しています。

3. おわりに

本稿では、我々の研究室で取り組んでいる研究課題の1つである高温超伝導線について紹介させていただきました。半導体分野では、単結晶薄膜であることが当たり前であり、その為に基板には適切な単結晶が必要です。一般的に電子材料は多結晶よりも単結晶の物の方が高特性ですが、全ての電子材料に適した単結晶基板が開発されているわけではありません。また単結晶は高価であり、大きなサイズの単結晶を作製することは簡単ではありません。そこで、単結晶基板を用いずに単結晶に近い薄膜を作製することができれば、安価に性能向上を実現できる可能性があります。我々は、高温超伝導線以外にもガラス基板上での透明導電膜や多結晶 Si 薄膜、金属板上での熱電材料や太陽電池などの結晶配向制御も試みており、どこかに新しい展開が無いか模索中です。

今後とも、皆様のご指導、ご鞭撻をお願い申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno and Y. Ikeno, Appl. Phys. Lett. **60**, 1992, p.769.
- [2] 土井俊哉、東山和寿、応用物理、第 65 巻、1996、p.372.
- [3] 例えば、塩原融、電気学会誌、第 134 巻、2014、p.540.
- [4] 雨宮尚之、中村武恒、cue No.36、2016、p.3.
- [5] http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/160527_3.html.

産業界の技術動向

照明器具における LED 化と それに伴う高度化への取り組み

星和電機株式会社
竹之内 光彦

1. はじめに

照明として用いられる光源は、誕生当時から現在に至るまで4世代に分類される。

第一世代は、「炎」であり明るさだけでなく料理や陶芸などあらゆる用途に使用されているが、照明としては非常に原始的であると言える。

第二世代は、「電球」であり一般的には白熱ランプと言われるもので、照明器具に使用された初期の人工光源である。

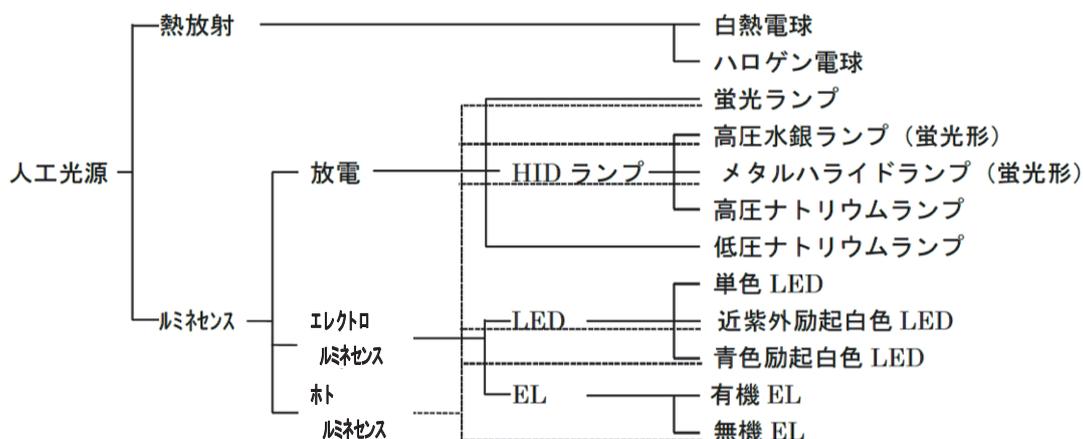
第三世代は、「放電灯」であり一般的には蛍光ランプや高輝度放電ランプ（水銀ランプや高圧ナトリウムランプなど）と言われるもので、白熱ランプと比較して発光効率（1ワット当たりの明るさ）や寿命および明るさの出力が飛躍的に向上した少し以前では主流で使用されていた人工光源である。

第四世代は、「LED（Light Emitting Diode、発光ダイオード）」であり近年実用化されてきた半導体による固体光源（SSL：Solid State Lighting）で、第二・三世代の光源の特徴をさらに向上できる性能を持った人工光源である。

20世紀の終盤に青色LEDの生産が活発になり、赤色、緑色LEDとともに光の三原色が整いLEDでの白色化の実現が可能になった。それによりLEDは、照明用光源への適用が現実味を帯びることになり現在に至るまで各種性能の改良が継続的に行われ、照明用光源として確立された。ここでは、LEDを光源とした照明器具の高度化について述べたいと思う。

2. 照明用光源の特徴と変遷

照明器具に使用される人工光源（以下、光源という）は、白熱電球のように熱放射を利用した光源と



※ホトルミネセンスは、これのみではランプとにならないため破線で示している

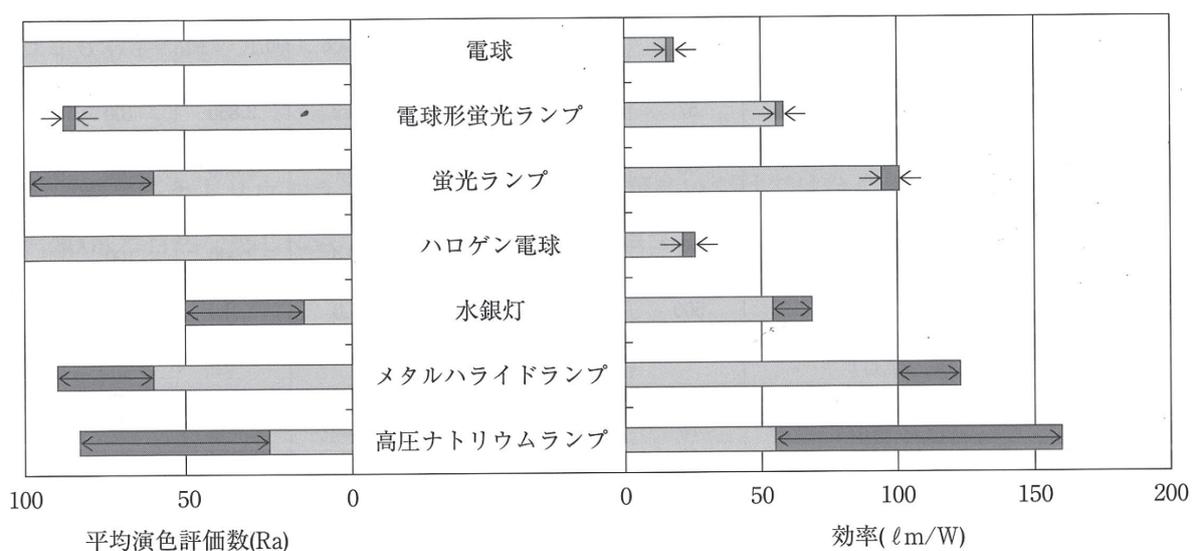
図1 主な人工光源の種類【1】

放電ランプやLEDのようにルミネセンスを利用した光源に大別され、ルミネセンスを利用した光源はさらに放電、エレクトロルミネセンスとホトルミネセンスを利用した光源に分けられ、それぞれ用途に合わせて大きさ、明るさ、光の色などが異なるものがある。図1に主な人工光源の種類を示す。

これらの人工光源はいずれも電気エネルギーを光に変換するものであるが、各々特徴があり性能も違う。LEDを除く既存光源の原理と構造を表1に、効率と演色評価数を図2に示す。

表1 光源の原理と構造

種類		発光原理	構造・材料
白熱電球		・熱放射 加熱したタングステンフィラメントの発光	発光体：フィラメント ガラス球：軟質ガラス 封入ガス：アルゴン他
ハロゲン電球			発光体：フィラメント ガラス球：石英ガラス 封入ガス：ハロゲン、アルゴン
蛍光ランプ		・低圧放電 水銀からの紫外放射を蛍光体で可視光に変換	主な発光体：水銀→蛍光体 ガラス管：軟質ガラス 封入ガス：アルゴン他
HID ランプ	高圧水銀ランプ	・高圧放電 封入金属の発光	主な発光体：金属原子 発光管：石英ガラス アルミナ管 外管：硬質ガラス
	メタルハライドランプ		
	高圧ナトリウムランプ		
低圧ナトリウムランプ		・低圧放電 封入金属の発光	主な発光体：金属原子 発光管：耐ナトリウムガラス 外管：赤外線反射幕ガラス



※仕様によって値が異なるものはその範囲を |<->| で示した

図2 光源の効率と平均演色評価数

図1に示した光源の中で近年新たにLED (Light Emitting Diode) が加わった。そのLEDの特性は、3項で記載するとして、LEDを含めた光源の変遷を図3に示すが、ガス灯から始まり白熱灯(ランプ)、放電灯(蛍光ランプ)といった新光源の出現は、大凡60年間隔であることが判り、LEDは固体照明(SSL: Solid State Lighting)として全ての性能を含めて既存光源に取って代ろうとしている。

3. LEDの特性

LEDは、電流を流すことで光を発生する半導体素子であり、世界的な地球環境問題に対する意識の高まりとともに、LED照明に関する省エネルギー光源としてその需要は急速に拡大してきている。

(1) 発光方式

LEDの発光色は純度の高い光色であるが、一般照明用としては白色光が必要となる。そこで単色LEDの光を混合して白色の光を作ることとなる。LEDを発光色によって分類すると、図4に示すとおり、従来から表示用などに使われている赤色、橙色、黄色、緑色、青色などの単色LEDと混色した白色LEDの方式に分類され、照明用光源として使用されているほとんどは後者の混色した白色LEDの方式で、さらにそのほとんどが青色LED+黄色蛍光体によるものであり、その代表的な分光分布を図5に示す。

(2) 効率

LEDの効率はその技術開発により年々上昇しており、LED照明の普及促進を目指して2020年頃までのLED発光効率のロードマップが公表され、図6、図7のような一般照明用白色LED(チップベース)の発光効率の推移を示している。なお、図6は2008年時点でのロードマップ予想であるが、その発光効率の向上が予想以上に早く2015年時点でそのロードマップを更に修正したものが図7となり、さらに図8に光源の効率と推移を示すが、その技術発展は目を見張るものがある。

(3) LEDの寿命

LEDは従来の光源のように断線やフィラメントの摩耗によって寿命となることはほとんどないが、使用材料の劣化によって光束が減衰していく。従来光源である蛍光ランプの場合、初期光束の70%に低下

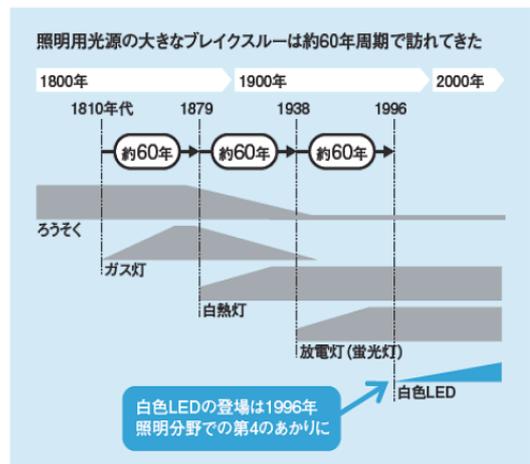


図3 光源の歴史

方式	備考
短波長LED + 蛍光体 青色LED + 黄色蛍光体 青色LED	●現在の主流方式 ●蛍光体の塗布量等により色バラツキが目立ちやすい ●演色性の改善形も出始めている
励起方式 紫色(近紫外)LED + RGB蛍光体 紫色(近紫外)LED	●高演色性が最大のメリット ●赤色蛍光体の効率が悪く、実用化されているものの効率は“青色LED+黄色蛍光体”方式より劣る ●寿命の改善が課題
混光方式 R・G・B3色LEDの混光 R G B	●各色LEDのバラツキ抑制が必要(白色にした場合の色バラツキが目立ちやすい) ●LEDの色によって点灯電圧が異なるため、回路構成が複雑になる
補色となる2色のLEDの混光 (例) 青緑色LED 赤色LED	

図4 白色LEDの発光方式

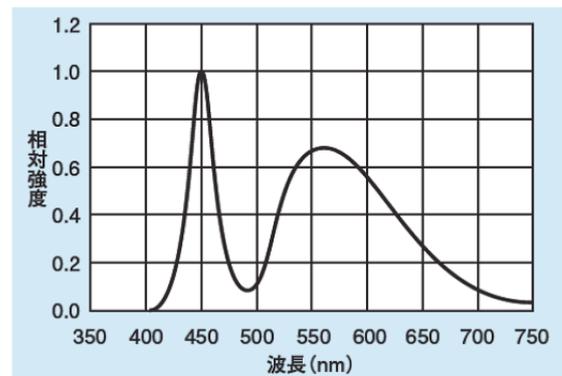


図5 青色LED+黄色蛍光体の分光分布の一例

した時点を生寿命としているが、LEDにおいても同様の定義が一般的に用いられている。図9に白熱電球、蛍光ランプ、LEDの点灯時間と光束維持率の関係を示す。実際のLEDの寿命は放熱条件により大きく異なり、古典的な砲弾型白色LEDでは定格電流で点灯した場合に10,000時間程度であるが、セラミック容器に耐久性の優れたシリコン樹脂で封印された素子の場合、40,000時間以上さらにそれ以上の寿命が得られる。

(4) LEDと熱

LEDは赤外線をほとんど含まないため、熱の発生しない光源のように捉えられることが多いが、実際には光に変換されなかったエネルギーは熱となる。図10にLEDに供給された電力のエネルギー配分を示すが、これは、青色LED + 黄色蛍光体の白色発光（効率100lm/W）を例にしており、電気的入力に対して光として利用できるのは約30%で、残りの約70%が損失となり熱を発生させていることが分かる。

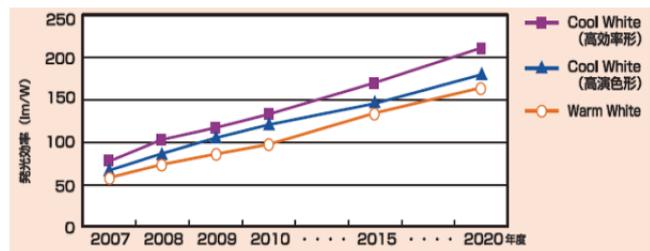


図6 2008年時点の白色LED発光効率のロードマップ [2]

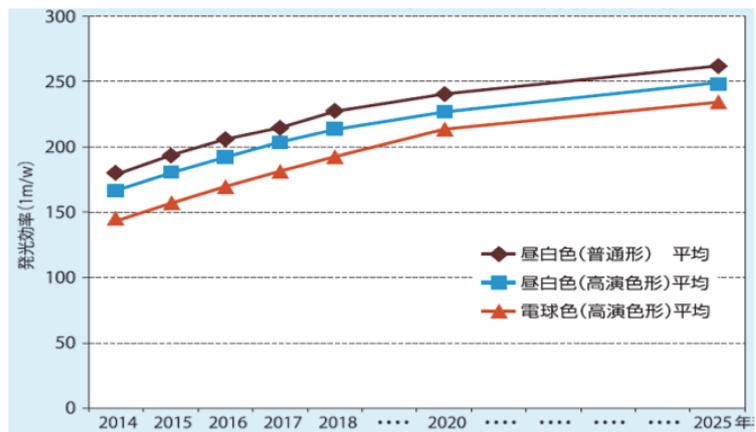


図7 2015年時点の白色LED発光効率のロードマップ [3]

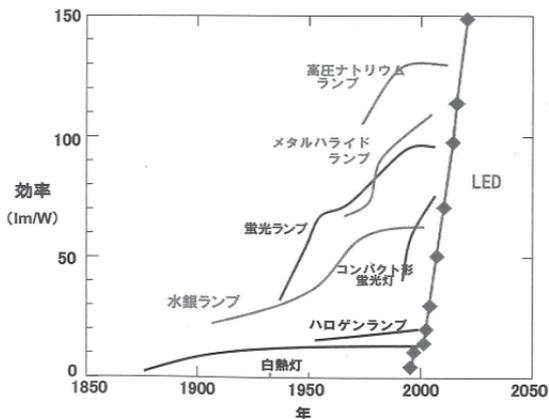


図8 光源の効率と推移 [1]

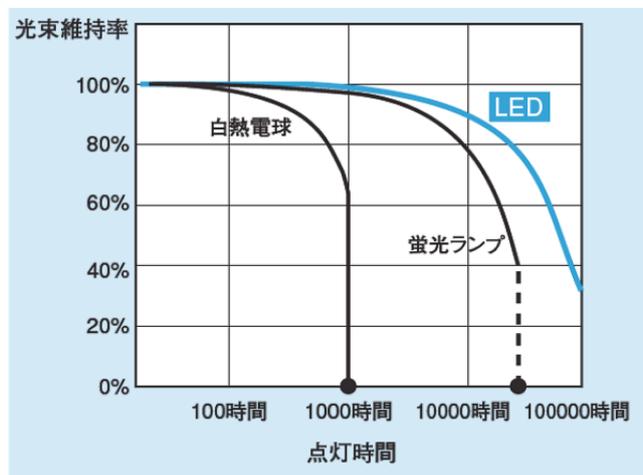


図9 光源と光束維持率の一例 [1]

4. 照明器具の高度化

(1) 高効率化

照明器具の主目的は、1) 光源から出た光を適切に制御し目的に合った放射分布（配光）を得る、2) 光源にエネルギーを供給し光源を正しく動作させる、3) 装飾的な効果を発揮する、の3つの項目が考えられる。ここでは、機能的な目的である前二者について表2に照明器具の機能的要件を示す。

照明器具の機能的要件は、表2に示したとおりであるが、それぞれの機能的要件を満たすための使用部材の効率ロスを考えた場合、光源部単体の発光効率を仮に100とした場合に最少で40%、最大で80%のロスが生じる事となり、実際の発光効率（以下、効率という）は20～60%程度となる。そこで、その効率を上げるための施策として、a) 照明率を上げる（必要な場所に最大限照射して漏れ光を出さない）、b) 電源効率のロスを回路の最適化やLED 負荷の最適化で極力無くす、c) 器具の放熱設計を十分考慮することでLED の発熱を抑える、d) 透光部の透過率を極力抑えると同時に器具内での反射ロスを抑える、等の対策を講じる事で大きく効率を上昇させることができ、省エネルギー効果を大きく実現できる。

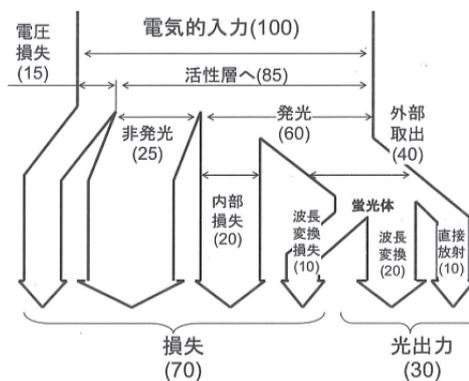


図10 LEDのエネルギーバランス【1】

表2 照明器具の機能的要件

	部位	部品名	材料等	ロスの要因	効率のロス(%)
光学	反射	反射板	樹脂	透過率、変色、照明率	～5
	屈折	レンズ	アルミニウム等	反射率、照明率	
構造	電氣的部品	電源装置	AC/DC 定電流	電源変換、	10～30
		LED	SMD、COB等	高出力化	10～20
	機械的部品	器具	鋼材、アルミニウム	熱ダレ	10～20
		透光部	ガラス、樹脂	内部反射	～5
				透過率、変色	

(2) 視認性の改良

(1) で記載した省エネルギーを追求し高効率化を実現した場合に、今までの光源にない“まぶしさ（以下、グレアという）”という大きな問題が出現してきた。すなわち、高効率化を実現するために、①ロスを極力低く透過率を最大限にするため、透明の全面カバー（ガラス等）を利用し直接LED光を取り出した、②照明率（対象照射面に器具からの放射光束が入射する率）を高くするためにレンズや反射板で集光するため放射されるある角度の光度が極めて高くなった、③照明率を高くするために漏れ光が小さくなり空間の明るさが小さくなった、ことなどが重なり人の視点や視線がある位置になった時に不快なグレアを感じる現象が頻繁に表れてきた。そこで、ある角度に突出した光度分布にならないような配光制御を検討し、逆に透過率は低くなるものの一様な光度分布になるような拡散透光カバー等を開発しグレアの出現を押さえる事に成功した。

(3) 多機能化

光源がLEDになった事により既存光源にない反応速度やその利便性により、飛躍的に多機能化が実現しやすくなった。多機能については、照明制御や情報提供と言った分野を照明器具をとおして実現することができ、表3にその多機能化への進展について示す。

表3 多機能化への進展

光源のLED化	“明るさ”、“色”を自在にコントロール可能	
世の中のIT / IoT化	通信 / ネットワーク対応	あらゆる機器との連携
	各種センシングデータ収集	あらゆるデータの蓄積・解析
	リアルタイム制御、モニタリング、自動制御、フィードバック制御	
次世代照明システム	照明制御：省電力、管理の省力化、快適性・安全性の向上、設備の省力化	
	情報提供：安全性の向上、秘匿性の向上、設備の省力化	

表3にある次世代照明システムのうち照明制御に関わるその利用シーンは、下記のとおりである。

a) 省エネ・最適化のための照明制御

- ① 個別またはグループ（エリア）単位での制御
- ② 各種センサ（人感／照度）や、他設備・機器との連動制御
- ③ 日時や活動サイクル等に合わせたスケジュール制御
- ④ イベントや設定シーンに合わせた制御
- ⑤ 遠隔からのリモート制御
- ⑥ アクチュエータ等の利用により照射位置や配光特性の制御も可能

b) 監視・モニタリング

- ① 消費電力や灯具状態（稼働状況等）をリアルタイムに見える化
- ② 故障検知

c) メンテナンス

- ① 調光レベルなど各種の設定変更・調整
- ② 設置現場での動作確認・調整
- ③ 灯具内の制御プログラムのアップデート

これらをもとに、制御の構成イメージを図11に、さらに当社の多機能化への技術ロードマップの概要を表4に示す。

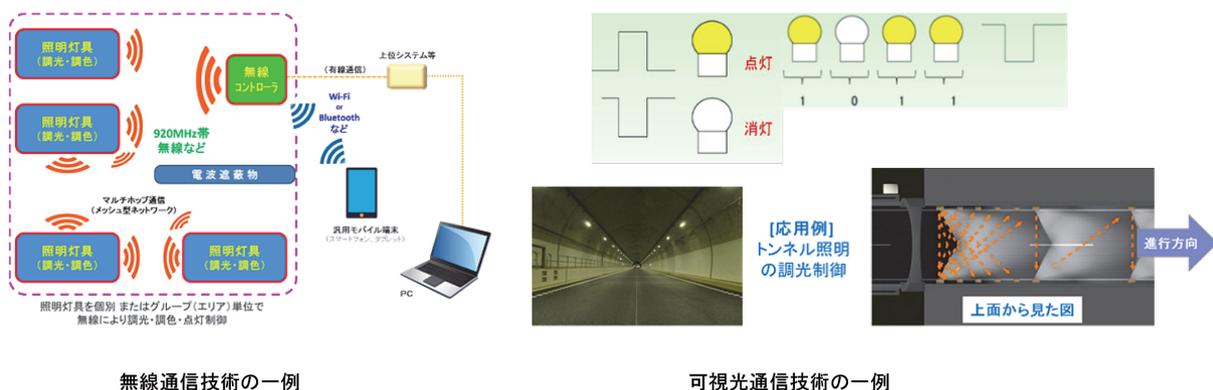


図11 照明制御の構成イメージ

表4 技術ロードマップ

現在	～1・2年後	数年後
可視光通信技術 →トンネル照明の制御 無線通信技術 →照明制御の無線化 (スマホ操作)	システム化技術 →上位システム連携 →外部設備連携 (センサ、カメラ等)	総合システム化技術 →FEMS対応 →スマート化対応

図11にあるとおり、多機能化の大部分を占める照明制御は、従来の有線から無線へ、さらには各種センサ機能や情報提供端末へと今までの単なる照明という単機能から多機能へ大きく変貌していく。

5. おわりに

LED照明器具の高度化は、LEDの持つ特徴を最大限に引き出した光学・構造・電気的要素を集約した照明器具と、IoTの進化に伴った通信の多機能化を取り入れたシステムとの融合により大きく飛躍していくものと考えられる。

しかし、現段階はまだ発展途上であり各製造メーカーが独自路線で提案しているのが実際であり、システムを含めた通信方式等の標準化が早急に望まれる。

参考文献

- 【1】 新編 照明基礎講座テキスト 第36期,照明学会,2015
- 【2】 LEDロードマップ2008,LED照明推進協議会,2008
- 【3】 LEDロードマップ2015改訂,LED照明推進協議会,2015

新設研究室紹介

電気工学専攻 優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研究室） 「先進的電磁エネルギー変換機器とそのシステム化」

当研究室では、“材料からシステムまで”をモットーに、これからの省エネ・低炭素化社会を実現する先進的電磁エネルギー変換機器とそのシステム化の研究を進めています。具体的には、以下のような研究を行っています。

(1) 車載用モータとそのシステム化に関する研究

我が国の市販車用駆動モータは、そのほとんどが永久磁石モータです。一方で、欧米では誘導機が搭載されるなど、走行モードに依存して最適回転機が異なります。当研究室では、電気自動車を含む輸送機器の電気駆動化を見据えて、基礎的電気-機械エネルギー変換過程に立ち戻った最適回転機構造および駆動方法を研究しています。また、輸送機器特有の駆動モードに適した電力変換器や負荷他のシステム構成を検討しています。特に、私達は車載用かご型誘導モータの可能性について長年研究しており、高速回転領域における高性能性を明らかにすると共に、実証試験に向けて企業との共同研究を推進しています。

(2) 再生可能エネルギーを利用した高効率発電システムに関する研究

小水力発電システムの高効率化に関する研究開発を実施しています。近年では、企業との共同研究として試作した1 kW級低速永久磁石発電機について、回転数150 rpm程度の低速回転でも90%を超える高効率を実現しました。さらに、発電機から負荷までの最適マッチングを実現するシステム構成を検討し、他大学・企業との共同研究によって、ダリウス水車一体型小水力発電システムを開発しています。本システムは実用段階に達しており、共同研究先企業がフィールド試験を実施しています。その他、エネルギー総合工学研究所他との共同研究として、MW級以上の大型システムを想定した大規模風力発電発熱システムの検討も行っています [1]。

(3) 高温超伝導材料の非線形電流輸送特性を利用した応用研究

超伝体の中間視的量子現象のモデル化から出発して、その巨視的具現としての非線形電流輸送特性を利用した応用研究を進めています。例えば、高温超伝導線材の異方的超低損失大電流輸送特性 [2] を定量化した送電ケーブルの特性解析 [3] や超伝導磁気エネルギー貯蔵 (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) コイルの設計を実現しました [4]。特に SMES 用コイルの設計では、遺伝的アルゴリズムに基づく最適化設計技術を確立し、NEDO プロジェクト (当時) の開発目標に位置付けられました。現在は、核融合科学研究所・明治大学他との共同研究として、磁気エネルギー貯蔵用他の高温超伝導ヘリカル巻線技術の研究開発を実施しています [5]。また、NEDO プロジェクトとして MRI 用超伝導マグネット開発に参画し、高温超伝導マグネットとして世界初の 3 T イメージングに成功しました [6]。

さらに、高温超伝導誘導同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) を提案し [7]、輸送機器 (船舶、電車、バス、トラック、自動車) [8] や液体水素燃料移送ポンプ [9] 等への適用を目指したプロジェクトを複数立上げ、研究開発を推進しています。図 1 には、JST-ALCA プロジェクトで開発した 20 kW 級プロトタイプ機の外観写真を示します。

- [1] T. Okazaki et al., *Renewable Energy*, vol. **83**, no. 3 (2015) 332, [2] T. Nakamura, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **13** (11) (2000) 1521, [3] T. Nakamura, et al., *J. Mat. Process. Technol.*, **161** (1-2) (2005) 22, [4] K. Shikimachi et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** (3) (2009) 2012, [5] Y. Kimura, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26** (4) (2016) 4202104, [6] S. Yokoyama et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (4) (2017) 4400604 [7] G. Morita et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **19** (6) (2006) 473, [8] 中村武恒, *応用物理*, **82** (7) (2013) 579, [9] K. Kajikawa et al., *Cryogenics*, **52** (11) (2012) 615



図 1 20 kW 級 HTS-ISM の外観写真

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

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

電気関係研究室一覧

工学研究科 (大学院)

電気工学専攻

先端電気システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研)

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座
(中村武研)*

電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研)

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

デバイス創成部門先進電子材料分野 (藤田研)

情報学研究科 (大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研)

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)#

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

エネルギー科学研究科 (大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)☆

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

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

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアルライゼーション研究分野
(小山田研)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野 (中村裕研)

先端電気システム論講座（引原研究室）

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

「高周波電力変換回路の実現にむけた取り組み」

昨今 SiC、GaN パワーデバイスが商品化されるに至り、電力変換回路設計は大きな転換期を迎えている。Si デバイスに比べて優れた性能が報告されており、低オン抵抗、高耐圧、低スイッチング損のデバイスが市販されるようになってきている。鉄道や自動車などをはじめとして、Si 半導体を SiC に置き換えることで電力変換回路の大幅な高効率化や小型化が実現され、世界中で研究開発が加速している。本研究室では、さらにその先を見据え、SiC や GaN パワーデバイスの性能を限界まで引き出す回路づくりに挑戦している。たとえば Si パワーデバイスでは難しい 10 MHz を超える高周波スイッチングが挙げられる。この実現にむけた取り組みを紹介する。

電力変換回路の動作周波数は一般的に 100 kHz 程度であり、10 MHz 以上になると現状の回路シミュレーションでは対応できず、シミュレーション環境を再構築する必要がある。本研究室ではデバイス物理に立ち返り、SiC ショットキーダイオード (SBD) や MOSFET のデバイスモデリングを行ってきた。実験値をフィッティングして得られる経験的モデルと異なり、デバイス物理に基づいたモデリングを行うことで高周波領域でもデバイス動作を記述することができる。またデバイス構造に由来するパラメータで構成されているため、スイッチング速度を制限しているデバイスパラメータを調べることができ、高周波で動かすためのデバイス設計論として半導体研究へフィードバックすることができる。また、トランスなどの受動素子についても高周波領域での振る舞いをモデル化する必要がある。半導体素子だけでなく回路素子ひとつひとつに目をむけていく必要がある。回路パターンにおける寄生インダクタンスの適切な評価も重要である。これらを体系的に調べていくことで、たとえば図 1 に示すように SiC SBD の高周波大電力正弦波 (10 MHz, 200 V_{pp}) に対するスイッチング結果を、回路シミュレーションにより精度よく再現することに成功した [1]。また、図 2 には SiC MOSFET と SiC SBD を用いた昇圧回路におけるスイッチング波形 (5 MHz) を示す [2]。回路シミュレーションにより実験波形を精度よく再現することができた。これは半導体デバイスモデルの高精度化だけでなく、受動素子の適切なモデリングによるところも大きい。

これらの研究を実施するにあたり、回路分野だけの研究ではなく、様々な分野の研究者と議論を続けている。たとえば、デバイスモデル作成にあたっては半導体物理に精通している必要がある。実際の計算にあたっては複雑な非線形方程式を高速に求解する必要があり、モデル式の適切な記述や非線形方程式の高度な取り扱いが必要である。スイッチング波形の高速化にともない、回路の寄生成分によるリングングや、不適切な回路パターンでの放射ノイズなどが問題となり、これらはマイクロ波工学が得意とする分野である。トランスなどの磁性体材料では漏れ磁束を制御するため磁性体形状の工夫が必要である。他研究室と連携をはかりながら、次世代パワーデバイスを用いた電力変換回路の限界に対して学術的に線引きするとともに、その限界を押し上げようと試みている。

[1] 前田凌佑, 奥田貴史, 引原隆士, 電気学会全国大会, 富山大学, 4-012, 2017 年 3 月 15 日。

[2] T. Okuda et al., 4th IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, Arkansas, pp.101-104, 2016.

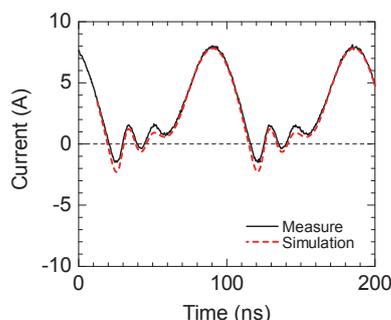


図 1 SiC SBD の整流特性の測定結果とシミュレーション結果の比較 (10 MHz, 200 V_{pp})

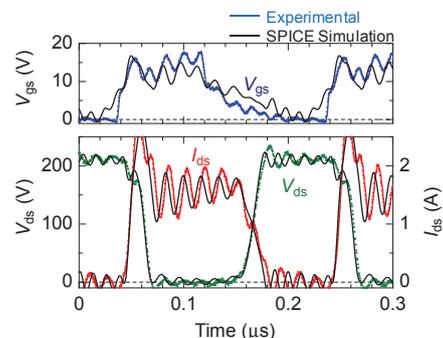


図 2 昇圧回路における SiC MOSFET のスイッチング特性 (5 MHz)

電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）
<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>
 「高温超伝導線の常伝導転移現象」

超伝導線には銅線に比べてずっと高い電流密度で電流を流すことができるために、銅線に比べて格段に高い磁界を発生するマグネット（電磁石）を作ることができます。その応用例が、MRI 装置であり、磁気浮上列車です。現在実用化されている MRI 装置や磁気浮上列車のマグネットには、ニオブチタン合金などの金属の超伝導線が用いられています。これらの金属系超伝導線は低温超伝導線とも呼ばれ、超伝導状態にするためには、例えば液体ヘリウムの中に漬けて 4.2 K 程度まで冷却する必要があります。一方、銅酸化物系の超伝導材料による高温超伝導線を用いたマグネットの研究も近年活発化しています。高温超伝導線は数十ケルビンという比較的高い温度で超伝導状態となるため、低温超伝導線に比べて冷却の手間が軽減されます。高温超伝導線を用いたマグネットでは、超伝導コイルを冷凍機の数ケルビンから数十ケルビンまで冷えるコールドヘッドと接続して熱伝導で冷却することができます。

このような伝導冷却高温超伝導コイルにおいて、冷却の不具合、様々な擾乱、超伝導線の特性劣化などによる常伝導転移現象についての知見を得ることは、その実用化のために大変重要です。我々の研究室は、図 1 に示したような、最大 5 T の磁界のもとで、最大で直径 20 cm × 高さ 20 cm 程度の試料超伝導コイルや超伝導線を最低 10 K 程度まで冷却し、最大 500 A の電流を通電できる装置を有しています。この装置を用いて、伝導冷却された高温超伝導線や高温超伝導コイルの常伝導転移現象について研究しています。図 2 は希土類銅酸化物を用いた高温超伝導線を伝導冷却し 64 A の電流を流し、これに過渡的な熱擾乱を局所的に与え、その際の高温超伝導線の温度変化を観測した実験結果の一例です。過渡的な熱擾乱は、医療用などの粒子加速器において粒子ビームが誤ってコイルに入射するビーム損失などを模擬したものです。熱擾乱が小さい場合は自然に超伝導状態を回復しますが、ある閾値を超えた熱擾乱が加わると超伝導線の温度は上昇し、超伝導線全長にわたって超伝導状態が壊れるクエンチという事象につながってしまいます。クエンチを放置すると、常伝導転移した超伝導線において発生するジュール発熱により超伝導線や超伝導コイルは最終的に焼損してしまう恐れがありますが、図に示した例では、時刻 8 - 10 秒程度で流れる電流を遮断すれば、最大温度は 200 K 程度で抑えられ、超伝導線（コイル）を焼損から保護できることを示しています。



図 1 伝導冷却超伝導線・コイルの特性評価装置（最大磁界 5 T、最低温度 10 K、最大電流 500 A）

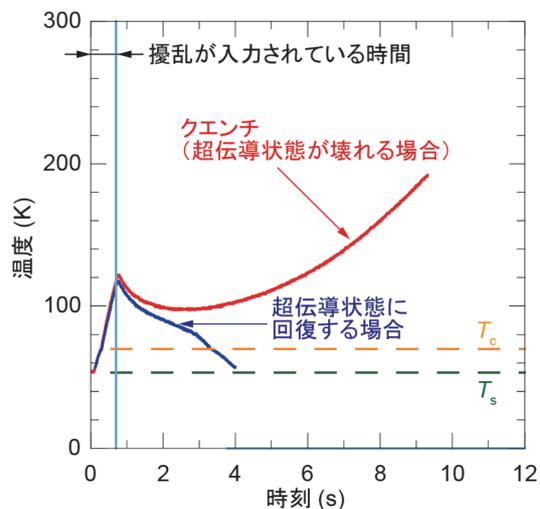


図 2 伝導冷却された超伝導線に熱擾乱を加えた際の温度変化（通電電流 64 A）

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（松尾研究室）

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

「鉄芯材料のマルチフィジクスモデルを用いた磁気特性の応力依存性の予測」

誘導モータに対してトップランナー基準が設定されるなど、モータの効率向上が課題となっている中で、モータに用いられる鉄芯材料特性の応力依存性の重要度が増している。すなわち、モータの製造過程で焼き嵌めなどにより鉄芯材料に加わる機械的応力により鉄損が増加し、そのことがモータ性能を制約する要因となっている。そこで、鉄芯材料磁気特性の応力依存性の測定が進められている。しかし、これまで応力特性の有効なモデル化手法が存在していなかったため、鉄芯のベクトル磁気特性の応力依存性を表現するためには膨大な計測データを要していた。

本研究室では、鉄芯材料の基礎的な物性データからその磁気特性を測定によらずに予測する物理的モデル化手法として集合磁区モデル [1] を開発してきた。本手法は、磁区構造のモデル化とエネルギー極小化に基づいており、磁化過程を左右する各種要因（磁気異方性、外部磁界、減磁界など）をエネルギーの形で陽に考慮することが可能である。したがって、磁気弾性エネルギーの項を加算することにより、機械的応力が磁気特性に及ぼす影響を考慮することができる。

機械的応力により増加する損失はヒステリシス損である。これは、圧縮応力が磁気異方性の効果をもたらし、応力印加方向に向く磁区が減少することから、応力方向のピンニング磁界が増加するためと考えられる。したがって、機械的応力が磁区構造に及ぼす影響をエネルギー的に表現するとともに、磁壁移動に伴うピンニング磁界を表現できればよい。そこで、無応力状態における磁気特性からピンニング磁界の密度関数を推測し、これを集合磁区モデルに組み込むことにより応力依存解析を可能にした [2]。図 1 (a) は図の水平方向に圧縮応力を印加した際に生じる磁区分布の模式図である。水平方向には磁化しにくくなるため、磁化が応力と異なる方向の磁区が増加している。図 1 (b) は 40MPa の圧縮応力による鉄損の増加を示しており、計測結果と一致する結果を得ている。圧縮応力による透磁率の減少についても本モデルで再現される。また、本手法はベクトル励磁下における異方的な磁気特性および磁歪特性の再現にも成功している [3]。今後、不純物密度などの材料データからピンニング磁界分布を予測する技術を開発し、磁性材料シミュレータとして実用化することを目指している。

文献 [1] S. Ito, et.al. J. Appl. Phys., 117, 17D126, 2015. [2] 伊藤, 他, 電学マグネティックス研資, MAG-16-083, 2016. [3] S. Ito, et.al., IEEE Trans. Magn., 52, 2002604, 2016.

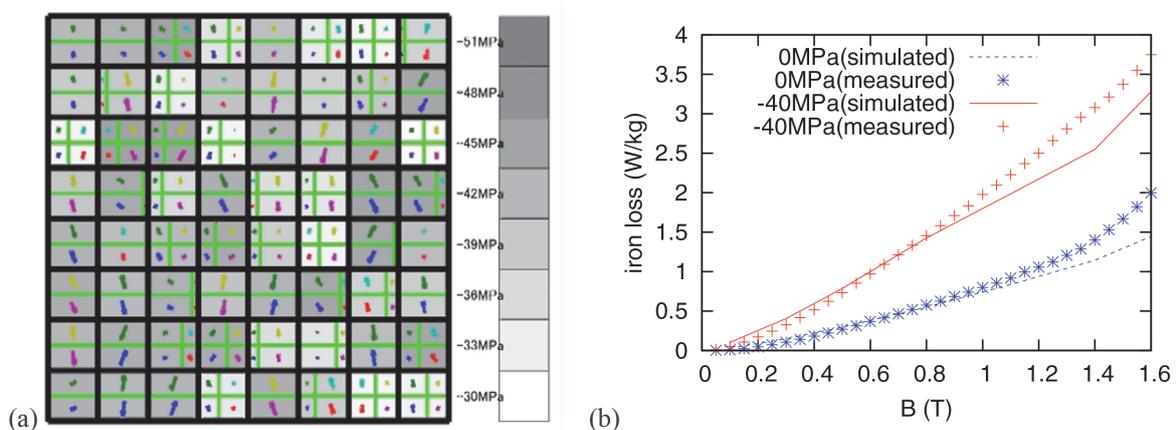


図 1 集合磁区モデルによる計算結果：(a) 磁区と応力の分布の模式図、(b) 無応力 (0MPa) 時と圧縮応力 (-40MPa) 印加時の鉄損

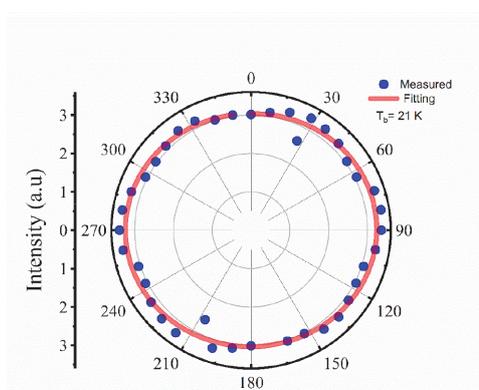
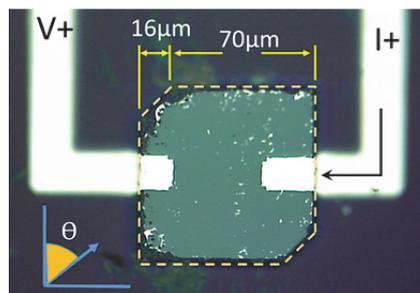
集積機能工学講座

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

「高温超伝導体テラヘルツ光源からの円偏波発振」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ (THz) 領域はこれまでに 1 mW を超える実用的な強度を持つ固体光源が得られていませんでした。マイクロ波領域のようにキャリアのダイナミクスを利用しようとしても半導体の易動度の上限から周波数が制約され、LED のように量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは 10 ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要であるからです。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。2007 年に高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ ($\text{Bi}2212$) からの結晶外への THz 波放射が初めて観測された後の研究により、単色でありながら 0.3-2.4 THz という広い可変周波数範囲、最大 0.6 mW という高い放射効率という際立った特性が現在までに報告されています。空間への電磁波の放射は、多数の固有ジョセフソン接合で励起されたジョセフソンプラズマ振動が同期することによってメサ構造表面に誘起されたマクロな電流がもたらす振動磁場が空間の電磁場と結合することによって生じます。このことは、高温超伝導テラヘルツ光源の放射特性の制御には携帯電話に用いられているパッチアンテナの手法が応用できるということを示しています。マイクロ波領域では、パッチアンテナを用いて円偏波を放射させ、人工衛星との通信や車間測定レーダーに応用されています。円偏波電磁波は、振動電場の直交成分の位相が 90 度ずれており、伝搬面へ投影した電場ベクトルの先端が円軌道を描いています。私たちは、パッチアンテナ理論を高温超伝導体テラヘルツ光源に応用することにより、円偏波のテラヘルツ電磁波を発生させることができました。

図に、パッチアンテナ理論を参考にして設計した高温超伝導体テラヘルツ光源のメサ構造の写真および最大の円偏波度の条件での偏波強度特性のデータを示します。メサ構造は正方形の角を取った形をしており、もともとの正方形の面積と角の部分の面積の比が、アンテナの Q 値に関して特定の関係を満たす場合、円偏波が放射されるとされています。前述のとおり、高温超伝導テラヘルツ光源は単独の素子で発信周波数を広く変化させることができるので、円偏波度はバイアス条件に依存します。パッチアンテナは外部から電磁波が供給されますが、高温超伝導テラヘルツ光源では、アンテナ自身が電磁波を供給することになるので、円偏波度のバイアス条件依存性から、内部の励起モード、ひいては同期機構に関する知見を得ることができます。円偏波のテラヘルツ波は、将来的な移動体間の超高速通信や円二色性分光に応用できる有用な技術ですが、スケールアップが可能なモノリシックな (1 枚板の) デバイスでは、高い円偏波度が得られていませんでした。本研究で得られた 99.7% という円偏波度は既存のテラヘルツ連続光源と比べて最高の値であり、高温超伝導テラヘルツ光源の有用性がまた一つ増えたこととなります。



図：(上) 円偏波を放射する高温超伝導体テラヘルツ光源メサ構造の写真。(下) 偏光子透過強度の極座標プロット。

電子物理工学講座 極微電子工学分野（白石研究室）

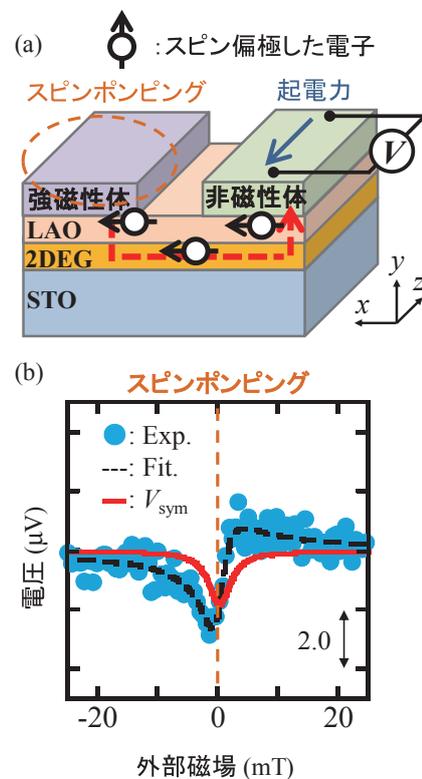
<http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「酸化物スピントロニクス領域の開拓」

電子が持つ電氣的性質「電荷」と磁氣的性質「スピン」を同時に制御する分野をスピントロニクスと呼びます。量子力学を扱うこの分野は微小サイズのデバイスと大変相性が良く、微細加工技術が発達した近年急速に発展してきた研究分野です。スピンの向きが揃った、あるいは偏った電子の流れを「スピン流」と呼びますが、スピン流は電流とは異なり保存されず、ある距離を流れると減衰します。これは、物質中の電子の軌道運動とスピンの相互作用である「スピン軌道相互作用」に代表される効果によってスピンがランダムな方向に向くことに起因します。スピン流が保存される距離の指標を「スピン拡散長」と呼びますが、この長さは材料毎に大きく変化します（凡そ数ナノメートルから数ミクロン）。その為、スピントロニクスを利用したデバイス開発には、そのデバイスに適した材料の開発・探索が重要となります。スピンデバイスにおいて必要となる機能は主に①スピン流の伝搬・伝搬中の電子スピン方向の制御、②スピン流の検出、③スピン流の媒体への注入の3つです。それぞれ求められる役割は異なり、特に①と②はスピン拡散長がそれぞれ長いものと短いもの、一般的に正反対の材料が求められます。②に短いスピン拡散長が求められる理由としては、スピン軌道相互作用によって散乱を受けた電子は電流として検出できるためです。散乱方向はスピン流とスピンの向きに直交し、ホール効果と類似することからこの効果を「逆スピンホール効果」と呼びます。

我々の研究室では酸化物に形成される二次元電子系を上記①の候補材料として研究しています。LaAlO₃ (LAO) と SrTiO₃ (STO) は共に酸化物絶縁体ですが、それらを接合すると、その界面が恰も二次元平面であるかの如く振る舞う伝導層（二次元電子系、2DEG）となることが報告されています。この材料はスピントロニクスにおいて上記②の機能が低温にて報告されており、スピン拡散長が短いとされてきました。しかし、室温環境下では他の良好なスピン輸送媒体と同等のスピン拡散長を有することを我々の研究で明らかにしました。図 (a) のように LAO/STO 表面に強磁性体（スピン注入）電極と非磁性体（スピン検出）電極をそれぞれ作製します。強磁性体中の磁化の歳差運動を利用したスピン流生成法「スピンポンピング」を用いて LAO/STO 界面にスピン流を生成します。LAO/STO 界面内方向を流れるスピン流は非磁性体電極にも流れ込み、上記逆スピンホール効果によって起電力として観測されます（図 (b)）。これはつまり、強磁性体電極のスピン情報を非磁性体電極まで伝送しています（スピン輸送）。また、起電力の大きさを解析することでスピン拡散長を求めることができ、上記①で利用する上で十分な長さのスピン拡散長を有することが分かりました。以上の結果は酸化物界面に新たなスピン機能を付与するだけでなく、酸化物におけるスピントロニクス領域開発へとつながります。現在はこの長いスピン拡散長の起源の解明や、二次元電子系で期待されるスピン軌道相互作用の外部電界による変調を利用したスピン方向の制御を目指した研究を進めています。

参考文献：Ryo Ohshima *et al.*, “Strong evidence for d-electron spin transport at room temperature at a LaAlO₃/SrTiO₃ interface” *Nature Materials* **16**, 609-614 (2017).



図：(a) スピン輸送実験の試料構造。(b) 観測される起電力。外部磁場の値はスピンポンピング条件を中心としている。

量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

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

「可視長波長域での発光素子実現に向けた新奇基板上への InGaN 量子構造の作製」

窒化物半導体 GaN の禁制帯幅は 3.4 eV (波長 365 nm 相当)、InN のそれは 0.6 eV (2 μm) であることから、それらの混晶 InGaN は、近紫外～近赤外での光デバイス用材料として期待されている。すでに、近紫外から緑色にかけての InGaN 系 LED やレーザーダイオードが市販され、さらに青色 LED を利用した白色 LED による蛍光灯の置き換えが急速に進められている。ただし、このような高品位な発光素子が得られる波長域は近紫外～可視短波長域に限られ、材料が持つポテンシャル (波長 365 nm ~ 2 μm) を活かし切っているとは言い難い状況にある。その最大の要因は、GaN と InN の格子定数の違いにある。これら材料はいずれも六方晶系ウルツァイト構造を示すが、その格子不整合度は 11% にも及ぶ。その結果、例えば、GaN をベースとした GaN/InGaN/GaN のような薄膜多層構造 (量子井戸構造) においては、発光層である InGaN に大きな歪が発生している。それを弾性的な格子変形で内包できなくなったとき、格子不整合転位が発生して非輻射再結合中心として働くことが知られている。特に長波長発光を目指して In 組成を増すと歪が増大するためこの現象が起きやすく、発光効率が低下する。

本研究では、赤色など可視長波長領域での高品質 InGaN 発光素子の実現を目指し、新しい基板 ScMgAlO₄ 上への InGaN の作製を提案している (*Appl. Phys. Exp.* 7, 091001)。この基板の概略図を図 1 に示す。この結晶の (0001) 面は、InGaN と同じ六対称性を持っており、しかも、格子定数 *a* が In 組成 17% の InGaN と一致することが特長である。したがって、In_{0.17}Ga_{0.83}N/In_xGa_{1-x}N/In_{0.17}Ga_{0.83}N (*x* > 0.17) のように In_{0.17}Ga_{0.83}N をベースとした量子井戸構造の作製が可能であり、In_xGa_{1-x}N 発光層の歪を低減することが期待される。

同様の目的で ZnO 基板を用いる提案も他機関からなされているが、窒化物半導体と ZnO の界面での反応により、高品質な窒化物半導体を得ることは容易ではない。同じく酸化物である ScMgAlO₄ 基板においても同様の界面反応の懸念があったため、まずは、従来のサファイア基板上と同様の LED を試作し、特性を比較した。結晶の作製条件の調整は必要であったが、図 2 に示すように、青色 LED の試作に成功し、しかも光出力はサファイア基板上 LED と同等以上であった。この結果は、*Appl. Phys. Exp.* 8, 062101 に掲載され、Spotlight 論文に選ばれた。

目的とする In_{0.17}Ga_{0.83}N/In_xGa_{1-x}N/In_{0.17}Ga_{0.83}N (*x* > 0.17) についても検討を進めており、構造の作製と光励起による発光特性の評価を行っている。結果の一例として発光強度の発光波長依存性を図 3 に示す。期待通りに ScMgAlO₄ 基板上で、赤色発光強度の顕著な増大が確認できた。今後は、物性評価と合わせ、素子化を進める予定である。以上述べた ScMgAlO₄ 基板上の窒化物半導体発光素子構造に関する成果は、2017 年の窒化物半導体国際会議に招待されるなど対外的にも注目を集めている。

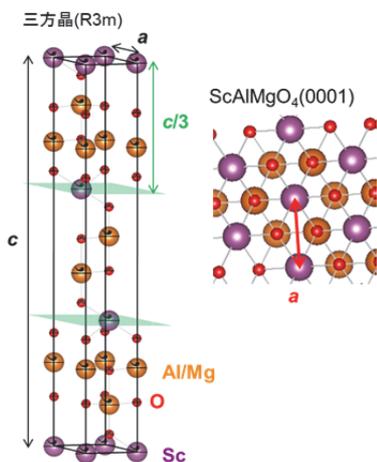


図 1 ScMgAlO₄ の結晶構造。

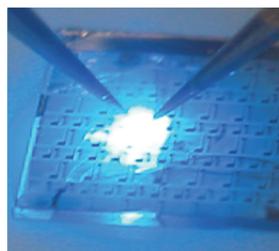


図 2 ScMgAlO₄ 上に試作した青色 LED。

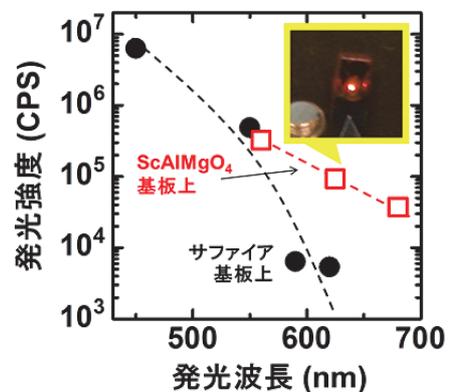


図 3 室温での光励起発光強度の発光波長依存性。サファイア基板上と比べ、強い赤色発光が得られている。

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
http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html
 「クラスターイオンビーム誘起発光の応用研究」

クラスターイオンビームを半導体等の固体材料に照射すると、高効率かつ低損傷な表面加工や酸化膜の室温形成が可能であることが報告されてきました [1]。クラスターイオンが固体表面に衝突する際の反応過程については分子動力学計算による研究が進められ、衝突するクラスターイオン及び衝突された固体表面が高温・高圧状態になることが報告されています [2]。この様な高温・高圧状態においては、クラスターを構成する分子や、固体表面の原子の運動エネルギーが上昇し、また衝突頻度が上昇するため化学反応の促進が予想されます。クラスターの生成によく用いられるアルゴンガスではなく、エタノールやアセトン等をクラスター材料として用いると、希ガスを材料としたクラスターイオンの衝突で支配的な原子衝突に加えて、化学反応が寄与することにより、高いスパッタ率が実現できることが分かっています [1]。

最近、数 kV の電圧で加速したクラスターイオンが固体表面に衝突する際、微弱な発光があることがわかりました。この光を分析すると、クラスターイオンと固体表面との衝突時の表面状態、クラスターの状態、及び反応過程に関する情報が得られることが期待されますので、このクラスターイオンビーム誘起発光のスペクトルを測定するためにスペクトロメーターを開発しました [3]。図 1 にアルゴンクラスターイオンビームを鉄の表面に照射した際の、クラスターイオンビーム誘起発光スペクトルを示します [4]。丸は加速電圧 9 kV、四角は加速電圧 6 kV の場合の測定値です。光の波長 430 nm 付近のアルゴン由来のピークを解析することで固体表面への衝突時にクラスターイオンが高温になることを実験的に知ることが出来ました。また、図 2 に見られる様にアルゴンクラスターイオンビームを SiO₂ の表面に照射すると、SiO₂ 特有のピークが観測されました [4]。

この様にクラスターイオンビーム誘起発光のスペクトルを測定することにより、クラスターイオンと固体表面の衝突時の様々な情報が得られることが期待されますので、クラスターイオンビームによる固体表面加工・改質時の表面状態のオンラインモニタリングや、固体表面分析への応用につながる可能性があると考えられます。

[1] H. Ryuto, Applied Physics Express 2, 016504 (2009).

[2] C. L. Cleveland, U. Landman, Science 257, 355 (1992).

[3] H. Ryuto, F. Musumeci, A. Sakata, M. Takeuchi, G. H. Takaoka, Rev. Sci. Instrum. 86, 023106 (2015).

[4] F. Musumeci, H. Ryuto, A. Sakata, M. Takeuchi, G. H. Takaoka, Journal of Luminescence 172, 224 (2016).

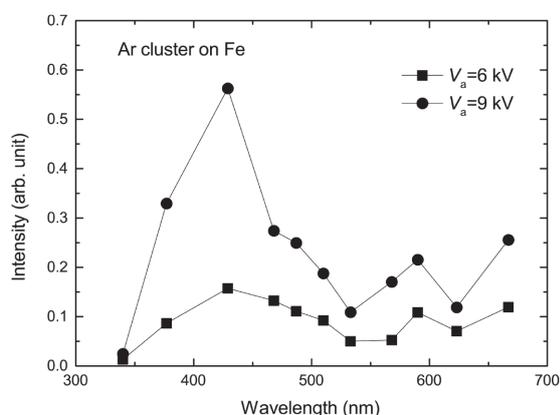


図 1 アルゴンクラスターイオンビームを鉄に照射した際の、クラスターイオンビーム誘起発光スペクトル。丸は加速電圧 9 kV、四角は加速電圧 6 kV の場合の測定値を示す。

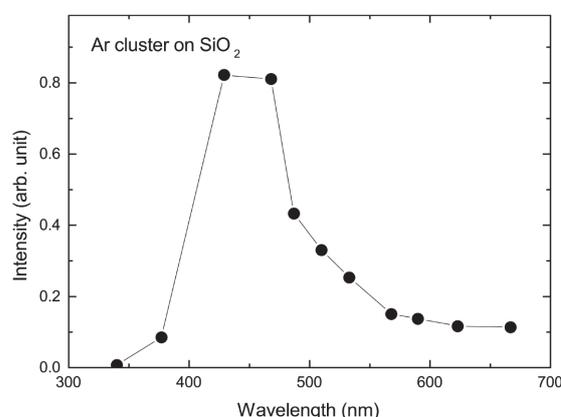


図 2 アルゴンクラスターイオンビームを SiO₂ に照射した際の、クラスターイオンビーム誘起発光スペクトル。

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>
 「ミストデポジション法」

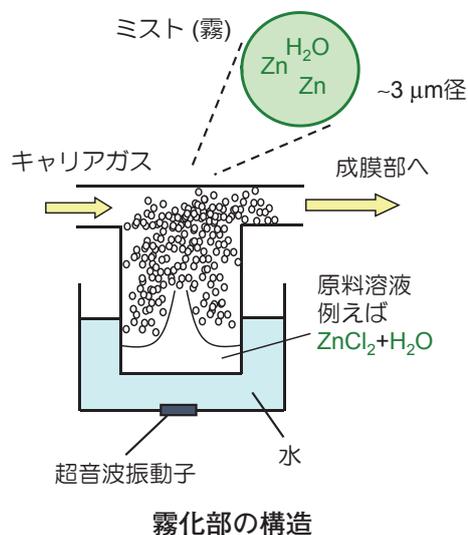
半導体の結晶成長というと、高価な装置を使いメンテナンスに苦勞がかかることがいわば常識化している。筆者（藤田）も GaAs や GaN の結晶成長を経験してきたが、成長している時間よりもメンテナンスを行っている時間の方が長いという実感であった。これはひとえに不純物との戦い故で、中でも最も性質の悪い不純物は酸素とされている。なぜなら、酸素はほとんどの金属元素ときわめて容易に反応して、目的の結晶中に混入するためである。そのため、ひとたび空気に触らした部品は2日間程度温度を上げて脱ガスが必要となる。これは今も続けられていることである。

一方、2000年頃から、酸化物が従来の半導体と同じように機能することがわかってきた。インターネットで「酸化亜鉛 (ZnO)」と検索すると、「白い粉」「化粧品」「顔料」といった語が出てくるが、われわれにとっての ZnO は単結晶の半導体である。この半導体の成長で問題となったのは酸素の空孔で、酸素を十分供給する雰囲気での成長が必須とされた。この考えは、従来の半導体成長における考え方を反転させるものである。となると、酸化物半導体に適した結晶成長技術を考える必要がある。ここで生まれたのがミストデポジション法により単結晶半導体を成長しようという考えである。ZnO という半導体を成長しようとすると、Zn の原料は水溶液でも構わない。なぜなら水は良い酸化剤であるためである。ただし水溶液は蒸気圧が低いので、溶液に超音波を印加してミスト（液滴）状にしてこれをキャリアガスで輸送する（図参照）。O の原料は酸素ガスでもよいが、前述の水がそのまま O の原料にもなる。用いる部品は水で洗浄すれば良いし、危険物を用いないため廃棄のガス処理も簡単である。

この技術を報告すると、必ずと言っていいほど受ける質問が、「そんな簡単な方法でデバイスに使えるような半導体を得られるのか」ということであったが、nm レベルでの膜厚の制御や多層構造の成長をすでに実証¹⁾、また共同研究を行っている株式会社 FLOSFIA は、この技術を用いて酸化ガリウム (Ga₂O₃) を成長し、低いオン抵抗 (0.1 mΩ·cm²) と高い逆耐圧 (531 V) を持つショットキーバリアダイオードを報告して²⁾、その事業を期している。

われわれは、この技術を用いて酸化物半導体をはじめ、SiO₂ や Al₂O₃ 等を真空を用いることなく成膜できることを示した。これは下地の半導体層にダメージを与えにくいという特徴を示している³⁾。また多くの酸化物が成膜可能なことも実証してきた。この技術は、もともとは上記のように酸化物の成長に用いるものとして開発してきたが、最近になってさまざまな工夫をすることで、硫化物のように酸化物以外の材料が成長できるようになり、株式会社 FLOSFIA では Au や Cu など金属単体あるいは合金の成膜に成功している⁴⁾。また、本技術については、当研究室の出身者がそれぞれの研究機関（京都工繊大、京大工、京大エネ科、津山高専、鳥取大、高知工大、佐賀大など）においてその深化に大いに努力している。彼らの若い力にも支えられ、今後、広い産業分野での応用につながることを確信する次第である。

- 1) R. Jinno 他, Appl. Phys. Express **9**, 071101 (2016).
- 2) M. Oda 他, Appl. Phys. Express **9**, 021101 (2016).
- 3) T. Uchida 他, Appl. Phys. Express **7**, 021303 (2014).
- 4) 株式会社 FLOSFIA, プレスリリース, 2017. 4. 24.



知能メディア講座 言語メディア分野（黒橋研究室）

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

「機械翻訳の実用化に向けて - ニューラルネットワークを用いた機械翻訳」

計算機による自然言語（人間が日常的に使う言語）間の翻訳、いわゆる機械翻訳の研究の歴史は古く、およそ70年前に開始されたと言われています。これまでにルールベース翻訳、アナロジーに基づく翻訳（または用例ベース翻訳）、統計翻訳などの手法が提案され、2014年にはニューラルネットワークを利用したニューラル機械翻訳（Neural Machine Translation, NMT）が登場し、今では他を大幅に上回る翻訳精度を達成しています。2016年11月のGoogle翻訳の進化もNMTによるものであり、使ったことがある人はその向上ぶりに驚いたと思います。

黒橋研究室では以前から用例ベース翻訳を中心に機械翻訳の研究を続けていますが、昨年度からはNMTの研究開発も並行して行なっています。NMTは大きく分けてエンコーダー(encoder)、アテンション機構(attention mechanism)、デコーダー(decoder)の3つのパーツで構成されています(図1)。

エンコーダーではまず各単語を分散表現(distributed representation)と呼ばれる、単語の意味を表すとされる数百次元からなる実数値ベクトルに変換するエンベディング(embedding)を行います。次に各単語を先頭から(forward)と末尾から(backward)1つずつ順に読み込んで行き、前または後ろの単語を考慮したベクトル表現を作り出します。この操作を実現するのがリカレントニューラルネットワーク(Recurrent Neural Network: RNN)です。

アテンション機構は、エンコードされた入力文と次に説明するデコーダーの内部状態を判断材料として、次の単語を訳出する際に注目すべき入力単語を推定します。1単語訳出するごとに各単語の注目確率(=アテンション)が再計算され、注目すべき箇所が毎回変化します。入力文の各単語の分散表現のアテンション確率による重み付き和をとることでコンテキストベクトル(context vector)を求め、これをデコーダーに渡します。

デコーダーは1つのRNNで構成されており、コンテキストベクトルと1つ前に出力した単語を考慮して次の単語を出力します。訳文は先頭から順に1単語ずつ生成され、文末を表す特殊記号<EOS>が出力されると翻訳が完了します。RNNの出力は目的言語の語彙サイズと同じ次元のベクトルで、これがソフトマックス関数(softmax function)により確率に正規化され、最も確率の高い単語が出力されます。以上がNMT全体の概略で、学習時(ネットワークの重みの調整)は、対訳コーパスを用いて各文が正しく翻訳されるように重みを確率的に更新します。100万文規模の対訳コーパス全体に対して10回程度繰り返し更新を行うことで学習はほぼ収束します。

このようにNMTでは最初の入力文と最後の出力文以外の部分は全てベクトルなどの実数値で表現されており、翻訳の過程は数値計算で実現されています。モデル自体は非常にシンプルで使いやすくなりましたが、翻訳の過程の解釈は困難、もしくは不可能となってしまいました。またこれまでの翻訳手法のように入力文を置き換えることで翻訳するのではなく、入力文を見ながら翻訳文を先頭から順に作り出すため、翻訳されない部分や2回以上翻訳される部分が出てきてしまいます。さらにNMTでは扱える語彙サイズが小さいため、低頻度語や固有名詞の翻訳に弱いという弱点もあります。これらの問題を解決することが今後の課題です。

本研究室で開発したNMTシステムは国際的な機械翻訳評価ワークショップであるWAT2016において参加システム中トップの翻訳精度を達成しました(注1)。また本システムはJSTによる日中・中日機械翻訳実用化プロジェクトにおいて、海外科学技術文献の日本語への機械翻訳のエンジンとして実用化されています(注2)。さらに大手新聞社との共同研究を行っており、日本語新聞記事の英訳の下訳としてのNMTの活用を検討しています。

(注1) <http://lotus.kuee.kyoto-u.ac.jp/WAT/>

(注2) https://jipsti.jst.go.jp/jazh_zhja_mt/

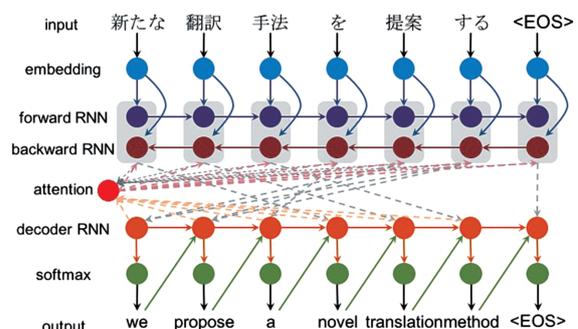


図1 ニューラル機械翻訳の概略

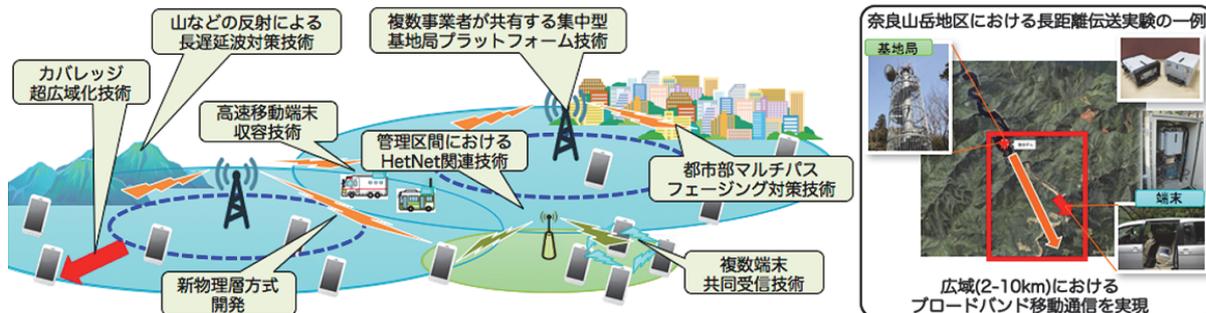
通信システム工学講座 デジタル通信分野（原田研究室）

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

「第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究」

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に人と人の通信のみならず、“モノ”をインターネットに接続し、新たな価値創造を行うIoT（Internet of Things）など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。現在、第4世代移動通信システム（4G）としてLTEやWiMAX2などの高速移動通信網の普及が進んでいますが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。そこで現在、2020年代の実用化を目指した次世代の移動通信システム、いわゆる第5世代移動通信システム（5G）の研究開発が国際的に始まっています。

この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室では5G実現に資する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、新信号波形・新物理層方式の開発、複数事業者が共有する無線基地局プラットフォーム技術、端末共同超多重MIMO伝送技術、スマートIoT無線通信システム：Wi-SUNなどを中心に研究活動を進めています。特にVHF帯を用いた超広域ブロードバンド移動通信システム、スマートIoT無線通信システム：Wi-SUNに関しては一部商用化が開始されています。当研究室では机上検討のみならず、研究成果を実際に無線機に実装し、屋内外伝送実験を通じ評価し、その結果をまた机上検討にフィードバックさせるスタイルで研究開発を行い、卒業後すぐに一線で活躍できる人材育成を行っています。また、できるだけ多くの成果を社会実装させるために、内閣府、総務省の研究開発プロジェクトを自ら運営し、その成果を積極的に国内外標準化団体等にも提案しています。



※本研究の一部は総務省から受託した「電波資源拡大のための研究開発」によって実施しています。

本研究室における第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



※本研究の一部は内閣府革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」により、科学技術振興機構を通して委託された研究開発として実施しています。

本研究室におけるスマート無線 M2M システムに関する研究開発概要

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/>

「データベース駆動型周波数共用システムにおける教師あり学習による共用条件更新方式」

無線周波数帯域の枯渇を解消するため、既存システム（一次利用者）に割り当てられた周波数を他の通信システムが二次利用する周波数共用が検討されている。共用周波数帯域では、二次利用者は一次利用者に強い干渉を与えないよう、二次利用者の通信を禁止する領域（通信禁止領域）や周波数帯域など周波数を共用するための様々な条件を設定する必要がある。周波数共用を実現する技術として、データベース駆動型周波数共用システムがある。あらかじめ各エリアにおける周波数の一次利用状況を収集し、周波数共用条件を算出し、データベース化する。二次利用システムは利用開始時に周波数共用条件をデータベースに問い合わせ、条件を守って運用する。しかし、たとえ周波数共用条件に従い二次利用システムが運用されている場合であっても、地形や建物などにより複雑に変化する電波伝搬の影響から、稀に一次利用者に強い干渉を与える場合がある。そのため、データベース上の周波数共用条件を適切に更新する必要がある。

我々は、二次利用者の通信が一次利用者に強い干渉を与えた場合において、周波数共用条件、特に通信禁止領域を、これまでの干渉発生情報と二次利用者の通信履歴をもとに適切に更新する方式を提案した [1]。一般に、通信禁止領域は広く設定するほど、一次利用者において強い干渉が発生する確率が低下する。しかし、過度に広い通信禁止領域は共用周波数を利用可能な領域まで通信禁止され、周波数の面的利用効率を低下させる。本研究では、干渉が発生する度に、干渉情報と通信履歴から教師あり学習を用いて強い干渉を発生させる可能性の高い領域を学習し、通信禁止領域として逐次更新する手法を提案する。初期の周波数共用条件として、一次利用者の周囲に通信禁止領域が設定されているとする。初期の共用条件に従って周波数共用開始し、一次利用者において強い干渉があったとき、一次利用者は干渉の発生時刻をデータベースに通知する。データベースではこれまでの通信履歴と干渉通知と同一時刻の通信を干渉源とみなしラベルを付与する。一方、それ以外の時刻の通信は干渉源ではないとラベル付ける。このラベル付きデータセットに対し教師あり学習アルゴリズムを適用し、強い干渉を発生させる二次利用通信の条件、ここでは領域を学習する。この領域を通信禁止領域として追加する。干渉通知の度に上述の手順で通信禁止領域を更新することで過度に通信禁止領域を設定することなく干渉発生確率を低減する。

図2に干渉発生確率に対する通信禁止領域面積のシミュレーション評価結果を示す。提案方式は従来方式に比べて干渉発生確率5%以下における通信禁止領域面積を削減した。(参考文献) [1] A. Yamada, T. Nishio, M. Morikura, and K. Yamamoto, "Machine learning-based primary exclusive region update for database-driven spectrum sharing," Proc. IEEE VTC Spring Workshop on Connecting All Things for Enabling Smart Cities, Sydney, Australia, June 4 2017.

(謝辞) 本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発」の平成27年度案件として開始した「複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術に関する研究開発」の一環として実施した。

- 二次利用端末の送信位置
- 干渉発生時の端末送信位置

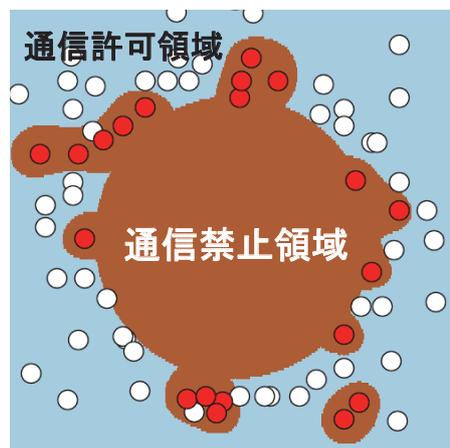


図1 通信禁止領域の設定例

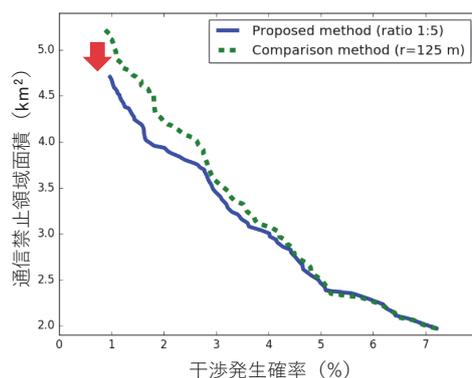


図2 シミュレーション評価結果

システム情報論講座 医用工学分野 (松田研究室)

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

「臓器変形・切除プロセスマッピング」

医用工学分野 松田研究室 医用システムグループでは、生体と治療を対象としたコンピューティングに関する研究を進めている。コンピュータビジョン、機械学習、人工現実感などの情報学的手法を医療に応用し、特に治療前や治療中において観測可能な情報から人体臓器の形態や特性を認識、理解する技術の探求、次世代の医療を牽引する情報技術の創出を目指している。本稿では、手術支援への応用を目指した試みの一つを紹介する。

外科手術における腫瘍切除は多くの診療科において実施される基本手技の一つである。臓器機能の温存と手術時間の短縮のためには正確な腫瘍位置の同定、術中解剖の理解が必要不可欠であるが、近年普及しつつある内視鏡手術やロボット手術においては、臓器表面や切除の進展によって出現する一部の脈管を視認することしかできない。また、手術時には術野の確保や臓器に対する切除や変形などの手術操作により臓器形状は時間変化する。術中における臓器形態の理解や腫瘍位置の正確な同定のために、超音波計測、術中CT (Computed Tomography), Open MRI (Magnetic Resonance Imaging) などの種々の計測が試みられてきたが、高度なイメージング機器が利用可能な施設は限られるだけでなく、追加の計測に伴う手術時間、医師・患者双方の負担の増加が課題となっている。

本研究では、患者固有の術前CT / MRI画像から術中に想定される臓器変形を予測し、切除時に想定される臓器内部の脈管構造の三次元分布や腫瘍位置等の参照情報を半自動的にバーチャルガイドとして生成する臓器変形・切除プロセスマッピング (図1) の概念を提案した。切離時に想定される臓器の位相構造の変化を事前知識として保持するメッシュモデルを導入し、メッシュを患者固有の術前CT/MRI画像に位置合わせすることで、切離の進展に伴って出現する脈管構造の可視化を達成しつつ、視覚表現の質と実時間性の両立を可能とする。図1 (a) は肝癌及び肺癌に対する切除術において想定される脈管構造の外観を描出したシミュレーション画像であり、それぞれ切離面上に出現する肝静脈、肺動脈と肺静脈の一部が可視化されている。バーチャルガイドは想定される術中変形や位置ずれを考慮して複数パターン生成しておくことが可能であり、手術前における手術戦略の共有や、術中における意思決定支援への活用が期待される。図1 (b) は肝切除時における術中カメラ画像と、医師によって事前に生成されたシミュレーション画像である。京都大学医学部附属病院 肝胆膵・移植外科, 呼吸器外科, 泌尿器科と共同で、シミュレーション画像の術中ガイドとしての有効性について臨床評価を進めている。術中カメラ画像の認識との連携に、モデルベースの腫瘍位置推定や処理のさらなる自動化へ向け、研究開発を進める予定である。



図1. 臓器変形・切除プロセスマッピング, (a) 肝切除術と肺切除における患者固有切除ガイドの半自動生成結果, (b) 術中カメラ画像とシミュレーション画像

参考 URL :

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~meg/research.html>

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）

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

「3次元配置した微小領域でのレーザー光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイ」

これまで、3次元映像を表示する方式としては、パララックスバリア方式やプラズマを発生させる方式、LEDアレイを高速回転させる方式など、様々な方式が提案・実装されてきました。しかし、特殊な眼鏡を装着する必要がある、観察可能な領域が狭い、同時観察可能な人数が少ない、装置が大掛かりで高価になる、フルカラーの映像を提示することが難しい、輻輳調節矛盾が生じるなどの問題があり、これらの問題をすべて解決したディスプレイは開発されていませんでした。

本研究では、これらの問題を同時に解決する新しいディスプレイとして、3次元配置した微小空隙でのレーザー光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイ LuminantCube を開発しました。LuminantCube は図1に示すように、光透過性素材で制作した直方体（以下、ガラスキューブ）とレーザー光源小型プロジェクタ、制御用PCで構成されます。ガラスキューブ内には、図2に示すように、事前にガラス内部マーキング法により多数の微小空隙（光を散乱させる傷）を3次的にはほぼランダムに配置しています。この空隙は、通常照明下ではあまり目立たず、レーザー光が照射された場合にのみ、照射された色で発光しているように見えます。この発光は、ほぼ全方向から裸眼で認識可能なため、個々の微小空隙ごとに発光・非発光を制御することにより、周囲のどの位置からでも裸眼で観察できる任意の形状の3次元フルカラー動画を表示できます。さらに、輻輳角と焦点調節が矛盾しない表示方法ですので視覚疲労や酔いを誘発しにくいと期待されます。

ガラス内部マーキング法により生成した微小空隙は、プロジェクタからのレーザー光をすべては散乱させず、一部を透過させます。そのため、プロジェクタから見て同一直線上に複数の空隙を配置することができず、このことが解像度を上げる際の障害となります。そこで本研究では、複数のプロジェクタを用いて異なる位置からレーザー光を照射することにより、解像度を上げる試みを行いました。また、本方式では、同じ微小空隙に複数のプロジェクタから同時にレーザー光を照射することにより、輝度を向上させることもできます。図3に、プロジェクタを4台同時に用いることにより、約1000Luxの照明環境下で直方体と円柱を表示させた例を示します。このディスプレイは、設計支援、教育支援、デジタルサイネージ、インテリアなどに応用可能であると期待されます。

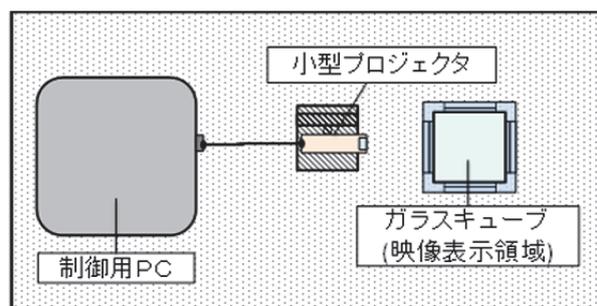


図1 ディスプレイの構成

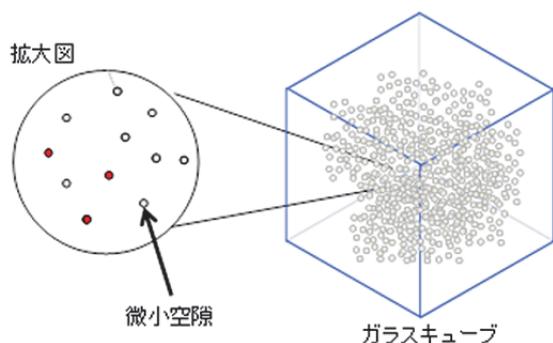


図2 ガラスキューブ内に配置した微小空隙

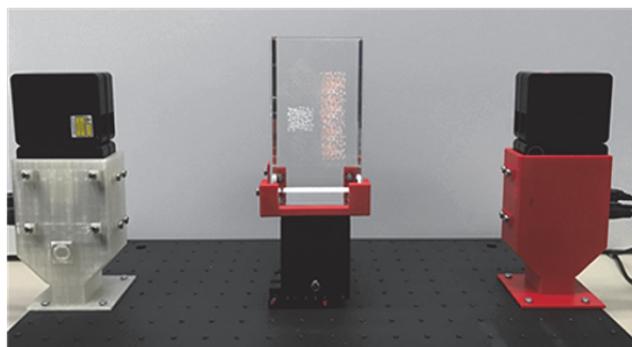


図3 立体映像の表示例

エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野（白井研究室）

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

「伝導冷却高温超電導 MRI マグネットシステムの開発」

1. はじめに

当研究室では、エネルギー問題にコミットする視点として、超電導応用エネルギー機器とこれらを導入した先進エネルギーシステムをテーマとしている。今回は、伝導冷却高温超電導 Magnetic Resonance Imaging (MRI) システムの開発について紹介する。現在の MRI 超電導マグネットには NbTi 超電導線材を用いているため、液体ヘリウムによる冷却が必要であるが、これを高温超電導線材を用い伝導冷却とすることで液体ヘリウムを用いないシステムが期待されている。当研究室では、NEDO「高温超電導実用化促進技術開発／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」プロジェクト（三菱電機・京都大学・東北大学）に参画し、医療用 MRI 超電導マグネットの高温超電導化を目指し、高均一かつ高安定磁場を発生できるモデルマグネットを試作（図1）し、イメージングによる実証（図2）を行った。



図1 HTS-MRI

2. 高温超電導マグネットによる高安定磁場の発生

開発課題は、超電導特性が劣化しないコイル構造の開発、高精度のコイル製作方法、高均一磁場発生コイルの設計、高温超電導コイルでの高安定磁場発生などがあげられる。特に高温超電導マグネットでは、テープ状線材を往復して遮蔽電流が流れること、また現状では超電導接続ができないため、低温超電導マグネットで行われている永久電流モードでの運用が難しいことが、高安定磁場発生障害となっている。我々は、電源によるドライブモード運転での MRI イメージングに必要とされる変動 1ppm/h 以下の高安定磁場発生をめざし、図3に示すような超高安定励磁電源システムとその磁場制御システムの開発を行っている。

この高安定電源を用いてモデルマグネットを 3T まで励磁し、電源ドライブモードで 0.7ppm/h の磁場安定度を達成し、図2のネズミの胎児のイメージングに成功している。

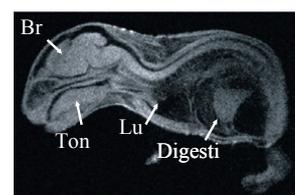


図2 ネズミの胎児のイメージング例

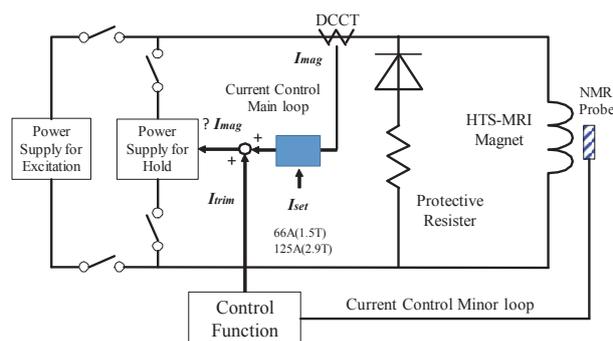


図3 超高安定励磁電源システム

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野

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

「ヘリオトロンJ」における高速イオン励起電磁流体力学的 (MHD) 不安定性に関する研究

近年、環境問題やエネルギー問題を解決するため、持続可能な社会および地球環境の構築が求められています。そこで鍵を握るのが新エネルギー源の開発です。磁場で閉じ込めた超高温プラズマ中で熱運動によりイオン同士を衝突させ核融合反応を起こし、生成された高エネルギー粒子の運動エネルギーを発電に利用しようとするのが核融合発電です。核融合発電は低環境負荷、燃料が無尽蔵、高エネルギー密度、そして外部から制御可能であるといった特徴を有することから、持続可能な社会環境を支える基幹電力源となる可能性を秘めています。そのため、世界各国で研究開発が積極的に進められるとともに、国際協力下でフランスに建造中の国際熱核融合実験炉 ITER では、2035 年から重水素 - 三重水素 (D-T) 核融合反応を起こす実験が計画されています。そのような情勢の中、本研究室も参加するヘリオトロンJグループではさらに先の実証炉、発電炉を見据え、より核融合炉に適した磁場配位 (閉じ込め磁場容器) の最適化・探索ならびに高性能プラズマ閉じ込めを実現すべく、京都大学で独自に創案されたヘリオトロン磁場配位を発展させた立体磁気軸ヘリオトロン磁場配位を提案し、高温プラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いた原理実証を進めています。複数ある研究課題の中から今回は「ヘリオトロンJ」における高速イオン励起電磁流体力学的 (MHD) 不安定性に関する研究について紹介します。

前述の D-T 核融合では高エネルギー (高速) のアルファ粒子 (ヘリウムの原子核) が核融合反応により生成され、プラズマ中の電子との衝突により電子を加熱します。この加熱により次の核融合反応が起き、その反応が繰り返され入力以上の出力が核融合反応により生み出されます。そのため、アルファ粒子のエネルギーが加熱されるプラズマの温度と同程度になるまでアルファ粒子が磁場によってしっかりと閉じ込められる必要があります。しかしながら、このアルファ粒子閉じ込めを阻害するものに、高速イオン励起 MHD (Magnetohydrodynamics: 電磁流体力学的) 不安定性との共鳴的相互作用が挙げられ、この不安定性によって核融合出力の低下が引き起こされる可能性があるため、核融合発電実現に向け解決すべき最重要研究課題の一つと捉えられ精力的に研究が進められています。高速イオン励起 MHD 不安定性の本質は粒子 - 波動間の共鳴的相互作用であり、同様の現象は地球を取り巻く磁気圏などでも太陽風由来の高エネルギー粒子に起因して起きています。高エネルギーアルファ粒子が MHD 波動と共鳴的相互作用を起こすと、MHD 波動が大振幅の電場、磁場振動を伴い励起されます。すると、共鳴しているアルファ粒子軌道が影響を受け閉じ込めが悪化することが懸念されています。ヘリオトロンJではプラズマ加熱に用いる高エネルギー水素イオンを活用し (1) 高速イオン励起 MHD 不安定性の物理現象解明、(2) 高エネルギーイオン閉じ込めへの影響、そして (3) 不安定性の制御手法の確立を進めています。(3) の結果を紹介します。外部から 70GHz のマイクロ波を新たにプラズマに入射することで、観測されていた高速イオン励起 MHD 不安定性の振幅が減少することを示したのが右の図です。右の図は横軸が時間、縦軸が振動の周波数を表し、色 (明るさ) が振動強度を表す等高線表示となっています。マイクロ波強度を 100kW (上図) から 300kW (下図) にすることで明るい色で表された不安定性強度が減り、全体的に暗くなり振動が減少していることがわかります。現在、この抑制の物理機構解明に向け実験や数値解析を進めております。

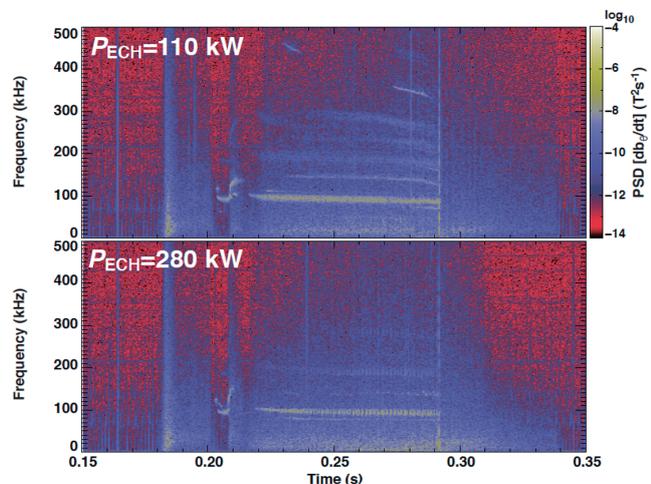


図. 高速イオン励起 MHD 不安定性のマイクロ波による抑制。

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野

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

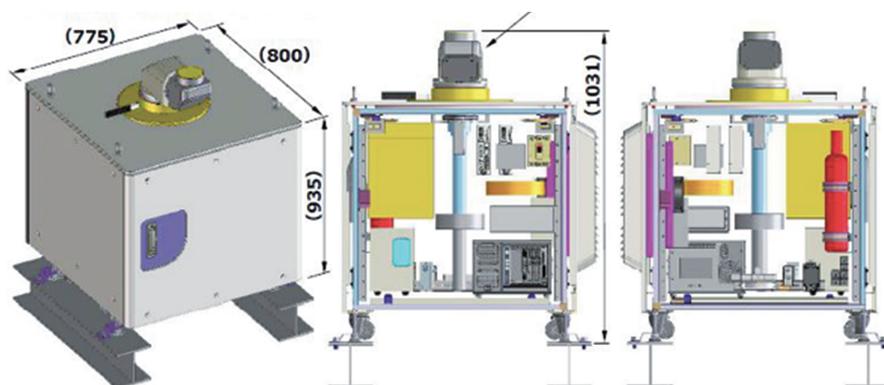
「小型高性能コヒーレント・ドップラー・ライダーの開発」

LIDAR (Light Detection and Ranging: ライダー) は光を用いたリモートセンシング技術の1つで、パルス状に発光するレーザー照射に対する散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離やその対象の性質を分析するものです。ライダーは大気中に浮遊するエアロゾルによるミー散乱や空気分子によるレイリー散乱を観測することができ、大気の散乱と大気分子の吸収を組み合わせた差分吸収法やラマン散乱法を用いてガス状物質の濃度分布を測定することも可能です。コヒーレント・ドップラー・ライダーは十分にコヒーレント性があるレーザー光と望遠鏡を用いて大気中のエアロゾルが移動している様子を検出し、散乱光のドップラーシフトを利用して散乱体の移動速度から風向風速を測定することができます。

現在、このコヒーレント・ドップラー・ライダーをさらに小型化、高性能化を行なっています。コヒーレント・ドップラー・ライダーは大きく分けて、ライダープロセッサ、スキャンヘッド、演算処理コンピュータ部、望遠鏡、レーザーアンプで構成されています。ライダープロセッサと演算処理コンピュータでレーザーの送受信の制御を行い、アンプでシードレーザーを増幅し送信を行っています。スキャンヘッドはレーザー本体上部に設置されているレンズを、方位角0~360度、仰角-10度~90度の範囲で動くように制御しています。この研究開発では、各コンポーネントを見直し、全体的に小型化することに成功しました。

レンジ分解能は、信号処理によって最小10m、最大300mまで選択でき、レンジ分解能に応じて計測可能距離が変わる仕組みになっています。シードレーザーは最大出力40mW、パルス幅は可変で代表的なパルス幅は400ns、200ns、100nsなどが選択でき、中心波長は1543nm、レーザー安全レベルでクラス1Mのアイセーフとしています。

これまでの研究では、コヒーレント・ドップラー・ライダーの観測データを高分解能気象予報モデルに同化し、局地的豪雨の予測精度向上も行なっています。ドップラー・ライダーで得られた風の情報、特に風の場の変化が急激に起こったタイミングを気象予報モデルに同化することで、局地的豪雨の予測精度が向上する結果を得られています。これまではコヒーレント・ドップラー・ライダー1台のみの観測でしたが、2台以上設置することでデュアル観測ができ、より正確な風の3次元情報を得ることができます。また使用している気象予報モデルの分解能は現在100mですが、都市のビル群、樹木などの影響も考慮にいれられる、ラージ・エディ・シミュレーションモデルを活用することで、数m分解能まで向上させることが可能となり、特に人口が集中し、ひとたび局地的豪雨が発生すると社会的影響の大きい都市における極端気象予報の精度向上につながると期待されます。



開発した小型高性能コヒーレント・ドップラー・ライダー

生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研究室）

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

「日本における巨大地磁気誘導電流の可能性について」

太陽活動や宇宙天気が私達の身近な社会に大きな影響を与えることがあります。その一つが人工物に流れる地磁気誘導電流（GIC：Geomagnetically Induced Current）です。太陽表面で生じたフレアは時折宇宙空間に向かって高エネルギーの磁気雲を放出し、磁気雲が地球の磁場に衝突すると地球周辺の磁気圏内に複雑な電流系が生じます（図1）。こうした磁気圏電流の電磁エネルギーの一部は地表へ伝搬し、地磁気的时间変動や誘導電場（GIE：Geomagnetically Induced electric field）という形で日々観測されています。電力網において発電所や変電所の変圧器の中性点は安全のため地面に接地されていますが、GIEが生ずると図2に示したように中性点を通して送電網に電流（GIC）が流れます。GICは変圧器の磁気飽和等を引き起こし、送電網に障害を与えます。1989年3月13日にはカナダのケベックで、2003年10月30日には、南スウェーデンのマルメで、GICによる大規模な停電が発生しました。オーロラ活動とともに電離圏電流の影響の強い高緯度地域ではGICへの研究や対策が盛んに行われているのに対し、日本におけるGIC障害については注目されてきませんでした。1000年に一度の規模の大磁気嵐に伴い巨大GICが生じた場合、社会的な大災害となり得るとして近年注目を集めています。

先行研究としては、地球を水平一様構造と仮定した解析解や、周波数領域での3次元シミュレーションが多くなされています [1]。一方、日本のGICにおいては磁気圏極域から地下までの電磁エネルギーの伝搬や、日本の複雑な地下構造を考慮する必要があるため、実空間における3次元数値シミュレーションが重要と考えています。また、電力系統は広かつ複雑なネットワークを成しており、GIEから送電網を流れるGICを見積もるためには、送電網全体のトポロジーや電気的なパラメータが必要となります。図3は日本の地下構造と送電網を模擬したGIEとGICの計算の初期結果です。国内電力会社の変電所に設置した電流計のデータを比較するとともに、計算精度を高め現実的なパラメータを導入することで磁気嵐の規模に応じて流れるGICの値を求め、減災や被害予測の想定に貢献することを目指しています。

参考文献

[1] Pirjola, R. Surveys in Geophysics (2002) 23: 71. doi:10.1023/A:1014816009303

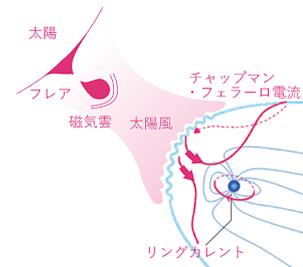


図1：太陽磁気雲と地球磁気圏の概略図

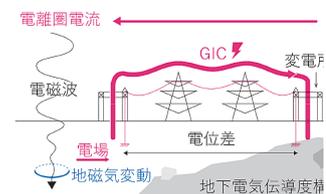


図2：GICの概略図

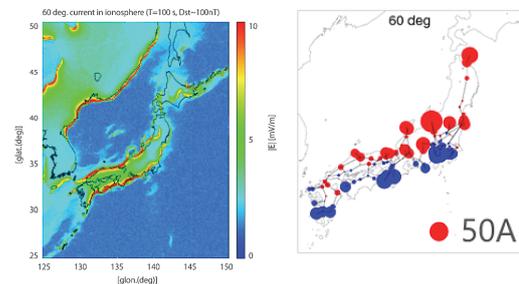


図3：計算した地磁気誘導電場（GIE）と地磁気誘導電流（GIC）

学術情報メディアセンター ビジュアライゼーション研究分野（小山田研究室）

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

「因果関係の発見を支援するための視覚的分析 —線虫における発生動態の解明—」

本研究室では、基礎生命科学ビッグデータを用いて行われる科学的方法において重要な因果関係の発見を支援するための視覚的分析環境の構築に関する研究を実施しています。

表現型特徴因果関係ネットワークをわかりやすく可視化することは、そこからの新たな知識の発見を促進する上で必要不可欠です。時間変化する特徴量間の因果関係を可視化するために階層グラフィックレイアウトの適用が考えられますが、この因果関係ネットワークは辺の数が多い密グラフであるため、これを階層グラフィックレイアウトによって可視化した場合に多くの辺交差が現れます。辺交差の発生は、可視化結果の美しさを損なうだけでなく、可視化結果の読み取りに悪影響を与えることが知られています。そのため、密な階層グラフィックに現れる辺交差を取り除き、視認性の高い可視化結果を生成することが課題でした。

このような辺交差を取り除く方法として辺集中化(Edge Concentration)に着目しました。辺集中化は、階層グラフィックに含まれるバイクリク（完全二部部分グラフ）を抽出し、集中化ノードを用いて置き換えることで辺交差の除去を行います。しかし、既存の辺集中化アルゴリズムでは、表現型特徴因果関係ネットワークのような大規模なグラフにおいて辺交差の除去を十分に達成することができませんでした。そのため、辺集中化後の辺数の最小化に基づいた新たな辺集中化アルゴリズムを開発し¹⁾、表現型特徴因果関係ネットワークへの適用を行いました。提案手法は既存手法と比較して、大規模なグラフに対しても効果的に辺交差の除去を行うことができ、また、計算時間の観点でも優れています。図1は表現型特徴因果関係ネットワークの可視化結果を表しており、左は辺集中化適用前、右は辺集中化適用後の結果の図です。辺集中化適用前の辺交差数が8663であるのに対して、辺集中化後の辺交差数は4035であり、およそ53パーセントの辺交差の除去が達成できました。

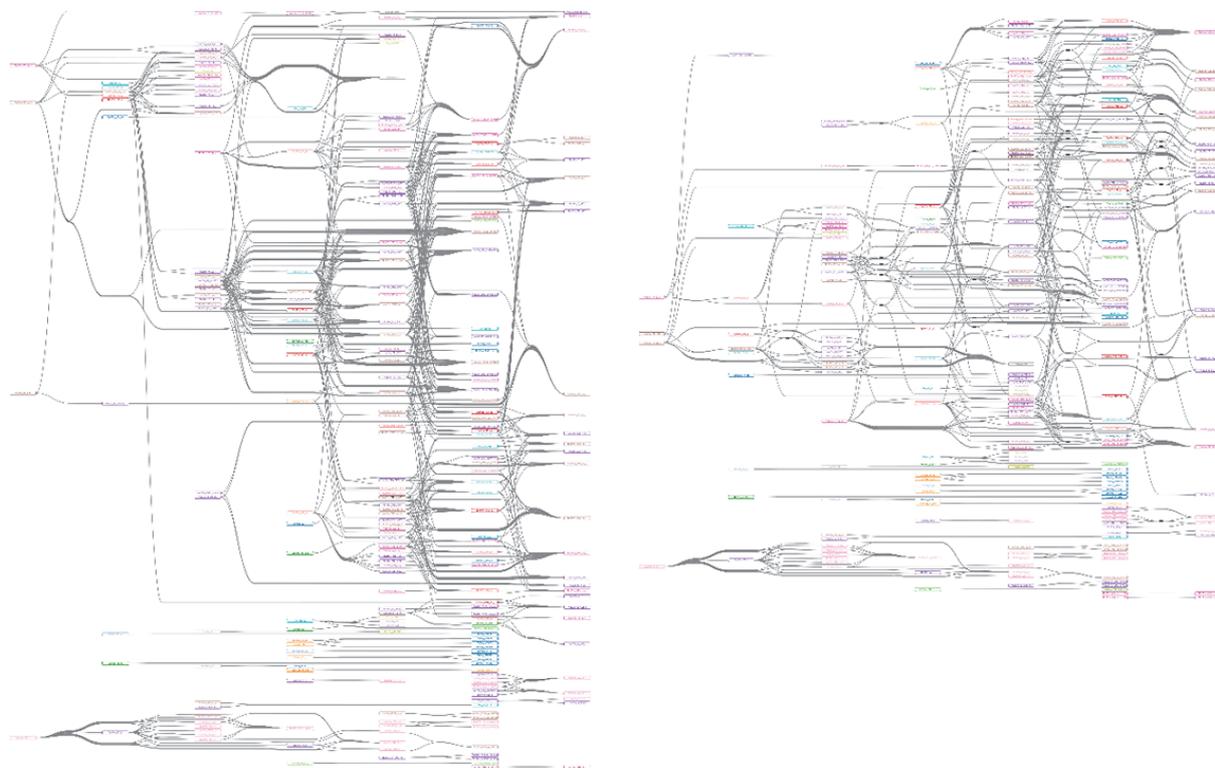


図1：表現型特徴因果関係ネットワークの階層グラフィックレイアウトによる可視化結果
（左：辺集中化適用前、右：辺集中化適用後）

学術情報メディアセンター 教育支援システム研究部門 遠隔教育システム研究分野 (中村裕研究室)
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>
 「動作支援と見守りのための体性感覚呈示デバイス」

我々の研究室では、動作の支援や情報伝達の手段として、皮膚感覚を用いた新しいデバイスを設計している。相手に所定の動作を促したり、そのタイミングを指示すること、相手との協働を円滑にすること、お互いの動作を直感的な方法で伝えることにより、共感 (empathy) を得ることなどを目的としている。応用としては、スポーツやリハビリテーション動作等のコツ・タイミングを教えること、注目を促す場合や危険が迫った場合の注意喚起、遠隔地の相手の状態を直感的に感じ取るデバイスその他が考えられる。

このような目的で試作した Skin Stretcher 型デバイスを図 1, 2 に示す。デバイスが皮膚を引っ張り、それに伴う違和感によって、装着者が動作を行う (この例では頭部を回転させる) ことを目的とする。このようなデバイスはこれまでに例を見ないものであり、また、人間が系に含まれるために複雑な振る舞いを持つ可能性があるため、その基本的な性能を確認することが重要となる。そのため、入力を本デバイスによる皮膚の変位 (頭部の回転角に換算)、出力を装着者の頭部の回転角とし、ステップ入力などの簡単な入力を与えながら、系の基本的な特性を計測し、モデル化を行った。そのベースとなる性質としては、2~3 次の遅れとむだ時間の存在するモデルを仮定した。図 3 に動作例とシステム同定によって得られた動作推定例を示す。青色が入力、黒色が出力、赤色がシステム同定で得られたパラメータ (伝達関数) を用いて出力を推定した結果を表す。上段は 2 次遅れ+むだ時間のモデルとして同定した場合、下段は 3 次遅れ+むだ時間の場合の例である。これらは一回の試行 (入出力) から伝達関数を推定した結果であり、そのような場合には、個々の動作は比較的単純なモデルで良く近似できる。

このような考え方を基に、装着者を支援する人間機械系を構築することにより、装着者の行動をできるだけ妨げずに、動作を誘導するシステムの実現が期待できる。ただし、ここには示さないが、回転角によるばらつき、試行間のばらつき、個人差によるばらつきなどがあり、これらを利用者、利用状況に合わせて調整することが必要であり、今後の課題となっている。

井藤隆秀, 近藤一晃, 中村裕一, Jonathan Rossiter, "Skin Stretcher 型の頭部回転誘導デバイスの基礎的検討", HCG シンポジウム 2016, pp.517-524, 2016

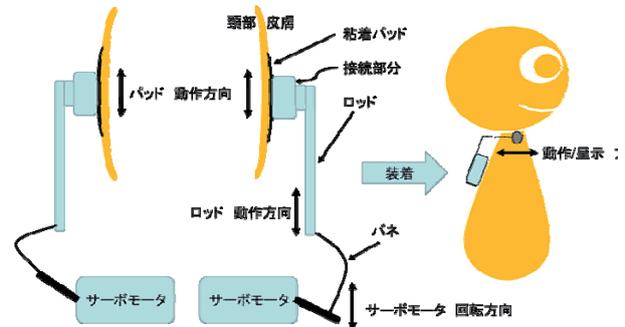


図 1 : skin stretcher のしくみ



図 2 : 装着時の様子

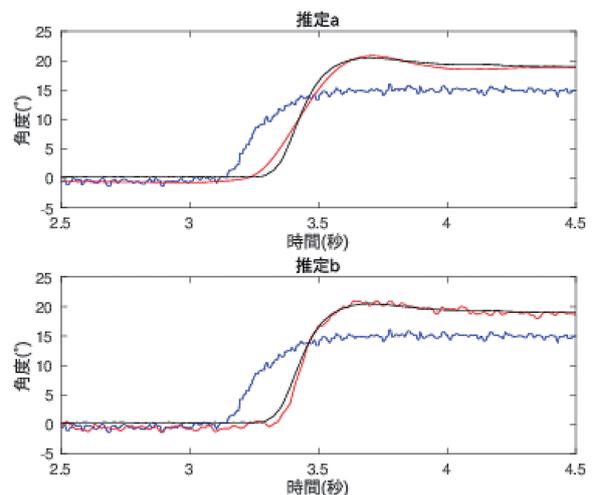


図 3 : 入力, 出力, システムの近似

平成 28 年度修士論文テーマ紹介

工学研究科 電気工学専攻

齋 藤 司 (引原教授) 「温水供給システムの形式手法に基づくモードスイッチング制御器の設計と検証」

医療施設内の温水供給システムを対象に、温水の流路及び温度を確保するモードスイッチング制御器を形式手法を用いて設計した。そして、データに基づいた温水供給システムのモデルに対する上記制御器の性能をリアルタイム計算及び数値計算により検証した。

佐 孝 恭 一 (引原教授) 「電力系統における電圧ダイナミクスのクープマン作用素による解析」

観測量の時間発展を表すクープマン作用素により電力系統の電圧ダイナミクスの解析を検討した。まず、電圧時系列から固有関数を算出し、電圧の挙動を把握した。さらに、連続スペクトルに基づくパラメトリックモデルにより、電圧時系列が電圧崩壊現象を示すか否かの判定が可能であることを示した。

佐段田 裕 平 (引原教授) 「高周波 DC/DC コンバータの受動性に基づく並列化」

電源回路の小型・並列化を目的とし、DC/DC コンバータの高周波スイッチング手法及び受動性に着目した並列回路の制御手法を研究する。実験により高周波化と並列化が可能であることを示し、数値計算により並列回路の応用的な制御を検討する。

持 山 志 宇 (引原教授) 「電力パケット給電によるマニピュレータの軌道制御に関する実験的検討」

電力パケットは、パルス電力に情報タグを物理層で付与した伝送単位である。本論文では電力パケット給電によるマニピュレータの軌道制御について実験による検証を行った。この結果は動的負荷の要求電力を電力パケットにより充足可能であることを示す。

李 文 堯 (引原教授) 「非線形 MEMS 共振器の力学的特性に基づく電界強度計測に関する研究」

強制振動時に非線形性が生じる櫛歯型電極を有する MEMS 共振器に対し、力学的特性の変化に基づいた電界強度の測定原理を示した。さらに、複数の MEMS 共振器を一方向に結合した系において、各素子の空間配置と外部電界の方向による振動特性の変化を数値的に検討した。

佐々木 正義 (萩原教授) 「離散時間系の l_∞/l_2 誘導ノルムの解析・最小化とサンプル値系への応用」

線形行列不等式に基づき離散時間系の l_∞/l_2 誘導ノルムの解析法とそれを最小化する制御器の設計法を与えた。続いてサンプル値系の L_∞/L_2 誘導ノルム解析を近似的に等価な離散時間系の l_∞/l_2 誘導ノルム解析に帰着させ、サンプル値系に対する制御器設計への展開について論じた。

高 橋 誠 也 (萩原教授) 「双対 SDP の最適解の構成による 1 入出力系の H_∞ 性能限界解析」

いくつかの閉ループ伝達関数の H_∞ 性能限界解析手法を論じた。 H_∞ 性能限界を特徴づける半正定値計画 (SDP) の双対問題 (双対 SDP) に着目し、その構造を利用して問題を簡単化することで最適解を解析的に構成した。結果として H_∞ 性能限界の解析的表現の導出に成功した。

反 甫 透 (萩原教授) 「離散化双線形モデルに基づくブーストコンバータ平均出力電圧のオブザーバを用いた非線形制御」

ブーストコンバータ平均出力電圧の制御について理論的、実験的検討を行った。まず電圧出力に関する双線形モデルを部分空間法に基づき同定し、それに対して最小次元双線形オブザーバの設計法を与えた。最後に実験により、これらの結果に基づく出力フィードバック制御則の有効性を示した。

崔 溶 雨 (萩原教授) 「水平連続焼鈍炉の炉内雰囲気に関するモデル化と水素比制御」

製鉄工程における水平連続焼鈍炉について炉内雰囲気非線形動特性のモデル化を行った。次に平衡点の求め方を論じ線形化モデルを導いた。続いて圧力制御に関するマイナーループと水素比に関する積分性の最適制御を施す2段階制御器設計法を与え、有効性をシミュレーションにより検証した。

柳 楽 勇 士 (萩原教授) 「離散時間確率系に対するスモールゲイン定理とロバスト安定化状態フィードバック設計」

本論文では、確定系の議論においてロバスト制御の基礎をなすことで知られるスモールゲイン定理を離散時間確率系に対して導出した。また、その定理に基づき不確かな確率系に対するロバスト安定解析および状態フィードバック設計問題に取り組んだ。

國 兼 範 昭 (土居教授) 「1型糖尿病患者の暁現象のモデル化と血糖値制御の基礎的検討」

1型糖尿病患者の夜間の血糖値上昇現象である暁現象について、睡眠と成長ホルモンの糖代謝への影響によるものとしてモデル化を行った。また、シミュレーションにより暁現象による高血糖状態を回避するための血糖値制御法を検討した。

永 井 拓 未 (土居教授) 「イオン電流と膜容量の変化が心臓ペースメーカー細胞モデルの周期解と双安定性に及ぼす影響について」

ホジキン-ハクスリ型の微分方程式に対して高次元パラメタ空間における分岐解析を行い、洞房結節細胞が心臓ペースメーカーとして正しく機能する(周期解が単安定の)パラメタ領域及び心停止に至る可能性のある(安定平衡点との)双安定領域の全貌を解明した。

水 野 文 崇 (土居教授) 「積み替えるブロックに制限のないブロック積み替え問題に対する効率的な厳密解法」

ブロック積み替え問題とは、積み重なったブロックを最小の積み替え回数で順番に運び出す問題である。本研究では、一番上に積まれたブロックはいずれも積み替え可能とした問題に対して分枝限定法に基づく厳密解法を提案し、その有効性を計算機実験により確認した。

三 谷 敦 己 (土居教授) 「柔軟な1次元 Fermi-Pasta-Ulam 格子における静止型空間局在モードの基礎的性質と移動可能性に関する研究」

1次元結合振動子において、質点が軸方向以外の自由度を持ち、全体として柔軟に変形可能なモデルを提案し、非線形局在振動について解析した。結果、既知の縦振動型に加え、横振動型、回転型の局在振動を発見し、その安定性や移動可能性を明らかにした。

小 島 史 嵩 (小林教授) 「生体磁気計測に向けた光ポンピング原子磁気センサのグラジオメータ構成法に関する研究」

環境磁気ノイズ抑制法であるグラジオメータ構成を光ポンピング原子磁気センサに適用する有用性を数値計算と実験から検証した。これを用いてヒト MCG および MEG 計測を行い、グラジオメータ構成において生体磁気計測が実現できたことから本手法の有効性を示した。

馬見新 友 輝 (小林教授) 「ポンプ光変調による光ポンピング原子磁気センサの多チャンネル化に向けた研究」

光ポンピング原子磁気センサのポンプ光の変調によるセンサの多チャンネル化の実現可能性について研究した。光チョッパや電気光学素子による強度変調・偏光変調により、生体磁気計測に耐えうる感度で多チャンネル化が実現可能であることを明らかにした。

依 田 学 樹 (小林教授) 「拡散 MRI を用いた精神神経疾患の病態神経回路の同定に向けた白質神経線維束の解析」

精神・神経疾患に關与する病態神経回路の同定を目的として、拡散 MRI に基づき global tractography で再構成した白質神経線維束の拡散情報を線維束に沿ったプロファイリングによって解析する新たな手法を提案し、シミュレーション等による検証を行った。

伊 藤 達 哉 (雨宮教授) 「希土類系高温超伝導薄膜線材の異方的電流輸送特性を考慮した常伝導伝搬特性に関する基礎検討」

本研究では、希土類系高温超伝導薄膜線材における異方的電流輸送特性と常伝導伝搬特性の関係を実験的・解析的に検討した。その結果、20 K ~ 40 K 程度の温度領域における常伝導伝搬速度や最小クエンチエネルギーの磁界ベクトル依存性他を明らかにした。

入 山 周 平 (雨宮教授) 「次世代車載システムに向けた 50 kW 級全超伝導誘導同期モータ及び冷却システムに関する研究」

本研究では、輸送機器応用を志向した高温超伝導誘導同期モータについて、20 kW 級プロトタイプ機の定常最大効率マップの明確化、50 kW 級全超伝導モデル機の電磁設計と冷却特性解析、およびスターリング冷凍機励磁系の特性解析を実施した。

坂 洋 輔 (雨宮教授) 「FFAG 加速器用超伝導マグネットの磁場設計及び技術検証用マグネットの磁場精度評価」

重粒子線がん治療装置用 FFAG 加速器に高温超伝導マグネットを適用することを目指して、同加速器用高温超伝導マグネットの磁場設計を行った。さらに、要素技術検証用マグネットの磁場精度評価を行い、製作精度や線材に流れる遮蔽電流が磁場精度に与える影響を明らかにした。

木 村 琢 也 (和田教授) 「単導体線路における外部励振と放射損の定式化」

帰路線をもたない単導体の回路モデルを、線電荷密度と電流を変数とする波動方程式を基に定式化した。放射に対する反作用としての減衰を、端点が生成する場が自己に遅延を伴って作用するモデルで表現し、アンテナの理論や電磁界解析により妥当性を確認した。

Kiss Daniel (和田教授) 「Peer-to-Peer Energy Transfer by Gytrators Based on the Concept of Time Variable Transformer」 (時変変成器の概念に基づいたジャイレータによる P2P エネルギー伝送)

送り手と受け手が協調してエネルギー授受を行う P2P エネルギー伝送のための双方向 DC/AC 変換器を時変変成器としてモデル化し、それをジャイレータとして動作させることで、授受が電源や負荷の特性に依存しにくい伝送を実現し、実験により妥当性を確認した。

豊田真希 (和田教授) 「通信機器内部の結合に起因する電源ポートから通信ポートへの妨害波伝達の抑制法」

スイッチングハブなどの通信機器の電源線から混入する伝導性妨害波の通信ポートへの伝達について、伝送モードに着目した評価系を構築し、抑制法を提案した。機器電源部への平衡度調整回路の付加により、数 10MHz 帯において最大 10dB 程度の低減効果を実証した。

黒柳貴夫 (和田教授) 「DCDC コンバータの寄生結合経路変更とインピーダンスバランスによるコモンモード低減」

DC-DC コンバータを構成するパワー MOSFET 近傍の寄生結合によるコモンモード妨害波の発生を定式化した。放熱構造が異なる MOSFET を使用して寄生結合の位置を調整することによりコモンモード妨害波を低減できることを回路解析と実験により示した。

河口慈 (松尾教授) 「渦電流解析における誤差修正法のための写像行列の構成方法に関する研究」

電磁界解析に置いて性質の類似した連立一次方程式を連続して求解する際の、誤差修正法のための写像行列の構成法を開発した。穴あき導体・扁平要素を含む解析、電圧源との連成解析、非線形磁気特性を扱う解析などについて、提案手法の高い有効性を確認した。

阪下真紀 (松尾教授) 「電気機器特性解析におけるヒステリシス特性を考慮した後処理補正に関する研究」

電気機器の有限要素磁界解析を行う際、まず鉄芯の飽和特性のみを考慮した解析の後、得られた磁束密度分布を用いて、ヒステリシス特性が電流・電圧特性や電磁力に及ぼす影響を後処理的に補正する方法を開発し、効率的なヒステリシス磁界解析を実現した。

坂田優樹 (松尾教授) 「時空間有限積分法におけるサブグリッド接続の最適化に関する研究」

有限積分法における時空間サブグリッドの接続部の計算格子配置を最適化する手法を開発した。格子座標や格子間隔に連続条件を課す方法と平面波伝搬条件を課す方法により格子を最適化し、サブグリッド接続による非物理的な電磁波反射を抑制することに成功した。

手島彰吾 (松尾教授) 「集合磁区モデルにおけるエネルギー極小化問題の高速解法に関する研究」

集合磁区モデルにおけるエネルギー極小化の際、他セルによる減磁界を陽解法的に、その他の項を陰解法的に扱う部分的陰解法を開発した。極小化の際のステップサイズを大きくすることにより、磁化解析の計算時間を大幅に削減することに成功した。

工学研究科 電子工学専攻

土井卓司(掛谷准教授)「高温超伝導体テラヘルツ光源における高効率排熱構造素子に関する研究」

高温超伝導体におけるジョセフソン効果を応用したテラヘルツ光源は、素子のジュール発熱に伴う温度上昇による超伝導の消失が発振出力を抑制していることがわかっている。本研究では発熱を効率よく排出し、素子の温度上昇を抑える素子構造を提案した。

大友健郎(白石教授)「GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面の二次元電子層におけるスピン輸送とそのゲート操作の研究」

AlGaAs/GaAs 界面で誘起される 2 次元電子ガスを介した室温スピン輸送を世界で初めて実証した。スピン注入は動力学的手法(スピンプンピング)を用い、2 次元電子ガス層の形成は低温での量子振動の観測による確認した。

熊本涼平(白石教授)「 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 薄膜における電流スピン流交換の Sb 組成依存性に関する研究」

BiSb は Sb 組成によって半金属、直接及び間接遷移半導体、トポロジカル絶縁体など多様な物性を示し、更にスピン軌道相互作用も大きいためスピン変換物性を示すことから高い関心を集める材料である。Sb 組成制御により BiSb の電子物性とスピン変換物性の相関を検討した。

重松英(白石教授)「IV 族半導体への動力学的スピン注入の研究」

世界的に注目を集める IV 族スピントロニクス新たなファミリーとして SiC と分子性半導体である単層カーボンナノチューブに着目し、これらへのスピン注入による室温スピン輸送の実現や、スピン流(スピン角運動量の流れ)を電流に変換する逆スピンホール効果物性の精査に成功した。

羽路祐紀(白石教授)「直流低電界によるソフトイオン化を用いたアミノ酸分子の原子プローブ分析」

アミノ酸分子の質量分析を行うため飛行時間形質量分析装置の高性能化を行った。グリシン蒸着タンダステン針を試料とし、直流低電界印加によるイオン化を利用することでフラグメント生成のないグリシンモノマーイオンの生成を行うことができることを見出した。

山下尚人(白石教授)「スピン依存ゼーベック効果を用いたシリコン中のスピン流生成に関する研究」

熱流がスピン流(スピン角運動量の流れ)を生むスピン依存ゼーベック効果(ゼーベック効果のスピン版)を磁性体/半導体接合系において世界で初めて観測することに成功し、更にその効率が磁性体/非磁性金属接合系より 400 倍以上高いことを実験と理論の両面から明らかにした。

小野祐介(竹内教授)「窒化シリコンリング共振器を用いた光子対発生に関する研究」

光量子回路は、量子情報通信処理や量子計測に不可欠なツールであるが、その小型化が重要な課題となっている。本研究では、オンチップ光量子回路のための光子対源として、窒化シリコンリング共振器を設計、作成した。その結果、1550nm 帯の連続光励起で、4 光波混合による光子対発生に伴うと考えられる非線形応答を確認した。

清原 孝行 (竹内教授) 「光子数検出器を用いた多重化伝令付き単一光子源の実現と応用」

単一光子源から発生する余剰光子が、光量子回路の大規模化の障害となっている。本研究では、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源の余剰光子抑制について研究を行った。その結果、「並列化」と「光子対数分別」の双方を実装した伝令付き単一光子源を初めて実現、余剰光子の削減を実証した。

末澤 舜 (竹内教授) 「スラブ導波路素子による周波数もつれ光子対生成と量子光干渉断層撮影の高速化」

周波数に関して相関を持つ量子もつれ光の発生と応用に関して研究を行った。まず量子もつれ光を用いた光断層撮影装置を開発、従来に比べて50%程度高速化に成功、約 $3\mu\text{m}$ の高分解能での分散耐性を確認した。また、スラブ導波路型チャープ擬似位相整合素子を用いた光源を構築、バルク素子に対して10倍以上の光子対生成率を確認した。

菅野 駿太 (竹内教授) 「量子もつれ光子対の極短時間相関幅の観測に向けて」

極短時間相関を持つ量子もつれ光では、極めて高効率の2光子吸収が予想されている。その実証に向け、和周波光子発生について研究を行った。その結果、非同軸発生させたもつれ光子対間で最大毎秒32カウントの和周波光子を観測、また素子温度依存性が理論予測と一致した。さらに時間相関幅観測に向けた光学系の設計構築を行った。

栗山 豊 (木本教授) 「TiO₂ 抵抗変化素子のフォーミングにおける準高抵抗状態の発現」

不揮発性メモリ応用を目指したTiO₂ 薄膜の抵抗スイッチング現象の基礎研究に取り組んだ。初期フォーミング(電圧印加による最初の低抵抗化)現象に着目し、低抵抗状態と高抵抗状態の間に特定の準高抵抗状態が発現し、これがTiO₂ 膜中の酸素空孔密度と関係することを明らかにした。

澤田 直暉 (木本教授) 「ホモエピタキシャル成長Siドープn型GaNの電気特性と深い準位の評価」

GaN 縦型パワーデバイスを目指したGaN ホモエピタキシャル成長層の電子物性評価に取り組んだ。様々なドーピング密度、欠陥密度を有するn型GaN 試料のHall効果測定から、電子移動度を定める散乱過程を明らかにした。また、深い準位の評価も行い、主要な電子トラップを同定した。

齋藤 栄治 (木本教授) 「高性能バイポーラデバイスを目指したSiCにおけるキャリア寿命制御に関する研究」

超高耐圧SiCバイポーラデバイスの高性能化を目指したキャリア寿命制御に関する研究を行った。炭素空孔欠陥をほぼ完全に消去した後に、低エネルギー電子線照射あるいは高温熱処理を施すことによって炭素空孔欠陥を意図的に生成させ、広い範囲でキャリア寿命を制御できることを実証した。

平井 和斗 (木本教授) 「SiC基板上AlN層の成長モードと結晶性の成長温度依存性および原料交互供給法の検討」

高Al組成AlGaInの基板として有望なSiC上AlN薄膜のヘテロエピタキシャル成長に取り組んだ。成長温度の高温化のみでは格子緩和やクラックなどの問題が発生するが、原料交互供給法を用いることにより、Alドロップレットのない平坦かつ高品質AlNを成長できることを見出した。

宮 本 眞 之 (山田教授) 「原子間力顕微鏡によるタンパク質 2 次元結晶の構造観察および特異的結合能評価」

原子間力顕微鏡を用いてストレプトアビジンの 2 次元結晶の高分解能観察に成功した。また、ストレプトアビジンにビオチンを結合させ、2 次元結晶が崩壊する様子を観察することに成功した。さらに、ビオチン修飾探針を用いてストレプトアビジンとビオチンとの特異的結合力の測定に成功した。

山 下 貴 裕 (山田教授) 「金属内包フラーレンの周波数変調原子間力顕微鏡による分子内構造観察」

周波数変調原子間力顕微鏡を用いて、二硫化モリブデン基板上的フラーレン (C_{60}) 薄膜に堆積した金属内包フラーレン ($Gd@C_{82}$) の分子骨格を可視化し、電圧パルス印加や探針近接によって金属内包フラーレンの分子配向操作を行うことに成功した。

岸 元 克 浩 (川上教授) 「クリーン原料を用いた気相成長法により作製したサファイア基板上 AlN の結晶性評価と界面構造制御」

Al と窒素ガスのみを用いる環境負荷の低い独自の手法により、サファイア基板上に AlN を結晶成長した。成長手順によりさまざまな界面構造が現れ、構造的な特性に影響を与えるが、この要因を、Al あるいは窒素ガスとサファイアとの反応にさかのぼって解明し、それを制御することに成功した。

木 戸 峻 平 (川上教授) 「半極性 GaN 基板上 InGaN/AlGaN 応力補償超格子に関する研究」

GaN 上に、格子定数の大きな InGaN と小さな AlGaN を交互に積層した応力補償超格子は、レーザにおけるクラッド層としての利用が期待されている。有機金属気相成長における成長条件の詳細な検討や、界面への GaN 極薄膜の導入などを通じて、表面平坦性を維持したまま多数の層を積層する方法を提案した。

松 田 祥 伸 (川上教授) 「高品位白色 LED の実現に向けた $\{11\bar{2}2\}$ 半極性 GaN 基板上三次元 InGaN 量子井戸に関する研究」

所望の可視スペクトルを高効率で発光する LED の実現を目標とし、 $\{11\bar{2}2\}$ GaN 基板上に三次元 InGaN 量子井戸を作製した。三次元構造を構成する各結晶面での原子の取り込みなどを考慮して構造設計をすることにより、効率低下を引き起こす結晶面を排除し、かつ、各面から異なる発光色を得ることに成功した。

松 村 威 哉 (川上教授) 「深紫外時間・空間分解分光測定系の構築による AlGaIn 量子井戸の光物性評価」

深紫外域での時間・空間分解分光を可能とする測定系の構築をおこなった。要素技術として、紫外用光ファイバの特性を評価し、例えば群速度分散が時間分解分光に支障がないことを示した。構築した時間・空間分解分光装置を用い、AlGaIn/AlN 量子井戸におけるキャリアダイナミクスを初めて計測した。

元 平 暉 人 (野田教授) 「光吸収層表面にフォトニック結晶を導入した微結晶シリコン太陽電池」

微結晶シリコン太陽電池の光吸収層表面にフォトニック結晶構造を導入し、光吸収を増大させることを検討した。フォトニック結晶の構造や導入方法を適切に設計することで、pin 層にシリコンのみを用いた微結晶シリコン太陽電池としては世界最大の変換効率である 11% を達成した。

中 川 翔 太 (野田教授) 「フォトニック結晶レーザの大面积単一モード動作に向けた格子点構造の設計」

周期的な誘電体構造を有するフォトニック結晶レーザの格子点構造について解析を行ない、デバイスの大面积化と安定的な単一モード発振の両立に必要な格子点構造の条件を示した。更に具体的な構造を挙げ、半導体レーザによるキロワット級出力の可能性を提示した。

堤 達 紀 (野田教授) 「ロッド型シリコン狭帯域熱輻射光源の耐熱性向上の検討」

熱光発電への応用を目指してサブ μm サイズのSiロッドアレイからなる熱輻射光源を作製し、測定系の改良を行って近赤外域に集中した選択的な輻射を示すことを実証した。また本構造に数十nm厚のアルミナコーティングを行い、 1100°C で24時間以上の動作を実証した。

吉 田 昌 宏 (野田教授) 「ダブルホール格子点構造を導入した高出力・高ビーム品質フォトニック結晶レーザ」

フォトニック結晶レーザの高出力・高ビーム品質化に向けて、単一モード発振を維持しつつ発振面積の大面积化を可能とするフォトニック結晶構造としてダブルホール格子点構造を提案した。さらに、本構造を導入したデバイスを作製し、従来構造の2倍以上である $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ の発振面積において単一モードでの発振に成功し、回折限界に近い高ビーム品質を得ることに成功した。

菊 田 智 寛 (北野教授) 「チェッカーボード型自己補対電磁メタ表面でのジュール熱を利用した電磁波分布の可視化」

チェッカーボード型メタ表面の抵抗膜での吸収による熱上昇を利用した電磁波分布の可視化に関して数値計算および実験で検証を行った。数値計算における本手法の有用性の検証に加え、マイクロ波領域で動作するメタ表面を設計し局所的な温度上昇の実証に成功した。

友 松 駿 介 (北野教授) 「 Yb^+ 電気八重極子時計遷移を励起するテーパ半導体素子を利用した光源の性能改善」

寿命約10年の時計遷移を励起する狭線幅・高出力光源を開発した。標題素子を外部共振器構造でレーザー発振させ、共振器を構成する回折格子と出力鏡を同時に微動し連続掃引範囲を5GHzに拡大した。第2高調波発生に用いる外部共振器への結合を改善して10mWを超える変換光を得た。

安 彦 修 (北野教授) 「数値処理による分散消去光干渉断層撮影および光パルスの時間複素振幅の直接測定」

光子を用いて提案された分散消去光干渉断層撮影(OCT)を通常のOCTの出力から数値処理のみで実現する理論の構築、実験実証を行い、分散消去OCTの限界などを考察した。加えて、時間空間アナロジーを用いた時間複素振幅の直接測定の理論構築、実験実証を行った。

山 下 尚 也 (北野教授) 「電磁誘起透明化現象を実現する非線形メタマテリアルを用いた電磁波の保存・再生」

非線形メタマテリアルでの周波数混合を利用した電磁誘起透明化現象を電磁波の保存・再生に応用する研究を行った。被測定波及び制御波共に透過するメタマテリアルを設計し、制御波の動的変調により被測定波をメタマテリアル中に保存し、その後再生することに成功した。

光・電子理工学教育研究センター

清水友規（龍頭講師）「液体クラスターイオンビームの遷移金属薄膜への照射効果に関する研究」

液体クラスターイオンビームを用いた遷移金属薄膜の表面加工・表面改質法の開発を目指して、遷移金属薄膜に対するアセトン及びエタノールクラスターイオンビームの照射効果について調べた。液体クラスターイオンビーム照射により高スパッタ率が得られることが分かった。

西和哉（龍頭講師）「竹炭を用いたイオン液体イオン源の開発と応用に関する研究」

メタルフリー集束イオンビームや二次イオン質量分析への応用を目指して、良導体多孔質材料として竹炭を利用したイオン液体イオン源を開発し、イオン源の動作特性について調べた。竹炭の優れたイオン液体供給性能により長時間の安定したイオンビーム放出が得られることが分かった。

山岡昌貴（龍頭講師）「クラスターイオンビーム誘起発光を用いた表面分析法開発に関する研究」

クラスターイオンビーム誘起発光の、オンラインモニタリング・固体表面分析への応用を目指して、様々な膜厚の銅薄膜や、水クラスターイオンビームを照射することにより作製したシリコン酸化膜等の固体表面に対するクラスターイオンビーム誘起発光スペクトルを測定した。

神野莉衣奈（藤田教授）「サファイア基板上バッファ層による酸化ガリウムの構造制御に関する研究」

広いバンドギャップ（5.3 eV）を持つ α 相（コランダム構造） Ga_2O_3 薄膜の欠陥低減と結晶構造の制御を目指した。 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 擬似傾斜バッファ層を提唱し、その導入により、 Ga_2O_3 の刃状転位密度を従来の約 1/100 低減した。また、低温バッファ層を導入することで、 α 相と ϵ 相を選択的に成長する構造制御を実証した。

内田昌志（藤田教授）「完全格子整合系スピントランジスタに向けたコランダム構造酸化物の成長と物性に関する研究」

コランダム構造の酸化物を用いて、各層が格子整合したスピン FET の構造を提唱した。その基礎として、二次元電子ガスが形成可能なタイプ I 型のヘテロ構造を持ちうることを実験的に明らかにし、またスピン注入界面として、完全に格子整合した $(\text{Ga,Fe})_2\text{O}_3/(\text{In,Ga})_2\text{O}_3$ 界面の形成を実証した。

情報学研究科 知能情報学専攻

Yevgeniy Puzikov（黒橋教授）「Improving Graph-based Abstract Meaning Representation Parsing by Flexible Subgraph Generation」（柔軟な部分グラフ生成を用いたグラフベース抽象意味表現解析の改善）

計算機によるテキスト理解に向けて、文を抽象意味表現（Abstract Meaning Representation）と呼ばれる表現形式に変換するタスクに取り組んだ。グラフベースのアプローチに焦点を当て、柔軟性のある部分グラフ生成過程を組み込む手法を提案し、精度向上を達成した。

稲村和樹（黒橋教授）「大規模名詞格フレームの自動構築と名詞間関係解析への応用」

テキスト中の名詞間の関係解析には名詞格フレームと呼ばれる語彙的知識が必要である。本研究では、大規模ウェブコーパスから名詞格フレームを自動構築する手法を提案し、構築した名詞格フレームを名詞間関係解析に適用することによってその有効性を確かめた。

大 谷 直 樹 (黒橋教授) 「音声対話システム上の GWAP による常識的知識の獲得」

言葉を理解するためには多くの場面において常識的知識が必要である。本研究は目的をもったゲーム (GWAP) を介して人間から知識を獲得する。ゲームは広く使われている音声対話システム上に公開され、多数のプレイヤーから 1 年間で 20 万種類を超える知識を収集した。

大 月 仁 志 (黒橋教授) 「A Hybrid Replacement based Method to Address Rare Words in Neural Machine Translation」 (ハイブリッドな置き換え手法を用いたニューラル機械翻訳における低頻度語問題の解消)

ニューラル機械翻訳では低頻度語が翻訳の精度に影響を与える。本研究では、低頻度語を高頻度語に置き換える既存手法を拡張し、状況に応じた置き換えをするハイブリッドな手法を提案する。複数の言語対で翻訳評価を行いその有効性を確かめた。

寺 田 凜太郎 (黒橋教授) 「注意型ニューラルネットワークによる非明示的談話関係の自動認識」

非明示的談話関係の自動認識は精度が低く、談話関係解析におけるボトルネックとなっている。本研究では、注意型機構、多層 LSTM、外部語彙関係知識を利用したニューラルネットワークを提案し、既存手法を上回る精度を達成した。

Huang Yin-Jou (黒橋教授) 「Improvement of Shared Argument Identification in Event Knowledge Acquisition」 (事態間知識構築における共有項認識の高度化)

事態間知識は、より高度な自然言語処理アプリケーションを構築するために重要な知識である。本研究では、既存の二段階手法をもとに、関連事態対の共有項識別を改善し、より質の良い事態間知識を構築した。また、人手で構築した共有項正解データで、提案手法の有効性を確認した。

山 内 健 二 (黒橋教授) 「言語類型論的特徴の垂直安定性と水平伝播性の統計的分析」

言語類型論的特徴は、文法や発音といった言語の構造に関する特徴である。本研究は、言語変化を捉えるために必要な、垂直安定性と水平伝播性という性質を各類型論的特徴で定量化し、その結果に言語学上の定性的主張の内容と一致する点があることを確認した。

植 木 康 介 (川嶋准教授) 「ビデオ講義視聴時における受講状態推定のための注意モード遷移を考慮した注視行動モデル」

ビデオ講義受講時の視線パターンから非集中状態の推定を行うために、講師の発話内容に対する追従の有無を考慮した注視行動モデルを提案し、あらかじめ典型的な注視行動を学習することで、受講者の注意状態推定が可能であることを実験により検証した。

Meng-Yu Jennifer Kuo (延原講師) 「One-shot Underwater Active Stereo Through Refractive Parallel Flat Surfaces」 (平行平面屈折層を介したワンショット水中アクティブステレオ)

平面屈折層を介して撮影された水中運動物体の 3 次元形状を推定するために、被写体に格子状のパターン光を投影し、撮影像上で検出された格子パターンと比較することで屈折を考慮した三角測量が可能であることを示し、その有効性を実環境において検証した。

鈴木 達哉 (川嶋准教授) 「変動分散電源のためのオンデマンド型電力制御システム」

太陽光発電などの再生可能エネルギーが導入された需要家内においても、事前に定めた使用計画の遵守が可能な電力制御方式として、変動電源に対して蓄熱機器および蓄電池を協調動作させるオンデマンド型制御アルゴリズムを実装し、シミュレーション実験により有効性を確認した。

田原 都夢 (延原講師) 「複合鏡による符号化パターン光の相互干渉を考慮した仮想多視点アクティブステレオ」

複合鏡を用いた仮想多視点能動ステレオにおいて、投影パターン光が鏡によって多重反射されることで生じる符号衝突を抑制する新たなパターン生成法を考案し、多重照射されたパターン光から3次元形状を復元するアルゴリズムを提案して、実環境においてその有効性を確認した。

橋本 賢治 (延原講師) 「多視点画像を用いた水中半透明物体の3次元形状・透過率分布推定のための多重異方性散乱モデル」

異方性多重散乱を示す半透明物体の3次元形状とその透過率を多視点画像から推定するために、対象の形状および透過率と、物体内部での散乱光をモデル化した点光源群の強度および方向依存性を交互最適化によって推定するアルゴリズムを考案し、実環境においてその有効性を確認した。

情報学研究科 情報通信システム専攻**上野 宏樹 (原田教授) 「TV ホワイトスペース帯広域無線通信システムの受信機構成に関する研究」**

TV ホワイトスペースを利用する広域固定通信システムの国際標準規格 IEEE 802.22 について、ハードウェア規模が比較的小さく実装が容易な無線機実現に向けた搬送波周波数オフセットおよび伝搬チャネル推定方式を提案した。さらに移動通信に応用可能なチャネル推定方式を提案し、所要の通信品質が達成できることを計算機シミュレーションにより示した。

小幡 健太郎 (原田教授) 「広域・移動 M2M 無線通信方式を実現するための受信信号処理法」

広域 Wi-SUN システムにおける端末の小型化、省電力化、および低価格化を目的とした、搬送波周波数オフセットの推定補償法、基地局におけるダイバーシチ受信法、シンボル同期法などの IEEE 802.15.4g 物理層を前提とした高能率受信信号処理法を提案し、計算機シミュレーション評価およびソフトウェア無線機によるオフライン伝送実験によってその有効性を示した。

牧野 仁宣 (原田教授) 「VHF 帯広域ブロードバンド移動通信システムにおける受信機構成及び実機実装に関する研究」

VHF 帯広域ブロードバンド移動通信規格 ARIB STD-T103 に準拠し、通信距離数 km 程度の伝搬環境においても良好な伝送特性を達成することが可能な高能率受信機構成を提案し、計算機シミュレーション評価および、提案受信機構成を実装した無線機による実験評価によりその実現性と有効性を検証した。また、さらなる通信エリア拡大を目的としたマルチホップリレーシステムの導入について検討し評価を行なった。

南 翔太郎 (原田教授) 「高周波数帯を用いた端末共同受信信号処理に関する研究」

端末共同受信信号処理システムにおける端末数と受信特性及び計算量の関係を計算機シミュレーションならびに屋外伝送実験によって明らかにし、端末数の増加によって演算量を低減し得ることを示した。

また端末を適切に選択する方法について計算機シミュレーションによる検討を行った。

望 月 健太郎 (原田教授) 「低消費電力広域ワイヤレススマートユーティリティーネットワーク」

デバイスの省電力化とカバレッジエリアの広域化を同時に実現する低消費電力広域 Wi-SUN システムを提案し、以外地環境における屋外伝送実験を行うことで、提案システムの実現可能性を評価した。また、さらなるデバイスの省電力化を実現する新たな受信機構成を提案した。

飯 田 直 人 (守倉教授) 「全二重通信無線 LAN におけるメディアアクセス制御」

同一周波数全二重通信無線 LAN において、全二重通信を用いることによる利得を最大化するためのフレーム時間長最適化手法を提案した。さらに、全二重通信特有の干渉の影響を低減しつつ、公平性や遅延時間を考慮可能な通信端末組み合わせ選択手法を提案した。

大 戸 琢 也 (守倉教授) 「Stochastic Analysis of Channel-Adaptive Scheduling for Downlink and Full-Duplex Communications」 (下り回線通信と全二重通信のためのチャネル適応的スケジューリングの確率解析)

全二重セルラネットワークとセルラネットワークの下り回線通信におけるチャネル適応的スケジューリングの確率解析を行った。全二重セルラネットワークについてはシステム容量を定式化し、セルラネットワークについては下り回線でスケジューリングを行った際の確率幾何解析を行った。

小 熊 優 太 (守倉教授) 「Camera-assisted Proactive mmWave Access Control Based on Human Blockage Prediction」 (人体遮蔽予測に基づくカメラを用いたプロアクティブミリ波アクセス制御)

ミリ波通信における人体遮蔽問題を抜本的に解決する提案として、RGB-D カメラを用いた人体遮蔽予測とプロアクティブ (事前) 通信制御手法を提案し、実験的、理論的にその有効性を示した。また、確率幾何学を用いたカメラとミリ波基地局の配置問題も提案した。

神 矢 翔太郎 (守倉教授) 「Spatial Co-channel Overlap Mitigation through Potential Game-based Channel Assignment in Dense WLANs」 (高密度無線 LAN における空間的カバレッジ重複削減に向けたポテンシャルゲームに基づくチャネル制御)

高密度無線 LAN における送信局同士のチャネル競合を緩和するため、アクセスポイント間のカバー領域の重複を低減する分散的チャネル制御法を提案した。ポテンシャルゲームと呼ばれる理論的枠組みに基づく検討により、分散制御の収束性を示した。

船 引 魁 人 (守倉教授) 「長遅延を含む無線 LAN のメディアアクセス制御の研究」

長遅延を含む WLAN と既存 WLAN の共存環境を想定し、長遅延を含む WLAN の伝搬遅延がシステムに与える影響に対して、AP のスループットを補償する MAC プロトコルを提案した。さらに、オフロードの変化に応じた AP のアクセス方式の制御手法を提案した。

伊 藤 直 輝 (新熊准教授) 「コンテンツ配信ネットワークにおける推薦システムに関する研究」

従来のコンテンツ配信ネットワークではコンテンツをユーザに近いサーバにキャッシュすることによる帯域利用効率の向上が図られていたが、コンテンツが使用されない場合キャッシュ容量や帯域が浪費されてしまう。本研究ではキャッシュされたコンテンツをユーザに推薦するシステムを提案し、その有

効性を示した。

後 藤 祐 貴 (新熊准教授) 「ワイヤレスネットワークにおける動的割当制御の研究」

モバイルネットワークにおけるアプリケーションの特性に応じたトラフィック制御ならびに小型無人航空機によって構成される無線メッシュネットワークを対象に、通信資源を動的割り当てるためのスケジューリング方式について研究を行ない、それぞれ数値評価により有効性を示した。

杉 本 有 輝 (新熊准教授) 「時間特性に基づくユーザ間の通信機会のモデル化に関する研究」

ユーザ間の通信機会を分析し、次の通信機会を予測するといった試みが行なわれている。しかし、従来は通信機会の時間的特徴をモデル化する有効な手法がなかった。本研究では、ユーザ間の通信機会の時間的特徴を周波数領域の指標を用いてモデル化する手法を提案し、その有効性を示した。

田 中 祐 輔 (新熊准教授) 「モバイルネットワークにおけるトラフィック平準化のためのユーザ誘導システム」

従来のモバイルネットワークでは特定の時間帯にトラフィックのピークが発生することによるネットワーク負荷やユーザ体感品質の低下が問題となっていた。本研究ではピーク発生時にユーザをオフピーク時間に誘導することでトラフィックの平準化を行なうシステムを提案し、その有効性を示した。

凌 嘉 良 (佐藤 (高) 教授) 「環境との熱交換を考慮した回路シミュレータによる MOSFET の電熱解析」

環境との熱交換を考慮したパワーデバイスの電熱解析モデルを提案した。商用パワー MOSFET を対象とし、熱対流やヒートシンク付き構造を考慮した電熱解析を行った結果、既存モデルに比べてドレイン電流の最大誤差を 11.2% から 4.6% に削減できた。

岸 野 瞬 士 (佐藤 (高) 教授) 「複数指操作可能なポインティングデバイスの実現に向けた格子状電極を持つ電界センサ」

複数指による操作可能なポインティングデバイスの実現に向け、格子状電極を持つ電界センサを提案した。既存センサより多数の電極を配置することにより、2つの接地導体の位置を誤差 2mm 以内で検出し、2点スワイプジェスチャの認識率 97% を実現した。

小 西 慧 (佐藤 (高) 教授) 「動画圧縮センシングにおけるフレーム間相関を利用した復元性能の向上」

動画圧縮センシングにおいて時間相関を利用する高速復元手法と高画質復元手法を提案した。前者は前フレームの復元値を初期値に用いることで従来法より 28 倍の高速化を、後者は時間方向に複数フレームをまとめて復元することで従来法より 2dB の高画質化を達成した。

吉 永 幹 (佐藤 (高) 教授) 「リング発振器出力の瞬時値を返り値とする機械学習攻撃耐性に優れたチップ ID 生成回路」

チップ認証に用いる ID 生成回路を提案した。提案回路方式ではリング発振器の発振開始から一定時間後の状態を出力値とすることで、優れた機械学習攻撃耐性を実現する。数値実験により、提案方式が複数の攻撃手法について従来方式より優れた耐性を示すことを示した。

周 瑞 (佐藤 (高) 教授) 「寄生成分を考慮した電荷基準に基づく縦型 SiC パワー MOSFET のシミュレーションモデル」

寄生成分を考慮した SiC パワー MOSFET のデバイスモデルを提案した。提案モデルは、電荷基準モデル及びデバイスシミュレーションにより得た寄生成分の電圧依存性に基づく。実デバイスを用いた過渡特性の実測と比べて、既存モデルより 1.5 倍以上正確であることを示した。

辺 松 (佐藤 (高) 教授) 「PINO: A Framework for Predicting and Mitigating NBTI Degradation in Processor-Scale Designs」 (PINO: 大規模集積回路における NBTI 劣化の予測および緩和に向けたフレームワーク)

負バイアス温度不安定性 (NBTI) による劣化後の遅延解析及び緩和を、大規模回路において正確かつ高速に行えるフレームワークを提案した。数値実験により、プロセッサの遅延解析を最大 5.6% の精度で実現し、その寿命を最大 6 倍伸ばせることを示した。

都 築 祐 亮 (小野寺教授) 「電源電圧と基板電圧独立調節によるプロセッサのエネルギー効率最大化」

スタンダードセル方式で実現されるプロセッサを対象として、消費エネルギーに対する処理量 (エネルギー効率) を最大化する方法を検討した。スタンダードセルの設計指針を示すと共に、電源電圧と N 型および P 型基板の電圧を独立に制御する方法の有効性を明かにした。

中 井 辰 哉 (小野寺教授) 「リングオシレータを用いたランダムテレグラフのイズの統計モデル化」

トランジスタのしきい値電圧が時間的に変動するランダムテレグラフノイズにより、リングオシレータの発振周期は時間的に変動する。多数の測定結果から得た変動量の統計的分布から、ランダムテレグラフノイズによるしきい値変動量分布を表す統計モデルを作成した。

中 尾 拓 矢 (小野寺教授) 「多チャンネル実装に向けたエネルギー効率の高い多段構成トランスインピーダンスアンプ」

光インターコネクタに用いるためのエネルギー効率の高いインバータ型トランスインピーダンスアンプを設計した。インダクティブピーキングによる帯域伸長法やカスケード段数の決定法を示し、多チャンネル実装時の電源バウンス低減を目指した補償回路を提案した。

穴 吹 元 嗣 (佐藤 (亨) 教授) 「UWB ドップラーレーダ干渉計とアダプティブアレイ処理を用いた複数歩行者イメージングと分離識別」

少数アレイのアンテナを利用した高分解能イメージング法として、UWB (超広帯域) ドップラーレーダ干渉計法が提案されているが、複数目標が存在する場合にイメージング精度が低下する問題があった。これを、アダプティブアレイ処理を併用することで解決し高解像度を得た。

今 西 亮 介 (佐藤 (亨) 教授) 「UWB ドップラーレーダを用いた身体各部位からの非接触心拍推定」

呼吸や心拍などの生体情報の遠隔測定に UWB (超広帯域) ドップラーレーダが有望視されている。胸部を含む複数の身体部位からの心拍推定精度の比較、静止干渉波除去及びアダプティブ信号処理法による心拍推定精度の改善、複数の被験者による心拍推定精度の比較を行った。

上品彰斗 (佐藤 (亨) 教授) 「超広帯域レーダを用いた時間・距離情報の適応的信号処理に基づく複数運動目標の分離」

1組の送受信アンテナを用いた簡易なシステムにおける目標の速度推定法としてテクスチャ法が提案されている。本研究ではこれに替わる手法として適応的信号処理の1つである ESPRIT 法を受信信号の時間・距離情報に適用する手法を提案して、精度の大幅な向上を実現した。

浦田一生 (佐藤 (亨) 教授) 「UWB マルチドップラーレーダとアダプティブアレイ処理を用いた複数運動目標の断面形状推定」

複数の UWB (超広帯域) ドップラーレーダにより構成されるシステムを用いて同時に複数の運動目標を観測し、その断面形状を正確に推定する手法を提案した。アダプティブアレイ処理を導入することにより従来の手法より高い距離分解能を実現した。

前原勝利 (佐藤 (亨) 教授) 「適応型ビームフォーミングを用いた複数人体のバイタル信号分離技術」

UWB (超広帯域) ドップラーレーダを用いて、2人の人体が近接して存在する状況下において受信されるバイタル信号から、アダプティブ信号処理により各々の目標のバイタル信号を分離する手法を提案し、シミュレーションと実験により性能を検証した。

情報学研究科 システム科学専攻

内橋堅志 (石井教授) 「敵対的生成モデルを用いた電子顕微鏡画像からの神経細胞膜セグメンテーション」

連続切片電子顕微鏡画像から神経細胞の3D構造を再構成するため、条件付き敵対的生成モデルを用いた画像変換による細胞膜セグメンテーションを行った。ベンチマークデータセットで、小さな計算コストによる良好なセグメンテーション精度を示した。

児玉悠 (石井教授) 「アイテム特徴ベクトルを用いた多様性を保持する推薦システムの提案」

ユーザー嗜好予測に基づく商品推薦システムにおいて、推薦リスト内アイテムの多様性を向上させる手法を提案し、嗜好予測の精度を大きく悪化させずに推薦リスト内のアイテム多様性を向上できることを示した。

濱田恭行 (石井教授) 「Saliency に基づく動画観視時の事象関連電位解析」

ヒトの自然動画観視時の脳波計測を行い、動画内容の急変に関する事象関連電位 (ERP) を調べた。動画 Saliency に基づく特徴量によって、統計的に有意な ERP が検出できることを示した。

淵上卓也 (石井教授) 「拡散テンソル画像に基づく位置合わせを用いた被験者転移デコーディング」

被験者の脳内状態を読み取るデコーダを、異なる被験者の脳活動データに基づいて学習する転移デコーディングを行った。拡散テンソル画像を用いた脳構造の位置合わせを用いることで、T1 強調画像を用いた場合と比較した場合の性能改善を示した。

矢野泰樹 (石井教授) 「確率的最適制御問題における反復的方策改善手法の提案」

最近提案された確率的最適制御法のひとつである KL 制御手法では、制御方策が特定の状態遷移確率

に大きく影響を受けてしまう問題があった。制御方策を反復的に更新することで近似解を得る手法を提案し、近似精度が高いことを示した。

川崎 李穂 (松田教授) 「腭骨片を用いた下顎骨再建計画のスパースモデリング」

腭骨片を用いた下顎骨再建を対象として、過去の手術計画データを用いて患者固有の腭骨配置を自動決定するスパースモデリングの概念を提案した。医師の計画に近い再建計画を算出できること、術前計画において重要な指標となる下顎の形態的特徴を抽出できることを確認した。

齋藤 陽 (松田教授) 「画素情報に基づく外力制約の最適化による弾性体のモデルベース変形推定」

単眼カメラから取得した画像と有限要素モデルのレンダリング画像との画素情報の差分を最小化する外力制約に基づいて変形を算出する弾性体の変形推定方法を提案した。弾性ファントムと動物の肝臓を用いた実験を通して、提案方法が変形推定に有効であることを確認した。

坂田 良平 (松田教授) 「弾性体の局所変位観測に基づく外力推定に剛性マトリクスの条件数が及ぼす影響」

有限要素モデルへスパース推定の概念を導入することによる、弾性体の局所変位観測に基づく外力推定方法を提案した。物体表面の変位の部分観測によって弾性体の引張変形時の外力を推定可能であることを示し、剛性マトリクスの条件数と推定精度の関係を明らかにした。

西村 優汰 (松田教授) 「心筋細胞モデルとミトコンドリア精密モデルの統合によるアシドーシス下の代謝機能変化の解析」

酸素供給の低下によりアシドーシス（酸性化）に陥った心筋細胞の代謝機能の変化を明らかにするため、アシドーシス下でのシミュレーションが可能な心筋細胞モデルを構築し、その妥当性を確認した。また、アシドーシス下ではミトコンドリア内の酵素反応が活性化することを明らかにした。

呉 裊旋 (松田教授) 「Theoretical explanation of spectral line shape in the Chemical Exchange Saturation Transfer (CEST) MRI of Dopamine」 (ドパミンの CEST MRI におけるスペクトル波形の理論的検討)

MRI における化学交換飽和移動 (CEST) 法を用いて神経伝達物質であるドパミンの検出可能性を実験的に検証するとともに、ブロッホ方程式に基づく CEST スペクトル波形の理論的検討から、ドパミンの CEST MRI 計測結果の正確な評価につながる新たな知見が得られた。

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

遠藤 竜太 (下田教授) 「多視点裸眼立体視ディスプレイ LuminantCube の表示性能向上」

本研究では、微小空隙でのレーザー光拡散を利用した裸眼立体視ディスプレイの実用化に向けて、空隙形状の改良、カリブレーション手法の改良、プロジェクタの複数台化を通して解像度の向上とコントラスト比の向上を実現した。

下中 尚忠 (下田教授) 「集中の深さに着目した知的生産性の定量的評価」

本研究は、集中の深さの変化を考慮して知的生産性を定量的に評価することを目的とし、作業集中モデルおよび集中指標 MCTR、CDI を開発した。そして、モチベーションの向上や温熱刺激が集中の深

さに影響して知的生産性を向上させることを定量的に示した。

杉 田 耕 介 (下田教授) 「執務環境と休憩環境の統合温熱制御が知的集中へ及ぼす影響の実験研究」

本研究では、執務環境と休憩環境における室温制御に着目し、2つの環境間にある温度差の影響を考慮した統合的な室温制御法を夏期と冬期において提案し、知的生産性への影響を評価した。その結果、夏期において知的生産性向上の効果が見られた。

木 村 太 郎 (下田教授) 「環境再構成モデルによるレンダリング画像を利用したリローカリゼーション手法の開発」

拡張現実感を利用した原子力発電プラントの解体作業支援にはリローカリゼーションと呼ばれる技術が必要である。本研究では、環境再構成モデルによるレンダリング画像を利用することにより、広い範囲でリローカリゼーションを可能にする手法を開発した。

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

松 山 顕 也 (中村 (祐) 教授) 「トーラスプラズマに対する MHD 平衡計算コードの開発」

トカマクプラズマは弱いながらも非軸対称性を持ち、その影響の理解が求められている。この非軸対称な平衡状態を計算する数値シミュレーションコードを開発し、閉じ込め装置のコイルに流れる指定された電流から、生成されるプラズマの形状を正確に求めることを可能にした。

松 下 健太郎 (中村 (祐) 教授) 「ヘリオトロン」におけるモーメント法を用いた新古典輸送解析」

トーラス磁場中の粒子ドリフト運動とクーロン衝突の相乗効果で起こる新古典輸送はヘリオトロン装置の閉じ込め性能を規定する。この新古典輸送をモーメント法に基づく数値シミュレーションによって解析し、トロイダル方向磁場強度が輸送を低減することを示した。

濱 中 幸 太 (中村 (祐) 教授) 「トカマクプラズマにおける内部キンクモードと分岐 MHD 平衡」

プラズマ表面の形状が同じ軸対称であってもコア部分が軸対称または非軸対称な平衡状態が現れる。この分岐平衡の形成機構を理解する目的で電磁流体シミュレーションを行い、非軸対称状態の形成過程に圧力駆動型不安定性の非線形相互作用が重要であ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

下 田 佑太郎 (土井教授) 「MgB₂ 超伝導薄膜の高臨界電流密度化および Cu テープを用いた線材化の検討」

MgB₂ 超伝導線材の実用化を目指して、ポストアニールによる高臨界電流密度化を試み、超伝導臨界温度および臨界電流密度が向上することを明らかにした。また安定化層として働く Cu テープ上への MgB₂ 超伝導薄膜を直接形成することが可能であることを示した。

森 村 岳 雄 (土井教授) 「配向 Cu テープを基材とした YBa₂Cu₃O₇ 超伝導線材に適する Ti 酸化物系導電性中間層の開発及びその安定化効果」

{100}<001> 集合組織 Cu テープ上に Nb ドープにより導電化した各種 Ti 酸化物系酸化物をエピタキシャル成長させ、その上に YBa₂Cu₃O₇ 超伝導薄膜をエピタキシャル成長させることで、高性能低コスト

トな高温超伝導線材の開発を試みた。新規線材において、従来構造と同等の高い性能と大幅な低コスト化が達せできる見通しを示した。

喜多村 康 平 (土井教授) 「電磁鋼板を基材とした YBa₂Cu₃O₇ 超伝導線材における中間層構造の最適化」

電磁鋼板を基材とした超低コスト高温超伝導線材の開発に向けて、安定化ジルコニアとセリアをエピタキシャル成長させるバッファ層構造の検討を行い、良好な 2 軸配向が得られることを示した。

西 岡 寛 広 (土井教授) 「双晶組織を含む希土類系高温超伝導物質の磁気異方性の向上及び二軸磁場配向」

結晶粒内に双晶組織を含むために、実質的な磁気異方性が低下することから磁場配向法の適用に不利であると考えられてきた希土類系高温超伝導物質について、磁場配向法を用いて 3 軸結晶配向を実現するために好ましい組成、粉末製造条件、磁場配向プロセスパラメータの組み合わせを明らかにした。

井 上 大 輔 (白井教授) 「模擬電力システムを用いた微小擾乱注入手法による動的負荷モデリング」

能動的な制御特性を持つ負荷や分散型電源を含む配電系統等の動特性を評価するため、実機で構成したモデルシステムにおいて微小擾乱注入によるオンラインの応答特性から負荷の動特性モデルを作成し、AVR 特性の同定モデルへの影響について評価を行った。

玉 嶋 愛 美 (白井教授) 「Improvement of Recovery Characteristics of GdBCO tape with Several Surface Conditions for Resistive Superconducting Fault Current Limiter」 (抵抗形超電導限流器を目的とした GdBCO 線材の表面状態改変による復帰特性向上)

抵抗型超電導限流器の限流動作後の復帰特性改善を目的として、液体窒素に浸漬した YBCO 超電導テープ線材表面改質を行い、沸騰冷却現象をビデオ観察した。表面にフィン取り付けあるいは PTFE コーティングを行うと、沸騰膜の形成が不安定となり、超電導への復帰時間が大幅に短縮できることを確認した。

向 麻理子 (白井教授) 「REBCO 線材を使用した変圧器磁気遮蔽型超電導限流器の限流特性」

REBCO 線材を用いた変圧器磁気遮蔽型の超電導三相限流器を設計製作し、基礎特性試験を行った。故障電流が増加するにつれ、リアクタンス成分による限流から抵抗成分による限流に移行していくことが確認できた。さらに、実験室規模の模擬システムにおいて動作実験を行い、最小故障除去時間を評価することで系統安定度向上効果を確認した。

飼 沼 徹 (白井教授) 「液体水素浸漬冷却における MgB₂ 超電導線材の臨界電流特性・常電導伝搬特性」

液体水素浸漬冷却における MgB₂ 超電導線材の外部磁場下での臨界電流特性及び、クエンチ保護の観点から重要な常電導伝搬特性の定量的評価を実施した。さらに、液体水素冷却超電導機器の開発へ応用することを想定し、液体水素の過渡的冷却効果を考慮した、超電導線材のクエンチ時の熱的挙動シミュレーションモデルを作製した。

谷内田 貴 行 (白井教授) 「高安定電源システムを用いた電流制御による高温超電導 MRI マグネットの磁場安定度向上」

高温超電導線材を用いたヘリウムフリーの伝導冷却 MRI マグネットの開発においては、遮蔽電流による磁場変動と永久電流モードの実現が容易ではないという問題がある。32 H の 3T 高温超電導 MRI マグネットおよび高安定電源システムを設計・導入し、遮蔽電流の影響の抑制と電源安定度向上のための手法を提案し、イメージングに必要とされる 1 ppm/hour 以下の磁場安定度を達成した。

エネルギー理工学研究所**Dagbede Tchedessou Marcel (長崎教授) 「張力準安定流体中性子検出器を用いた閾値エネルギー中性子解析法による高濃縮ウランの検知実験」**

DD 核融合中性子源の単色性と張力準安定流体中性子検出器の閾エネルギー特性を利用した閾値エネルギー中性子解析法による高濃縮ウラン検知性能を実験的に評価し、テロ対策のための実用的な不審物検査システムに必要な検出器台数や中性子源強度などの要件を明らかにした。

守 田 健 一 (長崎教授) 「LaB₆ および CeB₆ 光陰極の陰極温度・照射レーザー波長特性の計測とモデリングに関する研究」

高周波電子銃の性能向上に繋がると期待される熱励起補助光電子放出機構について、候補陰極材料である LaB₆ および CeB₆ からの電子放出特性を測定して陰極温度、照射レーザー波長およびレーザー強度への依存性を明らかにし、これらの特性を説明する熱励起補助光電子放出モデルについて考察した。

山 田 晃 生 (長崎教授) 「ヘリオトロン J における電子密度揺動径方向相関計測のための Ka バンドマイクロ波反射計の改良」

ヘリオトロン J において、電子密度揺動相関計測用 Ka バンドマイクロ波反射計システムの改良を行い、プラズマ実験に適用した。スパイクノイズを除去するとともに、ペレット入射実験においてカットオフ密度に応答して I/Q 信号が増大していることから反射計が正常な動作をしていることを確認した。

飯 村 幹 (水内教授) 「ヘリオトロン J 高密度プラズマにおけるプラズマ周辺発光分布の高速カメラを用いた特性解析」

ヘリオトロン J 高密度 NBI プラズマの周辺プラズマ揺動の特徴を、高速カメラ計測をもとに調べた。周辺部発光強度の揺らぎは、通常電子反磁性方向へ回転するが、高密度時の改善閉じ込めモードでは、揺動回転速度が上昇し、揺動構造が細くなることを見出した。

國 分 大 (水内教授) 「ヘリオトロン J における高速イオン励起 MHD 不安定性に伴う密度揺動分布のビーム放射分光計測」

ビーム放射分光法を用いて密度揺動分布を計測し電子サイクロトロン波加熱・電流駆動による高速イオン励起 MHD 不安定性の抑制効果を調べたところ、ヘリオトロン J 低バンピネス配位において高速粒子モードが加熱パワーの増加に伴って安定化されることがわかった。

野 崎 勇 樹 (水内教授) 「ヘリオトロン J における密度計測用干渉計に用いる HCN レーザーの高出力化を目指した研究」

ヘリオトロン J 密度計測干渉計の多チャンネル化に向け、光源である HCN レーザー高出力化のため、

複数の運転パラメータを系統的に調べ、高出力化への指針を示した。同時に、現状では直接制御が困難な放電管壁上の成膜制御の重要性も確認し、その制御法に関しても議論した。

望 月 聡一郎 (水内教授) 「ヘリオトロン J」における高密度プラズマの電子密度分布・電子温度分布特性の研究

ヘリオトロン J 装置では高強度ガスパフ (HIGP) あるいはペレットを用いた高密度プラズマ生成を試みているが、Nd:YAG レーザートムソン散乱装置で電子密度・温度分布の時間発展を計測し、異なる粒子供給方法によるプラズマ分布の時間発展の違いを明らかにした。

多和田 齊 興 (岡田准教授) 「ヘリオトロン J」におけるシンチレータ型損失高速イオンプローブの開発

高速イオン励起 MHD 不安定性起因の高速イオン損失の物理機構解明のために、損失高速イオンの特性を計測可能なシンチレータ型損失高速イオンプローブを開発し、高速イオン励起 MHD 不安定性に起因した損失高速イオン計測から高速イオン損失の物理機構を調べた。

白波瀬 一 貴 (門准教授) 「ヘリオトロン J」における真空紫外分光システムのための検出器光学系評価に関する研究

ヘリオトロン J の高密度プラズマの電子密度、電子温度分布から推定される制動放射スペクトルを利用し、真空紫外分光器の分光感度較正を行い、有効電荷数あたりの分光放射輝度が推定可能となった。MCP 背面の検出器を 2 次元仕様に拡張し、結合光学系および計測システムの最適評価を行った。

生存圏研究所

森 昂 志 (山本教授) 「Study on atmospheric structure based on simultaneous observations with UAV and the MU Radar」 (小型無人航空機・MU レーダー同時観測による大気成層構造の研究)

信楽 MU 観測所で小型無人航空機 (UAV)・MU レーダー同時観測実験が実施された。本研究ではその観測データを用いて大気成層構造について、下部対流圏の強いエコー層近傍で観測された大きな気温変動と、MU レーダーと UAV から推定された屈折率勾配について比較・検討した。

岩 田 桂 一 (山本教授) 「新型のビーコン衛星に対応する電離圏全電子数推定用受信システムの開発」

電離圏全電子数測定のための新型ビーコン衛星に対応する受信システムを開発した。既存の 150MHz、400MHz に加えて、965MHz と 1067MHz の利用が計画されており、同時に 3 周波数を受信可能とするため、複数のソフトウェア無線 (SDR) 機器を用いた受信システムを開発した。

伊 藤 直 (津田教授) 「稠密 GNSS 受信ネットワークによる可降水量の時間空間変動のリアルタイム観測に関する研究」

局地的大雨のリアルタイム予報のため、滋賀県信楽町に構築した GNSS 受信機ネットワークを用いた可降水量の時空間変動のリアルタイム観測システムを開発した。特に、1 周波 GNSS 受信機を用いた電離層遅延補正、標高差に伴う可降水量空間変動補正の手法を確立した。

田 畑 啓 (津田教授) 「EAR-RASS による赤道域の気温プロファイルの観測に関する研究」

赤道大気レーダー (EAR) に高出力スピーカーボックスを配置し、RASS 法による赤道大気温度の観

測システムを構築した。3次元 ray tracing により音波面形状を計算し、Bragg 条件を満たす EAR ビーム方向を推定した。ラジオゾンデで同時観測された気温との RMS 誤差は 0.3K であった。

岩 堀 太 紀 (山川教授) 「MU レーダを用いたスペースデブリの形状推定の精度向上に関する研究」

地球周回軌道上の衛星等の残骸であるスペースデブリの大きさ・スピン・形状をレーダ観測により推定することを目的とし、SRDI 法 (単一レンジドップラー干渉法) における時間周波数解析のパラメータを最適化し、計算機シミュレーション、および、実際の MU レーダ観測を通じて、推定精度を向上させた。

西 村 泰 河 (山川教授) 「MU レーダの観測によるスペースデブリの軌道決定手法に関する研究」

地球周回軌道上のスペースデブリの軌道 6 要素をレーダ観測により推定することを目的とし、軌道推定アルゴリズムを構築したうえで、MU レーダの観測パラメータを最適化して、MU レーダの実際の観測、および、計算機シミュレーションを通じて、再観測が可能なレベルの軌道推定精度を実現した。

宮 崎 大 志 (大村教授) 「プラズマ圏ヒスの微細構造の解析」

プラズマ圏で頻繁に観測されるホイッスラーモード・ヒス放射のスペクトルの微細構造を解析した。最近の非線形波動成長理論に基づいて、Van Allen Probes で観測された波動スペクトル構造を分類し、その振幅と周波数の関係を検証した。

**辻 浩 季 (大村教授) 「Impact of Interplanetary Shock on Ions in the Inner Magnetosphere」
(内部磁気圏イオンに対する惑星間空間衝撃波の影響)**

惑星間空間衝撃波が到来すると磁気圏は圧縮され、電磁流体速達波が磁気圏中を伝搬する。速達波の波面とともに運動をするイオンは選択的に加速され、特異なエネルギー分散構造を示すことを電磁流体シミュレーションと粒子シミュレーションで明らかにした。

蟻 正 悟 史 (篠原教授) 「工業的大量生産のためのチタンのマイクロ波焼結装置の設計」

反射波および透過波からチタン粉末の実効誘電率、実効透磁率を電磁界シミュレーションにより計算した。方形空洞共振器型の照射装置をシミュレーションにより設計して簡易試作した結果、6割程度のマイクロ波がチタン粉末試料に吸収されていることが推測された。

王 策 (篠原教授) 「Study on Rectifier for a Satellite Internal Wireless Power Transfer System」 (人工衛星内部ワイヤレス給電システムの整流回路に関する研究)

人工衛星内部の電力および情報通信の無線化を目指し、チャージポンプ回路と F 級負荷を組み合わせた 5.8GHz 整流回路の設計、試作を行った。実測結果より、最適負荷 1.3k Ω 、入力電力 30mW において最大マイクロ波-直流変換効率 71% を達成した。

兒 島 清志朗 (篠原教授) 「放射近傍界におけるアレーアンテナ間高効率無線電力伝送に関する研究」

24GHz 帯電力分配型 16 素子、64 素子、256 素子アレーアンテナを製作し、近距離でのアレーアンテナ間無線電力伝送実験を行った。発生損失をアンテナ損失、反射損失、ビーム形成損失、合成損失に分類し、電磁界/回路シミュレーションを用いて各損失を定量的に評価した。

平山啓太 (篠原教授) 「2.45GHz 帯マグネトロンの発振効率と雑音改善のための研究」

3次元粒子シミュレーションおよび実測実験により、市販電子レンジに搭載されている 2.45GHz 帯マグネトロンの発振効率と雑音スペクトルを評価した。電磁界シミュレーションによりマグネロン内に発生する電磁界共振モードを解析し、雑音スペクトルとの対応付けを行った。

学術情報メディアセンター**宮川岳士 (中村 (裕) 教授) 「筋電位を用いた複数筋の協調関係分析」**

複数の筋肉が関与する運動における各筋の協調関係について分析を行った。表面筋電位による筋活性度の計測、およびウェーブレットコヒーレンスを用いた解析から、主導筋と拮抗筋の協調関係に対していくつかのパターンが存在することが明らかとなった。

高校生のページ

人に寄り添う安全安心なコンピュータの実現を目指して

情報学研究科 通信情報システム専攻 集積システム工学講座 大規模集積回路分野
石原 亨、小野寺 秀俊

1. コンピュータの消費エネルギーと信頼性

今日の高度情報化社会は図1に示すとおり、多くのコンピュータシステムによって支えられています。最近良く耳にする人工知能（AI）や深層学習（Deep Learning）もコンピュータシステムとその上で動作するソフトウェアプログラムによって実現されています。コンピュータシステムはスマートフォンやパソコンなどの分かりやすい情報通信機器だけでなく、冷蔵庫やエアコンなどの家電製品や自動車あるいはエレベータなどに組み込まれ、我々の生活をそれとなく支えています。これらコンピュータシステムの頭脳を果たしているのがSystem-on-Chip（以下SoC）です。SoCは様々な信号処理機能を1つの半導体チップ上に集積した超多機能集積回路です。SoCは典型的には10mW～10W程度の電力を消費します。仮に、日本人が1人当たり1つのSoCを使用しているとする、単純計算では日本だけで最大130万kWにも及ぶ電力を消費することになります。これは、原子炉2基～5基分に相当する電力です。

最近では人間だけでなく“モノ”がインターネットにつながって自律的に情報をやりとりするInternet of Things（IoT）の世界が現実のものとなりつつあります。スマートフォンは当然ですが、例えば監視カメラやバス停留所の時刻表、あるいは家庭の洗濯機や地下鉄の改札機がインターネットに繋がる時代もそう遠くはないかもしれません。防犯システムに必要な監視カメラは、カメラ自体のコストよりも電源を設置するためのコストの方が大きくなるが多いため、乾電池や太陽電池などによって、

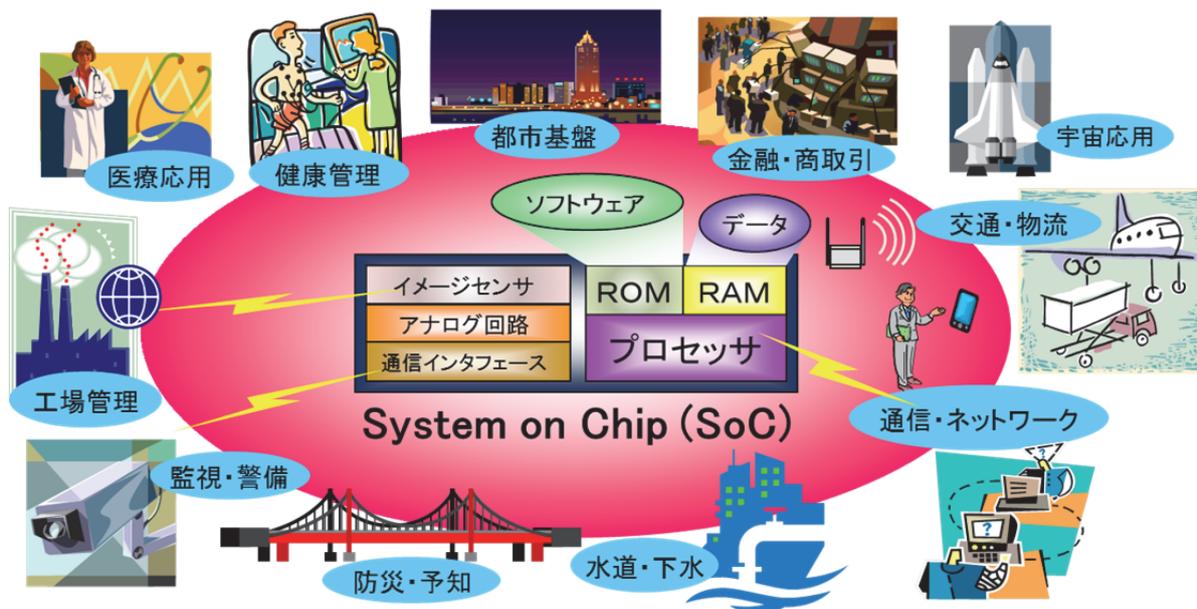


図1 高度情報化社会とコンピュータシステムの役割

電源敷設コストをなくすことができれば監視システム全体のコストを大幅に抑えることができます。また、太陽電池や小型の風力発電機などによって環境から採取する自然エネルギーのみを使用して監視カメラと画像処理用 SoC を稼働させることができれば、電気を作る際の二酸化炭素排出量を極小に抑えることができ、社会全体の低炭素化と高度情報化に貢献することになります。今後も今日の高度情報化社会を発展させるためには、コンピュータシステムを低いエネルギーで稼働させる技術が鍵となります。我々の研究室では、SoC の消費エネルギーを大幅に低減することにより、微小な自然エネルギーのみで自律的に動作するコンピュータシステムの研究に取り組んでいます。

一方で半導体チップの微細化と高集積化に伴い、SoC のハードウェア設計は複雑化し、過去 10 年の間に、ハードウェアの設計コスト、マスクコスト、検証コスト、およびテストコストが急激に上昇しました。製品ごとに専用のハードウェアを作り直す旧来のアプローチでは、半導体ビジネスで収益を得ることが極めて難しい状況です。特にスマートフォンや高精細テレビなどのデジタル情報家電は製品サイクルが短く、仕様変更やバージョンアップなどが頻繁に行われるため、これらの状況に柔軟かつ低コストで対応できるアプローチが求められています。また、トランジスタの微細化に伴い、半導体チップの特性ばらつきが大きな問題となっています。同じ設計図に基づいて製造した半導体チップでも 1GHz の動作周波数で正常に動作するチップもあれば、800MHz の動作周波数でしか動作しないチップもあります。トランジスタの漏れ電流による消費電力も深刻な問題です。同じ設計に基づくチップでもトランジスタの個体差により、チップごとに消費電力が異なります。さらに、トランジスタの特性は時間とともに変化することも知られています。製品化された当初は 1GHz の動作周波数で正常に動作していた半導体チップが 1 年後には 800MHz でしか動作しなくなることも起こり得ます。経年変化だけでなく、数分程度の短い間隔でトランジスタの特性がランダムに変動する現象も見つかっています。上記のようなトランジスタの特性変動や経年劣化は SoC の故障の原因となります。図 1 に示したように、今日の高度な情報化社会はコンピュータシステムに強く依存しており、我々の生活は SoC 抜きに考えることはできません。SoC の故障は安全安心な今日の社会システムの根幹を揺るがす大問題につながります。我々の研究室では、刻々と変動するトランジスタ特性の高精度なモデル化と半導体チップの制御技術により、SoC の故障を回避する技術の研究に取り組んでいます。上述の SoC の省エネルギー技術の研究と併せて、SoC の高集積化と大規模化に伴う諸問題の解決に取り組んでいる点が我々の研究室の特徴です。

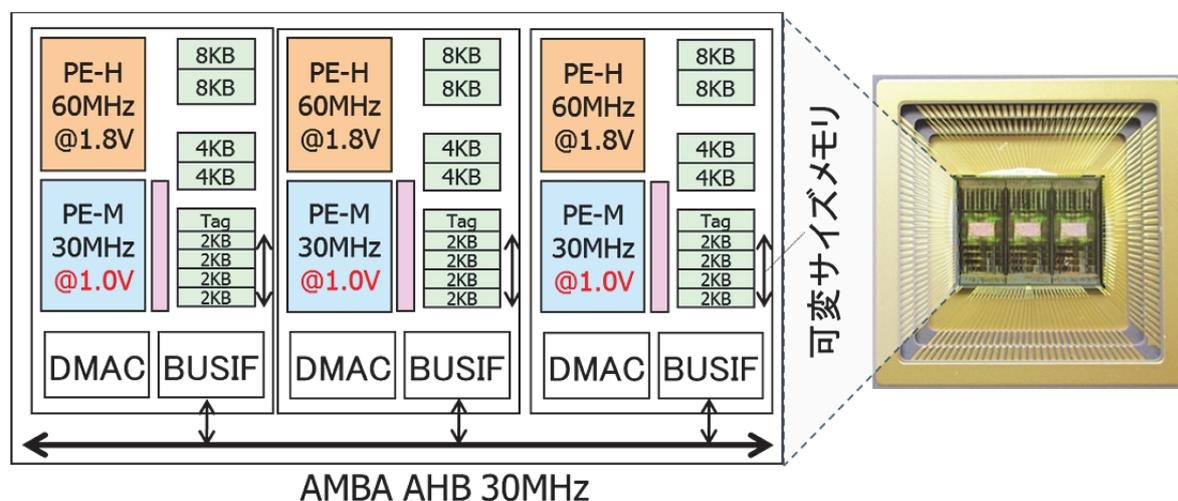


図 2 電源電圧とメモリサイズを瞬時に変更可能なマルチコアプロセッサ

2. コンピュータシステムの省エネルギー化

経済産業省は、2025年にICT機器の消費電力が全消費電力の20%を占めるまでに増大すると試算しています。ICTはInformation and Communication Technologyの略で、ICT機器は情報通信の担い手となる電子機器を表します。ICT機器の中でも特に大きな電力を占めるのがマイクロプロセッサとメモリです。マイクロプロセッサとメモリは、SoCの大部分の機能を担う主要部品です。今日のネットワーク機器や携帯型情報端末は非常に高い性能を必要としますが、時間によってはほとんど何も仕事をしていません。つまり、動物と同じで、狩りをする時や敵から逃げる時のような「いざ」という時には高い性能を必要としますが、ほとんどの時間はのんびり過ごしています。しかし、従来の高性能マイクロプロセッサはのんびりしていても大きな電力を消費してしまい、低消費電力指向のマイクロプロセッサは「いざ」という時でも十分な性能が出せません。我々の研究室では、ピーク時の性能が高く平均消費電力の小さいメリハリの効いたマイクロプロセッサを開発しました。具体的には、電源電圧の異なる複数の中央演算装置（CPU）をチップ上に搭載したマルチコアプロセッサを基に、各々のCPUが使用する電源電圧とメモリのサイズを瞬時に変更する機構を開発しました（図2参照）。CPUの電源電圧を下げると消費電力は電圧の2乗に比例して小さくなりますが、性能も電圧にほぼ比例して悪化します（図3参照）。メモリに関しても、使用するサイズを小さくすることで消費電力を抑えることが出来ますが性能は悪化します（図3参照）。

上述したような消費電力と性能のトレードオフ関係を考慮することによって、必要最小限のメモリサイズと電源電圧を適切に選択して使用することが重要です。我々の研究室では、SoCのハードウェアだけでなく、SoCにとって最適な電源電圧とメモリサイズを動作時に選択するソフトウェア技術を開発しました。具体的には、マイクロプロセッサ上で動作するリアルタイムオペレーティングシステム（以下、リアルタイムOS）が、CPUの最適な動作電圧とメモリサイズを計算する方法を開発しました。リアルタイムOSは、マイクロプロセッサ上で動作する複数のアプリケーションプログラムをタスクと呼ばれる実行単位に分割して、個々のタスクに与えられた制限時間内に全てのタスクを実行します。したがって、リアルタイムOSは個々のタスクがいつまでにその処理を終えればよいかを知っています。我々の研究室で開発した方法は、個々のタスクの制限時間とCPUの性能を基に、各タスクの実行に最低限必要な電源電圧とメモリサイズを算出し、それらをCPUに使用させます。マイクロプロセッサの電源電圧をソフトウェアによって制御する技術は1990年代に提案され、現在ではスマートフォンやノート型コンピュータ向けのプロセッサに応用されています。しかし、初期の電源電圧制御技術はリアルタイムシステムを対象としておらず、タスクの実行時間が正確に考慮されていませんでした。リアルタイムシステムとは与えられた処理を制限時間内に完了するように設計されたコンピュータシステムです。つまり、初期の電源電圧制御技術はタスクの実行時間を気にしなくても良いシステムにしか適用できない技術でした。しかし、今日の社会を支えるコンピュータシステムは実世界との対話が重要となるため実時間性（つまり、リアルタイム性）が求められます。例えば、

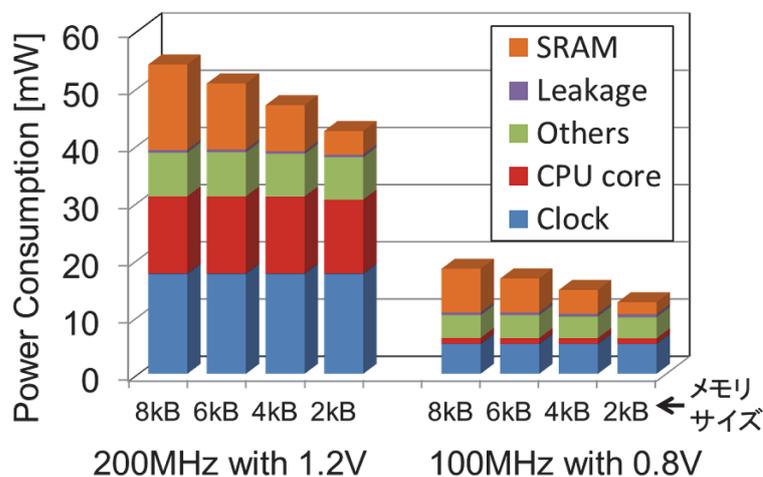


図3 開発したマルチコアプロセッサの消費電力と性能

自動車用の制御機器に組み込まれたCPUの応答性能が悪く、運転者がハンドルを操作してからタイヤが方向を変えるまでに2秒かかったとすると、このCPUは使い物になりません。一般的にCPUの電源電圧を半分に低減するとCPUの動作性能は半分以下に低下し、タスクを制限時間内に処理できなくなる可能性が高くなります。タスクが制限時間内に処理できなければ、電力が低減できてもリアルタイムシステムとしての価値はなくなります。また、初期の電源電圧制御技術は電圧変更に数百マイクロ秒の時間を必要としていたためリアルタイム制御が難しいという問題がありました。我々の研究室で開発したマイクロプロセッサは電源電圧とメモリサイズの変更を $1\mu\text{s}$ 以下で実現します。ドローンなどの自律飛行ロボットや自動車などに組み込まれてリアルタイム制御を行うマイクロプロセッサの省エネルギー化に大きく貢献する技術だと考えています。

3. トランジスタの特性ばらつきと経年劣化への対応

前述のとおり、トランジスタがナノスケールまで微細化すると個々のトランジスタの特性ばらつきの割合が大きくなるのと同時に動的な特性変動や経年劣化の割合も大きくなると考えられています。トランジスタの特性ばらつきや特性変動および経年劣化に対応するための方法として、事前に予備回路をチップに搭載しておきチップ製造後にその予備回路を有効活用する方法とチップに印加するバイアス電圧の設定をチップ製造後に適切に調節する方法を研究しています。トランジスタの特性が設計時の予測より極端に悪くなると、チップに要求される性能を満足できなかったり機能的に正しく動作しなかったりすることがあります。例えば、特性ばらつきの影響で遅延時間が非常に大きいメモリセルや漏れ電流が極端に大きいメモリセルをチップ製造後に検出し、それらのメモリセルが含まれるメモリブロックを無効化して予備メモリブロックに置き換えることにより性能を補償する方法を開発しました。デバイス特性のばらつきをモデル化する研究は数多く行われていますが、チップ設計段階で遅延時間や漏れ電流のばらつきを精度良く見積もることは簡単ではありません。本手法は、チップ製造後にメモリブロックのアクセス遅延時間や漏れ電流を計測し、計測結果に基づいて予備の回路ブロックと置き換えることにより、デバイス特性のばらつきによる負の影響を無視できるほど小さくすることを可能にしました。

最近では、チップの電源電圧とバックゲートバイアス^{*1}をチップ製造後に適切に調節することによりSoCの性能を補償し消費エネルギーを最小値に保つ方法を研究しています。電源電圧を高くすると回路性能と消費電力が共に大きくなります。逆方向に印加するバックゲートバイアスを大きくすると回路性能と漏れ電流は共に小さくなります。したがって、トランジスタの特性ばらつきの具合に応じて適切に電源電圧とバックゲートバイアスを調節することにより、SoCに要求される性能を満足したうえで消費エネルギーを極小化することができます。トランジスタの性能や漏れ電流の量は特性ばらつきや経年劣化だけでなく、温度によっても大きく変化します。そこで、我々の研究室では、SoCの動作中にチップの温度を計測し、温度変化に応じて電源電圧とバックゲートバイアスを動的に調節することにより、SoCに要求される性能を満たしたうえで常に消費エネルギーを最小に保つ手法を研究しています。これらの研究の結果として、信頼性が高く消費エネルギーの小さいコンピュータシステムを実現することを目指しています。

4. 今後の展望

SoCの高性能化に伴う消費エネルギーの増大や半導体デバイスの微細化に伴うデバイス特性のばらつきをチップ製造後の制御によって軽減する技術の研究に取り組んでいます。SoCはハードウェアだけでなく、ハードウェアを制御するソフトウェア技術を含めたシステムとして考えることが重要です。チップ製造後の制御技術によってSoCの性能を補償し消費エネルギーを極小化することができれば、チップの開発コストを大幅に低減することができます。今後ますますチップ開発コストの高騰が心配され

るナノスケール時代に必要不可欠であり、今後の科学・産業技術分野への大きな貢献が期待できる研究と考えています。

※1 バックゲートバイアス

トランジスタのバックゲートに印加するバイアス電圧で、逆方向に掛けるとトランジスタのチャンネル部に電流が流れにくくなり、リーク電流は減少するが、トランジスタの遅延は増大する。

学生の声

「仲良くなるため」の物理」

工学研究科 電子工学専攻 白石研究室 博士後期課程1年 重松 英

私が研究室配属前に抱いていた研究生生活の主なイメージは、研究室の中でひたすらテーマを追いかけ、実験や考察を進めるというものでした。実際には国際学会での発表や研究滞在など国境を越える活動が多いということは想定外でしたが、図らずも国際的な研究交流の醍醐味というものを知ることになりました。私自身は2015年春にベルサイユ大学・パリ第6大学の研究グループに研究滞在する機会を得ました。はじめての海外滞在経験であった不安をよそに、現地の学生やスタッフとコミュニケーション関係を築くのに長い時間はかかりませんでした。この理由について思い返してみると、滞在先との初対面時において、お互いの研究内容についてゼミを行ったことが大きな鍵だったような気がします。一般には、文化的なバックグラウンドが異なる相手とのコミュニケーションには困難が伴うものです。しかし、はじめに研究テーマを紹介しあい同じ科学を究める者として敬意を持ちつつ聞き入る、こういった研究交流特有の“儀式”を経たことが円滑なコミュニケーションの導入に繋がったのではないかと考えるのです。つまり、“仲良くなるための手段として”の研究や物理という観点を得ることができました。国際研究交流は多くの場合、研究自体の発展や深化に目的が据えられているものだと思います。しかし、科学研究を基軸とした交流は異なる文化を持つ人々との関係を構築する“手段”としても有用ではないかと気づきました。広がった視点に立てば、国際的な親善関係はこうした無数の個対個の交流によって支えられている面もあるのではないかと思います。国際情勢がより複雑さを増している昨今において、自然科学を基点とした交流が担う役割は大きくなっていくように思われます。

末筆ではありますが、フランス滞在中においてご支援いただいた光・電子理工学教育研究センター 藤田研究室の先生方、在日本フランス大使館の方々に感謝申し上げます。

「博士課程：ルールに乗らない人生」

情報学研究科 通信情報システム専攻 佐藤高史研究室 博士後期課程1年 辺 松

博士課程に進学して、周りから若干浮くことが増えた。研究室外の人からはもちろん、博士課程の学生が少ない私の研究室では研究室内でも「勇気がある」、「優秀で研究好き」といったようにまるで違う人種のように見られることが度々ある。確かに、博士課程では必要とされる能力が高いと感じる時があり、それで失敗したり挫折したりもするが、私がいつも思うのが、「Don't take life too seriously」である。

私は自国の高校を卒業せずにアメリカの大学へ行き、そしてアニメが好きという理由で日本へ来た。そもそもルールに乗った人生を嫌っているためかもしれない。そして、最初に今の所属研究室に来たときに、いわゆるポジティブ・カルチャー・ショックというものを感じた。研究室の先生方も先輩方も、よく耳にする縦型社会の人間関係がなく、ルールに乗って「正しい」生き方にこだわる人もあまりいなかった。研究室にいるみんなでアニメを見たり、ゲームをしたり、挙句の果てに研究発表をやり直されたりとしたカオスともいえる環境は、私にとって非常に居心地がよかった。そしてその環境こそが、博士課程に進学することを決めた理由だったといえる。博士課程に進学し研究者になりたいという大それた目標というより、ズッコケたとしても人生を楽しめる人間になりたいという気持ちの方が強かった。

立てた目標を必ず達成し、安定かつ着実に与えられた任務を遂行し学位を手に入れる。それが博士に必要な覚悟と勇気であると考えられる人も居る。しかし私的には、自由に研究する過程を楽しみ、結果的にうまくいかなくてもそのうちまた頑張ればよいと考えている。何かのルールに乗って完璧な人生を演出するよりも、楽しく自由に研究する方に興味があったら、博士課程に進学してみるのもよいのではないか。

教室通信

桂キャンパスで電気系教室の新たな歴史を

電気工学専攻長・電気電子工学系長 小林 哲 生

今年の4月から、電気工学専攻長と共に電気電子工学系長を務めている関係で、教室通信の執筆依頼を頂きました。そこで今回は、桂キャンパスの近況と教室のさらなる発展を願って日頃考えていることの一部を書かせて頂きます。

桂キャンパスは、苔寺として有名な西芳寺や桂離宮、嵐山にほど近い京都の西、桂御陵坂の中腹に京都大学の第3のキャンパスとして14年前に開設されました。創設以来120年の長い伝統を持つ電気系の同窓生の皆様の中には馴染みのない方も多いことと思います。桂キャンパスからは京都市内が一望でき、8月16日の宵には吉田キャンパス近くの大文字の送り火も望むことができます。

新しく、スペースも広く、閑静な雰囲気の中でじっくりと研究に取組み学業に専念するには理想的な環境です。昨年、私の研究室がお世話をして第18回日本ヒト脳機能マッピング学会という、医学系と工学・情報系との学際領域の学会を桂キャンパス内にある船井講堂で開催させて頂きましたが、国外も含め参加いただいた多くの研究者の方々から、口々に「素晴らしいキャンパスですね」とお褒めの言葉をいただきました。

京都大学の計画では、工学系と情報系の研究室をこの新たなキャンパスに集約することになっており、工学系の移転はほぼ終了しました。一方、残念ながら情報系の移転については目処が立っていない状況が何年も続いています。現在の電気系教室は、工学研究科の電気工学専攻・電子工学専攻、情報学研究科の知能情報学専攻・通信情報システム工学専攻、エネルギー科学研究科ならびに学術メディアセンターや生存圏研究所などを含めた大きな組織です。そのため、電気工学専攻・電子工学専攻の桂キャンパス移転後は、3つのキャンパスに教室が分断されたことによる幾つかの問題が解決されないまま残されています。例えば、教育面では、学部の講義や学生実験、また学期初めの各学生へのアドバイザーなどのために、桂・宇治キャンパスの教員はキャンパスバスを利用する等して吉田キャンパスに頻繁に行く必要があります。その移動などに多大の時間と労力を使うことになっています。また、教室会議もキャンパス間の遠隔会議システムを用いた方式をとってはいますが、直接顔を見ながら話すのとは違って学生の教育や運営などに関する重要な事案について深い議論ができていくことを危惧しております。

今年度の概算要求で、桂キャンパスに図書館の新設が認められ、再来年にはBクラスターの福利・保健管理棟の隣に完成する予定になっておりキャンパス自体はその魅力を増して行くと思います。桂キャンパスへの移転に関しては必ずしも賛同されない方々もおられることは十分承知していますが、皆が一体となって京都大学の理念である「世界的に卓越した知の創造」と将来のリーダーとなれる輝く人材の育成、そしてこれから100年の新たな電気系教室の歴史を作っていく為に、皆様のご理解とご協力、ご支援を賜ることができれば大変ありがたいと思っております。



賛助会員の声

JR 旅客販売総合システムマルスの発展と その安定稼働維持について

鉄道情報システム(株) (昭和 49 年卒) 藤 井 和 彰

国鉄が 1987 年に分割民営化されて JR となって 30 年が経過しますが、国鉄時代から現在に至るまでの多くの間を、旅客販売総合システムマルスの開発、運営等の業務に従事してきましたので、特に JR 発足以降のマルスシステムの発展の経過、並びに社会インフラの一部として、「常に動いていて当たり前、正しく処理されて当たり前」となっているシステムの安定稼働維持について述べさせていただきます。

1. マルスシステムにおけるシステム構成等の変遷

1.1 ホスト・サーバ機器

国鉄から承継したマルス 301 システムは、大型汎用機（メインフレーム）5 台から構成されていましたが、1993 年に処理能力の向上と機器の集約を図ったメインフレーム 2 台からなるマルス 305 へと更新されました。

2003 年には、JR6 社共通の販売機能に加えて、各社毎の独自販売施策も柔軟に反映できる各社マルス化を実現するとともに、機器のダウンサイジングを行い、それまでのシステム構成から大きく変わり、サーバ機を大幅に取り入れたマルス 501 が再構築されました。

更に 2013 年には、大規模地震対策として実施した免震構造の新システムセンターへの移転に合わせて、ブレードサーバ等の導入によりサーバ機器の仮想化を実現しました。

1.2 端末装置

(1) 係員操作型端末

JR 発足当初、マルス端末は国鉄時代に開発された N 形、M 形、L 形の 3 機種が、引き続き利用されていました。ページ式の駅名・列車名入力装置で特徴のある N 形は、1971 年のマルス 105 の開発に合わせて導入され、またページ式入力装置とディスプレイ装置を具備した M 形は、1983 年のマルス 301 の開発に合わせて導入されましたが、いずれも専用のハードウェアからなる機器でした。1986 年に導入された L 形は、当時出始めたパソコンを利用した初の端末で、低価格であったこともあり、JR となった初期の 10 年間には中小駅や旅行代理店への「みどりの窓口」拡大のため多数が導入されました。

これらの端末は、老朽化と陳腐化が進み、1992 年以降、新たに開発された MR 形等に順次取り替えられました。MR 形からは汎用のワークステーションやパソコンが制御装置として活用され、OS も汎用の UNIX や WINDOWS が採用されました。また、各種のデータ類のメンテナンスにネットワーク経由のダウンロード方式が導入され、ダイヤ改正時等における、駅での端末のページ面への駅名、列車名などのシール張替えなどの作業は無くなりました。MR 形端末は、新機種が順次開発導入され、取扱い機能の拡充、操作性の向上、価格の低廉化等が図られ、現在約 3,700 台が全国で稼働しています。

(2) 顧客操作型端末及び空席表示端末

お客様のタッチパネル操作等により、駅係員を介さずに乗車券・特急券等を発売することが可能な顧客操作型マルス端末（MV形）は、国鉄時代には実用機が存在していませんでしたが、JRになって以降いくつかのプロトタイプ機を経て、1996年に初の本格的な実用機が登場しました。以降、新機種が順次開発導入され、現在約2,200台が全国の駅等に設置され、旅客サービスの向上、販売窓口の自動化や省スペース化に貢献しています。

また、顧客操作型端末と合わせて空席表示端末も順次開発され、MV端末の各機種に連動して導入されています。



(3) 発券プリンタ

マルスシステムでは、いわゆるN形券と呼ばれた非磁気化券の切符が大層を占める時代がしばらく続いていましたが、国鉄時代のM形端末から乗車券類の裏面磁気化が実施され、自動改札対応や駅窓口での操作自動化に利用されてきました。2002年には、磁気化券率100%が達成されています。

この乗車券類を発行する発券プリンタは、ドットインパクト・プリンタから、インクを乗車券原紙に熱転写して印字を行う間接サーマル方式プリンタ、乗車券原紙表面の感熱剤への加熱で発色印字させる直接サーマル方式プリンタへと、端末の進展に合わせて開発導入されてきました。現在は、直接サーマル方式のプリンタが主流となっています。

1.3 回線・ネットワーク

JR移行時には、マルスホスト～マルス端末間回線は、国鉄から承継した鉄道通信(株)（後に日本テレコム(株)と統合）の提供する回線やJR旅客鉄道会社が管理していた回線から構成されていましたが、国立（中央センター）～東京間の中継PCM回線を唯一の例外として、すべてがアナログ回線でした。

その後通信キャリアの提供する回線のデジタル化が進み、マルス端末の機種更新等に合わせて順次回線のデジタル化が進み、現在では当然のことながら全ての回線はデジタル化されています。

JR発足当初の主力端末であったN形／M形端末は、全て専用線でマルスホストと接続されていましたが、L形端末は国鉄から承継したパケット網（JR-NET）を経由して初めてマルスホストと接続されました。

その後のMR端末、MV端末は全てパケット網経由でマルスホストと接続されましたが、技術の進展に合わせて2002年にはIP網が整備され、その後登場した新機種はすべてIP網経由で接続されました。またこの時から、端末アクセス回線にISDNバックアップを付加し、回線の信頼度が飛躍的に向上しました。

パケット網、IP 網は交換網であることから、マルチホスト接続が可能となり、マルス端末に POS 機能や旅行業機能などを搭載して、それぞれのホスト・サーバと直接接続することにより端末の多目的な利用が可能となりました。

2. マルスシステムの利用拡大の状況

JR 発足以降、マルスシステムの利用内容は年々拡大してきており、この 30 年の間で各種の指標は 3 倍～8 倍程度に増加しています。1987 年度と 2016 年度を比較しますと、接続端末総台数は 3,400 台から 9,900 台と 2.9 倍に、1 日当たりの平均コール数は 98 万コールから 771 万コールと 7.9 倍になっています。お客様がピークになるお盆や正月の 1 日あたりの最大コール数は、1987 年度は 181 万コールでしたが、2016 年の 7 月のピーク時には 1,005 万コールを記録しました。切符の発券枚数は、1 日当たり 67 万枚から 187 万枚と 2.8 倍になり、それに伴い 1 日当たりの発売金額も 25 億円から 83 億円となりました。2016 年度には年間累計で 3 兆円超をマルスで発売しています。

3. マルスシステムの安定稼働維持について

マルスシステムでは、新たな販売機能の開発、ダイヤ改正、新幹線等の新線・新駅開業に対応するための開発改修、日々の列車データ・販売データ等の設定、ホスト・サーバ等機器の増強取替、各種端末装置の設置、通信ネットワーク機器の増強更新、電源空調設備の維持更新、また数年前に実施した大規模なセンター移転などを行いながら、多くの構成要素からなる巨大システムを日々安定的に稼働させるため、多岐にわたる業務を多くの部署で分担しながら、連携を保ち細心の注意を払って開発、保全、運用を行っています。

しかしながら、ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク、建物・電源・空調等の設備、更にはヒューマンウェアを起因として、様々な障害が発生します。マルスシステムが世に登場して以来 50 年以上の歴史の中で、これまでの数々の苦い経験を踏まえて、システムの品質・信頼度を継続的に高めるとともに、システムダウンは回避する、迅速な回復機能を設ける、影響範囲を極小化するという対策がその都度、あるいはシステム更新時等に抜本的な対策が実施されています。

現在、マルスシステムは、ネットワーク部分も含めてオンライン稼働率 99.999% 以上を維持していますが、毎日 4:00～翌朝 2:00 までの 22 時間運転されていますので、99.999% の稼働率維持のためには、年間で合わせて 4.8 分以上のダウンをしてはならないことになります。

しかしながら、現在のように新幹線が毎時 10 本以上運行されていて、駅の改札口まで来て、事前に予約した列車より 10 分早い列車に乗れそうであると、スマートフォンからその列車に変更して乗車するといった利用も当たり前となってきており、こうしたサービス要求に応えるために、2 重系となっている機器の障害時における系切替について、これまで以上に短い時間で行うシステム構成や、切替え自体をサービスに影響させないシステム構成にするなど、新たな機器や仕組みを順次導入しています。

システムの安定稼働を維持するためには、障害ゼロを究極の目標として、障害の一つひとつに対して、真の原因を徹底的に究明して確実に潰していくとともに、数多くの過去の経験や教訓を踏まえ、日々の運用や技術の進展、利用形態の変化を的確に捉えて、真摯に地道に取り組んで行くことが大切であると考えています。

編集後記

cue 38 号をお届けします。本号以降電子的に発行することになりました。お手許に届くというのではなく、Web ページにアクセスしていただくこととなりますが、皆様に楽しみにしていただけるような記事を掲載していけるよう編集委員一同努めてまいりたいと存じます。今後ともよろしくお願い申し上げます。

本号の「巻頭言」では AI についてご寄稿いただきましたが、AI を備えた囲碁や将棋のソフトがプロ棋士に勝つ、AI を用いた自動運転車の開発が行われるなど、さまざまな分野で AI が話題になっています。世の中で AI がブームとなるのはこれが最初ではありませんが、今回はどういう形で定着することになるのか、また本質的にできることとできないことや人の思考のプロセスとの関係がどこまで明らかになるのか、注目されるところです。

最後になりましたが、ご多忙のところご寄稿いただきました皆様に厚く御礼申し上げます。

[E. F. 記]

協力支援企業

新日鐵住金株式会社
鉄道情報システム株式会社
株式会社 村田製作所
ローム株式会社
(アイウエオ順)

発行日：平成29年9月

編集：電気系教室 cue 編集委員会
大村 善治、白井 康之、白石 誠司、
石原 亨、古谷 栄光、村田 英一、
龍頭 啓充、荒木 光彦（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

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

印刷・製本：株式会社 田中プリント

