ISSN　2433- 605X

cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.44　SEPTEMBER 2020

[第44号]

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

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

cue 44 号 目次

巻 頭 言

工学を臨床につなぐ人達

昭和 41 年卒業　京都大学名誉教授　荒　木　光　彦

私は京都のとある医療系専門学校で電気電子工学を受け持っています。臨床工学技士の資格を取ろうという人を対象とした授業です。では、「臨床工学技士とは何者か？」

一言でいうと「臨床工学技士とは医療機器のスペシャリスト」です。第一に、血圧計、点滴の流量管理に使用する輸液ポンプ、人工呼吸器、AED や除細動器など、病院内で使われる色々な機器の保守点検を行います。加えて、慢性腎不全の患者さんへの人工透析業務、心疾患のある患者さんへの人工心肺業務･心臓カテーテル業務･ペースメーカ業務、急性期の重篤な患者さんへの集中治療室業務・人工呼吸器業務・手術室業務など、治療や手術の際に、生命維持に必要な装置の操作や管理も行います。彼・彼女らは病院・クリニックなどの医療機関に勤めることが多いのですが、例えば医療機器メーカーなどの企業でも働いています。また、在宅医療を受ける患者さんたちのサポートをする場合もあるようです。

医療機関での配属先と仕事内容を見ておきます。所属は「臨床工学科（課）」となりますが、実務としては循環器内科･消化器内科･腎臓内科などでの診療にかかわったり、透析室、手術室、高気圧治療室、集中治療室などで仕事をしたりします。一日のスケジュールはカンファレンスに始まり、使用する医療機器の始業点検・手術の準備・治療・返却機器の点検終了、研修会・勉強会・会議と続きます。建前としては週休 2 日制のはずですが、急性期業務の場合は日曜・祝日勤務やオンコールがあり暦通りに休めるわけではありません。また、夜間透析を行うクリニックでは一日 10 時間労働ということもあるそうです。こう見ていくと、医師や看護師という他の医療従事者と同様、非常に忙しくかつ重要な仕事です。麻酔科医の二女に聞いてみますと、「何人かで急患を取り囲んで作業している場合、その中の一人は臨床工学技士である可能性が高い」そうです。

臨床工学技士の資格を得るには国家試験に合格することが必要です。その国家試験の受験には、高校卒業後大学（4 年）に入学するか、専門学校（3 年）に入る必要があります。ただし、看護師などの経験がある場合には、専攻科に 1 年通って受験資格を得ることができます。私が担当している授業はこの 1 年コースの専攻科の授業です。なので、昔は学生のほとんどが看護師さんでした。しかし、最近では 4 年制大学の最終学年をこの専門学校のコースとする大学もあり、色々なバックグラウンドの学生がいます。京大電気電子の学生とくらべると、この専門学校の皆さんの方が真面目です。私は 20 年近く担当していますが、特別な理由なしに遅刻・欠席する人はいません。また「わかるように教えれば、ほとんどの学生が“まじめに受け取って”」くれます。しかし「わかるように教える」のがなかなか難しいのですが、これは最後に説明します。

このコースの電気電子工学の授業でどういう内容を教えているのかというと、「臨床工学技士国家試験出題基準（医用電気電子工学）」というところに載っていること全部です。この基準には、電磁気学・電気回路・電力装置・電子回路・通信工学を網羅した107の項目が挙げられています。これらの項目をきっちり理解したら、京大の電気電子工学科の学部科目5科目以上に合格できるのではないかと思います。私は電気工学概論Iと電子工学概論I・IIの授業を週に半日（10分の中間休みを挟んで3時間）、30週分を他の2人の先生と一緒に担当しており、毎年オームの法則から初めて、最後はASK、FSK、PSKといったアイドルグループみたいな略号の説明で終わっています。ほかに電気工学概論IIと医用電気電子工学が各30時間、電気工学実習と電子工学実習が各45時間ありますから、かなりの時間が電気電子工学に割り当てられています。それでも試験出題基準の内容を十分に習得してもらうのは容易ではありません。そこで、まず基礎的なことを理解してもらったうえで、過去の国家試験の問題に関連するところを演習を交えて重点的に教えます。もちろん、電気電子工学だけが国家試験の内容ではなく、関連する広範囲の問題（医学概論、臨床医学概論、医用機械工学、生体物性材料工学、生体機能代行装置学、生体計測装置学、医用機器安全管理学など）が出題されます。したがって、学生は忙しくて帰宅してからは当日の復習をする程度がやっとという状態であろうと考えて、授業中に説明を完結するように努めています。

以上が臨床工学技士、国家試験および電気電子工学の授業の概要ですが、最後に「交流」を例として「わかるように教える」とはどう言うことを指しているのかを説明します。交流ですから、まず正弦波を黒板に書いて、「電圧がこんな具合に変化しているのが電力会社から送られてくる交流」であり、式で書くと次の通りになる。

$$\sqrt{2}\,V\sin\left(\frac{2\pi}{T}t+\varphi_V\right)$$

Vが電圧の実効値で振幅の約0.7倍、交流はプラスになったりマイナスになったりするので直流に比べて出来る仕事量が少ないからそうなる。Tが周期で図面ではここからここまで。φ_Vは電圧の位相角であるが、電流の位相角とのずれが重要でありあとで詳しく説明する。ということから交流の授業を始めます。さらに「交流のベクトル表記」というのを教えます。ここでは（周期が同じという前提で）上の交流電圧は「大きさが実効値・偏角が位相角であるベクトルで表すこと」ができる、ベクトルの和は平行四辺形の法則で決まることなどを説明します。ここまでは図面を黒板に書いて（もちろん配布プリントにも書いてあります）丁寧に説明すれば分かってくれます。

ここで一つ疑問が生じます（“生じるはず” だと私は思っていました）。二つの交流電圧を足し算の形で回路に加えれば、合計の電圧は二つのサインの式を足したものになるはずです。一方、ベクトルで交流を表すという立場からは、「平行四辺形の法則で決めたベクトルの和」が2つの交流電圧の和のベクトル表記になってくれないと困ります。しかし、数式の和の方は位相角を含んだ二つの三角関数、ベクトルの和の方を数式であらわすと座標軸ごとの和の形になってしまうので、ちょっと見ただけでは同じものだという確信が得られません。もちろん、三角関数の加法定理を使った計算をすればこの二つが同じであることが導けます。最初のころはその計算も講義ノートに入れていました。しかし、そのあたりになると“どうも学生さんの反応が良くない”、“これはまずいな”という感じでした。とは言いながら、「この部分の確認は重要だ」という先入観で、講義ノートはそのままにして実際の講義ではその部分を飛ばすことになっていきました。しかし、よく考えると、対象とする学生諸君は「三角関数の加法定理」とほぼ無縁の勉強をしてきた人達であるということに思い至りました。ということで、最近では「この二つは同じものである。」と断言します。それだけでは何となく気が引けるので、「それを確認したければ、

三角関数の加法定理を使えばよい。講義ノートには書いていないが、どうしても確認したい人のために三角関数の加法定理と一緒にまとめた付録を配布する。」と言って終わりにしています。要するに「厳密に証明すること」ことが必ずしも「わかるように説明すること」にはならないということに気付いたわけです。近頃は他の内容についても「説明をし過ぎないことに」十分注意を払っています。

最近は医療従事者ということで医師、看護師、事務の人たちが注目を浴びていますが、「臨床工学技士」という人達もいることを知っていただきたくて、紹介させてもらいました。

大学の研究・動向

酸化物半導体のエレクトロニクス・オプティクス

工学研究科　光・電子理工学教育研究センター
デバイス創生部門　先端電子材料分野
教授　藤　田　静　雄
講師（工学基盤教育研究センター）　金　子　健太郎

1. はじめに

ほとんどの元素は酸素と化合して酸化物をつくる。またこの反応は容易に起こる。「錆」はこの性質を顕著に表すものである。しかし一方で、酸化物にはさまざまな光・電子機能を持つものが多い。超伝導体も、誘電体も、磁性体も、絶縁体もある。光機能に注目すれば、素晴らしい可視光透過特性を持つ酸化物がある。ガラスである。それでは半導体はどうだろう。Ge、Si、GaAs、SiC、GaN、CdS・・・・　実用化されている半導体を挙げてもなかなか酸化物は出てこない。その理由の一つに「酸素の空孔」がある。酸素はもともと気体であるために、「空孔」を生じ易い。原子 100 万個に 1 個の欠陥も許さない半導体とは、縁遠い存在であったわけである。

では「酸素の空孔」を抑えるにはどうしたらいいか。結晶成長の際に大量の酸素を流し込めばいい。簡単な論理だが副作用が大きい。他の原料と気相中で反応して白い粉を生成する、原料を酸化してしまう、さらに部品をことごとく酸化して「錆」を作り劣化させる。部品としてよく使われるカーボンは一瞬で燃えてしまう。しかし、「じゃじゃ馬慣らし」がカウボーイの誇りであるように、結晶成長を行う者にとって、酸素の挙動を制御して半導体としての機能を持たせたい、と思うのは自然な流れといえよう。

一方で、酸化物が半導体として機能すれば、材料としては安全で安定なものとなる。結晶成長で危険なガスを使う必要もない。また、従来の半導体結晶成長では、酸素は最大の「敵」である。酸素は成長装置のあらゆる部分に存在し、容易に半導体に混入する。そのため、酸素を除くための大きな努力が不可欠である。しかし酸化物半導体の成長では、酸素が多い方が良い結晶ができそうに思われる。これは、半導体の結晶成長におけるパラダイムシフトである。私たちは、酸素を「味方」に付け、酸化物半導体によるエレクトロニクス、オプティクスの進展を目指している。

2. 結晶成長技術の開発

いまスタンダードとなっている結晶成長技術では、超高真空までの排気、リークタイト、成長前のベーキングなどにより、徹底的に不純物を除くことで原子層レベルでの制御が可能となっている。しかしその工夫の多くは酸素という「敵」を排除するためである。そんなところで酸素を「味方」に付けることはできない、との考えをもとに、われわれは 2005 年頃から「酸化物に適した」新しい結晶成長技術の開発を始めた。これがミスト CVD 法と呼ぶ技術である。例えば金属原子 M の酸化物 MO を成膜するとき、元素 M を含む原料の水溶液を作製し、これに超音波を印加して霧（ミスト）を生成させる。このミストには元素 M と酸化源となる水が含まれており、これをガスによって反応部へ送ると、加熱した基板上でミストが気化して化学反応により目的の化合物 MO が得られる、という原理である。ミスト生成部および成長装置の例を図 1 に示す。これは化学気相成長（CVD）法の一種であるが、例えば

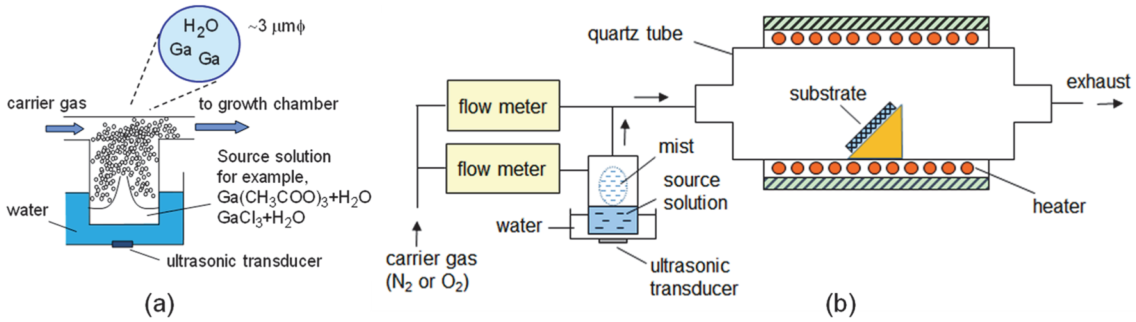


図 1　ミスト CVD 法による（a）ミスト生成部および（b）成長装置の例。

GaAs の成長には、Ga、As の原料としてそれぞれ蒸気圧の高い有機金属と猛毒の AsH_3 が用いられる。しかし、酸化物では結晶成長に水を用いることができるため、安全な原料が利用可能となるわけである。さらに水溶液の利用により、元素 M と酸素 O の濃度比 [O]/[M] は 500 以上にもなり、また原料の前反応も起こりにくい。これにより、酸化物で問題である「酸素の空孔」の発生を抑えられる可能性がある。

超音波噴霧されたミストを原料にする成膜技術は、透明導電膜や誘電体薄膜の成膜に用いる試みがあった。しかし半導体のように高純度な単結晶の成長に利用しうるとは考えられていなかった。われわれは、徐々に経験を積みながら装置の構成、用いる材料、成長手法に工夫を加えつつ、半導体としての応用を可能とする品質の材料を実現してきた。

3.　ワイドバンドギャップ半導体から超ワイドバンドギャップ半導体へ

半導体の王者といえる Si のバンドギャップは 1.1 eV であるが、その後バンドギャップの狭い方向にも広い方向にも、新材料による新しい応用分野の開拓という観点で研究が進んできた。バンドギャップが大きくなる方向は、青色発光デバイスや低損失のパワーデバイスの実現に向け、GaN や SiC の開発が実を結んできた。一方、これらワイドバンドギャップ半導体と称されているバンドギャップが約 3.4 eV の半導体に対し、よりバンドギャップの広い半導体の研究を進める動きが強くなってきた。このような半導体は超ワイドバンドギャップ半導体と呼ばれ、半導体の性質を保ちながらバンドギャップがどこまで広くなりうるのかという興味もある。材料としては、図 2 に示すように、ダイヤモンド（C）、窒化アルミニウム（AlN）、酸化ガリウム（Ga_2O_3）、酸化アルミニウム（Al_2O_3）、酸化マグネシウム　（MgO）などがあり、これらの混晶（例えば AlGaN、$(Al,Ga)_2O_3$、MgZnO）も含まれる。Si デバイスで絶縁膜として用いられている窒化シリコン（Si_3N_4）のバンドギャップが約 5 eV であるため、このような材料に半導体としての機能を持たせようとする考えは、まさに物理限界への挑戦と言えよう。

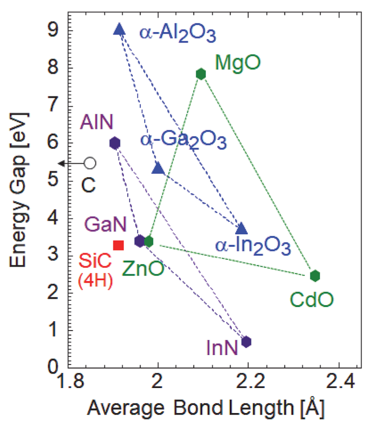


図 2　ワイドバンドギャップ、超ワイドギャップ半導体のバンドギャップと原子間平均距離の関係。

半導体において、後述のように、バンドギャップが広くなると高耐圧で損失の少ないデバイスにつながることが期待され、パワーエレクトロニクスに貢献する。また、バンドギャップが広くなると発光波長が短くなる。そのため、波長 300 nm 代の近紫外から 200 nm 以下の遠紫外までの発光・受光デバイスにつながり、オプティクスの新分野を拓くことになる。酸化物半導体は、最もバンドギャップの広い領域をカバーしており、ミスト CVD 法の特徴を活かした研究を行っている。

4. 酸化ガリウム

電力変換の高効率化のために、パワーデバイスの特性が重要である。ショットキーダイオードを考えた計算によれば、用いる半導体の絶縁破壊電界を E_{B}, デバイスの耐圧を V_{B}, 特性ドリフト抵抗（概ねオン抵抗に相当）を R_{drift} とすると、それらには以下の関係が成り立つ。

$$V_{\mathrm{B}} = \frac{\epsilon_{\mathrm{s}} E_{\mathrm{B}}^2}{2qN_{\mathrm{D}}}\ ,\ R_{\mathrm{drift}} = \frac{4V_{\mathrm{B}}^2}{\epsilon_{\mathrm{s}} \mu E_{\mathrm{B}}^3}$$

ここで、ϵ_{s} は半導体の誘電率、N_{D} は不純物密度、μ は移動度、q は電荷である。半導体では、バンドギャップが大きいほど E_{B} が大きい傾向があるため、第 1 式より耐圧が高いデバイスが可能となる。また、第 2 式より、同一耐圧のデバイスについては、E_{B} が大きいほど特性ドリフト抵抗が小さくなる。つまり、電力損失を小さくできる。このとき、E_{B} の 3 乗に反比例することから、E_{B} が特性ドリフト抵抗に与える影響は非常に大きい。このような観点から、ワイドバンドギャップ半導体の進展が期待されており、実用の域にある GaN や SiC よりもさらにバンドギャップの大きい超ワイドバンドギャップ半導体は利用できるのだろうか、という点に興味がもたれている。

Ga_2O_3 はバンドギャップが約 5 eV あり、Si デバイスからすれば絶縁体の域にある。図 3 に示すように多くの異なる結晶構造をとるという特徴がある。このうち単斜晶系の β 型と呼ばれる構造が熱的に最も安定相であり、融液法という一般的な技術でバルク（結晶固体）が得られて Ga_2O_3 基板が作製されていた。大きなバンドギャップにもかかわらず良好な導電性を持ち、それはおそらく酸素の空孔が多数存在するためと考えられていた。これを半導体デバイスに利用できないか、という観点で、当研究室において 2007 年頃から基板の酸素熱処理や基板上への結晶成長を試みた。その結果、大きなバンドギャップに相応しい高抵抗層形成、ショットキー接触形成、バンド間遷移による高感度の光電流生成、さらに $(Al,Ga)_2O_3$ 混晶の結晶成長によるバンドギャップ変調など、半導体としての特性が明らかになった [1,2]。

一方、当時はこの Ga_2O_3 基板は実験的に得られているだけで、入手は困難であった。そこで、サファイアを基板として用い、ミスト CVD 法による成長を試みたところ、2008 年になってコランダム構造をとり α 型と呼ばれる Ga_2O_3（α-Ga_2O_3）が成長した。これは準安定相であるにもかかわらず、単一相で結晶性に優れていた [3]。基板であるサファイアが α 型の結晶構造を持つため、その上に成長した Ga_2O_3 は「基板と同じ α 型を取りたい」と思うはずである。しかし、熱力学という自然界の力は Ga_2O_3 のこの気持ちを許さず、安定な β 型にしようとしてしまう。これはミスト CVD 法では、前述のように、「酸化物に適した」成長法により十分の酸素が供給され、酸素が「味方」についてくれるおかげで、準安定の

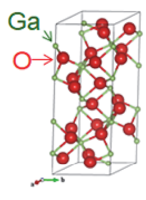
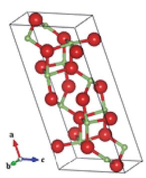
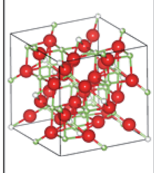
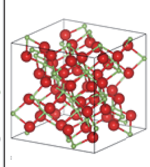
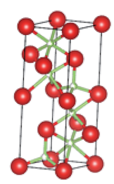
	α	β	γ	δ	ε
結晶構造の模式図					
結晶構造の呼称	rhombohedral corundum	monoclinic β-gallia	cubic defective spinel	cubic bixbyite	hexagonal
同様の結晶構造を持つ材料の例	Al_2O_3		$MgAl_2O_4$	In_2O_3	GaN (0001)

図 3　Ga_2O_3 の各種結晶形。図の作成には現（株）FLOSFIA の大島孝仁氏のご協力を得た。

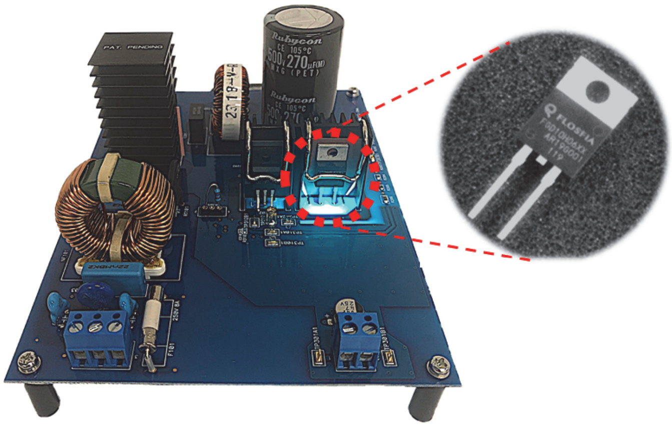


図４　α-Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオードを用いた電力変換ボード（(株) FLOSFIA 提供)。

α型にとどめてくれるようである。[1]　しかしバンドギャップが 5.3 eV と非常に大きいことから、ドーピングにより電気伝導を持たせることが非常に困難であった。それが 2012 年になって Sn のドーピングにより n 型伝導が得られるようになった [4]. これら一連の成果は、「準安定状態の材料」という「使いものにならない」と考えられてきた材料を使いこなし、それで得られる新しい物性を利用するという点で学術的に価値が高いと考えている。また応用的には、安価なサファイア基板を用い、ミスト CVD 法という安全で安価な原料・装置をもとに結晶を育成できることから、コストパフォーマンスの高いデバイスが実現できることになる。

これらの点に、ベンチャー企業である（株）FLOSFIA[2] が着目され、α-Ga_2O_3 をミスト CVD 法で成長して超ワイドギャップを活かしたパワーデバイスを産業化しようとする研究開発を開始された。α-Ga_2O_3 もミスト CVD 法も独自の技術に支えられたもので、製品として得られるデバイスも安価であるという技術・コストの両面で競争力があると考えられたようである。われわれも、研究成果の社会実装には大きな使命を感じ、積極的な共同研究に取り組んできた。結果として、同社は 2016 年に非常にオン抵抗の低いショットキーバリアダイオードを報告され [5]、2019 年にノーマリオフ型 MOSFET でチャネル移動度 72cm^2/Vs を実現された [6][3]。図 4 に同社が開発された 600 V 耐圧ショットキーバリアダイオードおよびこれを用いた交流 90 ～ 242 V → 直流 400V, 0.9 A 電力変換ボードの写真を示す。Ga_2O_3 の特徴を活かしてスイッチング周波数を最大 240 kHz 以上とし、高効率の電力変換が実証されている。

化合物半導体の実用化にとって重要な課題として、n 型と p 型の電気伝導性制御、およびヘテロ構造の特性を活かすためのバンドギャップ制御（バンドギャップエンジニアリング）が挙げられる。超ワイドギャップ半導体は n 型と p 型の両方の特性を得ることが難しい材料が多く、とくに酸化物は p 型伝導が困難である。これは、価電子帯が局在性の強い酸素 2p 軌道から形成されるために、価電子帯端における状態密度が大きく、また正孔の有効質量が大きいためである。そこで、α-Ga_2O_3 にアクセプタをドーピングして p 型化することは困難であると思われる。そこで、(i) 酸素 2p 軌道よりも上に価電子帯を持つ、(ii) α-Ga_2O_3 と同じコランダム構造を持つ、(iii) α-Ga_2O_3 と格子定数が非常に近い、(iv) バンドギャップが大きい、という酸化物を見つけることができれば、n 型の α-Ga_2O_3 との pn 接合が得られると期待される。結構厳しい条件のようであるが、コランダム構造（α 型）を取る酸化物は多数存在し、その中でコランダム構造酸化イリジウム（α-Ir_2O_3）がこれらの条件を満たしうることがわかった。ミスト CVD 法により成長すると、単結晶薄膜が得られ、p 型伝導を示し [7]、α-Ga_2O_3 との格子不整合は 0.3% と小さかった。しかし、α-Ir_2O_3 はバンドギャップが約 3 eV と超ワイドバンドギャップ半導体のエレクトロニクスに用いるにはやや不満足なものである。また、p 型の濃度が非常に高く縮退状態にある。そ

こで、α-Ir_2O_3 と α-Ga_2O_3 の混晶である α-$(Ir,Ga)_2O_3$ を成長できれば、バンドギャップは大きくできるうえ、α-Ga_2O_3 との格子不整合も小さくなる。現在のわれわれの研究が注力しているのはこの点であり [4]、バンドギャップが 3.3 eV で正孔密度が 10^{18} cm^{-3} 台の p 型 α-$(Ir,Ga)_2O_3$ が得られている。α-Ga_2O_3 との pn 接合は、逆方向 60 V 以上の耐圧を示し、整流比は 10^6 以上であった。さらに、バンドギャップ 4 eV の p 型層への見通しが得られており、（株）FLOSFIA におけるデバイス実装に活かしていきたいと考えている。

バンドギャップ制御は化合物半導体の大きな特徴であり、さまざまなヘテロ構造によって新しい機能を生み出すことになる。α-Ga_2O_3 の場合、同じコランダム構造を持つ α-Al_2O_3 および α-In_2O_3 との混晶によってバンドギャップ制御が可能である。実際、図 2 に --- ▲ --- で囲まれた三角形の領域、すなわちバンドギャップを 3.7 ～ 9 eV の範囲で制御可能なことを実験的に実証した [8]。

このように、ミスト CVD 法を用いてコランダム構造の α-Ga_2O_3 が得られたことは、熱力学的には準安定相であるものの、他の多くのコランダム構造酸化物との複合・混晶により多様な機能を持たせることにつながっている。多くのコランダム構造酸化物が互いに協力して創り出す機能であり、われわれは彼･彼女らを「コランダムファミリー」と呼んでいる。とはいえ、最熱安定相である β 型（β-Ga_2O_3）は、基板が存在し、その上に同じ材料を結晶成長することで非常に結晶性の優れた β-Ga_2O_3 層が得られ、世界中で多くの研究が行われている。しかし β 型は特殊な結晶構造で、「コランダムファミリー」ほど大家族の「β 型ファミリー」が存在しない。また、サファイア基板に比較して β-Ga_2O_3 基板は高価である。しかし、「コランダムファミリー」は安価なサファイア基板を利用できるという特徴はある一方で、格子不整合による欠陥を避けることができない。この問題に関しては、基板上に疑似混晶超格子バッファ層を導入する [9]、選択横方向成長技術を用いる [10]、といった方法での克服を進めている。

酸化ガリウムは、半導体の歴史として未だ 12 年程度を踏むのみであるが、その特徴を活かした研究が世界的に加速している。2020 年には Springer より “Gallium Oxide” と題した総 764 頁の書籍が出版されるに至っている。

5. 酸化マグネシウム亜鉛

次に、酸化物半導体のオプティクスへの応用を述べる。われわれは、バンドギャップが 7.8 eV である MgO を基板に用い、Mg 組成の大きいバンドギャップが 5.5 ～ 7.8 eV の MgZnO 混晶により波長 230 nm 以下の発光・受光が可能になると考えている。これもミスト CVD 法を用いた成長を行い、室温におけるカソードルミネセンスを図 5 に示す。試料 #1、#2 において波長 190 ～ 230 nm の発光が得られている [11,12]。紫外領域での発光材料としては窒化物半導体の研究が盛んで成果が得られているが、発光可能な最短波長は AlN のバンドギャップで決まる 210 nm であり、通常環境下では 200 nm 以下での発光は物理的に不可能である。MgZnO のバンドギャップは AlN より大きくしうるため、水銀や希土類元素の放電が用いられている波長 200 nm 以下の領域において、半導体による任意波長での発光が可能となりうると考えている。また、図 5 に示した波長 207 ～ 220 nm の光は、人に影響を与えずに空気中のウィルスを死滅させることが報告され

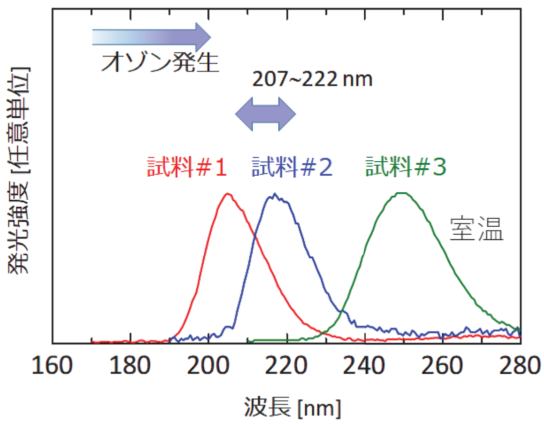


図 5　Mg/Zn 組成が異なる各種 MgZnO 薄膜（試料 #1~3）の室温における電子線励起発光（CL）スペクトル。

ている [13]。このように、酸化物半導体を用いて、UV-C から真空紫外領域にわたるオプティクスの進展に寄与することを期している。

6. まとめ

酸化物は多くの種類があり、同じ組成でも多様な結晶構造をとるものがあり、それだけ多様な機能を持つ。基本的に安定な材料（green material）で、安全な原料をもとにした合成（green chemistry）が可能である。さまざまな応用が期待されるが、われわれはその大きなバンドギャップを活かしたパワーデバイスや水銀・希ガス不要の光源など、環境に寄与するデバイスへの応用（green innovation）を目指している。また、工学の研究成果は世に用いられることが重要との観点で、積極的な産学共同研究を進めている。新材料の開拓はわが国の得意分野でもあり、今後さらに深い探索研究が行われることを期待している。

注

1 以上、いささか擬人化した表現であるが、結晶成長のメカニズムを理解するには自分が元素の立場に立ってみることが重要である。
2 京都大学発のベンチャー企業。現在、4 名の洛友会会員が勤務しておられる。
3 この成果により、電子デバイス産業新聞主催「半導体・オブ・ザ・イヤー 2020」において、半導体デバイス部門でグランプリを受賞された。
4 JST の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）のもとで研究中

参考文献

[1] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, N. Suzuki, S. Ohira, and S. Fujita, Appl. Phys. Express 1, 011202 (2008).
[2] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, N. Suzuki, H. Hino, and S. Fujita, Jap. J. Appl. Phys. 48, 011605 (2009) ,
[3] D. Shinohara and S. Fujita, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 7311 (2008).
[4] K. Akaiwa and S. Fujita, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 070203 (2012).
[5] M. Oda, R. Tokuda, H. Kambara, T. Tanikawa, T. Sasaki, and T. Hitora, Appl. Phys. Express 9, 021101 (2016).
[6] (株) FLOSFIA プレスリリース 2019/12/03; https://flosfia.com/20191202-2/
[7] S. Kan, S. Takemoto, K. Kaneko, I. Takahashi, M. Sugimoto, T. Shinohe, and S. Fujita, Appl. Phys. Lett. 113, 212104 (2018).
[8] S. Fujita and K. Kaneko, J. Cryst. Growth 401, 588 (2014).
[9] R. Jinno, T. Uchida, K. Kaneko, and S. Fujita, Appl. Phys. Express 9, 071101 (2016).
[10] R. Jinno, N. Yoshimura, K. Kaneko, and S. Fujita, Jpn. J. Appl. Phys. 58, 120912 (2019).
[11] K. Ishii, M. Ono, K. Kaneko, T. Onuma, T. Honda, and S. Fujita, Appl. Phys. Express 12, 052011 (2019).
[12] 京都大学プレスリリース 2020/03/31; http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2019/200326_1.htm
[13] D. Welch, M. Buonanno, V. Grilj, I. Shuryak, C. Crickmore, A. W. Bigelow, G. Randers-Pehrson, G. W. Johnson, and D. J. Brenner, Scientific Reports 8, 2752 (2018).

産業界の技術動向

マツダの目指すMBDと車両電装システム開発での適用事例

マツダ株式会社　統合制御システム開発本部　電子性能開発部
手　島　由　裕

1. はじめに

昨今の自動車産業を取り巻く環境は、CASE（Connected、Autonomous、Sharing、Electricity）に代表されるように100年に一度の変革期と呼ばれています。その中で世界シェア2%とスモールプレーヤーのマツダは、生き残りをかけてMBD（Model Based Development）の活用にいち早く着手しました。

本論の主題はMBDですが、まず前提として、機械産業である自動車メーカーにおける電気電子系エンジニアの役割について、かつて「ラジオ少年」であった私自身の業務を2例紹介しておきたいと思います。

2. マツダのエレキ系量産開発の紹介

■ MAZDA3　オーディオ音響性能開発の紹介

マツダは昨年度、新世代商品群のトップバッターとして「MAZDA3」の販売を開始しました。我々は人間特性を考慮し、車載オーディオシステムのスピーカ配置をゼロから見直すことで新世代商品に相応しい画期的なオーディオシステムを実現できましたのでご紹介します。

唐突ですが、理想のオーディオシステムとは何でしょうか？オーディオブランドが数多くあるように、人によって好みの音が異なるため、理想のシステムを一つに決めることは困難です。そこで「目指すオーディオの姿」として「お客様がご自身の好みに合わせて音楽を楽しめる」を掲げ、「好みの音量で聴ける低域再生ポテンシャル」「音源に忠実な中高域直接音再生」により音楽再生の土台を提供することを考えました。そして、音波の特性、人間の聴感特性から、音波を低域と中高域に分離しそれぞれで最適化することにしました。

低域は空間共鳴の「腹」に置くと効率が良く、指向性を感じにくいので見える場所になくてもよいことに着目し、市場の9割以上の車が採用しているドアスピーカを廃止し、低域再生専用として車室内前方隅に移動しました。車室内で新しいレイアウトを確保することは難しいのですが、最適な運転姿勢のためにタイヤを前方配置する独自のアーキテクチャーと合わせ、関係者皆が納得する形で変更を実現できました。（図1）

図1　MAZDA3とその低域再生革新のポイント

中高域では、従来のインパネ上の高域専用スピーカで、フロントガラスからの強い反射が音像を濁らせていることを時間軸解析で突き止め、反射音が生じにくいドア前方上方に移設しました。また、左右スピーカからの音の到来時間と音圧を揃える、いわゆるタイムアライメントを使った「運転席優先モード」を設定し、楽器（歌手の声）が音源製作者の意図通りの位置で、目の前で演奏しているかのように鮮明に聴こえる音場を再現し、自動車ジャーナリストの方々や多くのお客様から好評を得ています。弊社公式 Web サイト、Youtube にイメージビデオがありますのでご紹介しておきます。
https://youtu.be/Hr46W2LWYgQ

■ 自動車の EMC 開発の紹介

次は電気的信頼性開発の一例として、高周波（電波）に関連する EMC（Electro Magnetic Compatibility）開発をご紹介します。EMC 開発のひとつである不要輻射抑制開発には、規格法令（各国認証）適合開発の側面と、車載受信機への音声ノイズ混入を抑制する商品性開発（ラジオノイズ開発）の側面があります。

規格法令の代表例である国連レギュレーション「UN No.10」では、車両から発生する電磁ノイズが他の車両 / 家庭内受信機に妨害を与えないことを車両販売認可条件として要求しています。図２のような大型電波暗室を使った実車計測を行い、車外に設置されたアンテナへのノイズ誘起電圧が規制値以下であることを認証官立ち会いで実証します。

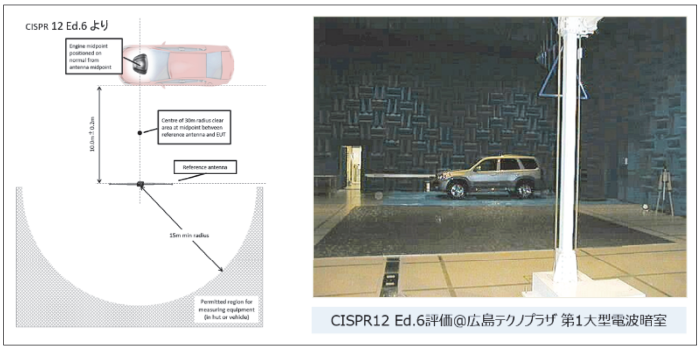


図２　UN No.10 認証適合性評価

一方、ラジオノイズ開発では、お客様が実際にノイズを耳で感じて良否を判断されることから、雑音の絶対レベルではなく他車（以前の所有車や知り合いの車）との比較が重視される傾向にあります。さらに、雑音発生のシーンがお客様固有の特殊な使い方によるものであったとしても、お客様の期待に沿うことが求められるため、お客様の立場に立った商品開発を進めていく必要があります。また、車載環境特有のシールド配線材や給電線（同軸ケーブルに非ず）の使いこなしに苦労したり、社内の多数派である機械系エンジニアと背反事象の調整に苦慮したり、各国の電波法関連情報や放送界の動向にも気を配る必要があります。

EMC 開発の対象部品は全車載電装品ですので、本論で述べる「車両エレクトロニクスの進化」に伴う開発対象の増加は、この EMC 開発の難易度にも大きく影響していると言えます。

3. 自動車の進化と MBD への期待

マツダでは早くから MBD に積極的に取り組み、技術開発において中心的な役割を果たしてきました。我々は、制御開発を念頭に置いた “狭義” の技術開発だけではなく、CFD ／ FEM 等の CAE も含め、すべてのモデルを用いた技術開発を MBD と呼んでいます。本論では、SKYACTIV TECHNOLOGY での成功のカギとなった MBD の基本的な考え方を示すとともに、車両電装システム開発での MILS/HILS や FEM 等 CAE の活用事例を紹介し、今後の進むべき方向について述べていきます。

■ 自動車の進化

近年の自動車の進化は、そのまま「車両エレクトロニクスの進化」と言い換えても過言ではないほど電子部品は増加の一途を辿っています。例えば、環境技術の進化としては、減速回生、HEV/BEV、エンジン系補機類の電動化など、安全技術の進化としては、自動運転、ADAS（先進運転支援システム）、シャシー制御、緊急通報、ITS など、快適性能の進化としては、コネクティビティ、キーレスエントリー

などの機能性能向上装備、そして、制御するソフトウェアも、マイコン数の増加、コード行数の増加、と枚挙に暇がありません。

20年前と比較して、数値的には、開発の複雑性/バリエーションは10倍増、開発期間は1/4に短期化されており、2倍の開発人員を持ってしても、一人当たりの生産性は20倍になることが期待されているのです。

実際の車両では、図3のようにクルマ全体で数十の電子制御システムが搭載され、単独だけでなくシステム間で協調して制御を行った上でソフトウェア規模は合計で1000万行以上（マイコン50個以上）に達しています。エンジン制御だけでも、SKYACTIVエンジン制御ソフトウェアの規模は、プログラム変数が数万個、データ（パラメータ）は約10万個、印刷すると1万ページ前後、と、走行/環境性能を向上させるために、20年間で約100倍と指数関数的に大規模化してきました。

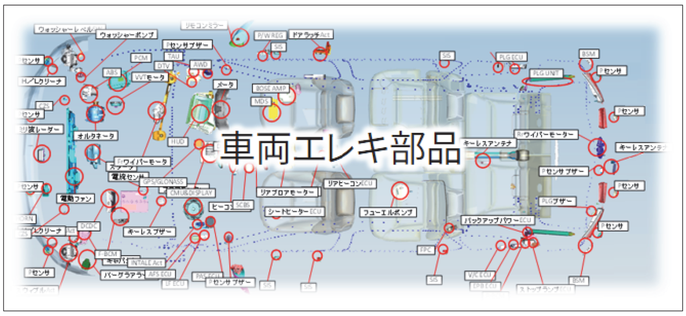


図3　車載制御システム群

■ MBDへの期待

従来の自動車制御開発プロセスの例を図4に示します。いわゆる「V字開発」ですが、試作や評価にかかる期間はそれぞれ数ヶ月レベルなので、通常の製品開発でこのサイクルを回せるのは最大2回までです。制御開発に関わるエンジニアの数は数百人規模、1台の試作車製作にかかる費用は数千万円に上ります。手戻りが発生した場合、後になるほど必要な時間と費用が加速度的に増加するため、実車評価まで進んでからやり直したのでは取り返しがつかない事態になってしまいます。

そこで、実際の車両を必要としない検証手段としてのMBDに大きな期待が寄せられているのです。

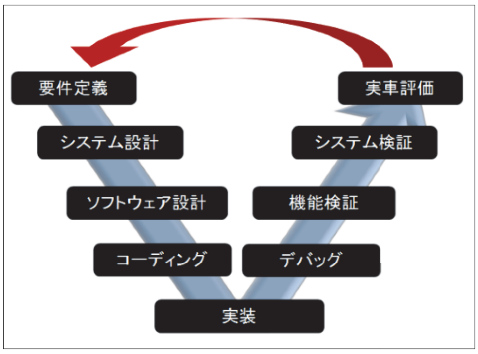


図4　従来の自動車制御開発プロセス

4. マツダの目指すMBD

では、マツダの目指すMBDとはどんなものでしょうか。我々はMBDをブランド価値とビジネス効率を共に向上させるイネブラーだと捉えています。「高いブランド価値を持つ商品を最高のビジネス効率でお届けする」狙いに向けて、車両全体、制御系、乗員、環境、全てをモデル化し、机上シミュレーションを徹底的に行うのです。その適用プロセスは、要求性能の把握、システム設計、制御開発、ユニット/部品開発、生産（品質）開発、と広範囲にわたっており、開発部門だけの、ましてや「制御開発用」に限定しない、企画から始まり、生産、引いてはサービスまで、「仕事」をモデルでつなぎたいと考えています。例えば、制御装置と制御対象の機能をモデル化して組み合わせ、シミュレーション技術を活用して開発することもMBDのひとつです。MILS（Model-In-the-Loop Simulation）やHILS（Hardware-In-the-Loop Simulation）を使いこなし、開発段階に応じReal/Virtualを融合した検証環境を使う手法です。

図4の各プロセスで小さな検証を繰り返すことで、大きな手戻りを撲滅し、開発の質と速度を向上できます。図5のように「開発モデル」から「家庭円満、健康」までの大きなつながりを実現するという

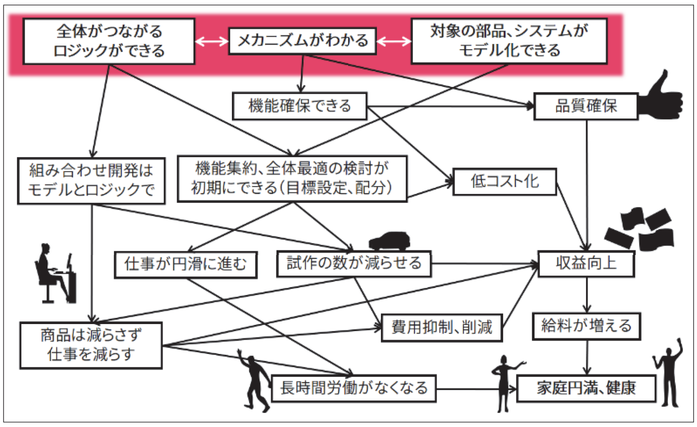


図 5　マツダの目指す MBD

意思を持ち、組織的に活動することが重要であり、この図がまさにマツダの目指す MBD の全体像と言えるのです。

5. 車両電装システムでの MBD 適用事例紹介

では、ここから車両電装システムへの MBD 適用事例についてご紹介していきます。

■ 高機能 HILS（Hardware-In-the-Loop Simulation）構築事例

先に述べたとおり、自動車の進化により車両電装システムは増加の一途を辿っており、その検証には幾千もの試験シナリオが必要になっています。限られた時間の中で、市場要求を満たす品質を確保するための機能評価を実施する必要がありますが、実車での走行試験が大きなボトルネックになっていました。

解決手段として、我々はあらゆる電装品を協調動作させて機能とロバスト性を自動評価する高機能 HILS システムを構築しました（図 6）。高機能 HILS では、実際の部品と疑似部品、疑似信号をベンチ上で統合し、ロボットアームによる運転者動作、バーチャル音声による言語・話者の網羅性、疑似 GNSS 信号と三次元高精度地図による NAVI 走行模擬などを実現し、コネクテッドシステムの試験工数を劇的に削減させることができました。適用システム拡大に向け、様々な運転環境を取り込むことで HILS は日々進化を遂げています。

Youtube のビデオをご紹介しておきます。　https://www.youtube.com/watch?v=tLkMmBdedRw

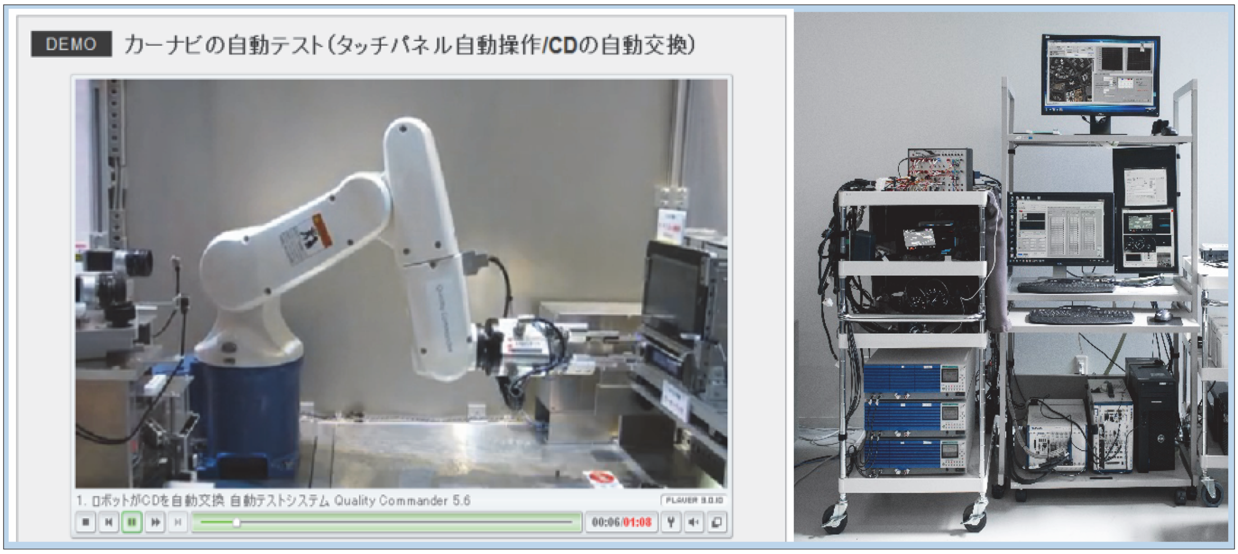


図 6　高機能 HILS のロボットとコントローラ

■ レーダー CAE 解析事例

ADAS センサーのひとつであるマイクロ波後側方レーダーは、リアバンパー内側に取り付けられています。樹脂部品は電波への影響を無視できると考えがちですが、外観形状に合わせデザインされたバンパーはマイクロ波伝搬に影響を与えてしまいます。受信電波が本来の位相と異なってしまうと到来角度を正しく推定できず、ターゲット車両の車線を見誤ってしまいます。

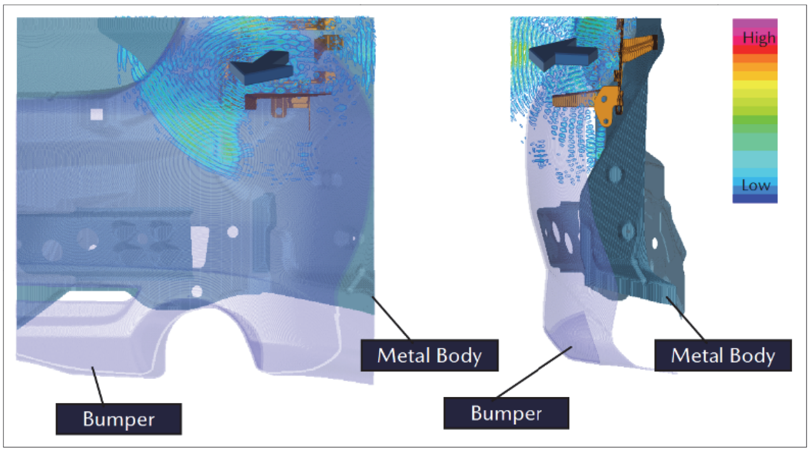


図７　バンパーを透過・反射する電波の CAE 解析事例

図７のように、バンパーを透過・反射する電波を CAE 解析することで、事前に影響を回避することが可能になりました。

■ キーレスエントリー性能 CAE 解析事例

キーレスエントリーシステム（KES）は、リモコンボタン操作により、メカキーによる施錠解錠の煩わしさを解消するシステムですが、実際のお客様の使い方として、広大な平面駐車場で自車の駐車位置を見つけるためのカーファインダーの機能も持っており、その作動距離は重要な性能指標となっています。

我々は、アンテナの形状・レイアウトを最適化するために、図８のような作動距離の CAE 解析による机上検証を進めています。

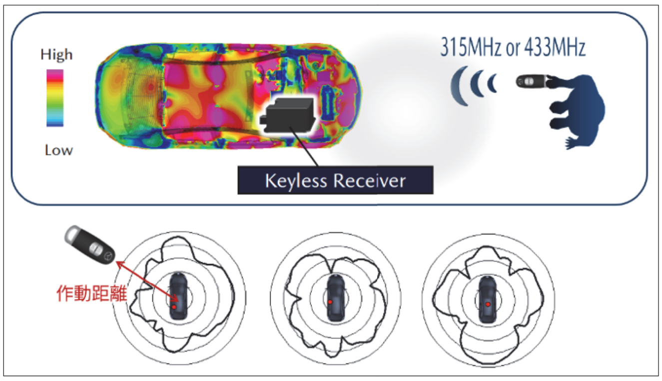


図８　キーレスエントリー性能 CAE 解析事例

■ 超音波式盗難防止装置開発の CAE 解析事例

超音波式盗難防止装置は、車両に泥棒が侵入した際に、侵入動作によって発生する超音波のドップラーシフトを受信センサーで検出することで侵入を検知し、警報を吹鳴させるシステムです。

図９のように、送信部から発射された超音波は周辺部品の影響を受け、指向性変化や音圧減衰が発生し予測通りに伝搬していきません。超音波が十分届かないエリアは侵入を検知できない【未検知】となり、逆に受信感度を上げすぎると雨などの微小振動を検知してしまう【誤検知】を誘発してしまいます。

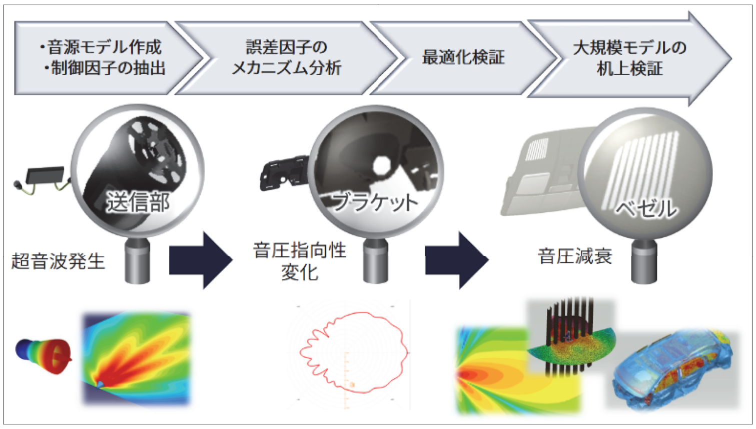


図９　超音波式盗難防止装置開発 CAE 解析事例

我々は、誤検知・未検知を防止する超音波センサーの指向性・レイアウトを超音波 CAE 解析することで、開発工数、コストを削減し、車両レス開発を実現しました。

■ ワイヤーハーネス断線信頼性予測における CAE 解析事例

自動車の進化による車両電装システムの増加に伴い、部品間をつなぐワイヤーハーネスの重量増も自動車開発において大きな課題となっています。重量軽減のための実現手段のひとつであるアルミ電線の採用では、銅⇒アルミへの素材変更による断線懸念の解消が必要でした。

我々は図 10 のように、ワイヤーハーネス屈曲による「ひずみ振幅」を CAE 解析することで、寿命曲線から断線回数を机上予測し、固定点の最適化を図ることができました。

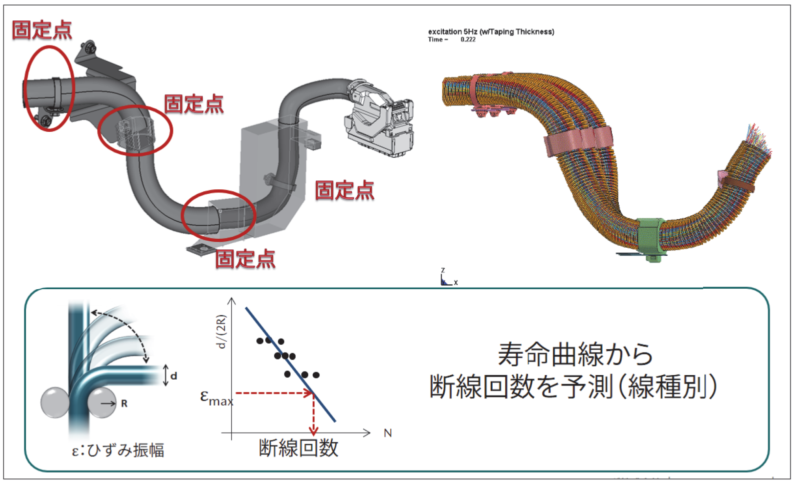


図 10　アルミ電線の断線懸念を CAE 解析事例

6. MBD の今後

本論の最初で述べたことの繰り返しになりますが、近年の自動車産業を取り巻く環境は、モビリティ革命 CASE（Connected、Autonomous、Sharing、Electricity）に代表されるように 100 年に一度の変革期と呼ばれています。クルマの持つ機能が飛躍的に増加し、開発すべき技術領域の拡大により異業種との関連も多くなり、自動車メーカー単体やグループ企業だけでの開発には限界が出てきます。

それでは、どこと、どうやって手を組めば良いのでしょうか？

欧米では、官（政府）主導で、産（自動車メーカー、部品メーカー、ツールベンダー）と、学（大学）とが一体となって、技術開発や規格化を進めることが主流になっています。日本では､､､ やはり All Japan で手を組むべきではないでしょうか。そのためには、協業と競争を分けて考えなければいけません。

協業のためには、共通の「言語（モデルや動く仕様書)」や共通の「やり方（モデルのガイドラインや I/F、解説書)」でお互いに補完して開発する仕組みが必要になります。社外では部品メーカー様と、社内では生産部門と連携して、開発初期段階でモデルを使った「擦り合わせ」を行うことが重要になってきます。

図 11 のように、自動車メーカー（OEM）と 部品メーカーが連携し、共通基盤の下で共に開発力を向上させ、「競争は要素の組み合わせで行う」姿を目指していきたいと思います。

これまで述べてきたように、MBD は各企業の強みを活かして生き残るための「切り札」です。お客様の要求の多様化によりソフトウェアの巨大化が進む中、競争激化の波を限られた予算と人財で乗り切るため、従来手法の限界をブレークスルーする力として、これからもますます MBD を活用していきます。

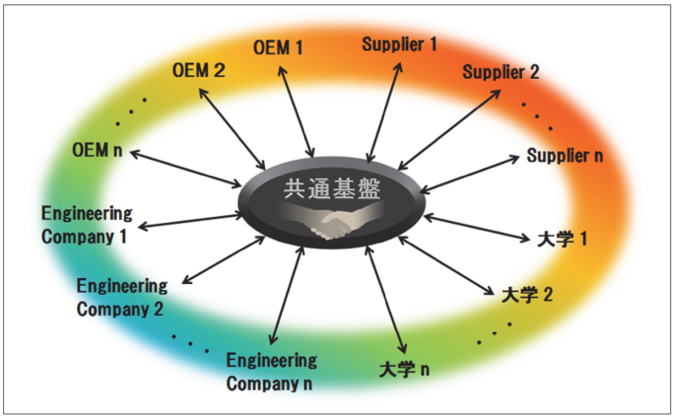


図 11　共通基盤の下での協業

7. さいごに

マツダはこれまで MBD を活用することで、生産性、品質、そして最適解の探索で成果を上げてきました。

これからも、お客様の要求の多様化により車載システムはさらに複雑となり、MBD の活躍の場が大きくなると予測されます。「今後の生き残りのために、各関連企業の強みを活かし、MBD を使った協業を推し進めていきたい」との宣言をもって本論のまとめとさせていただきます。

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工学分野（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

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
デバイス創生部門先端電子材料分野（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）
知能メディア講座コンピュータビジョン分野（西野研）

通信情報システム専攻
通信システム工学講座ディジタル通信分野（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（佐藤研）
集積システム工学講座大規模集積回路分野（小野寺研）

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（松田哲研）

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プラズマエネルギー研究分野（長崎研）
エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野
エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田一研）

生存圏研究所
中核研究部
生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野（山本研）
生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野（橋口研）＃
生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野（小嶋研）
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/ja/
複合システムのモデリング・解析 - レドックスフロー電池の場合 -

引原研究室では多岐にわたる電力システムが研究対象として扱われています。中には機械系や化学系といった電気系以外の事象が寄与するものも含まれます。そうしたシステムの挙動を調べる際、電気系以外の系の事象を考慮したモデリングや解析が必要になる場合があります。一例として、本項ではレドックフロー電池を対象とした研究について紹介します。

レドックスフロー電池とは内部に電解液の循環機構を持った蓄電池です。この電池は“セル”と“タンク”から構成され、両者の間をポンプによって電解液が循環します。セルは電力の入出力部であり、酸化還元反応を介して電気エネルギーと化学エネルギーの変換を行います。タンクは電解液の貯蔵部として機能します。この電池は大きなエネルギー容量と出力容量、素早い応答特性を併せ持ち、再生可能エネルギーの出力平滑化や負荷平準化、瞬時電圧低下の補償など様々な用途に適用可能であるとされています。

この電池を用いて電力を供給する際、タンクからセルへの反応物輸送が重要になります。この電池の起電力はセルの充電率に依存し、充電率はセル内の反応物（ここでは V^{2+} と VO_2^{+}）の物質量によって決定づけられます。セルから電力が出力される際、酸化還元反応によって反応物が消費されます。その間、反応物の消費速度に対してタンクからセルへの供給速度が遅ければ、セル内の反応物が枯渇します。結果として、急激な電圧降下や反応物輸送による反応の律速が生じ、出力電力が制限されます。したがって負荷から要求された電力やセルの充電率に応じて電解液流量を制御する必要があります。

本研究では、電解液流量制御に必要な知見を得ることを目的とし、反応物輸送とレドックスフロー電池の充放電ダイナミクスの関係について調べてきました。セルの充放電には酸化還元反応という化学的機構と反応物輸送という流体的機構が寄与しています。その両者を考慮した解析を行うにあたり、本研究では物質収支式を基にセル内の反応物量の時間変化を記述するモデルを導出しました。このモデルは電解液流量やタンクからセルへの輸送時間といったパラメータを含み、それらの値が陽に数値計算に反映されます。そのモデルを用いて充放電ダイナミクスにおける電解液流量やタンクからセルへの輸送時間の影響を明らかにしてきました。

本研究では、レドックスフロー電池の充放電動作を支配する流体的、化学的機構も考慮したモデリングや解析により、電解液流量の制御系設計に必要な知見が得られました。その知見をもとに電解液流量を制御することで、負荷変動により電流が急増した場合にも反応物の枯渇を回避しながらレドックスフロー電池による電力供給を維持できるものと考えられます。

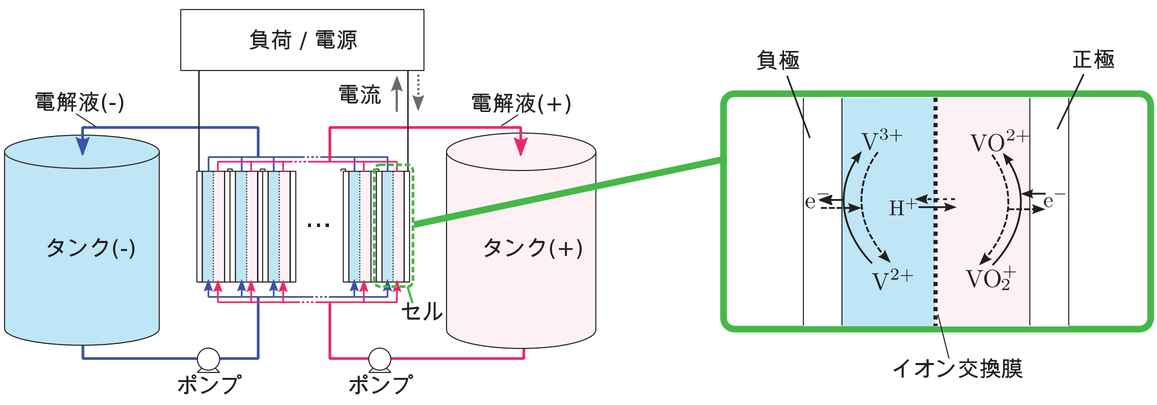


図１　レドックスフロー電池の構成。

システム基礎論講座　システム創成論分野
http://www.ist.kuee.kyoto-u.ac.jp
「電波センシングを用いた呼吸運動イメージング技術」

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）などの新型感染症の流行に伴い、医療資源の不足、いわゆる医療崩壊が生じうることが懸念されている。こうした問題に対処するためには、一部の患者について医療機関ではなく隔離施設や自宅等で経過観察する必要が生じる。こうした経過観察を安全に実施するためには、呼吸や心拍といった生体情報を数週間にわたってモニタリングすることが不可欠である。レーダ等の電波センシングによる非接触計測を導入すれば、センサ装着の不快感なく体調を長期にわたって観察することが可能となる。

本研究では、衣服や寝具を効率よく透過する2.4GHz帯のマイクロ波を用い、図1および図2に示す9素子の十字型アレイを有するアレイレーダシステムを開発した。開発システムは、生体信号ドップラーの狭帯域性を利用し、8ポートのGaAsスイッチによりアレイ素子を切り替える時分割多重方式を採用し、アレイレーダとして動作させた。さらに、時間周波数解析により呼吸運動の周波数特性を求め、呼吸成分を選択的に抽出するフィルタを構成した。その結果、呼吸運動を示す人体部位のみを選択的にイメージングすることが可能となる。

図3左にベッド上で左寄りに横たわる被験者を示す。図3右には、開発システムにより得られた呼吸運動イメージングの結果を示す。対象者の呼吸運動は微小であるが、衣服を透過して胸部付近の運動が明瞭に可視化されていることがわかる。図4に、呼吸運動を示す部位の変位量を、開発レーダ（青）および胸部バンドによる接触型センサ（橙）でそれぞれ計測した結果を示す。呼吸周期を含め、変位パターンが両者でよく一致していることがわかる。開発システムにより、衣服を透過して高精度に呼吸モニタリングが可能となることが実験的に示された。

参考文献　[1] T. Sakamoto and T. Koda, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters,* doi: 10.1109/LMWC.2020.2992541 (2020).

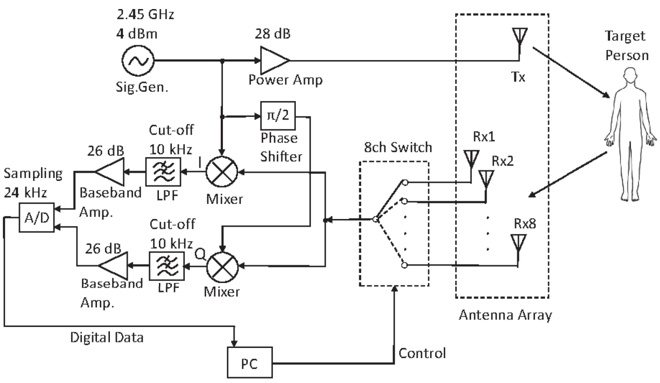


図1　開発したアレイレーダのブロック図

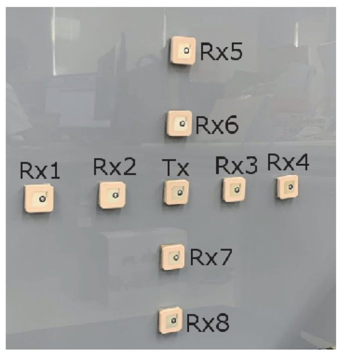


図2　開発した9素子アレイレーダ

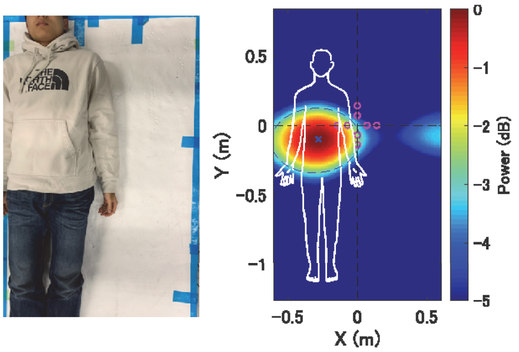


図3　電波による呼吸運動イメージングの実験結果

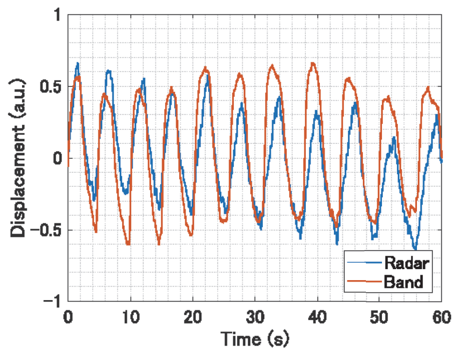


図4　開発アレイレーダ（青）と接触型呼吸バンド（橙）で測定した呼吸運動

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

高温超伝導マグネットの重粒子線がん治療用回転ガントリー応用に向けた研究

回転ガントリーとは、重粒子線がん治療において患者を動かさずに重粒子線の照射の方向を変えるための装置です。これにより治療精度が向上し、重粒子線を当てたくない臓器を避けた照射が可能になるなど、副作用の低減が実現できます。現在稼働している重粒子線がん治療用回転ガントリーは低温超伝導を用いたもので、日本の放射線医学総合研究所にて既に多くの治療実績があります。ただ、低温超伝導を使っているため、磁場を高くすることができず回転ガントリーが大型になる、数度の温度上昇で超伝導状態が壊れてしまう、といった課題が存在します。これらの課題を解決して重粒子線がん治療の普及を進めるため、雨宮研究室では高温超伝導マグネットを使った重粒子線がん治療用回転ガントリーの実現に向けた研究を行っています。

現在のほとんどの高温超伝導線は幅広の形状をしていますが、このような線に磁場が印加されると磁場を打ち消すように反磁化が発生し、マグネットの発生磁場を乱す要因となります。重粒子線を精度よく治療箇所に照射するためには、反磁化の影響を抑制し、時間的・空間的に高精度な磁場を発生することが必要です。

雨宮研究室では、重粒子線がん治療用回転ガントリーの偏向マグネットを高温超伝導マグネットで置き換えた場合（図 1）の発生磁場を電磁現象シミュレーションによって評価し、反磁化が磁場精度に与える影響の抑制手法について検討を行っています。これまでの検討結果として、主な発生磁場である二極磁場（ビームの偏向機能をもつ磁場成分）の補正は、マグネットの通電電流を事前の電磁現象シミュレーションの結果から調整することが有効であることが確認されました。また、偏向マグネットにおいては誤差磁場成分である六極磁場（ビームの形状に悪影響を与える磁場成分）を補正するには、六極磁場を発生するコイルを高温超伝導線で巻き、偏向マグネットの両端に配置することで補正が可能であることを確かめました。

この補正方法を適用した高温超伝導マグネットを図 2 のように並べることで回転ガントリーを模擬したビーム軌道を設定し、ここに重粒子ビームを通した場合のビーム照射位置でのビームスポット位置・形状をシミュレーションによって評価しました（図 3)。この結果、入射時には円形であったビームスポット形状は六極磁場の影響を受けて変形するものの、ビームスポット位置ずれ、ビームスポット形状の変形は許容範囲に留まっており、高温超伝導マグネットの重粒子線がん治療用回転ガントリーへの応用に向けた足掛かりとなる結果が得られました。

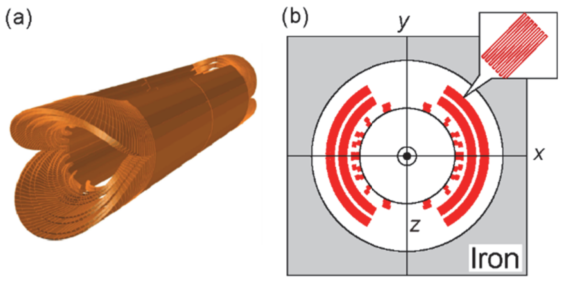


図 1　回転ガントリー用高温超伝導マグネット

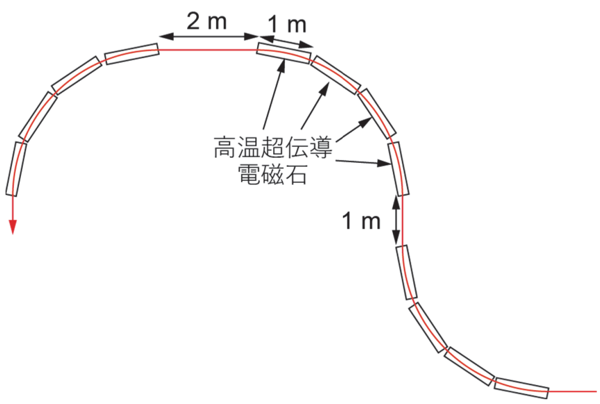


図 2　高温超伝導マグネットの配置

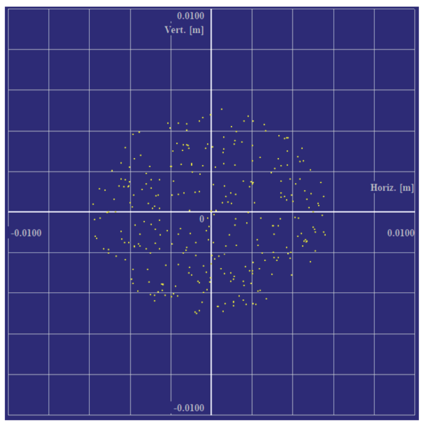


図 3　ビームスポット形状

電磁工学講座　電磁エネルギー工学分野　（松尾研究室）

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

「誘導モータ電磁界に対するモデル縮約法」

電動化および自動化が進む自動車やロボットの駆動に対応して、出力・効率の向上だけでなく高速制御性能を含めた電気機器の設計・開発が必要です。電気機器の解析技術および制御理論の進展にもかかわらず、両者を組み合わせた上記性能の計算機による評価は現在の計算機性能をもってしても容易ではありません。これは、機器の電磁界解析の計算コストが大きいためであり、効率的・高速に電磁界応答の算出を可能とするモデル縮約手法が求められています。本研究室では、誘導モータの電磁界を精度を損なうことなく効率的に等価回路表現するモデル縮約法を開発しています [1]。

簡単のため、直線型の誘導モータを考え、図 1 のように、固定子側と可動子側側に領域分割します（回転型の誘導モータでも同様にモデル縮約可能です）。両領域の電磁界は、空隙部での空間調波の成分にて接続します。図 2（a）は固定子の縮約モデルで、三相一次電流 $\boldsymbol{I}_S$ および電圧 $\boldsymbol{V}_S$、空隙部の磁界調波成分 $\boldsymbol{I}$ および電界成分 $\boldsymbol{V}$ のマルチポート表現となっています。可動子側は、図 2（b）のように空隙部の磁界成分 $\boldsymbol{I}'$ および電界成分 $\boldsymbol{V}'$ のマルチポート縮約モデルで表現されます。両者はマルチポート CLN（Cauer ladder network）法により RL 梯子形回路で縮約表現されます。($\boldsymbol{I}$, $\boldsymbol{V}$) と ($\boldsymbol{I}'$, $\boldsymbol{V}'$) は図 2（c）のように座標変換 $\boldsymbol{T}$ を介して結合しています。

図 1 の誘導モータについて、単位三相正弦波電流を供給した場合の特性を図 3 に示します。図 3(a) は U 相電圧で、空間高調波に由来する時間高調波が現れています。図 3（b）は推進力です。滑り 0 のとき、空間基本波は同期していますが、高調波成分は同期していないため負の値になっています。固定子と可動子を接続する空間高調波の成分を増やしていくと精度が上がり、第 17 次まで考慮することにより、正確にモータ特性を再現できていることがわかります。

文献 [1] T. Matsuo, K. Sugahara, A. Kameari, Y. Shindo, “Model order reduction of an induction motor using a Cauer ladder network method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 56, 7514704, 2020.

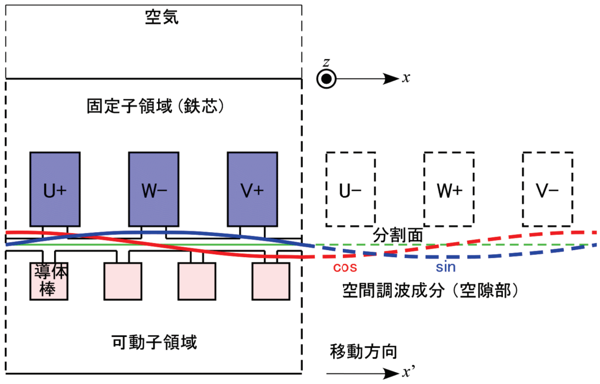


図 1　リニア誘導モータの領域分割

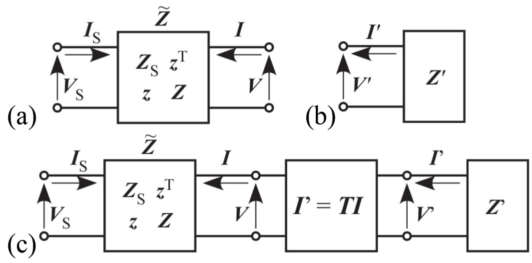


図 2　モータモデル縮約 : (a) 固定子、(b) 可動子、(c) 固定子と可動子の接続

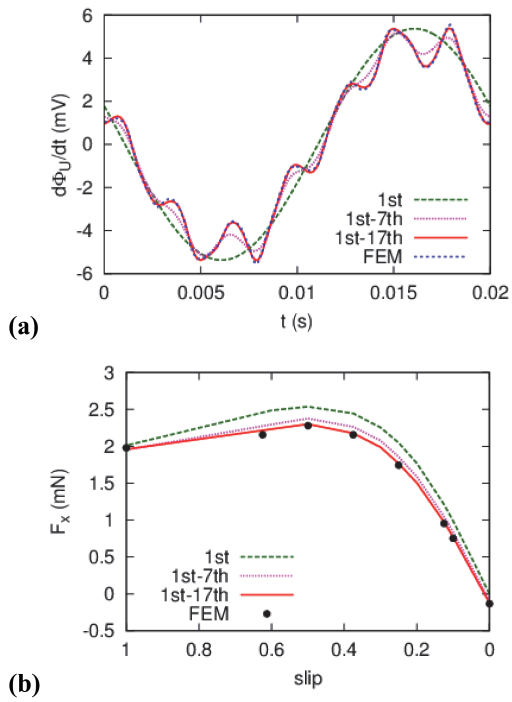


図 3　モータ特性の表現 : (a) U 相電圧の時間波形、(b) 推進力の速度特性

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）
http://aem.kuee.kyoto-u.ac.jp
「輸送機器用全高温超伝導誘導同期回転機の研究開発」

当研究室は、電気自動車や船舶他の輸送機器用途をターゲットとした高温超伝導誘導同期モータ（High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM）システムの研究開発を推進している。本研究開発は、2009年から10年間に亘りNEDOやJSTの産学連携プロジェクトを中心として進めており、輸送機器応用のために必要な基礎技術をほぼ確立した[1,2]。そこで本年より、本学・オープンイノベーション（OI）機構の支援のもとで、新たな国家プロジェクトの計画と共に、大型企業共同研究に移行して、次の10年後の実用を目指して研究開発を加速しつつある。また、新たな取り組みとして、回転機における電気－機械エネルギー変換過程の第一原理的な研究を実施しており、例えば巻線を収めるスロットについて、従来の経験則的設計を脱し、自己組織化法に基づく体系的かつ一意的決定法の確立に成功している[3]。今後は、これら基礎研究成果も擾乱の小さな低エントロピー回転系であるHTS-ISMに適用して、新たな回転機理論の創生を目指す予定である。

図1には、JST-ALCAプロジェクトとして開発した全高温超伝導モデル機の外観写真を示す[1,2]。本機は、三相交流電流を強制通電する固定子巻線およびかご形回転子巻線の両者に高温超伝導テープ材を使用している。図2には、固定子巻線の直流通電特性を示す。HTS線材の上記特性は、非常に複雑な経験磁界ベクトル依存性を示すが、我々の独自コードによって、フィッティングパラメータを用いない定量的記述にはじめて成功した[4]。さらに、同固定子の三相交流通電損失も別途測定し、非線形交流抵抗として定式化すると共に、非線形電圧方程式＋運動方程式に導入して回転特性解析したところ、図3のように負荷特性の実験結果を良く再現出来ている[5]。全超伝導機の負荷試験および同定量評価については、我々の他の成功例は無いと思われる。さらに、Maxwell方程式における超伝導材料の特長は、同材料を所謂混合状態で使用する場合、直流であろうと交流であろうと電界と電流密度の構成関係にのみ現れる。従って、最終的には図2から図3の特性を定量記述できなければならないが、HTS回転機における当該評価法の確立には残念ながら誰も成功していない。従って、HTS-ISMの実用の前に残された重要な基礎研究の一つとして、上記理論の確立を目指して検討を進めている。

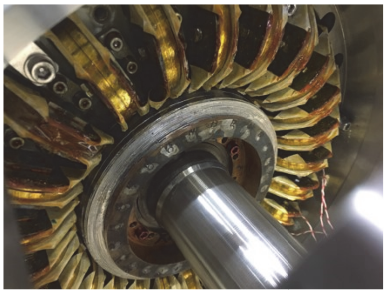


図1: JST-ALCAプロジェクトで開発した全高温超伝導誘導同期モータの写真[1,2]

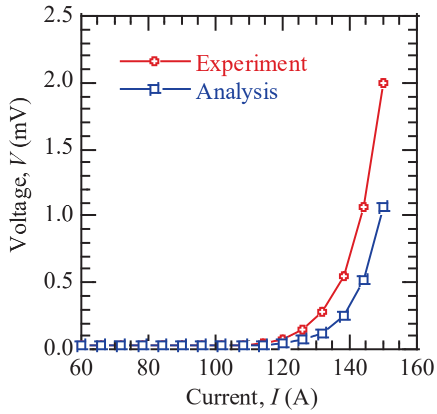


図2: 図1の固定子巻線の直流通電特性[4]

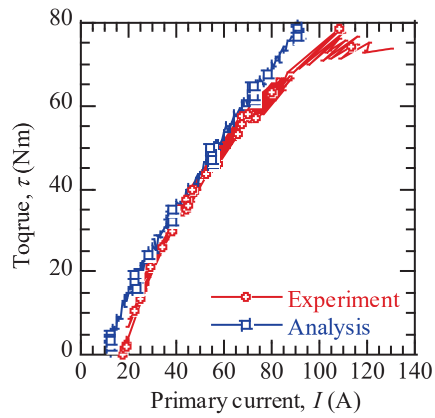


図3: 図1の負荷特性例[5]

[1] 日経エレクトロニクス12月号, pp. 39-41, Nov. 2019, [2] 日経ビジネス，テクノトレンド107，pp. 77-78, Feb. 2020, [3] Y. Kido and T. Nakamura, unpublished, [4] K. Ikeda and T. Nakamura, under review, [5] T. Nakamura, M. Okuno, et al., Physica C, vol. 578 (2020) 1353662

電子物理工学講座　極微電子工学分野　（白石研究室）

https://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp

「交流スピン流電流変換現象の検出実験」

スピントロニクスにおいてはスピン角運動量の流れであるスピン流が重要であるが、逆スピンホール効果などの物質中のスピン流電流変換現象によってスピン流をキャリアの流れに変換して起電力を測定する実験が盛んに行われてきた。スピン流電流変換は直接観測することができないスピン流を検出する手法として学理上重要であり、電流・スピン流の相互変換という意味でもデバイス応用上で注目されてきた。昨今までの実験報告では、スピン流電流変換による直流起電力の観測が主流であった。一方で、図 1 のようにスピン偏極方向が周期的に時間変化する交流スピン流を考えることができる。2018 年に Berger らが交流スピン流生成検出法 [1] を考案・実証したのを皮切りに交流スピン流の探求が盛んになされるようになった。この手法は、磁性体 / 非磁性金属（Pt や Cu）二層膜をマイクロ波源・アンテナを兼ねたコプレーナ導波路上に設置してその複素透過係数からスピン流電流変換を検知するものである。筆者も同手法の考案者のグループに研究滞在し技術の修得を進めるとともに、半導体 Si 構造に同手法を適用した実験を行った [2]。同時にこの実験構成の回路的側面からの理解を試みてきた。図 2 に示すように、磁性体 / 非磁性体二層構造で面直方向の磁化歳差を誘起した場合、「スピンポンピング」と呼ばれる現象により交流スピン流が非磁性体に注入される。その場合、非磁性体中の逆スピンホール効果によって変換される電流の方向も時間変化し、交流電流が生成されることとなる。実験系では、磁化ダイナミクスを誘起するための交流磁場の発生源としてコプレーナ導波路が近接して設置してある。図 2 に示すように試料端付近での電気化学ポテンシャルの境界条件を考えると、端面に出入りする電流密度と端面での電荷密度の時間変化が釣り合っていなければならない（定常電位差を観測している直流測定では電流保存のみを考えていた）。とりわけ、試料が導波路と近接している場合は試料端・導波路間のキャパシタンスによる電荷蓄積がコプレーナ導波路に交流起電力応答を及ぼす。以上が、スピン流電流変換がコプレーナ導波路の透過係数を変調するメカニズムであるが、この様子を等価回路に表す（図 3）。試料の領域を伝送線路に縦列接続された集中定数素子としてモデル化することで、測定された電圧透過係数から交流スピン流電流変換を「スピン軌道トルク伝導度」として定量的に評価できる。

筆者らの実験では Si のドーピング型・濃度によるスピン流電流変換効率の変調を観測することができ（図 4）、同手法の半導体への有用性も実証できた。さらに、この測定原理自体はスピントロニクスにおける物質探索のみならず、交流スピン流と交流電圧・電流の相互変換技術としても重要である。磁化ダイナミクスの典型的な周波数は数 GHz から数十 GHz であり、通信技術応用において重要な周波数帯にわたっている。本稿で紹介したような交流スピン流を介在した電気的機能を活用することで、産業応用に資する高周波デバイスの創出も期待できる。

参考文献 : [1] A. J. Berger, *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 094407（2018). [2] E. Shigematsu, *et al.*, submitted.

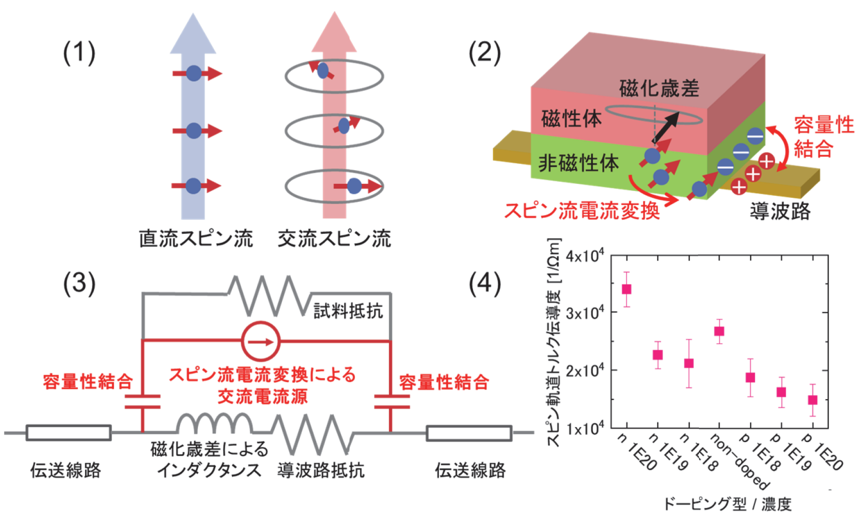


図 1: 直流 / 交流スピン流の模式図。
図 2: 交流スピン流生成検出法の典型的なセットアップ。
図 3: 交流スピン流生成検出法の実験構成の等価回路。
図 4: ドーピング型 / 濃度を変化させた Si におけるスピン軌道トルク伝導度の測定結果。

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

「高発光効率化を目指した新奇基板上への AlGaN 深紫外 LED の試作」

紫外光は、殺菌、消毒、キュアリング、リソグラフィーなど広い分野で既に使用されている。これまでは例えば Hg ランプや ArF、KrCl エキシマランプなどランプ系の紫外光源が用いられてきた。構成元素の環境負荷が高く、装置構成にガラス部を必ず含むことから、（蛍光灯が白色 LED に置き換えられたのと同様に）固体紫外光源の実現が期待されている。窒化物半導体の GaN と AlN による混晶 AlGaN は、GaN と AlN の組成比により禁制帯幅を 3.4 eV（波長 365 nm 相当）から 6.0 eV（207 nm）まで変化させることができるため、この固体紫外光源用材料として期待され盛んに研究されている。

通常、AlGaN 系 LED は、結晶成長のしやすさから六方晶系ウルツァイト構造の（0001）結晶面上に作製される。格子定数の違いにより量子井戸発光層は弾性的に歪んでおり、その歪がピエゾ分極を誘起している。（0001）面上の場合、ピエゾ分極起因の電界が量子井戸面に垂直な方向で最大となるため、注入された電子と正孔が逆方向に大きく引き離され、輻射的に再結合する確率が下がってしまう。この効果を抑制するには、結晶構造の特徴を利用して、導入された電界の量子井戸面に直交する成分を減らす面方位を探すことが有効である。今回は、（0001）面から約 43 度傾いた（$1\bar{1}02$）*r* 面を利用した。$Al_{0.8}Ga_{0.2}N$/AlN 量子井戸における電界強度は、（0001）上に作製した場合 2.3 MV/cm にもなるのに対して、*r* 面では 0.7 MV/cm に抑制できることが、我々の実験的な研究によりわかっている [*Appl. Phys. Lett.* **104**, 252102（2014）]。

この *r* 面上に LED を作る際に困難であった点は、（0001）面の結晶成長条件が全く適用できなかったことにある。LED は比較的簡単な層構造ではあるが、それでも、図 1 に示したように、AlN、*n* 型 AlGaN、AlGaN 障壁層、AlGaN 井戸層、AlGaN 正孔注入層（これらは組成が異なる）、*p* 型 GaN など多くの層があり、それらに対して地道に条件を確立することが必要であった [*J. Crystal Growth*, **522**, 68（2019）, *Appl. Phys. Exp.* **11**, 061001（2018）]。確立した条件のもと LED 構造を結晶成長し、その後デバイス化を図った。完成した LED に電流注入して駆動した時のスペクトルを図 2 に示す。波長 270 nm において、単峰性の発光を得ることに成功した。まだ発光効率は低いものの、この結果は、原理的に高効率紫外発光する可能性のある LED を実証したことから注目を集め、論文での発表 [上記，*Appl. Phys. Exp.*] を受け、*Compound Semiconductor* 誌の research review に紹介された [vol. **24**, p.58（2018）]。波長 250~280 nm は殺菌応用に極めて有効であるが、人体への影響も大きい。一方、さらなる短波長域の 220nm 帯では、真皮層や目の表面の水分でブロックされるため、人体にはほとんど無害でかつ空中浮遊ウイルスの不活性化に有効であることが、環境負荷の高いエキシマランプを用いて実証され、大変注目されている。他方、波長が 200nm 域より短波長になると空気の吸収を受けて利用範囲は制限される。これらのことから、AlGaN 系においてもさらなる短波長化に向けて、210~230nm 域の LED 開発競争が激化するものと予測される。

図 1　作製した深紫外 LED の構造

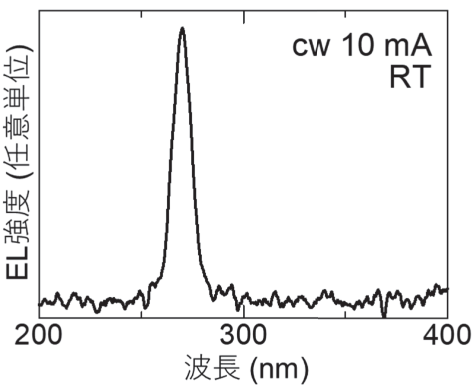


図 2　作製した深紫外 LED の電流注入発光スペクトル

工学研究科　附属光・電子理工学教育研究センター　ナノプロセス工学分野

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

「サブナノメートル精度での微細構造作製技術」

ナノ構造を高精度で作製する技術は、エレクトロニクス、ナノフォトニクスの分野をはじめとして様々な分野において、極めて重要である。例えば、現在、エレクトロニクス分野において、電界効果トランジスタの作製に7nm半導体プロセス技術が採用されており、今後、更なる微細化が進むことが予想される。また、ナノフォトニクス分野においては、スマートモビリティ・スマート製造の実現のための大面積フォトニック結晶レーザーや、高速光情報処理のための光集積回路等の開発が盛んに進められ、これらの光ナノ構造の作製にも、高精度な半導体プロセス技術が不可欠である。このようなナノ構造の作製において、最も重要となるのは、設計した構造を半導体ウエハなどの上に高精度に転写・形成する技術である。我々は、電子ビーム露光法において独自の工夫を行い、0.025nmという超高分解能で、ナノ構造の形成に成功した。本稿では、その一部を紹介する。なお、本研究は、電子工学専攻光量子電子工学研究室と共同で行った。

サブナノメートル精度の構造形成を行った例を図1に示す。図1（a）の模式図のように、周期がaおよび$a+\Delta a$と、僅かに異なる2種類のライン＆スペース状のパターン（パターンAとB）を並べて形成した。このとき、両パターンの左端をそろえた場合には、右方向に進むに連れて、パターンの繋ぎ目において生じるシフト量が次第に増加する（ノギスの原理）。そのため、周期の差Δaが極めて小さい場合（ここでは、一例として0.025nm）でも、基準位置から十分に離れた距離dの位置でのシフト量Δdを測定すれば、Δaを$\Delta d \times a/d$により見積もることが出来る。図1（b）に、上記のパターンをSiN_x膜上に形成し、基準位置（d=0μm）およびd=300μm, 500μmと離れた場所において電子顕微鏡（SEM）により観察した様子を示す。また、基準位置からの距離と、シフト量（Δd）を図1（c）にプロットする。同図より、シフト量は線形的に変化しており、周期の差（Δa）を見積もると、設計値（0.025nm）とほぼ等しいことが確かめられた。本結果より、0.025nm（＝シリコン原子間隔の～1/10）という超高精度での微細構造作製に成功したと言え、この技術は、エレクトロニクスや、ナノフォトニクスなどの分野において、広く応用出来ると考えられる。

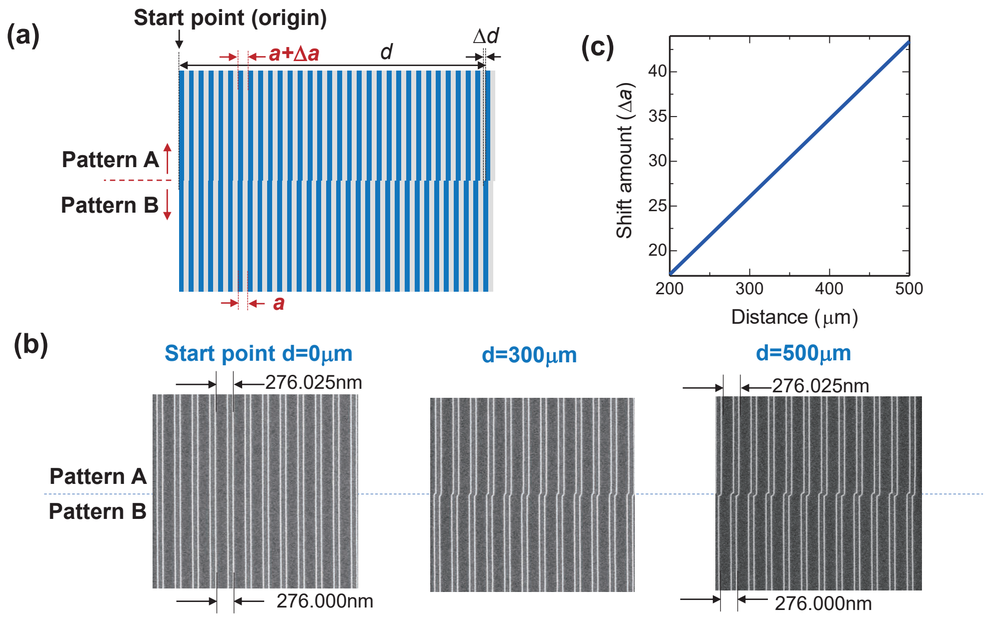


Fig. 1(a): Schematic diagram of line-and-space patterns with different lattice periods to evaluate the sub-nanometer pattern control, (b) SEM images of line-and-space patterns with periods of 276.025nm (pattern A) and 276.000nm (pattern B) which are fabricated into SiNx. (c) Shift amount at the interface with respect to distance measured by SEM images.

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/

医療テキスト構造化のための言語・知識処理基盤の構築

In recent years, electronic health record (EHR) systems have been widely adopted in the hospitals. In Japan, the prevalence of EHR in the major size hospitals has reached 62.5%. It becomes desirable to harvest knowledge from the huge amounts of accumulated EHRs. One critical component used to facilitate the use of EHR data is the information extraction (IE) task, which automatically extracts and encodes clinical information from texts. This introduction describes the collaborative research of IE on Japanese EHRs.

This project aims to build an automated language and knowledge processing infrastructure to analyze and re-structure EHRs for helping the new drug discovery of two diseases with high death rates in Japan: lung cancer and idiopathic pulmonary fibrosis (IPF). Given unannotated radiography reports, our automated system is designed to extract essential clinical **name entities** (e.g. disease, change, remedy), their **modalities** (e.g. positive, suspicious) and **relations** between entity pairs. Based on the extracted information, the system can reform the reports into a more informative structure and incorporate external knowledge. For instance, in Figure 1, the re-structured information can show the anatomical positions where a disease occurred. We believe such novel structure of clinical reports can be beneficial to recognize new patterns for discovering new drugs.

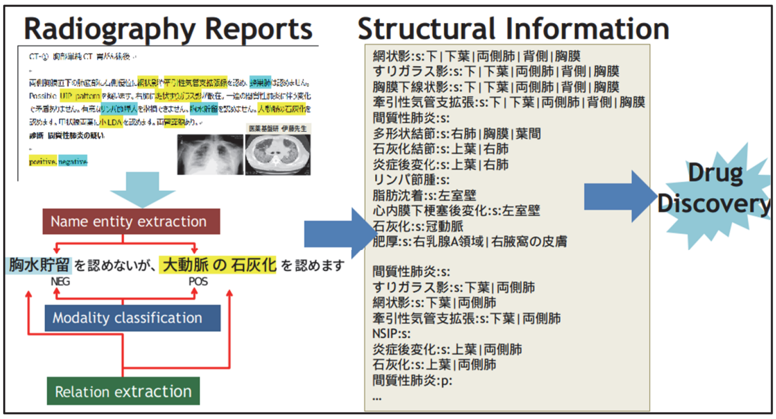


Figure 1. An Example of Re-structured Radiography Report.

In order to extract information from clinical reports, we adopt a supervised natural language processing manner to arrange this research with two focuses: dataset development and model construction.

Dataset development: We first develop a human annotated clinical IE dataset [1] containing three pipeline tasks: 1) Name entity extraction from reports. 2) Modality classification of entities. 3) Relations extraction of entity pairs. As a consequence, it is the first work to introduce the relation extraction task into the Japanese clinical domain IE.

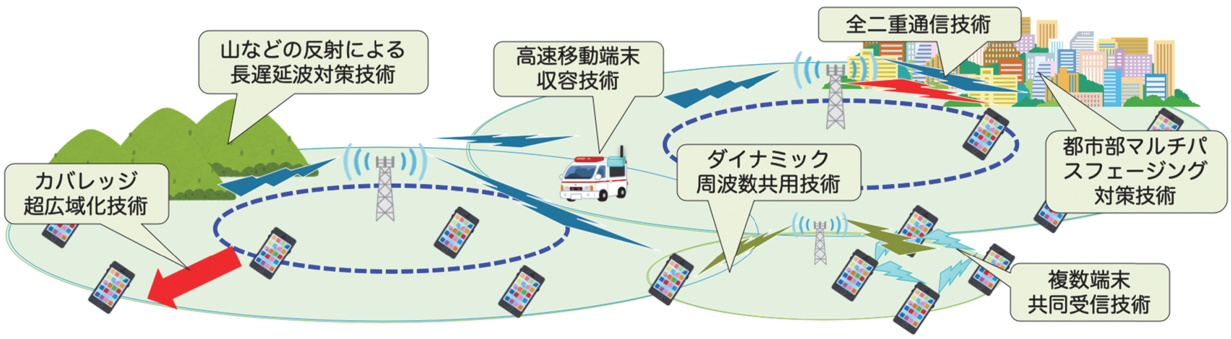
Model construction: Most existing IE systems adopt pipeline approaches for three tasks, in which the errors propagated in the early tasks will hinder the later tasks. Therefore, we propose a novel system to jointly process three tasks. Our system also explores the feasibility of exploiting the latest pre-trained BERT model to improve the encoding performance. The empirical results suggest our system obtains substantial improvements, compared to the pipeline approach and LSTM + word2vec encoder.

We have started the new research of clinical Timeline generation. Given a clinical report, the Timeline system analyzes the report by IE processing and anchors name entities in a time-axis. Such Timeline representation of clinical reports can allow the doctors quickly grasp the patient's condition. We revise our annotation schema for covering temporal relations (e.g. *on, start*) from clinical entities to temporal entities (e.g. '*2015-09*', '*H23*'). Now we are focusing on developing a model to automatically infer Timelines from raw clinical reports.

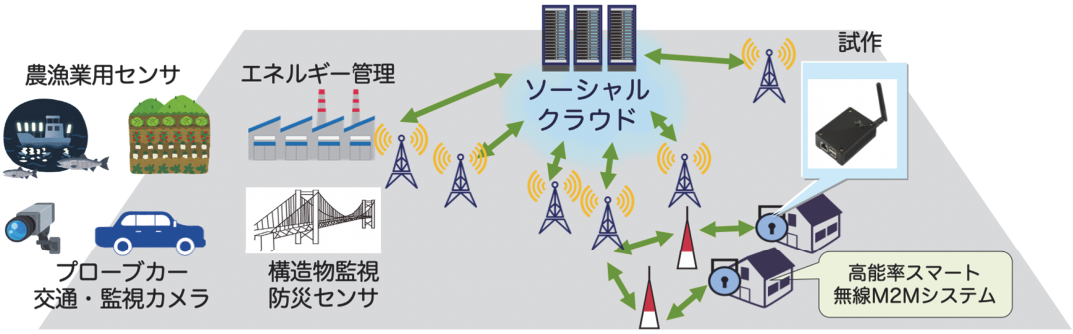
[1] Shuntaro Yada, Ayami Joh, Ribeka Tanaka, Fei Cheng, Eiji Aramaki and Sadao Kurohashi. Towards a Versatile Medical-Annotation Guideline Feasible Without Heavy Medical Knowledge: Starting From Critical Lung Disease, in LREC 2020.

通信システム工学講座　ディジタル通信分野　（原田研究室）
http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/
第６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、物と物（M2M）との通信など、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、4G システムとして LTE などの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでおり、また 2020 年からは 5G が一部の国においてサービスが開始されました。しかし、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。現在、すでに 5G 以降のシステム（Beyond 5G）および 6G の研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線 LAN、無線 PAN、および無線 M2M センサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室では Beyond 5G/6G に関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、全二重複信（Full-duplex）セルラシステム、周波数共用システム、新信号波形・新物理層方式、高周波帯を活用した端末共同多重 MIMO 伝送技術、高能率スマート無線 M2M 通信システム、機械学習の通信システムへの応用などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。なお「周波数共用システム」に関する研究開発は総務省「異システム間の周波数共用技術の高度化に関する研究開発」における受託研究の一環として実施しています。また、「全二重複信セルラシステム」に関する研究開発は総務省委託研究「第５世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発」の一環として実施しています。また「高能率スマート無線 M2M 通信システム」に関する研究開発は総務省 SCOPE の委託研究の一環として実施しています。



本研究室における第６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



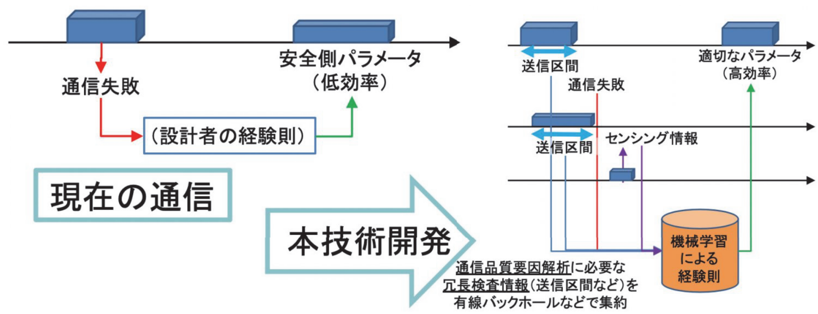
本研究室におけるスマート無線 M2M システムに関する研究開発概要

通信システム工学講座　伝送メディア分野　（守倉研究室）

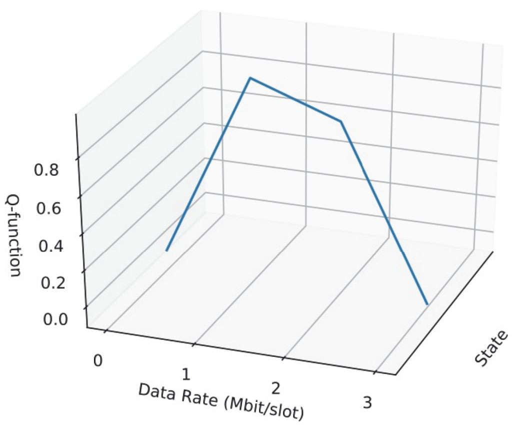
http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

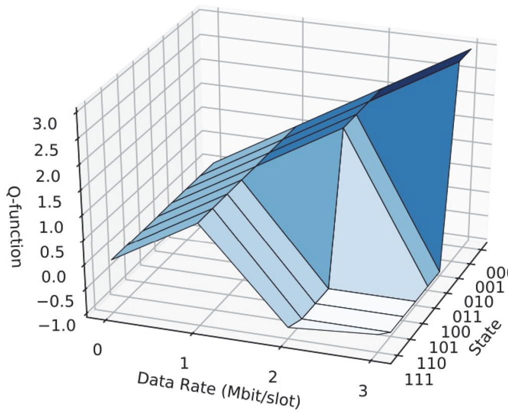
「冗長検査情報による通信品質要因解析」

無線通信においては一般に、通信の成否は確認できる一方、フレーム損失など通信品質の要因は不明である。無線LANを例に挙げると、フレーム損失の対策として、原因が低受信電力と想定して伝送速度を下げる、もしくは原因が衝突と想定して待機時間を長くするなどといった経験則が用いられる。しかし、原因が特定できていないために原因に対して必ずしも適切でない対策をとることがある。加えて、通信品質要因は、無線通信の稠密化に伴い、より複雑になっている。フレーム損失理由が明確になれば原因に対して適切な対策をとることができ、原因が不明なまま対策を行った場合に比べて高効率な通信を行うことができると考えられる。本研究では、通信品質要因の特定に資するフレーム送信区間などの情報を冗長検査情報と呼ぶこととし、有線バックホール回線などでの収集を想定している。そして、通信成否等の情報と組み合わせ、通信品質要因解析ならびに無線アクセス技術の高効率化を検討している。



初期検討の一例を示す。強化学習で最も基本的なQ学習を用いた。Q学習では、各状態・行動に対して過去に得られた報酬に基づき、状態・行動の価値を表すQテーブルを更新しつつ、次の行動を決定する。各時間スロット毎に、状態は他の無線局の送信の有無（冗長検査情報）、行動は送信の有無及送信時の伝送速度､即時報酬は受信に成功したデータ量とした。学習後のQテーブルの値を下図に示す。冗長検査情報なく強化学習を行う場合は､左図のように､伝送速度が1 Mbit/sの場合が最も受信成功データ量が多いと学習し、この伝送速度を高い確率で用いる。一方、冗長検査情報を状態として用いた右図の学習結果では、冗長検査情報、例えば110は、AP 1及び2が送信している状況を表しており、この場合は1 Mbit/sであれば送信に成功していることの学習ができている。このように、冗長検査情報は、通信品質の要因解析に有用と言える。





本研究開発は総務省SCOPE（受付番号196000002）の委託を受けたものである。

（参考文献） 山本高至, 紀平悠人, 香田優介, 西尾理志, 守倉正博, “無線LANにおける冗長検査情報による通信品質要因解析,” 2020年電子情報通信学会総合大会, B-5-147, March 2020.

集積システム工学講座　大規模集積回路分野　（小野寺研究室）
http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「集積ナノフォトニクスに基づく超低遅延演算回路の研究」

私たちは集積ナノフォトニクスに基づき、コヒーレント光をチップ上で変調・制御し、光の速さで計算する超低遅延演算回路の設計手法を研究しています。微細化が進んだ集積回路デバイスは、極限まで詰め込まれたトランジスタを活用してプロセッサコアや演算器を複数搭載し、データ処理を並列化しています。これは単位時間あたりのデータ処理量（スループット）を高めることに繋がります。一方でデータ処理遅延に関して考えてみましょう。ディジタル集積回路の基本構成要素であるCMOS論理ゲートの遅延は微細化と共に改善してきました。しかし22 nmプロセス付近を境に、金属配線抵抗に由来する配線遅延が支配的となり、結果としてCMOS論理ゲート1個の遅延は10 ps付近で飽和しています。これは、微細化だけでは“データ1個の処理時間”をあまり改善できないことを意味しています。例えば株式取引のように、急に発生した事象に超低遅延に反応するシステムを実現するためには、この“低遅延性の壁”を打ち破る必要があります。集積ナノフォトニクスの登場により、μmオーダのスケールで光変調器をチップに搭載できるようになりました。本研究は、NTT物性科学基礎研究所、産業技術総合研究所、九州大学、名古屋大学と連携し、集積ナノフォトニクスのアプローチで低遅延性の壁を打破します。

一例として、NTT物性科学基礎研究所が開発した集積ナノフォトニクスデバイスを用いた光並列乗算器（図1）を紹介します。並列乗算において回路性能を決めるのは、部分積を足し合わせる累算です。光集積回路技術を使い、累算の低遅延性を改善します。“光パスゲート”と書かれた素子は、ナノフォトニック電界吸収型光変調器（素子長10μm以下）です。電気制御入力（x_i, y_i）の電圧が1の場合にのみ、光が左から右に通ります。この結果、光信号が図1の右側へ通るのは、x_iとy_iがともに1の場合であり、部分積を計算することに対応しています。

ひとたび電気入力信号値が確定すると、変調された光信号がナノフォトニック“方向性結合器”で干渉（振幅のアナログ加算）し、光の速さで累算します（図1の①と②に対応）。CMOS集積回路と異なり、光信号の伝搬遅延は素子長のみで決まります。方向性結合器の素子長はおよそ100μm程度であり、光信号が伝搬するために必要な時間はたったの1 ps　（CMOS論理ゲート1個の10分の1）です。累算器の後段に接続する“AD変換器”や“並列加算器”もナノフォトニック光変調器で実現できます。光電混載回路シミュレーション（図2）と数値解析によると、8ビット並列乗算器全体の遅延はおよそ106 psで、CMOS集積回路（16 nmプロセス）より3.3倍高速です [1]。

「電気入力信号値が確定すれば、変調光を光の速さで干渉させるだけで演算できる」というアプローチを活用すると、様々な超低遅延光演算器を設計できます。本研究室では、例えば二分決定グラフ（BDD）に基づく光論理回路を研究しています。ニューラルネットワークの光実装手法にも取り組んでおり、1層100ノード程度の規模で、1層あたり1 ns未満の遅延で動作する多層パーセプトロンを実現しています。

[1] Y. Imai et al., "An Optical Parallel Multiplier Using Nanophotonic Analog Adders and Optoelectronic Analog-to-Digital Converters," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2018.

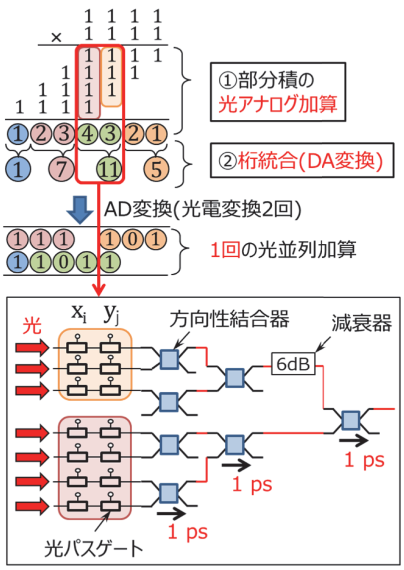


図1: 光並列乗算器のコンセプト。

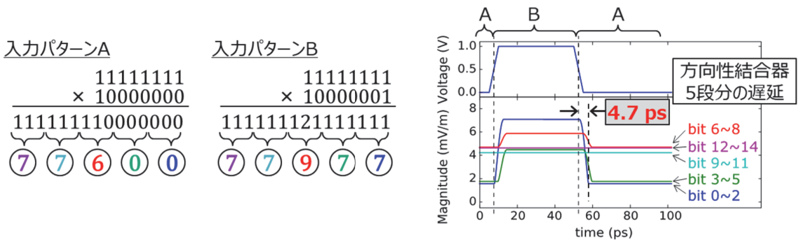


図2: 光累算回路のシミュレーション結果（縦軸：光出力の電界強度）。

システム情報論講座　医用工学分野　（松田（哲）研究室）

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

生体内分子の定量的 MRI 撮像法の開発 － CEST MR Fingerprinting －

MRI 画像のボクセル値には、そのボクセルに内包される対象に生じる様々な物理現象が関与し、それぞれの現象を特徴付ける物理量の大きさの違いが、各ボクセル値の違い、すなわち画像コントラストとして現れる。どのような物理量を画像上で強調するかは撮像パルス系列により変更でき、そのコントラストの程度は撮像パラメタの設定により調整できる。様々な疾患の画像診断は、各種の物理量の大きさが健常組織と病変組織で異なることを利用して、その違いを強調した画像を撮像し、組織性状などを定性的に判断することで行われる。一方で、このような「定性画像」とは異なり、物理量の大きさをボクセル値とする「定量画像」がある。定量画像には、画像からその物理的意味や生物学的特徴を定量的に解釈できる利点があるが、撮像に長時間を要することが課題であった。

2013 年に、短時間の撮像データから複数種類の定量画像を同時に生成する MR Fingerprinting（MRF）と呼ばれる手法が報告され、臨床的な有用性からも注目されている。MRF では、N 通りの撮像パラメタの組を特定の順に並べた「撮像パターン」に従って、撮像パラメタを変更しながら短時間の計測を繰り返す。得られる画像群を時系列方向に眺めると、各ボクセルが有する N 点で構成される信号列は各物理量の大きさに応じて固有の軌跡を描く。計測と同一の撮像パターンを用いた際に、各物理量の大きさの網羅的な組み合わせで得られる信号列群をブロッホ方程式を用いて計算し、各組に応じた索引を有する信号列の辞書を作成しておくと、計測した信号列と辞書の信号列群との間でパターン照合を行うことにより、各物理量に対応した定量画像を得ることができる。

MRF は、ブロッホ方程式で扱える物理現象であれば適用可能という柔軟性を有する。その一つに化学交換がある。化学交換は、分子を構成する一部の原子が他の分子の原子と交換する現象であり、低濃度の分子を検出する CEST MRI で利用されている。CEST MRI には多数の物理量が関与するため、それらを個々に定量すると膨大な計測時間を要するという課題がある。そこで当研究室では、CEST MRI に MRF を導入し、効率的に定量画像を取得する CEST MRF の開発を行っている。本稿では、CEST MRF により化学交換現象を特徴付ける分子濃度及び化学交換速度を定量画像として得る手法開発について紹介する。

計測した信号列と辞書の信号列との照合に基づく MRF では、計測信号に含まれる雑音が誤った照合結果をもたらす要因となる。MRF における撮像パターンは任意に選択できるが、その違いは、計測及び辞書の双方の信号列の軌跡に影響し、結果として定量の正確性に影響を及ぼす。そのため撮像パターンの最適化が必要となるが、その最適化手法は現在のところ確立されておらず、一般にランダムな撮像パターンが用いられている。そこで本研究では、解析的に撮像パターンを設計可能な手法開発を目的とした。定量の正確性が期待できる撮像パターンは、辞書内のあらゆる信号列間の類似度が可能な限り低くなるような撮像パターンである。また、適切な撮像パターンは信号雑音比（SNR）によって変わるため、SNR に応じた撮像パターンを選択する必要がある。このような要件を満たす撮像パターンを生成するために、信号列間の類似度に関するパラメタを導入した評価関数を提案した。提案手法により撮像パターンを設計し、シミュレーション実験及び水溶液ファントムを対象に計測実験を行った。シミュレーション実験から、信号列間の類似度を考慮して設計した複数の撮像パターンを、画像の SNR に応じて使い分けることが定量の正確性向上において有効であることを明らかとした。また計測実験では、提案手法と従来手法とで得られる定量画像を比較し、同程度の推定結果であることが確認できた（図）。

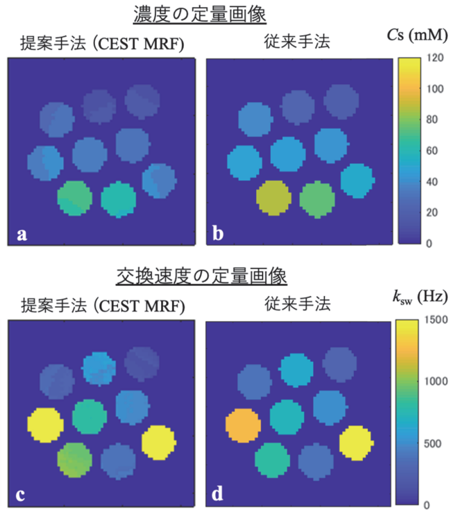


図　濃度及び交換速度の異なる 9 種類の L-Arginine 水溶液ファントムにおける提案手法と従来手法による分子濃度及び交換速度の定量画像生成結果。

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/

「実世界でのブロックの組合せと配置によりシナリオを作成するAR訓練環境構築システム」

地震や火事が発生したときのための防災訓練や、重要施設でテロ行為などの不法事案が発生したときのための対策訓練は、できる限りこれらが実際に発生した状況を再現して実施することが望ましいのですが、安全性やコストの問題があるため、簡略化して実施される場合が多く、訓練の現実感が低くなってしまうという問題があります。これに対して、近年、拡張現実感（Augmented Reality: AR）を利用して、訓練生の視野に炎や煙などのコンピュータグラフィックス（Computer Graphics: CG）を重畳表示しながら訓練を実施できるようにすることにより、訓練の現実感を高める試みがなされています。しかし、ARを利用した訓練環境を実現するためには、プログラミングなどの専門知識が必要なため、このような訓練環境は、ソフトウエア開発会社にお願いして開発してもらう場合がほとんどでした。しかしこの場合、訓練を実施する人が、その時々の課題に応じて訓練シナリオを変更することや、新しいシナリオを作成することが困難であるという問題がありました。

そこで本研究では、プログラミングなどの専門知識を持たない人でも容易にARを用いた訓練のシナリオを作成し、訓練を実施可能にするシステムを開発しました。本システムでは、図1に示す複数のブロックを組み合わせたものを、訓練を実施する環境に配置し、その後、カメラで訓練環境を満遍なく撮影して、その組合せと配置を認識させることにより、火災が発生する場所やイベントの発生条件などのシナリオをシステムに入力します。撮影により得た画像はStructure from Motionと呼ばれる手法を用いて処理され、環境の3次元形状モデルを作成するためにも利用されます。このモデルは、実物体とCGの前後関係を考慮したAR映像の合成や、CGの水の実物体の表面での跳ね返りの実現などに利用されます。図2に作成したAR訓練の実行例を示します。ブロックには、火・爆弾・煙・水などの「物」を表すブロック、警察官･侵入者･作業員などの「人」を表すブロック、現在時刻や経過時間などの「時間」を表すブロック、移動する・かがむ・飛び降りるなどの「動作」を表すブロック、2つの物の間の現在距離を表すブロック、数字を表すブロック、プログラミングにおけるIF文に相当する条件判断を設定するブロックなどで構成され、これらを組み合わせることにより様々な訓練シナリオを作成できます。例えば、「訓練参加者が侵入者から5m以内に近づくと、侵入者がシナリオで設定した経路に沿って逃げる」「訓練開始から5分後に爆弾が爆発し、時間が経過するにつれて火や煙が激しくなる」のようなシナリオを作成することができます。また、一部のブロックには小型の無線スピーカが組み込まれており、火災が発生している場所から炎が激しく燃える音が聞こえるようにするなどの設定も可能です。

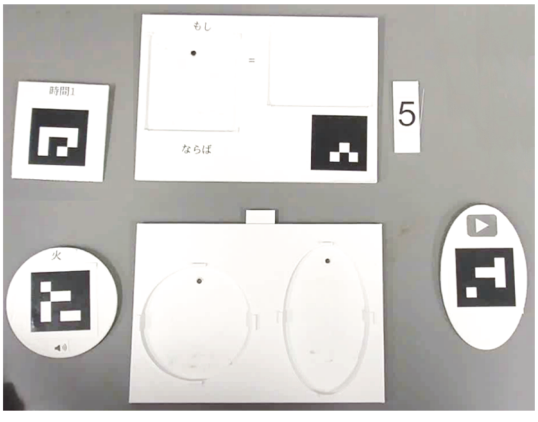


図1　訓練シナリオ作成に使用するブロックの例（ブロックはその形で填められる個所を制限）

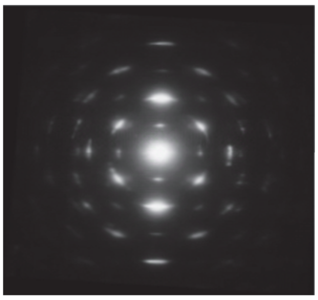
図2　作成された訓練の実行例（炎はCG）

エネルギー材料学講座　エネルギー応用基礎学分野　（土井研究室）
http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/
「液体水素冷却で利用可能な二硼化マグネシウム超伝導線材の開発」

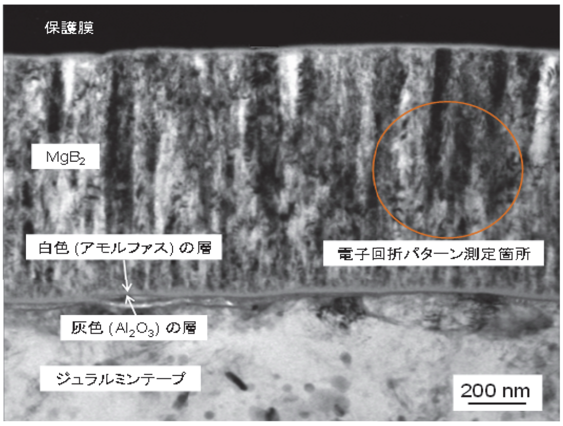
超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、リニア中央新幹線、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器などの様々な製品が作り出されています。しかし超伝導状態を実現するためには物質を極低温まで冷却する必要があります。超伝導物質の多くは電線形状に加工することが難しいことから、現在実製品で使用されている電線はNb-Ti合金と銅を複合化したものであり、液体ヘリウムを使って4.2 Kに冷却して使用しなければなりません。しかし、ヘリウムは資源量が限られていて、近年価格が高騰するのみならず、入手そのものが困難な状況になりつつあります。そこで、次世代の超伝導線材の開発が急がれていますが、その有力候補として二硼化マグネシウム（MgB_2）が考えられています。

MgB_2は超伝導臨界温度が39 Kと高いためこれから社会に普及することが期待される液体水素での冷却運転が可能であり、また軽量であることからMRIや磁気浮上列車への応用が期待されています。主にパウダーインチューブ（PIT）法と呼ばれる手法での線材化がすすめられ、MRIを試作できるレベルの長さの線材が市販されるようになってきました。しかし、液体水素で冷却できる温度での性能（抵抗0で流せる電流の限界の電流密度：臨界電流密度J_c）が低いという問題が解決されていません。

我々はCu、Al合金、ステンレスなどの汎用金属テープ上にナノ結晶を連続的に形成する技術を開発し、液体水素冷却でMRIを動作させることができる高いJ_cを有する　MgB_2超伝導線材が作製できることを示しました[1, 2]。図1に、ジュラルミンテープ上に作製したMgB_2厚膜の電子線回折像と透過型電子顕微鏡写真を示します。c軸がテープ面に垂直方向に揃った直径10～30 nmの柱状結晶が綺麗に成長している様子が分かります。超伝導線材でマグネットを作製した時、発生した磁場が量子化されて超伝導線材中に侵入し、ローレンツ力によって動かされることでエネルギーの逸散が生じて電気抵抗が発生します。我々のMgB_2超伝導線材ではナノ結晶の粒界3重点（3重線）が、非常に強く量子化磁束線をピン止めするため、従来のMgB_2超伝導線材より1桁以上も高いJ_cが実現できました。現在はメーカーと共同で1 km程度の実用線材を製造するためのプロセス研究に取り組んでいます。



(i) 電子線回折



(ii) 明視野像像

図1　ジュラルミンテープ上に作製したMgB_2厚膜の電子線回折像と透過型電子顕微鏡写真

参考文献

[1] T. Kusunoki, H.Yamamoto, M. Kodama, H. Kotaki, H. Tanaka, G. Nishijima, S. Horii, T. Doi, IEEE-TAS **27** (2017) 6200204.

[2] S. Horii, A. Ichinose, T. Iwanaka, T. Kusunoki, T. Doi, APEX **11** (2018) 093102.

エネルギー科学研究科（エネルギー応用科学専攻）プロセスエネルギー学分野　（白井研）
http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/
「液体水素冷却超伝導回転機の開発」

1. はじめに

当研究室では、科学技術振興機構の支援を受けて低炭素化をめざした水素エネルギーインフラ社会における液体水素冷却超電導発電機の実現に向けて研究を行っている。超電導発電機を対象とした回転子の中に液体水素を安定的に給排気させた実験例は世界的にもなく、ヘリウム冷却超電導発電機で使用した知識や技術が、水素の場合でも適用できるか分かっていない。そのため本研究では超電導発電機の回転子を模擬した試験装置を製作し、液体水素給排気試験を行った。

2. 実験装置

図 1 に液体水素冷却回転試験装置の写真を示す。回転液体水素槽は、真空外槽中で 15 kW の誘導モータによって駆動される。液体水素は貯槽タンクからバッファタンク、コントロールバルブ（CV）を介して断熱二重管で水素トランスファーカプリング（HTC）に供給され、回転軸中心から回転槽へ導入される。HTC が繋がっている反駆動側シャフトは、内周側が液体水素供給用流路、外周側が水素ガス排気用流路となる同軸多層型構造である。液体水素槽に供給された液体水素は、遠心力により円筒状の液面を形成する。槽内で蒸発した水素を水素槽中心付近の排気孔より半径方向外周へ導き、トルクチューブに設置したヒータによって常温近くまで温めた後、再び半径方向内周、軸方向の排気流路へ導く。軸の端部で磁性流体シールで回転系と外部静止系とを分離し、水素ベントラインへ安全に排出される。水素槽に設置したシリコンダイオード温度計（8 点）と MgB_2 超電導液面計（2 本）により槽内の温度分布や、液面のモニタを行った。

3. 実験結果と考察

回転子を 1200 rpm で回転させながら送液を行い冷却試験を行った。軸振動に注意しながら 224 K から 21 K（貯液）まで約 460 分で冷却した。図 2 に 21 K 到達前後の槽内温度と液面のグラフを示す。図中の 608 分で T4 が約 21 K に急激に下がり、温度計の位置まで液面が形成されていることが確認できる。さらに T3、T2 が液体水素温度へと到達し液面が確立し、全容量の約 60% にあたる約 16.3 L が貯液された。送液を絞って回転数を定格 1800 rpm に上げ液面の形成と制御を安定的に実施できた。

図 1　液体水素冷却模擬回転子試験装置

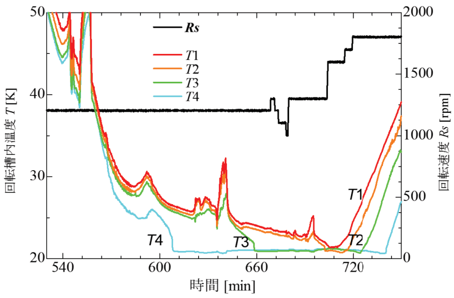


図 2　液体水素冷却・貯液試験

エネルギー生成研究部門　複合系プラズマ研究分野
http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex
「核融合プラズマへの粒子供給法の開発ー固体ペレット入射装置の開発と高密度プラズマ生成」

当研究分野では核融合を目指した高温プラズマ閉じ込め実験装置ヘリオトロンＪを用いた実験研究を行っています。核融合炉心プラズマを生成するためには、十分な閉じ込め性能、この場合は磁場による閉じ込めと加熱、粒子制御などが必要になります。炉心プラズマは温度１億度、粒子数が１立方メートル当たり 1×10^{20} 程度となります。現在考えられている燃料は重水素と三重水素であり、反応生成物はヘリウムと中性子です。燃料は反応により消費されるとともに、炉心領域から拡散していきます。したがって常時、燃料粒子の補給を行うことになります。粒子補給は通常外部からのガス供給によって行われます。しかしながら、高温高密度のプラズマへの粒子供給を考えると、中心部への粒子補給という意味では効率的ではありません。

ヘリオトロンＪ装置における超音速分子ビーム入射法に次ぐ新たな粒子補給法として、核融合科学研究所との双方向型共同研究の下、プラズマコア部への粒子補給が一層有効であると考えられる水素ペレット入射装置の開発を進めてきました。ペレットは水素あるいは重水素ガスを冷却し固化したもので、ペレット生成装置の中で自動的に生成され、外部トリガーを受けて、ヘリウムガスにより加速されプラズマ閉じ込め容器の中に入射されます。ペレットの速度、大きさは入射対象プラズマに合わせて決める必要があります。ヘリオトロンＪプラズマに対する有効な粒子補給のため、ペレットの入射速度は300m/s以下、直径は１㎜以下で設計が行われました。製作されたペレット入射装置の写真を図１に示します。

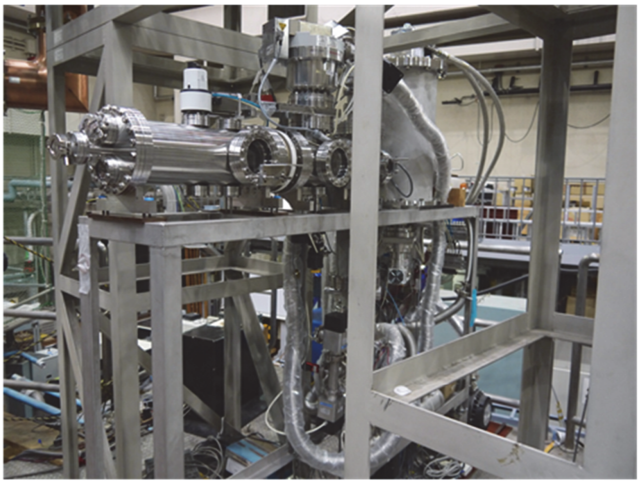


図１　ヘリオトロンＪ用水素ペレット入射装置

図１で示されたペレット入射装置を用いて中性粒子ビーム（NBI）加熱プラズマに対し水素ペレットを入射した場合のプラズマパラメータ変化例を図２に示します。ペレットの入射タイミングは図２（b）に入射位置に近い場所での Hα 線強度で示しています。入射直後から図２（a）の線平均電子密度は急激に増加し 5×10^{19} m^{-3} を超えました。プラズマ蓄積エネルギーは一時的に減少するものの、その後増加し 3.4 kJ に達しています。

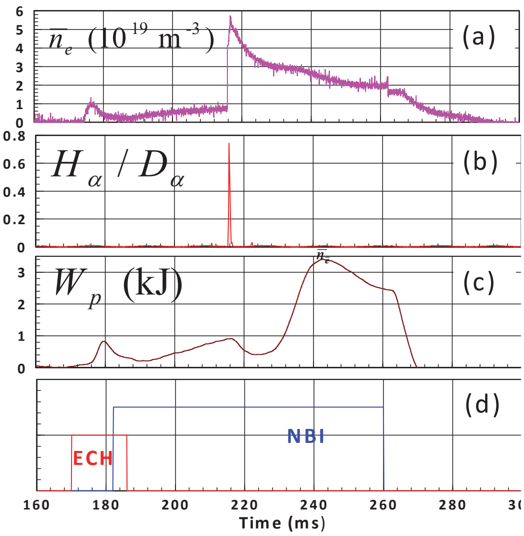


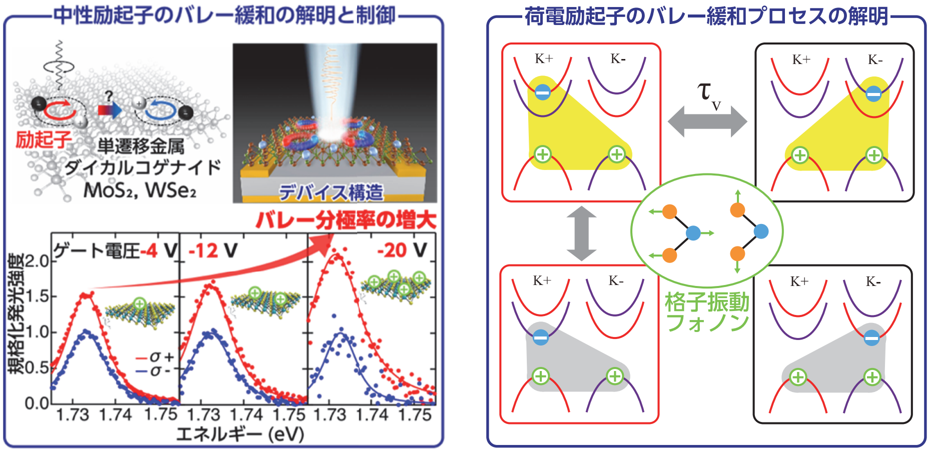
図１　NBI プラズマをターゲットとしてペレット入射した場合のプラズマパラメータ変化。
（a）線平均電子密度、（b）Hα 線輝度、（c）反磁性プラズマエネルギー、（d）各加熱タイミング。

さらに多視線の Hα 線アレイ検出器を用いてペレットの侵入長を調べたところ、プラズマ中心を通る視線まで Hα 線強度の増加が認められました。ただし、場合によってはプラズマを貫通している兆候も見られ、プラズマパラメータを含めた解析と最適化が必要です。また、ターゲットプラズマの密度、磁場配位依存性等についても今後の課題です。

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野　（松田一研）
http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/
「単層遷移金属ダイカルコゲナイドのバレースピン自由度の物理と制御」

近年、グラフェンの発見を契機として単層遷移金属ダイカルコゲナイドなど、わずか原子数層からなる原子層二次元半導体と呼ばれる新たな物質での光科学や応用が注目されている。原子数層の極めて薄い二次元半導体中に励起された電子とその抜け穴である正孔は、互いに強く束縛し励起子という状態を形成するとともに、波数空間上で「バレー」と「スピン」が結合したバレースピンという新しい量子自由度を有する。電子や励起子が持つバレースピン量子自由度を自在に操作できれば、バレースピン情報をデジタル情報処理に対応させて利用することができ、高速かつ省エネルギーな新たな光電子デバイスが期待できる。我々は、先端的な分光手法やデバイス作製技術を用いて、励起子のバレースピン状態を使った新しい光科学の研究に取り組んでいる。

それらの詳細を理解する上で、最も基礎となるのがバレースピン緩和の物理プロセスである。バレースピン情報はピコ（10^{-12}）秒という非常に短時間で失われてしまい、これまで、そのメカニズムの理解が十分でなく基礎研究や応用展開を妨げていた。我々は、典型的な二次元半導体である単層二セレン化タングステン（WSe_2）において、実験・理論の両方のアプローチから、中性励起子のバレースピン緩和のメカニズムを明らかにした [1]。さらにこのメカニズムに基づいて、電界効果トランジスタ構造を施し、バレー緩和を制御できることを明らかにしました [2]。これらの結果は、バレースピン緩和のメカニズムの解明という基礎科学的な意義に加えて、デバイス構造のデザインを通して、新しい応用への指針を与えるもととなる。さらに、荷電励起子のバレースピン緩和の解明にも取り組んでいる。荷電励起子は、中性励起子にもう一つの電子（あるいは正孔）が束縛された状態で電荷を持つため、電場での制御性がよく、また長い寿命・高いバレースピン分極度を示すなど、バレースピンの物理を研究する上で有望な準粒子と考えられている。我々は、単層 WSe_2 の荷電励起子の超高速な応答を調べ、荷電励起子のバレースピン緩和プロセスは格子振動（フォノン）との散乱過程によって引き起こされることを明らかにした [3]。これらの研究で得られたバレースピン物理の知見を今後さらに発展させることで、将来の高速・省エネルギーな新たな光電子デバイスの実現につながることが期待される。



参考文献

[1] Y. Miyauchi, S. Konabe, F. Wang, W. Zhang, A. Hwang, Y. Hasegawa, L. Zhou, S. Mouri, M. Toh, G. Eda, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **9**, 2598 (2018).

[2] K. Shinokita, X. Wang, Y. Miyauchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Adv. Func. Mater.* **29**, 1900260 (2019).

[3] K. Shinokita, X. Wang, Y. Miyauchi K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, and K. Matsuda, *Phys. Rev. B* **100**, 161304 (R) (2019).

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/
「ホイッスラーモード・コーラス波動が非線形的に成長可能な領域について」

地球固有の双極子型磁場が卓越する宇宙空間を内部磁気圏と呼び、数 eV から数十 MeV に至る様々なエネルギーを持つ荷電粒子が捕捉されている。磁気嵐やサブストームと呼ばれる擾乱が起こると内部磁気圏に熱い電子が流入し、ホイッスラーモード・コーラス波を励起することが知られている。ホイッスラーモード・コーラス波は磁気圏中の電子を散乱・加速することができるため、放射線帯の変動を理解する上で重要である。電磁流体シミュレーションと移流シミュレーションを組み合わせ、ホイッスラーモード・コーラス波が線形的及び非線形的に成長可能な領域を求めた [1]。図 1 に結果を示す。線形成長率は夜側から朝側のプラズマ圏の外側で高まる（a）。同領域で閾値振幅（threshold amplitude）が低下し（c）、最適振幅（optimum amplitude）と閾値振幅の比が 1 より大きくなることから（d）、線形的に成長した波は更に非線形的に成長することが可能であることがわかる [2]。また、最適振幅が夜側から午前側の広い範囲にかけて高まり（g）、成長率も高い（h）。位相の揃ったコーラス波が他所から到来すれば非線形的に成長が可能であることを意味し、その領域は広範囲にわたることが分かる。

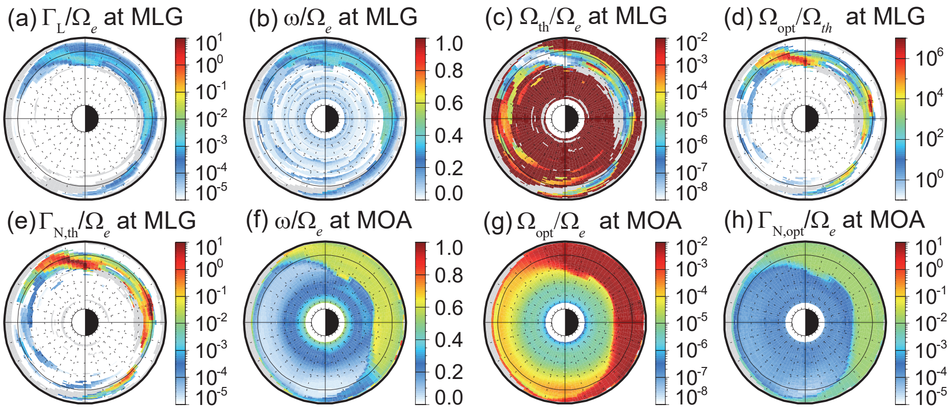


図 1：（a）線形成長率、（b）線形成長率が最大となる周波数、（c）同周波数における閾値振幅（threshold amplitude）、（d）同周波数における最適振幅（optimum amplitude）と閾値振幅の比、（e）同周波数における非線形成長率、（f）最適振幅が最大となる周波数、（g）同周波数における閾値振幅、（h）同成長率。（Ebihara et al., 2020）

参考文献

[1] Ebihara, Y., Ikeda, T., Omura, Y., Tanaka, T., & Fok, M.-C. (2020). Nonlinear wave growth analysis of whistler‐mode chorus generation regions based on coupled MHD and advection simulation of the inner magnetosphere. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 125, doi:10.1029/2019JA026951.
[2] Omura, Y., & Nunn, D. (2011). Triggering process of whistler mode chorus emissions in the magnetosphere. Journal of Geophysical Research, 116, doi:10.1029/2010JA016280.

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/
「ニューラルネットワークを用いたビッグデータからの偏微分方程式導出」

本研究室では、ビッグデータからの偏微分方程式（Partial Differential Equation: PDE）導出するための研究を実施しています。

ビッグデータからの説明モデル作成・選択（特に PDE）に対するニーズが高くなっています。例えば、人文社会科学分野で取得されたビッグデータを既存の PDE で説明したいというニーズがあります。現在、ビッグデータからの PDE 導出においては、基本技術の研究開発フェーズであり、PDE 計算結果をビッグデータとみなして、回帰分析による係数推測を行い、真値と推測値との差を評価しています[1)]。

本研究では、物理量の時間偏微分が空間偏微分項の線形回帰モデルで表現される PDE を対象としています。PDE 導出では、時空間でサンプリングされた離散点で偏微分項を計算し、正則化回帰を使って、回帰係数 $\boldsymbol{\varepsilon}$ を同定しています。さまざまな初期条件（Initial Condition: IC）を与えて計算した移流拡散方程式の厳密解にシステムノイズを重畳し、得られた係数（図における $\boldsymbol{\varepsilon}$）の真値に対する誤差を評価してきました。

データが時空間における規則格子点で定義されている場合、偏微分項は有限差分近似を使用して推定しますが、一般的に計測データは、規則性のない離散点で定義されます。この問題を解決するには、ディープニューラルネットワーク手法を使用して時空間モデルを推定します。Cybenko の普遍性定理[2)]によれば、時空間で定義された任意の関数を近似するニューラルネットワークモデルを得ることができます。推定で使用するニューラルネットワークモデルが十分に正確である場合、連鎖律を使用して偏微分項を計算し、係数 $\boldsymbol{\varepsilon}$ を同定しています。今後、実際の計測で得られた物理現象に関して、本手法を適用する予定です。

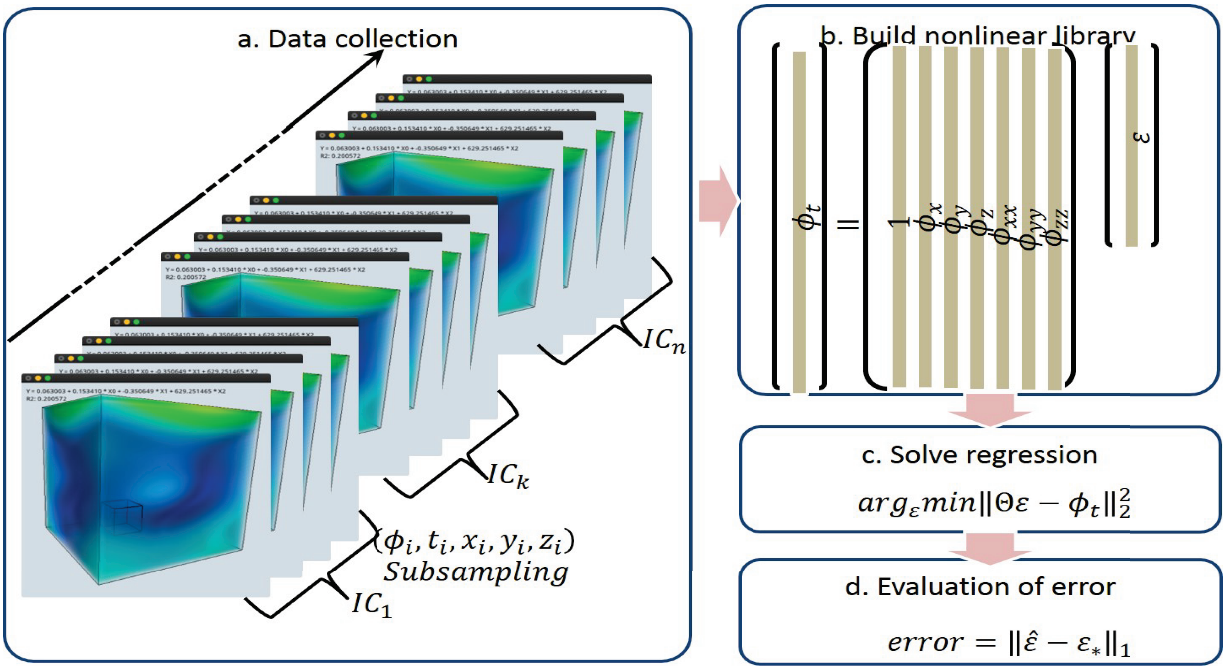


図 1：ビッグデータからの偏微分方程式導出の流れ（a: 時空間におけるデータ取得、b: 回帰方程式の構築、c: 回帰分析による係数計算、d: 誤差の評価）

1）水野翔太, 小山田耕二, 夏川浩明, “偏微分方程式の導出”, 日本シミュレーション学会 AI 研究委員会研究会, 2018.12,

2）Cybenko, G. “Approximations by superpositions of sigmoidal functions”, Mathematics of Control, Signals, and Systems, 2 (4), 303–314,1989

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

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

Utilization of Visual Sensing and Face Analysis for Enhancing E-Learning
（画像センシングと顔画像解析を利用した e- ラーニングの機能増強）

Learning is a complicated mental activity requires learners to involve themselves in this learner-centered process. To keep students engaged and motivated in self-paced e-learning has great importance, since it is supposed to accommodate vast number of learners with various types and characteristics. Support for self-paced e-learning is the target of the research, which findings can be generalized to a wide variety of learning.

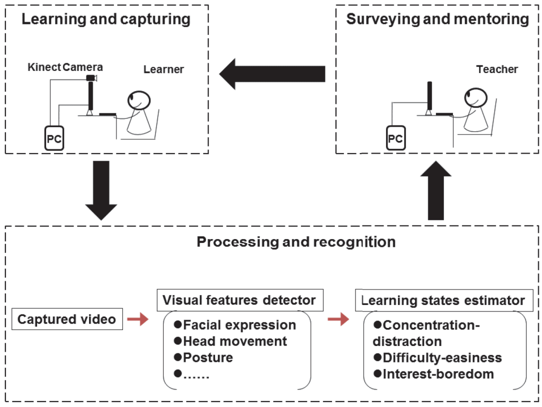


Figure 1: learning states recognition scheme

We designed an e-learning support system that can visually capture learners' behaviors and automatically estimate learners' learning states, specifically, a non-intrusive way to recognize concentration-distraction, difficulty-ease and interest-boredom in five-scale (Figure 1). The average accuracy of leave-one-out cross validation obtained by support vector machine was approximately 60% in strict matching and approximately 90% in lenient matching. We also examined practical methods for adjusting to a new learner who can provide only a few samples as ground truth, which is one critical problem in handling diverse learners. Accuracy-based method demonstrated better performance. Further investigation was conducted to obtain more accuracy improvement via selecting a few better samples to characterize a new learner. The experiments showed a slight improvement was observed. Although the rate of improvement was not large, the proposed method did demonstrate the advantage of avoiding bad cases. Moreover, the distribution of the representative samples displayed a significant correlation with respect to accuracy, which makes them a potentially valuable indicator for future investigations of new methods.

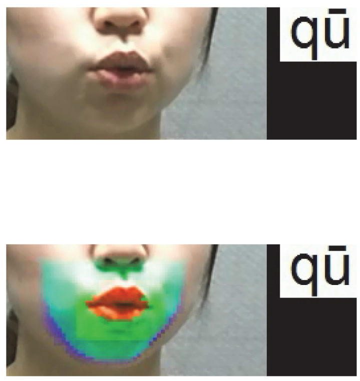


Figure 2: Examples of pseudo-coloring of pronunciation image

We also designed a scheme for pronunciation learning supports in Computer Assisted Language Learning via 3D sensing of a face. Rounded pronunciations are often difficult for a new learner if the native language does not require lip protrusion as we have none in Japanese language. Traditional instructions given by written texts and conventional multimedia approaches do not give comprehensive explanations of those articulations. Visual enhancement of lip protrusion by pseudo-coloring based on the depth, i.e., the distance from a camera, as shown in Figure 2 is a good tool for explaining articulations. The experimental results demonstrated the superiority of proposed method over conventional video method in reduction of incorrect rounded vowel pronunciations. Moreover, the results showed beginners who often make mistakes demonstrated significant improvements. The visualization scheme is not only applicable in preparation of teaching materials, but also usable in checking learners' pronunciations, and providing both qualitative and quantitative feedback.

[1] Siyang YU, et al, "Investigation on e-Learning Status Estimation for New Learners", IEICE Trans. E103-D (4), 2020

[2] Siyang YU, et al, "Visual Emphasis of Lip Protrusion for Pronunciation Learning", IEICE Trans. E102-D (1), 2019

令和元年度修士論文テーマ紹介

工学研究科　電気工学専攻

荒　木　裕　貴（引原教授）「Klein Gordon 格子系における非線形局在モードの生成・消滅・移動操作に関する検討」

非線形局在モードは非線形格子系に現れる、空間的に局在した振動モードである。本論文は非線形格子系の一種である、Klein Gordon 格子系における非線形局在モードの生成・消滅・移動操作を数値的に検討したものである。検討の結果、バネ定数などの、系のパラメータの断熱的な変化により、それぞれの操作が実現できることが明らかになった。

稲　垣　翔　太（引原教授）「電力の論理演算に基づくパワープロセッシングに関する研究」

電力パケットは、離散化された電力と物理層で付与される情報タグからなる電力の伝送単位である。本論文は、電力パケットの存在と論理値を対応付け、論理演算に基づいて処理する機能を、電力パケットルータへの導入を提案している。また、ルータに後段の要求と入力に応じて電力量を考慮し、演算を選択する機能を付与することで、要求と異なる入力が与えられた場合でも要求出力に近づけられることを確認した。

片　上　　　魁（引原教授）「結合非線形 MEMS 共振器を用いた情報処理による外部信号測定に関する数値的検討」

MEMS 共振器は、センサやメモリ素子等に用いられており、情報処理系デバイスとして応用が期待されている。本論文は、結合非線形 MEMS 共振器を用いた物理リザバーコンピューティングの可能性を、数値計算により検討したものである。検討の結果、共振器の非線形特性により、リザバー力学系が高い情報処理能力を持つ可能性があることを明らかにした。

村　川　悠　磨（引原教授）「受動性に基づく制御によるブーストコンバータとバックコンバータの並列化に関する数値的および実験的検討」

本論文は、ブーストコンバータとバックコンバータを並列接続した回路について検討したものである。同回路に対し受動性に基づく制御を適用した場合について、漸近安定性および制御パラメータ依存性を数値計算により検討した。合わせて実験を行った結果、漸近安定性に関して数値計算との一致を確認した。

加　藤　雄　也（萩原教授）「オフグリッドにおける発電・蓄電機器の設置および運用計画最適化に関する一考察」

山間部集落へのオフグリッドの導入に関する検討を行った。太陽光発電機、ディーゼルエンジン発電機（DE）、蓄電池の容量をコストを最小化する形で選定するとともに、蓄電量予測値が所望の範囲に収まるような DE のオンラインでの運用計画策定手法を提案した。

嶋　崎　俊　貴（萩原教授）「不確かなパラメータを有する非負システムの SDP 緩和を用いたロバスト性能解析」

不確かなパラメータを有する連続時間および離散時間の非負システムを対象とし、SDP 緩和問題の構

成によるロバスト性能解析手法の提案を行った。また数値例を用いて、ロバスト安定性および各種ノルムに関するロバスト性能解析問題に対する提案手法の有効性を実証した。

原　　洋　揮（萩原教授）「サンプル値系の L_2/L_2 準ハンケルノルムの意味で等価な離散化制御対象と L_2/L_2 ハンケル作用素」

サンプル値系の L_2/L_2 準ハンケルノルムの計算法を、先行研究とは異なる手法を通して与えた。それをもとに、サンプル値系の連続時間制御対象と L_2/L_2 準ハンケルノルムの意味で等価な離散時間制御対象の存在を構成的に示すとともに、L_2/L_2 ハンケル作用素の存在性を示した。

松　崎　弘　樹（萩原教授）「確率的スイッチドシステムに対する確率的 D スケーリングおよび状態フィードバック設計」

確率的スイッチドシステムに対するスモールゲイン定理を導出し、さらにそれに基づく安定解析の保守性を低減するための手法として、確率的 D スケーリングと呼ぶ手法を提案した。また、スケーリング要素および状態フィードバックを設計する手法も導き、その有効性を数値例により検証した。

楊　　　　熙（萩原教授）「離散化双線形モデルに基づくバックコンバータ出力電圧の SOS 手法による非線形制御」

DC-DC バックコンバータの離散化双線形モデルを導出し、それに基づき同定実験を行なった。また、同定により得られたモデルに基づいて、SOS（二乗和）手法により非線形状態フィードバック制御則を設計し、シミュレーションと実験を通して有効性を検証した。

石　川　寿　綺（土居教授）「1 型糖尿病における暁現象とソモジー効果のモデル化および夜間の血糖値制御法の研究」

1 型糖尿病患者の夜間の血糖値上昇現象である暁現象とソモジー効果を表せる数理モデルを機序に従って構築するとともに、これらの現象による血糖値上昇を抑制するため、構築したモデルに基づくモデル予測制御を用いた制御法を構成し、有効性を検討した。

後　藤　　聡（土居教授）「乗客への案内方式を考慮したマルチデッキエレベータシステムにおける乗客かご・デッキ割当て方法の検討」

複数階建て（マルチデッキ）のかごを用いるエレベータシステムにおいて、乗客のかごへの割当て・かご内のデッキへの割当てを決定する組合せ最適化問題に対し、近似解法や厳密解法を組合せた解法を複数提案し、計算機シミュレーションにより有効性を比較検討した。

杉　浦　知　基（土居教授）「ベクトル場の遅速分解と分岐解析に基づく膵 β 細胞のバースト振動に外部入力および血糖値が及ぼす影響の検討」

血糖値調節に関わるインスリンの分泌に対して本質的役割を担っている膵 β 細胞のバースト振動が、モデルが持つ特異摂動系としての数理的性質に着目した解析を行うことにより、血糖値等の細胞外環境変化に応答して、どのように変化するかを明らかにした。

茂　木　大　和（土居教授）「共振回路アレイに生じる局在モードに対する近似解の構成と非接触給電システム設計手法への適用」

共振回路アレイからなる送電回路を用いた非接触給電システムについて、受電コイル接近による局在

モードの近似解を構成した。また、受電コイルの位置に対する局在モードの周波数変動を抑制するための設計指針を与えることに成功した。

YUAN Shitong（土居教授）「Improvement of an Integrated Muscle Relaxation Index and Muscle Relaxation Control in General Anesthesia」（全身麻酔における筋弛緩度統合指標の改良と筋弛緩度制御の研究）

全身麻酔時のあらゆるレベルの筋弛緩度を統一的に扱うための統合指標を、非線形特性の導入と薬力学モデルの変更により改良するとともに、改良した筋弛緩度指標を用いた筋弛緩度制御システムを構成し、シミュレーションにより有効性を検討した。

喜　多　謹　仁（小林教授）「光ポンピング原子磁気センサを用いた超低磁場 MRI における超偏極 Xe 撮像に関する検討」

小型で超高感度な光ポンピング原子磁気センサを用いた超低磁場 MRI の実現に向け、超偏極 Xe 原子を対象とした MRI 撮像のための撮像シーケンスについてシミュレーション並びに実験の両面から詳細に検討し、有用な新知見を得た。

鈴　木　康　真（小林教授）「精神・神経疾患の診断支援に向けた拡散 MRI とスパース学習に基づく白質神経線維束解析」

精神・神経疾患の診断支援に向けて、全脳における白質神経線維束を拡散 MRI に基づき自動的に抽出し、各線維束に沿った拡散情報を定量評価する新たな手法を提案し、シミュレーションと実画像を対象として有効性の検討を行った。

浪　田　和　樹（小林教授）「光ポンピング磁気センサを用いた微小磁場の方向推定」

光ポンピング原子磁気センサを用いて脳神経活動に伴って発生するような低周波数かつ極微弱な生体磁場の 3 方向成分を同時計測すること目指し、ポンプ光の入射角度を変化させることにより磁場ベクトルの方向を推定する新手法を提案し、理論並びに実験的な検証を行った。

古　橋　直　也（小林教授）「精神神経疾患の病態解明に向けた脳内皮質下領域の高精度セグメンテーション法」

精神神経疾患の病態解明を目指して MRI データから各疾患を反映すると考えられる脳内皮質下領域の体積変化を高精度で解析するための新たなセグメンテーション手法を提案し、統合失調症及びアルツハイマー病患者の臨床データに適用し、その有効性を示した。

井　上　　　覚（雨宮教授）「伝導冷却による各種超伝導線の通電特性評価装置の構築及び臨界電流・クエンチ特性の評価」

伝導冷却された超伝導線の応用を実現するため、各種超伝導線の通電特性の評価装置の構築と、構築した装置を用いた各種超伝導線の臨界電流測定とクエンチ特性の測定を行った。各種超伝導線の臨界電流・クエンチ特性を温度・電流・磁場などの条件を揃えて比較することが可能になった。

安　永　将　広（雨宮教授）「スーパーフェリックマグネットにおける異なる高温超伝導集合導体で巻いたコイルの交流損失比較」

集合導体によって巻かれたスーパーフェリックマグネットの交流損失解析の手法の確立、及びその手

法を用いた解析によるスタックケーブル及びCORCケーブルで巻かれたスーパーフェリックマグネットの交流損失の比較を行い、スーパーフェリックマグネットの低消費電力化に向けた検討を行った。

河　嶋　信　彦（和田教授）「P2P エネルギー伝送における双方向コンバータネットワークの非線形ダイナミクス」

双方向コンバータのスター型ネットワークにおいて、エネルギーの関係から平衡点の数を導出した。また、そのことを利用して、P2P エネルギー伝送において、目的とする平衡点のみを安定化させるフィードバックを提案し、実験によってその有効性を確認した。

鮫　島　佳　奈（和田教授）「単導体線路モデルの接続による屈曲細線の解析」

帰路線をもたない単導体線路について、複数本接続した場合の電信方程式を提案し、電磁界解析と一致する結果が得られることを確認した。また、導体に沿う進行波と外部励振に対する散乱源の差異を明確化し、放射に対する反作用もモデル化できることを示した。

長谷川　　　確（和田教授）「導体球と導体線からなる単導体伝送線路のトポロジーに基づく設計」

導体線と導体球から成る単導体線路を離散的な電信方程式として記述し、特性インピーダンスや伝搬定数を定義した。また、それを用いて単導体線路における整合終端の設計法、トポロジーに基づくグラフラプラシアンを用いた線路の伝達特性の設計法を提案した。

山　本　拓　実（和田教授）「車載機器電源系イミュニティ試験の高周波拡張のための結合回路および注入系構造」

車載機器の高周波イミュニティ試験法の国際規格 ISO 11452-7（DPI 法、上限周波数 500 MHz）を 3 GHz まで高周波拡張したシングルエンド DPI 法と、コモンモード拡張手法であるコモンモード DPI 法を提案し、その設計指針と特性を示した。

北　村　　　駿（松尾教授）「電磁界反復求解における特異値解析に基づく収束性改善に関する研究」

電磁界シミュレーションを効率化するための反復解法の収束改善に取り組んだ。反復収束性が極端に悪化する解析条件下において、小規模問題に対して特異値分解を行うことで収束悪化の要因を捉え、実規模問題に有効な部分空間修正法を構築する方法を開発した。

栗　山　健　太（松尾教授）「CLN 法を用いたモーター電磁界のモデル縮約に関する研究」

誘導モータ特性の効率的な算出のため、CLN 法を用いたモデル縮約法を開発した。固定子と回転子を別々にモデル縮約し、空隙部で接続することで、正確な縮約モデルを構築する。展開点の導入により、さらに効率よく周波数特性を算出することに成功した。

西　村　悠　希（松尾教授）「電磁鋼板の応力依存性を含む磁化特性の数値解析および測定に関する研究」

電磁鋼板に加わる機械的応力が磁化特性に及ぼす影響を予測するための磁区モデルの計算効率化を行った。また、鋼板試料に印加した応力方向とは異なる方向の磁化特性を測定した結果を用いて、磁化方向への応力の影響を算出する等価応力モデルの検討を行った。

藤　田　健　作（松尾教授）「蓄熱発電用回転型誘導発熱機の３次元磁界シミュレーションおよび理論的特性解析」

再生可能エネルギーから安定な電力を供給するための蓄熱発電用誘導発熱機について、試作機の発熱特性の検討のため、3次元磁界シミュレーションを行った。3次元構造が発熱量に及ぼす影響や、最適な磁極幅など基本的な発熱特性を明らかにした。

奥　野　誠　也（中村（武）特定教授）「全超伝導誘導同期モータの性能評価およびマルチフィジックス解析に基づくEVシステム検討」

EV用途への実用を目指した50 kW級全超伝導誘導同期モータの精密な回転特性評価に成功した。また、非線形電圧方程式およびインバータ・負荷・冷却特性を連成したシステム特性解析を実施し、WLTC走行モードに対して優れた電費の実現可能性を明らかにした。

工学研究科　電子工学専攻

前　田　慶一郎（掛谷准教授）「超伝導体テラヘルツ素子における円偏光制御に関する研究」

高温超伝導体固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射について、デバイスのカイラリティに着目することで、放射される円偏光電磁波のヘリシティを切り替えることに成功した。本成果は、テラヘルツ移動体通信の基盤技術の形成に貢献する。

石　原　遼　磨（白石教授）「非縮退シリコンを用いたスピンXORゲートの室温動作実証」

半導体にスピンを注入することで従来型のトランジスタにスピン機能を搭載させたスピントランジスタはポストCMOS素子の有力な素子と目されている。本研究ではこれまでに研究室で培ったシリコン中での室温スピン流輸送技術を基盤としてスピン流の輸送とゲート制御によるXOR演算に室温で初めて成功した。

荒　畑　雅　也（竹内教授）「中赤外域における可視－赤外域量子もつれ光子対源の実現」

広帯域赤外量子吸収分光測定に必要不可欠な、中赤外域（波長2～5 μm）可視-赤外域量子もつれ光子対源を実現した。ニオブ酸リチウム中での下方変換により光子対生成を行った結果、可視光子を波長域600～859 nmで観測、対応する赤外光子は波長域1436～4694 nmと推測された。

殷　　　政　浩（竹内教授）「Broadband frequency entangled photon generation using silicon nitride ring cavities」（窒化シリコンリング共振器を用いた広帯域周波数もつれ光子生成）

窒化シリコンリング共振器を利用した量子もつれ光子対源に関する研究を行った。窒化シリコンリング共振器の作成方法、とくに窒化シリコンの堆積方法を比較し、広帯域での発生に必要となる条件を議論した。さらに、窒化シリコンリング共振器を利用した広帯域光子対発生に成功した。

冨　上　優　太（竹内教授）「光子対発生の破壊的干渉を用いた高感度量子吸収計測に関する研究」

量子もつれ状態を用いた吸収計測は、通常の古典光を用いた計測の限界を超える信号雑音比が期待されるが、検出器の量子収率や光路中の光損失に耐性を持たない問題があった。本研究では、光子対発生の破壊的干渉効果を利用することで、上述の損失に耐性をもつ新たな手法を理論的に提案するとともに、破壊的干渉実験系を構築した。

羽　山　恭　平（竹内教授）「スラブ導波路を用いた高効率量子もつれ光源と量子 OCT の高速化」

同軸生成かつ高効率な光子対源の実現と、干渉計の高効率化により量子 OCT の高速化の研究を行った。偏光の自由度を用いた高効率な干渉計を構築し、従来の光子対源を用いて、1 軸スキャンで 25 倍の高速化を実現した。さらに、スラブ導波路型を用いて、従来の BBO 光源より約 1000 倍の光子対生成を確認した。

福　重　一　樹（竹内教授）「ナノ光ファイバ結合単一光子源の高効率化に向けた窒素欠陥中心の軸方向推定」

ナノダイヤモンド中単一 NV 中心とナノ光ファイバの結合に関する研究を行った。ナノダイヤモンド中の単一 NV 中心の軸方向を推定する新しい手法を発案、自作した 3 次元磁場制御系を用いて実証した。さらに、タングステンチップを用いて、ナノダイヤモンドをナノ光ファイバへトランスファーすることにも成功した。

松　本　一　勢（竹内教授）「多光子多モードシステム間もつれ状態を用いた伝令付きノンフォック状態生成に関する研究」

単一光子源とビームスプリッタを用いたユニタリ変換では実現できない状態（ノンフォック状態）を、多光子多モードシステム間もつれ状態を利用した生成方法の実証に関して研究した。量子フーリエ変換回路を利用して生成した結果から、光子数分布の高い忠実度を観測した。

吉　川　将　人（竹内教授）「周波数もつれ光子対の時間相関幅の測定と制御に関する研究」

モノサイクルもつれ光子対の実現にむけ、周波数もつれ光子対の時間相関幅の測定を自作の時間遅延系により達成した。さらに、プリズムペアを用いた量子もつれ光子対に対する分散補償系を構築、もつれ光子間の上方変換により計測した 1ps の時間相関幅を、63fs にまで圧縮することに成功した。

伊　藤　滉　二（木本教授）「SiC MOS 反転層内量子化を考慮した界面準位評価およびチャネル移動度制限要因の解析」

ボディ領域のアクセプタ密度が異なる SiC MOSFET の特性を系統的に調べ、その特性を MOS 界面における量子閉じ込め効果を厳密に考慮したモデルで解析した。この結果、MOS 界面欠陥のエネルギー分布が特異な性質を示すことを明らかにし、この結果を基にして界面欠陥の起源について議論した。

金　上　尚　毅（木本教授）「$Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO_{3-\delta}$ を用いた抵抗変化素子における電気的特性の評価」

PrCaMnO（PCMO）薄膜の抵抗変化現象の機構解明を目指して、その電気的特性と素子の化学的構造の変化を調べ、通常の界面型抵抗変化は電極界面層の酸化と関係づけられることを明らかにした。また、PCMO 素子でもフィラメント型抵抗変化を示しうることを見出し、その導電性フィラメントに関する知見を得た。

中　島　誠　志（木本教授）「半絶縁性 SiC 基板上サイドゲート JFET および相補型 JFET 論理回路の作製」

厳環境動作可能な集積回路を目指した SiC 相補型 FET の作製と特性解析に取り組んだ。半絶縁性 SiC 基板への直接イオン注入によって n チャネルおよび p チャネル FET を作製し、室温から 400℃の温度範囲で良好なノーマリオフ特性を得た。また、両 FET の短チャネル効果発現条件を実験と理論により明らかにした。

宮　谷　俊　輝（木本教授）「組成の異なる二層の Ta 酸化物を用いた抵抗変化素子の電気的特性に関する研究」

抵抗変化素子応用を目指して、酸素組成の異なる Ta 酸化物の二端子素子の特性を広い周波数および温度範囲で調べ、その電気伝導機構を明らかにした。また、印加電圧の値を適切に設定することにより抵抗変化モードを制御でき、相補型抵抗変化特性においてアナログ抵抗変化が生じることを見出した。

山　下　昇　真（木本教授）「SiC バルクおよび表面におけるキャリア再結合の実験および理論的研究」

電力用 SiC バイポーラデバイスの性能を支配するキャリア寿命に関する実験および理論的研究に取り組んだ。表面再結合やバルク中のキャリア拡散が過剰キャリア密度の減衰に及ぼす影響を実験的に明らかにした。また、炭素空孔を介したキャリア再結合の物理モデルを構築し、実験結果を再現できることを示した。

武　下　将　大（山田教授）「ケルビンプローブ原子間力顕微鏡による高分子有機薄膜トランジスタのキャリアダイナミクス評価」

高分子（P3HT）薄膜をアクティブ層とする有機薄膜トランジスタを作製し、時間分解ケルビンプローブ原子間力顕微鏡を用いてキャリアダイナミクスの可視化に成功し、グレイン間のキャリア移動がトランジスタの性能を律速していることを明らかにした。

戸　野　博　史（山田教授）「走査型熱振動顕微鏡法による高分子膜下ナノ粒子の可視化に関する研究」

化学的処理によりシリコン基板上にポリスチレンのナノ粒子を固定し、高分子膜で覆うことで高分子下にナノ粒子が埋め込まれた試料を作製する方法を確立し、走査型熱振動顕微鏡法によりナノ粒子の有無とその埋め込み深さにより高分子膜の局所的弾性率が異なることを示した。

深　澤　直　人（山田教授）「周波数変調原子間力顕微鏡を用いた光応答性膜タンパク質分子の立体配座・物性計測」

光応答性タンパク質（バクテリオロドプシン）を含む高度好塩菌の紫膜をマイカ基板上に固定し、液中周波数変調原子間力顕微鏡により紫膜の膜形状および表面電荷を計測した。また、時間分解計測により光照射時のタンパク質の立体配座の変化を可視化することに成功した。

前　田　祥　吾（山田教授）「原子間力顕微鏡によるタンパク質 2 次元結晶の特異的相互作用に伴う結晶構造変化に関する研究」

特定の分子（biotin）と特異的に結合するタンパク質（streptavidin）の 2 次元結晶が biotin 結合により無秩序化する過程を液中原子間力顕微鏡により可視化することに成功した。また、DNA 修飾した biotin を標識とすることで無秩序化過程をより詳細に解析できることを示した。

呂　　　楚　陽（山田教授）「塗布法および蒸着法による有機薄膜トランジスタの作製および原子間力顕微鏡を用いた局所電子物性評価」

溶液塗布および真空蒸着の両方で成膜可能な有機半導体材料（C_8-BTBT）を用いて有機薄膜トランジスタを作製し、原子間力顕微鏡を用いて、有機活性層の微視的な結晶構造および電気特性を評価し、作製条件とトランジスタ性能との相関を示した。

重　岡　隆　宏（川上教授）「顕微エレクトロルミネッセンス測定による InGaN 発光ダイオードの面内発光揺らぎに関する研究」

InGaN 発光層における発光の面内揺らぎは、従来主として光励起で測定されてきたが、本研究では、デバイス駆動条件である電流注入下で顕微分光を行った。非輻射中心周辺にポテンシャルバリアが存在するが、高電流注入時にはキャリアがそれを乗り越えて非輻射再結合することが明らかになった。

坪　内　研　太（川上教授）「低閾値発振を目指した無極性 a 面 AlGaN 系深紫外レーザ構造の作製と評価」

無極性面上に高品質な AlGaN を形成できれば深紫外レーザ発振の低閾値化が期待されるが、結晶の育成が困難であった。本研究では、サファイア基板上に無極性 a 面 AlGaN を作製する条件として、原料の交互供給や作製後の高温アニールを検討し、世界最高レベルの結晶を得ることに成功した。

前　川　将　一（川上教授）「半極性 r 面 AlGaN 量子井戸の MOVPE 成長と発光特性の井戸幅依存性」

半極性面上の量子井戸では、歪誘起ピエゾ分極を低減できるため、量子井戸の膜厚の設計自由度が上がると考えられる。実験的に異なる井戸幅の AlGaN/AlN 量子井戸を作製しその光学特性を評価したところ、格子不整による格子緩和の影響を厳密に制御する必要があることがわかった。

前　原　圭　汰（川上教授）「高 In 組成 InGaN 量子井戸の光物性評価と低温成長 p-GaN による赤色 LED 試作への取り組み」

InGaN による赤色 LED の試作に向け、$ScAlMgO_4$ 基板上に高 In 組成 InGaN 量子井戸を作製した。顕微分光では、面内で In 組成が揺らいでおり、高 In 領域で発光効率が低下すること示唆された。また、高 In 組成 InGaN の熱劣化を避けるために低温で p-GaN を作製する条件を確立し、赤色 LED の試作に成功した。

古　山　隆　章（野田教授）「熱輻射光源・中間基板・太陽電池一体型近接場熱光発電デバイスの作製と評価」

近接場熱輻射増強を利用した熱光発電の実現を目指して、熱輻射光源・中間基板・太陽電池一体化デバイスの提案・作製・評価を行った。1040 K に加熱した Si 熱輻射光源を Si 中間基板と距離 150 nm まで近接させることで、遠方場の場合の 10 倍の短絡電流を得ることに成功した。

瀬　尾　　　和（野田教授）「フォトニック結晶レーザの高スロープ効率化に関する研究」

フォトニック結晶レーザの高スロープ効率化の検討を行い、裏面方向の放射光の活用により約 0.8W/A の高いスロープ効率を実現した。さらに、より一層の効率向上に向けて、内部吸収損失の影響を考察し、その抑制が可能なレーザ層構造の提案も行った。

CHEN Changxuan（野田教授）「2 次元 SiC フォトニック結晶共振器の高 Q 値化に関する研究」

水素イオン注入による薄膜剥離を用いない新たな方法で SiC 層を薄くすることにより SiC フォトニック結晶ヘテロ構造共振器を作製した。その結果、共振器の Q 値として 54 万を達成し、SiC を用いて作製された光波長程度の光ナノ共振器として世界最高の低損失化を達成できた。

深　谷　昌　弘（野田教授）「フォトニック結晶レーザの面内相互引き込み現象および発振状態制御に関する研究」

フォトニック結晶レーザにおける面内相互引き込み現象を活用した発振状態のオンデマンドな制御を目標とし、多電極を有するフォトニック結晶レーザを作製し、面内の電流分布制御により発振状態の制御が可能であることを示した。また、電流注入分布と発振状態との関係を、機械学習を用いて予測するとこにも成功した。

上　野　佑　介（杉山准教授）「同位体シフト精密測定を目指した光イオン化による Yb^+ の同位体選択的トラップ」

同位体による遷移周波数の差、同位体シフトの精密測定により、標準モデルを超える未知の粒子を探索する提案がなされた。これを目指して、存在比 0.13% の $^{168}Yb^+$ を選択して捕捉する方法を確立し、これを含む５種類の偶数同位体イオンを、1mm サイズの小型トラップに１個ずつ選択して捕捉可能とした。

工学研究科　光・電子理工学教育研究センター

増　田　泰　久（藤田教授）「p 型酸化イリジウムガリウム混晶薄膜の成長と物性に関する研究」

金ナノ粒子をマスクに用いた ELO により、α-Ga_2O_3 の転位低減を達成した。また、p 型 α-Ir_2O_3 の相転移温度が高く、熱膨張係数が非常に小さいことを見出した。α-$(Ir,Ga)_2O_3$ 混晶により p 型を示しながらバンドギャップの拡大に成功し、α-$(Ir,Ga)_2O_3$/α-Ga_2O_3 pn 接合の整流性を実証した。

情報学研究科　知能情報学専攻

阿　部　航　平（黒橋教授）「クラウドソーシングを用いた日本語述語項構造タグ付きコーパスの拡張」

本研究では、述語項構造解析の精度向上に向けて、クラウドソーシングによるタグ付きコーパスの拡張に取り組んだ。解析精度が低い省略解析に着目し、既存の学習コーパスと併用可能なタグ付きコーパスを構築した。分析と実験によりその有効性を確認した。

齋　藤　　　純（黒橋教授）「談話関係を用いたイベント感情極性の弱教師あり学習」

本研究ではイベント感情極性の推定に取り組んだ。感情を表す語彙からコーパス中で共起するイベントに対して談話関係に基づき極性を伝播させることで、ラベル付きデータを用いずにイベント感情極性を学習する手法を提案した。実験により提案手法の有効性を確認した。

HARUST Oleksandr（黒橋教授）「Neural Identification of Native-like Expressions Using a Corpus of Native and Learner English」（母語話者英語と学習者英語のコーパスを用いたニューラルネットワークによる母語話者表現の検出）

英語には母語話者しか使わないような言い回しや慣用句が数多く存在する。本研究では、まず母語話者と学習者の書いた文を識別するニューラルネットワークに基づく分類器を学習し、次に分類に寄与した文中の句を特定することで、母語話者表現の検出を実現した。

YAN Leyi（黒橋教授）「Improving Natural Language Understanding with Curriculum Learning」（カリキュラム学習による自然言語理解の精度向上）

本研究ではカリキュラム学習を用いた自然言語理解タスクの精度向上に取り組んだ。ヒューリス

ティックなカリキュラム、および、深層強化学習を用いて自動構築するカリキュラムを用いる方法を提案した。実験により、提案手法がベースラインモデルより高い性能をもつことを確認した。

LI Shengzhe（黒橋教授）「Towards Better Search Experience: Sequential Search Intent Prediction and Bootstrapped Event Sentiment Knowledge Acquisition」（より良い検索体験に向けた逐次的検索意図予測およびブートストラップ型イベント感情知識獲得）

本研究は、検索エンジンにおけるユーザー体験の向上を目的とした２つの研究に取り組んだ。一つは、ユーザーの検索行動履歴に基づく検索意図推定の改良を行った。もう一つは、ブートストラップ法によってイベントに関する感情知識を獲得し、感情認識の精度向上を達成した。

梶　原　　遼（西野教授）「深層漢字マッチング：手書き漢字とテンプレートの自動対応付け」

模範となるテンプレートに対し、手書きされた漢字をとめやはねなどの局所的な特徴を含め自動的に対応付ける手法を導出した。深層学習モデルによる局所的特徴の抽出および同定、さらに Thin plate spline 法による繰り返し位置合わせを行うことにより高い精度を実現した。

西　井　裕　亮（西野教授）「眼球領域の観測によらないベイズ視線推定」

人の視線運動の際の頭部、胸部、眼球の協調運動を確率モデル化することにより、従来用いられてきた高精度眼球画像が期待できない解像度の監視カメラ映像から、対象者の視線方向を推定する手法を導出し、その有効性を確認した。

NUR SABRINA binti Zuraimi（西野教授）「Spatio-Temporal Region Annotation from Bounding Boxes」（バウンディングボックスのみを用いた時空間領域アノテーション）

動画像列内の物体領域のラベリングのために、両端のフレームのみについて与えられた対象領域を囲むバウンディングボックスから、すべてのフレームについて自動的に領域抽出をおこなうグラフニューラルネットワークに基づいた深層学習モデルを導出し、その有効性を確認した。

情報学研究科　通信情報システム専攻

鮫　島　　渓（原田教授）「低消費電力無線 IoT システムを志向したデータリンク層メッシュネットワーク」

本研究では、低消費電力無線IoT システムを実現するためのMAC プロトコルであるCSL（Coordinated Sampled Listening）方式について、国際標準規格 IEEE 802.15.4/4e に準拠した実装が可能な詳細設計を実施し、通信特性の理論解析手法を確立し、実機評価結果との比較によりその有効性を実証した。また、データリンク層メッシュネットワークへの CSL 方式導入検討を実施し、高い End-to-end 通信成功率を達成しつつ、消費電力を大幅に削減した。

DU Fengning（原田教授）「Adaptive Mobile Terminal Collaboration in High-Frequency Band for MIMO Reception」（MIMO 受信に用いる高周波数帯適応移動端末連携に関する研究）

端末連携 MIMO 受信システムにおいて、連携端末間のトラフィックを削減する適応端末選択アルゴ

リズムとしてチャネル行列から推定したSINRを空間ストリームごとに最大化する方式を提案した。屋外伝送実験によって取得した受信信号を用いて特性改善効果を確認した。

寺　前　享　哉（原田教授）「帯域内全二重セルラシステムにおける高効率無線アクセス方式」

本研究では、第5世代移動通信システム以降に向けて新たに検討が進められている無線アクセスバックホール統合伝送（IAB）を高効率化することを目的とし、IABへの帯域内全二重通信の適用した方式を提案した。計算機シミュレーションにより、従来の半二重通信を適用したIABに比べて、提案法ではアクセスリンク通信の容量を拡大できることを示した。

林　田　尚　之（原田教授）「広域系無線プロファイルを用いた機械学習による屋外位置推定法」

本研究では、無線通信システムの伝搬特性の一つである遅延プロファイルと、その遅延プロファイルの測定場所との関係を機械学習することにより、端末の位置を推定可能なシステムを提案した。実際に京都市街地においてVHF帯を用いた伝搬実験を実施し、その測定結果を用いて提案手法の評価を実施し、高精度で端末が属するエリア推定を実施可能であることを示した。

水　谷　潔　志（原田教授）「高信頼IoTシステムに向けた異種無線通信融合方式に関する研究」

本研究では、様々なユースケースやアプリケーションの要求に応えるIoTシステムを構築するために、異種無線通信システムの共存検討、および融合利用する方式を提案した。前者については920 MHz帯の屋外環境を想定し、非同期系のWi-SUN FANと同期系のTSCHシステムの共存可能性を示した。後者については、屋内データ収集システムを想定した、Wi-SUN FANとWi-Fiの融合利用方式を提案し、その有用性を示した。

横　山　梨　一（原田教授）「周波数共用型5Gシステムを実現する信号処理技術に関する研究」

周波数逼迫問題を解決するための周波数共用システムを5Gに適用した、周波数共用型5Gシステムを実現するための信号処理技術として、電波利用エリア可視化を志向した基地局アンテナ指向性の高速測定技術、与干渉量の高精度測定手法としての5G信号検出電波センサ技術、および周波数帯域を最大限活用するための帯域制限型5Gシステム技術を提案し、その有効性を示した。

大　津　一　樹（守倉教授）「多目的バンディットアルゴリズムを用いた無線LANチャネル選択」

運用開始前と運用開始後のそれぞれにおいて、通信品質の観測結果に基づく無線LANチャネル割当手法を提案した。市販のAPを用いた実験により、提案手法が電波干渉とチャネル変更の発生頻度に関してパレート最適なチャネル割当をすべて識別できたことを確認した。

小　園　涼　太（守倉教授）「Mapping Between Users on Camera Images and Mobile Stations in WLAN Based on Similarity of Movement」（動きの類似性に基づくカメラ映像上のユーザと無線LANに接続された端末の対応づけ）

カメラ画像内のユーザと無線LANに接続された端末との対応づけ手法を提案した。画像内ユーザの関節の加速度と、端末で計測した加速度とでマッチングをとることでユーザと端末を対応付ける。実験によりユーザ - 端末間の適切な対応づけが実現できることを示した。

榊　原　太　一（守倉教授）「無線LANのBSS選択問題に向けた協調的バンディットアルゴリズムの検討」

ユーザ同士が学習結果を共有することで最適な戦略を少ない学習回数で獲得する協調的文脈付きバンディットアルゴリズムを提案した。無線LAN選択問題に対して提案アルゴリズムを適用し、少ない学習回数で無線LAN選択戦略を学習でききことを示した。

DENG Wangdong（守倉教授）「Game Theoretic and Thompson Sampling-Based Stochastic Channel Selection for Interference Mitigation」（ゲーム理論とトンプソンサンプリングに基づいた干渉緩和のためのチャネル選択）

ゲーム理論に基づき、大域的最適解に高速に到達するレプリカ交換モンテカルロ法を用いたチャネル割当を提案した。また、トンプソンサンプリングに基づき、確率幾何を活用したチャネル選択方式を提案し、ユーザ密度を推定しつつ干渉が最小であるチャネルを効率的に識別できることを確認した。

中　島　功　太（守倉教授）「Prediction and Optimization Based on Deep Convolutional Neural Networks for Wireless LANs」（畳み込みによる特徴抽出を用いた深層学習による無線LAN制御）

深層学習を用いて深度画像からミリ波通信の受信信号電力を推定する手法を提案し、実験により有効性を実証した。また、深層強化学習を用いた無線LANチャネル割当手法を提案し、シミュレーションにより比較手法に対する優位性を確認した。

三　熊　智　哉（守倉教授）「Deep Neural Network Enabled Vision-Assisted Predictive Control for mmWave Networks」（深層学習によるカメラ画像に基づいたミリ波通信の予測制御）

カメラ画像を用いたネットワーク制御において、シミュレーションデータを用いた事前学習手法を提案し、学習コスト削減できることを実験評価により示した。また、深層強化学習によるトラヒック制御手法を提案し、システムスループットが向上することを示した。

貴　次　登　己（大木教授）「Virtual Network Function Placement and Routing Model for Multicast Service Chaining Merging Multiple Service Paths」（複数サービスのパスを統合するマルチキャストサービスチェインにおける仮想化ネットワーク機能の配置と経路決定モデル）

マルチキャストサービスチェインにおける仮想ネットワーク機能の配置および経路決定モデルを提案した。提案モデルでは同じデータを伝送する複数サービスのパスを統合することで、従来モデルと比較してサービス提供に必要なコストを削減することを示した。

佐　藤　圭一郎（大木教授）「Prioritized transmission control of real-time spatial information」（リアルタイム実空間情報の送信のための優先制御）

実空間情報をリアルタイムに予測するためのデータ送信においては、通信帯域の制限がボトルネックとなる。そこで、事前学習により各々のデータの予測精度に寄与する重要度を推定し、その重要度に基づいて通信制御を行う方式を提案した。

澤　　孝　晃（大木教授）「Modeling and Analysis of Resource Allocations in Networks」（ネットワークにおける資源割り当てのモデル化と解析）

ネットワークにおける資源割り当てについて、擬似1+1パスプロテクションを適用したエラスティック光ネットワークにおけるパスの切り替えと経路変更に基づくデフラグメンテーション方式、及び、分散サーバー割り当て問題に対して二つのアルゴリズムを提案した。

兵　頭　直　樹（大木教授）「Virtual network function placement models for service chain provisioning to promote computation resource sharing」（サービスチェイン展開に向けた計算資源の共有を促進する仮想ネットワーク機能配置モデル）

計算資源の共有を促進することでサービスチェインの展開コストを抑制する仮想ネットワーク機能配置モデルを検討した。仮想ネットワーク機能の通過順序と経路制約を緩和した配置モデル、および各サービスの目標故障復旧時間に基づいた配置モデルを提案した。

平　野　佑　季（大木教授）「Network Design against Multiple Link Failures Considering Probabilistically Guaranteed Recovery」（確率的に保証された復旧を考慮した複数リンク故障に対するネットワーク設計）

バックアップリンク容量を多項式時間で計算できるバックアップネットワーク設計モデル、と、リンクの重みを用いてルーティングが決定されるようなネットワークの複数のリンク故障に対して輻輳を最小化するためのリンク重みの最適化モデルを提案した。

新　　瑞　徳（佐藤教授）「トランジスタ劣化の周波数依存性を考慮した回路遅延変動の評価と予測」

電界効果トランジスタのゲート電極にバイアスが印加されて生じるBTIと呼ばれる劣化モードについて、入力信号（ワークロード）および動作時のチップ内温度分布が与える影響を実測とシミュレーションの両面から検証した。固定的な劣化成分と回復可能な成分を分離して評価し、劣化が特に進行しやすいワークロード条件、および局所的な温度分布との相関を示した。

党　　　璋（佐藤教授）「組合せ最適化問題の高精度求解に向けた階層的イジングモデルソルバ」

大域的な解から出発し徐々に解を詳細化する階層的な枝刈りアルゴリズムを提案することにより、イジングモデルを用いて組合せ最適化問題（巡回セールスマン問題、二次割り当て問題）を解く際の効率を大幅に改善し、解精度を向上した。提案手法により、巡回セールスマン問題では、42都市の問題まで最適解が得られることを示した。

QIN Zhaoxing（佐藤教授）「カレントミラーアレイを用いた耐経時劣化有機PUF」

有機トランジスタを用いた製造に適するPUF（Physical Uncronable Function）回路を提案した。カレントミラー回路を応用することで、有機トランジスタの劣化により生じる出力値の変動を自己補償する。PUF回路の試作により、提案回路が経年劣化による応答の変化に対して高い耐性を実現できることを示した。

名　倉　健　太（佐藤教授）「協調機械学習の高精度化に向けた正規統合手法」

クライアントが個別に学習したニューラルネットワークを統合する協調機械学習では、クライアントの持つデータの偏りによる精度劣化が課題となっている。精度劣化の原因が主にモデル間の学習の打ち

消しによることを実験的に示し、正規化とモーメンタム項を導入して学習を促進する新たな統合手法を提案し、精度改善に有効であることを示した。

中　村　公　暉（佐藤教授）「カークマンスケジューリングに基づく巡回セールスマン問題の並列 2-opt 解法」

巡回セールスマン問題の近似解法である 2-opt 法を、GPGPU を用いて高速化するアルゴリズムを提案する。カークマンスケジューリングに基づき同時実行可能な 2-opt 交換を全列挙し、これらを並列に実行する。焼きなまし法と組み合わせることで、1 万都市以上の大規模な問題について、高品質の解を高速に得られることを示した。

今　井　悠　貴（小野寺教授）「集積ナノフォトニクスに基づく低遅延光並列乗算器」

集積ナノフォトニクスに基づく光並列乗算器は、CMOS 集積回路と比べて超低遅延動作を実現するが、消費電力がビット幅に対して指数関数的に増大する。並列乗算の符号化方式と部分積加算回路の最適化により、低遅延性を保ちつつ省電力化する設計手法を検討した。

松　尾　亮　祐（小野寺教授）「集積ナノフォトニクスに基づく光論理回路の素子数と消費電力の削減」

2 分決定グラフ（BDD）に基づく光論理回路は、CMOS 集積回路と比べて超低遅延動作を実現するが、素子数と消費電力が入力数に対して指数関数的に増大する。波長分割多重技術を用いた BDD の縮約や BDD の多段設計により、低遅延性を保ちつつ省素子・低電力化する技術を解明した。

松　田　崇　史（小野寺教授）「ビアスイッチ FPGA 書き込み回路の面積効率向上と誤書き込み防止に関する検討」

ビアスイッチ FPGA においては、所定のビアスイッチのみをオンもしくはオフに設定するための書き込み回路が必要である。高電圧の書き込み信号を生成する回路の省面積化と、所定のスイッチのみをプログラミングするための書き込み方法について検討した。

松　野　旺　示（小野寺教授）「再構成可能なスイッチにより電力変換効率を高めたスイッチトキャパシタ型 DC-DC コンバータ」

複数の電圧を出力することが可能なスイッチトキャパシタ型の DC-DC コンバータにおいて、スイッチング周波数の調節と、再構成によりトランジスタの幅を可変にできるスイッチを用いることにより、出力電圧毎に電力変換効率を最大化する方法を明かにした。

情報学研究科　システム科学専攻

辻　森　皓　太（石井教授）「動的環境における逆強化学習と行動決定のモデリング」

走査型の観測装置を用いて運動物体を撮影する場合、物体の運動により撮像結果がゆがむという問題がある。本研究では、観測のスパース化により物体の運動を制限してゆがみを低減し、そこから超解像によってゆがみのない高解像度の撮像結果を得る手法を提案した。

籔　内　敬　太（石井教授）「部分観測環境下における学習過程データを用いた逆強化学習」

逆強化学習は熟練者の行動から報酬を推定する手法である。これまでの学習アルゴリズムは、環境を全て観測できることを仮定していた。しかし、実問題では環境の一部しか観測できない場合がある。そ

こで、本研究では部分観測のみから逆強化学習を行う手法を提案した。

張　　天　依（石井教授）「Decoding of Bottom-Up based Visual Attention using Electroencephalography Signals」（脳波を用いたボトムアップベースの視覚的注意の解析）

ボトムアップ注意と視覚的顕著度の関係を、自然画像を観測中のヒト脳波によって調査した。解析では、自然画像内の顕著性の高い領域のサイズとその数が、脳波からデコード可能であった。これはボトムアップ注意に関する情報処理が脳波に反映されていることを示唆する。

神　波　一　穂（松田（哲）教授）「CEST MR Fingerprinting に対する 信号の類似度を考慮した飽和パルスパターンの設計」

溶質と溶媒のプロトンの化学交換を利用して低濃度の溶質を高感度に観測可能な CEST MRI 法と短時間の撮像データから複数の組織パラメタを定量可能な MRF とを組み合わせた撮像法において、撮像パラメタの最適化手法を提案し、シミュレーションおよび撮像実験でその有効性を確認した。

小　林　晃太郎（松田（哲）教授）「モデルベース位置合わせによる気胸変形の不均一性に関する解析」

肺の気胸変形を対象としたメッシュベース位置合わせ方法を提案し、肺実質と気管支の変位の関係性を解析した。虚脱前後の肺表面及び気管支分岐点の高精度な位置合わせを達成し、算出したひずみの空間分布に基づいて肺が気管支よりも変形しやすいことを明らかにした。

山　下　達　也（松田（哲）教授）「指先の把持力と速度に着目したつまみ及びつかみ操作の識別」

本研究では、複数指操作であるつまみ操作とつかみ操作を対象とし、これら操作を識別可能な指先に関する特徴量を探索した。複数物体に対する母指，示指，中指の接触力と速度を計測する被験者実験を実施し、2 操作の識別に有効な時系列かつ多チャネルの特徴量を明らかにした。

エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

木　村　　　覚（下田教授）「生理・行動指標に基づくリアルタイム知的集中度推定手法の検討」

本研究では生理・行動指標に基づき執務者の知的集中度をリアルタイムに推定する手法を検討した。生理指標として 40Hz 付近の音刺激に誘発される脳波の聴性定常状態応答を、行動指標として頭部運動や瞬目等の顔動作を用いて、機械学習により集中度を推定した。

久留島　隆　史（下田教授）「デジタルサイネージでの多言語同時表示レイアウトの視認性と可読性の評価」

本研究は、デジタルサイネージの多言語化の手法として、一画面に複数の言語を表示する「多言語同時表示」に着目した。複数の多言語同時表示コンテンツの視認性と可読性を評価する実験を行い、どのようなレイアウトが見やすいかを検討した。

竹　川　和佳子（下田教授）「作業環境のにおいが知的集中に与える影響に関する実験研究」

本研究では、集中を向上させるための環境提案として、においの制御に着目し、集中状態に与える影響についての評価実験を実施した。実験の結果、作業環境における悪臭の緩和および断続的な香り刺激の提示により集中が向上することが示された。

田　村　太　一（下田教授）「実世界指向プログラミングを用いた AR 訓練環境構築システムの開発」

プログラミングの高度なスキルを持っていない人でも、容易に、かつ現場で使用できる AR 訓練環境構築用のプログラミング言語を含む、AR 訓練環境構築システムを開発した。これにより、従来の構築方法と比べて、AR 訓練環境を容易かつ短時間で構築可能になった。

東　山　豊　大（下田教授）「VR 空間での視線計測によるプラント保守作業の習熟度推定システムの開発」

プラント保守の現場では、作業者の作業に対する習熟度を客観的に評価する必要がある。そこで、客観的な習熟度の指標として作業者の視線に注目し、容易かつ高精度に視線計測できる VR 空間での作業を対象に、視線の動きから習熟度を推定するシステムを開発した。

三　木　直　也（下田教授）「隠消現実感のための隠背景撮影カメラ最適配置探索手法の開発」

本研究では、原子力プラント内の見通しの悪さの改善を目的として隠消現実感を利用する際に、使用するカメラの設置位置の判断が困難であるという問題を解決するため、原子力プラント内で利用することを想定したカメラの配置探索手法を開発した。

エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻

井　口　智　博（中村（祐）教授）「核融合原型炉に向けての三次元 MHD 平衡解析」

トカマク型核融合原型炉では、トロイダル磁場コイルの離散性および第一壁のフェライト鋼の磁化などにより、閉じ込め磁場が僅かに非軸対称になる。この非軸対称性が、核融合反応で生成されるアルファ粒子の損失およびプラズマ表面の磁場構造に影響を与えることを示した。

海　士　湧　平（中村（祐）教授）「運動論的 MHD 不安定性による磁場揺動」

核融合プラズマにおいて、MHD 不安定性により生じる磁場揺動は、閉じ込め磁場が形成する磁気面を破壊する。高温プラズマにおいて磁気面が壊れる過程を調べ、微視的な不安定性より巨視的な不安定性の方が大域的に磁場構造をカオス的にすることを明らかにした。

駒　井　克　哉（中村（祐）教授）「トカマクの真空容器を流れる渦電流解析コードの三次元化」

トカマク型実験装置では、ディスラプションと呼ばれるプラズマ電流が突然途切れてしまう現象が観測される。この時にプラズマを囲む真空容器に流れる渦電流が、現実の装置において非軸対称性を持つことに対応するために、面電流近似を用いた渦電流解析コードを開発した。

新　納　希　彬（中村（祐）教授）「トカマクにおける微視的不安定性のプラズマ断面形状依存性」

核融合プラズマの閉じ込め悪化の主原因である乱流輸送は微視的不安定性により駆動される。この不安定性のプラズマ断面形状依存性を調べ、プラズマ断面を D 型にすることは、磁場構造変化による微視的不安定性促進効果を大きくすることを明らかにした。

萬　家　幹　人（中村（祐）教授）「ヘリオトロン J におけるポロイダルフロー計測に基づく径方向電場の解析」

ヘリオトロン J では、衝突性粒子輸送に伴い径方向電場が形成され、この径電場はプラズマ閉じ込め改善を導くことが期待される。実験のポロイダルフロー計測および新古典輸送理論に基づく評価を行い、

径電場が強い場合、プラズマ閉じ込めが改善されることを示した。

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

井　上　靖　也（土井教授）「低コスト $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材のための新規導電性中間層の開発および有限要素法による電流分布の検討」

{100}<001> 集合組織をもつ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした新規 YBCO 線材構造の開発を目的とし、クエンチ発生時の導電性バッファ層の抵抗率と電流回避必要距離との関係を有限要素法により検討し、条件を満たす新規導電性バッファ層の開発を行った。

柏　木　勇　人（土井教授）「$(Y_{1-x}Dy_x)$ $Ba_2Cu_3O_7$ 配向厚膜の高配向化に向けた印加磁場条件および厚膜成形条件の検討」

磁化率の異方性を持つ粉末に空間変調磁場を印加することで 3 次元的に結晶方位を揃えた粉末集合体が形成可能である。本研究では、様々な磁場印加パラメータに対して、粉末が時間的にどのように回転して 3 軸配向状態が形成されるのかを、その場 X 線回折測定法を用いて測定し、結果の定式化を行った。

北　村　直　也（土井教授）「薄膜型 MgB2 超伝導線材特性向上に向けた保護層及び金属基材テープと MgB2 層間反応防止層の検討」

薄膜型 MgB_2 超伝導線材の実用化に向けて、Cu/Nb/MgB_2/B/SUS304 テープの 4 層の線材構造が研究されてきたが、SUS304 から Ni、Cr が僅かに MgB2 層に拡散して特性低下を引き起こすことを突き止めた。そこで、本研究では SUS304 と MgB_2 の間に挿入する拡散バリア層の開発を行い、Ti が効果的であることを発見した。

寺　尾　奈　浦（土井教授）「珪素鋼板上に中間層を介して $YBa_2Cu_3O_7$ を形成した超伝導線材における剥離現象の解明」

電磁鋼板を基材とする YBCO 超伝導線材の作製のための中間層物質として、Y_2O_3/YSZ、$SrTiO_3$/YSZ などの 2 層バッファー構造が検討されているが、YSZ/ 珪素鋼板界面での剥離が問題となっていた。本研究では剥離発生のメカニズムを明らかにした。

濱　田　　　剛（土井教授）「{100}<001> 集合組織 Cu テープ上に $Sr_{1-x}La_xTiO_3$ を導電性中間層として配置した $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材の研究」

{100}<001> 集合組織 Cu テープ上に導電性中間層を介して $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導層を形成する新構造超伝導線材において、導電性中間に用いる酸化物の検討とその成膜条件の検討を行い、$Sr_{1-x}La_xTiO_3$ が好ましいことを明らかにした。

石　見　佳　紀（白井教授）「液体水素冷却超電導発電機の回転子を対象とした液体水素給排気システムと MgB2 超電導レーストラックコイルの励磁特性」

液体水素冷却による超電導機器の開発を想定して、超電導発電機の回転子を対象とした液体水素給排気試験、及び発電機界磁コイルを想定した液体水素浸漬冷却における MgB2 超電導レーストラックコイルの励磁試験を行った。高速回転している回転子に液体水素を供給・排気する実証実験を行い、安定な液面形成を確認した。

北　田　悟　史（白井教授）「電源駆動下での MRI マグネットの高安定磁場のための制御方式」

REBCO 高温超伝導 MRI で問題となる遮蔽電流による磁場変動を補償するために電源駆動で運用するにあたって、スイッチング制御方式を採用した電源とドロッパ制御方式を採用した電源、二つの制御方式を組み合わせた電源を導入し、最適な電源制御方式の検討、静磁場の変動がイメージングに与える影響を調べた。

坂　本　大　輝（白井教授）「REBCO パンケーキコイルを用いた変圧器磁気遮へい型超電導限流器の限流特性」

高温超伝導 REBCO パンケーキコイルを用いた変圧器磁気遮へい型超電導限流器を設計、製作し、基礎特性実験を行った。実験結果より、事故電流が小さい場合はリアクタンス成分で限流し、事故電流増加に伴い、抵抗成分も加わりさらに限流し、設計通りの限流効果を確認した。

柳　井　創　太（白井教授）「高温超伝導無誘導巻パンケーキコイルを用いた抵抗型超伝導限流器の復帰特性」

高温超伝導無誘導巻パンケーキコイルを用いた抵抗型超伝導限流器の実用化に向けた基礎研究として、複数のコイルをスタッキングした場合の、限流器内の液体窒素の流路の変化が復帰特性に及ぼす影響を調べた。大気圧下においては、流路の復帰特性に与える影響が大きく、サブクール条件ではその影響が小さくなることが分かった。

山　崎　隆　平（白井教授）「システム同定による配電系統の動的負荷モデリングの妥当性の検証及び無効電力補償装置による配電系統の電圧不平衡補償の検討」

システム同定による配電系統の動的負荷モデリングの妥当性の検証および無効電力補償装置による配電系統の電圧不平衡補償の検討を行った。導出した動的負荷モデルを定態安定度解析手法に統合することによる定態安定度の定量的な評価についても妥当であることを確認した。

エネルギー理工学研究所

久　米　秀　和（長﨑教授）「ヘリオトロン J における高密度プラズマ計測用 320GHz 多視線干渉計の開発」

ヘリオトロン J 装置において粒子輸送研究を進めることを目的として 320GHz サブミリ波を用いた多視線干渉計システムの開発を行い、設計した光学システムによって高密度プラズマの電子密度分布・揺動計測のための多視線干渉計が構築可能であることを示した。

富　田　剛　史（長﨑教授）「ヘリオトロン J における Q-band スーパーヘテロダイン型反射計を用いた揺動計測」

ヘリオトロン J 装置において電子密度・流速の計測を目的とした Q-band マイクロ波反射計を開発し、電子サイクロトロン共鳴加熱されたプラズマにおいて初期計測を行い、I/Q 信号から求まる位相を補正する複数の手法を適用することで電子密度と揺動の評価を可能とした。

岩　田　晃　拓（門准教授）「近赤外分光を用いたヘリオトロン J における高エネルギー電子によるホットスポット計測」

InGaAs リニア検出器を搭載した近赤外分光器（900 – 2100 nm）を用い、真空容器内壁の灼熱点（ホッ

トスポット）の温度評価に成功した。ホットスポットは電子サイクロトロン共鳴加熱による高速電子が低電子密度時にプラズマ内でエネルギーを緩和されず、壁に衝突して生成されていることを解明した。

清　水　佑　馬（門准教授）「ヘリオトロン J における固体水素ペレット溶発雲に由来するスペクトル形状に関する研究」

プラズマ中に入射した固体ペレット周辺の低温高密度のプラズマ（溶発雲）の分光診断により、溶発雲の電子密度を決定する検量線を求めた。空間チャンネル数を限定し CCD 検出器の電荷垂直シフト機能を利用することでシステムを高速化し、溶発過程の時間分解計測に成功した。

長　　　慎一郎（南准教授）「乱流揺動計測を目指したヘリオトロン J ビーム放射分光装置の開発」

乱流揺動計測を行うためにビーム放射分光装置の光学系から発生するノイズの評価と位相差の測定精度に与える影響を確かめた。また光ファイバーの配置を変更することで検出光強度の向上を行った結果、検出光強度は約 4 倍向上し 0.3% 程度の密度揺動の計測まで行えるようになった。

西　出　拓　矢（南准教授）「ヘリオトロン J における計測精度向上のための Nd:YAG レーザーマルチパストムソン散乱計測装置の開発」

マルチパストムソン散乱計測装置を開発し性能評価を行い散乱光検出量は約 4 倍向上するが前方散乱光は電子温度測定の感受性が低下することを明らかにした。さらにポッケルスセルを用いて偏光制御システムを構築しレーザーの往復回数を増加させラマン・トムソン散乱光の検出に成功した。

山　下　裕　登（南准教授）「ヘリオトロン J における NBI プラズマのイオン温度分布解析」

NBI プラズマのイオン電子温度は密度によらず、磁場強度が強くなるに従って高くなることを明らかにした。これは NBI 加熱吸収パワーの増加が主たる原因であることを確かめた。また閉じ込めは磁場強度に依存しないが $<\beta>$ の上昇に伴って改善することを明らかにした。

田　中　絢　也（松田（一）教授）「機械学習による二次元半導体バレー光物性予測手法の開拓」

二次元半導体では、バレーとスピンの自由度が結合した新たな物理自由度を有する。本研究では、大量のスペクトルデーターをもとに二次元半導体で生じるバレースピン分極について、ランダムフォレストのアルゴリズムを用いた機械学習のアプローチで予測する手法を開発した。

矢　野　翔太郎（松田（一）教授）「原子層物質と球状微小共振器構造による光共鳴とレーザー応用」

本研究では、わずか原子数層からなる二次元半導体である単層遷移金属ダイカルコゲナイドと微小球からなる共振器構造を組み合わせ、ウィスパリングギャラリーモードによる光共鳴などの光学特性の評価を行うとともに、光励起下でのレーザー発振特性を明らかにした。

生存圏研究所

坂　本　悠　記（山本教授）「Study of daily and seasonal variation of the equatorial ionization anomaly in Asia based on satellite-ground beacon experiment」（衛星ビーコン観測に基づくアジア域の電離圏赤道異常の日変化・季節変化の研究）

北緯 18.2 度から南緯 0.2 度の 5 点の衛星＝地上ビーコン観測網から東南アジア域低緯度電離圏の全電

子数（TEC）緯度構造を研究した。バイアス値の自動推定手法を開発し 2012 ～ 2015 年の大量データ解析を実現した。電離圏赤道異常の日周変化を詳細化する一方、その季節変動が背景大気の南北風速の影響を強く受ける事実を明らかにした。

氏　原　伸　裕（山本教授）「COSMIC-2 衛星・TBEx 衛星からの 2 周波ビーコン波による低緯度電離圏観測手法の開発」

2019 年 6 月に打上げられた COSMIC-2 衛星・TBEx 衛星からの 2 周波ビーコン波を用いた低緯度電離圏全電子数（TEC）の観測手法を開発した。受信信号解析ソフトウェアの開発、新型受信機の開発・設置、TEC 推定手法の検討をし、COSMIC-2 衛星を用いた TEC 観測を行った。

六　車　光　貴（橋口教授）「パラメトリックスピーカーを用いた低騒音型 Radio Acoustic Sounding System（RASS）の開発」

RASS は大気レーダーと音波を併用して気温の高度プロファイルを高時間分解能で連続観測する技術である。騒音問題を解決するため、鋭い指向性を持つパラメトリックスピーカーを用いた全天候で使用可能な低騒音型音源を開発し、RASS 観測システムを構築した。

菊　川　素　如（小嶋教授）「波動粒子相互作用解析装置における粒子検出用高速応答回路の集積化に関する研究」

宇宙空間プラズマにおけるプラズマ波動と粒子との間でのエネルギー授受を定量的に観測できる「波動粒子相互作用解析装置」の超小型化を目的として、粒子センサーからの信号をピックアップする回路の集積化を特定用途集積回路（ASIC）の設計開発により行った。

新　城　藍　里（小嶋教授）「地球内部磁気圏で観測される電子サイクロトロン高調波の研究」

電子サイクロトロン高調波を科学衛星 Arase のデータにより解析を行った。特に、Arase 衛星がもつ Interferometry mode を用いて、電子サイクロトロン高調波の位相速度を導出することに成功し、更に、それを用いて電子センサーでは検出できない低エネルギー粒子の温度を推定した。

三　木　淳　平（小嶋教授）「Arase 衛星搭載波動粒子相互作用解析装置におけるデータ処理手法に関する研究」

Arase 衛星搭載波動粒子相互作用解析装置（S-WPIA）の観測データを評価する手法とキャリブレーションについて解析を行った。磁界データのキャリブレーションが正確であることを示した上で、S-WPIA データについて波動・粒子センサーの観測特性を考慮した正確な処理手法を考案した。

関　根　友　博（大村教授）「Relativistic Acceleration of Protons by EMIC Waves in Jovian Magnetosphere」（木星磁気圏での EMIC 波によるプロトンの相対論的加速）

木星磁気圏における電磁イオンサイクロトロン（EMIC）波と共鳴する高エネルギープロトンの軌道計算のテスト粒子シミュレーションを行い、相対論なエネルギーを持つプロトンが非常に効率良く加速される非線形過程を定量的に検証しその理論解析を行った。

高　橋　渓　太（大村教授）「A Method for Estimation of Cold Plasma Density from Whistler Mode Waves Observed by Magnetospheric Multiscale」（MMS 衛星で観測されたホイッスラーモード波によるコールドプラズマ密度推定方法）

4 機編隊の MMS（Magnetospheric Multiscale Mission）衛星で観測されたホイッスラーモード波の波形データを使ってその位相差から波数ベクトルを推定し、プラズマの分散関係に基づいて背景プラズマ密度を推定するデータ解析手法を開発した。

佐々木　太　一（篠原教授）「マルチパス環境下でのマイクロ波送電システムに関する研究」

本研究ではマルチパスレトロディレクティブにより、マイクロ波送電の実用化における課題であった効率と安全性の改善に関する研究を行った。複数目標の場合、障害物がある場合等様々なマルチパスレトロディレクティブの検証を行い、有効性を示した。

佐　藤　勇　海（篠原教授）「管内検査ロボットへの高効率マイクロ波送電手法に関する研究」

本研究では配管内を自走する検査ロボットへのマイクロ波送電システムについて検討を行った。特に、これまでの配管内のマイクロ波伝搬に関する研究に基づいて、主に送受電アンテナの設計と実験、評価を行い、送受電効率を最大化する送受電アンテナの提言を行った。

中　本　悠　太（篠原教授）「成層圏プラットフォーム用マイクロ波無線電力伝送システムの最適化に関する研究」

本研究では成層圏プラットフォームに向けた最適で高効率なマイクロ波無線電力伝送システムの検討を行った。具体的には、細長い形状の無人飛行機と受電アンテナを想定し、周波数、送電アンテナ形状、飛行経路、整流効率などを考慮して、飛行経路全体で受電する総受電電力が最大となる最適なシステムを提案した。

学術情報メディアセンター

青　山　　　望（小山田教授）「表現型特徴ネットワーク解析における Group-In-a-Box レイアウトの有効性評価」

生命科学で多用される表現型特徴ネットワークをはじめとするグループ構造を有するネットワークの解析に有効なレイアウトについて、これまで十分な評価が行われていなかった．この問題を解決するために、生命科学者の協力を得て、4 種類のレイアウトをユーザー実験により評価することで、タスクパフォーマンスに影響する視覚特徴を特定する事ができた。

LEI Puwen（小山田教授）「Explainable Water Level Prediction: Employment of Dynamic Attention Mechanism in LSTM Model」（説明可能な河川水位予測 :LSTM モデルにおける動的注意機構の利用）

長期短期記憶（LSTM）に基づく深層学習による降雨データからの河川水位予測の精度は向上しているが、そのメカニズムの説明が不十分であった。この問題を解決するために注意機構を導入し水位予測の根拠を可視化するシステムを開発した。河川水予測の専門家に実際に使ってもらうことにより、本システムの有用性を検証した。

WANG Ting（小山田教授）「Visual analysis of multi-dimensional time series data using a state transition graph with a time order tracking mechanism」（時間順序保持機構をもつ状態遷移図を使う多次元時系列データの視覚的分析）

経験的動的モデリング法を利用し、多次元時系列データから状態を特定し、その遷移を有効に可視化するための技術が期待されていた。これに対して、複数のコードダイアグラムを使って、状態の外部遷移と内部遷移を同時に表現する可視化手法を開発し、これを生態系ビッグデータに適用し、その有用性を検証した。

岡　田　拓　洋（中村（裕）教授）「筋活動による仮想力覚呈示の制御と操作感の変容の分析」

操作者に対して様々な質感や操作感を与えるメカニズムを実現することを目的とし、筋活動計測を用いた基礎的な調査を行った。そのために仮想力覚呈示デバイスを用い、呈示反力を制御しながら操作者の筋電位を計測し、引き起こされる筋活動や操作者が感じる質感・操作感などの関係を分析した。

高校生のページ

電波・光・音波を利用した大気のリモートセンシング

生存圏研究所　大気圏精測診断分野
橋　口　浩　之、矢　吹　正　教

1. はじめに

電波（電磁波）は、テレビ、ラジオ、スマホ（携帯電話）、WiFi、カーナビ（GPS）、あるいは電子レンジなど広範囲に利用されており、私たちの生活になくてはならないものになっています。電波の種類は周波数で識別され、例えば、携帯電話では約800MHz、1.5GHzなどの周波数の電波が使われています。光も電磁波の一種ですが、慣習的に波長で識別されます。波長と周波数は逆数の関係になっていて、光速（秒速約30万km）を周波数で割れば波長が求まります。可視光の波長はおおよそ0.4～0.8μm、それより短い光は紫外線、長い光は赤外線と呼ばれます。電波と光の明確な境界はありませんが、電波法では周波数3THz（波長100μm）までを電波としています。[1]

電磁波は情報通信の分野で広く使われていますが、その際、伝搬路となるのが大気です。電磁波と大気との間で起こる様々な物理現象を用いて、多くの大気のリモートセンシング手法が開発されています。大気自体が放射している電磁波を検出すれば、気温や組成など様々な大気情報を得ることができます。例えば、地上に設置したマイクロ波放射計を上空に向けて大気からの特定の周波数の電磁波を受けると水蒸気を測定できます。また、衛星搭載の赤外・マイクロ波放射計では気温や水蒸気の全球分布を測定できます。このように自然界の電磁波を用いた手法は受動型リモートセンシングと呼ばれます。一方、人工的に電磁波を発射して大気を計測する手法は、能動型リモートセンシングと呼ばれ、電波が大気中で散乱・反射される現象を利用したレーダーがその典型です。また、GNSS（全球測位衛星システム）衛星から発射される電波が大気中で伝搬遅延あるいは屈折することを活用した大気計測法も開発されています。

電波を利用したリモートセンシングの代表がレーダー（RADAR: Radio Detection And Ranging）です。レーダーと聞くと、飛行機の探索や自動車の衝突防止などのための装置という印象が強いかと思いますが、大気中の様々な現象を観測するためのレーダーも実用されています。ここでは、電波のほか、光や音波を利用して大気（気象）を観測するリモートセンシング装置の概要と観測例について紹介します。気象庁のアメダスのように、地上気象観測はそのほとんどが直接観測により行われています。一方、上空の高層気象を直接観測するには、センサーを飛行機やヘリウムを詰めた気球に付けて飛ばすなど手間やコストがかかるので、地上からのリモートセンシングが有力な観測手段になります。

2. 電波による大気リモートセンシング

気象観測で一般に用いられるレーダーは、短いパルス状の電波を送信し、ターゲットから散乱されるエコーを受信し、ターゲットの位置や特性（大きさ、移動速度など）を測定します。雨滴が電波の散乱体となるのはよく知られていますが、降雨がない時にも大気の乱れ（乱流）による屈折率の微細変動により電波はわずかに散乱されます。雨滴をターゲットとするレーダーは気象レーダー、乱流をターゲットとするレーダーは大気レーダー（あるいはウィンドプロファイラー）と呼ばれます。ここでは、主に大気レーダーについて紹介します。

大気の温度と風速構造が一定の条件を満たせば大気の不安定状態が起こり、乱流が生成されることが知られており、乱流は大気密度の変動としても現れます。電波の屈折率は大気密度と水蒸気密度で決まり、乱流により大気密度変動が起こると、屈折率も変動します。これが電波散乱に寄与しますが、テレビ放送や携帯電話通信には影響を与えないほど、散乱はごく僅かです。散乱の度合いは雨滴などに比べても大変微弱なので、この種のレーダーでは増幅作用が必要です。

ブラッグの回折格子は良く知られていますが、これは光の波長の半分の間隔で格子を刻んだものです。光の半波長に対応する格子構造が散乱した波を同じ位相に揃えて足し合わせることで強い散乱が起こります。電波が大気乱流によって散乱する時にも同様のことが起こります。一見乱雑に見える乱流も、波長成分に分解すれば規則的な構造の重ね合わせと捉えることができます。乱流のうち、ブラッグの共鳴条件を満たすようなレーダー電波を使うと、効率的な電波散乱を起こします。対流圏および成層圏では数 cm から数 10m の大きさ（スケール）の乱流渦が連続的に存在するとされています。すなわち、大気レーダーに使用できる電波波長にも広い選択肢があり、数 MHz から数 GHz までのどんな周波数を使っても、対応する乱流渦が存在するので、レーダーエコーが期待できます。しかし、国際的な電波利用の取り決めにより、大気レーダーの周波数には 50MHz、400MHz、900MHz、あるいは 1.3GHz 帯が用いられています。成層圏より上の中間圏では小スケールの乱流渦が存在しなくなりますので、中間圏まで観測するレーダーでは 50MHz 帯のみが使われます。

大気乱流は背景の大気の流れと一緒に動くので、乱流エコーのドップラー周波数を計測すれば、レーダービーム方向の視線風速成分を知ることができます。音波のドップラー効果は、近づいて来る救急車のサイレンは高く聞こえ、遠ざかる場合は低く聞こえるなど、日常生活でも体感できます。電波でも同様に、移動している物体に電波を当てると反射された電波の周波数は、その速度に応じて発射した周波数からずれます。この周波数のずれ（ドップラーシフト）は物体の速度に比例するため、ずれを測定することで速度を知ることができるのです。図 1 に示すように、大気レーダーでは、一般にアンテナビームを鉛直方向と東西および南北面内で天頂角が 10 度程度の斜め 4 方向に走査して、各視線風速を測定します。アンテナビームを走査する空間内（例えば、高度 5km ではおおよそ直径 2km の円内）で風速が一様であると仮定すれば、5 つのビームから得られた視線風速成分から風速の 3 成分（東西風、南北風、鉛直流）が求まります。一般に鉛直流は水平風速に比べて 1 桁以上小さく測定が困難な量です。例えば、気球観測では気球自体が浮力により上昇するので、鉛直流を測定することは原理的に困難ですが、大気レーダーでは鉛直上方にアンテナを向けることで、鉛直流を 0.1m/s 程度の高精度で測定できる特長があります。

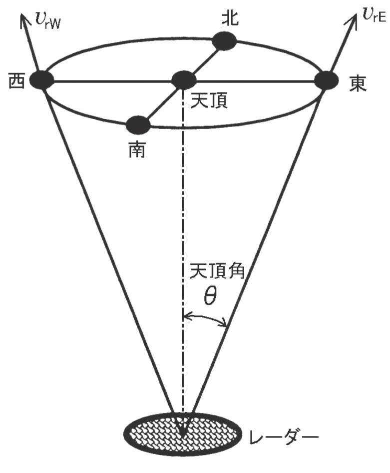


図 1: ウィンドプロファイラーのビーム走査例（深尾と濱津, 2005）

MU レーダー

レーダーには多種多様なシステム構成がありますが、もっとも一般的なレーダーは、短いパルス状の電波を送信し、ターゲットで散乱され戻ってくるエコーを受信して、散乱体までの距離や散乱体の特性（大きさ、移動速度等）を測定する方式を取っています。この場合、アンテナを送信と受信に共用するので、モノスタティック・パルス・レーダーと呼ばれます。「モノ（mono)」は単一を意味します。

気象レーダーや大気レーダーに使われるアンテナは、一枚の大きなパラボラアンテナを用いたものか、線状のアンテナ素子を多数並べたフェーズドアレイアンテナが主です。パラボラアンテナはその名前の通り反射面が放物面になっており、その焦点に置かれた一次放射器からの電波を反射して、指向性のあ

る電波を放射します。パラボラアンテナではモーターを使い機械的にアンテナ全体を駆動することでビーム方向を変えます。一方、アレイアンテナは多くの八木アンテナなどを用いて大型のアンテナを構成しますが、アンテナ自体は固定されています。それぞれの素子から放射される電波を少しずつ遅らせて、各アンテナから発射された電波を空間で合成して、特定の方向に電波を集中させます。大気レーダーとしては、多数の八木アンテナを2次元に配置したアクティブ・フェーズドアレイアンテナが、我々のグループが1984年に滋賀県甲賀市信楽町に建設したMUレーダー（Middle and Upper atmosphere radar）で初めて採用されました。フェーズドアレイアンテナは電子的にビーム方向を走査できますので、パラボラアンテナに比べて、非常に高速に観測方向を変更できる特長があります。特に大型のアンテナではその差が顕著になります。

MUレーダー（図2）では、直径約100mの円形凹地に八木アンテナ475本を設置しており、送受信周波数は46.5MHz、すなわち波長約6.5mです。MUレーダーの最大の特長は、475本の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式を採用していることです。1台の小型送受信機の送信電力は2.4kWで、475台の小型送受信機を同時に働かせることにより合計1MWの大電力を送信することができます。またレーダーシステム全体がマイクロコンピュータを用いてソフトウェアにより制御される柔軟な構成となっており、その結果各アンテナについて送受信信号の自由な位相制御が可能となり、アンテナビーム方向をパルス送信毎すなわち最高1秒間に2500回という高速で走査できます。また、MUレーダーのアンテナは25個の小アンテナ群に分割して、それぞれ独立な小型レーダーとして動作させることができるなど、様々な新しい観測手法の実験に使うことができます。

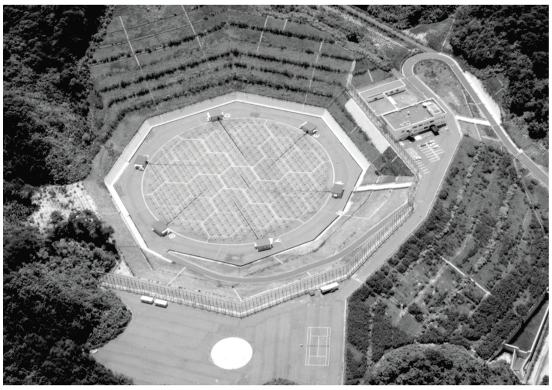


図2: MUレーダー。中央の円形の部分が475本の八木アンテナから構成されるフェーズドアレイアンテナ（直径103m）

図3に台風通過時にMUレーダーで観測された水平風の時間高度変化の例を示します。通常ラジオゾンデ観測では6～12時間毎にデータが得られるのに比べて、大気レーダーの時間分解能が格段に優れていることが分かると思います。大気レーダーは地上に固定設置されるため、上空を移動していく大気現象を時間的に連続に観測することになります。つまり大気レーダーで得られるのは、上空の高さ・時間の2次元データになります。近似的に大気現象の空間構造が観測時間内で大きく変わらないとすれば、現象が西から東に移動することを利用して、時間変化を水平変化に置き換え、その高度・水平距離断面の構造を推定できます。すなわち、図3の例であれば、図の左側を東、右側を西と考えて、擬似的に台風の高度・東西断面を表していると考えることができます。

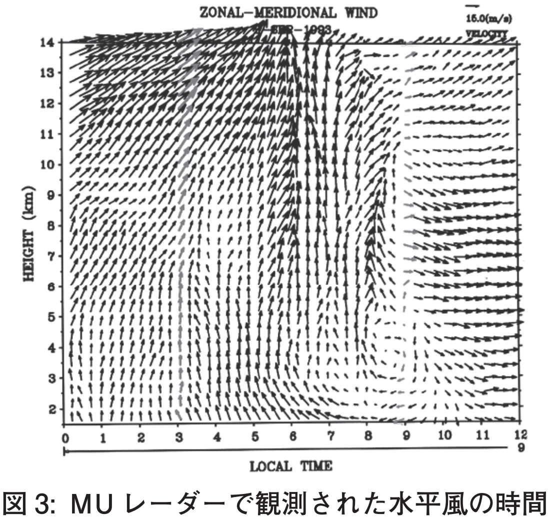


図3: MUレーダーで観測された水平風の時間高度変化の例

気象庁は、北海道から沖縄県までの全国33ヶ所に1.3GHz帯大気レーダーを配置した「局地的気象監視システム Wind Profiler Network and Data Acquisition System（WINDAS）」を運用しています。手前味噌ですが、これには我々のMUレーダーで培ってきた技術が大いに活かされています。

3. 光による大気リモートセンシング

レーザーを光源とするレーダーは、レーザーレーダーあるいはライダー（LIDAR: Light Detection And Ranging）と呼ばれ、近年それを大気計測に応用する研究開発が急速に進んでいます。レーダーは一般に同一のアンテナで送・受信を行いますが、ライダーは光源としてのレーザーと散乱された光を集める望遠鏡でそれぞれ送・受信を行い、これらに集光された光の強度または光子数を計測する受光・分光装置で構成されます。パルスレーザー光を射出して、その後方散乱光が戻ってくるまでの時間から距離を、散乱光強度や周波数変化から測定対象の分布や移動速度を計測します。測定対象は、エアロゾルや雲、オゾンや二酸化窒素などの微量気体成分、気温・水蒸気・風などの気象要素など多岐に渡ります。時空間的な変動が大きい大気環境をモニタリングする上で、ライダーは有効な計測手法の一つです。

エアロゾル（aerosol）は、「aero（空気の）」と「sol（媒質中に固体または液体が分散しているコロイド系）」を組み合わせた言葉です。すなわち、エアロゾルの定義は気体中に浮遊する固体もしくは液体の粒子で、私たちの身の回りにたくさん存在しています。例えば、タバコの煙、海の波飛沫、土埃、火山の噴煙、車から排出される煤塵、花粉など、すべてエアロゾルです。大気中に浮遊するエアロゾル濃度は、場所によって大きく異なり、都市域では 1 cm^3 あたり数万個以上にもなりますが、南極のように非常に清浄な地域では 100 個以下です。エアロゾルは、工場や自動車などの人間活動がもとになって排出された「人為起源」のものと、森林や土壌、海水など自然界から放出された「自然起源」のものとに大別されます。一般的に、人為起源のエアロゾルはサイズが小さく、自然起源のそれは大きい傾向があります。微小粒子ほど体の奥まで取り込まれやすいため、健康影響の面からも重要視されており、2009 年にはサイズが 2.5 μm 以下の粒子の重量濃度で定義される PM2.5 について、環境基準が新たに設けられました。

数 nm から約 10 μm にわたる広い粒径範囲を取るエアロゾルの光学特性は、ミー散乱理論が適用できます。粒径 10 ～ 100 nm を最大とする一般的なエアロゾル粒子数濃度の分布（粒径分布）を考慮すると、光の波長領域におけるミー散乱の強度は波長におおよそ反比例します。一方、窒素、酸素など空気分子 1 個の大きさは、光の波長に比べても非常に小さく 1 nm 以下であり、このような粒子の光散乱はレイリー散乱と呼ばれ、その強さが波長の 4 乗に反比例します。それに対して、エアロゾル粒子の波長に対する強度差は、かなり小さいと言えます。そのため、太陽光に対するエアロゾルの散乱では、色ごとの明瞭な違いが表れず、白っぽく見えることになります。この特徴は、2000m を超えるような標高の高い山で見る青空と、都会で見る青空の色の違いにも反映されています。高山では、透き通った深い青色、空気分子のレイリー散乱による「理想的な青空」となります。一方、大気汚染物質が多く浮遊する都市域で見る空は、空気分子によるレイリー散乱に、エアロゾルによるミー散乱の効果が加わった色となり、白みがかった青色の空となります。

信楽 MU 観測所には、レイリー・ミー散乱を計測する多波長偏光ライダーが設置されています。このライダーシステムにより、エアロゾル後方散乱信号を数 m おきに、高度約 1 km 以下では数秒、10 km 以下では 1 分程度の時間分解能で取得できます。何故、多波長なのかというと、粒子特性によって散乱される光の波長（色）ごとの強度が変わる特徴を計測に利用するためです。人工的に光の波長を制御したレーザー光を何種類か使用して、その波長ごとの散乱特性の違いを検出すると、粒子サイズなどの情報を抽出できるようになります。また、レーザーから出た光は電場（および磁場）の振動方向が一定の直線偏光をしています。球形粒子からの後方散乱光の偏光成分は変わらないですが、非球形粒子では入射光と後方散乱光の偏光特性に違いが表れます。そのため、多波長と偏光を組み合わせたライダーは、エアロゾル成分や雲相（水雲・氷晶雲・混合相雲）の計測に広く利用されています。また、レーザーの入射波長と散乱波長が異なる水蒸気分子や窒素分子のラマン散乱を検出すると、水蒸気濃度や気温の空間分布の計測が可能となります。これら物質の空間的な広がりを把握するために、ライダーの観測視野

方向を自動制御できる走査型ライダーも開発しています(図4)。

一方、オゾンのような微量気体は、窒素や酸素に比べて非常に少ないため、その散乱の計測のみから濃度を求めることはできません。そこで、特定の光の波長のみを吸収する微量気体の特性を利用します。例えば、オゾンは波長 250 nm を中心とする紫外域で強い吸収を示します。効率良く光を吸収する波長と、吸収しない波長の2波長の光源を用いて同時に信号を取得し、その差分を取ると、オゾンによる光吸収の情報が抽出できます。分子1個あたりの光吸収（吸収断面積）は理論的に求まるため、それらの情報からオゾン濃度の分布を推定できます。

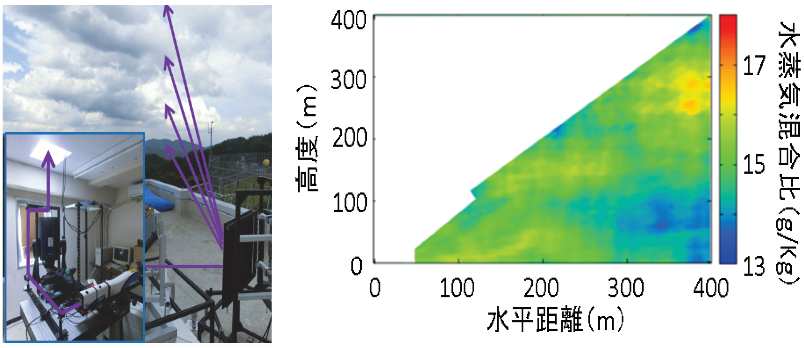


図 4:（左）走査型水蒸気ラマンライダーシステムの外観、（右）ライダーで取得された水蒸気混合比の鉛直断面図（信楽 MU 観測所 2012 年 8 月 28 日 22 時 17 分）

ライダーの応用範囲は非常に広いですが、原理上の弱点もあります。まず、光を用いているため、大きく散乱するものがあるとその先が見えません。つまり、厚い雲があると、その先が計測できなくなります。さらに太陽光がノイズ源となるため、日中の観測精度が落ちるという課題もあります。そのため、最近では、太陽光の影響が少ない紫外領域や近赤外域を光源とするライダーも多く開発されています。また、得られた信号からエアロゾルの情報のみを抽出しようとすると、空気分子の散乱に埋もれない程度の粒子による散乱強度が必要となります。一般的に、ライダーで検出できる粒子サイズは、サブミクロン以上（0.1 μm 以上）と言われており、それ以下のナノ粒子サイズの定量的な計測は難しいです。そこで、ライダーだけでなく、雲中まで計測できるレーダーやタワー・気球を利用した直接計測など、様々な計測手法を組み合わせた複合観測から、大気微量物質の動態や気象要素の空間変動を総合的に把握する取り組みが進められています。

4. 音波による大気リモートセンシング

気温の高度プロファイルを測るには一般にラジオゾンデ気球が用いられます。しかし、放球から観測終了まで 1 〜 2 時間かかるので、いわゆるゲリラ豪雨など変動の激しい気象現象を捉えるには時間分解能が不十分です。大気レーダーと音波発射システムを併用したラス（RASS: Radio Acoustic Sounding System）では、高時間分解能で気温を連続観測できます。ラスでは、音波を上空に発射して屈折率変動を人工的に作り、そこからの散乱電波を大気レーダーで検出します(図5)。そのエコーのドップラー周波数から音速を求めます。さらに、音速が気温の二乗に比例する関係を用いて気温を測定します。

乱流エコーと同様、ラスでもブラッグ条件が重要で、レーダーの送信電波の波長と、音波による屈折率変動の周期構造の間でブラッグ条件が満たされる必要があります。自然界の乱流は様々な大きさの乱流渦の重ね合わせなので必ずレーダー半波長に合うものが存在し、さらに乱流は3次元等方的なのでどの方向にビームを向けても電波散乱が期待できま

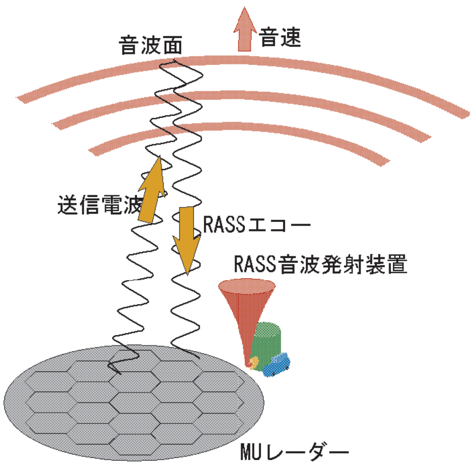


図 5: ラスの原理

す。一方、ラスでは音波の周波数の選択と音波面の形状が鍵となります。ラスに関するブラック条件は、レーダービームが音波面に垂直に入射すること（直交条件）と、屈折率変動を作る音波波長がレーダー波長の半分になること（共鳴条件）の両方を満たす必要があります。音波は風の影響を受けるので、直交条件を満たすためには音源を風上側に設置し、アンテナビームを風上方向に適切に向ける必要があります。MU レーダーはアンテナビーム方向を自在に走査できますので、風による音波面の変化に追随して、直交条件を満たすようにアンテナビームを向け、広い高度範囲で RASS エコーを検出できます。共鳴条件について、対流圏では高度とともに気温が低下し、音速も遅くなるため、単一周波数の音波では、波長が高度とともに短くなり、共鳴条件は特定の高度でしか満たしません。そこで、適切な音域で周波数を変化させてこれを解決します。ここで、レーダーで測定される音速は対地速度であることに注意が必要で、測定された音速から背景風の成分を補正しなければいけません。背景風を補正して求めた気温精度は 0.5 度程度で、ラジオゾンデと同等かそれ以上と言われています。このような高精度な気温プロファイルが 150m 程度の高度分解能で時間間隔 1 ～ 2 分で連続的に得られます。

一方、音波のみで大気を観測する装置として、ソーダー（SODAR: Sonic Detection And Ranging）が実用されています。使用する媒体に音波と電波の違いはありますが、測定原理は大気レーダーと基本的に同じで、上空の風の鉛直分布を測定します。1kHz 程度の音波パルスを大気中に発信し、大気の屈折率の乱れによって散乱されて戻ってくる音波を受信します。受信した音波は風によるドップラー効果により周波数が偏移するので、それを元に風を算出します。大気による音波の減衰が比較的大きいことから高高度の観測には向きませんが、逆に大型のレーダーが不得意な地表面近くからの観測が可能であるという特長があります。

5. おわりに

電波、光、音波を利用して大気を観測するリモートセンシング技術について紹介しました。MU レーダーの成果を背景に、我々はインドネシア共和国西スマトラの赤道直下に赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar: EAR）を建設しました。EAR も MU レーダーと同様、直径 110m の円形敷地内に 560 本の八木アンテナを配置し、各アンテナに半導体送受信モジュールを備えたアクティブ・フェーズドアレイ方式を採用しています。送信出力は 100kW で、MU レーダーに比べて感度は 1/10 ですが、高度約 20km までの赤道大気の連続観測が可能です。EAR を MU レーダー並に高感度化する赤道 MU レーダー計画もあります。これまでに培ってきた知見や新しい計測技術を活用して、地球大気環境の変化を精密かつ多角的・長期的に把握し診断していくことは、持続発展可能な社会の実現において重要であると考えます。

注

1　n（ナノ）: 10 の -9 乗、μ（マイクロ）: 10 の -6 乗、m（ミリ）: 10 の -3 乗、k（キロ）: 10 の 3 乗、M（メガ）: 10 の 6 乗、G（ギガ）: 10 の 9 乗、T（テラ）: 10 の 12 乗

参考文献

深尾昌一郎・濱津享助，気象と大気のレーダーリモートセンシング，京都大学学術出版会，491 頁，2005.

石原正仁・津田敏隆, 最先端の気象観測（新しい気象技術と気象学）, 東京堂出版, 176 頁, 2012.

MU レーダーのホームページ http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/

赤道大気レーダーのホームページ http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/

気象庁 WINDAS のホームページ https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/windpro/kaisetsu.html

学生の声

人生のターニングポイント

工学研究科　電子工学専攻　野田研究室　博士後期課程３年　坂　田　諒　一

これまでの人生におけるターニングポイントはいつだったろうか。私の場合、幾つか思い浮かぶが、博士課程の進学”先”を決めた時は間違いなくその中の１つだろう。私は修士課程までは理学部の物理系の研究室に所属していたが、博士課程から工学研究科の野田研に移籍することにしたのだ。理由としては、実験設備が整っており、デバイスの作製を含んだより幅広い研究が行えるというのが大きかった。また大まかには研究分野も近い。博士課程で研究室を移るケースは稀で、大変そうだと思うかもしれないが、実際、たいへん苦労も多かった。とはいえ、すっかり初心に戻って新たな研究を始めるのは純粋に楽しく、修士までの経験のお陰で、強くてニューゲームをしているような気分もあった。現在野田研で、面発光型フォトニック結晶レーザーにおいて、フォトニック結晶に変調を導入することで斜め方向にビームを出射させ、アレイ化することで非機械式なビーム走査を実現する研究を私は行っている。

さて、他にも何回かターニングポイントはあったように思えるが、最も意外性に富んでいるのは、小学６年生の時に指の骨を折ってしまったことだと思う。指を怪我した状態で中学に入学した私は、運動系の部活への入部を見送り、やや消去法的に文化系の情報科学部なる部活に入った。情報科学部は明確な目標がなく良い意味でゆるい部活であったが、顧問が理科の先生だったこともあり、夏休みの自由研究では、理科室やそこにある器具を使って実験することができた。中学３年の夏にした自由研究の実験（ウィルバーフォース振り子とブラックバーン振り子に関する実験）が兎に角面白く、それがきっかけで私は研究者を志すようになった。それで、SSH 指定校であった高校に進学し、そこはかとなく研究者になれそうな京大理学部（実際になれるとは言っていない）に進学した訳である。

そう思うと、人間、今の自分があるのは自らの選択による必然だと思いがちだしそう思いたいものだが、運によって左右される部分は、なかなかに大きいのではないかと思う。あなたにとってのターニングポイントはいつだったろうか。ふと立ち止まって考えてみると何か面白い発見があるかもしれない。

他研究室との交流がもたらしてくれたもの

工学研究科　生存圏研究所　篠原研究室　博士後期課程３年　兒　島　清志朗

これまでの研究生活を振り返ると、普段から他研究室の学生と交流することが多い生活だったと思う。私が所属する篠原研究室は宇治キャンパスにあり、同キャンパス内の小嶋研究室と大村研究室を含めた３研究室の学生は同じ部屋で研究生活を過ごしている。この点は他の電気系の研究室とは異なる部分だと思う。３研究室の関わりは日常的にあり、単純に考えると普通の研究室と比べて研究室の知り合いが３倍いることになる。このような環境は多くの点で私の研究生活を支え、刺激や彩りをもたらしている。

私の専門は高周波回路やアンテナであるが、宇宙放射線環境の解析や宇宙プラズマ観測用回路の開発など様々な分野の研究に取り組んでいる学生が周囲にいるため、学生間で話をしていると、それぞれの研究内容について話すことが頻繁にある。単純に知的好奇心をくすぐられるだけでなく、自分の研究に応用できそうな様々な視点に気づかされることもあり、刺激を受けることが多い。他にも、他研究室との交流により研究生活において精神的に助けられている部分も多い。博士課程に進むと修士課程までとは異なり、同期は少なく学年が上がるにつれ自身の研究室で果たす役割が大きくなるため、気軽に相談できる人はそれほど周囲に多くない。幸いにも私の場合は、自身の所属研究室の先輩、同期だけでなく、大村研、小嶋研究室の博士課程の先輩にも気軽に相談できる環境だった。そのため、研究でなかなか思い通りの結果が得られず行き詰まり、精神的に辛いときや解決策を悩んでいるときに、相談することで助けられたことは多い。相手が専門外であるからこそ、客観的な視点から自分と同じ分野の人とは異なる貴重なアドバイスをもらえることもある。また、互いの研究の詳しい内容まではわからなくても、共に学位取得を目指す者同士励ましあえる環境は非常に心強いものだ。

このような環境のおかげで、これまで充実した研究生活を送ることができていると感じている。博士課程の研究は一人で黙々と取り組み思い悩むことが多いが、だからこそ様々な人と日常的に話し合うことの重要性を実感した。残りの研究生活において、周りで思い悩んでいる後輩を気遣える余裕を持ちつつ、学位取得に向けて邁進したい。

教室通信

困ったときの保健室：ストレス・コミュ障・体調不良

電気工学専攻　和　田　修　己

学科長を2年勤めている間に、学習や就職でいろいろと問題や悩みを抱えている学生諸君と話す機会がありました。また、かなり以前ですが工学部の学生生活委員を務めた際にも、他専攻の学生の不登校の対応などで、メンタルヘルスとコミュ障（コミュニケーション障害、対人関係障害）の問題に遭遇しました。大学にも企業にも、メンタルや体調などに問題を抱える人がたくさんいます。本稿では、最近、工学部・工学研究科で進んでいる「困ったときの保健室活用」について、書かせていただきます。

新型コロナウイルスの流行で、2020年度は大学でもインターネット授業の在宅受講や在宅勤務など、例年とは全く異なる始まり方をしました。本稿執筆時点で、京都大学は活動制限レベル3（対面授業の停止、会議は原則オンライン）となっています。近々、活動制限が緩和されることを期待していますが、実はそのあと、普通の暮らしに戻る際には、健康な人でもストレスや体調不良の問題が気になります。さらには、以前から大学に行きにくい、昼夜逆転で暮らしのリズムが崩れている人、ストレスや体調不良を抱えている人など、いろいろ大変だと思いますが、一人で解決しようとせず、是非、保健室を使ってみませんか？

以前は、朝きちんと起床できない、授業に出席しない、研究室に来ないという人は、「サボっている、やる気がない」と叱られ、「真面目に頑張れ」と言われるだけでした。しかし、実は人によっては「サボっている訳ではなく、頑張ろうとしてもうまくゆかない」人がいるようです。これには、いわゆる「コミュ障」も含まれます。（筆者は専門家ではないので、医学的・心理学的に誤ったことを書くかもしれませんが）、不登校の原因が自律神経調節不良（起立性調節障害）だったり、ストレスだったり、発達障害だったりすることがあるようです。そういう人たちは、本当に悩んでいて、自分一人で解決することは大変です。でも実は、本人と周囲の人がその理由をきちんと理解すれば、問題を解決する方法はあります。自律神経の問題を循環器内科や心療内科できちんと治療して、普通の暮らしに戻った人を知っています。発達障害（最近は「大人の発達障害」がかなり話題になっています）の人は、本人と周囲の人がきちんと理解すれば、実は非常に素晴らしい能力を発揮して活躍できることもあるようです。

困ったとき、誰に相談するか、どこへ行けばよいかが、問題です。いきなり専門医やカウンセリングルームに行くのも、敷居が高いと思います。実は、そんなときに役に立つのが「保健室」です。皆さんの中には、中学生時代に（病気でもないのに）保健室の優しい先生に会いに行って悩みの相談をしていた人がいるのではないでしょうか。工学部で平成29年にできた「吉田保健室」は、物理工学科がメンタルケアを必要とする学生に対する早期相談のために作ったもので、高等学校養護教諭の資格を持つ看護師さんが相談対応をしてくださいます。「吉田保健室」が非常に良いとのことで、平成31年には「桂保健室」が桂Bクラスターに開室され、ずいぶん通ってお世話になって卒論を書いた人がいます。「吉田保健室」は物理工学科が独自に作ったものなので、これを工学部全体の学生対象に広げるため、本年度の夏には電気電子工学科事務室のある9号館北棟1F（東端）に「吉田第2保健室」の開室が予定されています。学部生も大学院生も「保健室」を利用することができます。基本的に予約は不要で、とりあえず「保健室に行って相談してみたら？」と気楽に行けて、もちろん、相談内容の秘密は守ってもらえます。本人が希望すれば、必要なら研究室とも連携できて、専門家やカウンセリングルーム、学生支援ルームなどにもつないでもらえます。

実は学生だけではなく、私も含めて先生方も相談できる「保健室」があると良いかもしれませんね。ストレスは、一人で抱えるのは良くありません。

少し話は変わりますが、なかなか授業に出ることのできない学生には、今回のコロナによる「オンライン授業」は、講義室に行く必要が無く後で見ることもできるので、チャンスかもしれませんね。いろいろ活用して見ませんか？

賛助会員の声

大学との共同研究と企業としての研究開発の取り組み

ローム株式会社　研究開発センター　融合技術研究開発部
國　師　　渡

1. はじめに

2004年に京都大学大学院工学研究科電子物性光学専攻修士課程を修了後、ローム株式会社に入社し、以来、光素子に関する研究開発に従事しております。ご縁があり、現在も出身研究室である野田研究室にて半導体レーザの開発に取り組みさせていただいております。今回、紙面をお借りする機会をいただきましたので、ローム株式会社と自身の研究開発に関する取り組みについて紹介させていただきます。京都大学工学系出身の方は研究開発業務に携わる方も多いかと思いますので、ご参考の一助になれば幸いです。

2. ローム株式会社について

ローム株式会社（以下、ローム）は京都に本社を置く半導体メーカーです。ローム（ROHM）の社名は創業当時の生産品目である抵抗器（Resistor）の頭文字「R」に抵抗値の単位Ω「ohm」を組み合わせたものです。「R」信頼性（Reliability）にも通じており、品質を第一とするロームのポリシーを表しています。抵抗器の作製・販売から手を広げ、現在は売り上げの大部分をLSIやディスクリート半導体素子（トランジスタやダイオードなど）が占める、国内でも有数の半導体メーカーです。皆様の身の回りの製品にもローム社製の部品が使われているはずなのですが、部品を目にすることは殆ど無いでしょうし、部品にロームのロゴが入っているわけでもないので、一般の消費者の方には馴染みの薄い企業だと思います。関西、特に京都在住の方にはクリスマスシーズンのイルミネーションや、京都会館コンサートホールの命名権取得（ロームシアター京都）など、半導体メーカー以外としての知名度のほうが高いのではないでしょうか。

私は、幸運なことに、学生時代の所属研究室にロームのエネルギッシュな共同研究員が在籍していたため、半導体メーカーとしてのロームとしての魅力、働き甲斐について触れる機会があり、ロームへと道を進めることとなりました。さらに幸いなことに、希望していた研究開発部門へ配属され、私の企業人としての研究開発生活が始まりました。

3. 研究開発の取り組み

研究開発の意義というものを考えた場合、その本質は社会的課題を解決することにあると思います。具体的には世の中の課題（要望）があり、それに応えるために技術あるいは製品の開発をおこなうことだと考えています。企業における研究開発では、企業目的、戦略、保有技術、取引先などのステークホルダーといった様々な要素を考慮して、研究開発の対象を適切に絞り込むことが必要になります。一方で、それまでとは全く異なる分野への開発に進出し、成功を収めている企業も存在しますので、現状に捉われずに取り組むことも重要です。また、数年以内に成果を求めるか、10年以上の長い期間を要するか、といった時間軸のマネジメントも必要となります。企業ではこれらのバランスを考えながら研究開発への投資がおこなわれています。場合によっては、委託研究や技術そのものの買収などへ投資をおこなうこともあるでしょう。また、大学との共同研究も有効な研究開発の選択肢です。ロームでは研究公

募の実施など、積極的に大学との共同研究を進めており、京都大学ともいくつもの共同研究を実施しております。ここでは、私が従事している京都大学との共同研究内容について簡単に説明させていただきます。

4. 京都大学との共同研究：フォトニック結晶 LD の開発

現在、私は工学研究科電子工学専攻野田教授と共同で『フォトニック結晶 LD』という新しい半導体レーザの開発をおこなっております。この素子は、フォトニック結晶というナノスケールの微細周期パターンを内部に造りこんだ独特の構造をしており（図 1）、このフォトニック結晶を光の共振器として活用することで従来の LD では得られない様々な特徴を得ることが可能です。

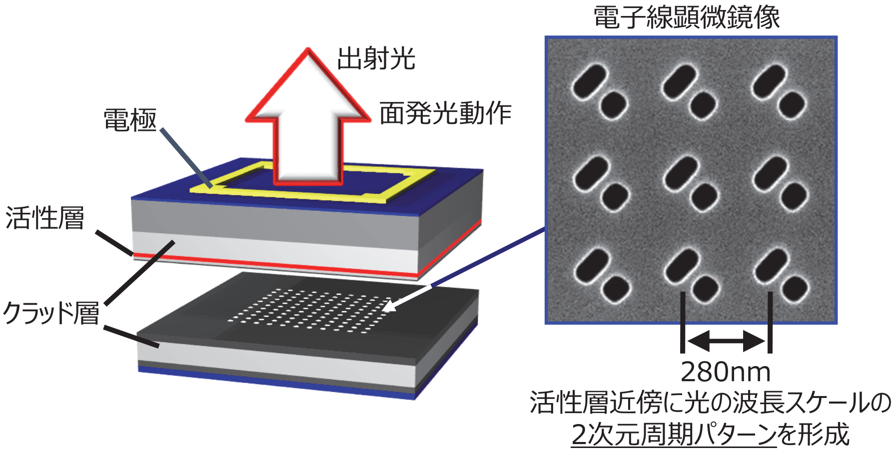


図 1. フォトニック結晶 LD の構造図およびフォトニック結晶構造の電子線顕微鏡像
（電子線顕微鏡像の引用元：フォトニック結晶レーザーを搭載した LiDAR の開発に成功
－来たるべき超スマート社会におけるスマートモビリティの発展に貢献－
http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/200716_1.html）

この特徴を活かすことで、アプリケーションとしての新たな価値を創出できる可能性を秘めております。その例の 1 つとして、現在大きな注目集めている LiDAR（Light Detection and Ranging）システムの光源としての適用が考えられます。LiDAR とは光を用いた測距システムであり、例えば対象物までの光の往復時間を検出することで高精度の測距を実現しています。自動運転やセキュリティセンサなどで使用されている LiDAR では、光源に高出力の半導体 LD が使用されることが一般的です。半導体 LD は小型・安価という特長があり、LiDAR システムの普及には欠かせない光源です。通常の半導体 LD は拡がり角が 10 ～ 30° と大きいので、遠方まで測距をおこなう（光を届かせる）ためには、光を平行に変換するための光学系（コリメートレンズ）が必要となります。高出力半導体 LD はビーム品質の劣化や非点収差の影響があり、平行度の高い光を得るには精密な調整が必要となります。一方で、我々が開発しているフォトニック結晶 LD は高出力（大面積発光）でも高いビーム品質を維持できることで、極めて狭い拡がり角（半値幅約 0.1°、30m 先で 5cm 程度のスポットサイズに相当）を得ることが可能です（図 2）。フォトニック結晶 LD を光源として用いることで、コリメートレンズを、その調整作業も含めて、省略することができ、小型化・低コスト化への貢献が期待できます。

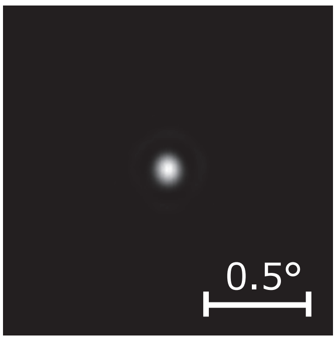


図 2. フォトニック結晶 LD の出射ビーム形状（ピークパワー 10W 駆動時）
（引用元：図 1 と同様）

そして、実際にフォトニック結晶LDを搭載したコリメートレンズフリーのLiDARシステムの作製をおこない、動作実証まで進めております。これらの情報に関しては京都大学からプレスリリースが出ておりますので、是非、そちらもご覧ください。
（URL：http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/200716_1.html）

5. 終わりに

これまでに、共同研究のおかげで、素子の試作、アプリケーションとしての原理検証まで進めることができました。研究開発としては大きく進んできましたので、いよいよ量産化…と行きたいところですが、ここからが研究開発としての勝負所となります。原理検証まで進んだ技術（試作品）を量産可能な技術（製品）に結び付けることが最大の課題です。そのためには動作原理の理解を深め、品質の高い設計（ロバスト性の高い設計、原理的に動作不良が起こらない（起こりにくい）設計）の開発を進めるとともに、図1に示したナノスケールの微細周期パターンを量産に適した工法（市場に見合ったスループットと精度、設備投資費。それらのバランスが取れている工法）で作製する技術の開発、さらにその技術で作製した素子の信頼性試験および故障モード解析とその対策も必要です。ロームでは既に多くの半導体レーザを製品化しており、半導体レーザに関する技術・知見を持っています。その点で『フォトニック結晶LD』はロームの技術との融和性は高いですが、それでもなお、多くの課題が存在します。

これは私の場合の一例に過ぎませんが、研究開発から事業化へ進めるにはこのように確実に多くの障壁が存在します。自分の関わる研究開発ではどのような障壁が存在するのか、研究開発を進めるにあたり、この点を予め具体的にイメージできていることがどれだけ重要であるかが、恥ずかしながら、最近になってようやく身に沁みてきました。研究開始当初は、デバイス特性の向上にばかり意識が向いてしまい、このような視点が抜け落ちていました。今後、企業での研究開発に従事する機会がありましたら、私の経験を少しでも参考にしていただけると幸いです。

編集後記

cue44 号をお届けします。新型コロナウィルス感染防止のため、前期の授業は全面的にリモート実施となりました。受講者の雰囲気が掴めないため講義はやりにくいですが、画面に表示される参加人数は例年よりも多く、アップロードで提出されるレポートの集計が容易など良い面もありました。入学式も無かった１回生については黒橋学科長が特に気にかけられ、追加のリモート面談を実施しました。使わざるを得なくて使い出したＩＴツールですが、今後はリアル授業への効果的な活用が行われると感じます。

今後とも cue ならびに電気関係教室にご支援を頂けますようお願い申し上げます。

［H. M. 記］

協 力 支 援 企 業

鉄道情報システム株式会社
日 本 製 鉄 株 式 会 社
株 式 会 社 村 田 製 作 所
ロ ー ム 株 式 会 社

発 行 日：令和２年９月

編 集：電気系 cue 編集委員会
大木 英司、白井 康之、藤田 静雄、
山本 衛、田中 俊二、デゾイサ メーナカ
村田 英一、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