



**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 25号 目次

### 巻頭言

学生よ、技術者よ、立ち上がれ！

……………イー・アクセス株式会社 代表取締役会長 千本 倅生………… 1

### 大学の研究・動向

環境調和型エレクトロニクスの現状と展開—分子系エレクトロニクスおよび電気自動車研究—

……………電子工学専攻 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野………… 3

### 産業界の技術動向

歌声合成について—「初音ミク」を支える技術—

……………ヤマハ株式会社 研究開発センター 音声グループ マネージャ 剣持 秀紀………… 9

研究室紹介…………… 14

博士論文概要…………… 34

### 高校生のページ

生物と電気と数学と—数式やコンピュータを使って生命を理解し、新しい医療をめざす—

……………電気工学専攻 土居 伸二………… 52

### 学生の声

自己成長の場

……………工学研究科 電子工学専攻 博士後期課程2年 奥村 宏典………… 58

とある暇人の思考

……………工学研究科 電気工学専攻 博士後期課程2年 笹山 瑛由………… 58

### 教室通信

……………電気電子工学科長 北野 正雄………… 59

### 賛助会員の声

エピタキシャル A1 電極を用いた高耐電力 SAW デバイスの開発

……………村田製作所 中川原 修………… 60

編集後記…………… 62



**巻頭言****学生よ、技術者よ、立ち上がれ！**

昭和 41 年卒 イー・アクセス株式会社代表取締役会長 千本 倅生



昨年来、日本という国の地盤沈下に警鐘を鳴らす声が多数聞かれるようになった。GDP で中国に抜かれ世界第三位となったことが最大の契機だったかと記憶しているが、実際にはすでに、S & P の 2009 年世界市場調査・株価上昇率で日本が世界 45 ヶ国・地域中ワースト 2 位（44 位）と惨敗するなど、日本という国の将来性・発展性が徐々に、また構造的に劣化してきていることを市場は冷徹に評価し始めていたのだ。

先日、私の著書の中国語版出版を記念して、北京・清華大学で講演する機会を得た。清華大学は、胡錦濤国家主席や習近平国家副主席（次期国家主席予定）の母校であり、また伝統的に理工系が特に優れている。発展しようとする国がまさに最も必要とする人材を育成・輩出している、中国トップレベルのエリート校である。授業も終わり閑散とした夕暮れ時に構内に到着した私を迎えたのは、講堂に入りきれず溢れ返る聴講希望者の集団である。講堂内に足を踏み入れると、歓迎の横断幕や、通路や階段に座り込んで場所を確保しようとする学生の列が目飛び込んできた。その熱気のまま講演を終えるや、今度は延々と途切れない質疑応答、しかも驚くほど流暢な英語での質問が留学経験のない学生達の口をついて出てくるのである。異国から来たベンチャー起業家から何でも学んでやろうと必死なのだ。学部不問の募集だったが、質問内容から察するに理工系の学生も多数混じっていた。伸び盛りの国のパワーに心底圧倒され、またアントレプレナー（起業家）精神に通ずる向上心とハンタリーさに強い共感を覚えただけでなく、理工系の学生も、技術や理論に加え、その応用としての事業化に強い興味と意欲を持っていると感じ、深い感銘を受けた。

携帯事業を営む当社イー・モバイルのパートナー企業である Huawei 社もまた、中国を代表するハイテク企業である。数千人の修士・博士号技術者を抱えすでに世界トップクラスの事業規模と技術レベルに達しているにも関わらず、チャレンジ精神溢れるアグレッシブな製品提案と走りながら解決するパワー、そして夜を徹して問題点を修正してくる熱意が実は最大の売り物である。彼らはまた、日米等先進国だけではなく、遠くアフリカ大陸のモバイル産業を席卷するほどの国際性と戦略性も併せ持つ。恐るべき技術者集団である。

日本は一昨年、今年と、立て続けのノーベル賞複数受賞に沸いた。京都大学は 1949 年に日本人で初めてノーベル賞を受賞した湯川秀樹博士を始め、5 人の受賞者を輩出しており、そのいずれもが理学部・工学部出身である。また今年も、京大発の iPS 細胞の研究が受賞するのではないかと期待され、背景として語られる本学の自由闊達でチャレンジ精神旺盛な学風は今も健在であると誇らしく感じた。また、残念ながら一連の受賞の対象は 1970 年代の成果であり最近の研究実績ではないものの、30 年以上も経って高い評価を得られたことで、国力や成長性に暗い見方が支配的な今の日本の重い雰囲気であって、再び目線を起こし元気を出そうという気にさせる明るい話題だったのではないか。更には、成果を上げ

るには目の前の取り組みを一層の高みに押し上げる懸命の努力と、忍耐強い継続への熱意が必要であることを改めて思い起こさせてくれた。

物理、化学、数学などの国際オリンピックで毎年極めて優秀な成績を収めるなど、高校までの日本の教育レベルは世界に誇れる水準にあらうかと思う。一方、果たして日本の大学は、入学自体がゴールとなってしまうてはいないか。2010年のQS世界大学ランキングで、日本以外の大学である香港大学が初めてアジアトップとなり、京都大学はわずかに及ばなかった。単純なランキングに一喜一憂すべきではないが、経済や国のあり方といった大きな潮流と軌を一にしてはいないか。「二番じゃダメですか」というフレーズは有名になったが、志の持ち方としては、やはり少しでも高みを目指す気概が欲しい。

日本は、国内市場の成熟や少子高齢化など固有の要素に世界的な経済苦境も加わり、失われた10年、20年から抜け出せないでいる。また、海外留学生の激減や海外旅行の不人気にも見られるように、外国に対する関心や外に開かれた感覚が急速に低下しているとも言われる。しかし、国家的危機感に突き動かされて欧米に学び、急速な近代国家建設を果たした明治時代や、SONY や HONDA を輩出した戦後の復興期に思いを馳せるにつけ、日本人はもともと好奇心に満ち、勉強や向上に対するハングリー精神を強くもっているのだとの確信が溢れてくる。考えてみれば、SONY 創業者の井深大氏や盛田昭夫氏、HONDA 創業者の本田宗一郎氏は、実業家であるとともに優秀な技術者であった。資源を持たない島国は国内に閉じこもれるはずもなく、世界に目を向け、知恵を絞り、技術力を磨き、熱意を持って世界と積極的に関係を持っていかねば生きていけないのである。

ダボス会議で有名な「世界経済フォーラム」2010年版報告書で日本は「付加価値」「生産工程」「顧客重視」といった「ものづくり」の分野で底力が非常に強いと高い評価を受けた。目先の指標に自信を失い、政治や経済の停滞感で萎縮しがちな日本だが、国力の基盤の質はまだまだ世界最高水準にある。将来に目を向けても、今後世界的に大きな成長が見込める携帯産業や、医療福祉・教育・電子政府といったICT分野では、日本の高い技術力が推進力となる。また、最近目にするようになった官民挙げてのインフラ事業輸出の試みは、これまで日本に眠っていた世界最高水準の工学系運営ノウハウを発掘し活用する新しい動きであり大いに期待したい。失敗を恐れず海外に挑んだかつての先達技術者のチャレンジ精神を思い出すのに遅いことは決してない。日本の若い世代が自らの潜在能力に自信を持ち、好奇心を豊かにして真摯に勉強し、ハングリーさを思い出し、そして世界に開かれたマインドで、市場の活性化とグローバル化、そして新産業の創出に向け、挑戦を続けることが大切である。

日本の学生よ、技術者よ、今こそ立ち上がれ！

**大学の研究・動向**

## 環境調和型エレクトロニクス の現状と展開 —分子系エレクトロニクスおよび電気自動車研究—

工学研究科 電子工学専攻 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

教授 松 重 和 美  
准教授 山 田 啓 文  
助教 野 田 啓  
助教 小 林 圭  
(産官学連携本部)

### 1. はじめに

21世紀に入り、環境・エネルギー問題が顕在化し、その克服が緊急の課題となっている。その解決に科学技術、特に電気電子関連技術の果たす役割は、以前にも増して大きいものとなっている。革新的科学技術の推進には、さまざまな基盤的要素技術を開発するとともにその集積・融合が必要不可欠であり、基盤的観点だけでなく、統合的観点からも時代を先導する技術を開発し、推進して行くことが必須となる。

このような視点から、当研究室では環境親和性の高い有機分子材料を対象とする以下の2つの研究課題「①ナノ機能構造の構築・制御、分子スケールでの電子物性・構造評価、さらには分子操作をも可能とする新規手法の確立(分子ナノテクノロジー)」、「②従来のSiを中心とする無機系材料を用いたデバイスから、有機系材料を利用した半導体・太陽電池を含む有機系エレクトロニクスおよび分子デバイスに関する研究開発」に取り組むとともに、技術統合的観点から「③最近急激に関心を集め、環境に優しい電気自動車に関して、バッテリーとキャパシターのハイブリッドエネルギーシステムや竹などの自然素材の採用、伝統文化との融合を図った京都風電気自動車の提案」を行なっている。

これまで精力的に進めてきた個別的な基盤的研究に加えて、統合的視点からも研究を推進することで、広範な技術分野において新規エレクトロニクスを進化させ、グリーン社会に向けての新たな電子デバイスの創成や、(自動車)産業構造の変革を誘導する一助となることを期待している。

### 2. 分子ナノテクノロジー

#### (1) カーボンナノチューブエレクトロニクス

有機分子やナノカーボン材料を構成する炭素骨格は、多様な結合様式(sp, sp<sup>2</sup>, sp<sup>3</sup>軌道)に由来して、特異な電子構造を有するが、特に近年、単層カーボンナノチューブ(SWNT)やグラフェンなどのいわゆるナノカーボン材料(図1(a)(b)参照)は、バリスティック伝導やディラック粒子性など、その低次元構造に起因する特異な電子物性を示すことから、基礎・応用の両面から精力的に研究が進められている。グラフェンの革新的研究により、英マンチェスター大学のAndre Geim、Konstantin Novoselov両氏が2010年のノーベル物理学賞を受賞したニュースも、大変記憶に新しい。ここでは、次世代のナノスケールのデバイスとして期待されている、SWNTをゲートチャネルに用いたカーボンナノチューブ電界効果トランジスタ(CN-FET)のチャネル電子状態評価の最近の研究について紹介する。

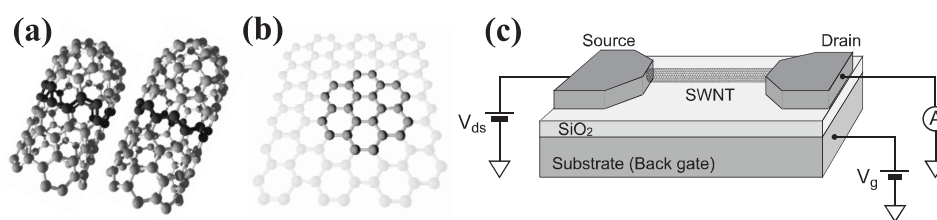


図1 注目される低次元ナノカーボン材料.

(a) カーボンナノチューブ. 左: armchair 構造, 右: zigzag 構造. (b) グラフェンシート. (c) CN-FET の模式図.

CN-FET の特性は SWNT と金属電極との界面およびチャネルの電子状態によって支配されるため、接合界面および SWNT の電子状態を解析することは本質的に重要となる。われわれは、ナノメートルスケールの空間分解能で表面電位計測が可能な、周波数検出型のケルビンプローブ原子間力顕微鏡 (FM-KFM) および各点 AFM ポテンシオメトリー (P-AFMP: Point-by-point AFM Potentiometry) を新たに開発し、動作状態の CN-FET のチャネル電子状態を直接計測することに成功した。図 2 に、P-AFMP による SWNT チャネル電位の測定例を示す。用いた試料は、チャネル長 300 nm の p 型の CN-FET 試料である (図 2(a))。図 2(b) は、ソースドレイン間に 1V ( $V_{ds}$ )、ゲート電圧  $V_g$  に -5V (左図) あるいは 5V (右図) を加えた状態での、チャネル領域の電位マップ (P-AFMP 像) である。図 2(c) のチャネルに沿っての電位プロファイルでも分かるように、ゲート電圧を 5V に増加すると、チャネル電位は上昇し、ソース側からのショットキー障壁を通してのホール注入が抑圧される (ドレイン電流の減少)。

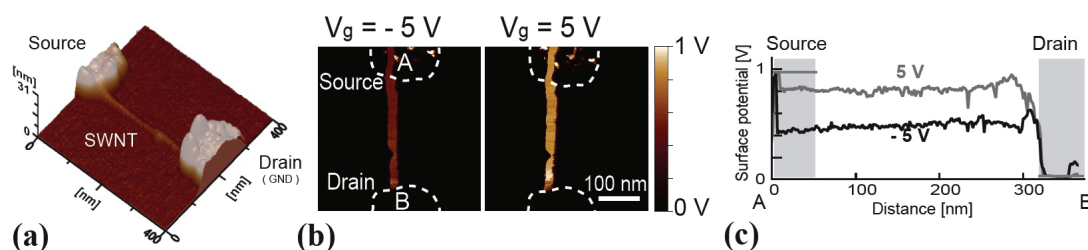


図 2 (a) CN-FET の AFM 像. (b)  $V_{ds} = 1$  V,  $V_g = 5$  V および -5 V のときの電位像 (P-AFMP 像). (c) (b) から得られた SWNT チャネル上の電位プロファイル.

## (2) バイオナノ機能デバイスのための基盤研究

生体分子は、DNA や種々のたんぱく質などにも見られるように、一つ一つの分子が固有の機械、電気、化学機能を担っており、かつ機能構造単位として独立しているという際立った特徴を持っている。また、生体系分子は自己組織的に形成され、一般にエネルギー効率性が高く、環境調和性にも優れているということも大きな特徴となっている。われわれは、こうした単一の分子自身が内在的にもっている種々の機能を活用する、分子スケールの電気・機械素子「分子ナノ機能デバイス」の構築を目指している。一方、分子スケールデバイスの実現には分子を直接制御し、分析することが必要不可欠となることから、単一分子の直接制御・操作・観測・分析を可能にするナノプローブテクノロジーに関する研究にも注力している。特に、周波数検出型の原子間力顕微鏡 (FM-AFM) は、図 3 に示されるように、真空中 (図 3(a)) だけでなく、生理環境である緩衝溶液などにおいても原子・分子スケールの観察が可能になったことから (図 3(c))、生体分子機能の直接評価やバイオナノ機能デバイス構築に向け大きな期待が寄せられている。



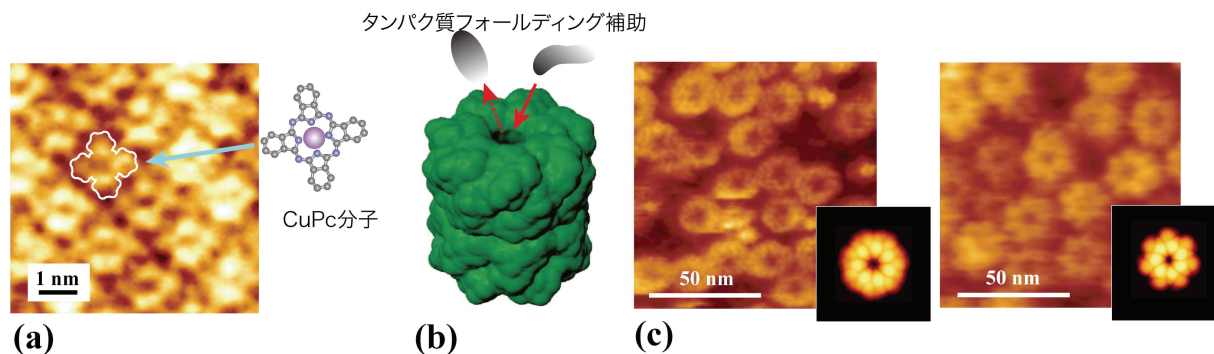


図3 (a) 金表面上の銅フタロシアニン分子の高分解能 FM-AFM 像 (超高真空中). (b) タンパク質分子の自己組織的な構造形成 (フォールディング) を促進する機能をもつ, 環状の分子シャペロン (GroEL) のモデル図. (c) 生理環境溶液中における個々の GroEL 分子の FM-AFM 像. 左図は分子下部のハーフユニット面 (赤道面) の AFM 像. 右図は GroEL 上部の AFM 像に相当する. それぞれの図の右下の正方形は、対応する分子モデル図を表す.

### 3. 有機系エレクトロニクス

有機電界発光 (EL: Electroluminescence) ディスプレイや照明の商品化に代表されるように、有機半導体におけるキャリア (ホールや電子) 伝導を利用した有機系エレクトロニクス素子の研究開発は著しく進展している。現在、有機材料特有の可塑性・柔軟性を活かしたデバイス (例えば、巻き取り可能な「ローラブル」素子や折り曲げ可能「フォルダブル」素子) への研究開発が進む中で、われわれは、インクジェット法やロール・ツー・ロール (R2R) 等のプリンタブル技術による低価格、低エネルギー負荷で製造可能な太陽電池、プロセッサ、ディスプレイを集積化した「有機光電子デバイス統合システム (OFIS: Organic Function Integration System)」を提案している。これは、図4に示すように紙や繊維などの任意表面上に、電源ケーブルから解放された真のユビキタスシステムを実現するものである。

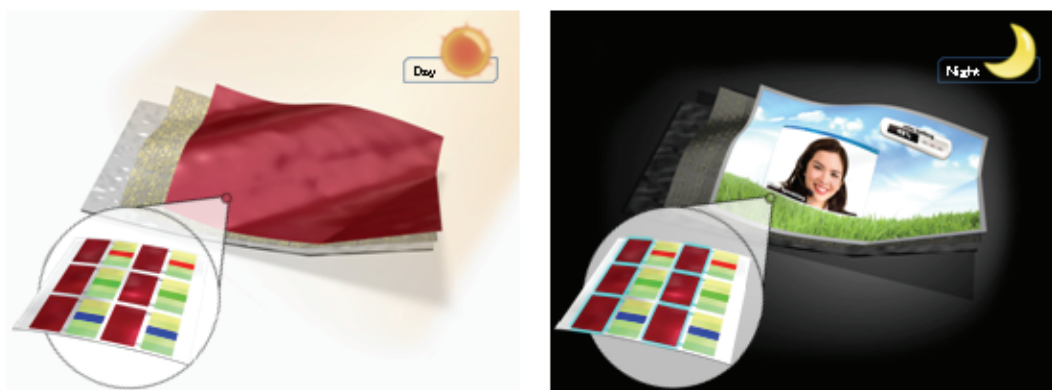


図4 有機光電子デバイス統合システムの一例. (左図) 日中に個々の画素に付属の太陽電池により充電される様子、(右図) 夜間、日中に充電された電力により画素が駆動され、ディスプレイとして機能する様子を示す.

しかし、これら有機系薄膜デバイスの駆動回路を担うと期待される有機薄膜トランジスタ (OTFT: Organic Thin-Film Transistors) については、未だその特性及び再現性において、実用レベルに到達していない。その原因の一つに、伝導キャリアの生成に関する問題がある。元々、無機系材料と比較して有機半導体におけるキャリア濃度が小さい上に、大気中の酸素や水による有機半導体分子の酸化、ゲート絶縁膜と有機半導体界面におけるキャリアトラップなど、キャリア生成を阻害する要因が数多く存在

する。特に、電子を主たる伝導キャリアとする n チャンネル型については、ホールを伝導キャリアとする p チャンネル型よりも性能が劣っているため、実用に耐えうる n チャンネル OTFT へ向けた材料開発・素子構造提案への取り組みが急務となっている。

本研究室では、OTFT におけるキャリア生成の問題を解決するための知見を得るべく、ゲート絶縁膜/有機半導体界面における電荷移動に着目し、図 5 に示すように膜厚数 nm レベルの極薄絶縁ポリメタクリル酸メチル (PMMA) 膜を SiO<sub>2</sub> 絶縁膜/半導体界面に挿入した OTFT 素子の作製とその評価を行うことで、OTFT のチャンネル部における電子伝導及び電子トラップ挙動を追跡している。

まず、大気下で p 型半導体として振る舞う代表的な有機材料であるペンタセンの OTFT において、その電気特性に与える極薄 PMMA 層 (膜厚 8 nm) の効果を図 6 に示す。通常、ペンタセン OTFT は、図 6(a) に示す p チャンネル動作 ( $V_G < 0$  V かつ  $V_D < 0$  V) しか示さないが、図 5(a) の素子構造では、真空中ではあるが、n チャンネル動作条件下 ( $V_G > 0$  V かつ  $V_D > 0$  V) で、図 6(b) に示すようにドレイン電流の飽和が生じ、n チャンネル動作が出現する。また、大気下では PMMA 層の有無に関わらず、n チャンネル動作は生じなかった。この真空下でのペンタセン OTFT の両極性動作は、PMMA 層の存在に起因するものであり、SiO<sub>2</sub> 絶縁膜を PMMA 層で被覆することで、絶縁膜/半導体の界面における電子トラップ (主に水酸基 (OH)) が減少し、チャンネル部の電子伝導が促進されたためと考えられる。

更に、大気中では FET 動作が困難である不安定な n 型有機半導体材料 (ペリレンテトラカルボキシジイミド誘導体、PTCDI-C13) の OTFT に対して、PMMA 層を導入することで大気下での n チャンネル動作の安定性が大幅に改善されると共に (図 7)、しきい値電圧の低減、伝達特性におけるヒステリシス現象の抑制の効果も得られ、極薄高分子絶縁層が様々な OTFT に対して、界面電子トラップ抑制、及び電子輸送性の向上にきわめて有用であることを示している。

このように、われわれは主にキャリア濃度制御という観点から OTFT の特性向上を試みているが、この取り組みは太陽電池、イメージセンサなど、他の有機光電子素子開発の進展にもつながるため、本研究の今後の発展が、OFIS の実現に向けて、大きな波及効果をもたらすものと期待される。

#### 4. 電気自動車に関する取組み：Kyoto-Car プロジェクトの進展

CO<sub>2</sub> を排出せず、環境に優しい電気自動車が最近注目を集めている。当研究室では、数年前よりベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (VBL) や桂地区に存在する京都市立芸術大学、国際日本文化研究セ

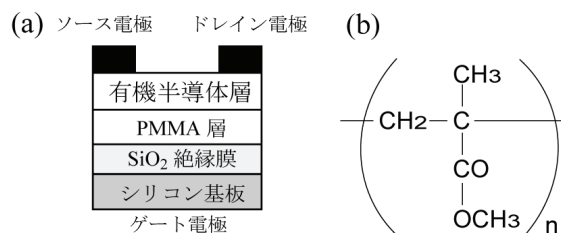


図 5 (a) ポリメタクリル酸メチル (PMMA) 層付き OTFT 素子. (b) PMMA の分子構造図.

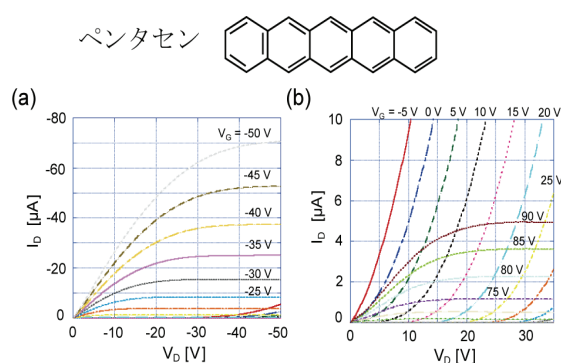


図 6 PMMA 層付きペンタセン OTFT の真空中での出力特性 (a) p チャンネル 及び (b) n チャンネル動作.

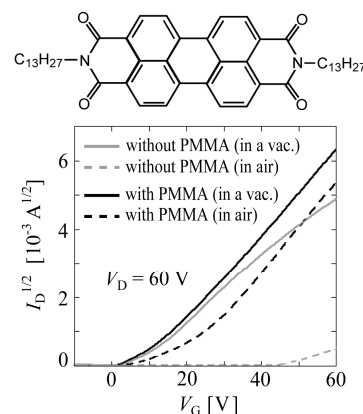


図 7 PTCDI-C13 の分子図と、PTCDI-C13 OTFT の大気下での伝達特性 (膜厚 2nm の PMMA 層の有無で比較をしている).

ンターと協同して、先端技術と伝統文化・芸術が融合した電気自動車“Kyoto-Car”を提案してきた。これまで、実車の1/10サイズのコンセプトカー（インホイールモーター、京友禅の外装）の製作、市販のコムス（トヨタ車体製）改造車へのバッテリーと電気二重層キャパシターを組み合わせたハイブリッドエネルギーシステムの搭載とその有効性の実証実験、更に車体に自然素材（木や竹）を活用した京都風木型、竹籠（愛称 Bamgoo）電気自動車の製作などを試み、プレス発表してきた。更に、最近スポーツタイプの電気自動車の試作車を発表した京大発学生ベンチャーのグリーンロードモータース（GLM）や京都府とも連携し、京都企業の高性能電気電子部材等を集積した最高性能の電気自動車の製造にも取り組んでいる。



京都の伝統技術・文化と最先端技術を融合させたKyoto-Car



竹のEV: Bamgoo

桂での実証実験

GLMのトミーカイラZZ-EV

図8 Kyoto-Car プロジェクトに関連した電気自動車。（上段）コンセプトカーの写真（下段）実際に製作、実証実験などを行った電気自動車。



図9 (左図) 今後予想される自動車産業の変革。(右図) 将来のエネルギー・スマート・ステーションの概念図。

一方、自動車産業そのものを考えた場合、電気自動車はこれまでのエンジンを中核としたピラミッド型・すりあわせ技術集積型の産業構造から、世界の高性能・低価格のバッテリーやモーターなどの部品を集めた水平統合型・組み合わせ型産業（丁度、iPhone や iPad 製品の様な）への変革を誘導するものとも考えられる。そうした意味からも、世界中で中小企業やテスラ・モーターズなどのベンチャー企業の台頭が目覚ましい。こうした電気自動車は、最近世界中で取組みが活発化しているスマート・グリッド、コミュニティーの重要な構成要素となっており、太陽電池等と組み合わせたエネルギーステーション等の提案も行っている。こうした事例は、今後の電気電子分野の進展には、種々の要素技術と統合化、融合化によるイノベーションも必要であることを示唆している。

## 5. おわりに

科学技術の進展は早く、しかもその内容、社会的位置付けは時代とともに変化する。ナノレベルでの基盤技術の研究開発、時代を変革する電子材料・デバイス開発、そして21世紀のグリーン社会を先導する統合的研究・提案への取組みは、学術的・産業的貢献のみならず、学生・院生に対する教育としても価値あるものと期待されている。

研究内容の詳細は松重研究室のホームページ：<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/> を参照下さい。

## 産業界の技術動向

# 歌声合成について —「初音ミク」を支える技術—

ヤマハ株式会社 研究開発センター  
音声グループ マネージャ  
剣 持 秀 紀

### 1. はじめに

最近、歌声合成技術が注目を集めています。これは、コンピュータに歌詞と音符を入力するだけで、歌声を合成するという技術です。動画投稿サイト「ニコニコ動画」には、「初音ミク」を筆頭とする歌声合成ソフト Vocaloid を用いてボーカルパートを作成した楽曲の動画が溢れ、市井のクリエイターたちが日夜新曲を競って発表しています。人気が出た楽曲は大手レコード会社からリリースされ、ヒットチャートの上位に食い込むようになってきています。実際、2010年5月19日に発売された“EXIT TUNES PRESENTS Vocalogenesis feat. 初音ミク”というアルバムは、並み居る人間の歌手を押しつけて、オリコンの週間ランキングで1位を獲得しました。合成音声による楽曲がヒットチャートの一面を占めることを10年前に誰が予想し得たのでしょうか。また、人気楽曲の多くはカラオケとして配信され、カラオケでの人気曲のランキングの上位を占めるようになってきています。2010年のJOYSOUNDのカラオケ年間総合ランキングでは、10位のうち5曲が「ボカロ曲」（歌声合成ソフト Vocaloid を用いてボーカルパートを作成したオリジナル曲）となっています。特に若い世代の人々がカラオケボックスでこれらの楽曲を好んで歌っているようです。

本稿では、歌声合成の歴史を振り返りながら、筆者が開発に携わった歌声合成ソフト Vocaloid について紹介し、最後に最近の歌声合成技術を取りまく状況と今後の展望について述べます。

### 2. 歌声合成の意義

最近では、さまざまな楽器がコンピュータやシンセサイザの上で納得出来る品質で再現できるようになってきています。実際に、商業音楽ではほぼ100%と行って良いほど電子的に作られた音が含まれています。ところが歌声だけは、スタジオに歌手を呼び、それを録音するというスタイルがずっと続けられてきていました。歌声も将来は電子的に合成されたものが「普通に」使用される時代が来ると考え、開発を進めてきました。

歌声はメロディーを奏でるといふ点が楽器と共通していますが、楽器と違う点があります。それは、歌声は歌詞を持っているということです。歌詞を持っているということは、音色が異なるということであり、楽器に喩えるのであれば、様々な異なる楽器をリアルタイムに切り替えながら演奏していることに等しいことになります。ですから、これまでのシンセサイザと同じような考え方では、「歌うシンセ」

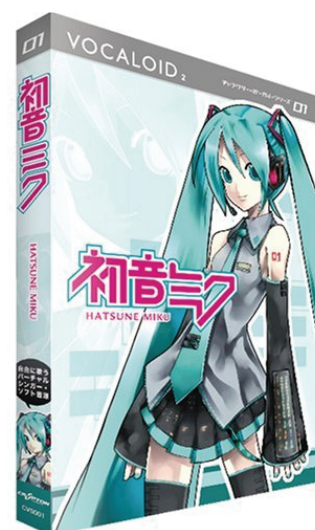


図1 VOCALOID「初音ミク」

は実現できません。

一方で、歌声には、音声という側面もあります。歌声の音声としての性質とは、発音器官を共有しているという点です。しかし、話し声と歌声とは決定的な違いがあります。歌声は、音程とリズムが楽譜（あるいはそれと同等のもの）に支配されるという点です。したがって、朗読音声と比べると、歌声はリズムや音程が多様性を持ちます。テキスト音声合成（入力した文章をもとに音声を合成する技術）では、ナレーターに長時間朗読音声を読み上げてもらい、入力したテキストで最も似ている部分を取り出して接続する技術（コーパスベース方式）が確立し、自然な音声の読み上げが実現されていますが、歌声の場合は、リズムや音程の多様性と歌詞の組み合わせを考えると、この方式は不可能です。これに加えて、歌声はそれ自体が鑑賞される対象になります。合成という観点からみると、伸ばし音が「美しい」かどうかは重要なポイントになります。合成音の品質はいわゆるハイファイであることが求められます。

### 3. 歌声合成の歴史

さて、ここで歌声合成の歴史を振り返ってみます。

世界初の合成による歌声は、1962年にベル研究所の Kelly らによって発表された“Daisy, daisy…”という歌声です [1]。これは、音響管モデル（acoustic tube model）と呼ばれる、滑らかに管の直径が変化するという簡単な形で声道を表現することにより、歌声の生成を物理的にシミュレートしたものです。このときの歌声は文化的にも大きな影響を残し、1968年に公開された映画「2001年宇宙の旅」の最後のシーンでコンピュータ HAL9000 が停止する直前に“Daisy, daisy …”と歌う場面にも影響を与えたと言われています。今その合成音を聴くと、1960年代にこれだけのクオリティで歌声合成が達成されていたことに驚きを禁じ得えません。しかしながら、物理モデルは精密にモデリングしようとするほど扱うパラメータの数が膨大になるという欠点もあり、その後も物理モデルによる歌声合成のチャレンジはいくつかあったものの、未だ実用には至っていません。

一方では、歌声も音声の一種であり、音声の分析合成の研究開発の成果も歌声合成に十分に生かされています。ソースフィルタモデル（音声の生成過程をソース（声帯の振動）とフィルタ（声道による調音）に分けて考えるモデル）もその成果の一つです。1980年に Klatt らが発表した MITalk（のちの DECTalk）は、二次 IIR フィルタ群の並列および直列構成により声道の調音を表現しています [2]。DECTalk はテキスト音声合成を目指して開発されましたが、それをういた歌声合成もよく知られています。

物理モデルもソースフィルタモデルも音声の生成過程をモデリングしたものとなっていますが、一方では音声の生成過程にとらわれず、発音された音のスペクトルをそのままモデリングする手法も歌声合成に取り入れられています。McAulay らによって発表された正弦波モデリング [3] は、音声信号を短時間 FFT により正弦波の強度、周波数および位相を時間的に変化する関数として表現します。この手法を分析合成方法として使用した歌声合成も提案されています [4]。

研究レベルの歌声合成技術だけではなく、商用のシステムも過去にいくつか市販されています。1997年にヤマハから発売された PLG-100SG という商品は、MU2000 等の MIDI 音源モジュールに装着して歌声合成機能を提供するものです。FM 音源をベースとした方式により歌声を合成しています。1999年に KAE Labs（カナダ）より発売された VocalWriter は、Macintosh 用の歌声合成ソフトウェアです [5]。合成方式は不明ですが、音を聞くと、上述の DECTalk の方式に類似した手法であると推測されます。歌声だけでなく、伴奏もこのソフトウェア上で制作することが可能です。2000年に NTT より発表された正弦波重畳方式により歌声を合成する技術（HORN 法） [6] は、「ワンダーホルン」という名称のソフトウェアとして、NTT アドバンステクノロジー（株）より発売されています。また、歌声の楽器的な側面に注目したアプローチとしては、2004年に Virsyn（ドイツ）から発売された CANTOR という

商品が挙げられます。合成方式は、ソースフィルタモデルをベースにしたものと推測されます。音楽制作環境に特化し、各種のソフトウェアプラグイン規格に対応したソフトウェアシンセサイザという形態で発売されています。

しかしながら、過去の歌声合成システムには、いくつかの問題点がありました。それは、(1) 歌詞が聞き取れない、聞き取りにくい、(2) 歌声が自然でなく、ブザー音的に聞こえる、(3) 直感的な入力インタフェースが無く、難しいコマンド列を入力しなければならない、等です。歌声合成技術を楽曲制作に「普通に」使っていただくためには、これらとは逆の条件が必要です。すなわち、(a) 歌詞が聞き取れること（了解性）、(b) 自然な揺らぎや息の音が含まれること（自然性）、(c) 簡単に入力できること（操作性）です。筆者が手がけた歌声合成技術 Vocaloid は、この条件をクリアし、音楽制作の現場で「普通に」使っていただけることを目標として開発を進めてきました。次節では Vocaloid について簡単に紹介します。

#### 4. 歌声合成システム VOCALOID

Vocaloid は、ヤマハが開発し、ライセンシングを行っている歌声合成ソフトウェアです。実際の歌手の歌声から取り出した音声素片を入力された楽譜情報に合うように接続することで合成を行っています [7]。テキスト音声合成で用いられる大規模コーパスベースのものとは異なり、比較的小さな単位の素片（音声の断片）を持ち、それらのピッチ（音程）を変更し、音色を調整して滑らかに接続します。図 2 に全体のブロック図を示します。

スコアエディタは、音符と歌詞を分かりやすく入力できるようになっています。図 3 にスコアエディタのスクリーンショットを示します。音符はピアノロール形式（音符の位置を縦に音階、横に時間軸で表したもの）で表現します。歌詞は音符の上に直接入力できるようになっています。

合成エンジンは必要な音声素片を歌声ライブラリから取り出し、連結して合成します。その際の素片の使用タイミングは、C-V（子音—母音）という素片の V（母音）の開始位置と音符開始のタイミングが合うように位置の調整

が行われます。このようにしないとリズムやタイミングが明らかに違うものとして感じられるからです。素片の接続には、素片のピッチ（音程）を所望のピッチに変換する必要がありますが、仮に 2 つの素片の接続部分のピッチを合わせたとしても、単純に接続するだけでは二つの素片の音色の差がノイズとな

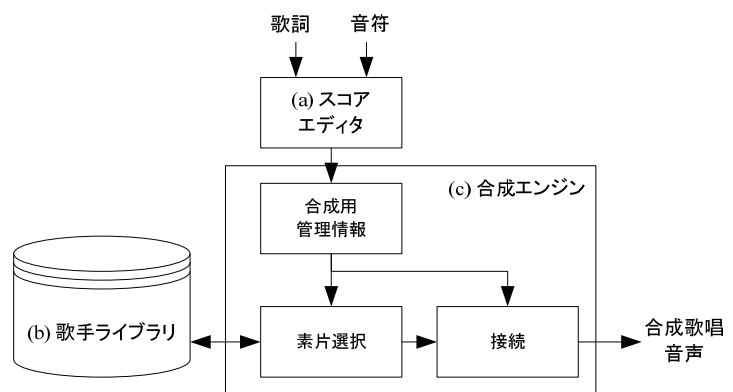


図 2 VOCALOID ブロック図

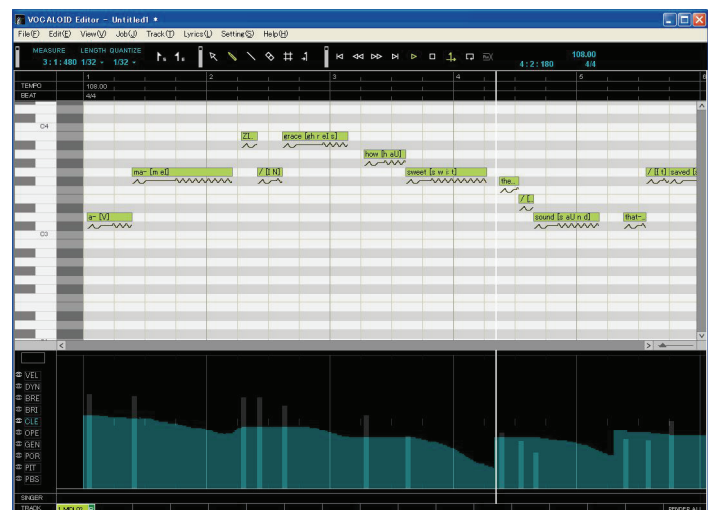


図 3 スコアエディタ

って現れてしまいます。素片連結時には音色も合わせ込む必要があります。これが合成エンジンの一番のポイントかもしれません。現状では、伸ばし音の区間で隣り合う二音素連鎖のスペクトル包絡を補間することで音色の合わせ込みを行っています。図4にその例を示します。図4では“sing” ([sIN]) という歌詞の伸ばし音のスペクトル包絡は、伸ばし音に先行する diphone (音素と音素が変化する部分) すなわち [s-I] の最終フレームと、伸ばし音後の diphone [I-N] の最初のフレームのスペクトル包絡を時間的に補間することで求められます。スペクトルの微細構造は伸ばし音の音声素片のものを使用します。これにより原理的に連結部分で音色の急激な変化が発生しないようになっています。

ピッチの変換およびスペクトル包絡の調整は周波数領域で行われます。ピッチ変換は、素片の波形をFFTした後、スペクトルを周波数軸上でスケールングすることで行われます。(スペクトルの周波数軸上でのスケールングはピッチを変えることになります。) スペクトルのスケールングの際、倍音に相当するピーク近傍の微細構造はできるだけ元のものを保つように、非線形なスケールングが行われます。スペクトル包絡の調整は、倍音に相当するスペクトルのピーク的位置が所望のスペクトル包絡に合うように、スペクトルの強度を調整することによって行われます。周波数領域でのピッチ変換と音色の調整の後、IFFTと Windowing & Overlapping を行うことで合成音声を得られます。

歌手ライブラリは、実際の歌手の歌唱データから取り出した音声素片を集めたものです。素片は diphone と伸ばし音を使用しています。伸ばし音を素片として持っているところが歌声合成ならではの特徴です。対象となる言語で可能性のある全ての母音、子音の組み合わせと、母音および鼻音の伸ばし音が含まれます。素片用の歌声の録音では、効率的に素片が収集できるように考案された専用の歌詞を歌手に歌ってもらいます。声域によって声質も変化するので、収録は複数のピッチで行います。もちろん、収録するピッチの数が多ければ多いほど合成音のクオリティ向上が期待されますが、歌手への身体的、心理的な負担を考慮して、ある程度のところで妥協が必要となります。歌手のモチベーションを保ち安定した声を出していただくために、さまざまな現実的な工夫(収録する歌声のイメージを伝えるために挿絵を描いて見せる、茶菓によりご機嫌を取る等)も必要になります。収録されたデータは音素セグメンテーションおよび使用する領域のセグメンテーションを自動的に行い、人間の手によるチェックと修正を経て完成となります。

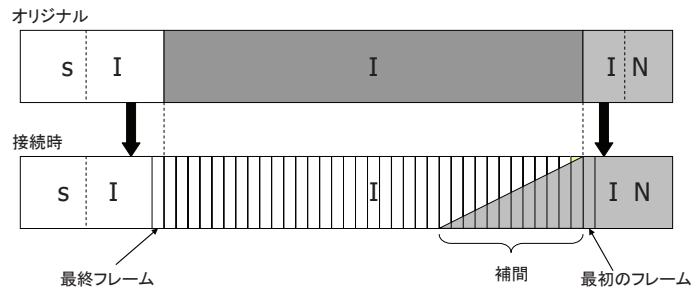


図4 スペクトル包絡の補間

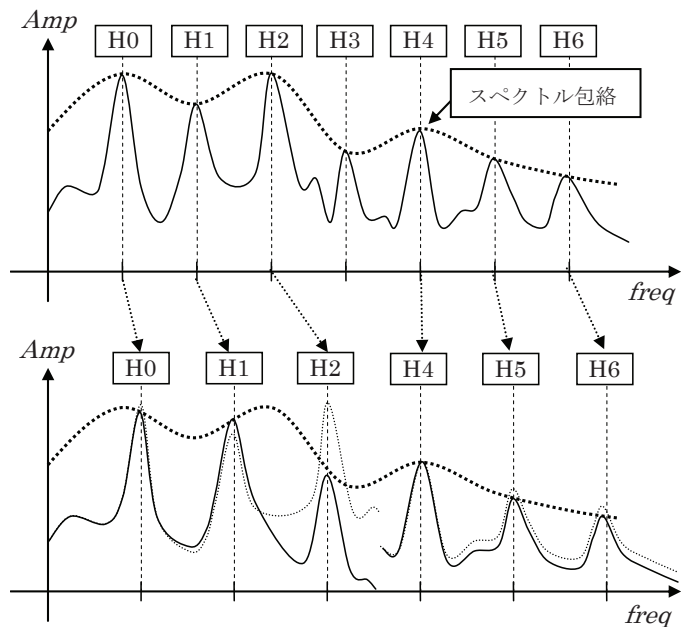


図5 ピッチ変換およびスペクトル包絡の調整



## 5. 歌声合成の今後

歌声合成は今後、品質がますます向上し、より広い分野で応用されるでしょう。音楽制作の現場では、プロ・アマを問わず、なくてはならないツールとなっていくことでしょう。音楽業界の現場では、すでに、仮歌（作曲家が歌手に歌い方を伝えるために制作する仮の歌）を作る際に、合成音声を使用することも増えていると聞いています。

技術的な面から言えば、特に歌い方や表情付けのモデリングが自然な歌声を作り出す上で重要になってくるでしょう。現状の合成エンジンでも人間の実際の歌声からピッチやダイナミクスを抽出してそのまま再現すると、人間の歌声か合成かわからないぐらいのクオリティの歌声が実現できます。歌声の表現、表情が人間らしい歌声の鍵だと思われます。そうすると、様々な楽曲スタイルに合った歌い方や、特定の歌手の歌い方や癖を自動的に再現できるようなモデルが期待されます。その一方で、クリエイタがさらに細かに自分の思い通りに歌い方や声質をコントロールし、調整できるようなツールや環境も必要になるでしょう。また、現在ではまだ再現が難しいタイプの歌声（例えば vocal fry やいわゆる「ダミ声」等）の合成のために、信号処理の手法の改良も続けられるでしょう。

技術的な発展とともに、単なる楽曲制作のツールとしてだけでなく、さまざまな分野での応用も考えられていくでしょう。Vocaloid の合成エンジンをサーバ上で動作させ、インターネットの接続があれば歌声合成の機能を利用できる NetVocaloid と呼ばれるサービスも実際に運用され、Web 上のプロモーションや携帯電話向けのサービスも行われています。今後は音楽制作にとどまらず、教育分野やエンタテインメント分野への応用も広がっていくことでしょう。

さて、合成された歌声は、これまでの音楽の鑑賞のありかたを変える可能性を秘めています。歌声合成による楽曲の愛好者（特に若い世代）には、クリエイタの思いを直接感じるができるから、ということを楽しめる理由に挙げる場合もあると聞きます。実在の歌手による歌声と異なり、歌手の感情が介在する余地がなく、クリエイタが歌声の表現を自ら作っていくことができるからです。クリエイタにとっては、楽曲を通して自分の感情を（歌手というフィルタを通さずに）直接リスナーに伝えることができるツールを手に入れたと言えるのかもしれませんが。ただし、もちろんこれは実在の歌手を否定するものではありません。電気楽器、電子楽器、コンピュータ音楽が登場しても生楽器がなくならなかったように、歌声合成は生の歌声と共存しつつ、音楽に新たな可能性と選択肢を提供することになるでしょう。

## 参考文献

- [1] Kelly et al., "Speech Synthesis", Proceedings of the Fourth International Congress on Acoustics, pp.1-4 (1962).
- [2] Klatt, "Software for Cascade/Parallel Formant Synthesizer," J. of the Acoustical Society of America 67(3) pp.971-995 (1980).
- [3] McAulay et al., "Speech Analysis/Synthesis Based on a Sinusoidal Representation", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing 24(4), pp.744-754 (1986)
- [4] Macon et al., "A singing voice synthesis system based on sinusoidal modeling," Proceedings of ICASSP 97, pp. 435-438 (1997)
- [5] <http://www.kaelabs.com/>
- [6] <http://www.ntt.co.jp/news/news00/0009/000907.html>
- [7] H. Kenmochi and H. Ohshita, VOCALOID - commercial singing synthesizer based on sample concatenation, Proc. Interspeech, pp. 4009-4010. (2007).

## 新設研究室紹介

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野 (中村祐研究室)

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

「トーラス型プラズマの磁場閉じ込めにおける非軸対称性の影響」

太陽のエネルギー源である核融合エネルギーを地上で利用する人工太陽炉を実現するには、燃料を制御熱核融合反応に必要な一億度以上に加熱する必要があり、このような状況では物質はプラズマ状態になっています。したがって、人工太陽炉実現には、このような超高温プラズマを閉じ込める必要があります。プラズマは荷電粒子の集合体なので、これを閉じ込める手段として磁場を用いた方法が検討されています。そのための方法として、主に外部コイルに流す電流だけで、ドーナツ状のプラズマ（トーラスプラズマ）の閉じ込めに適した磁場配位（MHD 平衡）をつくる「ヘリカル系方式」と、外部コイル系だけでなくトーラスプラズマ中に大きな電流を流すことで、磁場配位をつくる「トカマク方式」とが、有望な磁場閉じ込め方式として挙げられます。我々の研究室では、これらの磁場閉じ込め超高温プラズマにおいて、プラズマ形状や磁場強度の非軸対称性が閉じ込め性能に及ぼす影響を実験解析と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

プラズマ中に大きな電流を流すトカマク方式では、理想的には回転対称性のある軸対称な磁場配位でプラズマを閉じ込めることができますが、実際の装置では主たるコイルが回転方向（トロイダル方向）に離散的に設置されているため、わずかではありますがトロイダル方向に磁場強度の非一様性が存在し、この非軸対称性が核融合反応生成物であるアルファ粒子や高エネルギー粒子の損失をもたらす恐れが指摘されています。図1に示したのは、国際熱核融合実験炉 ITER に対する MHD 平衡計算で得られたプラズマ形状と磁場強度の等高線です。左図において薄い灰色で示されているのはトロイダル方向の磁場を作るためのトロイダルコイルの一部で、コイルとコイルの間で磁場強度が弱くなっており、非軸対称性が現れています。中図はこの非軸対称性を低減するために強磁性体であるフェライト鋼を配置した例で、非軸対称性は完全にはなくなっていますが、改善されている様子が分かります。ITER ではテスト・ブランケット・モジュール（TBM）が設置されますが、ここに強磁性体がいられるため、これが磁場強度構造に及ぼす影響を示したのが右図です。TBM 直下で強い非軸対称性が表れることが分かります。我々の研究室では現在、これらの非軸対称性がプラズマ閉じ込め性能に及ぼす影響を詳細に解析しています。

また、主に外部コイル系に流す電流だけで閉じ込めに適した磁場配位を作るヘリカル系方式では、プラズマ電流を駆動（通常は電磁誘導を用いる）する必要が無く定常運転に適しているなど多くの利点があるのですが、磁場配位を軸対称とすることができないので、その実験・理論解析には対称性を利用することができず、三次元解析が必要となるだけでなく、非軸対称性がプラズマの閉じ込め性能に悪影響を与えないように工夫が必要です。このため、我々は非軸対称性が存在しても優れたプラズマ閉じ込め性能が得られる磁場配位の最適化研究も行っています。

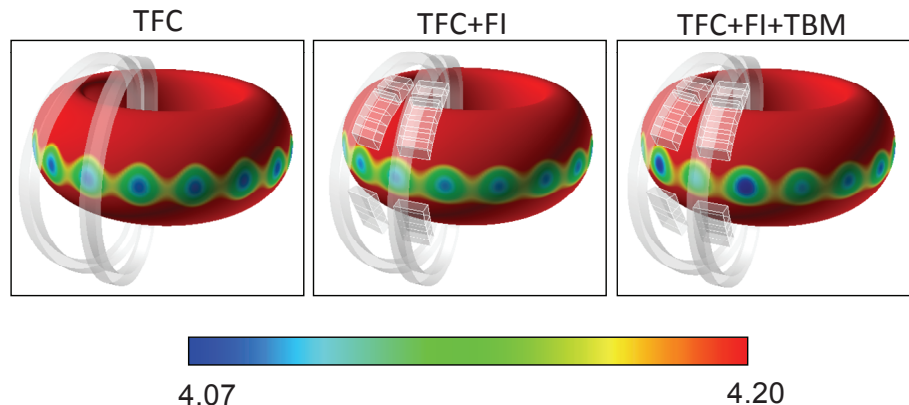


図1 コンピュータによる三次元 MHD 平衡の解析で明らかになった ITER トカマクにおける磁場強度の非軸対称性とフェライト鋼の影響

## 新設研究室紹介

### 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

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

#### 「宇宙太陽発電所 SPS とマイクロ波無線電力伝送に関する研究」

当研究室では、宇宙太陽発電所 SPS (Space Solar Power Station/Satellite) の実現を目指し、システム研究と共に基盤技術であるマイクロ波無線電力伝送技術、及びそのスピノフである大電力マイクロ波を用いた新材料創生の研究を3つの柱として研究を行っている。

宇宙太陽発電所 SPS とは宇宙空間で太陽光発電を行い、その電力を無線（例えばマイクロ波）で地上へ伝送する将来の発電所構想である。100 万 kW 程度の電力を 2GHz 帯もしくは 5GHz 帯のマイクロ波に変換し、直径 2km 程度のフェーズドアレーアンテナから無線電力伝送を行う。当研究所では 1980 年以降様々な実証実験を通して SPS 実現のために研究を行ってきた。当研究室としては大規模フェーズドアレーのビームフォーミングに関する新しいアルゴリズムの理論検討と実験、マグネトロン（マイクロ波管）を用いた新しいフェーズドアレーの開発（特許）等を研究している。

また近年は SPS の基盤技術であるマイクロ波無線電力伝送技術の地上応用にも力を入れている。情報の無線化とデジタルデバイスの省電力化が実現したユビキタス情報社会は、人間のネットワーク化による社会革命を起こしつつある。しかし、そのネックとなっているのが電源である。人間はユビキタスに情報を得られるようにはなったが、ユビキタスに電力を得るようにはまだなっていない。そこで注目されるのが無線電力伝送とエネルギーハーベスティングである。両技術とも様々な方式が世界中で研究されているが、当研究室では主に SPS へつながるマイクロ波無線電力伝送技術を中心に研究開発を行い、対外的にすべての無線電力伝送とエネルギーハーベスティングを統合して推進すべく活動を行っている。近年は共同研究による FWA (Fixed Wireless Access) のためのミリ波レクテナ（受電整流アンテナ）の開発（図 1）（特許）、同じく共同研究による新規 GaN ダイオードを用いた大電力（現状 10W, 目標 100W）2.45GHz レクテナの開発、センサーネットワークへのマイクロ波無線電力伝送の応用、電気自動車無線充電システムの研究、コードレス建物の研究（特許）、共同研究による火星無人探査飛行機への無線給電システムの研究等を行っている。

さらにマイクロ波で無線電力伝送を行うためには大電力が必要であるが、現在の市場に大電力マイクロ波のニーズは少ないため、新たに大電力マイクロ波を用いた新材料創成の研究も開始した。マイクロ波加熱による新材料創成は、単なる加熱によるものとは比べ高機能の新材料が作れる場合があることが近年わかってきた。例えば太陽光感度波長のより広い  $\text{TiO}_2$  をマイクロ波加熱で創成することに成功している（特許）。マイクロ波加熱は新材料創成の際にエネルギー効率や  $\text{CO}_2$  排出量の観点からも有意な場合もあり、現在 NEDO の予算を得て木質バイオエタノール生産プロジェクトも推進中である（図 2）。

これらの研究は当研究所の電波暗室及びマイクロ波計測装置 METLAB 等を用いて行われている。当設備を含め複数の設備はマイクロ波・電磁波研究一般に利用可能で、全国共同利用設備として開放されている（<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/metlab/>）。

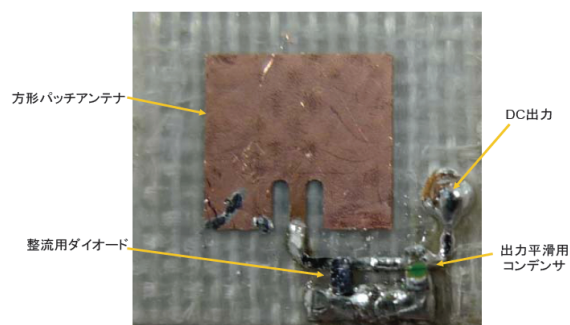


図 1 開発された 24GHz レクテナ (2009)

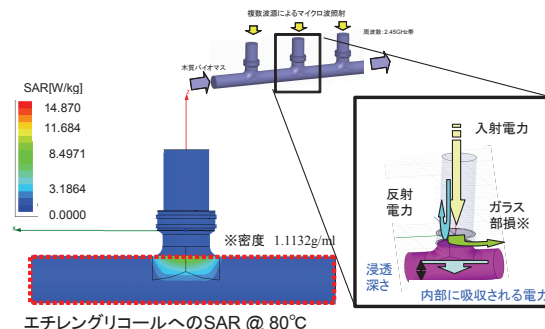


図 2 木質バイオエタノール前処理用マイクロ波加熱装置の計算機シミュレーション結果 (2010)

## 研究室紹介

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

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

### 電気関係研究室一覧

工学研究科(大学院)

電気工学専攻

複合システム論講座(土居研) #

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野

電子工学専攻

集積機能工学講座(鈴木研)

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野(松重研) ☆

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創生部門先進電子材料分野(藤田研)

情報学研究科(大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

エネルギー科学研究科(大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野(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(野澤研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研) \*

ベンチャービジネスラボラトリー

高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(小山田研)

学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野(中村裕研)

## 電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab03/>

## 「拡散テンソル MRI を用いた精神疾患における白質病変の定量解析」

我々の研究室では、電気電子工学技術を基盤とする先端の生体計測、並びにそれを用いた中枢神経系の機能の解明や医療、福祉分野への応用研究を行っている。中でも磁気共鳴画像 (MRI) を中心とした機能や形態の計測とイメージングを主要なテーマと位置づけている。MRI システムは現在広く臨床における画像診断に用いられており、印加する磁場の制御、磁気共鳴信号の計測、信号処理、画像化などの技術を統合し、一つのハードウェアで様々な情報を画像化することが可能なシステムである。近年、この MRI システムを用いて生体内の水分子の拡散情報を捉える MR 拡散強調画像 (MR Diffusion-weighted Imaging; MR-DWI) が脳内白質構造の解明に広く用いられるようになり、例えば統合失調症といった精神疾患の病態研究においても、白質における神経線維の異常が認知不全など統合失調症に見られる症状と何らかの関係があるといった可能性が示唆されている。白質には大脳皮質間を結ぶ多くの神経線維束が張り巡らされているが、異方性など詳細な白質構造は従来の MRI では取得することができず、MR 拡散テンソル画像 (MR Diffusion Tensor Imaging; MR-DTI) 計測によりはじめて可能となった。詳細は参考文献 1 に挙げる解説を参照されたい。

当研究室では、MR-DTI 研究の一つとして精神神経科の研究者と共同で白質線維追跡法を用いた統合失調症患者の白質病変の研究を行なっている。近年、統合失調症にみられる認知不全や前頭葉機能低下は、その原因が大脳皮質の前側に位置する前頭前皮質と脳深部の視床や線条体と呼ばれる深部組織を接続する神経回路における何らかの障害・損傷に由来するとの仮説が認められつつある。そこで、我々は統合失調症患者群 20 名と健常者群 20 名の視床から内包前脚に抜けて前頭葉へ伸びる左右半球の神経線維束を MR-DTI を用いた神経線維追跡法により解析し、追跡開始領域における線維束断面積を比較すると、統合失調症患者においてこの部位の白質線維接続が、線維の絶対量は変化していないもののその走行方向に異常をきたしている可能性が高いことを見だし報告した [2]。図 1 は、この解析法により得られた健常者における白質線維追跡結果の例を示している。現在さらに、精神疾患の定量評価を目指し、大脳半球内を前後に走行する代表的な神経線維束である上縦束 [3] や他の神経線維束の解析を進めている。また、この白質線維追跡法が躁鬱病の白質病変解析にも有効である事を報告している [4]。MR-DTI は、精神疾患の解明、診断、治療効果の評価に有用であり、今後も医学系の研究者との密な連携により医療や脳科学に貢献する研究を進める。

## 【参考文献】

- [1] 小林哲生：“MRI 技術の最前線：拡散 MRI とその脳機能計測・白質病変解析への応用 (解説)”，システム制御情報学会誌，Vol.54, No.2, pp.58-65 (2010)
- [2] S. Kito, J. Jung, T. Kobayashi and Y. Koga: European Psychiatry, Vol.24, pp.269-274 (2009)
- [3] 山本詩子, 小林哲生, 鬼頭伸輔, 古賀良彦：電気学会論文誌 C, Vol.130-C, No.5, pp.799-806 (2010)
- [4] A. Ikeda, S. Kito, J. Jung, T. Kobayashi and Y. Koga: J of Inter. Soc. of Life Information Science, Vol.28, No.1, pp.14-22 (2010)

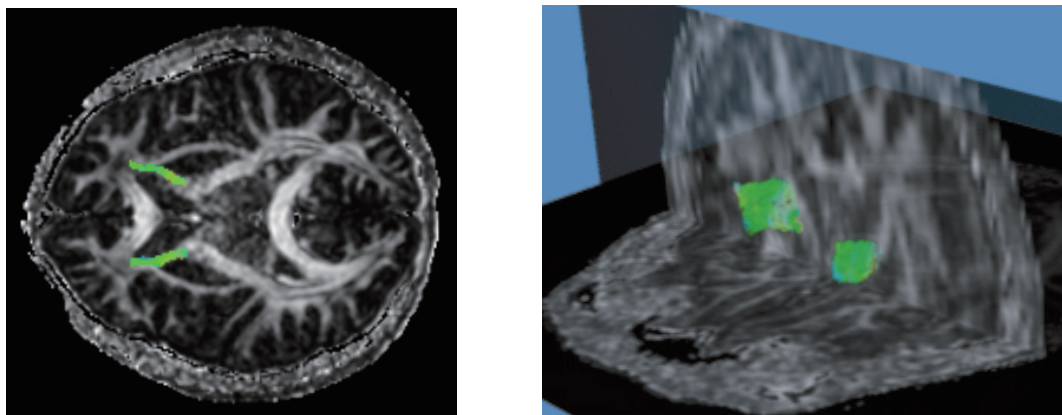


図 1 視床から内包前脚に抜けて前頭葉へ伸びる神経線維追跡結果の例。(左) x-y 断面, (右) 3D 表示

電気システム論講座 電気回路網学分野 (和田研究室)

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

「電力潮流の時間変化を利用した送電線の線路パラメータの決定」

多様化する電力ネットワークの中で、安定な電力供給を維持するためには、送電線のインピーダンスなどの線路パラメータを正確に把握することが、従来にも増して重要となってきた。線路パラメータは、従来鉄塔や送電線の幾何学的配置から Carson-Pollarczek の式などに基づいて計算されてきたが、大地から送電線までの距離、大地の状態、線の配置など、正確な値を与えるのが難しいパラメータを含んでおり、計算された線路パラメータは精度が低いものであった。一方で、比較的正確に線路パラメータを測定する方法として、1線ずつ電圧をかけるなどの特別な系統操作を実施して実測する方法もあるが、多大な労力と線路の停止などが必要となる一方で、必ずしも正確な値が得られないため、現実的な手法とはなっていない。そのような中、GPS システムを用いて常時電圧電流のフェーズ値を測定できる PMU (Phasor Measurement Unit) が開発され、種々の応用が期待されている (図1左)。

本研究は、PMU によって得られる常時測定膨大な測定データを利用することにより、電力潮流の時間変化だけで特別な系統操作なしに正確な線路パラメータを把握しようという試みである。この方法の実現には、膨大なデータからパラメータ決定に必要な潮流状態をみつけだし、膨大なデータを利用した信号処理により S/N 比を上げることが重要となる。これまでに、図1右にあるような三相1回線送電線のパラメータ同定に必要な条件を与え、さらに2回線送電線の場合には鉄塔の対称性を利用してモード分解を行うことにより (図2)、効率的にパラメータ同定する方法を提案している [1]。また、電機メーカーと電力会社の協力により、実際の電力送電線の測定も実施し、提案手法の妥当性について検討中である。

<参考文献>

[1] M. Kato, T. Hisakado, H. Takani, H. Umezaki K. Sekiguchi, "Live Line Measurement of Untransposed Three Phase Transmission Line Parameters for Relay Settings," Proc. IEEE PES General Meeting 2010, No.377 pp.1-8, 2010.

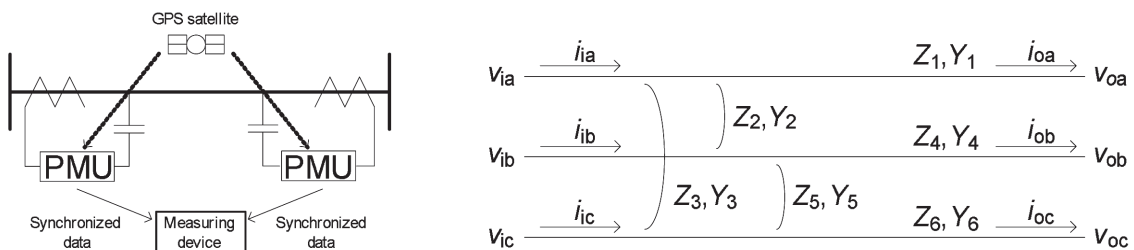


図1: GPS同期したPMUを用いた計測の模式図と、三相1回線送電線の線路パラメータ。

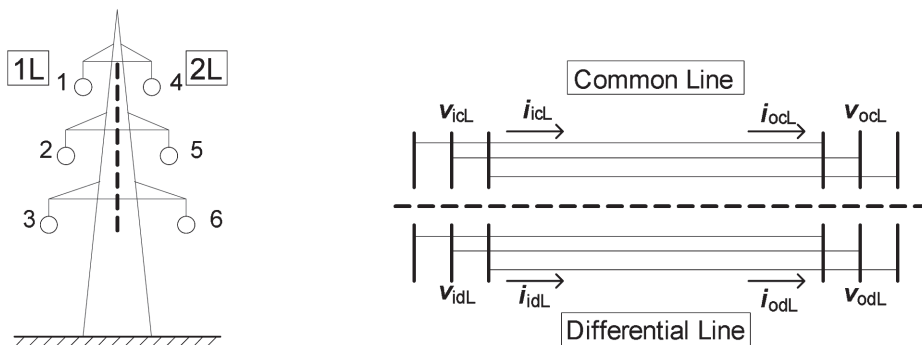


図2: 鉄塔構造の対称性に基づいて同相 (Common) 差動 (Differential) 分解された三相2回線の線路

# 電気システム論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

## ロバスト制御理論の基盤としての線形代数的研究の一端

### —ブロック市松・ブロック対角変換を例として

#### 1. ロバスト制御の意義とその理論的基礎を与えるスケーリング手法

cue の第 23 号において、本研究室で取り組んでいる制御工学に関する理論的研究の一端を紹介した。具体的には、実システムの制御において必ず行われる制御対象の数式モデル化とその際に必然的に生じるモデル化誤差について述べ、その影響を考慮してもなお所望の制御性能が達成されることを保証するフィードバック制御、すなわちロバスト制御の重要性について紹介した。

ロバスト制御の観点では、あらゆる制御系は図 1 のように、何らかの既知のシステム  $G$  と、モデル化誤差に相当する不確かさ  $\Delta$  との閉ループ系とみることができる。  $G$  はいかなる制御器を設計するかによって変化するものであり、  $G$  に所望の性質を持たせることのできる制御器を設計するためのできるだけ強力な理論基盤を与えることが、ロバスト制御理論の役割である。図 1 において、不確かさ  $\Delta$  の持ちうる最大のゲインと  $G$  のゲインの積が 1 未満になるように制御器を設計できれば、制御系は安定となる。このことは、制御対象の (モデル化誤差による) 不正確な情報しかなくても有効な制御系設計が可能となることを意味し、その工学的意義は大きい。これがロバスト制御理論の最大の基礎を与える考え方であるが、そのままではあまり強力な理論基盤に発展せず、工夫が必要である。

ここで、もし、どんな不確かさ  $\Delta$  についても  $\Delta = W^{-1} \Delta W$  が成立するような  $W$  (の集合) が存在したと考えてみよう。このとき、図 1 は、  $G$  を  $WGW^{-1}$  と置き換えても同じ閉ループ系を表すことになる。よって、「  $\Delta$  の持ちうる最大のゲインと  $WGW^{-1}$  のゲインの積が 1 未満になる  $W$  が存在する」ことがより重要であることになる。ここで、  $WGW^{-1}$  は  $G$  のスケーリングと呼ばれ、一般には  $G$  自身とは異なるものになる。  $W$  を恒等作用素に限定せず  $W$  (の集合) の自由度を利用すれば、より強力な理論が構築できる可能性があるということである。

#### 2. ロバスト制御理論新展開の一端紹介—高速リフティング、ブロック市松・ブロック対角変換の周辺

上記のような考え方を通してロバスト制御理論は目覚ましい発展を遂げているが、そのような理論も、現状のままでは限界がある。そのもっとも単純な例が、  $G, \Delta$  がスカラの場合である。その場合には  $WGW^{-1} = G$  となってしまうことから、  $W$  を導入しても何ら新たな効果を生み出せないからである。この問題を解消するばかりでなく、もっと一般的な状況でも大きな効果を発揮する考え方として、当研究室では、非因果的なスケーリングを提唱し、これを利用したロバスト制御理論の枠組みの展開を精力的に進めている。そのさらなる理論基盤の一つに高速リフティングがある。紙面の都合上、相当に雑な説明となるが、高速リフティングを介した非因果的スケーリングとは、上記における  $W$  の作用が、たとえば  $u(t); kT \leq t < (k+1)T$  を  $\tilde{W} \tilde{u}_k$  という関数に写像するようなものである。ここで、  $\tilde{u}_k$  は、区間  $kT \leq t < (k+1)T$  を 3 等分し、それに応じて  $u(t)$  も 3 等分したものを縦に並べたベクトル関数であり、  $\tilde{W}$  は  $3 \times 3$  の行列である。このような  $W$  が  $W^{-1} \Delta W = \Delta$  を満たすためには、一般的な状況で考えれば、行列  $\tilde{W}$  はブロック市松行列と呼ぶ図 2 のような複雑な (零 / 非零) 構造を持つ必要がある。この構造の複雑さが理論の記述や数値計算において何かと厄介を引き起こすが、適切に定義される置換を通してこれは図 3 のようなより単純なブロック対角構造に変換できる。一方で、図 2 から図 4 のような中間的な構造を介してから図 3 に変換することが可能であるなど、この変換が持つ自由度や数学的構造は非因果性を高めるにつれてさらに複雑になる。そういった性質やその利用法の明確化を一端として含む理論的課題に取り組み、非因果的スケーリングに基づくロバスト制御理論の新展開を図っている。

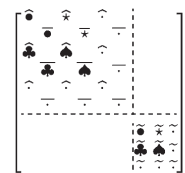
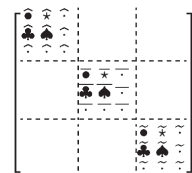
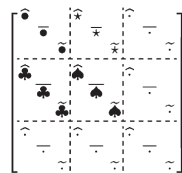
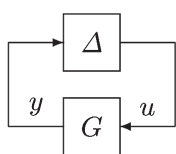


図 1 ロバスト制御の視点

図 2 ブロック市松行列

図 3 ブロック対角行列

図 4 中間的な行列

## 電気システム論講座 電力システム分野

<http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/gse/ee/powersystem>

### 「真空遮断器の高電圧化に関する基礎研究」

当研究室では電力システムの潮流計算や安定度解析手法の開発の他に、システム構成要素の絶縁技術に関する基礎研究も行っています。近年取り組んでいる課題の一つに高電圧真空遮断器の開発があります。これは、地球温暖化問題を背景に、現在の高電圧ガス遮断器の代替として真空遮断器を採用しようとするものです。真空遮断器の高電圧化では我が国が世界に先駆けており、既に定格電圧 80 kV までが電力システム等で使われていますが、将来はより高い電圧階級への適用が検討されています。国内では一点切りで 140 kV 級の遮断器も開発されています。高電圧化の課題として、消弧や冷却方式の観点もありますが、我々は電気絶縁の問題に取り組んでいます。真空中の絶縁では、一般に、金属電極が対面した真空ギャップ放電に比べて、電極を支える固体絶縁支持物の表面に沿った沿面放電の電圧が低いため、我々は特に沿面絶縁を研究対象としています。真空中では絶縁支持物が陰極から放出される電子の衝撃を受けて帯電し、これが引き金になって沿面放電へ進展すると考えられますので、この帯電の機構や帯電分布を把握することが重要になります。電流遮断は真空バルブ内で行われ、このバルブはアルミナセラミックなどを材料とする円筒で、真空容器と電極支持の役割を担っており、内部が真空環境です。

円筒形状であるため、電圧を印加して内面を帯電させると、その電荷からの電束は円筒材料を通して円筒の外部にも届きます。そこで、図1のように、外部（大気圧）にプローブを置くと静電誘導によって帯電の様子がわかります。この測定系ではプローブが上下に可動で、また円筒試料が回転しますので、試料全体のスキャンが可能になっています。図2が測定結果の一例で、試料は長さ 55 mm、外形 55 mm、内径 50 mm のアルミナ製円筒です。図のように、プローブに誘導した電荷は陰極近くで大きく、陽極に向けて小さくなる山型をしています。また、円周方向にも電荷の不均一性が見えます。このように、円筒内面の帯電の様子が次第に明らかになりつつあります<sup>[1]</sup>。真空中の帯電現象は、気体中や液体中の帯電現象には無い特徴として、電荷分布を理論的に評価できますので、シミュレーション結果との対比や、電界緩和用電極による帯電抑制効果についても検討しています。

なお、遮断器に限らず、X線管やマイクロ波管など真空環境を応用する多くの高電圧機器は何らかの形状のバルブを使いますので、本研究の結果はそれらの機器の絶縁にも応用できると期待できます。

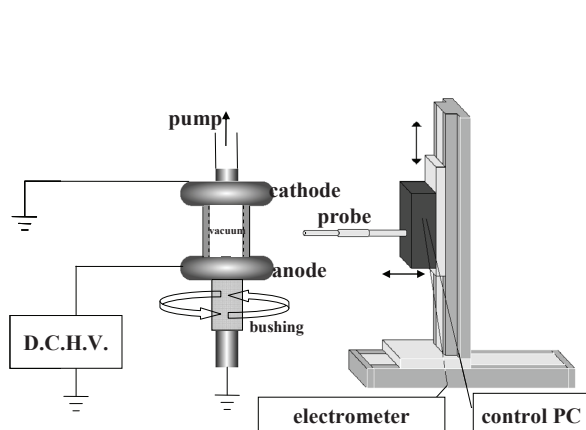


図1 可動型静電プローブと円筒試料

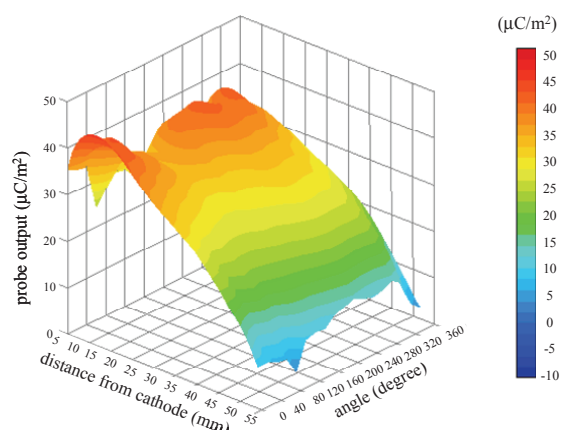


図1 可動型静電プローブと円筒試料

[1] Y. Shimizu, H. Morii, O. Yamamoto; "Study on Surface Charge Distribution of an Insulating Hollow Cylinder in Vacuum", Proc. of 24th ISDEIV. Vol.1, pp 100-103 (2010)



## 電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野 (<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>) 「チェーン状プラズマに沿った局在表面波モードによる可変電磁波導波路の形成」

当研究室の研究テーマである「プラズマ」の電気的な特性を考えてみますと、荷電粒子を含むことで生じる導電性を頭に浮かべることができます。この導電性という性質は、より広い意味では物質のもつ誘電性の中で理解でき、その観点においてプラズマは正から負の値にわたって幅広い比誘電率値を示します。誘電率が負となることで、通常電磁波はプラズマ中を伝搬することができずその表面で反射されますが、この性質を用いて上空の電離層でのラジオ波の反射による長距離伝送が可能となり、地球上で遠く離れた場所への放送等の情報伝送がなされます。

当研究室では、このようなプラズマの性質を身近に利用する可能性を探るため、様々な検討を行ってきました。すなわち、プラズマを微小化し、また大気圧動作させる様々な様式を提案する中で、手のひら上に形状を制御された形でプラズマを手にすることが可能となり、現在その電磁波応答を調べています [1]。なかでも、最近取り組んでいるのは、携帯電話やローカルエリアネットワーク (LAN) と同じ GHz 帯周波数でのチェーン状プラズマを用いた電磁波伝搬の制御です。先ほど述べましたように、プラズマの生成条件を調整することでプラズマの比誘電率を少し負の値 (-1 程度) に設定することができ、また空間寸法として 1 mm 内外のプラズマを整列させて生成することができるようになりました。そこで、折れ曲がりや分岐を含んだチェーン状プラズマ構造を自在に生成し、それに沿った電磁波伝搬を理論及び実験で観測しております。

図 1 に、直線型のチェーン状プラズマ構造に沿った電磁波伝搬の計算結果とその実証実験におけるプラズマ発光パターンを示します。また、図 2 には、十字型分岐構造による電磁波の分波現象の計算結果を示します。いずれにおいても、電磁波はプラズマ内には存在せず、その周囲に巻き付く様な表面波形状で局在化していますが、これは比誘電率を -1 程度と調整することで実現します。そのような局在構造はサイズとしては自由空間波長よりも十分に小さく、それらが連続的につらなることで波長オーダーの伝搬が実現されます。ここで、チェーンに沿って定在波が生じるようなことは概してなく、これはプラズマの周囲に局在するときすでに円周方向に定在していることでも理解できます。この電磁波伝搬のスペクトルを実験において観測してみると、1-10 GHz の広範囲の周波数帯で断続的に検出されました。このように広帯域化しているのは個々のプラズマの周辺にて電子密度の空間勾配が有意に存在しているためと解釈できます。以上のように、この現象はわかりやすいツールとしての有用性と同時に、波動伝搬の物理としても興味深い内容を数多く含んでいます。

本研究内容は、光波領域で盛んに研究されている表面プラズモン現象と共通点が多く、将来的にはマイクロ波から光波領域で連続的に電磁波の導波を制御するスキームの構築につながるものと考えております。その意味では、本研究内容は、“低周波プラズモニクス”と呼ぶこともできるでしょう。また、個々のプラズマのオンオフや強度調整を行うことで様々な導波路パターンの組み合わせが構成でき、さらに時間的な可変性も確保できるので、高周波複素関数の機能の発現やその計測応用も視野に入れて研究を推進しています。

### 参考文献

[1] 酒井道, 橋邦英, 「マイクロプラズマによる電磁波メタマテリアル」, 応用物理, 78 巻, pp. 437-441 (2009).

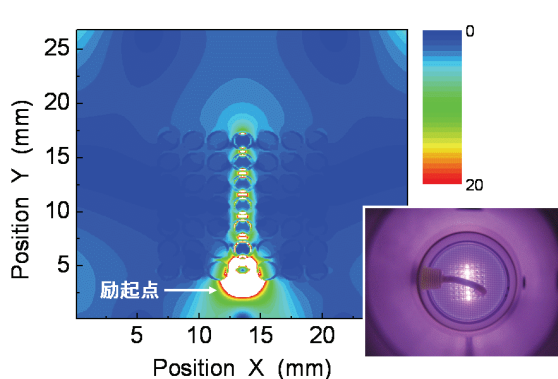


図 1. 直線型のチェーン状プラズマによる周波数 6 GHz の電磁波の導波現象。挿入図は、この計算結果を実証した実験でのプラズマ点灯の様子。

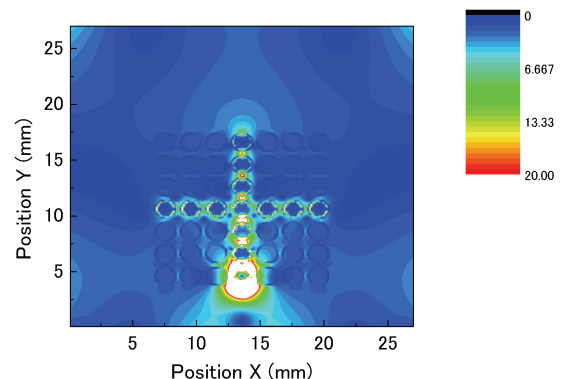


図 2. 十字型チェーン状プラズマによる分波現象の数値計算結果。

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

ビーム出射方向を自在に制御可能な半導体レーザー

フォトニック結晶は、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもつ新しい光学材料であり、固体結晶中の周期的なクーロンポテンシャル分布によって電子の分散曲線にバンド構造が生じると同様に、光子の分散曲線にバンド構造が生じることを特徴とする。本研究室ではこのフォトニック結晶の特異なバンド構造を用いて、これまでにない光の制御を実現することを目標に様々な研究を行っている。その中から以下では最近開発に成功したビーム出射方向を自在に制御可能な半導体レーザーについて紹介する。

半導体レーザーを利用する上で、レーザービームの方向を変化させる機能は様々な応用において重要である。しかし、現状の半導体レーザーでは出射ビーム方向は固定されているため、外部に設置した反射鏡の向きを機械的に制御することによりビームの方向を変化させている。そのため、(i)小型化が困難である、(ii)耐久性が悪い、(iii)動作スピードが遅い、などの課題が存在する。

これに対して、本研究室ではフォトニック結晶を用いることで、半導体レーザーそのもので、ビーム出射方向を自在に制御することに成功した。具体的には、2種類の少しずつ周期の異なるフォトニック結晶を組み合わせることにより、様々な角度にビームが出射可能な共振（発振）状態が形成できることを見出し、かつ、この共振器を実際にレーザー共振器として用いることにより、様々な角度にビームが出射可能となることを初めて示した。この成果は、外部光学系なしに、レーザー単体でビーム方向を高速に、自在に操作することのできる全く新しいレーザーの誕生を意味するものであり、半導体レーザーの新たな方向性を示す極めて重要な成果である。レーザーディスプレイ、超小型レーザー探知システム、チップ間光インターコネクションなど、次世代型光システムの新たなレーザー光源として、極めて有望な技術と言え、

2010年5月2日（英国時間）に英国科学雑誌「Nature Photonics（ネイチャー・フォトニクス）」のオンライン速報版で公開された。

参考文献

[1] Y. Kurosaka, S. Iwahashi, Y. Liang, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda: "On-chip beam-steering photonic-crystal lasers", Nature Photonics, vol. 4, pp. 447-450 (2010).

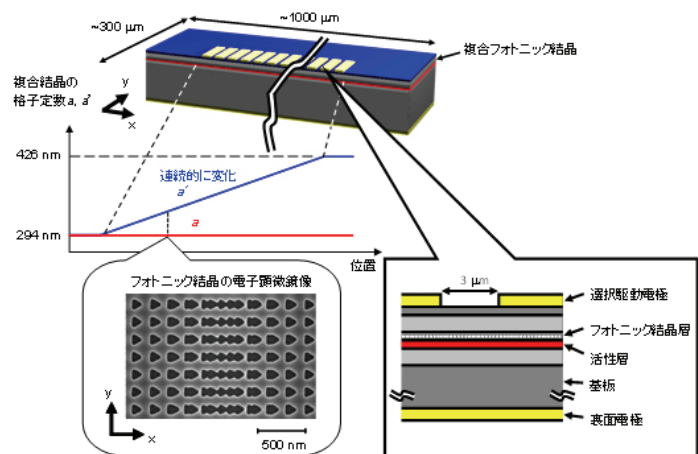


図 1. ビーム偏光レーザーの構造

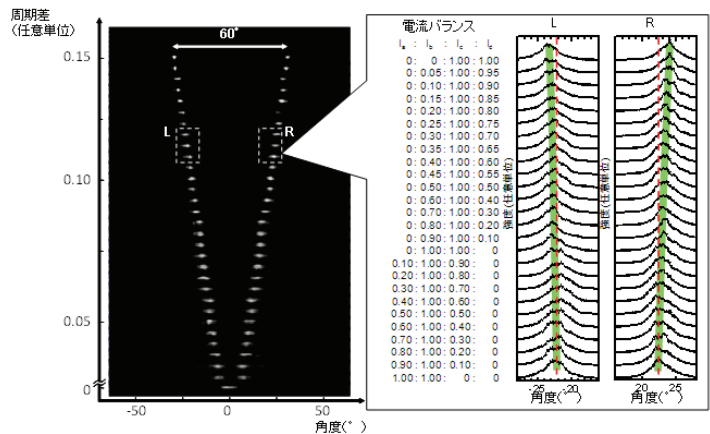


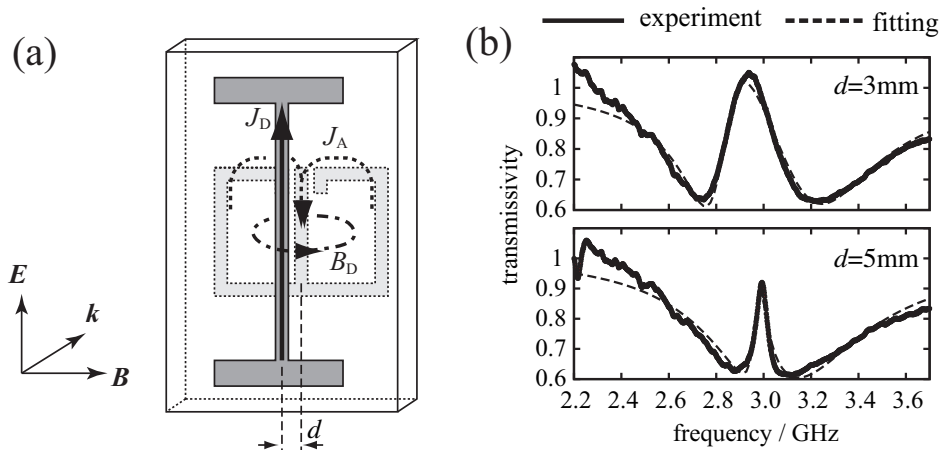
図 2. ビーム偏光動作の実験結果

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研究室)

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab15>

## 「二重リング共振器を用いた電磁誘起透明化現象の実現」

電磁誘起透明化現象 (EIT) とは、3準位原子系に対してコントロール光を入射することで、プローブ光の吸収が消失する現象のことを指す [1]。この吸収の消失は非常に狭い周波数領域で起こるために、屈折率もその領域で大きく変化し、その結果、光の群速度が非常に小さくなる。この研究は現在、光を止める技術へと広がっている。EIT 現象は、量子特有の現象ではなく、Q 値の異なる共振器間の結合でも同様の現象が起こることが示されている [2]。これ利用したメタ物質における EIT 現象についての研究も盛んに行われている [3]。メタ物質を用いることで、対象となる電磁波の周波数を含めた様々なパラメータを自由に設計することができる。本研究では、Q 値の低い共振として電気ダイポール共振を、Q 値の高い共振として2重リング共振器の反対称共振を用いた。図 (a) にその構造と電磁場の伝搬方向および電場  $E$ 、磁場  $B$  の向きを示した。表面の I 型の構造が電気ダイポールアンテナとしてはたらく、裏面の  $\omega$  型の構造が二重リング共振器としてはたらく。電磁波の電場成分によって、電気ダイポールアンテナに電流  $J_D$  が誘起される。この電流はアンテナの周りに磁場  $B_D$  を作り出す。このとき、2重リング構造に逆向きに磁場が貫くので、左右のリングには逆向きの電流  $J_A$  が誘起される。電気ダイポールに誘起される電気双極子モーメントの放射損失に対して、反対称ループ電流の放射損失は小さいために、両者の共振周波数を一致させることで EIT 現象が起こる。透明化領域の幅は、両共振器間の結合が小さくなるほど狭くなる。つまり、両共振器の中心軸の距離  $d$  を大きくするほど狭い透明化窓が現れることが予想される。実験的検証のために低誘電率 PPE プリント基板 (Risho CS-3376C) 上に両構造を作成し、実験を行った。両共振器の中心軸の距離が  $d = 3\text{mm}$ ,  $5\text{mm}$  の2種類のメタ物質1層に対して透過率を測定した結果を図 (b) に実線で示した。いずれの場合も、EIT 現象特有の狭帯域透過現象が  $3.0\text{GHz}$  付近で観測されている。透明化領域の帯域は  $d$  が大きいほど狭く、理論通りの結果を得ている。点線は、理論式によるフィッティング曲線であり、これも実験で得た値とよい一致を示している。このようなメタ物質を利用することで、電磁波の群速度を制御することができる。この特性により、電磁波の遅延量の制御、電磁波の非線形現象の増大、電磁波の変調などへの応用が期待される。



[1] S. Harris: Phys. Today **50**, 36 (1997).

[2] C. L. Garrido Alzar *et al.*: Am. J. Phys. **70**, 37 (2002).

[3] V. Fedotov *et al.*: PRL **99**, 147401 (2007). S. Zhang *et al.*: PRL **101**, 047401 (2008). N. Papasimakis *et al.*: PRL **101**, 253903 (2008). P. Tassin *et al.*: PRL **102**, 053901 (2009). T. Koschny *et al.*: PRL **93**, 107402 (2004). Y. Tamayama *et al.*: PRB **82**, 165130 (2010).

## 知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

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

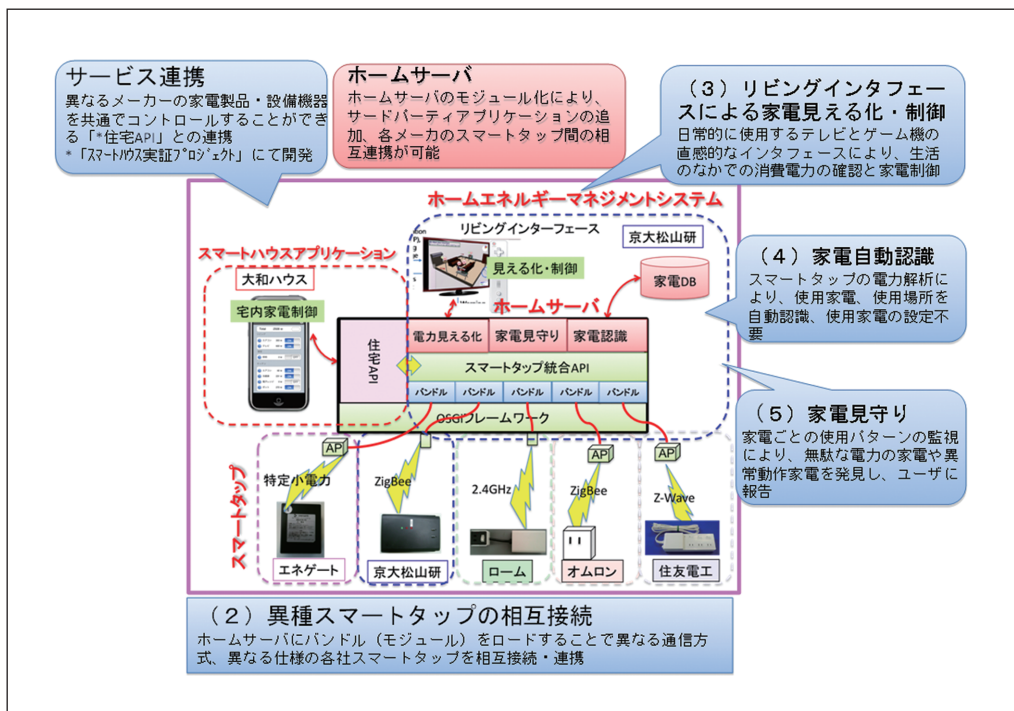
### 「スマートマンションルーム」

本研究室では、数年前から「エネルギーの情報化」（本誌 No.23, pp.3-8, 2010）という新たなエネルギーマネジメントの考え方を提唱し、それを実現するための研究開発を進めています。

「エネルギーの情報化」を実現するための第一段階は、家庭・オフィス内のすべての電気機器に、高精度電力計測・信号処理・通信機能を備えた「スマートタップ」を付け、エネルギー消費のリアルタイム計測・表示、人間・電気機器の安全安心見守り、省エネコンサルティングなどを行う「エネルギー消費の見える化」システムの開発です。

本年度前半には、同システムの実証実験として、京都市内の 1LDK（33 平米）のマンションルーム内の全ての電気機器（約 50 台）に、京都大学松山研究室、株式会社エネゲート、オムロン株式会社、住友電気工業株式会社、ローム株式会社、NICT 委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」プロジェクトがそれぞれ開発したスマートタップを付け、6 月より実際の生活を行いデータ収集、分析を行い、9 月には以下の機能を備えたシステムの公開デモを行いました。

1. スマートタップを使った、家電の詳細な電流・電圧波形計測や消費電力のリアルタイム計測と表示
2. 異なったメーカーが開発したスマートタップを統合するホームサーバシステム
3. 消費電力の見える化による省エネ支援システム：リビングのテレビとゲーム機を使って、日々の暮らしの中で各家電の電力消費の状態を調べたり、無駄な電気の削減を気軽に行えるシステム
4. スマートタップによる家電の自動認識：スマートタップで計測された電流波形を解析することにより、家電をコンセントに差すだけで、家電の種類を自動認識するソフトウェア
5. 家電の安全見守り・異常発見：家電の詳細な電流波形特性をリアルタイムに解析・監視することによって、機器の異常・不具合を自動検出・通報し、火災などの事故の予防に努めるソフトウェア



## 通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

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

### 「光ファイバ遅延線バッファ構成法の研究」

光ファイバ（FTTH）の普及とともに、ネットワークを流れる情報量は飛躍的な成長を続けています。大量の情報を伝送するために、基幹網では光ファイバによる波長多重伝送技術が使われています。一方、ネットワークの内部で情報の交通整理を行うルータは、電子回路で構成されているため、処理能力が制約されています。そこで、光信号のままパケット情報をルーティングする光パケットルータの研究を行っています。

ルータでは、ひとつの出口に同時に複数のパケットが出力しようとするするとパケット衝突が起こるため、バッファで順番待ちをする必要があります。光ルータでは、ファイバ遅延線バッファを使用します。さまざまな長さの光ファイバ遅延線を用意し、ほかのパケットと衝突しないような長さの遅延線を選び、パケットを入力します（図1）。一方現在のルータは電子回路で構成されており、パケットの衝突回避にメモリを用いています。メモリを用いたバッファは、①任意の時刻にパケットを読み出して送信することができ、②メモリ容量が大きいため大量のパケットを蓄積できるのに対し、遅延線バッファは、離散的な値の遅延しか与えられず、かつ容量も小さいという短所があります。遅延時間が離散的であると、送信される2つのパケットの間に無駄な時間（パケット間ギャップ）が発生し、ネットワークの利用効率が劣化します。性能を向上するために、可変遅延線を固定遅延線と組み合わせる方法を考えました。パケット間ギャップを短くするための遅延時間の制御方法などを検討し、最大で42%の性能向上を達成しました（図2）。また、パケット長により品質が異なる問題の分析と対応方法も検討しています。

#### 文献

- [1] 岩井他 “可変遅延線を用いたファイバ遅延線バッファの構成法”, 信学論, Vol.J93-B No.6, pp.813-821, Jul. 2010
- [2] 岩井他 “可変長パケットにおける可変遅延線を用いたファイバ遅延線バッファの構成法”, 信学論, Vol.J94-B No.1, pp.14-23, Jan. 2011

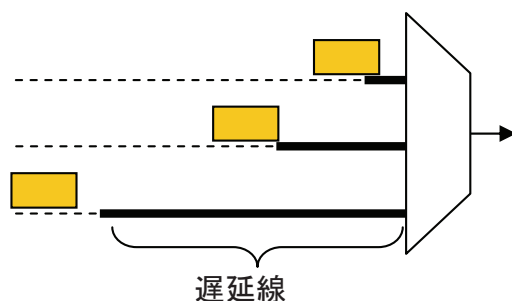


図1 遅延線バッファ

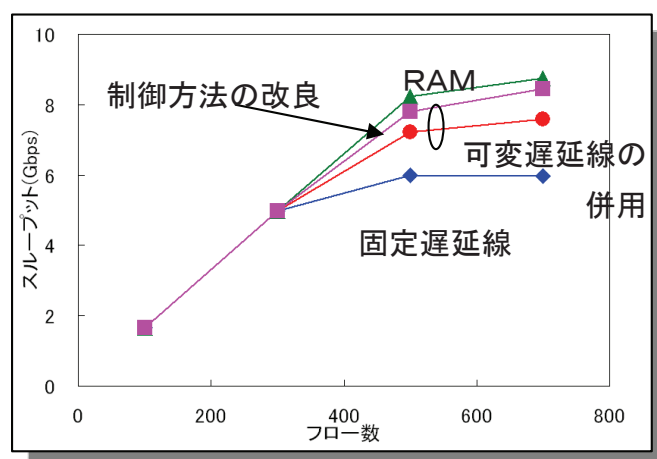


図2 遅延線バッファのスループット

集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤高研究室)

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

「逐次重点的サンプリングを用いた SRAM 歩留まり解析手法」

半導体プロセスの微細化に伴い素子特性のばらつきが回路歩留まり低下の原因として支配的になっている。素子の微細化と高集積化をさらにすすめる、これまで以上に有益な応用を生み出すには、要素回路である SRAM 回路の最適設計が特に重要である。これまで行われてきたワーストケース解析では必要以上に悲観的な見積りとなるため、モンテカルロ (MC) 法に代表される統計的解析手法が適用され始めている。MC 法では、ばらつき情報に基づいて各素子の各パラメータを乱数により決定し、SPICE シミュレーションにより不良品の判定を行う。十分なサンプル数を用いれば、正確な歩留まり解析が可能となる。しかし、SRAM メモリセルの不良は稀にしか発現しないため、正しい歩留まりを得るには膨大な計算時間を要する。たとえば 32Mbit SRAM を歩留まり 90% で製造する場合、各セルに要求される不良率は  $3 \times 10^{-9}$  以下となる。この場合、信頼区間 90%、精度 90% の時、 $3.3 \times 10^{10}$  のサンプル数が必要となる。既存の MC 法高速化手法として、図 1 (a) のように不良品となるパラメータ空間 (不良領域) 付近に重点的にサンプルを発生させる、重点的サンプリング (IS) 法がある [1]。しかし、ばらつきを考慮すべきパラメータが増加して探索空間が広くなると、代替分布の適切な選択が難しく、精度の悪化や解析時間の増大を招く等の課題があった。

以上のような背景のもと、本研究室では、逐次重点的サンプリングによる歩留まり解析の高速化手法を提案している [2]。この手法では、不良の起こりやすさに応じた粒子 (サンプル) 配置を乱択プロセスにより逐次的・適応的に得るため、図 1 (b) のようにメモリセルの不良領域の分布に従うサンプルを用いて IS を行うことができる。不良領域のみを辿って回路歩留まりへの寄与が大きい領域を見つけ、その歩留まりへの寄与に応じたサンプルを発生できることから、低不良率ならびに高次元の場合にも効率の良い解析が可能となる。

図 2 のような 6 トランジスタ SRAM の不良率解析に提案手法を適用した。全てのトランジスタの閾値電圧をばらつきパラメータとする場合 (6 変数) について、本手法と手法 [1] の比較結果を図 3 に示す。横軸は SPICE の実行回数、縦軸は不良率であり、少ない回数、すなわち図の左の方で収束を得るほど、早く歩留まりが計算できることを意味する。手法 [1] については、IS に用いる代替分布算出に用いるサンプル数として  $10^4$  と  $10^5$  の 2 通りとしている。

提案手法では  $10^4$  回の SPICE 実行で  $3 \times 10^{-9}$  という正確な不良率が得られた。この結果は、一般的な MC 法に対し  $3.3 \times 10^6$  倍の高速化に相当する。また、手法 [1] に対しても 50 倍以上高速である。さらに、手法 [1] では低不良率や高次元の場合に探索すべき空間が指数関数的に大きくなるため対応できなくなるのに対し、提案手法では、閾値電圧に加えてゲート長、酸化膜厚、キャリア移動度もばらつきパラメータとする 24 変数の場合でも正しく歩留まりが求められる。今後の課題としては、提案手法における粒子の初期配置決定手法の検討や SRAM 以外への応用が考えられる。

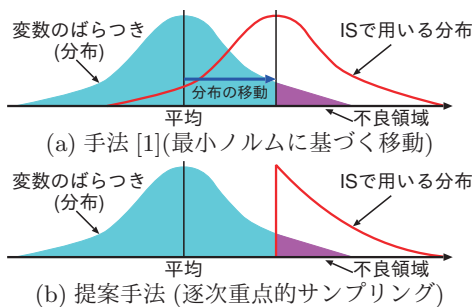


図 1: 重点的サンプリング

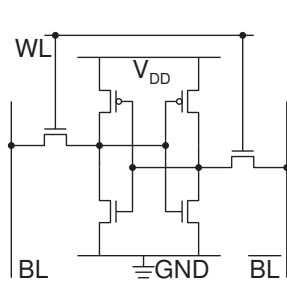


図 2: SRAM メモリセル

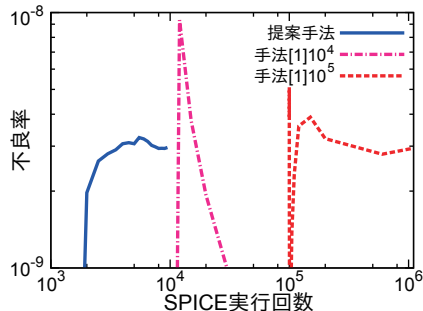


図 3: 提案手法と手法 [1] の比較

参考文献

[1] L. Dolecek, M. Qazi, D. Shah, and A. Chandrakasan, "Breaking the simulation barrier: SRAM evaluation through norm minimization," in *Proc. ICCAD*, Nov. 2008, pp. 322-329.  
 [2] K. Katayama, S. Hagiwara, H. Tsutsui, H. Ochi, and T. Sato, "Sequential importance sampling for low-probability and high-dimensional SRAM yield analysis," in *Proc. ICCAD*, Nov. 2010, pp. 703-708.

## 集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (佐藤亨研究室)

<http://pub-asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 「南極大気レーダー信号処理に関する研究」

昭和基地において建設が始まっている南極昭和基地大気観測計画 (PANSY) レーダーは、わが国の南極観測史上最大のプロジェクトであると同時に、日本が建設するレーダーとしても最大規模のものとなります。中心周波数 47MHz、ピーク送信出力 500kW のパルスドップラーレーダーで、1045 本の八木アンテナにより構成される直径 160m のアクティブフェーズドアレイアンテナを備えます。高度 1.5km ~ 600km の大気屈折率の擾乱からの散乱エコーを受信して大気の運動を連続的にモニターし、オゾンホールを始めとする気象現象や気候変動などの解明に貢献することが期待されています [1]。当研究室は、このレーダーのアンテナ開発やシステム設計を主に担当してきました。

この種のレーダーは極めて微弱な散乱信号を受信するため、周囲の山などによる不要反射波(クラッタ)が大きな障害となります。特に南極では、オーロラに起因する強い沿磁力線擾乱 (FAI) エコーと、電離圏自由電子によるインコヒーレント散乱が混在し、その分離が重要な技術課題の一つです。

当研究室ではこれまでアダプティブアンテナ技術を用いた大気レーダーの不要信号除去の研究を進めてきました。MU レーダーのクラッタ除去の他、赤道大気レーダーのマルチスタティック受信実験において、アンテナ利得が低く信号対クラッタ比の不利な受信専用アレイの信号処理で有効性を実証しています [2]。PANSY レーダーにおける FAI エコーは、時間変動が激しく適応的除去が特に困難と予想されます。適応的処理に加えて目標追尾技術を統合することにより問題の解決を目指しています。

## 参考文献

- [1] 日経サイエンス 2011 年 1 月号, Vol.41, No.1, pp. 34-43, 2011.  
 [2] K. Nishimura, T. Harada, and T. Sato, J. Meteor. Soc. Japan., Vol.88, No.3, pp. 409-424, 2010.

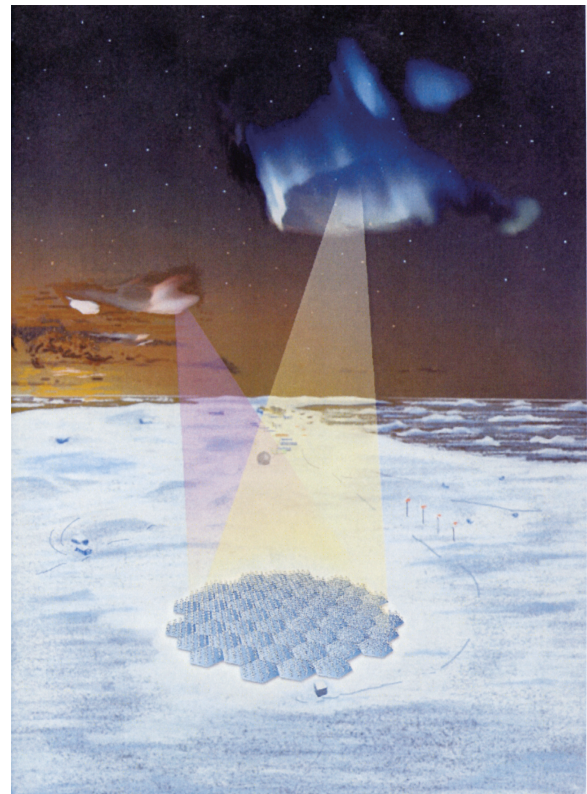


図 1. PANSY レーダーの完成予想図

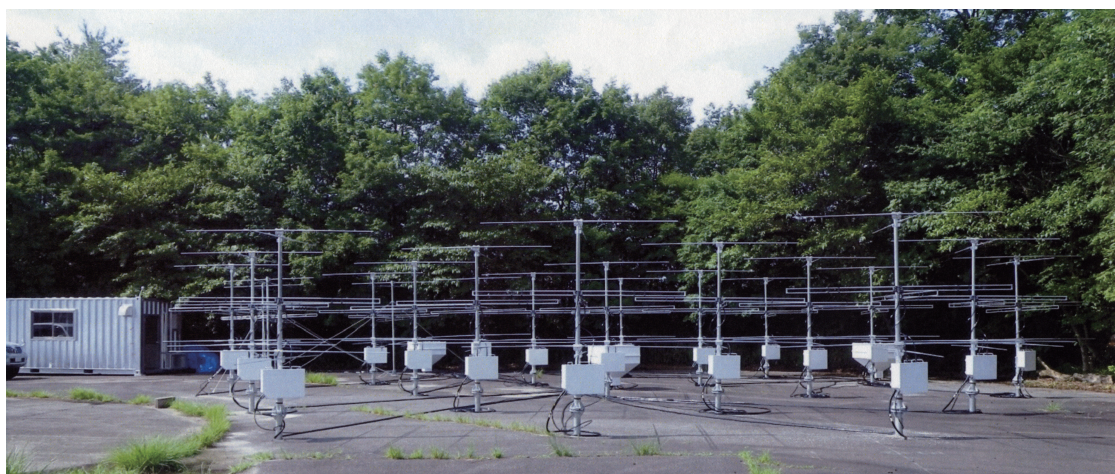


図 2. 信楽 MU 観測所内に設置された PANSY レーダーのトレーニングシステム

システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

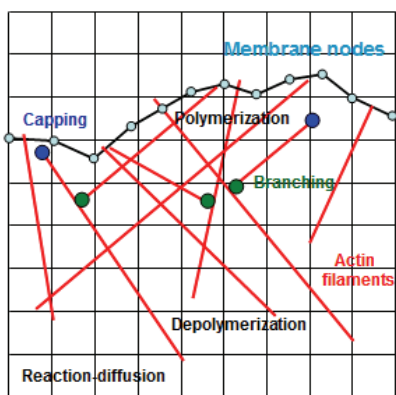
<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home>

「大規模計算機による神経細胞の形態変化シミュレーション」

細胞は、外部環境との相互作用の中で移動や形態変化を行い、その生物学的機能を発現している。線維芽細胞の移動は創傷治癒の原理であり、癌細胞の移動・浸潤は癌転移の基本機構である。また、神経細胞の軸索伸長は神経回路網構築のために必須である。したがって、細胞移動や形態形成のメカニズムを理解することは、医学的にも生物学的にも重要である。こうした現象は、細胞外からのシグナルに依存した細胞内シグナル伝達系、アクチンフィラメントや微小管などの細胞骨格系、細胞骨格と細胞膜との相互作用、様々な分子の能動輸送など、多くの細胞内素過程からなる。当研究室では、神経細胞の形態変化に伴う「情報処理」機能の解明を目的として、それら素過程の複合過程をボトムアップからモデル化するとともに、大規模計算機上でシミュレーションするためのソフトウェアを開発している。神戸にて稼働準備中の次世代スーパーコンピュータ「京」での実時間シミュレーションを想定しており、そのためのアルゴリズム・計算手法の開発も同時に行っている。

現在、細胞骨格系の中でも特に重要なアクチンフィラメントのモデル化に注力しており、先行研究による葉状仮足の数理モデルを拡張し、実装している。このシミュレータは、①分子の反応拡散：空間コンパートメント化による各種分子の反応拡散システム、②細胞骨格のダイナミクス：アクチンフィラメント確率反応（重合、脱重合、キャッピング、分枝）、③膜の動力学：エネルギー緩和（アクチンフィラメントによる局所細胞形状変化をエネルギー関数として定式化している）による細胞膜形状変化、からなるマルチフィジックスシステムである（図1）。

実際の細胞におけるアクチンフィラメントの数に対して  $1/10^4$  程度のスケールを持つモデル細胞の形態変化シミュレーションを可能としている。図2に、誘引性物質により右方へと移動する細胞シミュレーションの様子を示す。細胞前方に自身のサイズより狭いスリットがある場合、形態を大きく変えて潜り抜ける浸潤現象が良く再現できているのが分かる。今後、さらに他の細胞骨格制御機構のモデルを導入し、神経細胞における軸索誘導のモデル化を通して、神経回路網形成機序の解明へと進めていく。また、次世代スパコン上での実時間シミュレーションにより、神経回路網が徐々に構築される過程を可視化することで、発達期の神経回路がいかに「情報処理」の基盤を構築するのかを明らかにしていきたい。



各計算ステップ

- 拡散 および 反応  
重合-脱重合、キャッピング、分枝を含む
- ↓
- 重合-脱重合、キャッピング、分枝による  
アクチン繊維の更新
- ↓
- 細胞膜ノード  
アクチンフィラメント弾性、表面張力、体積弾性、表面積弾性に関するエネルギーの最小化

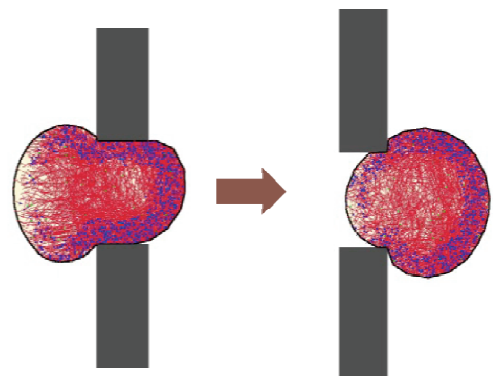


図1. アルゴリズムの概要

図2. 浸潤性細胞走性のシミュレーション。赤線はアクチンフィラメント、青点はフィラメントの分岐点を表す。



## エネルギー材料学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

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

### 「ビット直列ワード並列方式機能メモリのロジック応用」

ビット直列ワード並列方式強誘電体機能メモリのロジック応用の一環として、検索ソートなど情報処理への応用に着目し、その効果について検討しています。本方式を用いることにより電子計算機の高性能化を目指していますが、機能メモリでの新しいアルゴリズムを用いたソーティングでは大小比較の演算回数は  $O(n)$  に減少することが理論的に明らかにされたので、それがどの程度性能向上に貢献するか精度を上げて調べるため、消費電力、遅延などにつき回路シミュレータ（SPICE）を使って計算しています。ここではそれらに関連する研究の概略を述べます。

従来のもものと比較するためバブルソートで  $n$  個の数値データを大小の順に並べ替える時の消費電力および処理時間を基準に取ります。 $n$  個の数値データが  $n$  行  $m$  列の主メモリに格納されているとして  $n=2^m$  の関係があるとします。バブルソートでは隣り合う 2 つのデータを  $m$  桁の CMOS スタチック論理回路で構成する全加算器を使って大小比較をします。ビット列 1 桁での消費電力、遅延時間を各々  $P$ 、 $\tau$  とすれば一回の大小比較での消費電力は  $mP$ 、一方、遅延時間は並列動作を仮定してほぼ  $\tau$  としても良いので一回のソーティングに要する消費電力の総量、遅延の総時間はそれぞれ  $mn^2P$ 、 $n^2\tau$  となります。これらを基準にして機能メモリを使った場合の性能向上指数を見積もります。

機能メモリに基づいた新アルゴリズムでは全ワードに亘って 1 ビット列のデータを比較するので 2 入力 CMOS 論理回路を全ワード行に一つずつ配置する局所 ALU を使って大小比較が出来ます。その局所 ALU での消費電力と遅延時間をそれぞれ  $P^*$ 、 $\tau^*$  とすれば機能メモリでの 1 回のソーティングに必要な消費電力と処理時間は最良ケースの場合  $nmP^*$ 、 $n\tau^*$  となります。これから改善の傾向が直ちに理解できます。

ただし、機能メモリの場合並列度が高いのでピーク電力を考慮すると、これは過大評価となります。すなわち、バブルソートではピーク電力は隣接する 2 ワードについて大小比較を並列に行うときに発生するのでその時の消費電力  $mP$  となりますが、機能メモリでは全ワードのデータ比較になるので  $nP^*$  と増加します。この点を公正に評価するため機能メモリの局所 ALU に ADL 回路を用いてピーク電力が等しくなるように調整することにします。ADL 回路のランプ波電源の立ち上がり時間を  $T$  とすれば機能メモリでの  $n$  行 1 列での消費電力がピーク電力に相当しますので、それは  $nP^* \times (\tau^*/T)$  になります。この時間  $T$  は任意に設定できるのでピーク電力が等しくなるようにすると  $T = (n/m) \times \tau^*$  が得られます。従って、ADL + 機能メモリでのソーティングに要する消費電力は  $nmP^* \times (\tau^*/T) = m^2P^*$  となり、処理時間は  $nT = (n^2/m) \times \tau^*$  となります。全加算器の消費電力、遅延を 2 入力の論理回路のそれらと比較すれば大きいと予想されますが、概算ではほぼ等しいとして  $P \approx P^*$ 、 $\tau \approx \tau^*$  と置けるので消費電力における改善比はやや小さくなって、 $m/n^2$  に減少し、一方、処理時間はやはり改善比はやや小さくなりますが  $1/m$  に減少することが分かります。電力遅延積で比較すると  $1/n^2$  に減少します。

また機能メモリでの局所 ALU 部分選択が不可であれば最悪ケースの場合として見積もることが出来ます。それによると処理時間は変わりませんが、消費電力は  $n^2P^* \times (\tau^*/T) = nmP^*$  に増加するという試算が得られます。従って、改善指数は  $1/n$  と最良ケースに比べれば劣化する傾向になりますが、やはり消費電力改善の効果は大きいといえます。

最良ケースは機能メモリの局所 ALU 部分選択動作を必要とするので、選択回路や制御信号を別途必要とします。従って、具体化するのにやや困難をとまいます、一方最悪ケースはそういった困難さはないため、具体化するのには容易であるが効率の点でやや不満が残るということで、目下これらの問題点を一気に解決する方策について研究を進めているところです。

## エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

## 核融合プラズマにおける電子サイクロトロン電流駆動に関する研究

究極のエネルギー源として期待されている磁場閉じ込め核融合炉において、GHz 周波数帯の波を利用した波動加熱はプラズマの生成・加熱に幅広く利用されています。安定した高温プラズマの生成・加熱・電流駆動を行うに当たり、加熱機構の理解と加熱手法の開発は重要な課題として位置付けられています。電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システムはプラズマの生成・加熱・電流駆動を行うことが可能で、世界の多くの核融合実験装置において、局所電子加熱、熱輸送解析、新古典ティアリングモードなどのMHD不安定性の抑制、オーミックを用いないプラズマ生成等の研究が進められています。その中で、プラズマ中を流れるトロイダル電流の制御は高性能プラズマの実現や定常プラズマ維持に向けての重要な課題の一つです。ヘリカル系では閉じ込め磁場は外部コイルによって形成できることから、オーミック電流のような誘導電流をプラズマ平衡のために必要としません。しかしながら、トカマクと同様に有限のプラズマ圧力がブートストラップ電流を駆動し回転変換分布を変え、プラズマの平衡・安定性が変わることが近年わかってきました。

電子サイクロトロン電流駆動 (Electron Cyclotron Current Drive, ECCD) はブートストラップ電流を抑制し回転変換分布に危険な有理由を生じさせない手法として提案され、現在、ヘリオトロンJにおいて、電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システム (70 GHz, 0.4 MW, 0.2 sec) を用いて実験的な検証を行っています。2009年には集束ミラーと可動平板ミラーから成る入射システムを導入し、入射角を広い範囲でスキャンできるようにシステムを改良しました (図1参照)。入射ビームの形状を調べるために低パワー (mW) ガンダイオード発振器を用いて測定を行ったところ、図2に示されるような円形ガウスビーム形状が得られ、プラズマ中心にパワーが局在できることを確認しました。この入射ビームを用いたECCD実験を行ったところ、平行屈折率に対する依存性があること、また、磁場配位によって流れやすさが変わることが明らかになりました。ドイツのマックスプランク研究所との国際共同研究によって開発したレイトレーシング電流駆動計算結果と比較したところ、磁場配位依存性を再現するとともに磁場や平行屈折率に対する依存性が定量的に一致することがわかりました。これは、電流駆動が捕捉粒子の影響を強く受けていることを示唆しており、今後、非誘導電流を用いた回転変換分布制御によるプラズマの平衡・閉じ込めに指針を与えることになるものと期待しています。

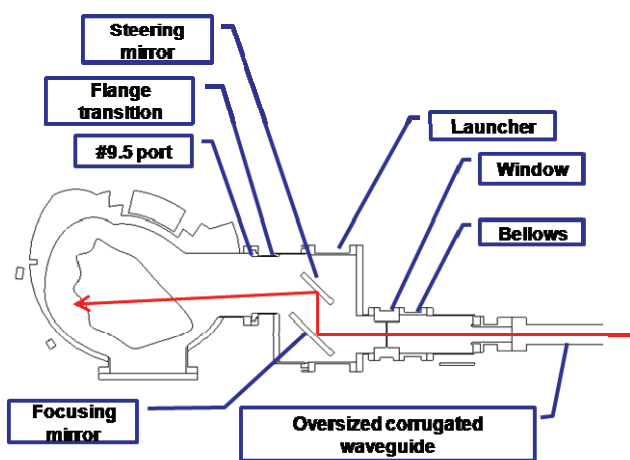


図1 70GHz 電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動入射システム概要図

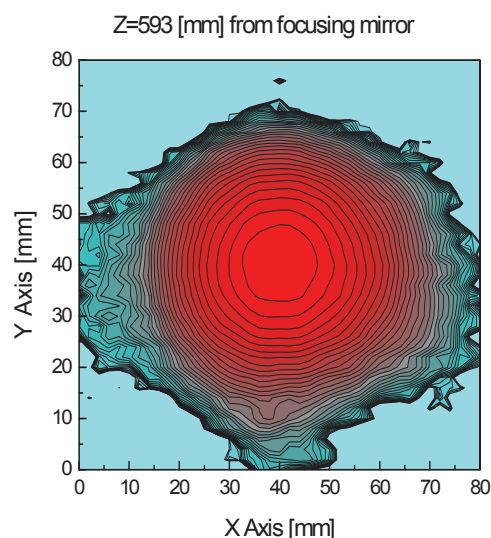


図2 低パワーテストで測定された入射ビーム分布

## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

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

## 核融合プラズマにおける新しい磁場配位の開拓 ～高エネルギーイオンの閉じ込めを調べる～

私たちの研究分野では磁場閉じ込めによる核融合の基礎研究を進めており、京都大学で独自に創案されたヘリオトロン磁場配位は、ヘリオトロンEに代表される歴代のヘリオトロン装置により、高温プラズマ閉じ込め概念としての優位性が実証されてきました。これらの成果を発展させ、更なるプラズマ閉じ込め磁場配位の最適化を目指して、ヘリカル軸ヘリオトロン配位を持つプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」において、新たな磁場配位パラメータ領域を開拓し、磁場閉じ込めプラズマの理解に資するため精力的に実験研究を進めています。今回はプラズマ中の高エネルギーイオンの閉じ込めが良くなると現れる異常輸送の現象について述べ、解決のための課題を紹介します。

核融合反応では、反応前後の質量欠損分に相当するエネルギーが、生成した元素の運動エネルギーとなります。例えば重水素・三重水素（DT）の核融合反応では、ヘリウムイオン（ $\alpha$ 粒子）および中性子が生成され、それぞれ3.5MeV、14.1MeVと、高い運動エネルギーを持っています。DT核融合炉においては $\alpha$ 粒子は磁力で閉じ込められるので、背景プラズマとのクーロン衝突でプラズマを加熱することができます。しかし、 $\alpha$ 粒子の閉じ込めが不十分であると背景プラズマの加熱が不足し、外部加熱なしに核融合反応を維持できる自己点火の条件を満たすことができません。

高エネルギーイオンの閉じ込めを良くするためには、第一に磁場の構造を改善することが必要です。ヘリオトロンJではトーラス方向に長周期の磁場強度のリップルを積極的に導入し、その周期の中に局所的に磁場強度の空間的な変動を抑えた領域を設けることで（準等磁場配位）、粒子閉じ込めの改善を目指しています。一方で閉じ込めが良くなると、高エネルギーイオンは電磁流体不安定性を励起し、その不安定性によって自分自身（高エネルギーイオン）の閉じ込めを劣化させる場合もあります（図1、2参照）。この現象はアルヴェン固有モードと呼ばれる電磁流体不安定性の一種と考えられており、高エネルギーイオンを損失させる異常輸送として、自己点火を阻害する要因の一つとみなされています。（アルヴェン固有モードは、電磁流体力学の基礎を築いた功績によりノーベル物理学賞を受賞したハンス・アルヴェンが発見しました。）この現象を明らかにし、次世代の核融合炉に外挿するためには、実験的に「アルヴェン固有モードの空間構造」、「高エネルギーイオン密度の時間・空間変化」、「損失した高エネルギーイオンの速度・空間分布」を“高精度”で計測する必要があります。これらの現象は互いにリンクしているため、特に“同時”に計測し、プラズマ中でどんなことが起こっているのかを理解することが重要です。現在、ヘリオトロンJでは新しい計測手法の適用、計測装置の開発を精力的に進めています。

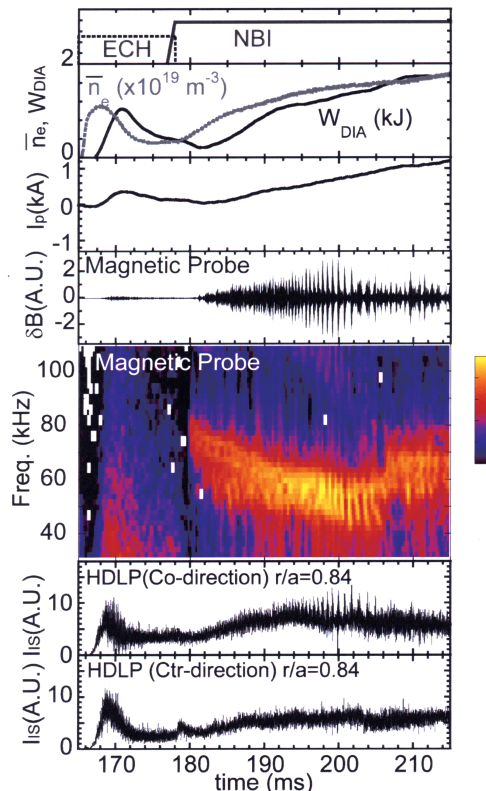


図1 高エネルギーイオンの異常輸送現象の一例。磁場揺動のバースト（ $\delta B$ ）と同期して、高エネルギーイオン束（ $I_s$ ）の輸送が観測されています。

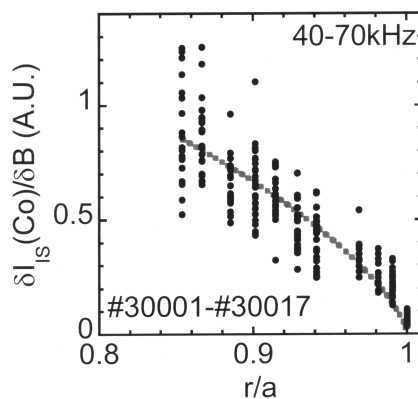


図2 磁場揺動のバースト強度に対する高エネルギーイオン束比（ $\delta I_s / \delta B$ ）の径方向分布。プラズマを閉じ込める領域の外側（ $r/a > 1$ ）ではイオン束がほとんど観測されず、このモードは局所的なイオン束の変位しか引き起こしていないことを示しています。

## 診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

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

### 「衛星ビーコン観測による電離圏大規模波動構造と赤道スプレッド F 現象の観測」

電離圏には様々な時間・空間スケールを持つ波動・擾乱現象が存在する。赤道スプレッド F 現象 (Equatorial Spread-F、ESF と略記、プラズマバブルとも呼ばれる) は電離圏の最も強い擾乱の一つであり、太陽活動度の活発期に増大する。ESF は、磁気赤道付近の日没後の電離圏下部に生じた密度低下域が、レイリー・テラー不安定によって拡大しながら高度千 km 以上まで急速に拡大する現象であり、電離圏擾乱の内で最も活発な現象として赤道低緯度電離圏研究のホットピックであり続けてきた。しかしながら ESF を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。

ESF は電離圏を通過する電波伝搬に大きく影響する。GPS 測位は、民間航空管制への応用が始まるなど社会インフラとして重要性が高まっているが、電離圏擾乱によって測位精度が低下したり測位ができなくなったりする、という悪影響が懸念されている。また高度 400 km 以上の電離圏は、国際宇宙ステーションを含む諸衛星が飛翔する領域である。電離圏は、衛星の周辺環境さらには新たな人類生存環境としても重要性が高まっている。

京都大学生存圏研究所 (以下では RISH) では、インドネシア・スマトラ島の赤道直下に位置する赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) を用いて ESF を研究してきたが、最近では名古屋大学太陽地球環境研究所 (STEL) および情報通信研究機構 (NICT) との協力のもとに、イオノゾンデ・衛星ビーコン受信機・大気光観測装置等による広域観測網の構築が進んでいる。

図 1 にインドから太平洋にかけての観測点の分布 (予定を含む) を示す。NICT は SEALION と呼ばれるイオノゾンデ観測網をタイ・ベトナム・インドネシアに構築しており、STEL はチェンマイ (タイ) とコトタバン (EAR サイト) にファブリペロー干渉計を設置して熱圏風の観測を始めた。我々は、GNU Radio と呼ばれるフリーのデジタル受信機用ハードウェア・ソフトウェアを駆使して開発した衛星ビーコン観測用の受信機を各地に展開中である。さらに、米国 SRI International では太平洋上の島々に VHF レーダー・イオノゾンデ・数台の衛星ビーコン受信機からなる観測網を構築中であり、インドには多数の観測点が存在している。これらをうまく糾合することで、経度範囲約 100 度 × 緯度範囲約 20 度 (磁気赤道の周辺 ± 10 度) に広がる地上観測網の構築を目指している。

ESF が日々変動を引き起こす要因については、(1) 赤道低緯度電離圏の南北半球対称性、(2) Large-scale wave structure (LSWS; 電離圏 F 領域下部に現れる、電子密度分布が東西波長数百 km で上下に波打つという波状構造)、(3) 大気下層から伝搬してくる中性大気波動、が議論されているが、圧倒的なコンセンサスを得たものはまだない。広域観測網から得られる多様なデータを活用して、これらの解明を目指していく。

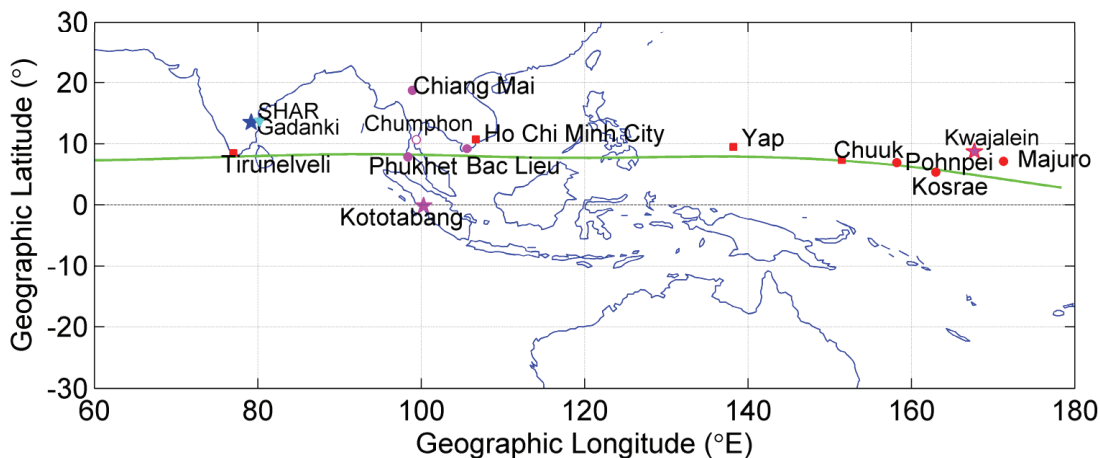


図 1 インドから太平洋にかけての ESF 研究用の地上観測網 (予定を含む)。タイ・ベトナム・インドネシアを中心として RISH・STEL・NICT によるネットワークが構築されている。太平洋上の観測点は米国 SRI International による。インドの研究グループによる観測研究も盛んに行われている。

## 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野（山川研究室）

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

### 「帯電現象の積極的な利用による人工衛星の軌道・姿勢制御に関する研究」

宇宙空間を飛翔する人工衛星では、通常宇宙空間に存在するプラズマにより太陽電池パネルなどの誘電体が局所的に帯電し、最悪の場合絶縁破壊を起こした事例も存在する。このような問題に対し、衛星からイオンや電子を放出することによって帯電を緩和し、人工衛星が破壊されるリスクを小さくする研究が為されている。我々は、これに対し衛星帯電を積極的に活用し、帯電量を能動的にコントロールすることによって人工衛星の軌道や姿勢の制御手法の研究を行っている。軌道制御を考察する場合は、人工衛星を帯電した点電荷としてとらえ、姿勢制御を検討する場合は、人工衛星の本体の両端に伸びるロッドの先端を帯電させることを想定する。帯電による力としては、1つの人工衛星だけを帯電させる場合には、地球磁場中の運動に起因するローレンツ力を考慮する。また、2つ以上の人工衛星を帯電させる場合には、クーロン力を主に考慮することになる。それ以外に支配的な力としては重力を考慮するが、大気抵抗、太陽光圧、地球形状の扁平に起因する高次の重力項については、短い飛行時間では相対的に小さいとして無視してかまわない。

クーロン力によるフォーメーションフライト：2つ以上の帯電した衛星間の距離が、地球周辺のプラズマ環境におけるデバイ長よりも小さい場合、プラズマによるデバイ遮蔽の効果が及ばないため、これらの衛星はお互いにクーロン力を及ぼすことができる。デバイ長が十分に大きな領域（例えば静止軌道上）ではクーロン力によるフォーメーションフライトが可能であり、例えば、2つの衛星が互いに距離を一定に保ちながら高度 36,000km の静止軌道を周回する軌道が存在することがわかっている。本研究室では、帯電量の制御を行うことで、地球赤道面内の円軌道上において、地球中心の半径方向に2衛星を安定な位置に配列させる制御手法についての研究を行った [1]。また、クーロン力と重力のある関係条件を満たすことで、地球と2つの帯電衛星の相互作用により、天体力学の分野で扱われる制限3体問題の手法が適用できることを見出した [2]。

ローレンツ力によるフォーメーションフライト：クーロン力によるフォーメーションフライトは、デバイ長が十分大きくなければデバイ遮蔽によりクーロン力が働かないため有効でない。例えば高度数百 km の低高度軌道ではデバイ長は衛星サイズよりも小さくなり、クーロン力によるフォーメーションフライトは不可能である。一方で、高度数百 km の地球近傍であれば地球磁場によりローレンツ力が働くため、これにより帯電した衛星の軌道制御が可能となる。地球を周回する非帯電衛星（ターゲット）を基準とし、ターゲット衛星から僅かに離れた距離にあり地球を周回する帯電衛星（チェイサー）の相対的な軌道の解析を行っている。現在は、どのように帯電量を変化させれば、地球赤道面に平行な円軌道上において、基準点（ターゲット）の周辺領域において、任意の位置から別の任意の位置へ移動出来るか、あるいは任意の軌道から別の軌道へ遷移できるかについて検討を進めており、基準点近傍領域で線形化した場合における制御手法の確立の可能性を見出している [3, 4]。また、ロッドの両端を異符号で帯電させて、それぞれの点電荷にかかるローレンツ力によって衛星重心まわりに生じるトルクを考慮して、赤道面内の円軌道上において、基準姿勢に対する姿勢角度、および、姿勢角速度のダイナミクスを位相平面上で解析した。同時に、電荷量制御、すなわち、トルク制御を行うことで、目標姿勢に誘導できることを示した [5]。

#### 参考文献

- [1] Yamamoto, U., Yamakawa, H., "Two-craft Coulomb-force Formation Dynamics and Stability Analysis with Debye Length Characteristics," Paper AIAA-2008-7361, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, 18 - 21 Aug, Honolulu, Hawaii, 2008.
- [2] Yamakawa, H. and Bando, M., "Gravity-Coulomb Force Combined Three-Body Problem," The 18<sup>th</sup> Symposium of International Federation of Automatic Control in Automatic Control in Aerospace (IFAC ACA 2010), Nara, Japan, September 6-10, 2010.
- [3] Bando, M. and Yamakawa, H., "Spacecraft Relative Dynamics under the Influence of Lorentz Force," AIAA/AAS Astrodynamics Conference, Toronto, August 2-5, 2010.
- [4] 辻井秀, 矢野克之, 坂東麻衣, 山川宏, "ローレンツ力を用いた衛星編隊飛行のダイナミクスと制御に関する研究", Paper 1105, 2010年11月17-19日, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 静岡.
- [5] Yamakawa, H., Hachiyama, S., and Bando, M., "Attitude Dynamics of a Pendulum-Shaped Charged Satellite," Paper IAC-10.C1.3.10, 61<sup>st</sup> International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, September 26-October 1, 2010.

## 博士論文概要

### 【課程博士一覧】

廣 本 正 之	「LSI design methodology for real-time computer vision on embedded systems」 (組込みシステムにおける実時間画像認識のための LSI 設計手法)	平成 21 年 11 月 24 日
益 尾 和 彦	「脱塩化ビニルと LCA を重視した電線・ケーブルの環境配慮設計に関する研究」	平成 22 年 3 月 23 日
大 島 孝 仁	「酸化ガリウム系半導体の機能とデバイス応用に関する研究」	平成 22 年 3 月 23 日
山 口 真	「半導体量子ドット・微小共振器結合系における共振器量子電磁力学の理論」	平成 22 年 3 月 23 日
石 崎 賢 司	「3次元フォトリック結晶の表面における光制御に関する研究」	平成 22 年 3 月 23 日
伊 藤 陽 介	「Studies on Microplasmas in Coaxial Dielectric Barrier Discharges and Their Application to Thin Film Deposition at Atmospheric Pressure」 (同軸型誘電体バリア放電を用いたマイクロプラズマとその大気圧薄膜堆積への応用に関する研究)	平成 22 年 3 月 23 日
松 山 顕 之	「Study on Monte-Carlo Calculation of Neoclassical Transport Matrix in Nonaxisymmetric Toroidal Plasmas」 (非軸対称トロイダルプラズマにおける新古典輸送行列のモンテカルロ計算に関する研究)	平成 22 年 3 月 23 日
武 田 浩 一	「Building Natural Language Processing Applications Using Descriptive Models」 (記述的モデルを利用した自然言語処理アプリケーション構築)	平成 22 年 3 月 23 日
中 澤 敏 明	「Fully Syntactic Example-based Machine Translation」 (構造的言語処理に基づく用例ベース機械翻訳)	平成 22 年 3 月 23 日
菅 野 裕 揮	「マルチコアプロセッサを用いた実時間物体認識システムに関する研究」	平成 22 年 3 月 23 日

徐 亮	「Studies of Adaptive Radio Resource Management in Wireless Networks」 (無線ネットワークにおける適応無線資源管理の研究)	平成 22 年 3 月 23 日
吉 岡 裕 典	「Fundamental Study on Si Nanowires for Advanced MOSFETs and Light-Emitting Devices」 (先端 MOSFET および発光デバイスを目指した Si ナノワイヤの基礎研究)	平成 22 年 7 月 23 日
Nathabhat Phankong	「Characterization of SiC Power Transistors for Power Conversion Circuits Based on C-V Measurement」 (SiC パワートランジスタの C-V 測定に基づく電力変換回路のための特性評価)	平成 22 年 9 月 24 日
改 正 清 広	「プリンタブルエレクトロニクスに向けた走査プローブ顕微鏡応用ナノスケール液滴作製技術に関する研究」	平成 22 年 9 月 24 日
Mohammad Lutfur Rahman	「Hybrid Offshore-wind and Tidal Turbine generation system (HOTT)」 (洋上風力・潮力ハイブリッド発電システム)	平成 22 年 9 月 24 日
工 藤 理 一	「Efficient Spatial Resource Management for Broadband MIMO Systems」 (広帯域 MIMO システムにおける空間リソース制御法の研究)	平成 22 年 9 月 24 日

### 【論文博士一覧】

中 山 武	「磁気閉じ込め核融合装置における強磁性鋼最適配置に関する研究」	平成 22 年 1 月 25 日
小 司 禎 教	「Accurate Estimation of Precipitable Water Vapor Using Ground-Based GPS Observation Network and its Data Assimilation into a Mesoscale Numerical Weather Prediction Model」 (地上 GPS 観測網を用いた可降水量の高精度推定とメソスケール数値気象予報モデルへのデータ同化)	平成 22 年 3 月 23 日

廣 本 正 之 (佐藤高史教授)

「LSI Design Methodology for Real-Time Computer Vision on Embedded Systems」  
 (組込みシステムにおける実時間画像認識のための LSI 設計手法)

平成 21 年 11 月 24 日授与

近年、半導体技術の進歩により LSI の性能が飛躍的に向上してきており、組込み機器においても様々な処理が実現可能となっている。一方で車載や監視、ロボット等の用途において、組込み機器上で画像認識を実時間で実現したいという要求が高まっている。これらの認識処理は高精度な手法ほど大きな演算量を必要とすることから、これまで組込み機器上での実時間処理は困難であった。そこで本研究では、組込み機器上での高精度な画像認識を実現するため、アプリケーションとハードウェアの両面から検討を行い、性能と設計効率の両立を目指した LSI システムの設計手法を提案することを目的とする。

まず画像認識に適した高性能なハードウェア設計手法を提案するため、近年の高精度な物体認識アルゴリズムの性質を分析し、それぞれ詳細な並列化検討に基づきアーキテクチャ検討を行った。その結果、画像認識アルゴリズムにおいては入力データ量に対する演算量の比率が極めて高く、画像データへのメモリアクセスが集中する特徴があることが分かった。そこで本研究では、並列処理による高速化の効果を得るため、レジスタレイ等の利用によりデータへのアクセス競合を回避する手法を提案した(図1)。提案設計手法により実際に Haar-like 特徴および CoHOG 特徴を用いた物体検出ハードウェアを設計し、共に従来のプロセッサ等への実装と比べて大幅な高速化を達成し、提案手法の有用性を示した。

次に、上記で提案した高性能なアーキテクチャ設計手法を取り入れつつ、LSI システムの設計効率を高めるために、設計の自動化と再利用性の2つの観点から検討を行った。

1つ目として設計の自動化を対象とし、粗粒度再構成デバイスに着目し、アーキテクチャ評価環境を提案した。本研究では粗粒度再構成デバイスを画像認識向け LSI システムに利用することを狙い、様々なアーキテクチャに対応可能な粗粒度再構成デバイス向けコンパイラを新たに開発し、これを用いたアーキテクチャ評価環境を構築した(図2)。本評価環境によりアプリケーションに適したアーキテクチャ探索が効率良く行えるようになり、画像認識向け LSI システムのための有用な設計環境となると言える。

2つ目として設計の再利用性を対象とし、非同期式 IP コアの設計手法を提案した。本研究では、容易に高性能な LSI システムを設計可能にするため、予めある必要な機能毎に高性能な非同期式回路を設計しておき、それを IP コアとして提供する手法を提案した。提案設計手法を用い、単精度浮動小数点除算器の非同期式 IP コアを設計した結果、同期式回路より面積、消費電力において優れた性能が得られた。

以上のような検討を通じ、本研究では、高精度な画像認識アルゴリズムを対象とした組込み向け LSI システムについて、性能と設計効率の両立を目指した各種設計手法を提案し、その実現に向けた指針を示すことができた。

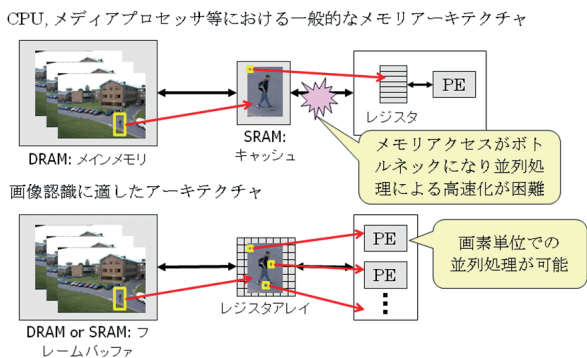


図 1. 画像認識に適したメモリアーキテクチャ

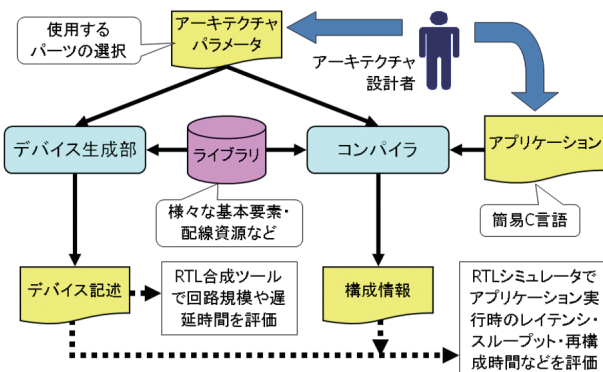


図 2. 粗粒度再構成アーキテクチャ評価環境



益 尾 和 彦 (大澤教授)

「脱塩化ビニルと LCA を重視した電線・ケーブルの環境配慮設計に関する研究」

2010 年 3 月 23 日授与

地球温暖化の軽減に寄与する電線・ケーブルの環境配慮設計に資するため、従来の塩化ビニルよりも環境影響の少ない電線の製造法に関する開発研究、ならびに、電線・ケーブルの製造から使用時の通電損失までを含むライフサイクルアセスメント (LCA) により、CO<sub>2</sub> の排出総量を削減するための導体サイズ適正化について研究を行った。主な成果は以下のように要約される。

1. 電線被覆材のベース樹脂としてメタロセン C8-LLDPE を選定し、これに難燃剤の水酸化マグネシウムを高充填することで加熱変形をし難く、かつ加工性に優れた脱塩化ビニル電線が実現できることを示した。また、従来不明であった水酸化マグネシウムの吸熱作用による難燃性付与メカニズムを明らかにした。さらに、製造時に消費エネルギー量が多い合成品ではなく、消費エネルギー量の少ない天然の水酸化マグネシウムを用いることにより、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を塩化ビニル電線の 20% 程度まで削減できることを示した。
2. 使用済み塩化ビニルのリサイクルに関して再使用の可能性、ポリエチレンの許容混入率などについて検討を行い、2 回までの再使用は可能であること、5% までのポリエチレン混入は破断特性や耐熱特性に問題をもたらさないことを明らかにした。さらに、難燃剤を高充填した樹脂が持つ実用上の 4 つの問題点 (白化現象、絶縁抵抗低下現象、汗をかく現象、沿面フラッシュオーバー現象) の対策として、電線被覆層を 2 層にし、その外層は難燃剤を使わない樹脂で薄く被覆する構造を提案し、試作実験によりその構造が抜本的対策となることを明らかにした。
3. IEC 規格のライフサイクルコスト (LCC) の考え方を基礎にして、ケーブルの一生涯における CO<sub>2</sub> 排出量をコスト換算した値と LCC との和を新たにライフサイクルコストと定義し、それが最小となる値を最適電流値とするという新しい導体サイズ決定指針を提案した。また、工場、事務所、ビルなどの分野ごとに調査した負荷電流パターンの実態より、それらが 3 つのケースに明確に分類できることを明らかにし、それぞれに対して最適電流値を算出することによって指針の明確化を図った。
4. 上記の導体サイズ決定指針に基づき、日本全国の需要家 (工場、ビル) 構内の低圧架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル (低圧 CV-T ケーブル) のサイズをすべて適正化したときの年間総 CO<sub>2</sub> 排出削減量は、1990 年における日本の CO<sub>2</sub> 総排出量の 0.75% に相当することを明らかにした。また、発電端から需要家受電端までの送配電損失が 7% 程度であるのに対して、需要家受電端以降の構内低圧 CV-T ケーブルによる通電損失が約 4% にもなることを示し、併せて、サイズ適正化によって 2% にまで半減できることを解明した。さらに、CO<sub>2</sub> 削減効果の点では、導体サイズ太線化が電圧を上げること (昇圧) より有効であることを示した。

この外にも本研究では、ケーブル表面温度から通電電流を推定する方法を確立し、ケーブル表面温度の測定によって取り替えの対象となるケーブルを特定することも可能にした。

大 島 孝 仁 (藤田教授)

「酸化ガリウム系半導体の機能とデバイス応用に関する研究」

平成 22 年 3 月 23 日授与

化合物半導体の材料探索は現在も行われており、新材料による新機能が我々の生活を豊かにしている。本研究もその材料探索の流れを汲むものであり、新規化合物半導体として、酸化ガリウム ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) に着目した。 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 半導体は、既存のワイドギャップ半導体にはない次に示す特徴を持つ。(i) バンドギャップが 4.8 eV という特徴的な値であり酸化半導体で最大である。(ii) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> との混晶系が作製可能である。(iii) 大口径単結晶基板が融液からの結晶成長で得られる。特に (i) は、深紫外光デバイス・高耐圧電子デバイスへの可能性を示している。(ii) は、ヘテロデバイスへの可能性を示しており、(iii) は、高品質のデバイスが量産性できることを示唆している。このように  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は可能性豊かな材料であるが、半導体としての研究がほとんどなされてこなかった。そこで、その半導体の機能性を調べデバイスへと展開することを目的として本研究を行った。

研究では、主に  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 単結晶基板を用い、その基礎的物性評価、ならびにオーミック、ショットキー電極、ウェットエッチング、熱処理など基本的な半導体プロセス技術を開発した。そして、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に光吸収特性から、ソーラーブラインド光検出機能があることを明らかにした。これは、波長 260 nm 未満の光にのみ選択的感度を示すもので、この機能を応用すれば太陽光や室内照明には反応せず炎や殺菌ランプの光を検出できる。そして、実際にそれを示すために、開発したプロセス技術で、ショットキー型の  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光検出素子を作製し、図 1 に示すように室内照明下での炎検知を実演した。一方、単純な構造のショットキー接触の逆方向電流電圧特性と容量電圧特性より、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の絶縁破壊電界が、2.2 MV/cm より大きく、既存パワーデバイス材料である SiC や GaN の 3.0 MV/cm に勝るとも劣らないことを明らかにした。この高耐圧機能により、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ベースの高耐圧ショットキーダイオード、高耐圧 HEMT などが期待できる。そこで、特にパワー HEMT などのヘテロ接合応用を想定した場合に必要な  $\beta$ -Al<sub>2x</sub>Ga<sub>2-2x</sub>O<sub>3</sub> 混晶薄膜作製に取り組んだ。そして、Al 組成 0.39 までステップフロー成長を、図 2 に示すように組成 0.61 までコヒーレント成長させることに成功した。以上より、比較的高 Al 組成まで良好な界面を維持できることが明らかとなり、ヘテロデバイスへの土台が整った。

本論文では以上の成果から、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系半導体が深紫外光デバイス・高耐圧電子デバイスのそれぞれの分野の最先端において可能性豊かな化合物半導体材料であることを示した。



室内照明

室内照明+炎

図 1 炎検知の実演。テスター中の信号は検出素子に流れる光電流に比例。

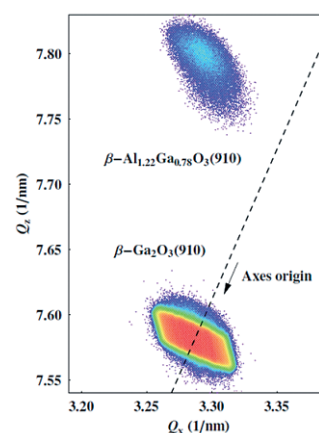


図 2  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と Al 組成 0.61 の  $\beta$ -Al<sub>2x</sub>Ga<sub>2-2x</sub>O<sub>3</sub> 薄膜に対する逆格子マッピング像

山口 真 (野田教授)

「半導体量子ドット・微小共振器結合系における共振器量子電磁力学の理論」

平成 22 年 3 月 23 日授与

本論文は、微小な光共振器の中に埋め込まれた半導体量子ドットの発光過程を記述し、解釈できる理論を開発・体系化したものである。

一般に、微小な光共振器の内部に置かれた発光体の発光過程は、自由空間中の場合と比較して大きく変化する。このような現象を取り扱う学問分野は共振器量子電磁力学と呼ばれ、もともとは発光体として原子を用いられることで詳細に調べられてきた。しかしながら、この現象を半導体内部において利用できれば、従来の半導体発光素子の大幅な性能向上だけでなく、無閾値レーザーや高効率な単一光子光源、量子ビット記憶・演算素子といった、これまでにない光素子を実現できるという期待がある。このため近年、半導体量子ドットを微小な光共振器中に埋め込み、その発光過程を評価するという研究が盛んに行われている (図 1 参照)。しかし、半導体量子ドットを用いた場合、従来の理論では説明できない現象が多数存在し、この分野の発展を大きく阻んでいた。本論文では、これらの未解明の現象を統一的に説明できる理論を構築している。得られた成果は以下の通りである。

1. この物理系では、共振器と量子ドットの共鳴波長が異なる状況においても、発光スペクトルにおいては、共振器準位からの強い発光が得られる。この現象は、2000 年代初頭から実験的に報告されてきたが、その明確な物理起源は不明のままであった。本論文では、固体結晶中において顕著に存在する純位相緩和 (エネルギー緩和を伴わない干渉性の消失過程) によって、この現象を説明することに成功した (図 2 参照)。

2. 上記の純位相緩和による共振器準位の発光は、量子アンチゼノ効果 (AZE) と呼ばれる一般物理として解釈できることを示した。ここで、AZE とは連続的な観測によって量子状態に擾乱を与えると、量子状態間の遷移速度が加速されるという現象である。本論文では、発光スペクトルという視点から、AZE のもつ新たな物理側面を明らかにしている。

3. さらに近年の実験では、共振器と量子ドットが共鳴する状況においても、起源の不明な発光ピークの存在が報告されていた。本論文では、この現象についても、電子のスピンを考慮することで説明可能であることを示した。

以上の成果は、半導体量子ドットを用いた共振器量子電磁力学の実験事実を統一的に解釈する上で、非常に大きな貢献を果たした。また本論文において構築された理論は、冒頭に述べた無閾値レーザーや高効率な単一光子光源、量子ビット記憶・演算素子の設計指針を得る上でも、極めて有力な手段になると期待される。

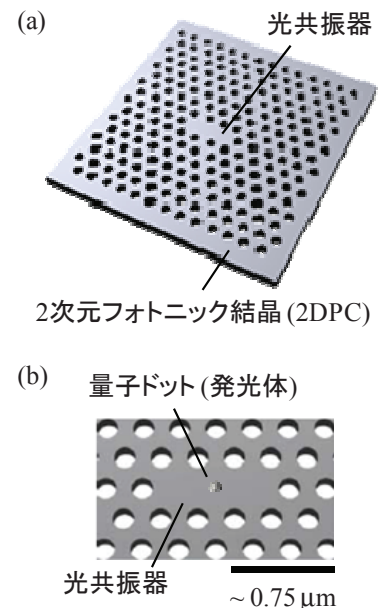


図 1 : (a) 2次元フォトニック結晶中に作製された光共振器. (b) 共振器中に埋め込まれた量子ドット.

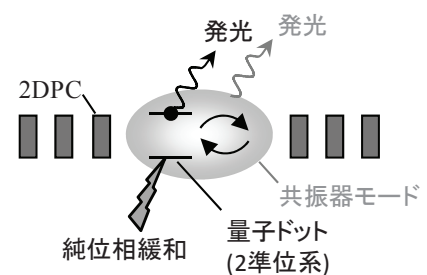


図 2 : 純位相緩和を含む解析モデル

石 崎 賢 司 (野田教授)

「3次元フォトニック結晶の表面における光制御に関する研究」

平成 22 年 3 月 23 日授与

本論文は、次世代の光材料として注目されている3次元フォトニック結晶において、その「表面」に着目し、新しい光制御手法の提案と実証を行った結果をまとめたものである。3次元フォトニック結晶は、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもち、光に対する禁制帯であるフォトニックバンドギャップをもつことを特徴とする。これは、周期的な静電ポテンシャル分布をもつ半導体中を運動する電子に対して、エネルギーギャップが形成されることと類似した特性である。このような3次元結晶は、光の伝搬特性や発光現象などを3次的に自在に制御することを可能とすると期待され、光回路などの様々な光デバイス実現の鍵となる次世代光材料と位置づけられている。これまで、3次元フォトニック結晶を用いた光制御を実現するためには、結晶の「内部」に人工的な欠陥や発光材料を埋め込み、3次的に全ての方向に対するバンドギャップ効果を利用することが不可欠と考えられてきた。これに対して本研究では、周期構造が終端される結晶の「表面」においても、光子を制御・操作することが可能であることを、世界に先駆けて示すことに成功した。

第一に、図1(a)のような3次元フォトニック結晶において、その表面に特有の光の状態が存在することを数値解析により明らかにするとともに(図1(b))、エバネッセント結合法を用いた実験により、初めて、結晶表面に光が安定して存在し得ることの実証に成功した。さらに、表面状態を介して光が伝搬する様子の顕微観察にも成功した。第二に、フォトニック結晶表面の構造制御により、表面における光の局在状態を自在に制御できることを見出した。図2(a)のような格子状の表面構造を形成することで、任意の偏光の光に対して面内の伝搬を禁止することが可能であり、さらに表面へのナノ共振器構造の導入により、表面内の任意の位置への3次元的な光の蓄積が可能であることを、解析・実験の両面から明らかにした。実験により、図2(b)に示されるように、表面の微小領域のみに光が蓄積されていることを実証すると同時に、局在状態における光の閉じ込めの強さを示す指標である $Q$ 値として、3次元結晶ナノ共振器として世界最高値となる $Q > 9,000$ を実現することに成功した。

以上の成果は、フォトニック結晶による全く新しい光子の操作方法を与えると同時に、金属表面における表面プラズモン-ポラリトン効果等の表面光現象との関連から、物理的にも興味深い。表面は外部空間からのアクセス性がよく、さらに3次元フォトニック結晶表面は吸収損失もないため、新しいセンシング応用や、高効率な光-物質の相互作用を実現する場を与えるものとしても大いに期待される。

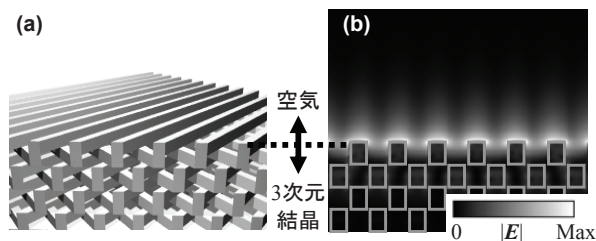


図1. (a) 3次元フォトニック結晶の模式図と、(b) 表面状態の光電界分布の解析結果。

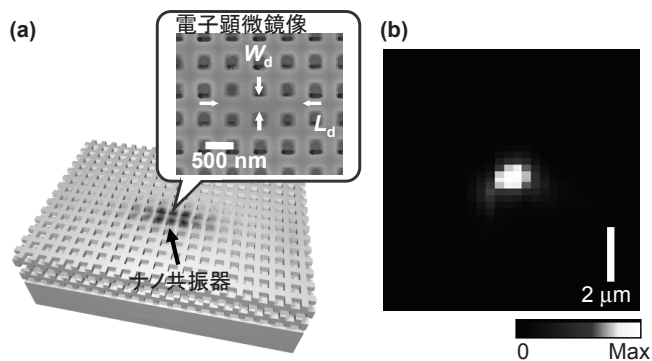


図2. (a) 3次元結晶表面に形成したナノ共振器の模式図と、(b) ナノ共振器への光蓄積実験の結果。

伊藤 陽 介 (高岡教授)

「Studies on Microplasmas in Coaxial Dielectric Barrier Discharges and Their Application to Thin Film Deposition at Atmospheric Pressure」

(同軸型誘電体バリア放電を用いたマイクロプラズマとその大気圧薄膜堆積への応用に関する研究)

平成 22 年 3 月 23 日授与

マイクロプラズマとは、大気圧付近の圧力帯域で生成される、時空間的に局在した高密度かつ熱非平衡状態のプラズマである。その高い反応性と熱非平衡性はプロセス用プラズマ源として適しており、また大掛かりな真空装置等を必ずしも必要としないことから産業界から多くの注目を集めている。本論文では図 1 に示すような同軸型誘電体バリア放電により生成したマイクロプラズマの特性診断およびそれを用いた 1 次元基板上への酸化物の大気圧高速堆積について研究した結果をまとめたものである。この研究により得られた結果は以下の通りである。

1. 分子性ガスの大気圧プラズマに対し、時間分解能の高いミリ波の透過特性診断による電子密度測定法を提案した。本測定法においてはマイクロプラズマの集合体（マイクロプラズマアレイ）を巨視的なバルクプラズマとみなし、プラズマ中の微視的な構造によらず、空間的に平均化された電子密度を得た。これより分子性ガスによる大気圧プラズマの電子密度を初めて明らかにした。
2. プラズマジェットを照射する基板の容量成分を変化させ、大気圧プラズマプロセス中の成膜速度に及ぼす蓄積電荷の影響を調べた。さらにプラズマの伸展を考慮したシステム全体の等価回路を用いて、蓄積電荷の効果を理論的に解明した。これより、大気圧プロセス中に基板を含むシステム全体の容量成分の成膜速度に与える影響が定量的に解明され、大気圧プラズマプロセス装置の設計の肝要な指針を得ることができた。
3. 上記のプラズマジェットを用いて、 $\text{SiO}_2$  および  $\text{ZnO}$  を対象として基板上に 1 次元状に高速成膜を行った。種々の成膜システム構造を検討し、基板上でプラズマジェットと原料ガスを交差させる構造にて、従来の低圧下における成膜法より 2～3 桁ほど高速な成膜方法を開発した（図 2）。また、この成膜法を用いて、マスクパターンを必要としない高速なプラズマプロセス技術を確立した。

以上のように本論文は、マイクロプラズマの電磁波応答を利用した大気圧プラズマの診断法の提案と実証、ならびにマイクロプラズマを用いた新規成膜法の開発および極めて高速な大気圧化学気相堆積の実現を明らかにしたものである。

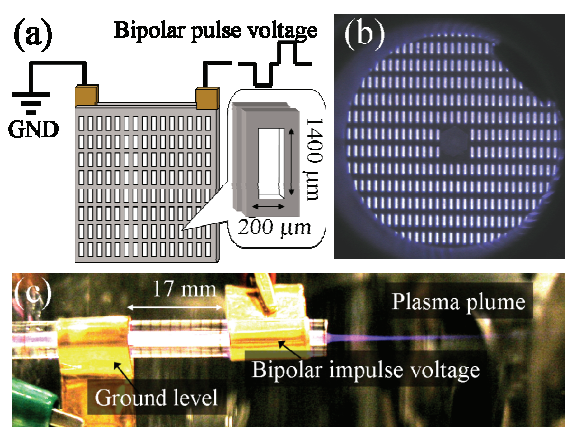


図 1. 研究に用いたプラズマ源。(a)(b) マイクロプラズマアレイ (c) プラズマジェット。

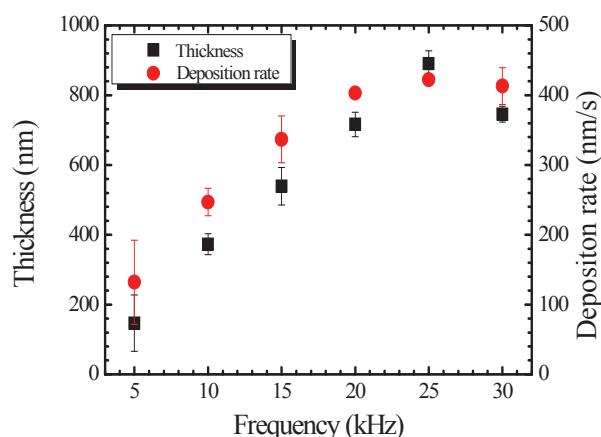


図 2. プラズマジェットにより堆積した  $\text{SiO}_2$  膜堆積速度の駆動周波数依存性。

松山 顕之 (花谷准教授)

「Study on Monte-Carlo Calculation of Neoclassical Transport Matrix in Nonaxisymmetric Toroidal Plasmas」

(非軸対称トロイダルプラズマにおける新古典輸送行列のモンテカルロ計算に関する研究)

平成 22 年 3 月 23 日授与

本論文は、新古典拡散係数を計算する標準的な手法であったモンテカルロ法を、線形応答理論や巨視的流体モデルの観点から詳細に検討することで、新古典輸送行列の対角項と非対角項を包括的に取り扱うことのできる新しいシミュレーション手法を提案したものである。この手法は、大型ヘリカル装置 (LHD) に代表されるような強い非対称性を有する配位に対して、プラズマの電流、粘性、および回転の衝突周波数依存性と径電場依存性を定量的に計算することができる。

1) 磁力線方向の巨視的運動量バランスをモンテカルロ・シミュレーションで直接考慮するにはプラズマ中の電子・イオン・不純物間の摩擦力を運動論的なレベルで無撞着に取り扱うために大規模計算が必要となる。ここでは計算の効率化のために、近年 Sugama と Nishimura によって提案されたモーメント法に基づく階層的記述をモンテカルロ計算に応用して、新古典輸送の駆動項である新古典粘性のみをローレンツ衝突モデルとデルタエフ・モンテカルロ法によって計算することで、正味のブーツトラップ電流が電子・イオン間の結合を含め、定量的に評価できることを明らかにした。

2) トカマクに代表される系に対称性を有するトロイダルプラズマは、径方向の粒子拡散が本質的両極性になるという顕著な性質を持っている。一方、わずかな対称性の破れがトロイダルプラズマの閉じ込め性能に及ぼす影響が準対称ステラレータを用いて精力的に調べられている。ここでは、デルタエフ法によるドリフト運動論的方程式の数値シミュレーションを行い、3種類の方程式系を比較し、フィルシュ・シュルター拡散項を解析的に除いた方程式系を解くことによって、トロイダル方向の粘性がゼロであるという軸対称系の新古典の性質を保証するモンテカルロ・シミュレーション手法を開発した。

3) 非軸対称トロイダルプラズマにおける輸送行列計算のために、線形応答理論に基づく二つの公式、グリーン・久保公式とアインシュタイン・ヘルファンド公式を導入した。これまでデルタエフ法による拡散的な系のシミュレーションでは、衝突輸送に伴うエントロピー生成によって数値ノイズが時間とともに増大する現象が知られてきたが、デルタエフ法とアインシュタイン・ヘルファンド公式の相互関係を理論的、数値的に調べることで、後者においてはエントロピー生成の長時間平均から輸送行列を計算することによって、数値ノイズの増大を生じない計算法が構成できることを明らかにした。

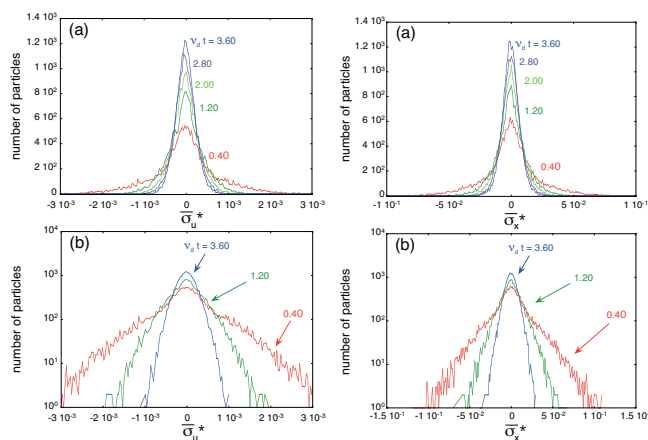


図 1. 輸送行列計算において軌道平均された磁力線方向 (左) および径方向 (右) の粒子束の確率密度分布の時間発展。

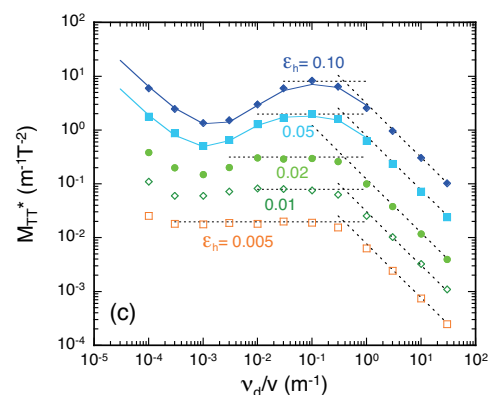


図 2.  $L = 2$  ヘリオトロン磁場におけるトロイダル粘性の衝突周波数依存性。  $\epsilon_h$  は磁場のヘリカル成分の値を表す。

武田 浩一 (黒橋教授)

「Building Natural Language Processing Applications Using Descriptive Models」

(記述的モデルを利用した自然言語処理アプリケーション構築)

平成 22 年 3 月 23 日授与

デジタル化されたテキスト情報の氾濫により、自然言語処理技術に基づいたアプリケーションへの要求が急速に増大している。特にインターネット上の Web ページやブログなどに含まれるテキスト情報の検索や翻訳をはじめとしたアプリケーションは、インターネット上の豊富な情報やサービスを統合し、多くの利用者にとって欠かせない社会的インフラを構成するようになった。さらにアプリケーションの多様性は、形態素解析、構文解析、機械翻訳のための構造変換、情報抽出といった要素技術のコンポーネント化を促進した。このため各コンポーネントがルールベースあるいは機械学習的手法といった実装の違いにかかわらずコンポーネント間のインタフェースを容易にするためには、各コンポーネントの入出力を明確にする自然言語処理の記述的モデルを積極的に利用することが極めて重要になった。

本論文は、このような記述的モデルに基づいて形態素解析の 1 つの主要機能である漢字複合語分割、機械翻訳 (概念表現を利用した中間言語方式と同期文法を利用したパターン翻訳方式)、中間言語表現の言換え、およびテキストマイニングの一手法である集合知の意見集約、という 4 種類のコンポーネントを実現した研究をまとめたものであり、以下の主要な成果を得ている。

- 漢字複合語の造語モデルをマルコフモデルによって表現し、大量のコーパスから各漢字複合語が生起する確率を学習するとともに、Viterbi 法によって与えられた漢字複合語の最も尤度の高い分割を推定するアルゴリズムを提案した。また同アルゴリズムにより、電気工学分野の技術論文からランダムに抽出された長さ 3 文字以上の漢字複合語に対して 95.0% の平均分割精度を達成することができた。図 1 に長さ 9 文字の漢字複合語の最尤分割例を示す。各行には与えられた漢字複合語、分割パターン (P は接頭辞あるいは漢字複合語に前接する 1 文字漢字、1 および 2 はそれぞれ 2 文字漢字複合語の 1 文字目および 2 文字目、S は接尾辞または漢字複合語に後接する 1 文字漢字を示す)、およびその生起確率が対応している。
- 中間言語方式の機械翻訳において概念トランスファーという手法により原言語および目的言語における概念表現の差異を吸収するとともに、集合や変数に相当する概念を導入し、並列句や代名詞などの広範な自然言語表現を実用的な精度で翻訳できるシステムを試作した。また「色」属性をもつ有向グラフに基づく概念表現の言換え手法による、目的言語の制約のもとで文生成が可能となる概念表現が計算できることを示した。
- 同期文法によるパターン翻訳方式を提案し、インターネットのオープンドメインな Web ページの翻訳に適した英日翻訳システムを実装した。同期文法中の非終端記号に語幹や対応関係の記述を許す拡張を行うとともに、その数学的性質を明らかにした。また、このシステムは製品化され外部からも高い評価を得た。
- インターネットにおける掲示板のように意見対立が存在する文書集合に対し、意見集約のための計算手法を提案した。論理的な矛盾に基づく意見のグループ化の計算的複雑さ (NP 完全) を示すとともに、3 分木を利用した対立意見の集約手法を示した。

一樣振幅周波数特性	121212S12	-1.27093E+01
一端子周波数依存性	12S12S12S	-1.43907E+01
一般化方程式誤差法	12S12S12S	-1.24734E+01
一般化相互関係器法	12S1212SS	-1.22991E+01
一般化可到達性空間	12SP12S12	-1.45771E+01
一般化優度比統計量	12S12S12S	-1.64295E+01
一般化反作用原理及	12S12S12S	-1.53643E+01
一般化逆固有値問題	12SS12S12	-1.43205E+01
一般産業用電気機器	1212S12SS	-1.31461E+01
一般産業用電気設備	1212S1212	-1.38063E+01
一般的多領域信頼性	12SP1212S	-1.28993E+01
一般的感度解析問題	12S121212	-1.09410E+01
一般料金改正用料金	121212S12	-1.70158E+01
一般形伝達関数実現	12S121212	-1.27132E+01
一階連立微分方程式	12121212S	-1.83198E+01

図 1: 長さ 9 文字の漢字複合語分割例

実用的な自然言語処理アプリケーションを構築するうえで、既存の知識や資源を再利用し、漸進的に機能を拡張し、多様性に対応することは産業的な要請である。このために、できる限り汎用的なコンポーネントを設計し、記述的モデルを通して理論的な諸性質を明らかにするという大きな目標であった。

今後は人間の感情表現の扱いや質問応答といった自然言語処理の関連分野も考慮し、記述的モデルを適用して意味的により豊富なテキスト情報を処理できるような研究に取り組みたい。

中 澤 敏 明 (黒橋教授)

「Fully Syntactic Example-based Machine Translation」

(構造的言語処理に基づく用例ベース機械翻訳)

平成 22 年 3 月 23 日授与

機械翻訳の歴史は古く、1940 年代後半から始まったと言われている。それにもかかわらず、現時点ではまだ高精度の機械翻訳システムは実現されていない。翻訳とはそもそも高度に知的な行為であり、これを計算機上で行なうには大きな計算機パワーが必要であったり、大規模な対訳データや高度な言語処理技術などの言語資源・言語知識が必要である。これらの問題は、近年の計算機のめざましい発達や、インターネットなどによる対訳データの利用、さらには言語処理技術の発展などにより解決されつつある。それとともに、他言語に触れる機会も急速に増加しており、機械翻訳への期待が高まっている。

機械翻訳において最も重要かつ困難な問題の一つは、言語間の違いを克服することである。ここで「言語間の違い」というのは各言語の性質の違いのことであり、言語の性質とは意味のある文を構成するために用いられる要素、表現、語順などのことである。英語とフランス語間のように似た言語対では、逐次的な単語の置き換えと局所的な単語の入れ替えだけでも、かなり高精度な翻訳が行なえるが、日本語（主語-目的語-動詞）と英語（主語-動詞-目的語）のように語順が大きく異なり、また表現の自由度も異なる言語対では翻訳は非常に難しくなり、実用的な翻訳システムは未だに開発されていない。このように違いの大きい言語対間の翻訳では、文の構造的な情報を利用することが非常に重要であり、その方法の一つとして文を単語列ではなく木構造として扱うことが考えられる。既存の手法の多くは文を単語列として扱っており、木構造を利用した手法であっても、対訳文内の単語対応の推定、単語対応結果からの翻訳知識の自動獲得、および獲得された知識を利用した翻訳の各ステップが分離しており、木構造を利用するメリットが最大限有効に利用されているものはほとんどない。本論文ではこれらの全てのステップにおいて文を単語依存構造木として扱う枠組を提案し、これが高精度な翻訳の実現に有効であることを示した。

翻訳知識の自動獲得ステップでは、1. 依存構造木上での距離を利用した、2. 方向性のない、3. 句対応獲得手法を提案し、既存の、単語列距離を用いた方向性のある単語対応推定手法による結果からヒューリスティクスにより句対応を獲得する手法に比べて 13% 程度誤りを軽減することができた。また、この対応結果から木構造で表現された翻訳用例を獲得し、これを翻訳で利用してその精度を人手により評価したところ、人手によりチューニングされた、ルールベースの商用翻訳システムと同等の翻訳精度を達成し、既存の単語列による

翻訳手法よりも有意に高精度であることを示した。また構築した翻訳システムは日本語イーコマースサイトの商品説明文の英語への自動翻訳に利用されるなど、実社会への貢献も大きい。

今後は他の言語対での大規模な実験を行ない、提案した手法が言語に依存しないロバストな手法であることを示し、様々な場面での機械翻訳の利用の拡大に貢献したい。

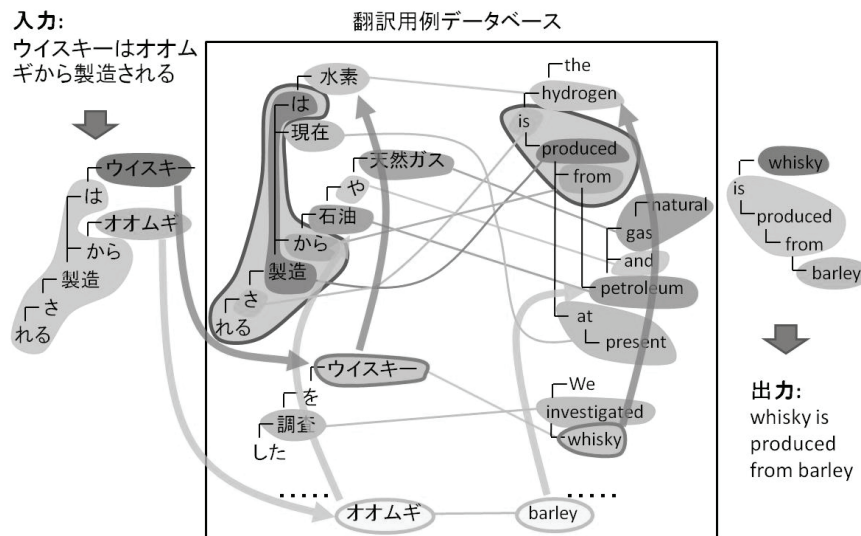


図 1：用例ベース機械翻訳の概要



菅野 裕 揮 (佐藤高史教授)

「マルチコアプロセッサを用いた実時間物体認識システムに関する研究」

平成 22 年 3 月 23 日授与

近年様々な機器において、高精度な物体認識処理が必要とされつつあり、さらに実時間での処理を実現する試みがなされている。一般に、高精度な物体認識処理ほど多くの計算量を要するため、単一プロセッサ上でのソフトウェアによる実装では、しばしば処理時間や消費電力等の制約下で十分な性能を得ることが困難となっている。そのためマルチコアプロセッサや専用ハードウェアによる物体認識処理の高速化が強く求められている。

本研究の目的は、単一プロセッサでは不可能であった実時間での高精度な物体認識システムの構築に向けて、マルチコアプロセッサの性能を引き出すための物体認識システムの実装手法、および物体認識システムを効率よく実装するためのマルチコアプロセッサアーキテクチャの要件を明らかにすることである。

そこで本研究では最新のマルチコアプロセッサである Cell Broadband Engine (Cell/B.E.) と Graphics Processing Unit (GPU) 向けに物体認識手法を並列実装し、物体認識手法に適したプロセッサアーキテクチャを検討する。Cell/B.E. は近年のプロセッサとは大きく異なりキャッシュの機構を持たず、DMA 転送によりメモリアクセスを行う。そのためメモリアクセスのスケジューリングが特に重要なアーキテクチャである。一方 GPU は 1 次キャッシュを備え、さらに数百個のプロセッサコアが 1 チップに実装されており、非常に高い並列性を持ったアーキテクチャである。

一般に物体認識処理は物体検出と物体追跡の 2 つの処理から構成される。物体検出では入力画像全体をラスタスキャン順に走査して、物体の存在する座標を特定する。物体追跡では前フレームにおいて検出された物体について、次フレームにおいてその周辺をランダムに探索し、時系列に物体を関連付ける処理である。

これらの処理を Cell/B.E. と GPU 向けに並列実装することで、メモリアクセス手段が DMA 転送のみの Cell/B.E. ではメモリアクセスのランダム性のために並列性を高めることが困難な追跡処理を、GPU 実装ではキャッシュを用いることで高速化できた。一方、GPU は DMA 転送命令を持たないため、物体検出処理時のラスタスキャンによるメモリアクセスの際に、キャッシュミスによる性能の低下が避けられなかったが、Cell/B.E. における DMA 転送ではメモリアクセスの遅延を完全に隠蔽できた。これらのことから、現在の GPU のアーキテクチャに DMA 転送命令に類する機構、例えばキャッシュの明示的なプリフェッチ機能を追加することで、物体検出処理でのキャッシュミスを低減し、物体認識処理をさらに 1.6 倍高速化できることを示唆した。

本研究では、マルチコアプロセッサの使用とメモリアクセスの最適化により、単一プロセッサシステムに対し物体検出処理では 76 倍、物体追跡処理では 8 倍以上高速な物体認識システムを実現した。本システムを利用することで、例えば QVGA 画像、15fps の一般的な監視カメラにおいて、十分な処理速度と認識精度での物体認識が可能となった。

徐 亮 (吉田教授)

「Studies of Adaptive Radio Resource Management in Wireless Networks」

(無線ネットワークにおける適応無線資源管理の研究)

平成 22 年 3 月 23 日授与

無線通信は著しい発展を遂げており、携帯電話をはじめとして、無線 LAN、ブルートゥース、RFID 無線タグなどさまざまな無線通信の利用が急速に普及してきた。今後もその利用は拡大の一途をたどることが予想される。しかしながら、無線通信に適した電波の周波数は限られており、この有限の資源である無線周波数をいかにして最大限有効活用を図るか、適切な無線資源管理が喫緊の課題となっている。本論文では次世代携帯電話や次世代の無線 LAN を念頭において、適応的な高効率無線資源の管理、とりわけネットワークのスループット、遅延特性、周波数利用効率、公平性などの特性改善を図る手法について検討が行われ、得られた成果が示されている。

まず、無線 LAN の自律分散制御プロトコルが使用される場合、代表的な 2 種類の広帯域化手法であるチャンネル結合とマルチチャンネル技術に対して比較検討が行われている。その結果、低トラヒック時はチャンネル結合が、高トラヒック時にはマルチチャンネル技術が適しており、スループットおよび遅延特性が改善されることが得られている。この結果に基づき、無線 LAN メッシュネットワークを対象とした両技術の組み合わせ使用が提案されている。具体的には、端末・アクセスポイント間の通信ではパケットの衝突を低減できるマルチチャンネル技術、アクセスポイント間同士の通信では大容量伝送を実現できるチャンネル結合技術の使用が提案されている。計算機シミュレーションの結果、本組み合わせにより上りリンクの特性が改善されることが示されている。

また、マルチレート伝送無線 LAN においてマルチチャンネル技術が使用される場合、低速端末と高速端末が混在するとチャンネル利用効率が劣化する問題に着目し、レートに基づいたチャンネル割当法が提案されている。具体的には、レートが同じまたは近い端末がグループ化され、同一チャンネルに割当てられることが提案されている。計算機シミュレーションにより、ネットワークのスループット特性が改善されることが示されている。

次に、セルラーシステムにおける FFR (Fractional Frequency Reuse) チャンネル割り当てについて研究が行われ、セルエッジユーザの周波数利用効率を改善するための適応的な基地局連携送信が提案されている。すなわち、WiMAX など最近のセルラーシステムでは、セル間干渉を避けるために FFR が採用されることが多いが、セルエッジユーザの周波数利用効率が低い。そこで、一つのセルエッジユーザに対して複数の基地局が連携して同一チャンネルで複数ストリームを送信する基地局連携送信が考えられる。しかしながら、同一チャンネルで送信する基地局が増えるため、セル間干渉の増加によってセルエッジ周波数利用効率が低下する場合も見られる。そこで、基地局連携送信による容量改善効果がセル間干渉増加による容量低減効果を上回るユーザに対してのみ選択的に基地局連携送信を行うことが提案されている。計算機シミュレーションにより、セルエッジユーザの周波数利用効率の改善が可能であることが示されている。

加えて、FFR システムの公平性の改善のために、周波数利用効率の最も低いユーザから順に、基地局連携送信により公平性が改善される場合のみ選択的に基地局連携送信を行うことが提案されている。提案方式を用いることにより、ユーザ間の伝送容量の差が減少し、システムの公平性が改善されることが計算機シミュレーションにより示されている。

吉岡 裕典 (木本教授)

「Fundamental Study on Si Nanowires for Advanced MOSFETs and Light-Emitting Devices」

(先端 MOSFET および発光デバイスを目指した Si ナノワイヤの基礎研究)

平成 22 年 7 月 23 日授与

Si MOSFET は大規模集積回路 (LSI) の基本構成素子であり、スケールリング則に基づいた微細化による高性能化が進められてきた。しかし近年、ゲート長が 50 nm 以下に到達するに至り、短チャネル効果増大等の問題のため、更なる微細化が困難となっている。これを打開する方法として、Si チャネル部をナノワイヤ (NW) にして、その周囲をゲートで囲んだ新構造 (Si NW MOSFET) が提唱されている。Si NW MOSFET の断面径は、ゲート長より十分小さい必要があり、10 nm 以下となることが予想される。このような微細 NW では NW に垂直方向の量子閉じ込め効果が強くなり、バルクとは異なる電子状態 (物性) が顕在化する。一方で、Si NW は直接遷移型半導体となることが予想されており、Si LSI に適合する発光デバイス材料の候補としても期待できる。

本研究では、デバイス応用が期待されている Si NW の基礎物性を解明することを目的として、高品質微細 NW の作製、電子状態を元にした移動度や吸収係数の理論計算、NW MOSFET の移動度評価、NW pn ダイオードの発光特性評価を行い、以下の結果を得た。

(1) 電子線リソグラフィと犠牲酸化を用いたトップダウン的手法で微細 NW を作製し、最小サイズで幅 7 nm・高さ 2 nm の横長楕円形状の超微細 NW の作製に成功した (図 1)。

(2) 断面サイズ 18 nm から 4 nm の NW MOSFET を評価し、しきい値電圧の増加、正孔・電子移動度の変化からサイズ 8 nm 以下では量子閉じ込め効果が顕著となっていることを明らかにした。

(3) NW MOSFET における相互コンダクタンスの振動現象を説明する、一次元電子状態における電気伝導の理論モデルを提案した。振動の特徴は実験と理論でほぼ一致したことから、提案したモデルが妥当であることを確認した (図 2)。本モデルによれば、ドレイン電流振動の起源は、一次元状に閉じ込められたキャリアの振動する状態密度を起源とした移動度の振動であることが明らかとなった。

(4) 電子状態・吸収係数の理論計算から、Si NW の発光素子としての可能性を検討した。<100>NW は直接遷移であり、その吸収係数はバンドギャップエネルギーでピークを示し、そのピークはサイズの減少に伴い増加した。約 2 nm 以下の NW では、バルクの吸収係数より 1 桁以上大きくなり、発光効率の増加が期待できる。

(5) Si NW pn ダイオードを試作し、EL を評価した。1,200-1,300 nm でブロードなピークが現われた。NW では界面準位も多いと考えられ、バンドギャップより低エネルギーで発光が観測されたと考えられる。

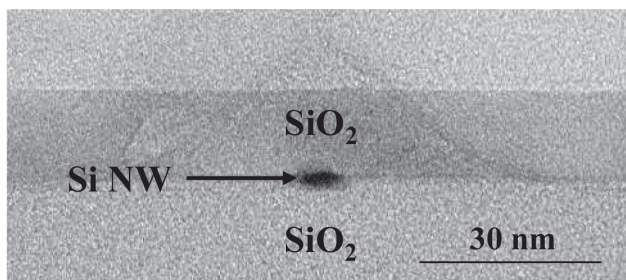


図 1 作製した Si NW の断面 TEM 像 (NW に垂直)。

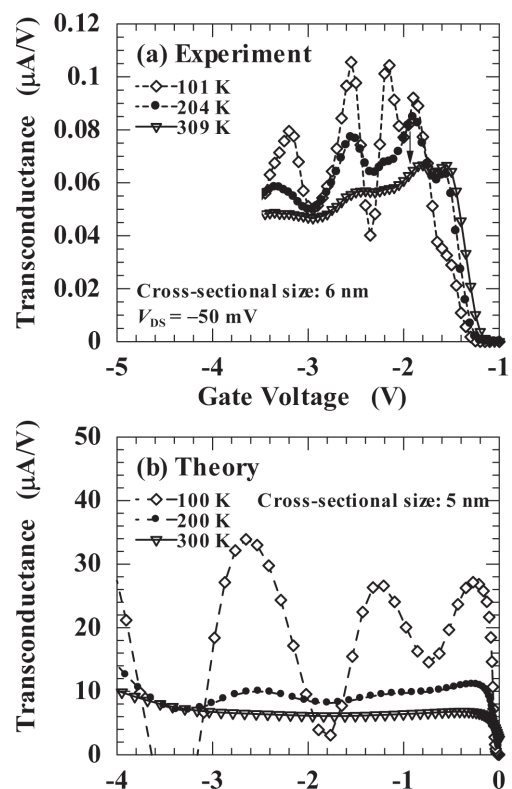


図 2 Si NW MOSFET の相互コンダクタンス：(a) 実験、(b) 理論。

Nathabhat Phankong (引原教授)

「Characterization of SiC Power Transistors for Power Conversion Circuits Based on C-V Measurement」

(SiC パワートランジスタの C-V 測定に基づく電力変換回路のための特性評価)

2010年9月24日授与

本論文は、ワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたパワーデバイスに関して、デバイス特性の実測により内部構造およびその物理現象に基づくモデルを検討し、回路解析に供することが可能なスイッチング特性を表現できるデバイスモデルを導出すると共に、導出したデバイスモデルを基にデバイスの優位性を生かした電力変換回路の設計を試みた結果をまとめたものである。

まず、SiC DiMOSFET, 横型の RESURF SiC JFET, 縦型の SiC JFET に関して、それぞれの特性を支配する MOS 形および pn 接合形からなるキャパシタンスを特定し、各素子の断面構造から導出されるキャパシタンスを求め、特性の端子電圧依存性および構造依存性を導出し、デバイス特性を支配するキャパシタンスの測定の必要性を示した。

次に、ゲート電圧駆動型のパワーデバイスに関して、5種類の測定回路からなる、3個の端子間キャパシタンスと2個の回路動作時の素子キャパシタンスの測定を可能にする C-V 特性の測定システムを新たに開発した。その結果、ゲートのバイアス値で決まるブロッキング条件の下で各キャパシタンス値の算出を可能にした。キャパシタンスがデバイス構造およびその動作を明確に反映することを実験に基づき明らかにした。

さらに、Si および SiC パワー MOSFET に関して、それらの広範囲の動作条件におけるデバイス特性を予測するため、端子間キャパシタンスに基づくデバイスの物理モデルを検討した。パワーデバイスの端子間キャパシタンスの電圧依存性から、C-V 特性に基づく I-V 特性をモデル化すると同時に、モデルパラメータを抽出し、パワー MOSFET のスイッチング特性を端子間容量に基づいて考察した。SiC MOSFET は Si MOSFET に比べこれらの端子間容量が小さく高速なオン、オフ動作を実現できることを確認した。また、縦型および横型 SiC JFET のスイッチング特性を、端子間キャパシタンスのゲートおよびドレイン電圧依存性、静的 I-V 特性の測定に基づき検討し、これらのモデルも構築した。

最後に、SiC パワー MOSFET を用いた高周波共振型スイッチングコンバータ回路を製作し、その素子特性を実用回路中において検証した。その結果 SiC パワー MOSFET がより高周波の共振に適していることを確認した。

以上の通り本論文は、ワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたパワーデバイスに関して、デバイス特性の実測に基づく特性評価からデバイスモデルを導き、SiC パワーデバイスの優位性を生かした応用回路を設計するために不可欠なモデルの構築とそのパラメータ同定に関して重要な知見を得ている。

改正清広（松重教授）

「プリンタブルエレクトロニクスに向けた走査プローブ顕微鏡応用ナノスケール液滴作製技術に関する研究」

平成 22 年 9 月 24 日授与

プリンタブルエレクトロニクスに用いる電子デバイスや生化学センサーの製造に向けて微少液滴作製技術の開発が求められている。オフセット印刷などの有版技術においては、既にナノインプリントリソグラフィ法によって数 10 nm の加工精度が達成されているが、これらの技術は電子線リソグラフィ法を始めとする原盤製造が必要になる。このため無版技術であるインクジェットプリンティング法に注目が集まっている。本研究室では分子エレクトロニクス、有機薄膜エレクトロニクスに向けてデバイス作製から特性評価までを行うだけでなく、走査プローブ顕微鏡を用いた形状観察・物性評価を行ってきた。そこで、本論文では、走査プローブ顕微鏡のひとつである原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy: AFM）を用いた微少液滴堆積技術に着目し、ダイナミックモード AFM を用いた液滴堆積技術を開発することとした。これにより、既に報告されているコンタクトモード AFM を用いた微少液滴堆積技術での液滴形成における試料表面のぬれ性の影響を低減できることが期待できる。

開発した微少液滴堆積技術の概念図を図 1 に示す。AFM の中空探針近傍部に集束イオン顕微鏡を用いて直径数 100 nm の開口が開けられており、試料溶液は中空探針部に貯蔵される。探針が試料表面に近接した状態でカンチレバー背面コーティングと導電性試料基板に電圧パルスを加えることにより、開口部から試料液滴が導電性基板上に堆積される。

本技術を開発するにあたって、試験溶液として蒸気圧が極めて小さく電解質のみからなる常温で液体のイオン液体を用いた。その結果、パルス持続時間数秒の 10 V 程度の直流電圧パルスを用いることによりzeptoliterオーダーの液滴の堆積に成功した。さらに、これらの液滴をアレイ状に堆積することにより薄膜の作製が可能であることを示した。次に本技術を電子デバイス作製へ応用するため、一般的な有機溶媒（グリセリン）を用い機能性物質の堆積を行った例を図 2 に示す。溶液は  $6.2 \times 10^6 \text{ pL}^{-1}$  の濃度で直径 10 nm の Au コロイドをグリセリンに溶解して作製した。堆積された液滴の表面形状を取得することで、単一または複数個の Au ナノ微粒子が堆積できていることが確認できた。

このように本論文はダイナミックモード AFM を用いた有機溶液の液滴堆積技術を実証したものであり、AFM を用いた微少液滴堆積技術の応用可能性をプリンタブルエレクトロニクス等の分野へ広げたとと言える。

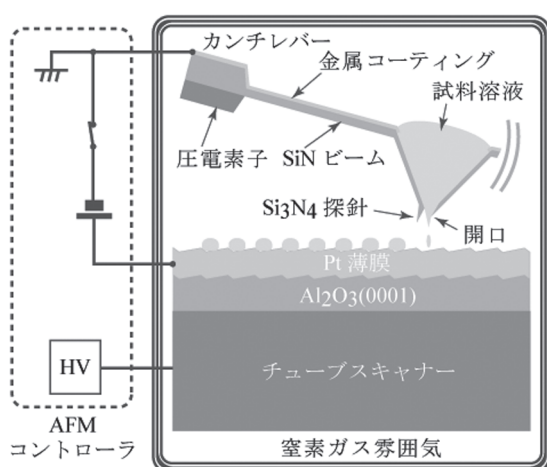


図 1：微少液滴堆積技術の概念図

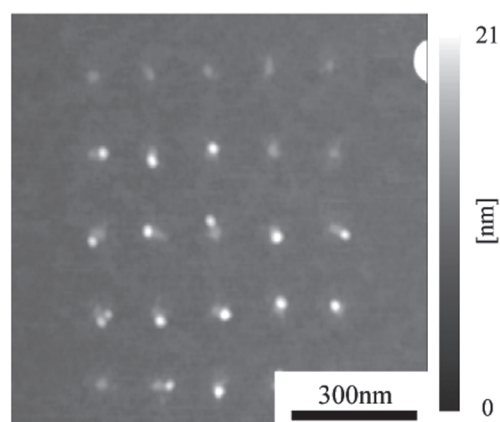


図 2：Au コロイドグリセリン溶液を用いて作製した  $5 \times 5$  液滴アレイ

Mohammad Lutfur Rahman (白井教授)

「Hybrid Offshore-wind and Tidal Turbine generation system (HOTT)  
(洋上風力・潮力ハイブリッド発電システム)」

平成 22 年 9 月 24 日授与

本論文は、洋上風力発電に潮力発電を一体化させたスタンドアローンのハイブリッド発電システムを提案し、その構成要素・回路構成・制御法の設計検討を通して、出力変動の平滑化効果・系統連系時の影響を論じた結果をまとめたものである。まず、洋上風力および潮力の潜在資源量について述べ、風力発電については、単機容量の増大とともに、ウィンドファームとしても大容量化が進み、洋上風力発電システムも導入されてきているが、それに伴い出力変動の連系系統への影響が顕在化していること、一方潮力発電は、出力変動は小さいものの大型化に難があり本格的な実用化に到っていないことを踏まえて、両者を一体化させたハイブリッドシステムを提案し、両者の長所を生かしたシステム構成・制御法を検討し、その有用性を明らかにすることを目的としている。

まず、提案する洋上風力・潮力ハイブリッド発電システムの構成要素・回路構成の設計を行うため、電力系統過渡シミュレーションソフトウェア (PSCAD/EMTDC) を用いてシミュレーション研究を実施した。各構成要素のシミュレーションモデルを構築し、風力と潮力の二種の発電システムを交流系あるいは直流系で連系したのち直流送電する回路構成を取り上げ、6. 3MW クラスのシステムを設計した。連系点電圧と直流送電電力を制御対象として電力変換器の制御系を設計し、典型的な風況の変動に対する動特性応答シミュレーションを行い、ハイブリッド化による出力変動の抑制を確認した。さらに、大きな風力変動を入力として、交流連系および直流連系それぞれでシミュレーションを実施し、直流連系が安定性において有利であることを明らかにした。

さらに、シミュレーション結果をもとに設計製作したハイブリッド発電システムの試作実験モデルとこれを用いたモデル実験を実施した。試作モデルシステムでは、風力発電モデルは、大容量を想定して同期発電機とダイオードブリッジ整流器による単純な構成とした。一方、潮力発電モデルは、小容量を想定し、出力の制御が容易となるよう誘導機と双方向コンバータからなる構成とした。さらに潮力タービン (サーボモータで模擬) から誘導機へのトルク軸に一方向クラッチを設け、誘導機をフライホイールとして動作させエネルギー貯蔵機能を持たせる構成を新たに提案した。二つの発電モデルは直流で連系され、昇圧チョップ回路を介して系統連系コンバータで所内電源につながる。モデル実験では、まず連系点直流電圧を系統連系コンバータの最大電力追従制御 (MPPT) によって制御することで、ハイブリッド発電システムが安定に動作することを確認した。続いて、風力発電の出力変動を補償することを目的として、潮力発電の出力制御に関して2ケースの模擬実験を行った。まず、潮力タービンからの入力を制御することで、一方向クラッチを on/off 動作させ、誘導機を発電機モードから電動機モードあるいはその逆にスムーズに移行できることを示した。電動機モードでは回転エネルギーによるエネルギー蓄積によって、エネルギーの貯蔵・回生 (フライホイール運転) ができることを確かめた。次に、双方向コンバータの PWM 制御によって潮力発電用誘導機に印加する電圧の周波数を制御することで、潮力発電の出力が高速に制御できることを示した。最後に、風力発電の出力が変動した場合に、前述した潮力発電出力制御によってこれを補償する模擬実験を行い、システムの有用性を確認した。

以上、大容量化する洋上風力発電システムでの風況による出力変動を抑制するため、提案した洋上風力発電に潮力発電を一体化したハイブリッド発電システムは、それぞれの短所を補完しあって安定した発電システムとなるとことを明らかにした。

工藤 理一 (守倉教授)

「Efficient Spatial Resource Management for Broadband MIMO Systems」

(広帯域 MIMO システムにおける空間リソース制御法の研究)

平成 22 年 9 月 24 日授与

無線通信の普及および高速化の要求から、Multiple input multiple output (MIMO) 技術による空間リソースを用いた周波数利用効率の向上が研究されている。MIMO 技術により得られる周波数利用効率は送受アンテナの小さい方の数に比例するため、実用化するためには、ユーザ端末に用いることのできるアンテナ素子数が、装置回路規模、消費電力、小型化の要求から制限される場合においても、周波数利用効率を増大することが可能な技術が必要となる。本論文は、図 1 に示す、Asymmetric MIMO、Multiuser MIMO、Cooperative MIMO、Optical MIMO の 4 つのチャンネル構成に注目し、演算負荷の軽減および周波数利用効率の増大を実現する空間リソース制御技術について提案を行い、理論検討と伝搬実験の両面からその特性を検証した。本研究の主な成果は以下の通りである。

1. 送信素子数が受信素子数より多い Asymmetric MIMO 構成について、アンテナ素子数に対する伝送容量の解析結果と非対称 MIMO チャンネルにおける簡易指向性制御法の効果を示し、OFDM システムにおける相関行列指向性制御法と STBC の組み合わせによる送信方法の提案を行い、レイリー及びライスフェージング環境における特性を明らかにした。
2. Multiuser MIMO 構成における伝送容量について評価し、Multiuser MIMO 用の電力制御方法とユーザ選択方法を提案した。ユーザ選択方法では、シングルユーザ MIMO と Multiuser MIMO の伝送容量の関係から、固有値減衰係数が Multiuser MIMO の効果を示す指標となることを明らかにした。さらに、屋内の実伝搬環境において、実際に送信を行い効果を検証した。
3. 更なるシステムスループットの改善のため、複数のアクセスポイントが協調する Cooperative MIMO チャンネルに注目し、集中制御シナリオと分散制御シナリオにおいて、それぞれゼロフォーシングにより指向性制御を行う空間リソース制御方法を提案した。計算機シミュレーションと実伝搬環境で測定したチャンネルからゼロフォーシング送信の適用領域とその効果を明らかにした。
4. MIMO 技術の光通信への応用を示した。長距離伝送用の受信構成におけるオーバラップ周波数領域等化を用いた波長分散補償と時間領域等化の組み合わせと、受信側の ADC のクロックレートを低減する等化方法を提案し、伝送実験により効果を示した。

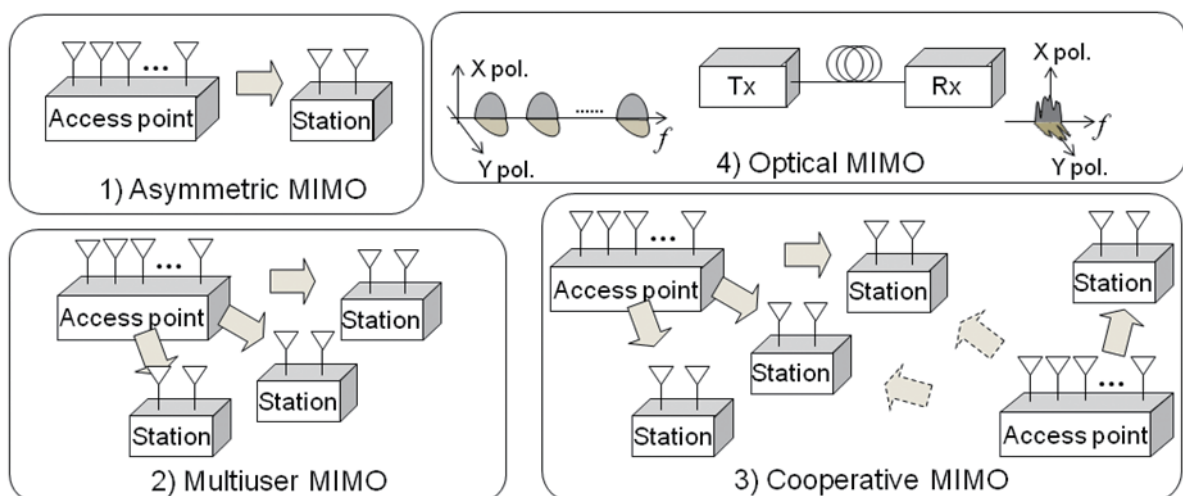


図 1. 検討したチャンネル構成

## 高校生のページ

# 生物と電気と数学と —数式やコンピュータを使って生命を理解し、新しい医療をめざす—

工学研究科電気工学専攻複合システム論講座  
土居伸二

## 1. はじめに

このページを見ている高校生の皆さんは、電子技術とかエレクトロニクスとかに興味があり、電気電子工学科のホームページから、この記事にたどり着いたのかも知れません。そこで出会った「生物・電気・数学」という言葉に興味、もしくは困惑を覚えているのではないのでしょうか。「これらの言葉にいったい何の関連があるのだろう…」以下では、これらの言葉が密接に関係していることを説明し、生物・生命の不思議な世界への誘いを試みてみたいと思います。

もちろん、ここでの生物という言葉は「せいぶつ」と読み、「なまもの」とは読みません（「そんなの当たり前だろう!」）。しかし、実は、この「なまもの」というニュアンスが大変大事なのです。ハードウェア (hardware) という言葉は聞いたことがあると思いますが、実は生物（を構成する部品や分子機械）をウェットウェア (wet ware) と呼ぶことがあります。まさに「なまもの」という感じですね。もちろん、(ほとんどの) 生物は湿っていて乾いてはいません。でもウェットウェアという言葉を使うときは、単に生物が湿っているという事実を述べるのが目的ではなく、生命を維持するためには、水が大事、湿っていることが本質的であることを強調したいときです（「そんなことは当たり前じゃん」「我々は水を飲まないと生きていけないし」…）。しかし、皆さんの中に、私たちの身体の中で水がどのような役割を果たしているのか、真剣に考えたことのある人は、どれくらいいるのでしょうか？

以下では、医学・生物学の中で、特に電気生理学という分野に焦点を絞って話をしたいと思います（水との関わりも含めて）。ご存じのように、私たちの脳では莫大な数の神経細胞が巨大なネットワークを形成しています。図1は、たった3個の神経細胞（ニューロンとも呼びます）のネットワークの模式図です。神経細胞は、普通の細胞のように丸くはありません。比較的丸い細胞体と呼ばれる部分と、そこから長く伸びた軸索、さらにはトゲのような樹状突起が沢山ついており、それら全体が一つの細胞になっています。最も大切なことは、神経細胞が活動電位（神経インパルス）と呼ばれる電気信号を発生させることです。細胞体（の一部）で発生した活動電位が軸索を伝わってゆき、シナプスという部分で別の細胞に信号を伝えます。脳の中で、このような電気信号が行き来することそのものが、私たちが見たり、聞いたり、考えたりすることなのです。脳は、いったいどのような仕組みで動いているのでしょうか？

もちろん、そのような仕組みはほとんど分かっていませんが、脳活動の基盤である神経細胞の活動電位が生じる仕組みやコンピュータや数式を用いた医学・工学融合研究について簡単に紹介しましょう。

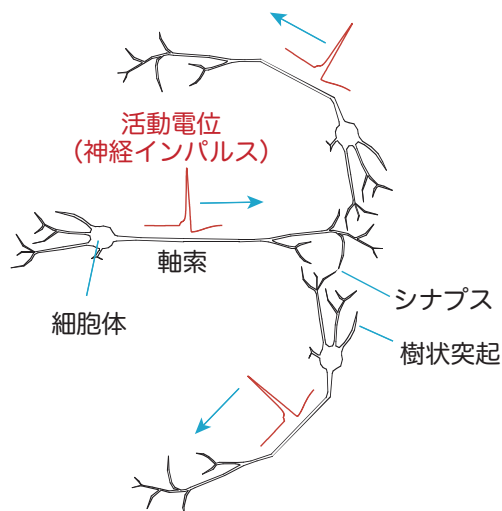


図1：神経細胞（ニューロン）のネットワーク。



## 2. 生物の細胞と細胞膜の自己組織化

細胞が細胞膜で囲まれていることはご存じでしょう。植物の細胞がさらに細胞壁というもので囲まれていることを覚えている人もいるかも知れません。とにかく、私たちの身体を構成する細胞は、細胞膜で内と外を区別することで「細胞」たり得るのです。図2は、そのような細胞の模式図です。細胞内外のイオン濃度も記述していますが、それについては後述します。さて、右の図が細胞膜の拡大図です。丸い頭と2本の足を持つように書かれているのが一つの分子で、リン脂質と呼ばれる物質です。リン脂質分子が2重に並んで細胞膜を形作っているのが分かります。このような規則正しい構造を、生物はどのように（誰が）作り出したのでしょうか？ 実は、このような構造は「勝手に」できるのです（自己組織化と言います）。皆さんは、物質には水に溶けやすいものと溶けにくいものがあることをご存じでしょう。細胞膜を構成するリン脂質という物質は、水に溶けやすい性質と溶けにくい性質を両方持っています。水に溶けやすいということは、その物質が水となじみ（ひっつき）やすいことです。リン脂質分子の丸い頭の部分は水に溶けやすく、親水性（水と親しい）の性質があります。一方、2本の足は水に溶けにくく、疎水性（水と親しくない）です。このように、リン脂質分子は親水性・疎水性の両方の性質を合わせ持つので、水の中では、親水性の部分を外側（水と接する側）にし、疎水性の部分を内側にするという構造を「自動的（自発的）」に取るのです。つまり、このような状態が安定なのです（イメージできるでしょうか？）。いずれにしても大事なことは、このような安定状態は「水の存在を介して」実現されているということです。このように、生物の構造や生物の体内で行われている代謝・分子反応には、水が本質的に関わっているのです。

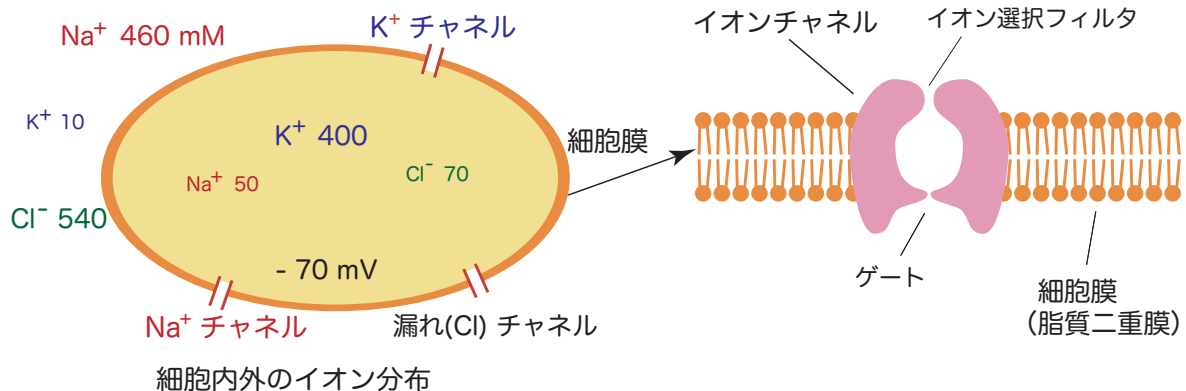


図2：細胞内外のイオン分布と細胞膜上のイオンチャネル

## 3. イオンチャネルと活動電位発生のしくみ

さて、生物と電気との関わりについて話をするために、少し先を急ぎましょう。図2には、生物の細胞内外の典型的なイオン濃度を示してあります。ナトリウムイオンは、通常、細胞外で濃度が高く、細胞内で濃度が低くなっています（濃度が高いイオンを模式的に大きな文字で表示しています）。また、細胞膜には、イオンチャネルというイオンを通す穴があります。普通のイオンチャネルは、特定のイオンだけを通します。例えば、Na<sup>+</sup> チャネルはナトリウムイオン Na<sup>+</sup> を通しますが、カリウムイオン K<sup>+</sup> は通しません。図右の細胞膜の拡大図には、イオンチャネルを模式的に描いてあります。イオンチャネルは細胞膜を貫通するタンパク質できています。タンパク質は巨大な分子ですが、それにも疎水性の部分と親水性の部分が存在します。疎水性の部分と親水性の部分とが膜の内部に納め、親水性の部分と膜の外部に突き出しています。ここでも、水の存在が、イオンチャネルを正しく配置するために役立っています。

イオンチャネルはイオンを通す穴だと述べましたが、図2を見て疑問を抱いている人もいないのではな

いでしょうか。「イオンがイオンチャネルを通るのなら、細胞内外でイオン濃度差が存在するのはおかしい。時間が経てば濃度差はなくなるのでは？」その通りです。イオンチャネルは、いつでもイオンを通すわけではなく、動的に開閉することでイオンを通したり通さなかったりするのです。通常の状態では、 $\text{Na}^+$  チャネルは閉じていて  $\text{Na}^+$  を通さないのです。また、濃度差を維持するためのイオンポンプという仕組みも、細胞膜上に存在するのです。

図には、模式的にゲートというものを描いてありますが、イオンチャネルは複数のゲートを用いて、イオンチャネルの開閉を調節しています。ここで、注目してほしいことがあります。イオン選択フィルタというものを描いてありますが、主にこれが  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  を区別するセンサーなのです。いったいどのようにして、イオンチャネルというタンパク質がそれぞれのイオンを「認識」するのでしょうか？ その仕組みは完全には分かっていませんが、近年の計測技術の進歩とともに、徐々にその姿が明らかになりつつあります。生物は、このように小さなものですら、精巧に作られた「分子機械」から成り立っているのです。面白いですね。

先ほど、私たちの脳は活動電位（神経インパルス）という電気信号を用いて様々な情報処理をしているという話をしましたが、次に、イオンチャネルが活動電位を発生させる仕組みについて説明しましょう。図3は、通常の状態（静止状態と言う）での細胞膜の模式図です。静止状態では、 $\text{K}^+$  チャネル

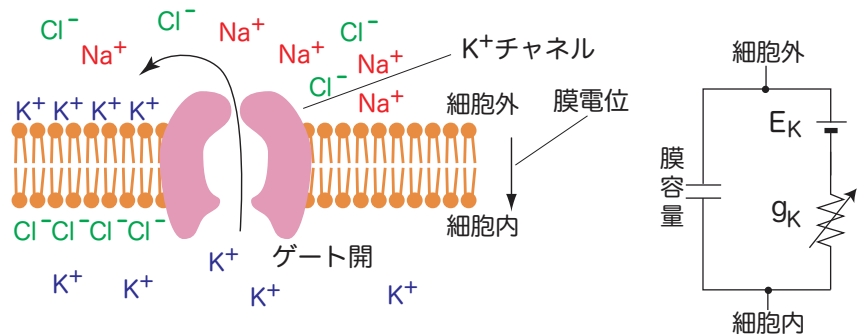


図3：イオンチャネルと等価回路。

はほとんど開いています。上でも述べましたように、 $\text{K}^+$  イオンは細胞内で濃度が高く、細胞外で低くなっています。したがって、 $\text{K}^+$  イオンは細胞内から細胞外へ出ようとします。（しかし、どんどん細胞外へ流れていくと、細胞内が電氣的に負になり、正の  $\text{K}^+$  イオンを引き戻す力が働きますので、 $\text{K}^+$  イオンが流れ続けることはありません。）とにかく、たまたま、いくつかの  $\text{K}^+$  イオンが細胞外に出てしまった状況を考えて下さい。正のイオンが細胞外に出てしまうと、細胞の内と外それぞれの電荷のバランスが崩れます（電氣的に中性でなくなる）。そうすると、細胞外に出てしまった  $\text{K}^+$  イオンは、細胞内の負イオン ( $\text{Cl}^-$  イオン) と細胞膜を隔てて向き合う（引き合う）ことで、そのようなバランスを保とうとします（図3の左側の図を見て下さい）。正と負の電荷が薄い層（細胞膜）を隔てて向き合っている状況をどこかで見たことはありませんか？ そうです。コンデンサーですね。細胞膜は絶縁体ですので、電氣的にはコンデンサーとして働きます。コンデンサーに電荷が蓄えられると細胞膜（の両側）には電位差（膜電位）が生じます。図から分かりますように、この状態では、細胞内は細胞外より電位が低くなっています。

図3の右側の図は、左側のような状況を模式的に電気回路で表現した図です（等価回路と言います）。細胞膜のコンデンサーとしての働きを膜容量で表し、そこに電池  $E_K$  と可変抵抗  $g_K$  がつながっています。電池は、 $\text{K}^+$  イオンが細胞内から細胞外へ出ようとする作用を表現しています（電池の正負の向きに注目して下さい）。可変抵抗は、 $\text{K}^+$  チャネルを表しています。イオンチャネルは、イオンを通しますから電流が流れますので、抵抗と考えられるわけです。抵抗が可変になっているのは、イオンチャネルは動的に開閉しますので、抵抗値が変化するからです。

前にも述べましたように、神経細胞の静止状態では  $\text{Na}^+$  チャネルは閉じています。次に、何らかのき

っかけで  $\text{Na}^+$  チャンネルが開いた状態を考えましょう。図4は、そのような状況を表しています。図3では、細胞の内側に負のイオンが、外側には正のイオンが配置し、細胞の内側は外側に対して電位が低くなっていました。 $\text{Na}^+$  は ( $\text{K}^+$  とは逆で) 細胞外で濃度が高く、細胞内で濃度が低くなっています。したがって、 $\text{Na}^+$  チャンネルが開くと、 $\text{Na}^+$  は細胞内に流れ込もうとします。その結果、細胞の内側に配置していた負イオンの代わりに  $\text{Na}^+$  が内側に配置し、それと引き合うように細胞外の負イオンが外側に配置します。つまり、今度は、細胞内の電位は細胞外に対して正になります。その後 (2, 3 ミリ秒の後)、開いていた  $\text{Na}^+$  チャンネルは自動的に閉じて、再び図3の状態に戻り、細胞内の電位 (膜電位) は細胞外に対して負になります。

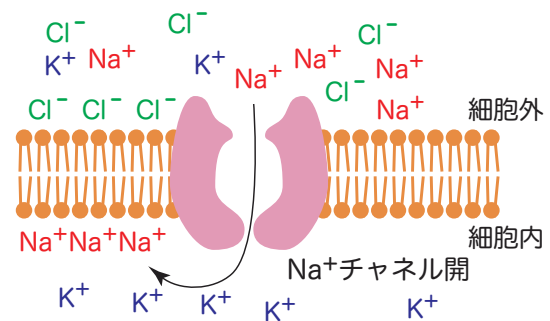


図4:  $\text{Na}^+$  チャンネルが開くと…

これまでは、 $\text{K}^+$  チャンネルと  $\text{Na}^+$  チャンネルを別々に説明してきましたが、実際の細胞膜上には  $\text{K}^+$  チャンネルと  $\text{Na}^+$  チャンネルが混在しています。これらをまとめて等価回路で表したのが、図5の上の図です。生物の細胞 (膜) を電気回路で表現するのですから、相当大胆な表現 (近似) であると言えます。電気回路で表現できると、それを数式 (微分方程式) を用いて調べることができます。図5の下の図は、その数式をコンピュータで解いた (シミュレーションした) 図です。縦軸は、膜電位をミリボルト (mV) で、横軸は時間経過をミリ秒 (ms) で表しています。上で説明しましたように、外部からの刺激 (入力) が神経細胞に加わると、それをきっかけとして  $\text{Na}^+$  チャンネルが開き、 $\text{Na}^+$  イオンが細胞内に流入します (図で下向きの矢印は、 $\text{Na}^+$  が細胞外から細胞内へ流れ込むことを表しています)。その結果、細胞内の細胞外に対する電位が高くなります。その後、 $\text{Na}^+$  チャンネルが閉じて、 $\text{K}^+$  イオンが細胞外に流出するようになります。そして、再び細胞内の電位が下がるのです。

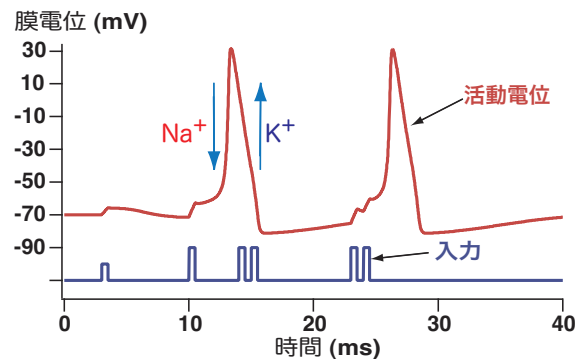
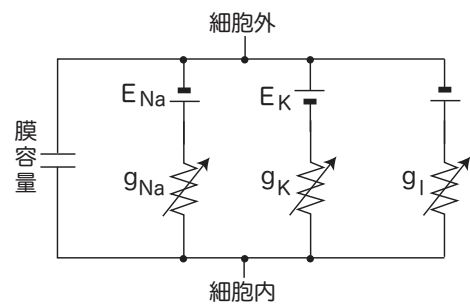


図5: 細胞膜全体の等価回路と活動電位波形。

コンピュータで方程式を解いた結果は、神経細胞で発生する活動電位 (神経インパルス) を極めて精密に再現しています。生物のような不思議な存在を数式で表現し、コンピュータを使って生物のふるまいを調べることができるのですから、驚きですね。実際、この微分方程式を提案したホジキンとハクスリーは、1963年にノーベル生理学・医学賞を受賞しています。

コンピュータを使って神経細胞のふるまいを調べられるということは、コンピュータ上のプログラムとして仮想神経細胞を作ることができると言えます (電気的な性質に限ってですが)。図1の説明では、脳は大規模な神経細胞ネットワークであると述べましたが、では、スーパーコンピュータ上のプログラムとして沢山の仮想神経細胞ネットワークを構築したら、仮想脳ができるのでしょうか? これは、まだほとんどできていませんし、将来のいつにできるとも言えません。そこで、次は、もう少し実現性の高い話をしましょう。

#### 4. 数式を用いた心臓の計算機シミュレーションと医学応用

心臓は、(特殊な) 筋肉細胞のかたまりであり、筋肉細胞は電気信号が伝わると収縮する性質があります。つまり、心臓や筋肉は電気信号によって制御されているのです。神経細胞と同様に、筋肉細胞が生成する活動電位が、これらの制御において大切な役割を担っています。

図6には、心臓の模式図とともに、心臓の場所ごとの活動電位の違いを示しました。心臓の場所(細胞)ごとに活動電位の形が相当異なることに注意して下さい。これらの違いは、心臓が機能するうえで重要な意味を持っているのです。心臓の図の左上(実際は右心房です)にある洞房(どうぼう、または、とうぼう)結節では、図に示したような活動電位が、約1秒間隔で周期的に発生します。この周期的電気信号が、左右心房の細胞や左右心室の細胞へ適切な順序で伝わることで、心臓全体が血液を送り出すポンプの役割を果たすのです。このように、洞房結節は心臓のリズムを調節するためのペースメーカー(歩調取り)の役割を担っていますので、洞房結節細胞のことをペースメーカー細胞とも呼びます。ペースメーカーという言葉は知っていますね。そうです、ペースメーカー細胞が何らかの原因でうまく働かない病気になると、ここに人工の電気回路を埋め込んで、ペースメーカー細胞の代わりに周期的電気信号を発生させるのです。この人工の装置もペースメーカーと呼ばれます。

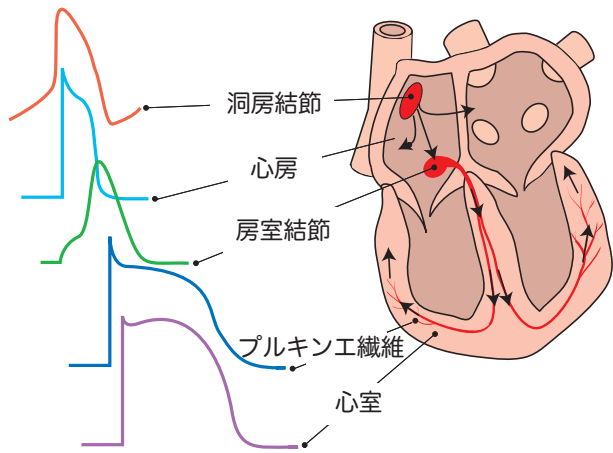


図6：心臓の各部位における活動電位の違い。

心臓は、ポンプの役割を果たすと言っても、私たちの周りにある人工のポンプとは相当異なる形と仕組みを持っています。このような袋の形をしたものが、ポンプの役割を果たすのは不思議ですね？上で説明しましたように、ペースメーカー細胞からの電気信号が「絶妙なタイミングで」心臓各所に伝わることで、見事にポンプの役割を果たしているのですが、そのタイミングがおかしくなると心臓の機能が悪くなるのです。心臓の多くの病気は、これまで説明してきたイオンチャネル(と活動電位)に深く関わっています。イオンチャネルの異常が原因で発生する病気のことをイオンチャネル病と呼ぶことがあります。イオンチャネル(や活動電位発生)のどのような異常が、どのような心臓病を引き起こすかは、まだ分からないことが沢山あります。このような病因を、生物実験や臨床での観察・治療だけで明らかにすることは大変難しいのです。このためには、コンピュータを使ったシミュレーションが役に立ちます。

神経細胞と同様に、心臓の細胞(心筋細胞)が作り出す活動電位も、方程式を解くことで再現することができます(ただし、心筋細胞の方程式は神経細胞の方程式とは異なります)。図7は、心室筋細胞の方程式をコンピュータで解いた結果を示しています。神経細胞の活動電位とは相当異なる形をしていますね。もう一つの大きな違いは横軸の時間スケールです。単位は、どちらもミリ秒ですが、神経細胞では二つの活動電位の間隔が十数ミリ秒だったのに対して、心臓では数百ミリ秒です。私たちの心臓が約1秒(1000ミリ秒)周期で動いていることに対応

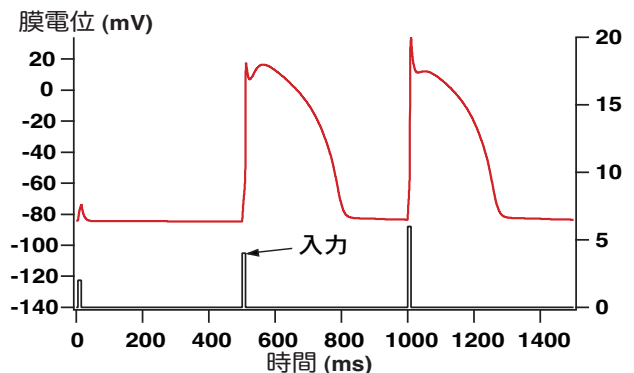


図7：心室筋の活動電位を計算機シミュレーションで再現したもの。

しているわけです（ただし、図7は動物の心筋細胞を表現していますので、人間よりは周期が短い（心拍数が高い）のです）。

## 5. おわりに

生物や生命現象のメカニズムを数式やコンピュータを用いて明らかにするという研究の一端を神経細胞や心臓の筋肉細胞の生成する活動電位を例として紹介しました。活動電位は、ここで述べたもの以外にも、膵臓のインシュリン分泌細胞（糖尿病に関係しています）、植物やゾウリムシの生態など、様々な生命現象において本質的で重要な役割を担っています。

生物は、実に不思議で巧妙な仕組みを用いて生きています。一方、現代の科学技術は、まさに日進月歩で発展しています。それでも、生物や生命の仕組みは分からないことだらけです。宇宙・地球や生命進化の歴史に、畏敬の念を抱かずにはいられません。そのような生物・生命の仕組みを明らかにするために、電気工学（やシステム工学）が大変役に立つことが分かって頂けたでしょうか？（ただし、ここで紹介した生命現象は、ほんの一部ですが…）生物や私たちの身体が成り立っているメカニズムが明らかになれば、高度な先端的医療の開発に直接結びつきます。それだけでなく、生物に学べば、マイクロな（ナノサイズの）機械や知的なセンサー・ロボットなどの開発にも役立ちます。また、生物社会には人類社会が学ぶべきことが沢山あります。陳腐な表現ですが、生物と生命現象は研究テーマの宝庫であり、私たちの社会のあるべき姿や進むべき方向を教えてくれる羅針盤なのです。

**学生の声****「自己成長の場」**

工学研究科 電子工学専攻 木本研究室 博士後期課程2年 奥村 宏典

『ピンチはチャンス』という言葉がある。不利な状況に陥っても、それを乗り越えることで、むしろ有利な状況になるというもの。修士課程では、無計画の一人旅、単独での国際会議の参加などを経験してきた。どれも直前に不安に駆られたが、これらの経験のお陰で、海外留学に行く際は不安より楽しみの方が大きかった。“自信がなくてやりたくない”と思う事ほど、自分を成長させるチャンスだ。

私にとっては博士後期課程もその一つである。進学前、“私で通用するのだろうか”といった不安があった。しかし、この3年間というのは、興味のある教科書をゆっくり読むことができ、仲間と何時間でも議論できる。気になったことを直に試す、実験設備やその使用資格もある。研究・開発者の基礎固めとして、非常に有意義な時間になったと思った。実際に博士後期課程に進んでみて、実験装置を例にしても、使用方法だけでなく、その原理から応用まで学ぶことができた。具体的には、透過型電子顕微鏡 (TEM) に関して、修士課程まで、マニュアル通りに使用すれば結晶中の欠陥が観察できるという程度の認識だった。今では、電子線の結晶中での回折状況や各レンズや絞りの役割を踏まえた上で、高分解能 (HR)-TEM により、結晶を原子レベルで観察している。この経験や知識は、修了後も活かせると信じている。今後も、自己成長のためであれば、不安な道でも積極的に選択していきたい。

成長したい根本的な理由として、“人の役に立ちたい”という思いがある。私は、より高いスキル、より幅広い知識を持つことで、より強く社会に貢献できると信じている。自己成長に欠かせない要素は、環境、つまり先生や友達、家族らの支えである。誰か一人でも支えが無くなれば大きな向上は見込めない。彼らの恩恵の下 (感謝しつつ)、自分を限界まで磨きたい。そして、得られた経験や知識を社会に還元したい。もう26歳、されどまだ26歳。まだまだ出来ることは山ほどある。

『他人のために尽くす人生こそ価値ある人生だ』 Albert Einstein

**「とある暇人の思考」**

工学研究科 電気工学専攻 小林研究室 博士後期課程2年 笹山 瑛由

博士後期課程学生の生活は基本「暇 (スコレー)」です。学会発表やその原稿のメットという制約条件がない限り、「暇」です。「暇」だからこそ、他分野の学問も探求でき、そこから新しい研究分野を開拓できるのです。一方、「暇人」の宿命なのか、さまざまところから雑用 (?) がきます。頻繁にあるのが、後輩からプログラムの実装方法やバグの原因について尋ねられることです。ただ、指導することで後輩の成長を見ること、また、その後輩がさらに下の学年の後輩を指導している姿を見ることで、一種の達成感を味わうことができます。そのため、この類の雑用に関しては喜んで引き受けています。

何はともあれ、「暇人」は「暇」なので日々さまざまなことを考えます。その一つが、研究者としてどのような心構えであるべきかということです。私は、脳信号を抽出することで機械を操作する、ブレインマシン・インタフェース (BMI) の研究を行っています。BMI は、全身麻痺でさらに声も出ない患者さんのコミュニケーションツールとなるなど、福祉の分野で期待がされています。私の身近な人にも障害者があり、その人のために現在の研究テーマを選びました。BMI の研究を進める中で、高度な数学を用いて脳信号をいかに適切に信号処理するか、また、それを実現するソフトウェア、ハードウェアをどのように実装するか、など学術面・応用面で面白い研究分野であることが分かり、現在ではこの研究をすることに快樂を覚えるほどです。一方、研究に快樂を覚える自分が、はたして正しい研究をしているのか考え込むことがあります。とある BMI の研究会で、BMI の研究者の一人が、「そのうち BMI によって思い通りに機械を動かせますよ。」と軽い口調で発言したことに対し、聴講していた患者さんが「では、いつそれができるんですか！」と怒鳴ったために、その会場がしばらく静まり返ったことがありました。その光景が時折脳裏に浮かび、次のようなことを思います。「今日、明日命が無くなるかもしれない患者さん、日々障害に苦しむ知人を目前にして、ゆったりと研究していいののか」と。先述の研究者のように、私も含め多くの研究者は、研究が楽しくそれに没頭するがために、世間が見えなくなる傾向があるのではないのでしょうか。研究が自己満足に陥っていないか、時には再考すべきようです。

## 教室通信

## 学科長退任にあたって

電気電子工学科長 北野正雄

本年3月で電気電子工学科長としての役目を終えることになりましたので、2年間の任期中にお寄せいただきました数多くのご協力へのお礼と現況のご報告を兼ねて教室通信に寄稿させていただきます。

前任の佐藤亨教授には初代の公選制学科長として3年にわたり、学科の新しい体制づくりにご尽力いただきました。2代目としましては、路線を伸延する方向でスムーズに仕事をさせていただくことができました。

高校との連携に関しては、出前授業、生徒の研究室への受入れ、高校教員の研修など、高校における理科教育や体験型授業を支援する活動が徐々にではありますが拡充されてきました。本誌cueに連載の「高校生のページ」の抜き刷り特集号は多くの高校生に配布されています。また、受験生向けのWEBページも拡充されています。これらの連携活動は受験生の囲い込みという短期的視点ではなく、中等教育における理系の教育環境の改善に少しでも貢献できればとの思いで行われています。

最近、本格的な改訂が行われた学部のカリキュラムも今年は3回生までの進行することになり、完成形に近づいています。科目間の関係を表す精細な系統樹も新たに描かれ、学生指導に活用されています。また改革が予定されている全学共通科目(教養科目)との接続の調整や、桂移転時の本格改訂以来、8年が経過している学生実験の見直しなどが今後の課題となっています。

共通的課題としては、大学生活に適應できない学生が急増していることへの対策として初年次教育の必要性が認識されており、その内容や実施方法を検討してゆく必要があります。また、産業界からはキャリア教育の拡充や国際化対応(英語の訓練)が要請されています。さらには、半期15週の講義時間の確保という国の指導に従うべく、窮屈なアカデミックカレンダーの導入が予定されており、休業期間の大幅な短縮に伴う課外活動や入学試験などへの影響が懸念されています。このような外部からの要請については、その教育的意義や効果を的確に判断し、対応を考えてゆく必要があると思われまふ。

昨年秋には新たな試みとして、洛友会の主催で「先輩と学生との交流会」を開催していただきました。外形的には合同企業説明会に酷似していますが、趣旨としては、現役の学生と企業で活躍中のOB諸氏との交流の場を設定することで、電気電子工学と社会の関わりを身近に感じてもらい、勉学、研究への意欲を高めることを目指しています。

エレクトロニクス・サマーキャンプは回を重ね3年目になりました。昨年は、ペットボトル分別ロボット(1回生)、1チップマイコンによる電子楽器(2回生)、飛行船のラジコン制御(3回生)という課題が設定され、約60名の学生が最終日のコンテストに向けた熱い3日間を体験しました。

大学院では博士課程への進学率の低下が問題となっていました。修士博士一貫コース、副指導制、GCOEによる経済的支援、海外派遣、研究室横断セミナーなどのさまざまな取り組みが効を奏し、改善が見られています。これらの取り組みは他専攻や他大学の電気系専攻から注目されています。ただし、GCOEは2011年度で終了を迎えるため、経済支援の財源確保が課題となっています。一方、教員、学生の意識改革が進み、博士課程や若手研究者を前面に据えた活発な研究の場の醸成につながったことが何よりの成果であったと感じています。

話は変わりますが、最近、吉田の電気総合館に隣接する旧変電所建物が、全学の研究施設として全面改修されることになりました。工事期間中、騒音を避けるために電気総合館の講義室は使用を中止し、代替教室で講義を行いました。しかし、学生からは早く電気総合館に戻して欲しいという希望が続出しました。40年以上も前に建設された講義室ですが、学科の教育環境として見事に機能してきたことを再認識した次第です。

再任によりもう一年学科長を勤めさせていただくことも制度的に許されておりましたが、工学研究科や全学関係の業務との重複で十分職務を果たせない場面もあり、勝手ながら2年で退任させていただくことになりました。新年度からは、小野寺秀俊教授が新学科長に就任されます。皆様には、引き続き電気電子工学科に対し、温かいご支援とご教示をお願いいたします。

賛助会員の声

エピタキシャル Al 電極を用いた高耐電力 SAW デバイスの開発

株式会社 村田製作所 技術・事業開発本部 (92 年卒)  
 中川原 修

1. 研究背景

SAW (surface acoustic wave: 表面波) デバイスは、携帯電話などの電子機器に広く用いられる電子部品である。図1のように電場を加えると変位を生じる圧電基板上に、くし型電極 (interdigital transducers:IDT) を薄膜プロセスで作製し、表面波の励振を利用して周波数フィルタとして機能させる構造である。従来用いられてきた誘電体フィルタに対し、薄膜微細加工技術を用いる SAW は小型・低背化が可能のため、第3世代携帯電話において電波の送受信を担うデュプレクサ (アンテナ分波器) としての応用が検討されてきた。フィルタリングの対象となる周波数は IDT 間隔で制御され、第3世代 (2GHz 帯) では  $0.5 \mu\text{m}$  程度の微細加工技術が必要となる。しかし、増幅した信号を送信する場合、微細な Al 薄膜配線に大電力が印加されると、Al 原子が自己拡散し、図2のようにヒロック (凝集) 等の機械的、結晶学的な構造欠陥が発生するためデバイス破壊を招き、実用化の障害となってきた。

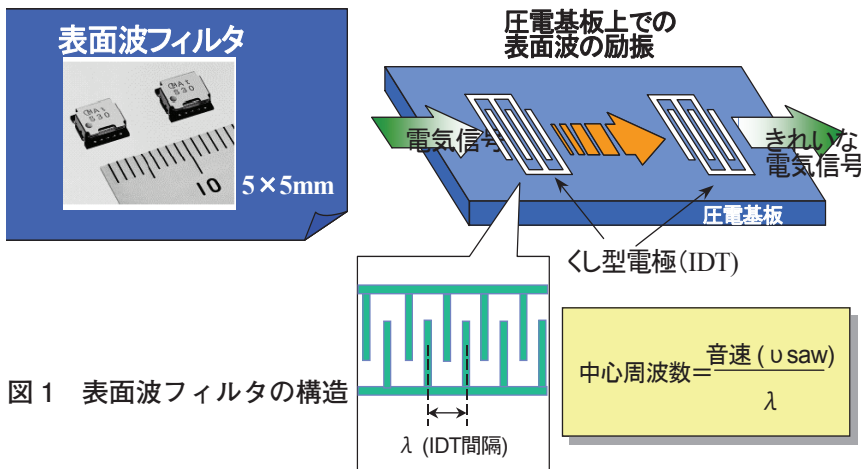


図1 表面波フィルタの構造

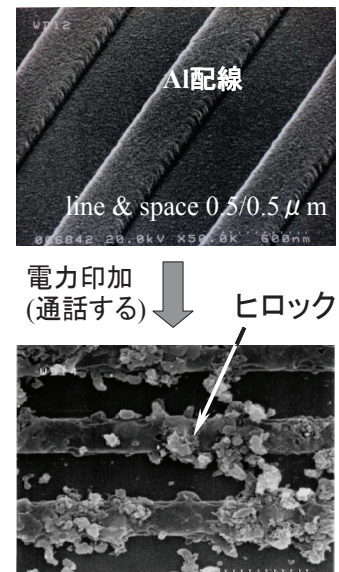


図2 従来の課題 (耐電力性)

2. 研究内容<sup>※)</sup>

2-1 材料・プロセス開発

SAW デュプレクサの耐電力性を向上させる目的で、電極を構成する金属 Al 薄膜のエピタキシャル化に取り組んだ。エピタキシャルとは下地基板表面の原子配列に強く拘束された結晶成長の形態で、エピタキシャル膜は多くの場合、単結晶に近い非常に良質の薄膜となる。ヒロックの主因である Al の自己拡散は、活性化エネルギーの低い結晶粒界での原子の移動が支配的であるため、Al 電極を粒界が極めて少ないエピタキシャル膜とすることで耐電力性の向上を目指した。

SAW デュプレクサでは、表面波の伝搬特性に優れる  $\text{LiNbO}_3$  や  $\text{LiTaO}_3$  といった酸化物圧電単結晶が、基板として汎用的に用いられる。 $\text{LiNbO}_3$  と  $\text{LiTaO}_3$  はイルメナイト型の非常に似通った結晶構造を持つ圧電材料である。いずれの基板上でも、Al 薄膜を直接成長させた場合、結晶格子の不整合が 3% 以上



と大きいため、Al (111) が面内ランダム配向した多結晶膜しか得られない。これに対して適切なバッファ層を模索した結果、Ti が非常に優れたバッファ効果を示すことを見出した。構造解析の結果、Al 薄膜は基板 (001) 面を核生成面としたエピタキシャル成長であることがわかった。図 3 は Al 電極を、透過型電子顕微鏡を用いて断面観察した像である。SAW デバイスでは (001) 面を傾斜させた基板を用いることが多く、その角度 (図 3 の場合  $26^\circ$ ) に対応する傾斜を有する Ti、Al の格子縞 (原子配列) が観察されている。これは下地の結晶情報に強く拘束された結晶成長であり、Ti および Al はエピタキシャル膜になっている。方位関係は  $\text{Al}(111)//\text{Ti}(001)//$  基板 (001) であり、過去に報告されたことのない特異な結晶成長である。Ti は  $\text{LiNbO}_3$  と  $\text{LiTaO}_3$  との格子不整が約 0.7% と小さいため、基板と Al の格子不整を緩和する中間層として機能し、エピタキシャル成長が可能になったと考えられる。

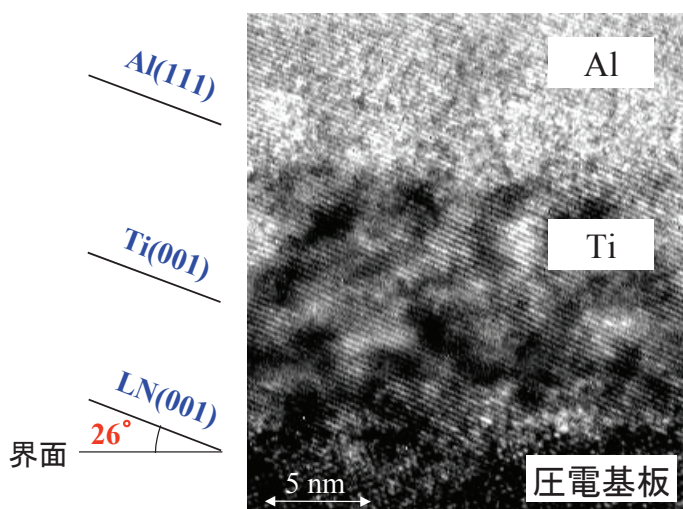


図 3 エピタキシャル Al 電極の断面電子顕微鏡像

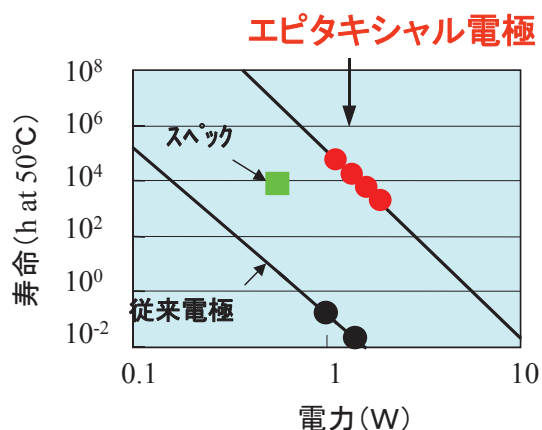


図 4 SAW デバイスの耐電力性比較

## 2-2 表面波デバイスへの応用

エピタキシャル Al 膜を電極とする SAW デバイスを作製・評価したところ、従来の多結晶膜を電極とする同一設計の素子に比べて、図 4 のように耐電力性が破壊寿命換算で 10 万倍以上と飛躍的に向上した。これにより第 3 世代携帯電話の規格の一つである W-CDMA 方式の端末への搭載が可能となり、2004 年初頭の商品化を実現した。その後、第 3 世代の通信規格 (UMTS) の 2GHz、1.7GHz、800MHz 帯の国内外の SAW デュプレクサに幅広く応用され、現在では世界シェア TOP の生産・販売を誇っている。

## 3. まとめ

以上のように、実用化の大きな障壁となっていた耐電力性向上の課題に対して、Al 電極をエピタキシャル成長させることで解決し、SAW デュプレクサとして世界初の商品化を実現した。本技術は汎用性が非常に高く、複数の周波数帯の SAW デュプレクサとして世界の通信市場で広く使用されている。また、結晶学的な見地から新規な結晶成長様式を見出したことで、学術的な意義も小さくない。これらが評価され、本研究は 2007 年に日本真空協会スパッタリングおよびプラズマプロセス部会賞を、また 2010 年に米国セラミクス学会 (The American Ceramic Society) のフルラス賞 (Richard M. Fulrath Award) を受賞した。

※ 例えば、O.Nakagawara et al., J. Crystal Growth 249 (2003) 497-501.

## 編集後記

cueの読者の方々には、卒業後、年数を経た電気系教室OB/OGも多数いらっしゃるかと存じますが、それらの方々が在学されていた頃に比べ、今の大学は外部により大きく窓を開くことが求められています。研究面では産学連携が唱えられ、教育面ではより優秀なやる気のある学生を獲得するため高校生へのPRが重要視されています。

高校生の理系離れが言われて久しいですが、最近では、特に電気電子工学の人気のよろしくないようです。電気系教室でもウェブページの充実や高校生向けのパンフレット作成、各種アウトリーチ活動などを行っておりますが、このcueも電気電子工学の魅力を伝える一助になれば幸いと思い、編集に携わっております。

[N.A. 記]

## 協力支援企業

NTTコミュニケーションズ株式会社  
新日本製鐵株式会社  
ダイキン工業株式会社  
鉄道情報システム株式会社  
日立電線株式会社  
株式会社 村田製作所  
ローム株式会社  
(アイウエオ順)

発行日：平成23年3月

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

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

印刷・製本：株式会社 田中プリント

