

# cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.22 SEPTEMBER 2009

---

[第22号]

..... 卷頭言 .....

津田 孝夫

..... 大学の研究・動向 .....

高温超伝導とジョセフソン効果、

強相関電子材料とその応用

電子工学専攻 集積機能工学講座

..... 産業界の技術動向 .....

株式会社ジーエス・ユアサ パワーサプライ

田中 俊秀

研究室紹介

平成 20 年度修士論文テーマ紹介

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

編集後記

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

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

## cue 22号 目次

### 巻頭言

自動並列化への道程 — 計算機ソフトウェア最大の課題 —

.....京都大学名誉教授 津田孝夫..... 1

### 大学の研究・動向

高温超伝導とジョセフソン効果、強相関電子材料とその応用

.....電子工学専攻 集積機能工学講座..... 3

### 産業界の技術動向

大形リチウムイオン電池の実用化の現状

.....株式会社ジーエス・ユアサ パワーサプライ 田中俊秀..... 9

研究室紹介..... 16

平成 20 年度修士論文テーマ紹介 ..... 36

### 高校生のページ

人間回帰としての可視化技術.....高等教育研究開発推進センター 小山田耕二、坂本尚久..... 54

### 学生の声

ロシア・クルチャトフ研究所への研修

.....エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 博士後期課程 2 年 向井清史..... 60

第一線で活躍するために

.....情報学研究科 通信情報システム専攻 博士後期課程 2 年 久保木猛..... 60

教室通信.....電気電子工学科長 北野正雄..... 61

### 賛助会員の声

「伝える」をきわめる: 光と無線の先端技術 .....日立電線株式会社 坂口春典..... 62

空調機 (エアコン) におけるエレクトロニクス技術.....ダイキン工業株式会社 田中三博..... 65

編集後記..... 67



## 巻頭言

## 自動並列化への道程 — 計算機ソフトウェア最大の課題 —

昭和 32 年卒 名誉教授 津田 孝夫



スーパーコンピューティング（超高速大規模数値計算）は時代とともに変遷を遂げてきた。筆者が情報工学科の教授を勤めていた頃の当初は、ベクトル演算機能を備えたベクトル計算機が全盛で、自動ベクトル化コンパイラが著しい成功を収めた。線形代数（行列）をもととする数値計算には最適で、確実にスピードアップが実現できた。自動と名がつくように、ユーザは通常の Fortran プログラムを書くだけで、機械命令にベクトル演算命令が含まれる目的コードが容易に生成された。そのうちに大量生産で安価なマイクロプロセッサが出現し、ハードウェアコストを下げた多様な並列計算機が出現するようになった。モデル的には CPU とその直属のメモリを 1 単位として、それら多数をネットワーク結合したもので、いわゆる分散メモリ並列計算機である。NEC 社製の地球シミュレータでは複数個の CPU が主記憶共有のベクトルプロセッサ（1 ノードという）となっており、それらが多数ネットワーク結合されている。

問題は計算機を使う側のプログラミングである。人間の思考はもともと逐次的 (sequential) であって、順を追って 1 次元的にものを考える。いままでの高級プログラミング言語は Fortran, C をはじめ、すべて逐次記述である。一方上述のように演算をしてくれるハードウェアは分散並列である。同時に多数のプロセッサで演算実行して、百台なら百倍の速さで計算したい。このような「並列化」では、逐次プログラムが意図したのと同様の演算系列の順序依存関係が保証され、それに必要なノード上メモリのデータ参照や移動が行われないといけない。ユーザが書いた逐次プログラムからコンパイラがこれらの並列化を自動的に行い、それが実行できる命令列を生成するのが自動並列化コンパイラである。これが現在できないのである。

1994 年 MPI (Message Passing Interface) が国際標準として策定され、これが現在に到るまでも並列プログラミングの実質上の標準になっている。プログラミング言語としては Fortran または C、C++ を用い、プログラムに記述された演算系列の並列分割も、プロセッサ間のデータ参照・移動に必要なプロセッサ間通信命令の記述はこの MPI で定義された通信関数を用いて、プログラマ自身がすべて書かないといけない。これは昔のアセンブリ言語のプログラミングと同程度（あるいはそれ以上）に複雑で誤りやすく、デバッグも容易でない。

それで自動ベクトル化同様に期待されて出現したのが HPF (High Performance Fortran) である。これには筆者も多少かかわってきた。ベースとなる言語は Fortran でデータ並列言語である。各プロセッサにデータの分割配置の仕方だけをユーザは指定する。各プロセッサの計算処理の分割と必要なプロセッサ間通信・同期はコンパイラが自動的に生成してくれる。ユーザは逐次的な Fortran プログラムにコメント行の形で HPF 指示行を挿入するだけでよい。フリーで配布されている HPF 処理系もあり、Fortran と MPI をサポートするシステムならほぼ利用可能である。

HPF を使うと規則的な問題は比較的容易にシステムに見合った並列性能を実現できるが、不規則問題は並列化がむつかしく、並列性能が十分に得られないことが多い。MPI プログラミングは並列機に習熟していない一般ユーザには複雑かつ困難なものである。それで HPF に期待が寄せられたのではある

が、十分に普及していない。

以上が現状である。分散並列計算機では並列実行により flops で表される浮動小数点演算の実行速度を競う。しかし並列計算の粒度（並列実行のため分割された命令系列）はある程度大きいとプログラムの並列化がより効率的に行えることが多い。そのためにはプロセッサ・ノードのメモリサイズはある程度大きい方が都合がいいのであるが、実際世にある並列機ではそうになっていない。分散並列機の最大並列性能を出すには現状では MPI プログラミングだけであるが、これが出来るのは一部の能力に恵まれた余裕のある科学者・技術者だけであって、一般ユーザにはやはり自動並列化コンパイラの出現が強く望まれる。

**大学の研究・動向****高温超伝導とジョセフソン効果、強相関電子材料とその応用**

工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学講座

教授 鈴木 実  
准教授 掛谷 一弘  
助教 菅野 未知央  
助教 山田 義春**1. はじめに**

新しい材料の発見が、新しい技術の創製と発展に繋がってきたのはこれまでの歴史の示すところですが、ここ10年から20年にかけて発見されて、顕著な物性を示す材料に、強相関電子材料と呼ばれる一連の物質があります。顕著な物性とは、高温超伝導あるいは巨大磁気抵抗効果などです。高温超伝導では、135Kという従来では考えられないくらいの高温で超伝導が発現します。高温超伝導をはじめとして、なぜこのような顕著な物性が発現するのか、その理由は今でもまだ十分理解されていません。そういう意味で驚くべき物性です。もっと顕著な物性、たとえば室温超伝導や、あるいは全く新しい物性が、この強相関電子材料の中からまだまだ発見される可能性は誰も否定できません。

強相関電子材料とは、CuやMnなど、3d遷移金属や他の不飽和核を有する元素の酸化物材料です。従来の認識では、このような酸化物は一般に絶縁体であり、透明電極やマグネタイトなど、ごく一部の酸化物でしか導電性の物質はありませんでした。20世紀が終わりに近づいたころ、超新星の爆発を初めとして、驚異的な発見や発明が相次ぎました。その一つが高温超伝導の発見であり、巨大磁気抵抗効果の発見だったのです。

このような高温超伝導を、あるいは巨大磁気抵抗効果をエレクトロニクスに応用して、これまでと同じ超伝導の機能が、より高い温度でより高い性能で実現できるようにしたい、ということのをわれわれは考えています。それと同時に、これまでの超伝導では実現できないような新しい機能を、このような強相関電子材料に見出したいと考えています。また、このような驚くべき顕著な高温超伝導が、なぜ発現するのかという理由も解き明かしたいと考えています。

**2. 高温超伝導体の異常なジョセフソン効果**

超伝導のエレクトロニクス応用ではジョセフソン効果が重要な役割を担います。ジョセフソン効果は、2つの超伝導体を、電子がトンネルするほど薄い絶縁膜で結合した接合で現れます。ジョセフソン効果は、巨視的量子効果である超伝導の位相を電気信号に変換する役割をします。半導体と同じように、超伝導エレクトロニクス回路の高速化には微細化が必要です。たとえば、100 GHz以上の高速性を実現するにはサブミクロン配線技術が必要になります。その場合、ジョセフソン接合も同じように微小化され、かつジョセフソン電流はある一定の大きさが必要であるために、回路の微細化には最大ジョセフソン電流密度の増大が必要です。

しかし、高温超伝導体ではこの最大ジョセフソン電流密度 $J_c$ を大きくすることは、実は非常に困難で

す。最初、このことは技術的な問題と考えられていました。つまり、高温超伝導体が酸化物であり、酸化物で極めて薄い絶縁トンネル層を形成するのが技術的に困難であるためと理解されていたのです。ところが、次に述べる固有ジョセフソン接合では、接合が理想的であり、理想的な特性が実現されているはずであるにもかかわらず、同じように最大ジョセフソン電流密度が小さいことがわかったのです。つまり、最大ジョセフソン電流密度が小さいのは技術上の問題だけではなく、高温超伝導に付随するもっと本質的な問題であることが明らかになったのです。

### 3. 固有ジョセフソン接合

ビスマス系高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ （以下 Bi2212）では、図 1 に示すように、結晶構造が層状構造をしており、0.3 nm の超伝導層と 1.2 nm の絶縁層が交互に積層されています。つまり、結晶構造そのものが積層されたトンネル型ジョセフソン接合になっています。このようなジョセフソン接合はイントリンシックジョセフソン接合（intrinsic Josephson junctions 略して IJJs）あるいは固有ジョセフソン接合と呼ばれています。固有ジョセフソン接合では、トンネル層が結晶構造そのものであるため、界面が清浄平坦で理想的なトンネル型ジョセフソン接合とみなすことができます。このような特徴をもった固有ジョセフソン接合は、応用のみならず高温超伝導の真の性質を知る上で非常に重要なプローブにもなります。

この固有ジョセフソン接合を用いて、その最大ジョセフソン電流密度を測定したところ、やはり超伝導ギャップ  $\Delta$  の大きさから期待される  $J_c$  の値よりも観察される  $J_c$  の値がはるかに小さいということがわかりました。つまり、高温超伝導体の  $J_c$  が小さいという事実は、トンネル接合を作るという技術上の問題ではなく、高温超伝導体に付随する本質的な問題であることを意味しています。このようにして高温超伝導体ではジョセフソン効果が異常であることが明らかになりました。高温超伝導の異常なジョセフソン効果は、人工的に作られたジョセフソン接合でもいろいろな形で現れていました。しかし、高温超伝導体ではなぜこのような異常なジョセフソン効果が現れるのかその理由はわかっていませんでした。

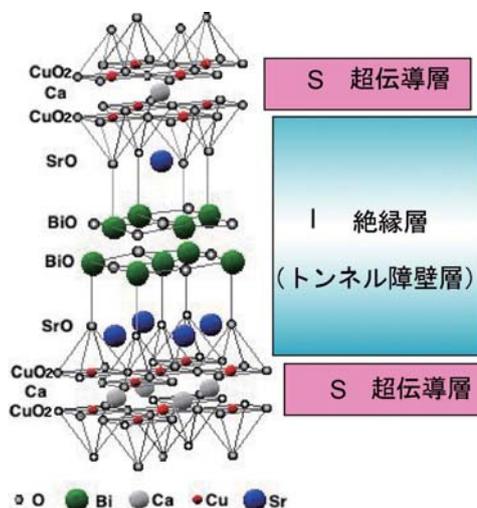


図 1 高温超伝導体 Bi2212 の結晶構造すなわち固有ジョセフソン接合。超伝導層と絶縁層が交互に積層されており、トンネル型のジョセフソン接合となっている。

### 3. 微細加工による固有ジョセフソン接合微小構造作製とその特性

固有ジョセフソン接合の特性は、結晶から数層取り出すことで初めて観察することができます。厚い結晶では数 1000 個の接合が直列になるため真の特性は観察できません。われわれはフォトリソグラフとアルゴンイオンミリングを用いて Bi2212 単結晶の表面を微細加工し、固有ジョセフソン接合を数層-10 数層取り出すことによって、ジョセフソン電流と準粒子電流を同時に観察することに初めて成功しました [1] [2]。

最初は 40 層ほどでしたが、それが 20 層、10 層、5 層と少なくすることができるようになり、最近では 2 層や 1 層の固有ジョセフソン接合の微小構造を作ることができるようになりました。2 層の 2  $\mu\text{m}$  角の固有ジョセフソン接合微小メサ構造の電流電圧特性を図 2 に示します。図 2 の上の写真で、中央の垂直の部分がジョセフソン電流で 2 つの接合ともに 0 電圧状態です。その両側の斜めの短い線の部分(電

圧分枝)が1個の接合が電圧状態になっています。その外側の丸い長い部分が2個とも電圧状態を示しています。図2の下の写真は、電圧分枝が電流を増加しても2本しか現れないこと、すなわちこの微小メサ構造がたった2個の固有ジョセフソン接合から構成されていることを示しています。このような微小構造が得られることでいろいろと興味深い実験が可能になります。

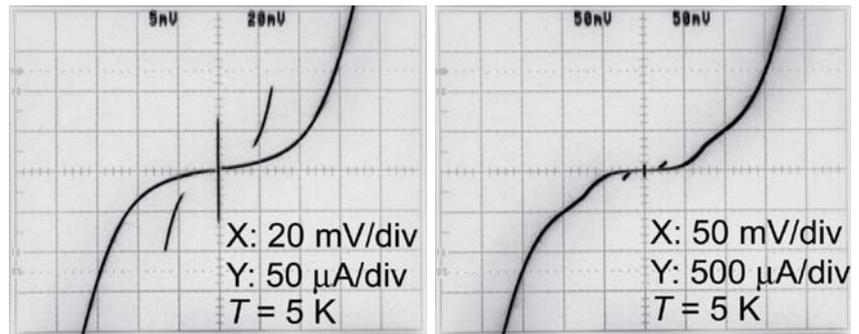


図2 2層の固有ジョセフソン接合からなる微小メサ構造の電流電圧特性。

図3と図4は固有ジョセフソン接合の微小構造の模式図です。図3の微小メサ構造は単結晶の表面に形成するために層数の制御が比較的容易ですが、3端子構造のため接触抵抗の低減と超伝導近接効果の影響を受けてしまいます。これまでの実験はほとんどこの微小メサ構造を用いてなされました。

一方、図4の微小クランク構造は、4端子構造であるため、接触抵抗をあまり気にしなくとも良いのですが、作製方法が複雑で難しく、また機械的強度が弱いこと、それから固有ジョセフソン接合の層数を数層に制御することがかなり困難です。われわれはこれまで $5\mu\text{m}$ 角で5層(厚さ7.5 nm)の微小クランク構造の作製に成功しましたが、まだ再現性は良くありません。

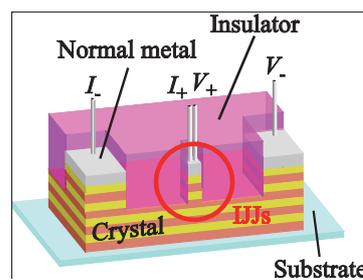


図3 微小メサ構造

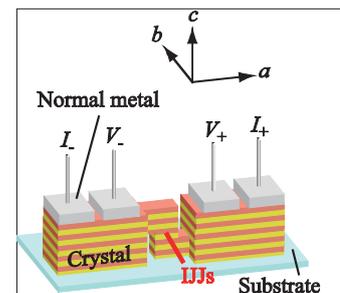


図4 微小クランク構造

### 3. 短パルストンネル分光と不均一超伝導状態、および擬ギャップ

固有ジョセフソン接合は、本来、結晶構造そのものであるということから、高温超伝導体の結晶のすべてにわたって存在していることとなります。つまり、固有ジョセフソン接合の特性は、高温超伝導体のバルクの特性を反映しています。したがって、固有ジョセフソン接合を用いてトンネル分光を行えば、高温超伝導体の、表面状態ではない、真の性質がわかります。われわれはこの点に注目してトンネル分光実験を行いました [2]。この実験では、薄い超伝導層に電圧状態で電流を流すために発熱が顕著です。電流注入による自己発熱と言われます。この自己発熱が大きいと測定が不正確になりますから、自己発熱を極力抑制する必要があります。われわれは、大きさ $5\text{-}10\mu\text{m}$ 角、厚さ $7\text{-}15\text{nm}$ 、つまり固有ジョセフソン接合で数層という微小なメサ構造を単結晶の劈開表面に作製し、かつトンネル特性を短パルスを使用し $60\text{ns}$ の時間スケールで測定して、自己発熱を抑えました [3]。こ

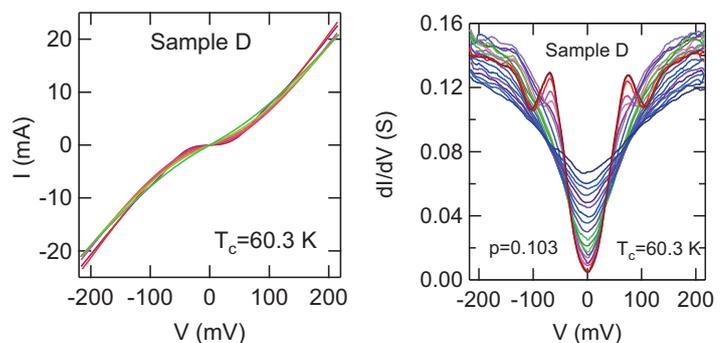


図5 短パルス層間トンネル分光の一例。10Kから200Kまで。

の実験技術はまだ他の研究機関の追従を許さないところです。

短パルス層間トンネル分光結果の例を図5に示します。図5の低温におけるピークの間隔から超伝導ギャップの大きさ $\Delta$ を知ることができます。また、図5の*I-V*特性の $V > 2\Delta/e$ の領域における抵抗から $R_N$ を知ることができます。

一般に、最大ジョセフソン電流密度 $J_c$ の大きさは Ambegaokar-Baratoff (AB) の理論により、

$$J_c = \frac{\pi\Delta}{2eR_N} \tanh \frac{\Delta}{2k_B T} \cong \frac{\pi\Delta}{2eR_N} \quad (1)$$

と表すことができます。つまり、トンネル抵抗 $R_N$ と $\Delta$ を知れば理論的な最大ジョセフソン電流密度の大きさ $J_c$ を知ることができることとなります。 $J_c$ の値は図2の*I-V*特性の観察で知ることができます。つまり、理想的な接合を用いて、高温超伝導の $J_c$ を理論と実験で比較することができることとなります。このような検討を行った結果以下のようなことがわかりました。

高温超伝導は、反強磁性 Mott 絶縁体にホール（正孔）をドーピング（注入）すると発現します。ドーピングにしたがって、転移温度 $T_c$ は高くなり、最適ドーピング量で最高値に達しますが、それ以上注入すると今度は $T_c$ は低くなり、あるところで消失します。最適ドーピング量よりも少ないドーピング領域（不足ドーピング領域）では、 $J_c$ が理論よりも2桁かそれ以上少なくなることがわかりました。トンネル障壁の影響は $R_N$ に取り込まれていますからそれ以外の要因でしか説明できません。結局、これを説明するためには超伝導性の空間的な不均一性を考えなければいけないということがわかりました。空間といっても実空間と量子力学で定義される波数空間の2種類があります。本質的には、波数空間で超伝導に寄与する遍歴電子が偏在していることを示しています。高温超伝導では、ドーピング量の増加に従って、偏在の仕方が変化するために $J_c$ の著しいドーピング量依存性が現れたと言えます。一方、高温超伝導体ではホールのドーピングは価数の異なる原子を置換して、いわゆる化学的に行いますから、微視的に見ると置換原子の周囲では電子状態の乱れがあります。この影響はキャリア数の少ない不足ドーピング領域で顕著になりますから、不足ドーピング領域では実空間における超伝導の不均一性が存在していると考えられます。高温超伝導体の超伝導状態はこのように理解できることがこの実験からわかったのです。これが異常なジョセフソン効果の原因と考えられます。

図5で、超伝導ピークの外側に幅広いピークが見えます。また温度が $T_c$ より高くなっても（複数の青い線で示した）フェルミ準位（ $V=0$ ）付近にあたかも超伝導状態のようにギャップが残っています。これが擬ギャップと言われる現象です。擬ギャップの原因はまだ解明されていません。現状では、大きく2つの説に別れています。1つは、超伝導を担うクーパー対は $T_c$ よりももっと高い温度から形成が始まっているが、空間的にコヒーレントにならないために超伝導になっていないだけで、温度が低くなると $T_c$ でようやくほとんどのクーパー対がコヒーレントになり超伝導が発現する、というものです。もう1つは、超伝導と競合する別の秩序があり、条件が超伝導に有利になって電子状態が超伝導に支配されても、その残滓が現れている、という説です。われわれが短パルス層間トンネル分光で得た結果は後者の説を支持しています [4]。

#### 4. 微小メサ構造と巨視的量子トンネル効果

将来の量子情報技術には集積化が容易な固体キュービットが使用されることになると考えられています。固体キュービットには種々の提案がありますが、それぞれにメリット、デメリットがあります。巨視的量子効果を示す超伝導キュービットの場合、集積化は容易と見られ、コヒーレンス時間の長時間化が課題になっています。

超伝導キュービットの1つ、位相キュービットはジョセフソン接合を用います。ジョセフソン接合の

ふるまいは、接合両側の位相差  $\phi$  で記述されます。 $\phi$  の運動方程式は単一振子と全く同じで、 $\cos \phi$  のポテンシャルの中を運動します。一方、振子の質量は接合の静電容量  $C$  に対応します。したがって、 $C$  が非常に小さい場合、 $\phi$  の状態は量子化されてエネルギーは離散化されます。位相キュービットはその量子化された準位のうち、下から2つの重ね合わせを利用します。

高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を利用すると、位相キュービットの読み出しに使用する巨視的量子トンネル効果 (MQT) が従来よりもはるかに高温で発現する可能性があります。また、複数の固有ジョセフソン接合をあたかも1つのように動作させると、実効的に低温で動作させた場合と同様の効果をもたらします。このような効果のために、固有ジョセフソン接合を利用した位相キュービットではコヒーレンス時間が長くなる可能性があります。また、現状の超伝導キュービットの主たるデコヒーレンス要因は、ジョセフソン接合の品質とされています。固有ジョセフソン接合の場合、接合は結晶構造そのものですから、デコヒーレンスを抑えてコヒーレンス時間が長くなる可能性が大いにあります。そこでわれわれはそうした可能性をめざして、固有ジョセフソン接合のMQTの研究を進めています。

図6はMQT実験に使用した2層の固有ジョセフソン接合微小メサ構造素子の特性です。表面の  $J_c$  が電極と近接しているために大きさが小さくなっています。この接合のスイッチング確率分布  $P(I)$  は、Kramersの熱励起の理論によって次のように表されます。

$$P(I) = \tau^{-1}(I) \left( \frac{dI}{dt} \right)^{-1} \left( 1 - \int_0^I P(u) du \right) \quad (2)$$

図7は実験結果と理論のフィットです。理論とのフィットにより実効的な温度、すなわち脱出温度  $T_{\text{esc}}$  がわかります。図8は  $T_{\text{esc}}$  の環境温度依存性を示しています。1 K から 6 K までは  $T_{\text{esc}}$  と  $T$  が一致して、Kramersの熱励起理論で説明できることがわかります。6 K 以上と 1 K 以下で  $T_{\text{esc}}$  が実際の温度  $T$  からずれてきます。6 K 以上では、散逸が大きくなりMQTとは別の理由で理論からずれてきます。一方、1 K 以下の理論からのずれはMQTによるものです。この場合に、0.4 K 以下でMQTが支配的になることがわかりました (0.4 Kの実験は東大との共同研究) [5]。

## 6. おわりに

高温超伝導体のジョセフソン効果について述べているうちに紙数が尽きてしまいました。おまけに最後は駆け足になり、説明が不十分になってしまったと思っています。当研究室では、ここで述べたこと

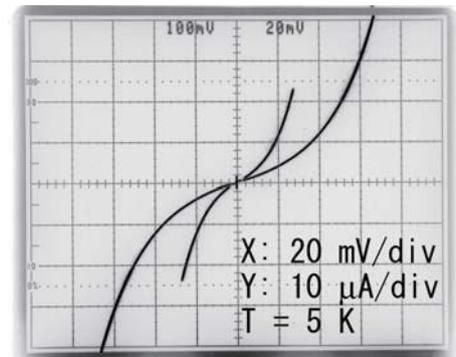


図6 MQT実験に使用した固有ジョセフソン接合微小メサ構造。2層、 $2\mu\text{m}$ 角。

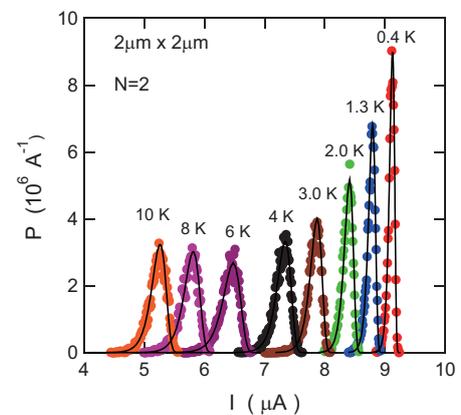


図7 0.4 K から 10 K までの固有ジョセフソン接合のスイッチング電流確率分布

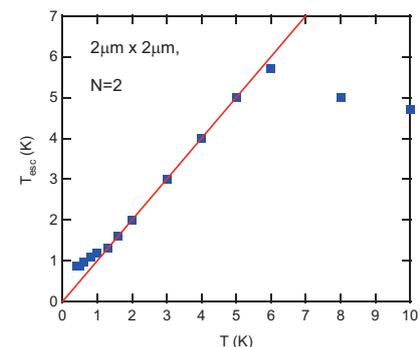


図8 脱出温度  $T_{\text{esc}}$  の環境温度依存性

以外にも、Mn系巨大磁気抵抗材料や高温超伝導との相互作用の研究も進めています。両方とも、強電子相関材料で、これまでにない新しい現象や機能などが発見できることを期待しています。

#### 参考文献

- [1] K. Tanabe, Y. Hidaka, S. Karimoto, and M. Suzuki, Phys. Rev. B 53, 9348(1996).
- [2] M. Suzuki, T. Watanabe, and A. Matsuda, Phys. Rev. Lett. 82, 5361(1999).
- [3] K. Anagawa, Y. Yamada, T. Shibauchi, M. Suzuki, and T. Watanabe, Appl. Phys. Lett. 83, 2381(2003).
- [4] M. Suzuki and T. Watanabe, Phys. Rev. Lett. 85, 4787(2000).
- [5] K. Ota, K. Hamada, R. Takemura, M. Ohmaki, T. Machi, K. Tanabe, M. Suzuki, A. Maeda, and H. Kitano, Phys Rev. B 79, 134505(2009).

## 産業界の技術動向

# 大形リチウムイオン電池の実用化の現状

株式会社ジーエス・ユアサ パワーサプライ

田中俊秀

## 1. はじめに

リチウムイオン電池が実用化されて約 19 年になる。リチウムイオン電池は

- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| ・電池電圧が高い (3.6V/セル) | ・エネルギー密度が高い         |
| ・メモリー効果がない         | ・自己放電が小さい (優れた保存特性) |
| ・大電流放電が可能          | ・急速充電が可能            |
| ・優れた寿命特性           | ・完全密閉でガスを放出しない      |

など数多くの優れた特長を保有している。これらの特長を活かし、最初に、小形リチウムイオン電池が携帯電話やモバイルパソコン、デジカメ、カムコーダなど携帯電子機器に採用されることに伴って、急激にその市場を拡大していった。

一方、大形リチウムイオン電池は、小形リチウムイオン電池での技術進展と市場実績を基に、様々な分野で実用開発が進められ、それに伴っていろいろな型式の電池が開発されてきている。

小形・軽量で長寿命という高付加価値を最大に活かして、まず宇宙・海洋分野での実用化が進み、ついで電池の標準化・量産化により産業分野での実用化が進められた。さらに最近では、小形・軽量でしかも急速充放電が可能であるという特長を生かして、自動車分野や鉄道分野など移動体系での応用が急激に拡大しつつある。(図 1) 本稿では、これら各種分野での多くの実用化のうち、主な実例について紹介する。

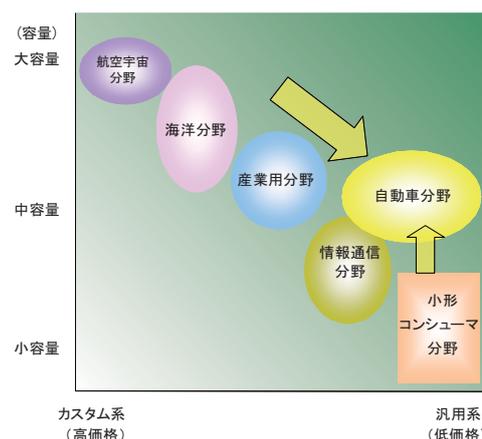


図 1 大形リチウムイオン電池の実用化マップ

## 2. 特殊分野

宇宙、深海、航空機など特殊分野で使用される二次電池は、小形・軽量でエネルギー密度が高だけでなく、過酷な使用環境で非常に高い信頼性が要求される。このような極限環境における厳しい要求を満たすリチウムイオン電池が最初に実用化されてきた。

### 2-1 衛星・ロケット

図 2 は、宇宙用途向けに開発されたリチウムイオン電池で、50 Ah、100 Ah および 175 Ah の大容量のものである。その質量エネルギー密度は、それぞれ従来の宇宙用アルカリ二次電池の 2 倍以上の高い値である。また、リチウムイオン電池は、放電時の平均で、従来の宇宙用アルカリ二次電池の 3 倍に当たる 3.7 V の電圧を発生するので、電池電圧が等しい場合に、直列接続する電池の数を 3 分の 1 に削減

して信頼性を向上できるという大きいメリットがある。また、この電池は電極端子取出し部に、超高真空の宇宙環境にも長期間耐えるセラミックハーメチックシールを採用して、高信頼の気密を実現している。2003年10月に実験ペイロードの一つとして、(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)によって開発・運用された人工衛星SERVIS-1(宇宙環境信頼性実証システム実証衛星1号機)<sup>1)</sup>が、50Ahリチウムイオン電池を搭載してロシアから高度1,000kmの極軌道に打ち上げられ、低軌道へ投入された。大容量リチウムイオン電池を搭載した人工衛星の軌道投入は、これが世界初であり順調に運用された。<sup>2)</sup>

この実績をもとに、現在まで日米欧で数々の衛星に採用実績が積み上げられてきている。



図2 宇宙用単電池

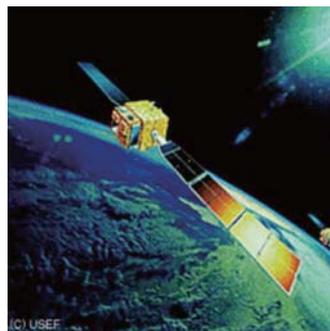


図3 人工衛星への搭載例  
写真提供 USEF

## 2-2 深海潜水艇

深海用途としては、1997年に海洋科学技術センター(当時)の7,000m級細径ケーブル式無人潜水機「UROV7K」用のリチウムイオン電池を、また2000年に自律航行型の3,500m級無人深海巡航探査機(AUV)「うらしま」用のリチウムイオン電池を開発し、納入した。

そして、2004年には「しんかい6500」の主蓄電池を(独)海洋研究開発機構(JAMSTEC)に納入し、全く問題なく実運用に成功した。<sup>3)</sup>

これらの深海探査機用リチウムイオン電池は、いずれも「油漬均圧方式」を組電池に採用しているが、リチウムイオン電池の単セルは、ガスが発生せず完全密閉にすることができるので、単セル内の電解液と油とを完全に分離しつつ単セルの内外を均圧しており、電池の信頼性を一層高くしている。



図4 「深海6500」と主蓄電池 写真提供 JAMSTEC

## 2-3 航空機

航空機用大形リチウムイオン電池(LVPシリーズ)は、民間旅客用の電力源として従来使用されていたニッケル・カドミウム電池に比べて2倍のエネルギー密度と、3倍の電圧を誇る。宇宙用等の特殊用途で培った高い信頼性および高エネルギー密度等の高性能が高く評価されて、Boeing社の次世代主力旅客機「787」へ搭載され、2009年6月には試験飛行が予定されている。

### 3. 一般産業用・鉄道分野

特殊分野での大形リチウムイオン電池の実績と、長年にわたり培ってきた産業用大形電池の経験に基づき、産業用大形リチウムイオン電池（LIMシリーズ）の標準化と量産化を実現した。産業用リチウムイオン電池の単電池および組電池の外観を図5に示す。LIMシリーズでは用途に合わせて2種類の電池をラインアップしている。標準仕様の電池は40 Ahと80 Ahと容量は大きいですが、最大充電電流は $3 I_t^*$ 、最大放電電流は $5 I_t^*$ に制限される。一方、高入出力仕様の電池は、最大 $10 I_t^*$ の大電流充放電が可能であるが、標準電池と同じ形状で、30 Ahと60 Ahと標準電池に比べて容量が小さい。<sup>4,6)</sup>

\*電流の大きさを表す。 $I_t^* (A) = \text{定格容量 (Ah)} / 1 (h)$

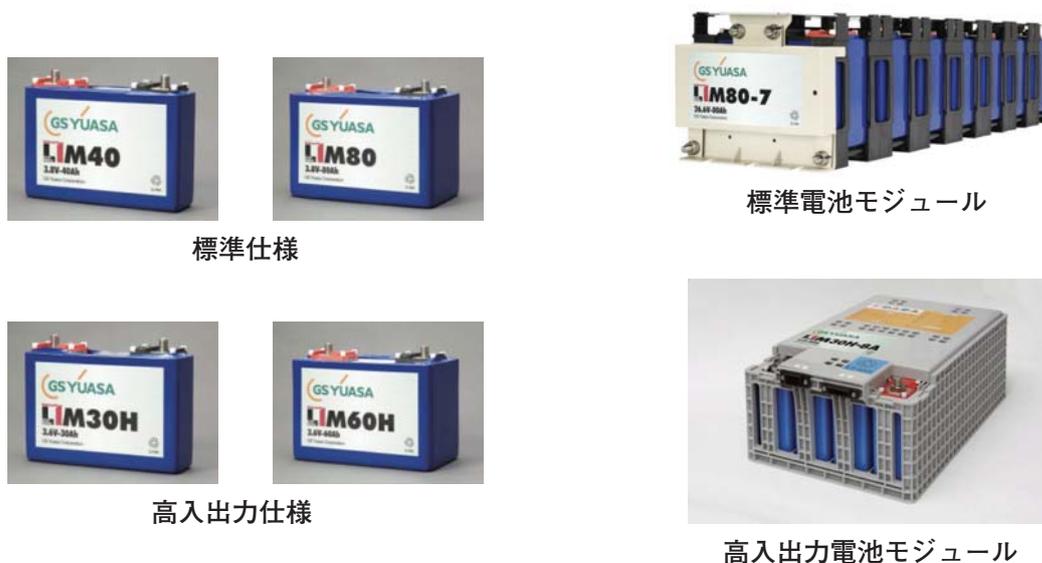


図5 産業用大形リチウムイオン電池（LIMシリーズ）の単電池とモジュール

#### 3-1 無人搬送車（AGV：Automatic Guided Vehicle）

LIMシリーズが、最初に導入されたのはAGVである。従来のアルカリ電池に比べて、小形軽量という特長のほかに、急速充電が可能なることから電池モジュールの取替えをすることがなく24時間操業が簡単に可能になること、リチウムイオン電池が密封でガスを出さないことから、液晶、半導体や製薬などクリーンルームでの稼働も可能という、従来にない特長がLIMシリーズ採用によって可能となった。最初に採用されてから、既に5年以上になり1,000台以上が国内外で稼働しているが、いまだに電池の取替え需要が少ないくらい、長寿命で、安定した稼働を続けている。

#### 3-2 鉄道

当社は、大形リチウムイオン電池の新用途として鉄道分野に着目し、(財)鉄道総合技術研究所の「架線レスバッテリー ترام」および、西日本旅客鉄道（株）の「直流電気鉄道の蓄電システム」に関する共同研究を通じて技術開発を進めてきた。<sup>7,8)</sup>

##### 3-2-1 架線レスバッテリー ترام

鉄道車両にバッテリーを搭載し、省エネ化や架線レスでの走行など新しい取組みが進められている。

電車のブレーキでは架線への電力回生が行われるが、近傍に他の電車がいない場合には、回生ブレーキがかからない「回生失効」が生じ、機械ブレーキが動作し、熱エネルギーとして消失される。そこで、

回生エネルギーを電車搭載バッテリーに蓄電し、力行時に再利用することで省エネが期待できるため、バッテリー搭載電車の開発が進められた。<sup>7)</sup>

上記研究開発成果を基に、2007年に架線とバッテリーの電源ハイブリッド電車「Hi-tram（ハイ！トラム）」（図6）が開発された。これは、NEDO（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）からの委託で（財）鉄道総合研究所、東急車輛製造（株）、アルナ車両（株）によって開発されたものである。同年11月から翌年3月までの期間には、札幌市交通局で試験走行が行われ、ここでは、省エネルギー効果（従来車両との消費電力量の比較）や、冬季の厳しい使用環境下での機器およびバッテリーの耐久性などが試験された。これにより、架線とバッテリー電力の協調制御で、加速時使用のエネルギーの40%以上を回生再利用できるようになった。さらに、停車中の1分間急速充電で4 km以上、フル充電状態では25 km以上の無架線区間走行が可能であることが実証された。（第38回 日本産業技術大賞 審査委員会特別賞受賞）



図6 架線・バッテリーハイブリッド車両「Hi-tram（ハイ！トラム）」  
写真提供 財団法人鉄道総合技術研究所

### 3-2-2 直流電気鉄道用蓄電システム

鉄道は省エネルギー化の一環として回生車両の導入を進めている。この回生車両が発生する回生電力を一時蓄電し有効活用を図る一つの方法として、電力蓄電システムの設置がある。<sup>8,9)</sup>

蓄電システムには2つの動作モードがある。

- ①回生吸収モード：回生車が回生しているときに回生電力を消費する他の車両が遠い所にいるとパンタ電圧が上昇するため、回生電力を吸収し蓄電システムに充電することを主眼においた動作
- ②電圧補償モード：変電所間隔が長い場合、変電所中間点では電車が力行時、架線電圧降下が大きくなるため変電所中間点に蓄電システムを設置して、蓄電された電力を放電することにより架線電圧降下を補償する動作



図7 直流電気鉄道の蓄電システム  
写真提供 西日本旅客鉄道（株）

2004年度には、西日本旅客鉄道（株）の学園都市線松井山手構内および琵琶湖線野洲き電区分所においてモデル機によるフィールド試験を実施し、2006年度には、北陸線新疋田変電所に導入された。（図7）この装置は、最大約1,050 kWを1分間出力できる能力を持ち、1日あたり約300 kWh弱も電力削減に寄与している。<sup>10)</sup>

また、鹿児島市交通局では、LRT（次世代型路面電車システム）整備計画に基づき、出力の大きいモータを採用した新形車両の増加に伴って消費電力増大等により、架線電圧の降下が生じることから、架線電圧補償システムが2箇所導入された。これにより電車の速達性や定時運行に大きく貢献している。



図8 トランスファークレーン搭載用ハイブリッド電源装置  
写真提供 住友重機械エンジニアリング（株）

### 3-3 トランスファークレーン

港湾でのコンテナの積み下ろしに、トランスファークレーン

が稼働している。コンテナの巻き下げ減速時に発生する回生エネルギーを、リチウムイオン電池モジュールに蓄積し、巻き上げ作業を効率よくアシストするシリーズハイブリッドシステムを実用化した。その結果、

- ① エンジン最大出力を約3分の1まで抑制可能
- ② 燃料消費は約6割が削減
- ③ 黒鉛排出量の大幅削減効果が発揮された。

トランスファークレーンのエンジン駆動を、エンジンとリチウムイオン電池とのハイブリッド化により騒音・黒鉛排出を大幅に低減するとともに、コンテナ積上げ時の電力アシストと積下し時の回生電力吸収によりエンジン容量を大幅に削減することができた。

### 3-4 電源システム

LIM シリーズは交流電源や直流電源にも応用展開されている。従来、鉛電池を使用していた部分をリチウムイオン電池に置き換えることにより、格段の小形軽量、省スペースを実現している。<sup>11)</sup>



図9 LIM を搭載した交流無停電電源装置 (30 kVA 30分)

### 3-5 その他

なお、大形ではないが、中容量のリチウムイオン電池では、電動自転車（電動アシスト自転車）、電動工具やロボットなど多くの用途が拡大している。

## 4. 自動車分野

自動車が最初にできたのは電気自動車である。当社が保有していた90年前の電気自動車「デトロイト号」が5月20日に運転可能な電気自動車として復活した。

この「デトロイト号」が復活した5月20日を「電気自動車の日」と制定、日本記念日協会から記念日登録証が授与された。



図10 電気自動車「デトロイト号」(1917年製)と「i MiEV」(2008年製)

### 4-1 電気自動車 (EV)

リチウムイオン電池の電気自動車への搭載は、1990年代から色々な車で実験が繰り返されてきた。最近の環境問題への意識の高まりと、原油価格の高騰などを背景に、電気自動車が大きく飛躍しようとしている。写真は三菱自動車工業(株)が今年から販売する「i MiEV」に搭載される単電池 (LEV50) と電池モジュール (LEV50-4) である。この電池を量産販売するために、2007年12月に当社、三菱商事(株)、三菱自動車工業(株)の三社で合弁会社「(株)リチウムエナジージャパン」を設立し、既に量産を開始している。



図11 EV用単電池 (LEV50)



図12 EV用電池モジュール (LEV50-4)

#### 4-2 ハイブリッド電気自動車 (HEV)

1997年に量産型ハイブリッド車として発売されたトヨタプリウス以降、ハイブリッド車は急速に市場を拡大していった。その後、色々なハイブリッド車が販売されるようになったが、現状そのほとんどはニッケル水素電池を採用している。しかし、この分野でも、さらに小形軽量、ハイパワーを期待して、リチウムイオン電池の開発が精力的に進められている。ハイブリッド車用途には、特に高入出力特性が要求される。当社では、NEDOプロジェクトや自動車メーカーとの共同研究を積み重ね、各種のハイブリッド車用電池技術を開発してきた。図13にHEVリチウムイオン電池の一例として当社が開発したEH6の外観写真を示す。



図13 ハイブリッド自動車用電池 (EH6)

2009年4月には、最新の技術を結集したハイブリッド車用電池の事業化を目指し、当社と本田技研工業(株)と合弁で「(株)ブルーエナジー」を設立し、2010年秋の量産化を目指している。

#### 4-3 その他

電気自動車には、EVやHEVのほかに、両方の長所を兼ね備えたPHEV(プラグインハイブリッド)も開発が進んでいる。PHEV用途にはHEV用の高入出力特性に加えて、更なる高容量化が要求される。このための電池技術開発も産官学合わせて精力的に進められている。

### 5. まとめ

以上述べたように、リチウムイオン電池は、すでに大量に普及している携帯電子機器用の小形電池における高エネルギー密度という特長に加えて、長寿命、高信頼性、高率充放電が可能等という様々な優れた特長が認められて、その大形電池が色々な分野で実用化が進んでいる。今後、大量に使用される自動車分野での採用により、ますます、技術の向上と低コスト化が期待されている。

#### 【参考文献】

- 1) 金井宏, 浜一守, 秋山雅胤, 長東紀夫; SERVIS プロジェクトについて, 第48回宇宙科学技術連合講演会, 講演番号1A01, (2004)
- 2) H. Yoshida, N. Imamura, T. Inoue, and K. Komada; Capacity Loss Mechanism of Space Lithium-Ion Cells and Its Life Estimation Method, *Electrochemistry*, 12, (2003), 71
- 3) H. Momma, A. Ikuta, and M. Iwata: "Development of Oil Filled Pressure Compensated Lithium-Ion Secondary Battery for DSV Shinkai 6500", *TECHNO-OCEAN '04*, Kobe Japan, Nov. 9-12, (2004), p.1720
- 4) 瀬山幸隆, 下藺武司, 西山浩一, 中村秀司, 園田輝男; 産業用リチウムイオン電池「LIMシリーズ」の開発, *GS News Tech. Rep.*, 62, 1, (2003), 76-81
- 5) I. Suzuki, T. Shizuki, K. Nishiyama; High Power and Long Life Lithium-ion Battery for Backup Power Sources, *IECEC/IEEE INTELEC '03*, Oct., 19-23, (2003), 317-321
- 6) 瀬山幸隆, 中本武志, 西山浩一, 園田輝男; 鉄道用強制空冷式リチウムイオン電池モジュール「LIM30H-8R」の開発, *GS Yuasa Tech. Rep.*, 4, 2, (2007), 24-29
- 7) 小笠正道; “リチウムイオン二次電池の技術と鉄道車両への適用～架線レスバッテリートラム“りっちい・とらみい”～”, *鉄道車両と技術*, 9 (9), (2003), 13-20
- 8) 石井順; 直流電気鉄道における電力補完装置の開発経緯, *GS Yuasa Tech. Rep.*, 3, 2, (2006), 1-13
- 9) 山幸隆, 岡崎賢二, 東直親, 作野敏郎; リチウムイオン電池を採用した電鉄用電力貯蔵システムの

- 開発, GS Yuasa Tech. Rep., 2, 2, (2005), 25-29
- 10) 中村悦章, 飯島宏康, 延原隆良; 鉄道の省エネルギーに関する JR 西日本の取り組み～直流き電システム, 鉄道と電気技術, 20 (4), (2009), 16-21
- 11) 道永勝久, 佐井真也, 河原林一王, 菊田重則, 山本利雄; リチウムイオン電池搭載 UPS の開発, GS News Tech. Rep., 62, 1, (2003), 82-88

## 研究室紹介

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

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科

##### 電気工学専攻

複合システム論講座(土居研)

**電磁工学講座電磁エネルギー工学分野**

**電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)**

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野(大澤研)

##### 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端電子材料分野(藤田研)**

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学専攻

**知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)**

知能メディア講座画像メディア分野(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(佐藤研)

#### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野

##### エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研)

応用熱科学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電波科学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(橋本研)

#### 京都大学ベンチャービジネスラボラトリー (KU-VBL)

#### 産官学連携センター

研究戦略分野 §

注 § 工学研究科電子工学専攻橋研と一体運営

#### 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

ネットワーク研究部門ネットワーク情報システム研究分野(中村研)

## 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野

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

## 「磁性体のベクトルヒステリシス特性のモデリング」

電気機器には高効率化・小型軽量化・高出力化あるいは高い環境適合性など多くのことが同時に求められるようになっており、これらの要求を低コストに実現するためには、高精度な計算機シミュレーションを用いて、材料の能力を可能な限り引き出した詳細な機器設計を行うことが必要です。しかし、電気機器の鉄芯材料である電磁鋼板はベクトル磁気ヒステリシス特性など複雑な磁気特性を持ち、これを考慮した電気機器の電磁界解析は容易ではありません。このため、磁気飽和のみを考慮した解析の後、ヒステリシス損や異常渦電流損などを経験的な算出式を用いて後处理的に求めることが通常で、このことが、電気機器の電磁界解析の高精度化の妨げとなっています。そこで、本研究室では、電磁鋼板の複雑な磁気特性の効率的で正確なモデル化手法の開発に取り組んでいます。ここでは以下、ベクトルヒステリシス特性のモデル化に関して述べます。

図1は、ベクトルヒステリシス特性の一例で、回転する磁束密度ベクトル  $\mathbf{B}$  (図1 (a)) に対する、磁界ベクトル  $\mathbf{H}$  (図1 (b) (c)) の変化を示しています。異方性により  $\mathbf{H}$  の軌跡は円になっていません。また、ヒステリシスのため回転方向によって  $\mathbf{H}$  の軌跡が異なり、 $\mathbf{H}$  の位相が  $\mathbf{B}$  より進んでいます。回転機器内ではこのような回転磁束が生じることが一般的なので、 $\mathbf{H}$  と  $\mathbf{B}$  の両ベクトル間のヒステリシス特性を表現するモデルが必要になります。図2は、無方向性電磁鋼板 (JIS: 35A300) の回転ヒステリシス特性をベクトルプレイモデル<sup>[1]</sup>で表現した結果です。回転ヒステリシス損失は、鉄芯が飽和に近づくにつれて減少するのが特徴ですが、ベクトルモデルにより精度よく表現されています。

## 参考文献

- [1] T. Matsuo, "Rotational saturation properties of isotropic vector hysteresis models using vectorized stop and play hysterons," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, pp. 3185-3188, Nov. 2008.

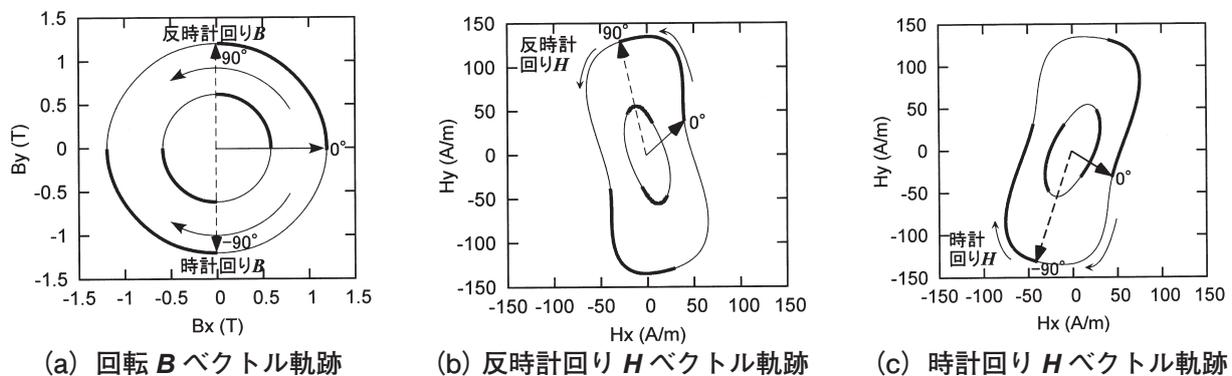


図1 ベクトルヒステリシス特性の例 (太線は  $B_x B_y > 0$  の部分, 細線は  $B_x B_y < 0$  の部分)

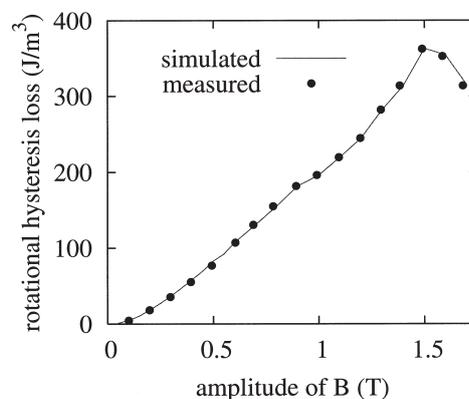


図2 回転ヒステリシス損

## 電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

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

## 「超伝導電力ケーブルの交流損失低減」

超伝導電力ケーブルは、抵抗がゼロであるという超伝導の特徴をいかした低損失・大容量・コンパクトな電力ケーブルであり、高温超伝導材料を使った電気機器の中でも、もっとも実用化が近いと期待されている機器です。日本、米国、EU、韓国、中国において、数百メートルからキロメートルの長さの超伝導電力ケーブルの研究開発プロジェクトが進行中、あるいは計画中であり、その一部は、実際の電力システムに導入され需要家への送配電の実証が行われています。今、この時期に、超伝導ケーブルの研究開発が活発に行われている背景には、地球環境問題に関連してエネルギー利用の高効率化への要請が世界的に高まっていること、20余年前の高温超伝導フィーバーの時代に発見されたセラミック系の脆い超伝導物質を複合加工し柔軟性を持った長い電線（高温超伝導線）を製造する技術が近年になってようやく確立してきたことなどがあります。

超伝導電力ケーブルには交流ケーブルと直流ケーブルがあります。直流ケーブルも太陽光発電、風力発電などの電力を輸送する手段として最近注目されていますが、既存の電力システムへの導入を考えた場合には交流ケーブルに対するニーズが高く、実際、世界における多くの研究開発プロジェクトのほとんどが交流ケーブルを対象としたものです。しかし、超伝導体も交流で用いると、超伝導体の内部に量子化して侵入した磁束（磁束量子線）が、電流の時間的変化に伴いピン止め力という力に抗してローレンツ力によって動かされることによって、交流損失という損失を発生してしまいます。この交流損失は絶対値としては大変小さなものですが、低温領域で発生するため、冷却に必要な機器の効率を考慮すると無視できるものではなく、交流損失の低減が超伝導電力ケーブルの実用化のひとつの鍵とされています。

我々の研究室では、超伝導電力ケーブルのアーキテクチャと超伝導ケーブルを構成するテープ形状をした高温超伝導線の特性に着目し、どのような断面アーキテクチャにすれば交流損失を低減できるか、交流損失低減の観点からはどのような高温超伝導線の特性が要求されるかといったテーマについて研究を行っています。大学の単独の研究室としてはかなり大規模な部類にはいる計算サーバを用いた電磁現象シミュレーションと、これまで培ってきた実験技術に基づいた交流損失測定を統合したアプローチにより、超伝導電力ケーブルの交流損失特性を解明しその低減指針の確立を目指した研究を進めています。

尚、本研究室は、NEDOによるイットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクトに主要な大学メンバーとして参画しており、本研究のその中で民間企業等との共同研究として実施しているものです。

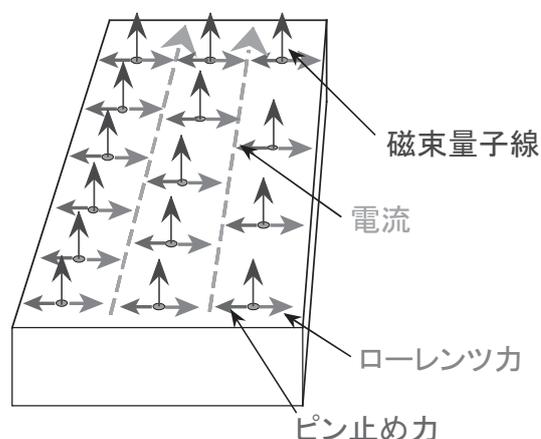


図1 磁束量子線、ピン止め力、ローレンツ力



図2 超伝導ケーブルの断面模型

## 電気エネルギー工学講座 電力変換制御工学分野 (引原研究室)

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

## SiC パワーデバイスの回路実装：高周波スイッチング駆動

ワイドバンドギャップ半導体 SiC の物性からデバイス開発に至る成果は京都大学の電子物性分野の世界的な成果として知られている。その基礎的な成果を元に、ここ数年漸く国内外の企業によりデバイスが製品として市場に出されるに至っている。しかしながら、電力変換は SiC パワーデバイスだけで達成されるものではない。パッケージング、放熱処理、回路実装、制御のための信号処理、そしてドライブ技術がバランス良く開発されて初めてデバイスの特性が生かされる。SiC パワーデバイスに関してみると、その回路実装に関する研究は漸く緒についたばかりである。SiC パワーデバイスは、Si に対してオン抵抗が小さく、スイッチング速度が速い、耐圧が高い、高温耐性が高いという物性的優位性がある。しかしながら、現在のデバイスの開発は、市場では従来の Si 系デバイスの置換え需要が意識されているが、その物性としての優位性を生かすための回路開発への努力は必ずしも熱心とはいえない。本来デバイス開発の研究者が従来の置換えデバイス開発の状況に満足せず、デバイスの特性を生かす回路を意識してこそ可能になる技術も在る。現状はとても満足いくものではない。

本研究室では、21 世紀 COE プログラムにおいて電気系の連携として SiC パワーデバイスの回路応用に関する研究を始め、まず、高温環境での駆動の可能性を検討した。その結果、450°C という高温環境でデバイスの駆動を確認し、400°C でコンバータの変換動作を示した。GCOE では、次に上述の温度がスイッチングロスに余裕度であることから、SiC 能動素子の高周波駆動を試みた。Si の FET などのゲート駆動は、今では Si 素子の限界である数百 Hz 程度で駆動可能なフォトカップラやドライバー IC によって行っている。しかしながら、本研究では SiC パワーデバイスのために新たにゲートドライブの方式を開発することが必要になる。新たな方式の開発の結果、SiC-JFET を図 1 の様に、数 MHz のスイッチング周波数で、かつ疑似 Normally-off 動作で駆動することに成功した。また小容量のコンバータにより動作確認も行っている。さらには、この周波数でソフトスイッチングを実現することで、スイッチング損失を下げることも示した (図 2)。これらは、デバイス技術に回路設計技術がうまくかみ合わなければ実現できない。

パワーデバイスが数 MHz 以上で駆動できた時、変換器には新しいパラダイムが生まれる。同じ容量ならばインダクタンス、キャパシタンスを小さくすることができることから、電源回路の主要な面積を占めるこれらの受動素子や放熱フィンなど小型化ができる。さらに、単なる電力変換の目的以上に変換を利用できる可能性が生まれる。

## 参考文献

- [1] T. Funaki, T. Kimoto, and T. Hikiyara, Evaluation of High Frequency Switching Capability of SiC Schottky Barrier Diode, Based on Junction Capacitance Model, IEEE Trans. on PE, Vol.23, No.5 (2008).
- [2] 宅野嗣大, 引原隆士, SiC JFET のゲートドライブ回路とスイッチング特性, 電気学会産業応用部門全国大会, 1-128, 2008 年 8 月 29 日.
- [3] 宅野嗣大, 引原隆士, SiC-JFET を用いた E 級電力増幅回路に関する実験的検討, 電気学会全国大会, 4-149, 2009 年 3 月 17 日.

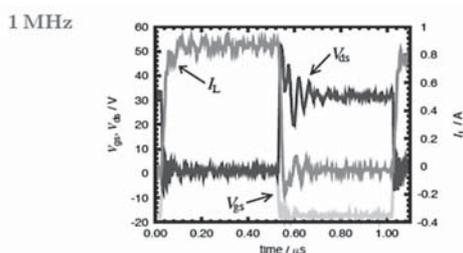


図 1 高周波ハードスイッチング

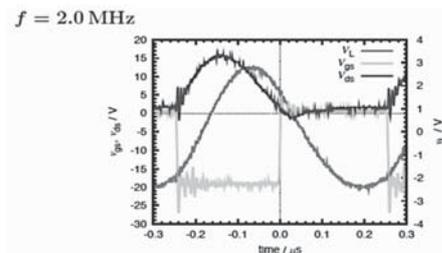


図 2 ソフトスイッチングの達成

## 電子物理工学講座 極微真空電子工学分野

[http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab16/index\\_j.html](http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab16/index_j.html)

## 「PVD 法による遷移金属窒化物薄膜の形成と真空電子デバイスへの応用」

周期律表の第4族、第5族の遷移金属の窒化物は、窒化チタン (TiN)、窒化バナジウム (VN) に代表されるように、化学的に安定で、硬度が高く、高融点、更に抵抗率も比較的低いことが知られている材料です。これらの材料は、従来から硬質皮膜や半導体デバイスのバリアメタルなどとして利用されてきました。当研究室では、この遷移金属窒化物の持つ特徴が、冷陰極材料が備えるべき性質と合致していることに着目し、電界放射陰極の材料として検討を進めてきました。具体的には、これら材料の仕事関数等の物性評価とデバイス形成の可能性検討です。本稿ではこれまでに得られた成果について紹介します。

上記の遷移金属窒化物を形成するためには通常、1000°C程度の高温を必要とします。我々は低温で化合物薄膜形成が可能な、スパッタリング法やイオンビームアシスト蒸着法などの物理的気相成長 (Physical Vapor Deposition: PVD) 法を用いてこれらの薄膜をシリコン基板上に形成しました。遷移金属窒化物薄膜のうち、どの材料が最も冷陰極材料として適しているかを検討するために、第4周期から第6周期にいたる遷移金属窒化物の薄膜を形成し、これらの薄膜の仕事関数をケルビン法により測定しました。

マグネトロンスパッタ法により作製した薄膜の仕事関数の値を図1に示します。仕事関数は、TiN や VN など軽い金属の窒化物では高く、窒化ハフニウム (HfN) や窒化タンタル (TaN) で低くなることが明らかとなりました。仕事関数は若干の窒素組成の変化に対してはあまり大きな依存性を持たず、金属材料が決まればほぼその値が決まっています。

HfN や TaN を陰極とする微小な電界放射型の真空電子デバイスの作製も試みました。シリコン基板を反応性イオンエッチングを用いて加工し、円錐状のコーンが並んだアレイを形成しました。その上から薄い遷移金属窒化物薄膜を形成し、さらに絶縁膜、ゲートとなる金属膜を形成しました。最後にコーン先端部分の金属膜と絶縁膜を除去して真空電子デバイスとしました。HfN を用いると絶縁層の特性もよく、良好な電子放出特性を示すデバイスを作製できることが明らかとなりました。図2に作製した真空電子デバイスの電子顕微鏡写真を示します。

最近では、この真空電子デバイスを高温や放射線照射化などの過酷環境下でも利用できるデバイスとするべく、高温度での電子放出特性の確認や、能動デバイスとしての特性の評価へと進展しています。また、遷移金属窒化物の更に進んだ薄膜物性評価にも力を入れています。

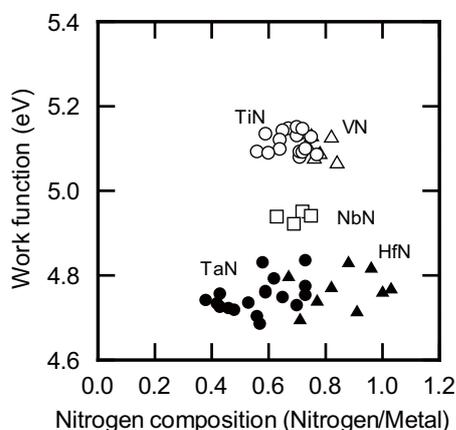


図1. 仕事関数の窒素組成依存性

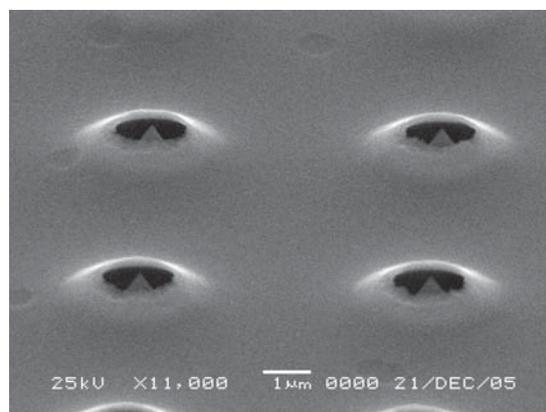


図2. HfN 電子源の走査電子顕微鏡像

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野（木本研究室）

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

### 「SiC を用いた高耐压横型 MOSFET の作製」

集積回路や電力変換素子を牽引してきた Si デバイスは、素子の発熱や電界強度の増大により材料固有の物性に起因する性能限界が顕在化してきている。広い禁制帯幅を有する半導体、特にシリコンカーバイド (SiC) は、数々の優れた物性を有することから次世代の低損失パワーデバイス、高周波デバイス、高温動作デバイス用材料として極めて有望である。SiC パワー MOSFET は耐压 600 ~ 3000V の領域で最も有望なパワーデバイスであり、現在はディスクリートの縦型 MOSFET の研究開発が進められている。SiC パワーデバイスも将来的には、駆動回路や制御回路との一体化が進められ、高機能パワー集積回路 (IC) のニーズが高まると予測される。このような素子実現には、集積化に適した横型のパワー MOSFET が有望と考えられる。本研究では、将来の高耐压パワー IC を目指した横型 SiC RESURF (REduced SURface Field) MOSFET の作製と特性向上を行った。

図 1 に本研究で作製したダブル RESURF MOSFET の断面構造の模式図を示す。本研究では、超接合構造の一種として、RESURF 領域の表面に p 型層を設けたダブル RESURF MOSFET を新たに作製した。ダブル RESURF 構造では、RESURF 領域 (n 型) / p 型成長層界面だけでなく、表面 p 型層 / RESURF 領域界面からも空乏化が進むため、RESURF 領域のドーピング密度を上げることが可能であり、オン抵抗の低減に有効である。RESURF1 領域、RESURF2 領域は N のイオン注入、表面 p 層は Al のイオン注入により形成した。RESURF1 領域、RESURF2 領域の各ドーズ ( $D_{RES1}$ 、 $D_{RES2}$ )、および表面 p 領域のドーズ ( $D_{TP}$ ) を広い範囲で変化させ、シミュレーションと実験の比較を行った。ダブル RESURF MOSFET の耐压は実効 RESURF1 ドーズ ( $D_{RES1} - D_{TP}$ ) と実効 RESURF2 ドーズ ( $D_{RES2} - D_{TP}$ ) に依存することを明らかにした [1]。ゲート酸化膜 (膜厚約 80 nm) は  $N_2O$  酸化 (1300°C) で形成した。チャネル移動度は約  $35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  である。

図 2 に作製した 2 ゾーンダブル RESURF MOSFET の出力特性を示す。ドリフト長が  $20 \mu\text{m}$  のデバイスではゼロゲートバイアスで耐压 1580 V、酸化膜電界が  $3 \text{ MV}/\text{cm}$  のときのオン抵抗  $40 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  という優れた特性を示した。しきい値電圧は 2.8 V のノーマリオフ特性である。ドリフト長が  $10 \mu\text{m}$  のデバイスでは耐压 1000 V、オン抵抗  $30 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  の特性が得られた (図示していない)。本研究で作製した MOSFET では、 $V_B^2/R_{ON}$  で表される性能指数として  $33 \sim 62 \text{ MW}/\text{cm}^2$  という値が得られた。これは、これまでに報告されたあらゆる横型 MOSFET の中で最高の特性である [2]。

[1] M. Noborio, J. Suda, and T. Kimoto, IEEE Trans. Electron Devices Vol.54 (2006), pp.1216-1223.

[2] M. Noborio, J. Suda, and T. Kimoto, IEEE Electron Device Lett. Vol.30 (2009), in press.

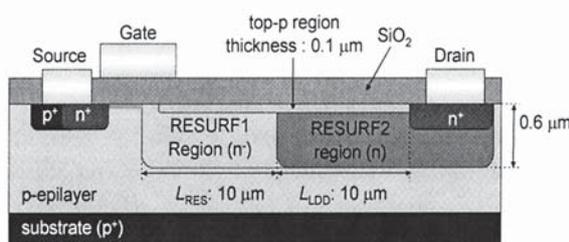


図 1 作製した SiC RESURF MOSFET の構造

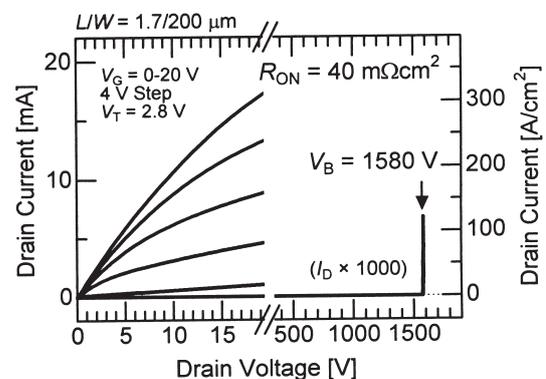


図 2 作製した SiC RESURF MOSFET の特性

## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

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

## 「近接場分光法を用いた InGaN 系発光素子におけるキャリア再結合過程の解明」

InGaN 系量子井戸を発光層とした青色発光ダイオード (LED) が実用に至ってから、すでに 15 年以上たっていますが、いまだその発光機構は議論の対象となっています。というのも、InGaN 系量子井戸には、従来の例えば GaAs を中心とした発光素子よりも 4 桁以上も高い密度の貫通転位 ( $>10^{10}\text{cm}^{-2}$ ) が存在するにも関わらず、それを用いた青色 LED の外部量子効率約 75% (内部量子効率は約 90%) と非常に高い値を実現しているため、この背景にあるメカニズムが多くの研究者の興味を集めているからです。この機構を解明するために、我々のグループの報告 (被引用回数 600 回以上) を皮切りに、InGaN 中に形成されたナノ局在中心に関する議論が非常に活発になされてきました。しかしながら、透過電子顕微鏡の観察中に生じる In クラスタリングや、カソードルミネッセンス測定におけるキャリア拡散の問題などのために、議論は百家争鳴の状態でした。このことから、当研究室では、ナノ構造と光物性の相関を非破壊で評価する測定手段が非常に重要であると考え、精力的な研究を展開してきました。我々の開発した、マルチモード近接場分光法は、波長、空間分解測定手法であり、さらに超高速レーザと組み合わせることで、波長・時間・空間分解を実現する究極の測定ツールであり、発光中心、非発光中心、キャリア拡散長やキャリアの再結合ダイナミクスを nm スケールかつ非破壊で直接同定することができる新たな評価手法です。

図 1 に、一例として近接場光学顕微鏡 (SNOM) で観察した青色発光 InGaN 量子井戸の光励起発光 (PL) 特性を示しました。図 1 (a) は PL 強度マッピング像、(b) は発光強度の弱い A 領域、強い D 領域、および発光の強い領域と弱い領域の境界である B、C 領域において測定したスペクトルです。発光強度が強い D 領域では、発光ピークエネルギーが低エネルギー側にある傾向が強く、局在中心からの発光を示しています。一方、発光強度が弱く、非発光再結合中心が多いと予想される A 領域では、発光は高エネルギー側に位置しています。これに対して、境界領域 B、C では二つの発光ピークに分離していました。これらのことから、非発光再結合中心の周りで組成変調が生じてそれがポテンシャル障壁として働き、非発光再結合中心への捕獲が抑制されていること、そしてそれが高効率発光の有力な機構となっていることが見出されました。同様の測定を、緑色発光素子や紫外発光素子にも展開し、波長フロントの拡大にも貢献しています。

参考文献：A. Kaneta, M. Funato, and Y. Kawakami, *Phys. Rev. B* **78**, 125317 (2008).

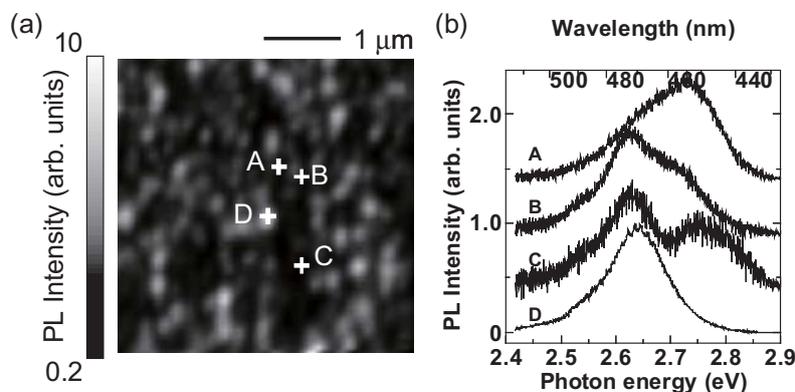


図 1 (a) 青色発光 InGaN-QW の SNOM-PL 強度マッピング像  
(b) A ~ D において測定された PL スペクトル

光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス部門 ナノプロセス工学分野 (高岡研究室)  
[http://cib.kuee.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess\\_eng/index.html](http://cib.kuee.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html)  
 「エタノールクラスターイオンビームを用いたシリコン基板の低損傷加工」

我々が日常生活で目にする電気・電子機器の多くには集積回路 (IC) が用いられています。IC の多くはシリコン基板上に作られています。その開発以来、加工パターンをより微細化することにより集積度や計算速度の向上がなされています。しかし、最近、基板への照射損傷や製造工程の複雑化による歩留まりの低下等により、これまで実現されていた IC の高性能化が緩やかになっています。このため、均一で高い再現性を持ちかつ低損傷な表面加工法が求められています。さらに、地球温暖化を抑制するために温室効果ガスを使用しない表面加工法が求められています。一方、液体クラスターイオンビームを用いた表面加工法は従来のウェットプロセスの限界を打破する表面プロセスとして注目されています。本稿では、シリコン基板とエタノールクラスターイオンビームとの相互作用についての研究を紹介します。

エタノールクラスターは数千個のエタノール分子が分子間力によって凝集したものです。クラスターソースにエタノールを導入し、ヒーターで過熱することにより蒸気圧を高め、超音速ノズルを通してエタノール蒸気を真空中に噴射すると、エタノールクラスターが生成されます。生成されたエタノールクラスターに 200 eV 程度に加速した電子を照射し、イオン化します。生成したクラスターの速度が一定であるとすると、クラスターの運動エネルギーはクラスターを構成する分子の数 (クラスターサイズ) に比例します。この現象を利用すると、減速電圧を印加することによりクラスターイオンビームから小さなサイズのクラスターイオンやモノマーイオンを除くことができます。図 1 にエタノールクラスターイオンビーム照射によるシリコン基板のスパッタ深さの加速電圧 ( $V_a$ ) 依存性を、図 2 にその際の変位原子数の減速電圧 ( $V_r$ ) 依存性を示します。エタノールクラスターイオンビームによるスパッタ率は通常のアルゴンビームの 100 倍以上と極めて高く、変位原子数 (照射損傷) は小さいものでした。また、減速電圧の増加により変位原子数を少なくすることができ、条件によっては無損傷の照射が可能になります。この様に、モノマーイオンビーム照射ではトレードオフの関係にある、高スパッタ率・低照射損傷の表面加工を実現できることが分かりました。

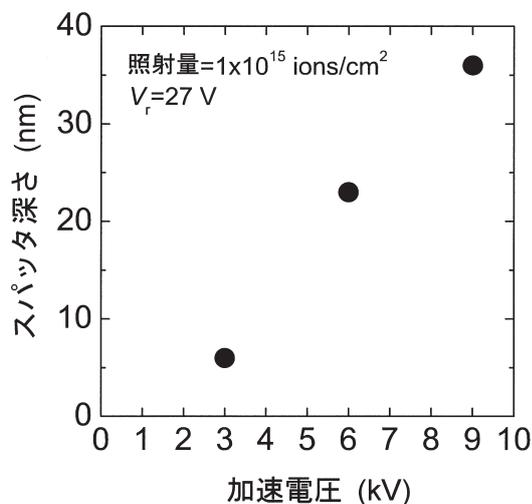


図 1. スパッタ深さの加速電圧依存性

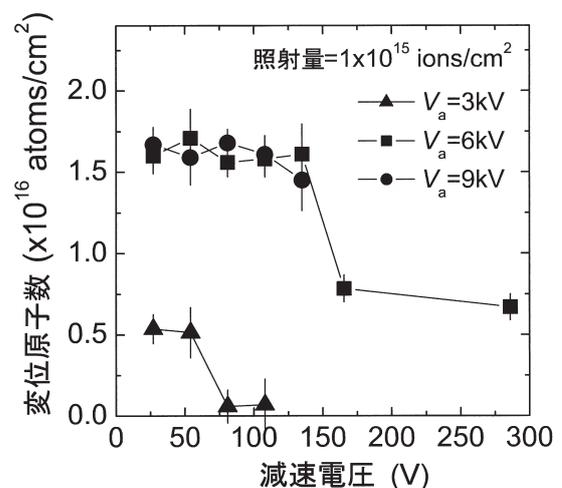


図 2. 変位原子数の減速電圧依存性

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野(藤田研究室)  
<http://cib.kuee.kyoto-u.ac.jp/ematerial/>  
 「酸化物半導体の世界を拓く」

多くの元素は酸素と化合して酸化物となる。それゆえ酸化物には多くの種類があり、それだけ多くの機能を持つ。また多くの元素にとって酸化物は最も安定な形態の一つで、製造コストや環境負荷の点で優れている。電気・電子工学の分野でも酸化物は圧電体、誘電体、磁性体、絶縁体、透明導電体、超電導体など多様な分野で用いられている。ところが酸化物が半導体として用いられることはほとんどなかった。これは、半導体として求められるレベルの組成制御、構造制御、電子物性制御が困難なためであった。しかし GaAs や InP 等半導体の結晶成長に用いられている高度な成長技術を用いることにより、半導体としての性質を示す酸化物が得られるようになり、環境に優しい材料であるとともにその多様性ゆえに、新しい原理に基づく光・電子デバイスの基盤材料として注目されている。一つの代表が ZnO であり、紫外発光・受光デバイス、高周波デバイス、フラットパネルディスプレイ駆動用 TFT、スピントランジスタ等への期待が寄せられている。実は現在のスタンダードな半導体成長技術である有機金属気相成長 (MOCVD) による ZnO の成長は 1982 年に電子工学教室川端研究室から報告され [1]、分子線エピタキシ (MBE) による成長は 1995 年に筆者 (藤田) がノースカロライナ州立大学滞在時に成功しており [2]、半導体応用を目指す酸化物半導体研究の礎が本電気系教室にあることは注目すべきである。

われわれの研究室では、多様な酸化物半導体の機能を開拓する観点で研究を行っている。最近になって注目しているのが  $Ga_2O_3$  半導体である、この半導体は禁制帯幅約 4.8eV (波長 260nm) の直接遷移型のバンド構造を持ち、その基板が開発されているという大きな利点がある。基板表面の熱処理により空孔が少なく分子ステップを持つような平坦面が得られるため、これを利用したショットキー型光検出器を試作した。この光検出器は波長 260 nm 以下の光に感度を持つため、自然界に存在する光に影響されことなく深紫外光の検出が可能である。図は蛍光灯照明下で炎に含まれる深紫外光を検出しているところである。また MBE により基板上に  $Ga_2O_3$ 、 $(Al_xGa_{1-x})_2O_3$  ( $x < 0.4$ ) 半導体が分子層ステップを保った layer-by-layer 成長をする。これは今後多層構造による光・電子デバイスへの進展が可能なることを意味し、ワイドギャップであるが故の高い絶縁破壊電界に期待すれば、コストに優れたパワーデバイスへの応用などが考えられる。

さらに  $Ga_2O_3$  半導体をベースに、コランダム構造を持つ  $Ga_2O_3-Fe_2O_3-Cr_2O_3$  混晶半導体系の物性探索を行い、光・電子物性と磁性の相互作用を持つ新しい酸化物半導体の発現とデバイス応用を目指している。

[1] M. Shimizu, T. Horii, T. Shiosaki, and A. Kawabata: *Thin Solid Films* **96** (1982) 149.

[2] M.A.L. Johnson, S. Fujita, W.H. Rowland, Jr., W.C. Hughes, J.W. Cook, Jr., and J.F. Schetzina: *J. Electron. Mater.* **25** (1996) 855.



図  $Ga_2O_3$  深紫外光検出器により蛍光灯照明下で炎の検出を行っているところ。

## 知能メディア講座 言語メディア分野 (黒橋研究室)

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

### 「大規模ウェブテキストを用いた語の類似度計算」

近年、ウェブをはじめとする大規模テキストから知識を獲得し自然言語解析に適用することにより、解析性能が大幅に向上しています。獲得できる知識としては様々なタイプのものがありますが、ここでは語の類似度計算について取り上げます。一般に、語の類似度は人手で整備されたシソーラスを用いて計算されます。しかしシソーラスにはカバレッジが低いことや一貫性を保つことが難しいといった問題があることから、大規模テキストを用いて、「似た語は似た文脈で出現する」という仮説に基づいて語の類似度を計算することを行ないました。例えば、「医者」と「医師」という2語は、どちらも「～に診せる」、「～を開業する」といった文脈で出現することから、類似していると判断することができます。

まず、大規模ウェブテキスト（日本語1億ページ、16億文）に対して係り受け解析を行ないます。そこから、名詞、助詞、動詞の3つ組を抽出し、助詞と動詞をペアとしたものを名詞の文脈とみなします。例えば、「子供を医者に診せた」という文からは、名詞「子供」に対して文脈「～を診せる」、名詞「医者」に対して文脈「～に診せる」を得ます。得られた文脈を名詞ごとに集約し、各名詞をベクトルで表現します。そして、2語の類似度を、2つのベクトルの類似度と定義します。

語の類似度計算手法を、相澤が構築した評価セット [1] を用いて評価しました。この評価セットは2つのタスクからなり、以下の手順で作られています(図1)。まず、「AやBなどのC」というパターンに合うものを大規模テキストから収集します。タスクIは、AとBを類義語とし、Aとシソーラスで異なるカテゴリに属している語Dを選び、非類義語とします。タスクIIは、A、BとCが上位下位関係にあるかどうかを手で判断します。図1にあるような「○」と「×」を正しく判定できるかどうかによってシステムを評価します。

この評価セットを用いて、類似度計算の評価を行なったところ、タスクIではF値0.98、タスクIIではF値0.88といった高い精度を達成することができました。また、類似度計算に利用するテキストのサイズを変更したところ、図2のように大規模にすればするほど精度が向上し、16億文あたりで精度が飽和することを確認しました。

当研究室ではこれまでに、「誰が何をどうした」という知識である格フレームを自動構築することに成功しました。格フレーム構築では、動詞の用法を区別するために語の類似度を用いてクラスタリングしています。以前は語の類似度計算にシソーラスを用いていましたが、上記で計算した語の類似度を利用することにより、以下のようにシソーラスにない語を含む格フレームを構築することができました。

焼く:1 {私, 主人, …} が {パン, ケーキ, …, パームクーヘン, …} を 焼く

焼く:2 {ファイル, 曲, 音楽, …} を {CD, DVD, CDR, …} に 焼く

#### 参考文献

- [1]: 相澤彰子. 大規模テキストコーパスを用いた語の類似度計算に関する考察. 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.3, pp.1426-1436 (2008)

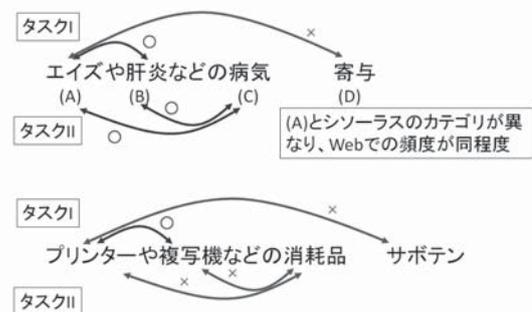


図1. 相澤が構築した評価セット

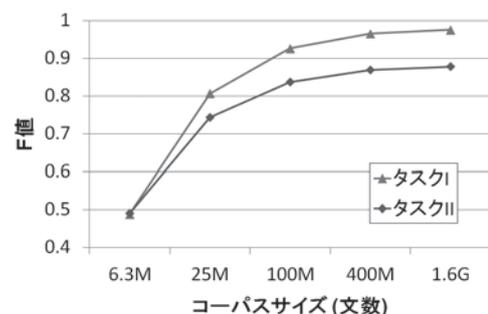


図2. F値とコーパスサイズの関係

通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室）

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

「協力中継の無線ネットワークへの導入に関する課題の検討」

携帯電話ネットワークや無線LANは、現在の社会を支える不可欠なインフラとなりつつある。これら無線ネットワークにおける伝送は多くの場合、有線ネットワークに接続された基地局やアクセスポイントと呼ばれる無線局と端末間の直接伝送であり、カバーエリアを抜本的に改善しようと考えたとき、無線中継伝送（マルチホップ伝送）が一つの解となりうる。マルチホップ伝送機能を有する中継局をネットワーク内に導入できれば、有線ネットワークに接続することが難しい場所にも、無線ネットワークの導入が可能になると考えられる。携帯電話システムの3GPP、無線MANのIEEE802.16、無線LANのIEEE802.11といった代表的な標準化組織すべてにおいて、マルチホップ伝送を用いる無線ネットワークの標準化が進んでいる。今後標準規格に則った製品が市場に登場すると考えられ、産業界で注目度の高い技術である。

このマルチホップ伝送の特性を向上させる手段として、協力中継が考えられている。これは、図1において発呼局（S）と中継局（R）からの信号、あるいは複数の中継局からの信号を宛先局（D）においてダイバーシチ合成する伝送方式である。協力中継を行う場合の受信信号電力は、直接伝送およびマルチホップ伝送と比較して増大可能であるため、孤立した直接伝送やマルチホップ伝送を協力中継に切り替えることで必ず通信品質を向上させることが可能である。

一方、無線ネットワークを構築するにあたっては、限られた資源である無線周波数を地理的に繰り返し使用することが重要である。協力中継は方式によっては干渉源の数を増加させるため、周波数繰り返しが効率よく行えないことが危惧される。そこで図1のように干渉によってネットワークの特性が制約される状況下の協力中継の特性を評価し、発呼局の空間的な同時送信密度が上がるにつれ、直接伝送、協力中継、マルチホップ伝送と切り替えることで高い周波数利用効率が得られることを明らかにした [1]。

また、無線ネットワークにおいては確認応答などのために双方向に通信を行うことが多い。直接伝送やマルチホップ伝送においては、ある方向の伝送と逆方向の伝送では送信アンテナと受信アンテナが逆となるため、双方向通信の容量の間に対称性が成り立つ。この一方、協力中継では送信アンテナ群と受信アンテナ群が逆とならないため、多くの場合に対称性が成り立たない。この非対称性が現れる条件を明らかにし、図2のように伝送を行う方向を適応的に切り替えることで高い周波数利用効率を実現できることを明らかにした [2]。現在は双方向通信の間の公平性を保証するスケジューリングなどに関して検討を進めている。

- [1] Koji Yamamoto, Hirofumi Maruyama, Takashi Shimizu, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, "Spectral efficiency of fundamental cooperative relaying in interference-limited environments," IEICE Transactions on Communications, vol. E91-B, no. 8, pp. 2674-2682, Aug. 2008.
- [2] 佐伯高明, 山本高至, 村田英一, 吉田進, "半二重協力中継における非対称性に着目した送信方向切り替え方式の検討," 電子情報通信学会技術報告, RCS2008-125, pp. 135-139, Oct. 2008.

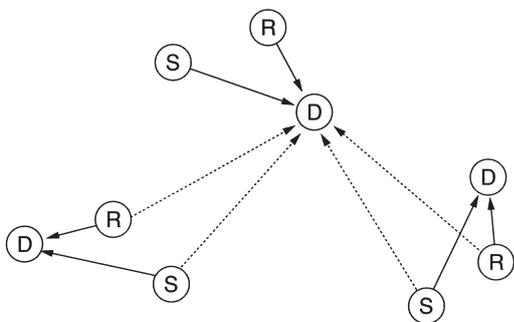


図1. 発呼局と中継局から同時に送信を行う協力中継図

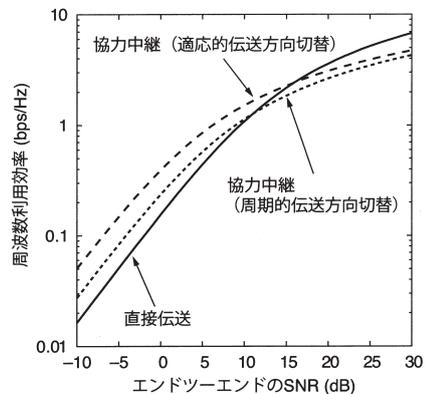


図2. 双方向協力中継における適応的の伝送方向切り替えの効果

## 通信システム工学講座 伝送メディア分野 (守倉研究室)

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

## 「高速移動体への大容量通信を可能にする適応等化器の研究」

移動無線の大容量化は驚くべきスピードで進んでいる。1992年にデジタル移動通信システムがサービスされたときには9.6kbpsだった伝送容量は、2～3年後には200Mbps程度にまで高速化される予定である。このような大容量通信を移動無線環境で行うと、電波の反射・回折に起因したマルチパスフェージングが発生する。即ち、これからの移動無線システムではマルチパスフェージング対策が必須となる。幾つかの対策法があるが、なかでも適応等化器はマルチパスフェージングに対する有効な手段として古くから知られており、無線中継系や移動無線に適用されてきた。そこで、我々は上記のような大容量無線システムには、簡易な処理で実現できるFFT (Fast Fourier Transform) を利用した適応等化器 (FFT 等化器) が適していると考え、研究を進めている。但し、端末の高速移動に伴い、通信環境が大きく変動する場合、FFT 等化器は特性を著しく劣化させる。端末を携帯できることが利点の移動通信システムにおいて、高速移動に伴う特性劣化は大きな課題となる。そこで我々はこの課題を解決する上で重要な次の現象を見出した。通信環境の変化によりFFT処理される各々の信号の周波数特性が時々刻々と変化する場合、ある瞬間の周波数特性を用いてFFT等化を行うと、等化器出力においてはその瞬間に受信された信号の品質が最も高くなる。至極当然の響きもあるが、我々はこれが1FFT処理ないでも成立することを見出した。そこで、FFT等化器を複数用意し、各々異なった瞬間の周波数特性を利用して等化を行い、その出力を選択合成することで等化特性の大幅な改善が可能になることを明らかにした[1]。図1にその構成を示す。本提案等化器では更なる特性改善のため、誤り訂正復号器と、その復号結果に基づき高速移動に伴う劣化要因を除去する歪補償機を備えている。図2にそのビット誤り率特性を示す。図2に示すように、従来のFFT等化器では約 $10^{-1}$ にフロア誤りが発生しているが、提案の等化器を用いることで、ビット誤り率を3桁程度低減できている。今後は本方式を、上記の高速移動無線通信システムに適用した場合の特性を評価して行く。

[1] 橋本、田野、梅原、守倉、“高速フェージング伝送路のための並列FFT等化”、信学論 (B) Vol.J92-B, No.3, pp.1174-1184, 2009

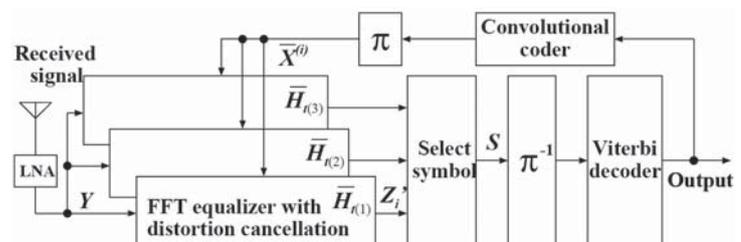


図1 提案する等化器の構成

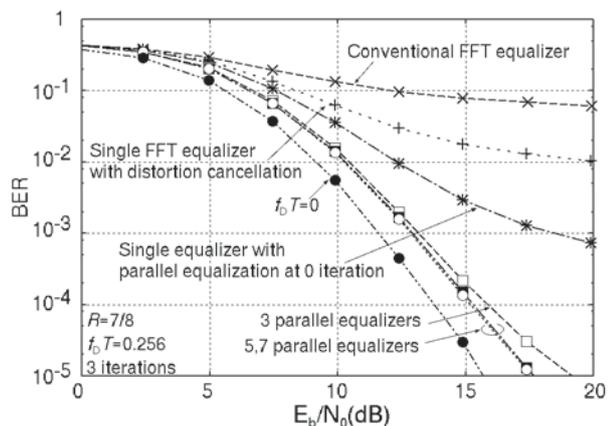


図2 BER 特性

集積システム工学講座 大規模集積回路分野 (小野寺研究室)  
<http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/>  
 集積回路の特性ばらつき評価技術

高度情報化社会を支える基幹デバイスである集積回路は、多大な研究開発努力により微細化、大規模化、高機能化が図られてきました。しかし、デバイスの寸法がナノスケールに向かう現在、微細化に伴う各種の物理限界が顕在化しています。すなわち、ドーパントの原子レベルの配置位置ばらつきや、デバイス構造の原子レベルの凸凹により、微細デバイスの動作特性には本質的にばらつきが存在します。ゲート絶縁膜も物理限界近くまで薄膜化され、動作に伴う特性や信頼性の劣化も深刻になっています。当研究室では、原子レベルの揺らぎが存在しても安定に動作しうる集積回路の実現に向けて、微細デバイスに内在する本質的な特性ばらつきや製造性の劣化、信頼性の低下などの物理的フォールトを克服する設計技術に取り組んでいます。ここでは、特性ばらつきを評価する技術について説明します。

集積回路の特性ばらつきは、各種の要因が重なって発生しています。そのため、実際のシリコン上で発生しているばらつきを評価し、その成分分離やモデル化を行うことが必要です。そこで、多数のリング発振回路 (RO) をアレー状に配置したテスト回路を開発し、実チップにおけるばらつき特性を実測しました。90nm プロセスで設計試作した回路を図1に示します。本回路により、チップ内におけるばらつきを、約 50 μm の空間分解能で観察できます。評価結果を図2に示します。図2左上は、チップ上での発振周波数分布です。チップ内ばらつきの標準偏差は 1.6% でした。このばらつきを、確定的成分 (図2左下)、大域的成分 (図2右上)、ランダム成分 (図2右下) の三者に分離しました。ここで、確定的成分とは、チップ上の場所に依存して確定的に発生するばらつきで、チップの縦方向のみに僅かな周期性 (周期: 約 240 μm) を持っていました。このような周期性を持つ確定的なばらつき成分が存在することは、今回の研究で初めて明らかとなりました。

大域的成分とは、チップ内で緩やかに変動する成分で、チップごとに分布は異なりますがばらつき量は僅かです。ランダム成分は位置相関のない正規分布をしており、原子レベルの揺らぎによって発生する成分と考えられます。各成分の標準偏差は、確定的成分が 0.68%、大域的成分が 0.01%、ランダム成分が 1.36% でした。ランダム成分が最も支配的ですが、確定的成分も無視できません。180nm や 65nm プロセスにおいても同様の評価を行い、確定的成分が存在することを確認しました。現在、より詳細な要因分析を行っています。なお、ウェハー内でのチップ間ばらつき量は、その標準偏差が平均発振周波数の 3.2% でした。チップ間のばらつきを製造後に補償する技術についても検討をすすめており、製造が容易でばらつきに強靱な回路の実現に向けた取組を推進しています。

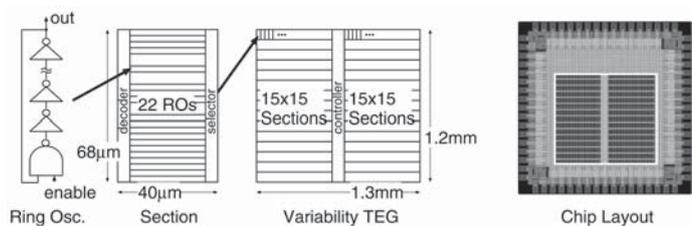


図1. ばらつき評価用テスト回路

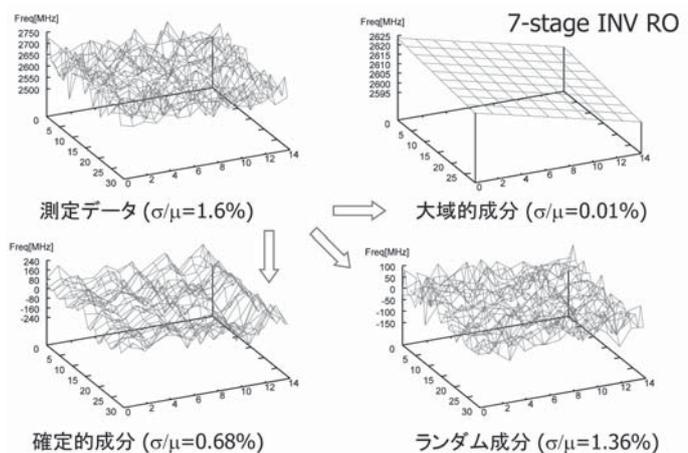


図2. チップ内ばらつきの実測値および成分分離結果

## システム情報論講座 医用工学分野 (松田研究室)

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

### 「仮想空間中での力覚情報の再現に関する研究」

近年バーチャルリアリティ (VR) 技術において、視覚や聴覚だけでなく、触覚に関する情報の扱いが重要視されている。医療分野においては、手術シミュレーションや触診シミュレーションなどにおいて、触覚情報の利用により実際と同様の施術行為が可能になると期待される。

VR 技術による触覚情報の提示は、従来ばねモデルなどに対して経験的にパラメータを設定し、実空間と類似した情報提示を実現するケースが多く見られる。この際、実際の触覚情報は忠実に再現されず、あるいは忠実に再現されたか否かの評価が行われていない。しかし、触診シミュレーションのような課題については、実物体から得られる 3 次元的な触覚情報を、計測に基づいて忠実に再現することが求められる。我々は、対象物体の能動的な操作により得られる反力の知覚 (力覚) 情報を、忠実に再現する手続きについて検討を進めている。

能動操作における力覚情報を仮想空間中で忠実に再現するために、我々は (1) 実物体からの反力分布の計測手続きの確立と計測装置の構築、(2) 計測反力情報を用いた仮想物体からの力覚情報の記述法の確立、(3) 仮想物体の操作に対するリアルタイムでの反力情報の提示法の確立、の 3 点を必要な検討課題と考え研究を進めている。この際、手法の妥当性を評価するためには (4) 心理物理学的な基準による、実物体と仮想物体とからの力覚情報を比較する手続きの確立が不可欠となる。また (4) と関連して、(5) 能動操作における対象物知覚の機序の解明も進める必要がある。

(1) について、我々は実物体表面からの反力分布を自動的に計測するシステムを構築している [1]。本システムでは、レンジセンサにより物体表面形状を獲得し、位置センサとして用いるハプティックデバイスと力覚センサを、ロボットアームにより物体表面で操作することで、計測の自動化を実現する。光学カメラが実空間での光学的な分布を記録するのに対し、本システムは 3 次元的な力覚情報の分布を記録することから、我々はこれを 3 次元力覚カメラと呼んでいる。

(2) (3) については、位置・速度 6 次元空間中で計測反力データ群を Radial Basis Function により補間することで反力分布を記述し、この空間中で格子状に配置した参照点群を用いて、仮想物体の操作位置に対する反力を高速に算出し提示する手法を提案している [2]。現在は、対象物体の表面形状情報を用いてこの手法の精度向上を図る手続きについて検討中である。

(4) (5) に関し、能動触の知覚特性を解析する手続きとして、従来は形状や硬さなど対象物の性質と知覚との関係を解析することが多く行われている。しか能動操作に変動は不可避であり、従来手続きはこの点を十分考慮していない。我々は、能動触において人が直接獲得する刺激として、位置情報および反力情報の軌跡を記録し、これらと知覚との関係を解析する手続きについて検討を進めている [3]。

#### 参考文献

- [1] 水田, 國川, 松田, 日本バーチャルリアリティ学会大会第 13 回論文集 (2008)
- [2] 大牟禮, 水田, 松田, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.13, No.1 (2008)
- [3] 藤森, 水田, 松田, 電子情報通信学会技術研究報告 HIP2006-47 (2006)

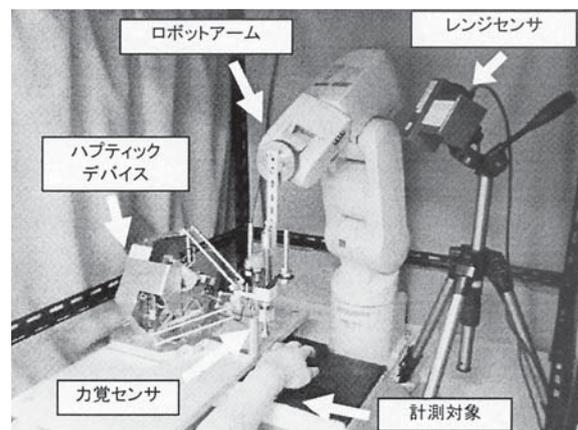


図 1 3 次元力覚カメラの外観

エネルギー社会・環境学講座 エネルギー情報学分野

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

「原子力発電所におけるヒヤリハット活動の活性化手法の提案と実践」

原子力発電所で安全意識の高揚・事故防止のために行われている取り組みの1つに、ヒヤリハット活動がある。ヒヤリハット活動とは、事故に至る前に未然に防ぐことができた事例、いわば事故未満の事例を収集し、そこから事故防止に役立つ教訓を取り出す活動である。通常のヒヤリハット活動は参加者が実際に集まって顔を合わせて行うものであるが、この方法では地理的に分散した複数の発電所間での事例や教訓の共有が難しい。また、ヒヤリハット活動が有効に行われるには、多くの事例が収集され、事例に関する活発な議論が行われる必要があるが、現在は必ずしも活発に行われているわけではない。

そこで、当研究室では、ICTを利用して場所を問わずヒヤリハット活動が可能なソフトウェア“ヒヤリハット共有システム”を開発した。このシステムは、ヒヤリハット事例を出来事や要因等で構成するツリーで見やすく視覚化する機能（図1）、良いコメントを評価する機能を備えた電子掲示板、議論への参加が“貢献ポイント”として提示される機能など、議論を活性化するための機能を備えている。また、このシステムを用いて匿名の参加者が5名程度のグループでヒヤリハット事例の登録と自分たちで登録した事例に関する議論を行うヒヤリハット活動を提案した。この活動には、掲示板の議論を活性化させるため、事例に関して積極的に質問することを特に要請された参加者である“積極的参加者”を導入している。

提案したヒヤリハット活動が実際に実施可能であることの確認と、ヒヤリハット活動を活発にする要因、逆に停滞させる要因を明らかにすることを目的に、現在原子力発電所で働いている現場監督6グループ30名にシステムを用いたヒヤリハット活動を行ってもらった。その結果、3つのグループは活発に活動が行われたが、残り3つのグループは活動が停滞する結果となった。（図2）。活発だったグループと活発でなかったグループの比較・分析から、(1) 参加者が自分自身の手で登録した事例は掲示板の議論が返答の連鎖によって盛り上がる傾向があるが、実験者が用意した事例の掲示板の議論は盛り上がらない傾向があること、(2) 活発だった一部グループの掲示板投稿の内容が積極的参加者によって導かれたものであったことが明らかとなった。

今後、さらに活動を活発にする要因の分析をすすめ、得られた知見をまとめて、ヒヤリハット活動を促進する手法を提案すること、そしてその手法を実際の現場で評価することを目指している。

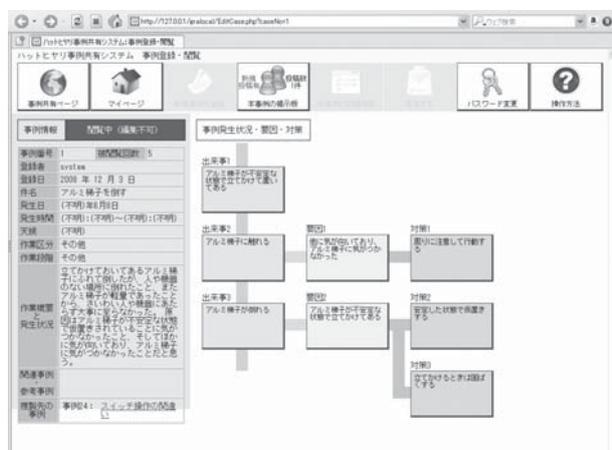


図1 ヒヤリハット事例の視覚化機能

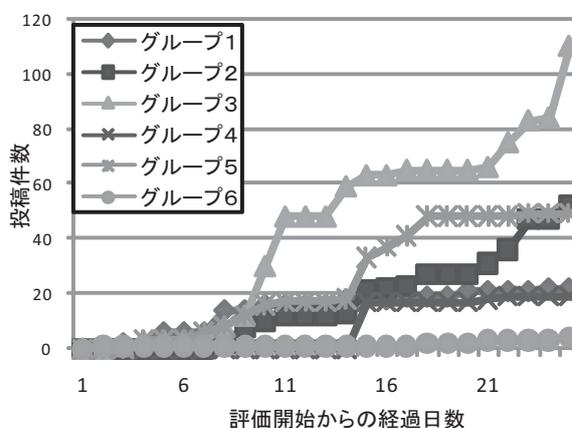


図2 各グループの掲示板投稿数（累積）

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（白井研究室）

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

### 「微小電力注入による分散電源の導入された配電系統の動特性推定」

1. はじめに 近年、電力事業の自由化により種々のタイプの分散型電源が配電系統に導入され、その数は今後ますます増加すると考えられ、動的な負荷と相俟って系統安定度に影響を与えることが懸念されている。従来は、偶発的な系統事故や負荷脱落などのイベントでの情報をもとに、静的な負荷特性を推定することが主であったが、先述のように複雑化する配電系統の連系状況や運転状態については負荷系統の動特性を系統的に把握する方法が求められている。

2. 提案手法 当研究室では系統に微小な既知の電力を注入し、それに対する系統の動揺を解析することで配電系統の動特性を測定し、システム同定手法を適用して系統の運転状態を推定する手法を提案している。ここでは、まず単純な例として、分散型電源として同期発電機が導入されている配電系統（図1）について、運転状態を推定できるかどうかを検証した。実験では、変電所の母線に微小電力擾乱を注入し、測定された応答波形から母線以下の系統の負荷構成を推定することを想定し、注入装置と応答波形の測定点CB2を母線1に設置した。注入時に生じる電圧変動の大きさが通常時の2%以内に収まるように設定した。注入するP,Qは同時制御されており、系統の動揺が注入信号に影響を与えないようにしてある。図2は注入電力Psm（最下段：Chirp信号：0.5Hz/60sec.）と測定点でのP,Q,Vである。たとえば、入力をPsm、出力をQcb2としてシステム同定手法で伝達関数を求め、ボード線図として示したのが図3である。同期機が連系されたCase 1-2は連系されていないCase 0-1に比べて明らかな周波数特性を示しており、提案手法が負荷系統全体の動特性推定につながる可能性を示している。

3. まとめ この他、連系された機器の種類やその機器が全体の負荷容量に占める割合の推定につながる結果が得られた。今後は、インバータ機器などを含む系統についても検討をすすめる予定である。

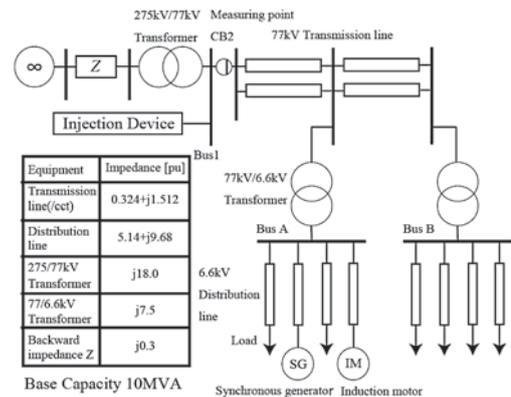


図1 例題負荷系統

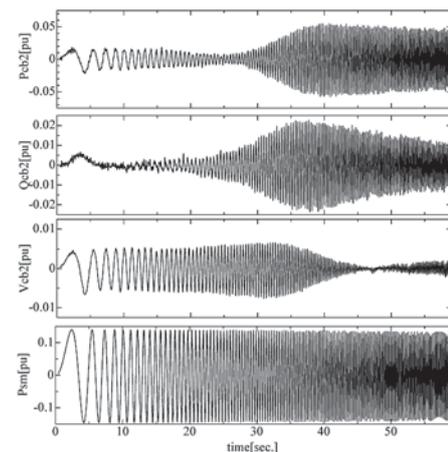


図2 系統応答の例 (Case1-2)

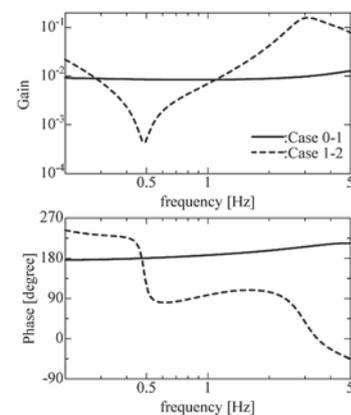


図3 同定伝達関数のボード線図

エネルギー理工学研究所エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野（佐野研究室）  
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/ksoshiki/complex.html>  
 「高温プラズマ閉じ込め磁場ヘリカル軸ヘリオトロンの最適化」

日本の原子力委員会は平成 20 年 7 月に、地球温暖化対策に貢献する原子力ビジョンを策定し、その中で核融合炉を 21 世紀中葉までに、その実用化の目処を得るように求めている。また洞爺湖サミットにおいては、2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量の半減を目指すことが採択された。省エネルギーとともに、CO<sub>2</sub> を排出しない核融合炉を含めた新たなエネルギー源の開発が急務となっている。

現在、国際熱核融合実験炉（ITER）などの核融合炉開発をとりまく世界的動向のなかで、エネルギー理工学研究所エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野では、先進ヘリカル型核融合炉開発の一環として、附属エネルギー複合機構研究センターと協力し、トカマク型原型炉の先に展開される次世代高温プラズマ閉じ込め磁場として期待されるヘリカル軸ヘリオトロンの新概念開発研究を推進している。

ヘリカル軸ヘリオトロン（ヘリオトロン J）の磁場構造は、これまでのヘリオトロン E の平面磁気軸ヘリオトロンと異なり、磁気軸の立体化を導入し、そこで発生するバンピー磁場を活用した良好な粒子閉じこめと閉じ込め磁場の全領域の磁気井戸の構築による電磁流体力学的（MHD）安定性との高次の両立性を図ることに特徴がある。準等磁場配位を指導原理とする閉じ込め改善の実現と磁場最適化の物理原理の探索を目標として行われてきたヘリオトロン J 実験から得られた代表的な知見として、以下が挙げられる。

- (1) 閉じ込め損失は新古典論の衝突輸送の予測より遙かに大きい。異常輸送は Bohm 型ではなく gyro-Bohm 型である（次元解析から collisional high- $\beta$  model のプラズマ揺動輸送と矛盾しない）。トカマク損失におけるプラトー比例則（L-G 則）の回転変換角依存性と類似性が指摘される。
- (2) ヘリオトロン J 閉じ込めと国際ステラレータ比例則（ $\tau_E^{ISS04}$ ）との比較研究、とくに規格化装置ファクター（ $f_{ren}$ ）の特性（ $\tau_E^{ISS04} = f_{ren} 0.134 a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} \bar{n}_e^{0.54} B^{0.84} I^{0.41}$ ）に係わる研究が進展した。規格化装置ファクター（ $f_{ren}$ ）の実効リップル率（ $\varepsilon_{eff}$ ）依存性が強く示唆される（新古典輸送最適化と異常輸送最適化の協働の可能性）。一方、比較的大きな測定値（閉じ込め時間）のデータのばらつきは、比例則に現れていない未知の物理パラメータの存在を強く示唆している。
- (3) 規格化装置ファクターは閉じ込めのモード遷移（L-H 遷移）で増加する。H-mode 発現領域は、磁気面のラベルとして用いられた真空磁気面の周辺回転変換角に依存し、主たる低次の有利面よりわずかに離れた回転変換角で比較的高い閉じ込め改善度が得られている。閉じ込め改善時に最外殻磁気面（LCFS）近傍で、負の径電場（ $E_r < 0$ ）形成が観測される。L-H 遷移時の LCFS の閉じ込め性能は、SOL の揺動輸送の確率分布関数の測定から、間欠的輸送（intermittent transport）の減少と強い相関がある。最近、高速カメラによる接線ポートからの周辺プラズマ領域におけるフィラメント状揺動の磁場に垂直方向の回転方向が、L-mode と H-mode で逆転する現象が見出され、電場構造変化が強く示唆されるに至った。

ヘリオトロン J 実験は上記以外に、電子サイクロトロン電流駆動（ECCD）の研究、中性粒子ビーム入射（NBI）加熱プラズマの研究、イオンサイクロトロン周波数帯加熱（ICRF）プラズマの研究、超音速分子ビーム入射（SMBI）による粒子補給の研究が進展している。今後、核融合科学研究所の LHD 研究との連携（双方向型共同研究）を一層強め、次世代コンパクト・高ベータ・ヘリカル物理・工学設計の提示につなげたいと考えている。

生存圏研究所 中核研究部 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野 (津田研究室)  
[http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda\\_lab](http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda_lab)  
 「電波や光を用いたリモートセンシング手法の森林大気相互作用の観測への展開」

地球陸面上の多くの部分を占める森林と大気間のエネルギーや大気微量物質の授受は我々の住む地表付近の大気環境や地球温暖化などの気候変動にも重要な影響を与えています。森林の樹木が光合成により土壌の水を吸い上げて大気中に蒸散することで、森林にもたらされる降水の約半分が大気に戻されます。森林に降り注ぐ太陽放射エネルギーの一部はこの光合成活動に使われることから、森林は地面付近の気温変動にも影響を与えています。さらには、光合成、呼吸に伴う二酸化炭素や土壌中の微生物の生化学反応によるメタン等の地球温暖化に関わる微量物質のやり取りも行われています。

従来、森林大気相互作用の観測は森林中に設置したタワーによる直接測定が行われてきました。これは10Hz程度の高い観測頻度で風速、気温、水蒸気、二酸化炭素等を測定してエネルギーや微量物質の鉛直方向のやり取り（フラックス）を観測するものです。しかしながら、森林生態系は、樹種、樹齢構成、土壌状態などが一様ではなく、一点観測であるタワー観測では観測の代表性が問題となることが指摘されています。また、山間部の森林に吹く斜面流がフラックス観測の誤差となることも知られています。

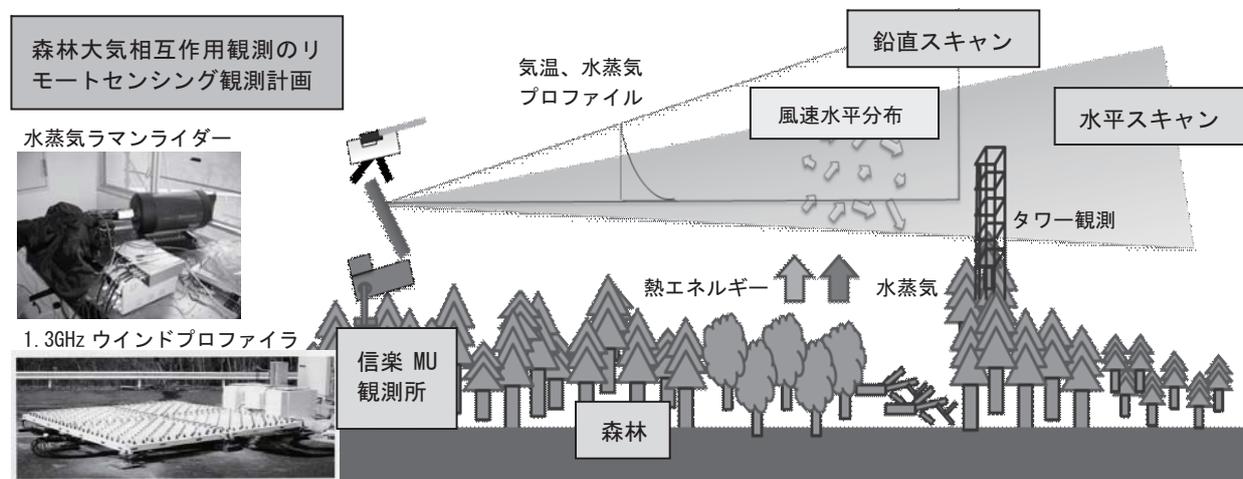
森林が大気に及ぼす影響を正確に診断するには森林直上の大気を面的にカバーする観測が重要です。このため本研究室では生存基盤研究ユニットと協同して、大気の鉛直方向観測を行うリモートセンシング技術を水平方向の観測に適用して、森林上空の面的な大気観測を実現し温度、水蒸気等のフラックスを測定する研究を進めています。

滋賀県甲賀市信楽町に位置する京都大学生存圏研究所信楽 MU 観測所では、大型 VHF レーダーである MU レーダーを中心として、境界層レーダーやライダーなど様々な大気観測が行われています。本観測所が森林に囲まれた環境であることを利用し、観測所から森林に向けたレーダー、ライダーの水平観測を実現し、森林直上の大気を観測する研究を行っています。

具体的には1.3GHz帯ウインドプロファイラのアンテナを傾けて設置し、水平、鉛直スキャンを行うことで風速の立体構造を得ます。さらに、レーダーに音波発射源を組み合わせる気温観測手法である RASS の観測も水平方向に行い、これから森林大気間の熱エネルギーフラックスを導出します。また、可搬型ラマン・ライダー装置を同時稼働し、水蒸気の立体構造を得てそれから水蒸気フラックスを導出します。また、GPS 受信機を森林中に複数設置することで水蒸気の空間分布を得る GPS トモグラフィー観測にも取り組んでいます。これらの新しい観測により従来のタワー観測では捉えきれなかった森林大気に及ぼす作用の理解が大きく進展することが期待されます。



森林に囲まれた信楽 MU 観測所



生存圏研究所中核研究部 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (大村研究室)  
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>  
 地球磁気圏放射線帯変動の研究

地球を取り巻く宇宙空間には、地球磁場によって捕捉された高エネルギー粒子が放射線帯（バン・アレン帯）を形成しています。この放射線帯は低軌道から静止軌道の間が存在しており、ここを通過する衛星の太陽電池パネルや半導体電子機器は、この放射線の影響を受けて劣化するなど、様々な障害を起こします。太陽表面でフレア現象が起こり太陽風の磁場が大きく変動すると、地球の磁気構造も乱されて（磁気嵐）、宇宙放射線環境は大きく変動します。放射線環境の変動は、有人宇宙活動及び宇宙機器に悪影響を及ぼすのみならず、電離層への降込み粒子の変動を通じて超高層大気が加熱され低高度の衛星の軌道に影響を与えるドラッグが発生します。本研究では、放射線帯の相対論的エネルギー（数 MeV）電子の生成機構およびオーロラ域への降下粒子のフラックスを、計算機実験によって定量的に評価し、観測データとの比較・検証を通じて、放射線環境の変動を定式化し、磁気嵐の発生後の放射線環境の変動を予測する手法を確立することを目指しています。

最近の研究では、VLF 帯のホイッスラーモード波と相互作用する電子が相対論的エネルギーまで極めて効率良く加速される過程が存在することを発見しました（図 1）。この加速過程は地球の内部磁気圏の磁気赤道付近からホイッスラーモード波が伝搬してくる時に、それとは反対に磁気赤道に向かう電子が加速されつつ進行方向を変えて大幅に加速されることから Relativistic Turning Acceleration (RTA) と名付けました [1]。地球の磁場が乱されて、地球の内部磁気圏に 10 ~ 100keV の電子が注入されると、周波数が大きく上昇するコーラス放射という電波が発生します。この電波の発生機構は 50 年来の謎でしたが、これを計算機実験で再現することに成功し [2]、その理論解析を通じて、コーラス放射と同時に RTA により電子の一部が MeV のエネルギーまで加速され、地球の放射線帯が形成されることが明らかになってきました。

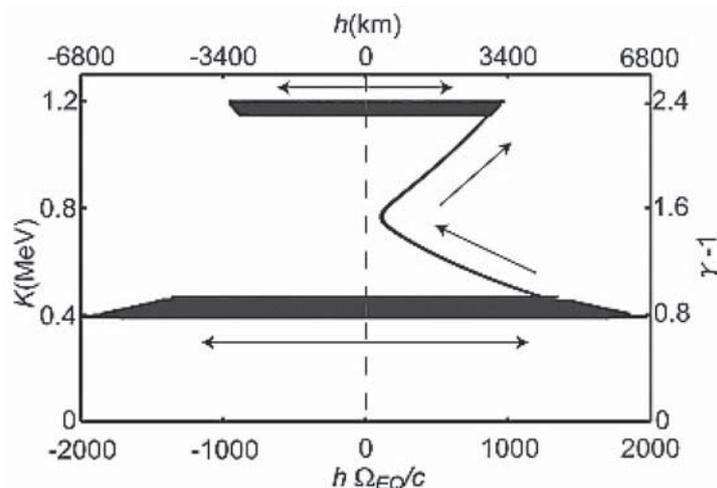


図 1 ホイッスラーモード波による相対論的電子加速

#### 参考文献

- [1] Y. Omura, N. Furuya, D. Summers, Relativistic turning acceleration of resonant electrons by coherent whistler-mode waves in a dipole magnetic field, *Journal Geophysical Research*, Vol. 112, A06236, doi:10.1029/2006JA012243, 2007.
- [2] Y. Omura, Y. Katoh, and D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, A04223, doi:10.1029/2007JA012622, 2008.

## ネットワーク研究部門ネットワーク情報システム研究分野（中村研究室）

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

### 「ユーザの状態に適応した支援を行うためのインタラクションモデル」

数え切れないほどの情報システムが人間の日常生活を支援する状況では、人間がその存在を意識することなくその恩恵を享受できる環境が必要となる。システムは人間の自然な振る舞いからその要求を認識し、自律的に支援をすることが期待されるが、支援を一方的に押しつけたり、ユーザの主体性や意欲を削ぐことがないようにしなければならない。例えば、福祉などの分野では、過剰な支援で残存機能を退行させてはならない。このような支援を実現するためには、ユーザの意図・興味・意欲といった内部状態を推定し、それに応じて支援の内容や方法、タイミングを適切に選択する能力が必要となる。

しかし、ユーザの意図や作業に対する熟練度などといった内部状態には直接的に観測できないものも多く、情報システムがそれを認識することは容易ではない。人間が支援を行う場合には、相手の表出する様々な情報を用いて被支援者の内部状態を推測し、また、様子を見るだけでは推測が難しい場合には、被支援者に積極的に働きかけることによって情報の表出を促している。我々は、このような、マルチモーダル且つプロアクティブな認識を実現するための方法論を探り、適切な支援を提供する情報システムを実現することを目指している。

そのためのモデルの一つとして“Interaction Reproducing Model (IRM)”を提案した(図1)。そのキーアイデアは、ユーザと熟練した支援者の間で行われる外部に表出された振る舞い(インタラクション)をモデル化することである。このモデルは、人間のオペレータの操作による理想的なインタラクションのパターンを有限状態機械として学習しておくものであり、支援時には、現在行われているインタラクションが学習済みのどのインタラクションパターンに最も近いかを判断し、そのパターンを基にシステムを動作させることで適切な支援を実現する。

このモデルを調理支援システムや教示システムに用いた実験では、ユーザの調理技術や、講義に対して感じている難易度や興味の度合いに応じて指示や教示内容を調節することが可能であり、ユーザに良い印象を与えることが確認された(図2)。認識率の向上など改善すべき点は多いが、将来的には家庭やオフィス、自動券売機やATMのように公共の場所などで広く使われる枠組みとなることを期待している。

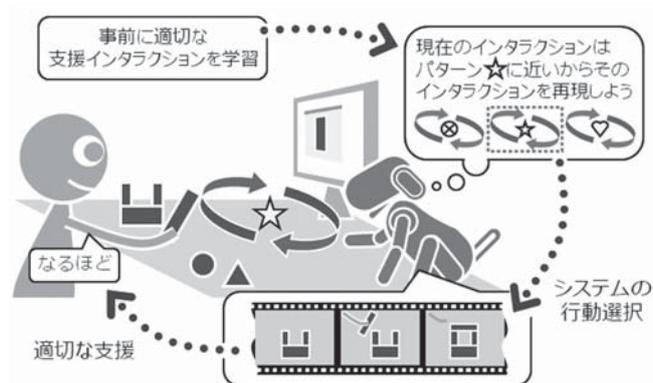


図1. Interaction Reproducing Model 概略



図2. 実験風景

## 平成 20 年度修士論文テーマ紹介

### 工学研究科 電気工学専攻

#### 楠 戸 省 吾 (古谷准教授) 「新たな麻酔鎮痛度指標の提案と静脈麻酔における鎮静度および鎮痛度のモデル予測制御の研究」

日帰り手術における鎮静度と鎮痛度の自動制御を目的として、脳波電極から得られる信号と脈拍を組み合わせた新たな麻酔鎮痛度指標と、鎮静薬と鎮痛薬の相互作用を考慮に入れたモデルを提案するとともに、モデル予測制御による鎮静度・鎮痛度制御システムの構成を試みた。

#### 佐 藤 俊 (古谷准教授) 「先行制約を考慮した 1 機械スケジューリング問題に対する厳密解法」

1 台の機械を用いて複数の仕事を処理する際のスケジュールを作成するという 1 機械スケジューリング問題において、仕事間に先行制約が存在する問題を対象とし、動的計画法に基づく効率のよい厳密解法を提案した。そして、数値実験によりその有効性を示した。

#### 金 田 久 司 (松尾准教授) 「鋼板の過渡応答を含むベクトル磁気ヒステリシス特性に関する研究」

冷間圧延鋼板 SPCC に対して、定常回転磁束に達するまでの過渡時のベクトル磁気特性を計測した。磁気シールドによる計測精度向上の効果を示し、計測コイルの設置角度誤差の検討により計測精度を高めた。また、楕円回転磁束に対するベクトル磁気特性を計測した。

#### 高 田 琢 平 (松尾准教授) 「単純化磁区構造モデルによる磁性体の磁化過程解析に関する研究」

磁化過程の基本的な機構を解明するために単純化磁区構造モデルを構築した。静磁界の影響が大きいと跳躍型のヒステリシスが抑制され  $180^\circ$  磁壁移動が生じる。モデルにより、 $180^\circ$  磁壁移動から磁化回転に移行する磁化過程を表現し、また、異方性の影響を検討した。

#### 長 尾 和 昌 (雨宮教授) 「車載応用を指向した高温超伝導モータに関する基礎検討」

高温超伝導かご形誘導同期機 (HTS-ISM) の車載応用について検討した。その結果、HTS-ISM における微小すべりの精密計測とそれが高温超伝導かご形巻線のハンダ接続抵抗に起因すること、高トルク密度化の方針、およびシステム化の際の課題などを明確化した。

#### 藤 井 陽 介 (雨宮教授) 「高温超伝導加速器用ダイポールマグネットにおける磁化電流が作る付加的磁界」

高温超伝導の加速器マグネット応用に向けて、ビスマス系超伝導テープ線材で巻かれたダイポールマグネットの発生磁界を回転ピックアップコイル法により測定した。線材内の磁化電流に起因する付加的磁界の多極成分の測定に成功し、それを理論解析の結果と比較検討した。

#### 白 澤 佳 大 (小林教授) 「視覚誘導性サッカード課題遂行時における脳活動の機能的 MRI と脳磁図による検討」

視覚誘導性サッカード (急速眼球運動) 課題遂行時の脳活動を機能的磁気共鳴画像法 (MRI) と脳磁図を用いて計測し、神経活動を高い時空間分解能で捉えることを可能とする新たな統合解析手法を適用することで課題遂行に関連する複数の大脳皮質における活動の経時変化を捉えることに成功した。

**笹山 瑛 由 (小林教授) 「多チャンネル脳波計測に基づく非侵襲型ブレイン・マシンインタフェースの基礎的検討」**

ブレイン・マシン・インタフェースの構築を目指し、速波同期活動、定常体性感覚誘発電位を多チャンネル脳波計測により検討した。スプライン・ラプラシアン法、および主成分分析、独立成分分析といった多変量解析を用いた脳活動の新たな抽出法を提案し、その有用性を示した。

**阪上 由 英 (小林教授) 「脳活動領域間の機能結合評価のための拡散テンソル MRI による神経線維追跡法」**

MR 拡散テンソル画像法 (MR-DTI) を用いた線維追跡法における異方性低下の問題を解決する手法として、異方性低下部前後における神経線維の類似度評価に曲率の標準偏差を導入する手法を提案し、シミュレーション画像と実測 DTI データを用いて提案手法の有効性を示した。

**増谷 圭 吾 (小林教授) 「パルス状コイル電流通電時の頭部モデル内誘導電磁界分布の数値解析」**

経頭蓋磁気刺激用 8 字コイルにパルス電流を通電した際の人体頭部モデル内電磁界を数値解析した。周期定常厳密解計算用の 2 ポテンシャル法を同心 3 球モデルに適用した。電流波形のフーリエ変換に周期定常解を畳み込み、パルス電流応答を求めた。電流波形や媒質の周波数特性の効果を定量的に明らかにした。

**有岡 久 登 (引原教授) 「パワー回路の EMC 設計に向けた配線寄生成分に関する研究」**

本研究では、パワー回路の EMC 設計論の確立を目指し、実装状態における回路の配線寄生成分を実験的・数値的に定量化した。また、それらを集中定数回路の素子定数として回路解析に組み込むことにより、配線寄生成分の過渡特性に及ぼす影響について検討した。

**高辻 悠 (引原教授) 「電力系統における動揺現象のダイナミクスに関するハイブリッドモデルと数値解析」**

ネットワーク構成の切り替えを考慮した電力系統における発電機のダイナミクスを、ハイブリッドシステムの理論に基づきモデル化した。そして、2003 年のイタリア大停電及びマイクログリッドに関してモデルを適用し、ダイナミクスの解析及び制御の検討を行った。

**宅野 嗣 大 (引原教授) 「SiC FET を用いた高速スイッチング電力変換回路に関する研究」**

ノーマリオフ型 SiC JFET を高速に駆動させるゲートドライブ回路を提案し、30W の抵抗負荷時に 5MHz でのスイッチングを達成した。また、SiC MOSFET を用いて約 2kW の誘導電動機を駆動した。その際に誘導されるノイズが制御回路に悪影響を及ぼすことを確認した。

**山本 晃 弘 (引原教授) 「永久磁石の能動制御を利用した間接支持系のダイナミクスと制御手法に関する研究」**

原子間力顕微鏡とアナロジーが成立する間接支持系を提案した。主に電磁石、永久磁石および支持対象から成る間接支持系のダイナミクスを磁荷モデルにより表現できることを数値、かつ実験的に検証した。さらに、支持対象に対するセンサレス化の可能性についても検討した。

**鶴飼 将 太 (和田教授) 「三相回路における周期振動および概周期振動の対称性に基づく解析」**

対称三相回路、その抵抗を除去した無損失三相回路、さらに電源を除去した自由振動回路について、

対称性に基づいて発生する振動の姿態を系統図を用いて明らかにした。また、対称性の高い振動から分岐図の追跡により、種々の振動を解析する方法を提案した。

#### 松山 晋也 (和田教授) 「グレイコードの位相的性質を用いた非同期式2のべき乗加減算器」

グレイコードのもつ位相的性質を利用することにより、非同期式2のべき乗加減算器を設計し、FPGAを用いてその動作確認を行なった。通常の2進加算器の非同期化に対して、飛躍的に回路規模が小さく、高速で、低消費電力性をもつ回路を実現できることを示した。

#### 大原 康宏 (萩原教授) 「非因果的周期時変 (D,G) スケーリングを用いたサンプル値系のロバスト安定解析と安定化」

サンプル値系のロバスト安定解析・安定化において有効な非因果的周期時変スケーリングを拡張し、(D,G) スケーリング型の手法を展開するための方法について論じている。そのような拡張の難しさを述べた後、線形分数変換に基づく解決法を示し、数値例で有効性を示している。

#### 田中正臣 (萩原教授) 「作用素リアプノフ不等式の離散化による漸近的に厳密なむだ時間系安定解析法の有効性検証」

作用素リアプノフ不等式に基づくむだ時間系の安定解析法について、数値的検証を中心とした研究を行っている。具体的には、この不等式のいくつかの離散化手法を対象とし、それらに基づく計算速度や収束の速さなどについて、理論的帰結を実用的観点から検証している。

#### 札幌 勇大 (萩原教授) 「単純適応制御系へのスケーリングの導入と2軸型空圧人工筋アームの軌道追従制御」

動的なスケーリングの導入に基づく単純適応制御系の新たな設計手法を提案するとともに、圧縮空気を駆動源とする2軸型空圧人工筋アームに対して本設計手法を適用することで、アームの高精度の軌道追従制御が可能となることを実験を通して実証している。

#### 山口 潤 (萩原教授) 「離散時間多目的 $H_2/H_\infty$ 制御のための周期時変制御器設計手法とその保守性に関する理論的考察」

離散時間線形時不変系に対して、 $H_2$  ノルムと  $H_\infty$  ノルムで表される二つの制御仕様を同時に達成する周期時変制御器を設計するための効率的な手法を示すとともに、周期時変制御器で達成し得る制御性能の下界値を計算するための有効な手法を与えている。

#### 大崎 徹哉 (大澤教授) 「最適潮流計算を用いた無効電力コストの発電機・負荷への配分法」

電力系統における発電機と負荷の間に送電管理者を設定し、無効電力供給に関わるコストを最適潮流計算によって算出して、そのコストを負荷から回収し発電機に支払う額を決定する手法を提案した。また、提案した手法を例題系統に適用して、手法の妥当性を検証した。

#### 徐 久輝 (大澤教授) 「三相不平衡を考慮したマイクログリッドの制御方式の検討」

マイクログリッドの自立運転時と連系運転時のそれぞれに対して、有効電力、無効電力、電圧を制御する制御方式を提案した。自立運転時については、三相不平衡負荷が接続された場合についても制御可能な方式を提案し、電圧不平衡率によってその効果を検証した。

**秋山博則 (大澤教授) 「真空遮断器の劣化予知・予防診断に関する研究」**

電力用真空遮断器の真空バルブの内部圧力が経年劣化などにより上昇して遮断不能となる事故を未然に防止するため、この圧力上昇をバルブの帯電状況から検知する方法について模擬試料を用いて検証した。

**和田浜俊彦 (大澤教授) 「真空中円筒型絶縁物の表面帯電分布の検討」**

真空環境で高電圧を利用する各種の荷電粒子加速器や真空遮断器の絶縁設計に資するため、それらの機器に共通する形状である円筒型絶縁物容器について、内部表面の帯電分布を可動型静電プローブによる測定と計算機シミュレーションとにより検討した。

**工学研究科 電子工学専攻****井川朝貴 (鈴木教授) 「スパッタ法による  $Pb_{1-y}Bi_ySr_2Y_{1-x}Ca_xCu_2O_{7+\delta}$  薄膜の作製とその基礎的物性に関する研究」**

基礎的物性の研究とトンネル型粒界ジョセフソン接合の形成を目的とし、超伝導転移温度が約 90K の標記高温超伝導物質を対象として、本物質では未達成の超伝導エピタキシャル薄膜の成長を検討した。異相  $SrPbO_3$  を約 20% 含むエピ膜は達成したが、10K 以上での超伝導は見られなかった。

**岸本昌也 (鈴木教授) 「強磁性体  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ /超伝導体  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  二層エピタキシャル構造を用いたスピン偏極準粒子注入効果に関する研究」**

off-axis スパッタ法により、標記強磁性体 80nm、および超伝導体 35nm の二層エピタキシャル薄膜を形成し、キュリー温度 300K 以上、 $T_C$  80K 以上を得た。この二層薄膜からスピン偏極準粒子注入素子を形成し、強磁性体の代わりに Ag を用いた同様素子と比較して、有意な注入効果を見出した。

**高丸泰 (鈴木教授) 「 $Bi_{2-x}Pb_xSr_{2-y}La_yCuO_{6+\delta}$  単結晶薄膜のドーピング制御とその輸送特性に関する研究」**

標記単結晶からパターン化ポリイミドを用いて大きさ  $300 \times 100 \mu m^2$ 、厚さ 50-100nm の劈開単結晶薄膜を制御して得た。これを用いて、酸素の入脱によりドーピング量を系統的に変化させ、ドーピング量に依存する本物質の輸送特性を明らかにした。

**濱田憲治 (鈴木教授) 「Bi 系銅酸化物高温超伝導体における単一接合固有ジョセフソン接合のスイッチング確率分布特性に関する研究」**

Pb 置換 Bi 系高温超伝導体の単結晶表面に、電子ビーム露光で 1 辺  $1-2 \mu m$  角、厚さ 3nm の微小メサ構造を形成して単一または 2 層の固有ジョセフソン接合素子を得た。また、5K 以上で Kramers の熱励起型スイッチング電流確率分布を観測した。

**小嶋裕之 (石川教授) 「炭素負イオン注入処理による親疎水性改質を利用した間葉系幹細胞の微細パターン接着」**

数ミクロンの微細パターンマスクを介した炭素負イオンの注入処理により、ポリスチレンやシリコンラバー上で間葉系幹細胞のパターン接着を達成し、細胞核の配向性を見出した。更に、プラズマ処理による表面疎水化前処理と負イオンパターン注入処理で、石英ガラス上での間葉系幹細胞の接着パタ

ーンの形成に成功した。

#### 酒井善基 (石川教授) 「低速電子ビーム形成に向けたシリコン電界放出電子源の減速特性」

シリコン電界放出電子源から放出される電子ビームを低速化するために半球型阻止電界エネルギー分析器を用いて電子のエネルギー分析を行った。エミッタ・ゲート構造の最適化、三フッ化メタンによるエミッタの表面処理などが電子の減速の上で有効であることが明らかとなった。

#### 服部真史 (石川教授) 「ゲルマニウム負イオン注入法による紫-青領域発光材料作製に関する研究」

ゲルマニウム負イオンを二酸化シリコン薄膜に種々の入条件で注入した上で熱処理を施した。発光特性を測定し、窒素中熱処理でナノ粒子の成長を見出し、次いで希釈酸素中の熱処理で酸化状態制御を行うことが発光特性向上に有効であることを見出した。結果として、数 10V の低印加電圧で、390 nm を中心とした電界発光を達成した。

#### 宮田雄高 (石川教授) 「窒化ハフニウムを用いた電界放出電子源の高温デバイスとしての検討」

高温下で動作する電子デバイスの開発を目指して、窒化ハフニウムを陰極にもつ電界放出電子源を作製し、電子放出特性の温度依存性を調べた。その結果、250 °C 程度までの間で電子電流は大きく変化せず、このデバイスが高温デバイスとして期待できることが示された。

#### 占部継一郎 (橘教授) 「大気圧非平衡プラズマジェットの時空間挙動に関する分光学的研究」

大気圧の大気雰囲気下において、長尺形状で動作する非平衡プラズマジェットについて、その動作機構をレーザ分光学を中心とした診断手法で実験的に明らかにした。時間・空間に対して高分解能の診断を行うことで、ジェットの高速進展機構が明らかとなった。

#### 川本昌幸 (橘教授) 「AC-PDP の放電電極構造による発光効率改善に向けた特性解析」

AC-PDP の新規構造に対して、レーザ吸収分光法ならびに近赤外発光像の高速高空間分解能測定法を用いてその診断を行った。3つの新規の電極構造に対して補助電極を追加して配置し、瞬時的カソード・アノード電極の選択駆動により発光効率の改善を確認した。

#### 内藤皓貴 (橘教授) 「プラズマフォトニック結晶における複素誘電特性の診断ならびに動的電磁波制御への応用」

1次元及び2次元のフォトニック結晶状プラズマアレイ構造を用いて、マイクロ波帯における複素誘電特性を実験及び数値計算の両面で明らかにした。禁制帯の前後での損失項の特異な振る舞いが明らかとなり、それを応用した複素数フィルター・演算機能の実現性を示した。

#### 横山拓也 (橘教授) 「パルスレーザー堆積法による $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の作製および電気パルス誘起抵抗スイッチング特性評価」

パルスレーザー堆積法を用いてペロブスカイト型マンガン酸化物 (PCMO) 薄膜を作製し、電気パルス誘起抵抗 (EPIR) 変化を確認した。そして、その EPIR 効果の発現に関して、デバイス内薄膜の深さ方向分析により、電極界面部の酸化物層の寄与が重要であることを明らかにした。

**奥村 宏典 (木本教授) 「表面制御を行った SiC (0001) 基板上 AlN 成長層の欠陥生成機構の解明  
および初期成長制御による高品質化」**

Ⅲ族窒化物 FET は次世代高周波パワーデバイスとして有望であるが、ヘテロエピタキシャル成長に起因する高密度の転位欠陥が課題となっている。本研究では、SiC (0001) 基板表面の原子ステップ高さの制御と Ga 先行照射により、AlN 成長層の高品質化を達成し、その欠陥構造を解明した。

**日吉 透 (木本教授) 「SiC 中の深い準位低減によるキャリア寿命改善と高耐圧 PiN ダイオード  
の作製」**

SiC を用いた高性能バイポーラ型パワーデバイスを目指して深い準位の低減に取り組み、熱酸化プロセスによって主要な深い準位 (点欠陥) が消滅することを見出した。また、このプロセスによりキャリア寿命の改善を確認し、耐圧 10kV の PiN ダイオードを実現した。

**三宅 裕樹 (木本教授) 「ヘテロ接合界面制御によるⅢ族窒化物 / SiC ヘテロ接合バイポーラトラン  
ジスタの性能向上」**

SiC バイポーラトランジスタの性能限界を打破するために、Ⅲ族窒化物をエミッタとするヘテロ接合バイポーラトランジスタを作製した。結晶成長時の界面制御、擬似 AlGaN 混晶の採用によりバンドエンジニアリングに成功し、世界初のエミッタ接地電流増幅動作を実現した。

**山路 和樹 (木本教授) 「電力用 GaN ユニポーラデバイスの作製に関する基礎研究」**

GaN を用いた電力用パワーデバイスの実現を目指し、ショットキー障壁と MOS 界面の研究を行った。高品質 GaN 結晶を用いるとショットキー障壁の漏れ電流が熱電界放出モデルで記述できること、および堆積酸化膜を用いることで高いチャネル移動度を有する MOSFET が作製できることを示した。

**小野山 有亮 (松重教授) 「高配向有機薄膜トランジスタにおける分子薄膜 / 金属界面の走査プロー  
ブ表面電位評価」**

ナノスケールのギャップを隔てた金属電極間に有機半導体であるオリゴチオフェン 6 量体 (6T) を真空蒸着し、結晶性薄膜を架橋し、有機薄膜トランジスタとして動作させるとともに、ケルビンプローブ力顕微鏡 (FM-KFM) により薄膜の電位プロファイル分布の変化を測定した。

**馬場崎 雄 (松重教授) 「マイクロカンチレバーを用いた周波数検出型高感度バイオセンサの開発」**

マイクロカンチレバーを用いた微小質量検出に基づく高感度バイオセンサ開発を行い、光熱励振法の導入によるセンサの高感度化・安定動作化を図ると共に、デオキシリボ核酸 (DNA) 分子の吸着過程や生体分子相互作用の一つである DNA ハイブリダイゼーションの実時間観測を遂行した。

**細川 義浩 (松重教授) 「周波数変調検出方式 AFM の高感度化と高分解能分子イメージングに関す  
る研究」**

周波数変調検出方式原子間力顕微鏡 (FM-AFM) を用いてより高感度かつ高分解能な分子イメージングを行うための手法について提案した。さらに最適な探針振動振幅と探針ばね定数を算出する手法を提案し、代表例として鉛フタロシアニン分子薄膜観察における最適値を算出した。

### 山 木 理 生 (松重教授) 「FM-KFM を用いた有機半導体薄膜の光照射下における局所表面電位に関する研究」

有機太陽電池デバイス用材料である p 型半導体の銅フタロシアニンと n 型半導体のフラーレン誘導体の薄膜を積層した試料を作製し、ケルビンプローブ力顕微鏡 (FM-KFM) を用いて可視光照射下における表面電位測定を行い、薄膜界面での電荷移動に起因するコントラスト変化を観察した。

### 井 上 大 輔 (川上教授) 「半極性面 GaN 基板上への厚膜 InGaN の成長と量子井戸構造への応用」

緑色領域での固体発光素子の高発光効率化に向け、InGaN 量子井戸発光層を、従来の GaN 上ではなく、厚膜の InGaN 上に形成することを提案し、実験的検討を行った。その結果、半極性面基板を用いることで、表面平坦性や光学的特性に優れた厚膜 InGaN が結晶成長できることを見出した。

### 西 村 活 人 (川上教授) 「デュアルプローブ近接場光学顕微鏡の探針制御技術の開発」

励起と検出の 2 本のプローブを持った近接場光学顕微鏡を提案・構築した。2 つの探針と試料の間の距離を 10nm オーダで制御するための手法を創出し、実験的にその有効性を示した。また、InGaN 量子井戸をサンプルとして評価を行い、キャリアあるいは光の伝播が測定できることを実証した。

### 井 上 博 揮 (野田教授) 「フォトニック結晶共振器・量子ドット融合系における共振器 Q 値制御とその効果」

Q 値の動的制御に基づいた光の捕捉・放出をより低損失で行うため、GaAs2 次元フォトニック結晶ナノ共振器と導波路の融合系を作製し、その特性を詳細に評価した。Si と比べて非常に短いキャリア寿命を利用して、Q 値を 10 ps 程度で変化させてナノ共振器に光を捕捉することに成功した。

### 山 内 浩 司 (野田教授) 「フォトニック結晶有機 EL 素子の解析とナノインプリント法による作製」

有機 EL 素子の光取り出し効率改善へ向けて、金属の光吸収効果を含む電磁界シミュレーション法を構築した。解析の結果、金属の吸収の影響を避け、フォトニック結晶の光取り出し効果も得られる最適な発光層と金属の距離が 60 nm 付近であることが判明し、ナノインプリント法で作製した素子でも導波モードの光取り出し効果が観察された。

### 大 塚 晃 嗣 (野田教授) 「2 次元フォトニック結晶レーザの大面积化とモード選択性に関する研究」

2 次元フォトニック結晶レーザの高出力化へ向け大面积化した際のモード選択性を議論するため、非  $\Gamma$  点モードも含めた解析を行った。その結果、 $\Gamma$  点モードを選択的に発振させるためには、二次元的な光の結合効果を強めること、格子点の形状を  $\Gamma$ -M 方向に対して対称にすることが有効であることを見出した。

### SUN QI (野田教授) 「3 次元フォトニック結晶表面における点欠陥共振器に関する研究」

3 次元フォトニック結晶の表面を用いた光制御に向けて、表面における点欠陥共振器の特性評価を行った。実験的に Q 値 600 程度の共振器が形成できたことを明らかにするとともに、電磁界シミュレーションにより、さらなる高 Q 値の共振器構造の設計に成功した。

### 杉 谷 知 昭 (野田教授) 「フォトニック結晶高 Q 値共振器による光パルストラップとその時間分解測定」

数十万程度の高い Q 値をもつダブルヘテロ型フォトニック結晶共振器に対して、共振器の Q 値 (光

子寿命)を動的に制御し、これによってピコ秒光パルスを共振器にトラップすることに成功した。また、その過程を時間領域にて観測し、光子寿命が40ピコ秒から80ピコ秒に切り替っていることを確認した。

#### 岳 江 林 (野田教授) [GaN系2次元フォトリック結晶面発光レーザに関する研究]

GaN系材料を用いたフォトリック結晶面発光レーザに関する研究を行い、電流注入により室温で400nmでのレーザ発振を実現することに成功した。さらにレーザ出力の向上、ビームパターンの単峰化を目指した解析を行い、三角形の格子点を用いることが有効であることを見出した。

#### MENAKA CHAMINDA (野田教授) [量子井戸サブバンド間遷移と2次元フォトリック結晶による熱輻射制御]

黒体輻射と比べて発光線幅が狭く、黒体強度に近い強度をもって必要な波長帯域のみで発光する高効率の熱輻射光源の設計・作製および実験評価を行った。設計した波長 $10\mu\text{m}$ で、黒体の6分の1程度の線幅をもち、黒体強度の7割程度の強度をもつ熱輻射光源を実現することに成功した。

#### 朴 相 昱 (野田教授) [SiC系2次元フォトリック結晶の作製と光学特性に関する研究]

ハイパワー光動作の実現に向けて、ワイドギャップ半導体SiCを用いてフォトリック結晶を作製し、2光子吸収の抑制を試みた。100pJのピコ秒光パルスを導入しても光非線形効果は観測されず、従来のSi系フォトリック結晶と比べて少なくとも2桁程度強い光の操作が可能であることが実証された。

#### NGUYEN TUNG (北野教授) [フォトリック結晶ファイバによる光子対生成と光子計数回路の開発]

フォトリック結晶ファイバを用いた光子対生成について、群速度分散の計算から光子対スペクトルを算出し実験と比較を行った。また、その光子を検出するために、アバランシェフォトダイオードを用いた光子計数回路の設計および開発を行った。

#### 室 木 佑 斗 (北野教授) [紫外外部共振器型半導体レーザの開発と $\text{Yb}^+$ 奇数同位体のレーザ冷却]

紫外半導体レーザを外部共振器構造とし、注入電流と共振器長を同期して変化させて10GHzの連続掃引を可能とした。この光源で偶数同位体 $\text{Yb}^+$ のレーザ冷却を実現し、さらに光時計に適する同位体171の冷却も、超微細構造間のポンピングを解決して実現した。

#### 長 田 大 (北野教授) [ $\text{Ba}^+ \text{}^2\text{S}_{1/2} - \text{}^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移励起用光パラメトリック発振器]

時計遷移の波長 $1.76\mu\text{m}$ 光を光パラメトリック発振で発生させ、時計遷移の励起を確認した。パラメトリック発振はPPLN結晶を用い、波長 $1\mu\text{m}$ ネオジウム・ヤグレーザを励起光として、励起光とシグナル光 $1.76\mu\text{m}$ に共鳴する光共振器を構成して実現した。

#### 中 嶋 一 雄 (北野教授) [外部共振器型モード同期自励発振半導体レーザの光注入同期とパルス圧縮]

DVD用の自励発振レーザを外部共振器構造としてモード同期発振させた。回折格子によるパルス圧縮で、全体の55%のパワーを2psのパルスに集中させた。CWレーザ光を注入すると光スペクトルの幅は狭まるが、モード1本のスペクトル幅も狭くなる。この現象の特性を詳しく調べた。

#### 小 泉 壮 隆 (北野教授) [Cs 2光子吸収線安定化半導体レーザの周波数安定度評価]

セシウムを封入したセルを光共振器内に設置して2光子吸収信号のS/Nを改善し、半導体レーザーの周波数を安定化した。積算時間100秒で $10^{14}$ 台の周波数安定度を誤差信号から推定した。GPS時計

を基準とする光周波数コムで光周波数を不確かさ  $10^{-11}$  で測定した

## 光・電子理工学教育研究センター

### 尾崎 良介 (高岡教授) 「エタノールクラスターイオンのサイズ制御と表面反応の研究」

本研究では、減速電界の印加による最小サイズ分離法および飛行時間の測定によるサイズ分析法を併用して、エタノールクラスターイオンのサイズ制御を行い、従来のモノマーイオン照射では得られない低損傷で高スパッタリングな表面処理に成功した。また、エタノールクラスターイオン照射特有の表面反応のサイズ依存性を明らかにした。

### 薬師寺 隆 (高岡教授) 「クラスターイオンビーム援用蒸着法による酸化物薄膜の低温形成の研究」

本研究では、ビーム輸送系を改良して酸素クラスターイオンビームの大電流化を行った。また、酸素クラスターイオン援用照射による酸化アルミニウムおよび酸化シリコンの高機能薄膜の低温形成を行い、加速電圧やイオン電流量の制御によって薄膜の組成制御や室温でも高密度で耐腐蝕性に優れたアモルファス薄膜の作製に成功した。

### 池之上 卓己 (藤田教授) 「有機ホウ素ポリマーを用いた二光子吸収型光メモリの多層化および高速・高精度再生に関する研究」

新しい有機ホウ素ポリマーを用いた光記録媒体により、従来材料を凌ぐ低エネルギーで二光子吸収光記録を達成し、記録データの適切な符号化で95%以上の高精度な再生を実現した。また多層媒体への選択的記録、一括再生に成功し、多層光メモリに向けた指針を示した。

### 騎馬 啓嗣 (藤田教授) 「超音波噴霧ミスト CVD 法を用いた非晶質酸化ガリウム系薄膜の作製とその透明 TFT への応用」

可視光に対して感度をもたない完全透明な TFT への応用を念頭に、安全で低コストの成膜技術である超音波噴霧ミスト CVD 法を用いて非晶質酸化ガリウムおよび酸化インジウムガリウム薄膜を作製し、TFT を試作して、非晶質シリコン TFT を越える特性への見通しを得た。

## 情報学研究科 知能情報学専攻

### 小谷 通隆 (黒橋教授) 「言い換え表現の述語項構造への正規化とテキスト含意関係認識での利用」

言い換え表現を網羅的に整理し、構文・格解析や語彙的知識に基づき様々な言い換え表現を述語項構造に正規化する手法を提案した。また、正規化述語項構造間のマッチングをとることによって、テキスト間の含意関係を認識する手法を考案した。

### 姜 ナウン (黒橋教授) 「同一文抽出に基づく類似ページの検出と分類」

1億ページという大規模なウェブコレクションを対象とし、低頻度の長い文の重複に基づいて類似ページの検出を行った。さらに、文字列の重複率やリンクの情報を手がかりとするミラーページ、引用ページ、盗作ページの自動分類法を提案した。

**原 島 純 (黒橋教授) 「ウェブ情報分析のための話題分割と要約生成」**

一般に検索エンジンが返す結果は組織化されておらず、情報を広く分析するのが難しい。本研究ではユーザの情報分析を支援するため、検索結果をクエリに関する話題ごとに分割し、話題ごとにその内容を示す要約を生成するシステムを提案した。

**玉 城 伸 仁 (黒橋教授) 「会話文生成を指向する日本語言い換えの研究」**

WWW コーパスから会話調 / 丁寧調 / 論説調に属する文を自動抽出する技術を開発し、文と形態素の文体を定量的に評価することを可能にした。また、文末表現の性質を統計量を用いた数値ベクトルとして記述し、表現間の機能的類似度を評価する手法を考案した。

**飯 野 晋 (松山教授) 「影と陰影を用いた 3 次元光源環境の推定」**

本研究では、かがり火等 3 次元的な拡がりを持ち動的に変化する近接光源の数、位置、輝度を、形状及び反射特性が既知の参照物体を撮影した画像を用いて推定する方法を提案し、計算機シミュレーションおよび蠟燭を用いた実世界環境における実験を通じてその有効性を示した。

**石 垣 智 子 (松山教授) 「陰影効果を利用した顔印象の編集」**

本研究では、顔画像中の陰影を変化させることによって、知覚される顔の 3 次元形状が変化し、結果として顔印象が変化するという仮説を設け、顔画像に様々な陰影を付与しその効果を定量的・定性的に分析することによって陰影と顔印象との間に関連性があることを示した。また、陰影編集のためのソフトウェアを開発し、本手法の効果を検証した。

**小 島 敬 (松山教授) 「対話の時間構造に着目した聞き上手な留守番電話の設計」**

本研究では、対話において聞くという行為の持つ特性を明らかにするために、留守番電話という状況に焦点を当て、用件をうまく聞き出す・聞き取ることができるようにするための条件を分析した。その結果、人が話し始めるきっかけを作る「促しモード」と、人の話を受け止める「理解モード」の必要性を提案し、対話実験によりその有効性を検証した。

**津 田 佳 行 (松山教授) 「連結性を考慮したグラフカットによる多視点画像からの 3 次元形状復元」**

グラフカットによる 3 次元形状復元では大域最適解が多項式時間で求められるが、最適化可能な評価関数の形に制限があるため、従来の手法では連結性など対象形状に関する事前知識を評価関数に含めることが困難であった。本研究では、グラフカットを反復的に用いることで対象形状の持つべき連結性を明示的に保証する手法を提案し、実験によってその有効性を定量的・定性的に示した。

**Jean-Baptiste Dodane (松山教授) 「Estimation of User Interest through Dynamic Matching of Eye Movements with Proactive Content Presentation (能動的なコンテンツ提示に対する眼球運動の分析に基づいた人の興味推定)」**

本研究では、システムからの能動的な情報提示に対するユーザの眼球動作反応からユーザの興味を推定する手法を提案した。従来は提示対象に対する注視持続時間が興味の推定に用いられたが、本研究では、新たな対象が提示されたにも関わらず注視が継続される時間長を指標とすることによって、ユーザの興味対象をより正確に推定できることを実験的に示した。

## 情報学研究科 通信情報システム専攻

### 安 達 隆 宏 (吉田教授) 「被干渉車両受信状況に基づく ITS 車車間通信用予約型アクセス制御方式」

推定された与干渉電力に基づき時間スロット予約距離を決定する PBRR-ALOHA 方式を提案した。各スロットにおける受信電力と予約情報から、周辺車両に対する与干渉電力の大きさを推定することにより、高品質な通信が実現可能であることを明らかにした。

### 温 允 (吉田教授) 「マルチホップネットワークにおける分散無線リソース制御の情報交換効率に関する研究」

マルチホップ無線ネットワークに適した分散リソース制御法について研究を行い、システムスループットを犠牲にすることなく、制御情報の交換に必要な総送信電力を削減可能なアルゴリズムを提案した。

### 加 美 幸 一 (吉田教授) 「マルチホップ通信における並列中継および空間分割多重を用いた周波数利用効率向上法の研究」

エンドツーエンドの無線局間において、シリアルにアンテナを活用するマルチホップ伝送と、パラレルにアンテナを用いる MIMO 伝送を組み合わせた伝送を考え、高いリンク周波数利用効率、面的周波数利用効率の得られる伝送方式を明らかにした。

### 佐々木 自 然 (吉田教授) 「マルチホップ協力中継ネットワークの伝送方式と周波数利用効率に関する研究」

循環遅延ダイバーシチを用いるマルチホップ協力中継ネットワークにおける遅延時間の分散制御方式を提案した。また、エンドツーエンド伝送レートが最大となる伝送レート割当てを行う場合におけるマルチホップ協力中継ネットワークの周波数利用効率を明らかにした。

### 柴 田 直 剛 (吉田教授) 「協力中継システムにおけるリンク品質に基づく送信スケジューリングの研究」

送信スケジューリング及び協力中継を導入した無線システムの周波数利用効率を理論解析により評価し、送信スケジューリングの導入によりシステム内で通信状況の良い無線局のみが通信を行うようにすることで、周波数利用効率が著しく向上することを示した。

### 田 中 広 記 (吉田教授) 「無線協力中継における理論 FER に基づく最適中継局配置と特性評価」

協力中継の利用可能な中継局数を一定とした条件下において協力通信の理論アウトエージ確率の評価により中継局配置の最適化を行った。また、より現実に近いと考えられる伝搬路を 3次元のレイランチング法により生成し、協力通信の特性評価を行った。

### 手 島 邦 彦 (吉田教授) 「協力中継無線ネットワークにおける分散適応中継プロトコル選択の研究」

中継プロトコル選択を行う分散無線ネットワークへの協力中継導入効果を評価した。ゲーム理論に基づく評価の結果、各局が独立に自局の特性向上のみを目的として選択を行う場合、必ずしも協力中継の導入が全体の特性を向上させるとは限らないことを示した。

### 早 崎 太 郎 (守倉教授) 「屋内電力線通信における OFDMA による伝送容量の改善効果」

本論文では、電力線通信におけるビットローディング方式に関して、平均誤り率と各サブキャリアの

電力を制限する条件下でビットレート最大化のために、サブキャリアのビット量に加え、全サブキャリアの誤り訂正符号化率を最適化するアルゴリズムを提案した。

#### 平野 智也 (守倉教授) 「無線中継 Slotted ALOHA システムにおけるネットワークコーディングの研究」

本論文では、メディアアクセス制御方式として Slotted ALOHA 方式を採用した無線中継ネットワークコーディングシステムを対象として、スループットと遅延特性を改善する新たな中継制御方式を提案し、特にタイムアウト制御方式が最も優れた特性を示すことを明らかにした。

#### 橋本 幸一郎 (守倉教授) 「高速フェージング伝送路のための並列 FFT 等化」

本論文では、高速フェージング伝送路における FFT 等化器の特性劣化を抑圧する並列 FFT 等化器を提案する。並列 FFT 等化器はフェージング歪の補償と FFT 等化を並列に行い、誤りの少ない等化器出力を選択合成することで等化器特性を改善する。これらの特性を計算機シミュレーションにより評価を行った。

#### 丸山 浩史 (守倉教授) 「MIMO 空間多重伝送における仮想伝搬路判定を適用した逐次復号法」

本論文では、受信アンテナ数が送信アンテナ数を下回るような状況下でも復号を可能とする MIMO 空間多重伝送復号器の構成を提案する。本構成では、位相変調を符号情報と位相情報に分離し、複素数の送信信号を実数として扱うことにより、仮想的に受信アンテナを 2 倍に増やすことが可能である。

#### 久保 広行 (高橋教授) 「ルートダイバーシチによるモバイルマルチキャスト品質制御手法の研究」

マルチキャストは多数ユーザへの同時配信を可能にするが、モバイル環境では受信失敗の補償や品質の保証が課題である。そこで、通信経路の多様性を活用した提案配送手法によって、従来の固定的配送に比べ品質を大幅に改善できることを示した。

#### 佐藤 健一郎 (高橋教授) 「P2P 情報共有におけるコスト多様性に対応可能なインセンティブメカニズム」

P2P 情報共有は参加ユーザに帯域、ディスクスペースといったリソースを提供させることで高いスケラビリティを実現する。しかし、リソースを提供する誘因が不十分であるため、貢献に応じて報酬を配分するメカニズムを提案し、実験を通じて有用性を示した。

#### 万 毅 (高橋教授) 「Studies of Peer-to-Peer Content Distribution Technologies (P2P を用いたコンテンツ配信技術)」

P2P 協調キャッシュを用いた YouTube 型 VoD システムの特性分析と設計法の提案を行った。さらに、低いオーバーヘッドで高い検索効率を得ることができる階層カテゴリ化コンテンツ向きのハイブリッド P2P インフラストラクチャーの提案を行った。

#### 森 友則 (高橋教授) 「コンテンツ人気度を考慮した P2P ネットワークにおけるキャッシング方式の提案」

P2P ネットワークにおけるコンテンツの人気度を考慮したレプリケーション方式、およびコンテンツ分散配置方式の提案を行った。提案方式では低人気コンテンツのヒット率を向上させ、かつ高次数ピアに負荷が著しくかかってしまうことを回避した。

**吉野 信 (高橋教授) 「モバイル環境におけるユーザ主体のリソース利用技術の研究」**

モバイル環境では、ユーザが帯域、電力といったリソースを協調的に拠出し合うことで通信品質を高めることができる。本研究では、リソースを拠出する際の心理的コストと品質改善による効用との関係を解析し、モバイル協調ネットワークの実現可能性を示した。

**神田 和士 (越智准教授) 「エッジの連結性に基づく全方位画像向けステレオマッチング」**

本研究では、2台の全方位カメラを用いたステレオマッチングにより高精度に距離計測を行う手法を提案する。提案手法では、物体境界の抽出手法の検討、線分の形状比較、線分の連結性評価を行うことにより、物体の距離計測誤差を従来手法と比較して最大で49%削減した。

**山口 典昭 (越智准教授) 「長寿命密封半導体記憶媒体を用いたスケーラブルなアーカイブシステムの方式検討」**

本研究では、図書館等でのデジタルコンテンツの恒久保存・恒久利用に向け、通信と電源供給を非接触で行う密封型半導体記憶媒体と、これを用いたアーカイブシステムの構成及びアクセス方式を検討し、長寿命かつ高速アクセスを実現するスケーラブルなシステムの提案を行う。

**寺田 晴彦 (小野寺教授) 「論理ゲート性能ばらつきの評価と統計的モデル化」**

微細化の進んだ集積回路の設計において問題となる製造ばらつきを、実チップからのばらつき情報の取得から回路設計に利用可能なモデル化まで体系的に扱う手法について検討した。提案したばらつき評価回路およびモデル化により、高い精度の遅延・電力解析を実現した。

**久米 洋平 (小野寺教授) 「チップ間およびチップ内ばらつきを利用した再構成デバイスの速度向上手法」**

近年問題となっている集積回路の製造ばらつきを積極的に活用することにより、再構成デバイスの性能を向上させる手法を提案した。ばらつきを利用する手法に電源電圧を2種類用いる手法を組み合わせることで、遅延時間を約24%改善することに成功した。

**可児 佑介 (佐藤教授) 「多点同時送信アレイを用いたスペクトル拡散レーダによる高速立体形状イメージング」**

超広帯域(UWB)レーダーを用いた目標物体のイメージングにおいて、送信アンテナの走査に時間を要することが制約となる。本研究では互いに独立な拡散符号系列で変調された信号を同時送信するアレイを用いて高速に立体形状を推定する手法を開発し、その特性を数値実験と実験により検証した。

**木村 智樹 (佐藤教授) 「周波数領域干渉計法による複数目標検出における高分解能超音波イメージングの実験検討」**

超音波パルスを用いた生体内の高精度イメージングのため、パルス幅で定まる分解能を大幅に超える解像度を持つ周波数領域干渉計法を適用した。相関性複数目標の分離のため周波数領域平均化を導入し、さらに周波数特性の異なる目標識別のための波形推定法を開発して、水槽実験により特性を検証した。

**小田 裕大 (佐藤教授) 「光2相差動位相変調方式における自己/相互位相変調の影響の評価法」**

光差動位相変調方式において、ファイバ非線形効果である自己位相変調を考慮に入れた上で相互位相変調の誤り率に対する影響を高速に評価する方法を提案した。提案法は強度変調方式への手法を拡張し

ており、計算時間を短縮可能な上、Q 値誤差を 0.2 dB 以下に抑えることが出来る。

**鮫 島 清 豪 (佐藤教授) 「接続化前方誤り訂正符号を用いた光差動位相変調方式における誤り率の数値計算法」**

ITU-T で標準化されている接続化した前方誤り訂正符号の誤り率を、数値計算により高速かつ高精度に導出可能であることを示した。また、近年注目を集めている光差動位相変調方式の誤り率導出式を、一般的な関数で表現された閉じた形で求めた。

**情報学研究科 システム科学専攻**

**國 川 敦 生 (松田教授) 「計測反力データ群に基づく 3 次元反力表示の表面形状情報を用いた高精度化」**

実空間から得られる計測値に基づいて仮想空間中で反力表示を忠実に行う手続きに関し、物体上面の表面形状情報を用いて計測点群分布の配置変換を行い、表示精度の向上を図る手法について検討した。シミュレーションおよび実計測データを用いた評価実験より、提案手法の効果を確認した。

**久保田 悠 太 (松田教授) 「低酸素状態における心筋細胞モデルと心筋組織モデルの酸素消費特性比較」**

心筋梗塞等の病気の解明には心筋局所の酸素需給解明が重要である。本研究では、毛細血管から心筋細胞への酸素等の物質輸送のモデルと精密な心筋細胞モデルを統合し、低酸素状態における心筋組織の酸素消費を再現するモデルの構築を目指した。

**辰 田 英 之 (松田教授) 「核磁気共鳴顕微鏡 3 次元画像群に対するヒト胚子モデルのフィッティングに関する検討」**

核磁気共鳴顕微鏡により撮影されたヒト胚子標本の 3 次元画像を標準的な胚子モデルと比較し、標本の個体差を明らかにすることは有用である。本研究では、大量の標本画像群とヒト胚子モデルのフィッティングを、半自動処理により効率的に実現する手続きについて検討した。

**前 原 慶 子 (松田教授) 「スペクトル拡散を利用したタギング MRI における位置情報の符合化」**

心壁の運動などの解析に利用されるタギング MRI 法では、臓器運動検出のための画像中の暗線部追跡精度の向上が難しい。本研究では、異なるパターンのタギング MRI を撮影し、画素位置を拡散符合の符合語とすることにより画素位置を特定する方法を提案した。

**エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻**

**伊 丹 悠 人 (下田准教授) 「ディベート学習システムを用いた批判的思考態度醸成のためのカリキュラムの提案と評価」**

インターネットを介して利用可能なディベート学習システムを活用した批判的思考態度醸成のための高校生向け授業カリキュラムを提案し、その実践及び評価を行った。その結果、批判的思考態度を構成する 3 つの因子のうち、客観性と誠実さは有意な向上が認められたが、探究心は有意な向上がみられなかった。

**松岡和宏 (下田准教授) 「拡張現実感技術を利用した住宅景観シミュレーションシステムの開発」**

住宅を建築する際に、完成後の住宅の明確なデザインやその周囲の風景との調和を直感的かつ具体的に把握することを可能にすることを目的として、拡張現実感を利用した住宅景観シミュレーションシステムを開発した。

**榎本健治 (下田准教授) 「オフィス環境評価のためのパフォーマンステストの実用化に向けた改良と評価」**

オフィスワーカーの知的生産性を定量的に評価可能なタスクテスト CPTOP2 を実オフィス環境での評価に使用可能にするために、評価所要時間の短縮および評価安定性の向上を試みた。また、実際に CPTOP2 を実オフィス環境で試用し、CPTOP2 の実用化に向けた課題を抽出した。

**エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻****河音憲 (近藤教授) 「ヘリカル系プラズマでの電流分布時間発展」**

ヘリカル系プラズマにおいて、ビーム駆動電流やブートストラップ電流などの非誘導電流に起因するプラズマ電流分布の時間発展シミュレーションを、MHD 平衡と自己無撞着に行った。ここではとくに逆向きの誘導起電力を考慮し、予測シミュレーションを可能とした。

**小和田雄亮 (近藤教授) 「ヘリオトロン」プラズマにおける中性粒子ビームの分光計測」**

ヘリオトロン」プラズマにおいて入射された中性粒子ビームを分光計測し、各ビーム成分の成分比や、ビーム密度の減衰などの中性粒子ビーム入射の特性を調べた。高エネルギーのビーム成分ほど、電子密度が増加するにつれて観測される成分比が増加することが分かった。

**エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻****新居辰彦 (白井教授) 「Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter with Rewound Structure (巻き戻し構造を持つ変圧器型超電導限流器の限流特性)」**

変圧器型超電導限流器に関して、巻き戻しコイル構造を採用することで設計裕度を大きくできることを示し、BSSCO 線 ( $n$  値 21, 臨界電流値 100A) を用いたモデル装置を設計・製作してこれを確認し、明確な限流効果を得た。あわせて計算機シミュレーションによりその効果を評価した。

**エネルギー理工学研究所****中川知也 (増田准教授) 「マグネトロン型イオン源によるビーム衝突慣性静電閉じ込め核融合装置の開発と特性評価」**

マグネトロン型イオン源を内蔵し、未踏低圧力で重水素イオンを環状入射し中心へ集束させる新型装置を開発して、その特性を評価した。その結果、核合反応率が電流の 1.7 乗に比例する等のビーム対ビーム衝突反応を示唆する初めての実験結果を得た。

**保坂 勝幸 (水内教授) 「ヘリオトロン J」における MHD 揺動の周辺領域プラズマに及ぼす影響に関する研究**

ヘリオトロン J の NBI プラズマで観測されるアルヴェン固有モードに起因するプラズマ MHD 揺動と静電プローブで観測される周辺プラズマ揺動との相関を調べ、プラズマ内部での MHD 不安定性の突発的増大が、閉じ込め領域からの粒子損失を増大させていることを実証した。

**三原 詩織 (佐野教授) 「ヘリオトロン J」における ICRF 加熱による高エネルギーイオン閉じ込めとイオン加熱効率の加熱位置依存性**

ヘリオトロン J で ICRF 加熱 (少数イオン加熱モード) で生成された高速イオンの速度分布を中性粒子エネルギー分析器で計測し、ピッチ角依存性および磁場のバンピー成分依存性 (トロイダル方向の磁場リップル) について実験的に調べた結果、無衝突粒子軌道計算結果と定性的に良く一致することを検証した。

## 生存圏研究所

**山岡 雅史 (山本 (衛) 教授) 「FORMOSAT-2/ISUAL を用いた 630nm 大気光観測に基づく電離圏三次元構造の研究」**

FORMOSAT-2 衛星の 630nm 大気光リム観測から発光高度が 220 ~ 280km であることを示し、地上観測との比較によって電離圏の中規模伝搬性擾乱の 3 次元構造を推定した。大気光強度が大きい場合には、衛星観測のみから解析が可能であることを示した。

**篠田 智仁 (津田教授) 「443 MHz ウィンドプロファイラ・RASS を用いた沖縄亜熱帯域気温微細構造の連続観測 (Continuous observations of temperature profiles by the 443 MHz wind profiling radar with RASS in Okinawa)」**

亜熱帯域における高時間分解能の気温連続観測を実現し、天気予報の精度向上へ貢献することを目指して、沖縄の 443 MHz ウィンドプロファイラを用いた RASS 観測の実用化を行った。遠隔制御監視システムによる無人連続観測を実現しさらに鉛直分解能を向上する新手法を開発した。

**伴 林 晃 紀 (津田教授) 「地球流体データサーバにおける知見情報と数値データの有機的連携」**

近年、急速に増大する地球流体データの検索・解析・可視化を効率良く行うデータサーバ構築ツール (Gfdnavi) において、知見文書と数値データを有機的に連携するシステムを開発した。さらに外部の認証システムを利用できるようにして文書作成機能が広く利用できるようにした。

**三上 彩 (津田教授) 「443MHz ウィンドプロファイラ・RASS で観測された沖縄亜熱帯域におけるメソ  $\gamma$  スケール対流システムに関する研究 (Meso- $\gamma$ -scale convective systems observed by a 443 MHz wind-profiling radar with RASS in the Okinawa subtropical region)」**

沖縄亜熱帯域において夏季に太平洋高気圧に覆われた際に頻繁に現れるメソ  $\gamma$  スケール対流システムの発生、発達メカニズムを明らかにすることを目的として、沖縄の 443MHz ウィンドプロファイラ・RASS による高時間空間分解能の温度・風速データ等を用いた詳細な事例解析を行った。

林 徒 南 (津田教授) 「GPS 掩蔽による高鉛直分解能プロファイルの導出と検証 (Retrieval of High Vertical Resolution Atmospheric Profiles from GPS Radio Occultation Measurements)」

高精度、高鉛直分解能、グローバルな観測が可能などの利点を持つ優れた大気観測法である GPS 掩蔽観測において、より高鉛直分解能で解析できる手法 (FSI 法) を従来より高高度から適用することで、優れた鉛直分解能の気温プロファイルを導出し、さらに気球観測データ等を用いて検証した。

水 落 悠 太 (山川教授) 「小型プラズマ波動観測器に向けたワンチップアナログ回路システムに関する研究」

科学衛星に搭載されるプラズマ波動観測器の極端な小型化を図るため、その大部分を占めるアナログ回路の ASIC 化に取り組んだ。特に、急峻な減衰特性をもつアンチエリアシングフィルタを他のアンプ系とともに複数チャンネル一つのチップ内に実現することに成功した。

佐々木 大 祐 (山川教授) 「磁気プラズマセイルに関する電磁流体解析」

宇宙機の周辺にコイルによって人工的な磁気圏を形成し、太陽風と相互作用させることにより、推進力を得る磁気セイルの電磁流体解析に取り組んだ。特に、磁場の拡大を目的とする宇宙機からのプラズマ噴射の推力に対する影響を明らかにした。

浦 西 洋 輔 (大村教授) 「Three-dimensional electromagnetic particle simulations of a magnetron based on the real model (実モデルに基づくマグネトロンの 3 次元電磁粒子シミュレーション)」

マイクロ波発生電子管として様々な用途に用いられるマグネトロン内部の電子-電磁界共鳴現象およびマイクロ波自励発振を自己無撞着に再現できる直交座標系 3 次元電磁粒子モデルの数値シミュレータを開発し、商用の実モデルを忠実に模擬してシミュレーションを行った。

小 路 真 史 (大村教授) 「Competing Process between Mirror Instability and L-mode Electromagnetic Ion Cyclotron Instability in the Earth's Magnetosheath (地球マグネトシースにおけるミラー不安定性と L モード電磁イオンサイクロトロン不安定性の競合関係)」

マグネトシースにおいてミラー不安定性が、それよりも成長率の大きい L モード電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 不安定性よりもよく観測される理由を、3 次元ハイブリッドシミュレーションで解析した。ミラー不安定性の 3 次元的な発展および非線形発展の重要性を示した。

鈴 木 宏 明 (橋本教授) 「木質バイオマス糖化前処理用マイクロ波照射加熱装置の研究開発」

木質バイオマスからバイオエタノールを精製するための糖化前処理手段としてマイクロ波加熱を利用した、マイクロ波照射加熱装置の研究開発を行った。バッチ式および連続式マイクロ波照射加熱装置の容器設計を計算機実験により行い、試作容器を用いた実測実験により評価を行った。

高 橋 文 人 (橋本教授) 「マイクロ波送電用レトロディレクティブシステムの開発及び屋外実験」

屋外でもマイクロ波電力伝送実験を行えるように小型で軽量なマイクロ波送電屋外実験系の開発を行った。屋外に於いても従来の実験機と同等に近い性能を得ることが出来た。雑音に強い到来方向推定法である TF-MUSIC 法の SN 比が低い場合の優位性を実験的にも確認した。

**宮 田 侑 是 (橋本教授) 「GaN ショットキーダイオードを用いた大電力レクテナの研究開発」**

本研究では、建物内無線配電システム実現を目指し、大電力整流可能な GaN ショットキーダイオードを用いたレクテナ（整流器付アンテナ）を開発した。その結果、入力電力 4.4W に対して効率が約 53.2% の GaN ショットキーダイオードを用いたレクテナの開発に成功した。

**高等教育研究開発推進センター****山 崎 晃 (小山田教授) 「数値シミュレーションを用いた光ナノ共振器の構造設計支援システムの開発」**

数値シミュレーションを用いた光ナノ共振器の解析における現状の問題点を明確にし、それに対する解決策として、シミュレーションと可視化が連携した構造設計支援システムを開発した。開発システムの有用性検証を行うために、要件検証およびリアルタイム可視化に関する処理の実行時間の測定を行った。

**丁 中 明 (小山田教授) 「GPU-accelerated Particle-based Volume Rendering」**

有限要素法解析結果について効率のよいボリュームレンダリング手法を開発することは可視化技術分野で挑戦的なことと認識されている。この問題を解決するために解析結果に対する重要度サンプリングを行い粒子群として表現し、これら粒子群を GPU を使って段階的に描画することにより、高速表示と高画質表示とをうまく切り替えることのできる可視化システムを開発した。

**学術情報メディアセンター****中 峰 達 彦 (中村 (裕) 教授) 「マイクロインタラクションを利用したユニバーサルなユーザ支援モデル」**

本論文では、情報システムが様々なユーザの状態や障害に対応しながら、ユーザ支援を行うための、ユニバーサルな支援モデルを提案する。そのために、支援システムがユーザの細かな動作や混乱を認識し、適切な支援手法を動的に選択するだけでなく、さらに先の支援の方針を変更することが特徴である。

**伊 藤 大 司 (中村 (裕) 教授) 「EMGUI: 筋電位を用いたユーザインタフェースの設計と高精度化」**

本論文では、EMG (筋電位) を利用した一般的なユーザインタフェースを構築するための計測手法、認識手法を提案する。典型的な筋肉の動きを GUI 部品と考えることで、見通しの良いユーザインタフェースを構築できること、そのために多数の電極を用いることが有効であることなどを実証した。

**高校生のページ**

## 人間回帰としての可視化技術

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（協力講座）  
小山田耕二、坂本尚久

### 1. 可視化について

1970年代ノーベル経済学賞受賞の学者ハーバート・サイモンが「情報の豊富さは注意の貧困を生み出す」と予言した状況がいたるところで発生しています。このような情報過剰の時代にあって、泥から砂金を探し当てる可視化技術は多くの分野で注目されていて、本研究室研究テーマの大きな柱と位置づけています。可視化技術は、スパコンや計測機器から出力される大量の情報をわかりやすく映像化し、シミュレーションモデルの理解・新しい振る舞いの発見・新しい可視化技術の発明を促すきっかけを与えると期待できます。

1987年に可視化技術の重要性を訴えたレポートが米国科学財団により発行されてから多くの可視化手法が提案されてきました（1987年を可視化元年と呼んでいます）。提案された多くの可視化手法の中でもっともインパクトの高かった手法がボリュームレンダリングです。この手法は3次元空間で定義された数値データ（ボリュームデータ）を雲状に可視化します。我々の知覚システムでは、感覚の入力が物理的にもっともらしい現象から生じ、そのうえで入力解釈を行うと仮定すると、ボリュームデータは物理的な現象をもっともらしく表現するメディアによって表現されることが望ましいとされます。たとえば、視覚的類似度が高いので、スパコンによって計算されたクリーンルーム内の空気汚染度データは、ボリュームレンダリングによって効果的に可視化することができます。一般的にボリュームレンダリングは、ボリュームデータの全体的な特徴をうまく表現することが可能です。ボリュームレンダリングは与えられたボリュームデータを半透明な雲として表現し、その見栄えは、スカラデータから色データへのマッピングを指定する伝達関数によって制御されます。この指定は、ユーザが興味のあるデータについては強調のため不透明度を上げ、そうでないところはこれを下げることによって実現されます。

### 2. 可視化とその効能

可視化技術の向上に伴って、シミュレーションソフトウェアもたいへん使いやすくなり、利用者も広がっています。このため、利用者はシミュレーション技術をブラックボックス化して問題に適用しているだけで問題解決の本質に関わることなくオペレータ化しているという懸念があります。ものづくりにおいて最終的に判断するのは利用者である人間であり人間の脳が可視化結果から気付きを得て斬新な設計案に結びつけることが必要です。最近この気付きを含めた意識そのものの脳内メカニズムについて研究が進んでいます。シミュレーション技術が人間をより知的にするために、可視化技術が重要な役割を果たしているのでしょうか？可視化効能の数値化について、脳科学からのアプローチも紹介しながら考えてみましょう。

冒頭でも述べたように、情報爆発時代における不可欠な技術として情報可視化技術の開発や先進的利用が注目されるようになってきました。また、隠蔽するよりも開示することのメリットを強調する観点で、テレビ番組においても可視化という言葉を目にするようになってきています。可視化は人類共通の言語であり、意識に直接働きかけるという効能をもっています。可視化元年からほぼ20年経って米国

電気電子学会 (IEEE) から出版された VRC レポート (Visualization Research Challenges Report) によると、現在は、可視化技術の整備から可視化の意義：よい可視化とは何か？の探求に焦点が移ってきていると強調されています。よい可視化とは、遠藤功著の「見える化」でも述べられているように、行動誘引になるかどうか、すなわち人々のやる気を起こすきっかけや未知の現象の理解につながる気づきが生み出せるかどうかで判断されるものと考えられます。ここでは脳科学者らによる視覚的気付きや知識創造に関する研究を紹介することにより視覚的気付きの重要性について考えてみたいと思います。

電気工学専攻小林哲夫教授の研究グループは多様な視覚情報からある情報に気づくという視覚的気付き (visual awareness) の脳内機構について研究をすすめています。彼らは視覚的気付きの研究において多安定知覚現象に着目しました。この多安定知覚とは物理的な刺激が変化しないにも関わらず、2・3の異なる知覚が交互にあらわれることであり、脳の視覚的気付きのメカニズムを理解する上で重要な客観的事象として認識されています。彼らの研究では、多安定知覚として両眼視野闘争状態と複数の解釈が可能な多義画像を観察中の脳活動部位を MRI 撮影画像により調べ、この視覚的気付きの脳内プロセスを検討しました。その結果、多安定知覚現象には高次視角野、前頭連合野、頭頂連合野といった脳内の複数の部位が関わっていて、とくに前頭連合野、頭頂連合野が多安定知覚現象における知覚交代のプロセスに共通に関与することが示唆されました。

気付きは知識創造と関係があると考えられます。野中郁次郎らの提唱する知識創造理論で、知識創造において重要とされる相互作用の対象 - 形式知と暗黙知 - において、前者はシミュレーションの拠り所とする数学モデルに、そして後者はメンタルモデルに対応すると仮定することができます。シミュレーションというと計算機によって実現されると思われていますが、Jeff Hawkins は人間の頭脳では常にある種のシミュレーションが行われ、その結果が人間の知性と関係すると述べています。脳内シミュレーションで構築されるモデルがメンタルモデルであると仮定すると、数学モデルとメンタルモデルとのインタフェースが可視化技術となります。これは、適切な可視化を通したシミュレーションの実践が人間の知性向上 - メンタルモデルの精錬 - と関係があることを示唆しています。脳科学の深化に伴い、意識の可視化 - メンタルモデルの可視化 - 技術が開発され、これまで困難とされてきた暗黙知共有の実現に近づくものと期待されます。

### 3. 可視化の適用例

数値シミュレーションによる工学的な解析では、解析対象となる空間が複雑な形状となっていることが多いので、四面体格子や六面体格子などを使ってボリュームデータを表現します。一方、計算機科学技術の進歩に伴い、シミュレーションモデルは複雑化・高分解能化していく傾向があり、それに応じてシミュレーション結果データも大規模化しています。1台の計算ノードに集約することが困難であるような大規模分散並列環境で計算されたボリュームデータの可視化を実現するためには、効果的な分散化が重要な研究課題のひとつとして位置づけられています。可視化というのは最終的にひとつの絵を作るので、ある時点でデータをひとつにまとめないといけません、分散化されたボリュームデータをひ

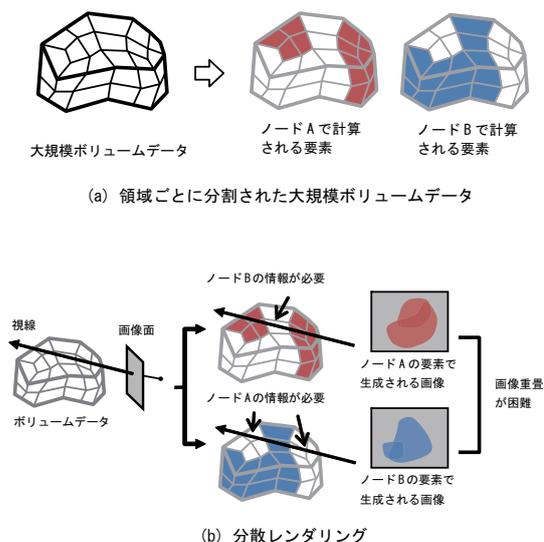


図1 大規模ボリュームデータの分散可視化

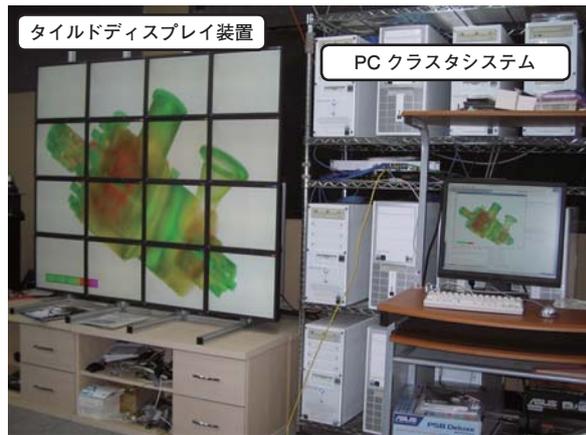


図2 PC クラスタシステムとタイルドディスプレイ装置

この問題を解決するために、本研究室ではボリュームデータをいったん粒子データに変換しそれを画像化する粒子ボリュームレンダリングを開発しています。膨大な格子のうち重要となる部分だけ粒子を発生させることで効率よくデータを表現することが可能であり、視線に沿った順序付けも必要なくなるため、分散化された大規模ボリュームデータに対して容易に可視化することができます。また、この手法は、不透明粒子を使って繰り返しかえし投影することにより半透明効果も実現できるため、データの空間的な広がりを効果的に観察することができます。以下では、これまで可視化することが困難であった2つの大規模複雑シミュレーション結果に本手法を適用した例を紹介します。また、ディスプレイを複数並べることで大規模表示環境を実現できるタイルドディスプレイ装置を利用した可視化事例を紹介します。この実験には、可視化結果を表示するためのPC1台と分散化されたボリュームデータに対して並列計算を行うためのPC8台をネットワークで接続したPCクラスタシステムを利用しました。そして、並列計算用の8台のPCにそれぞれ2台の液晶ディスプレイを接続することで4×4 (16面) のタイルドディスプレイ装置を構築しました (図2)。

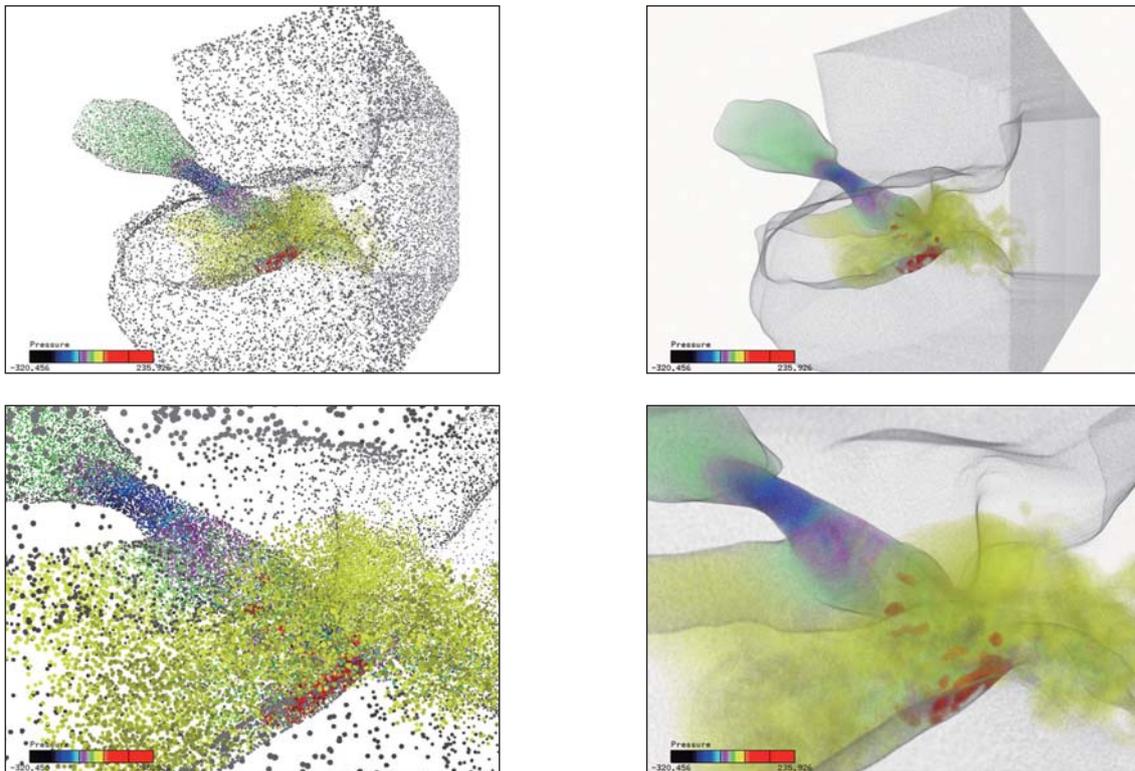
### 大規模口腔内気流シミュレーション結果の可視化

口腔内を流れる気流を計算し、摩擦による発音障害に関する解明および治療方法に関する研究が進められています。特に、口腔内気流解析では、その気流から発生する音源位置の推定は重要な問題の一つとされていますが、解析精度は計算の際に空間を分割するメッシュサイズに依存し、さらに計算機性能の向上も伴って、解析結果データはますます大規模化しています。ここでは、大規模で高性能な計算が可能な流体解析ソフトウェアを利用して出力された口腔気流シミュレーション結果に対して、粒子ボリュームレンダリングを適用した結果を示します。シミュレーションの対象となる口腔内形状モデルは、コーンビームCTと呼ばれるX線画像撮像装置を利用して得られた画像 (画像解像度: 512×512、スライス数: 512) から生成されたものを利用しています。そして、その形状モデルを、7,215万個の六面体格子に分割し計算することによって大規模なボリュームデータが出力されます。

図3に示す画像が、粒子ボリュームレンダリングによる大規模口腔内気流シミュレーション結果の可視化画像です。従来は、データが大規模であるために格子の順序付け計算が足かせとなって、ボリュームレンダリングを適用することが困難でした。そのため、格子数の少ないデータに対して、任意位置での断面や指定する値の面 (等値面) を表示することによって可視化していましたが、粒子ボリュームレンダリングを行うことによって、空間的な気流の速度分布や圧力分布を解析することが可能となりました。また、この手法では、粒子投影を繰り返して行うことでデータを可視化していますが、その繰り返

とつにまとめるのは不可能に近いので、部分ボリュームデータから部分画像を作成しそれを重畳するなど工夫が必要となります。

分散並列環境で計算された数値シミュレーション結果は、図1(a)に示すように領域分割されていることが多い。単純な格子による計算結果であれば、それぞれの分割領域ごとにボリュームレンダリングを行い、部分画像を作成し、それらを視線に沿った順序で重ね合わせる方法が有効ですが、非構造型格子による計算結果の場合は、その順序が確定しないケースが多くあります。図1(b)では、順序が決定されず、部分画像の重ねあわせが不可能となるケースを示しています。



(a) 繰り返し回数を減らして(1回)高速に描画 (b) 繰り返し回数を増やして(144回)高精細に描画

図3 大規模口腔内気流シミュレーション結果(圧力分布)の可視化(データ提供:大阪大学 野崎一徳 助教)

しの回数を制御することで、大規模データを効率的に表示することができます。たとえば、データに対して視点位置を変更する際は、繰り返し回数を減らし高速に表示し(図3(a))、静止時には繰り返し回数を増やし高精細に表示する(図3(b))ことによって、対話的な速度で効果的に解析を行うことができます。

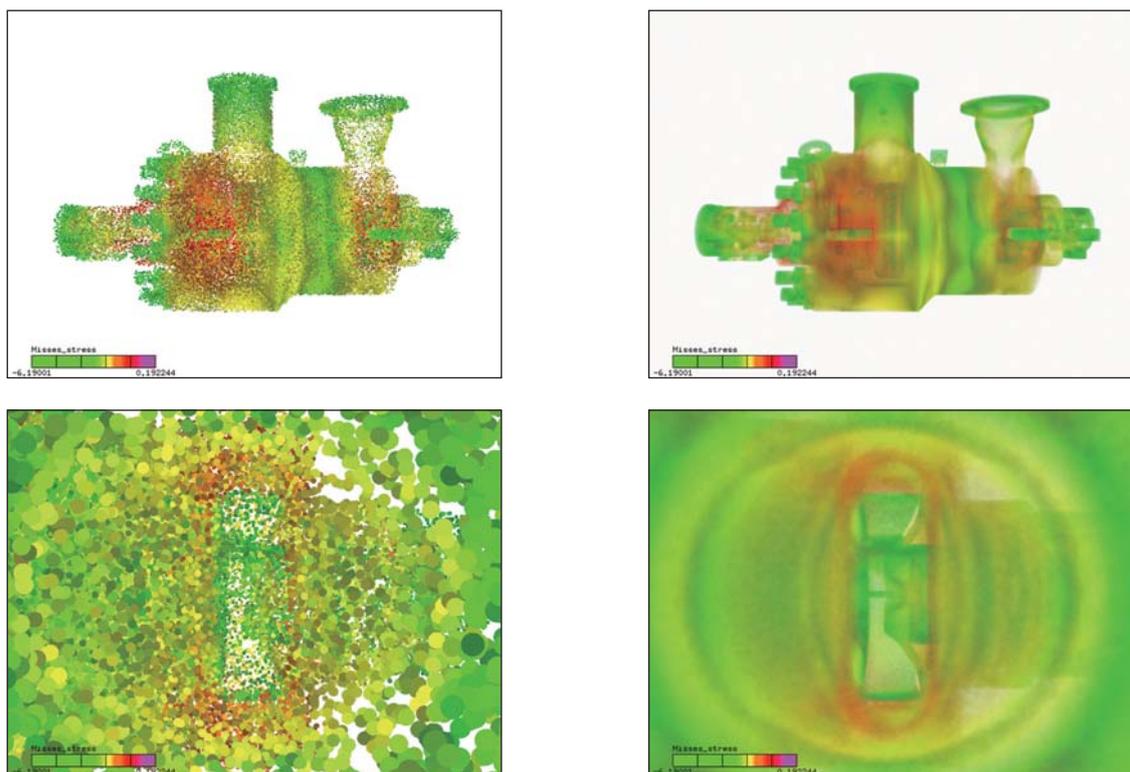
#### 大規模ポンプ自重解析結果の可視化

大規模並列構造解析システムを利用した原子炉給水ポンプの自重解析結果に対して粒子ボリュームレンダリングを適用した結果を図3に示します。ポンプデータは、32の領域に分割されていて、2,629万個の四面体格子の大規模ボリュームデータとして表現されています。このデータについても、データサイズが大規模であるために、従来では、断面図やデータ表面に対して計算された物理量を基として色付けを行うことで可視化を行っていましたが、粒子ボリュームレンダリングを行うことによって、ポンプ内部のデータ値の空間的な変化を解析することが可能となりました。

#### タイルドディスプレイ装置を用いた可視化

大量の情報をもつ可視化結果から重要な知見を見逃さないために複数研究者向けに提示できる高精細表示環境の活用も重要視されてきています。最近では、液晶ディスプレイやプロジェクタなどを複数並べることによって、安価にスケラブルな大規模表示環境を構築することができるタイルドディスプレイ装置(TDW, Tiled-Display Wall)を用いた可視化環境が注目されています。

本研究室では、図2に示したシステムを利用して並列計算された結果をタイルドディスプレイ上に大



(a) 繰り返し回数を減らして(1回)高速に描画 (b) 繰り返し回数を増やして(144回)高精細に描画

図4 大規模ポンプ自重解析結果(応力分布)の可視化(データ提供: 東京大学 奥田洋司 教授)

規模表示できる環境を構築しています。図5には、可視化された解析結果をもとに議論を行っている様子を示しています。大規模表示装置を利用することで、複数人でデータ全体を概観することができ、かつそれぞれに異なる興味領域を同時に観察することもできるため、効果的な議論を行うことが期待できます。

#### 4. おわりに

シミュレーション技術は、特に横断型研究分野で見られる複雑高度化された問題を解決する糸口を与えるものとして期待がますます大きくなっていくことが予想されます。横断型研究の例としては、地球規模の紛争解決手段の策定、地球規模の循環・環境変動の予測、次世代モノづくりの支援、効率的な創薬のプロセスの実現、そして個人毎に最適な薬剤や治療法を見出すテーラーメイド医療の実現などが挙げられます。これらを支援するシミュレーション技術は、高精度・高分解能化されていく傾向があり、そのシミュレーション結果は大規模・複雑化し、ある分野の専門家だけでは理解が困難となると予想されます。

複数メンバーが地球規模の困難な問題を解決するためには、明確化された可視化効能をうまく生かした遠隔協調研究支援環境を利用することが考えられます。そのような環境上で、複数メンバーによる議論を促進するにはそれぞれの視点で可視化画像が提示される必要がありますが、現在の表示装置では、多視点对応が十分ではありません。一部、制限された視点数における多視点表示装置や解像度を犠牲にした全方位型表示装置が存在しますが、複数メンバーによる議論を促進する段階にあるとは言えない状態です。

シミュレーション結果を共有できる遠隔協調研究支援環境の構築については、日本では、世界に先駆

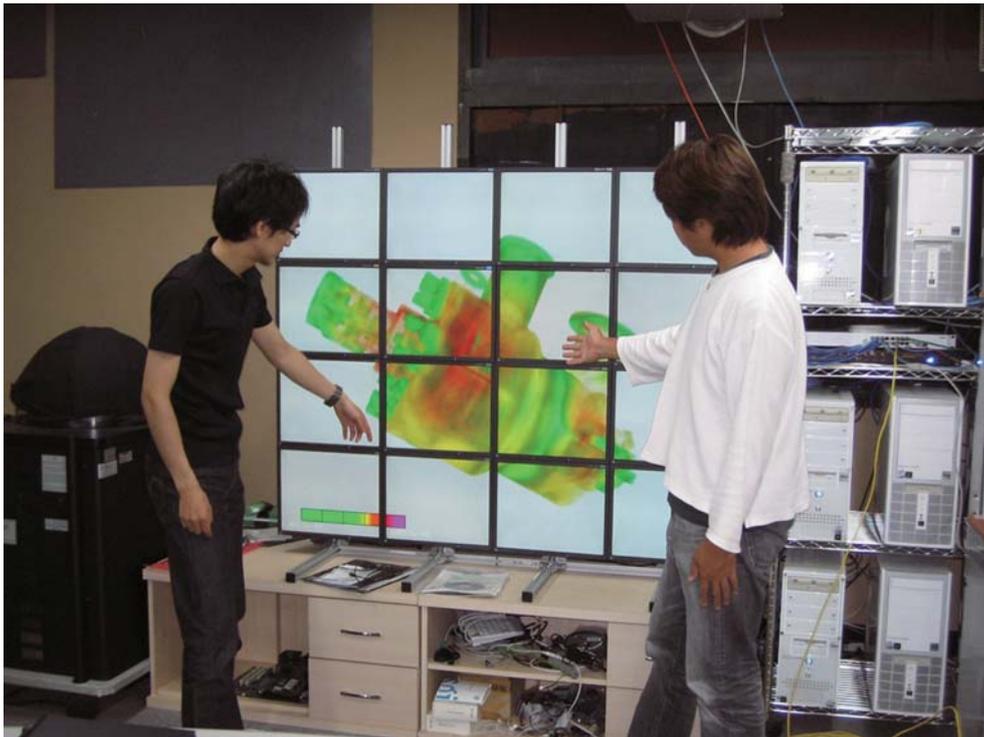


図5 タイルディスプレイ上に可視化された大規模ポンプ自重解析結果について議論をしている様子

けて可視化技術の効能を認識し、ITプログラムのひとつの柱として可視化に関する国家プロジェクト「VizGrid（代表 北陸先端大学松澤照男教授）」を実施しました。高速ネットワーク技術や高臨場感インタフェース技術といった多地点対応の可視化技術開発に必要とされる基盤が未整備の状況ながら、何十年もの先を見越した将来展望の開ける研究成果が残されたものと評価されています。

長期的には、コトづくりの基盤として可視化が重要な役割を担うものと予想します。コトづくりとは、社会的課題の解決に役立つ真の「知の統合」を実現するために個別分野の「知の相互関係を探求」することとされています。知の統合という観点では、収斂技術と深い関係があり、人間を知的にするという目標が共通しています。相互関係といった数値ではないデータの可視化としては、最近発展の著しい情報可視化技術の果たす役割が大きくなると予想します。また、コトづくりの性能：「人間をどの程度知的にしたか」を評価する上でメンタルモデルの可視化は必要不可欠な基盤となることが期待されます。

## 学生の声

### 「ロシア・クルチャトフ研究所への研修」

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 水内研究室 博士後期課程2年 向井清史

現在、私はヘリオトロンJプラズマの電子密度分布を計測することを目的としたマイクロ波AM反射計の開発を行っています。この度、反射計計測や構成部品の作製に関する技術指導を受けること等を目的として、今年の3月に約2週間、モスクワにあるクルチャトフ研究所のVladimir Zhuravlev博士のもとを訪問致しましたので、その際の体験談を紹介したいと思います。

まずは渡航前からです。当初、この研修は12月を予定していましたが、ところがある日、先生から「海外共同研究の担当者が突然解雇され招聘状が発行できない」との連絡があり、ビザの発行ができずに、極寒のモスクワ行きは延期となりました（もっとも3月でも川は凍っていましたが）。

新しい担当者が着任し、日程が3月に決定してからは順調に進んでいたのですが、シレメチェボ空港到着時にはロストバゲージに遭いました。自作の一見怪しげな部品を持ち込んでいたため、何か問題になったのではないかと暗い空港の中で冷や汗をかきましたが、ヘルシンキでの乗り継ぎの際の積み込みミスが原因だったようで、翌日には無事手元に届きました。

他にも夜のモスクワで道に迷う等、様々なトラブルに驚きや戸惑いの連続でしたが、最も衝撃的だったのは研究のスタイルでした。初めに研究所を訪れ装置の見学をした後、「もうここに来てもすることはない、部品等は私の家にあるから明日からは私の家に来なさい」と言われました。それからは、先生の部屋でペットの猫に囲まれながら部品の半田付けをする、という貴重な経験をさせて頂きました。

先生に熱心に指導して頂いたお陰で、今回の研修の目的は全て達成することができました。モスクワは1000万人を超える人口を持つだけあって多くの人種が住んでおり、東洋人に対する視線等を感じることは全くなく、“最大の犯罪者グループ”、“ごみ”と現地で呼ばれている悪徳警官の被害に遭うこともありませんでした。休日には“ねぎ坊主”の形で有名な寺院を訪れたり、クラシックのコンサートでロシア臭ただようモーツァルトに触れたりすることもでき、公私ともに充実した生活を送ることができました。この研修で得た知識や経験、そして度胸を糧に、今後の研究に励んで参りたいと思います。

本研修で大変お世話になりました Zhuravlev 博士が去る7月に急逝されました。この場を借りてお悔やみ申し上げます。

### 「第一線で活躍するために」

情報学研究科 通信情報システム専攻 小野寺研究室 博士後期課程2年 久保木 猛

私はCMOSによる高性能回路の設計に関する研究を行っております。このテーマは学部4年生から取り組んでおり、これまでこの研究を続けられたことに今更ながら感謝しております。CMOS回路、特に私の研究で取り組んでいるようなアナログ回路の設計では、設計が困難になりつつあり、大学だけでなく企業においても需要の高い研究分野です。

さて、すでに博士課程の進学から1年が過ぎてしまいましたが、修士課程在籍時には積極的に就職活動を行っており、進学はあまり考えていませんでした。ある会社の見学の時に魅力的な研究を紹介されて良い印象を持ちましたし、実際に、就職先を数社に絞っていました。しかし、進学という選択肢を考えたのもその会社見学でした。見学時に会社の技術面での説明をされていた人が、みな博士の学位を取得している人だったのです。そのとき「ああ、第一線で活躍する人は博士を持っているんだなあ」と考え始めました。また別の会社では当研究室の学生全員が就職希望と聞いて、「誰か博士行かないのか？」とリクルータの方がおっしゃっていました。第一線で活躍する技術者の生の声を聞いた後で、私の中で進学という選択肢が魅力的に思えてきました。すでに4月に入っていましたが私はまだ就職か進学かを悩んでいました。

結局、学校推薦を受けるかどうかの面接の日に進学を決めました。それから1年。進学という選択は私にとって良い選択、少なくとも就職と同程度には良い選択だったと満足しています。もちろん就職も良い選択でした。今こうして研究を進めてみると、なかなか思ったように進まないこともありますが、それでも主体的に研究を進められる環境のすばらしさに、今更になって気付くようになりました。それと同時に4月に入っていたぎりぎりのところまで悩んで考えてよかったとも思えてきました。世の中はあっという間に不景気になってしまいましたが、現在もこうして社会的にも学術的にも意義の大きい研究を進められていることは幸運であり、感謝しております。今の環境に感謝しながら、今後も学位取得に向けて頑張っただけでいいと思います。

## 教室通信

電気電子工学科長 北野正雄

今年度より電気電気工学科長を務めることになりましたので、ご挨拶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、新しい体制づくりに尽力いただきました。ここでは、姿を見せつつある成果の一端を紹介させていただきたいと思います。

まず、教務委員会関係では、カリキュラムの本格的改訂が進んでいます。とくに、高校までの教育内容のレベルと、大学での研究分野の多様化を考慮し、3年生までは共通性の高い基礎科目を精選して配置するよう方向づけがなされています。今年度の新入生から、この新カリキュラムでの授業が実施されています。年次進行にしたがい、新カリキュラムの名にふさわしいプログラムを完成させるべく各担当教員が最後の仕上げに取り組んでいるところです。

新入生向けの教育改善の新しい試みとしてエレクトロニクス・サマーキャンプを実施しています。与えられた課題達成に向け、数日間かけて、チームで取り組むというもので、夏休み直前に希望学生を募って開催されています。昨年は「柿ピーの柿の種とピーナツを判別、分離するロボットを設計し製作せよ」という課題に23名の1回生が取り組みました。キャンプと言っても、実際に宿泊する訳ではありませんが、時間の制約なしに、3日間チームでプロジェクトに集中するという意味でキャンプとよんでいます。指導にあたった教員、ティーチングアシスタントも含め、大いに盛り上がった3日間でした。詳細は下記のWEBページをご覧ください。今年度からは、1回生向けのコースに加えて、2回生、3回生向けのコースも実施する予定です。なお、優秀チームに送られる賞品は洛友会から提供いただいています。

もう1つの委員会である将来構想委員会は、当初、入試制度改革を目標にしていたのですが、高校生の理科離れ、工学離れ、電気離れ対策に重点を移し、ホームページや出版物による広報、在学生に対するアンケートによる意識調査などを進めてきました。下記の電気電子工学科の受験生向けホームページにその活動の一端を見ていただけたと思います。名称も企画・広報委員会と改められました。

全学の高校生向けの行事であるオープンキャンパスや中学生向けのジュニアキャンパスに積極的に参画するとともに、学科独自での取組も進めています。高校への出前授業、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に取り組んでいます。このようなアウトリーチ活動は即効性は期待できませんが、今後ますます重要になると考えられています。また、これらの活動に触れたことが、当電気電子工学科志望のきっかけとなったという例も実際に見られるようになってきました。交流の機会をとらえて、大学での勉強や研究内容を伝えるとともに、偏差値や進学実績などに惑わされずに、各自の興味や適性、志を見つめながら進路を考えるという当然の姿勢を、高校生に真摯に訴えてゆくことが大切だと考えています。本誌cueに連載の「高校生のページ」も活用させていただいており、今年のオープンキャンパスでは、これまでの記事の抜き刷りを特集号とし、参加者に配布することになっています。

今年度は昨年来の経済危機の影響で深刻な就職難に見舞われました。例年の求人の白熱ぶりが嘘のようです。長い目で見れば、一時的な事象かも知れませんが、その年に卒業する学生にとっては人生を左右する大問題であり、何らかの対応を考えてゆく必要があると思われます。

昨今の大学を取り巻く環境には相変わらず厳しいものがあります。経済分野においてさえ制御不可能な副作用を孕んでいる競争原理を教育や学術の世界に単純に当てはめようとする風潮は衰える兆しがありません。その結果、教育や基礎研究など、大学が培ってきた深みや広がり徐々に失われようとしています。大きい魚をとることばかりに気をとられて、湖が干上りつつあるのに気づかないかのようです。

皆様には、これら電気電子工学科の取組と直面している課題をご理解いただき、引き続きより一層のご支援とご教示をお願いしたいと思います。

サマーキャンプ：[http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/admission/top/summer camp](http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/admission/top/summer%20camp)

受験生のページ：<http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/admission/top/>

## 賛助会員の声

# 「伝える」をきわめる：光と無線の先端技術

日立電線株式会社技術本部 技師長（昭和50年卒） 坂口 春典

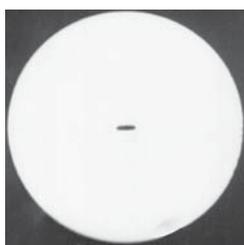
## 1. はじめに

「電線」と聞くと古いイメージを思い浮かべるかもしれませんが、電線の本質はエネルギーと情報を伝えることにあり、それらを如何に「早く」「確実に」「効率的」に伝えるかはますます重要な社会要請となってきました。エネルギーの分野では、サブプライムを契機としてグリーンニューディールに代表される産業の大転換が始まろうとしており、風力発電などの新エネルギーや電力網のIT化であるスマートグリッド、HEV、EVなどの移動手段の電動化が、環境・エネルギー革命として発展しようとしています。これらには、発電機やモータのコイル、パワーケーブル、監視や統合制御のためのセンサや情報伝送部品が使用されインテリジェントで効率＝環境に良い新たな技術革新が求められています。また、情報分野でも今後ますますIT網のトラヒックは増大し、100Gbit/s光伝送やデータセンタの大幅省エネ化などの技術革新が求められています。我々は、「伝えるをきわめる」をスローガンとして、「環境・エネルギー」や「情報伝送」の分野での社会貢献を念頭に多種多様な技術・製品の開発を行っております。以下にその一部をご紹介します。

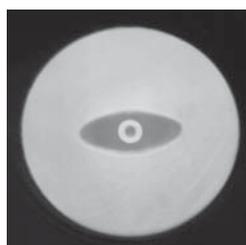
※「伝える」をきわめるは、日立電線株式会社の登録商標です。

## 2. 光を使ったセンシング技術

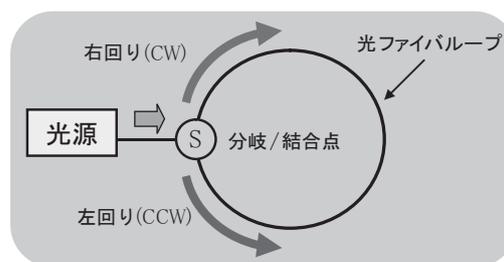
最近、機械が人間を煩わせることなく自ら伝えるべき情報を感じて、それに合わせて機械を動作させることができるセンシング制御技術が望まれるようになってきました。光ファイバは、情報を伝送する手段として広く家庭まで普及しつつありますが、通信のみでなくセンサ用途にも応用できます。例えば、ループ状にした光ファイバに時計方向とその反対方向に伝搬した光を干渉させて求めた2つの伝搬光の位相差から、回転角速度を検出する光ファイバジャイロは、無線操縦ヘリコプタや掃除ロボット、船舶などに使われます。当社では、この光ファイバを用いた光干渉技術を応用し、電流センサや振動センサを開発、製品化しています。電流センサは、電流によって発生する磁界と同じ面にループを配置し、ファラデー効果による光の偏波面の回転を利用したもので、外部磁界の影響による計測誤差がないことから、近年電力供給が密集している変電所などへ採用され始めています。振動センサは、ジャイロの光ファイバループを振動検知ケーブルに置換えたもので、フェンスに設置して敷地内への侵入者を検知する



楕円コアタイプ



楕円ジャケットタイプ



光干渉系（サニャック干渉系）

※ CW : Clock Wise , CCW : Counter Clock Wise

セキュリティ用途で実用化しました。空港、港湾、発電所など重要施設の外周フェンスに敷設され、監視カメラと組み合わせて配置し、侵入者を検知した場所のカメラ映像が直ちに確認できる仕組みになっています。これら光干渉センサは、楕円コアタイプの光ファイバと、応力付与部を加えた楕円ジャケットタイプの偏波面保存光ファイバを組み合わせて構成します。特性の安定性や信頼性が高く、取扱いが容易で寿命が長いことが特長です。これら以外にも、温度や歪センサなども研究・開発・製品化を進めています。

### 3. 低消費電力化を実現する光伝送技術

データセンターでは、多くのサーバーやストレージなどの機器が使用されており、相互にデータのやり取りを行なうために高速伝送ケーブルによって接続されています。また、一般家庭においても、画質や通信速度の大幅な向上から高速伝送ケーブルが普及し始めています。これまではメタルケーブルでの接続が一般的でしたが、膨大な電力を消費するデータセンターの省エネ化や機器の伝送速度向上などから高速・高密度・長距離伝送に適した光アクティブケーブルが一部使われ始めています。光アクティブケーブルとは、光トランシーバと光ファイバケーブルを一体化したもので、電気信号を光信号または光信号を電気信号に変換する機能を内蔵したコネクタ部と、光信号をやり取りする光ファイバケーブルからなります。当社では、以前から光トランシーバと光ケーブルそれぞれの研究開発・製品化を行っており、これらの技術を結集することにより、データセンター向けに10Gbit/s × 12ch 伝送に対応した「InfiniGreen」という InfiniBand 規格に準拠したパラレル光アクティブケーブル製品を開発しました。本製品は、消費電力0.9Wと他社同等製品の1/3まで抑えた低消費電力を実現し、独自の細くて柔軟性に優れた24芯光ファイバケーブルにより取扱い性に優れています。さらなる伝送速度の増加と配線密度向上の要求に対応すべく、研究・開発を推進しています。

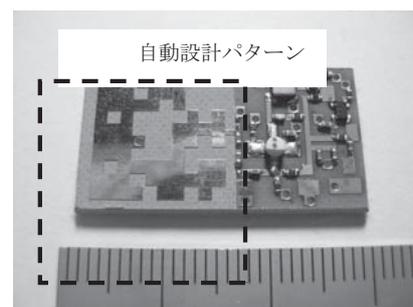


光アクティブケーブル  
「InfiniGreen」

InfiniGreen は、日立電線株式会社の登録商標です  
InfiniBand は、InfiniBand Trade Association の登録商標です

### 4. 多様化に対応可能な無線技術（アンテナ自動設計）

無線情報通信の分野では、データや音声、画像などの通信速度や容量の向上を目的に新しい通信方式が追加導入され、益々多様化が進んでいます。この多様化に伴い、基地局用アンテナでは、良好な電波送受信状態を実現する構造や仕組みへの対応が望まれています。また携帯電話やノートPCなどの情報携帯端末では、1台で複数の通信への対応が要求され、同時に使用する複数のアンテナを省スペースに実装することが望まれるようになって来ました。しかしながら、アンテナの構造や仕組みが複雑になるほど、設計は困難となります。当社では、この解決方法として、独自開発の高速モーメント法を用いた構造最適化アルゴリズムに従い、アンテナとして構成したい領域を離散化し、これら離散点の組合せを計算機で評価させ、所望の特性を実現できる自動設計技術を開発しております。これにより、人為的な検討では実現が困難だった最適構造の設計が可能となります。この技術を発展させ、無線情報通信の多様化に対応する無線技術の研究開発を進めています。



## 5. おわりに

これからの社会のキーワードは「エネルギー」「ヘルス」「セキュリティ」と言われています。「ヘルス」分野でも BMI と言われる、人とマシンをつなぐ技術の研究が進んでおり、またセンサ、IC、配線を一体化したインテリジェントハーネスは、ウェアラブルヘルスマニタリングやロボットに発展していきます。「伝える」技術にはまだまだやるべきこと、社会が求める開発ニーズは無限にあり、当社ではそれを極めようと努力を積み重ねています。学生の皆さんには、大学、企業の間を問わず、こうした技術開発へ積極的に参加頂くことを期待しておりますし、こうした分野で活躍してみたいと思われる方がいれば、是非話を聞きに来て下さい。お待ちしております。

## 賛助会員の声

# 空調機（エアコン）におけるエレクトロニクス技術

ダイキン工業株式会社 環境技術研究所 主任研究員（昭和51年卒） 田中 三博

## 1. はじめに

皆さんもご存知の通り、エアコンは家庭やオフィス・学校等に広く普及しています。家庭用エアコンの世帯普及率は85%を超え、今や一家に複数台が常識となっており、その国内市場規模は年600～700万台規模で推移しています。世界的に見ても、エアコンが余り使用されていなかったヨーロッパや急速に経済発展しているBRICs等においても、急速に普及しつつあります。

また、エアコンの消費電力が国内の家庭では使用電力量の20%以上を占めるに至り、省エネや地球温暖化防止の観点から見ても、非常に影響の大きい機器となっています。

エアコンは、ヒートポンプ技術をベースに熱を扱う機器のため、一般的には機械分野の機器として見られがちですが、現在のエアコンでは、省エネ・快適性を実現するため、高性能マイコン、高効率モータ・インバータ技術が必須であり、電子制御/パワーエレクトロニクス技術者の果たす役割が非常に重要になっています。

## 2. 空調機とモータ・インバータ技術

図1に空調機のヒートポンプサイクル（暖房）の概要を示します。圧縮仕事の熱量に加えて蒸発器で周囲から受け取る熱量を暖房に使えるため、圧縮機入力の3～5倍を超える暖房能力を出すことができ、ヒータ等による暖房よりも高効率になります。このことから、空調機の省電力化には「熱交換効率の向上」と「圧縮機入力の低減」が必須課題であり、モータの高効率化と圧縮機モータ駆動のインバータ化がこの2つの課題解決に非常に有効です。

1980年に世界初のインバータエアコンが日本で発売され、図2のように、その初期段階には誘導モータ、フェライト磁石を用いたSPM構造のPMモータが採用されていましたが、1990年代初頭には、弊社が業界に先駆けて希土類磁石を埋めこんだIPM構造の回転子を採用し、現在では固定子巻き線に集中巻を採用したIPMSMが主流となっており、図3のように大幅に効率が向上しました。

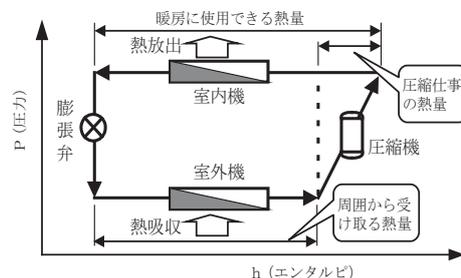


図1. 暖房時のヒートポンプサイクル

モータ構造			
'94	'95	'96	'00
ロータ			ステータ
フェライト埋込	希土類埋込	1層 IPMSM	磁極集中巻
フェライト埋込	希土類埋込	2層 IPMSM	磁極集中巻
励磁電流ゼロ	磁束密度強化	リラクタンストルク	巻線抵抗低減

図2. モータ構造の高性能化

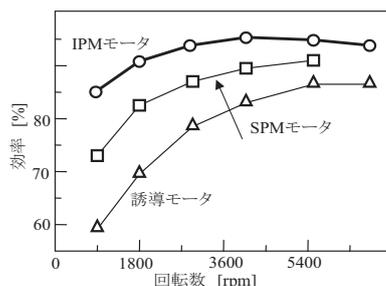


図3. 各種モータの効率特性

図4のように、インバータの回路構成は、誘導電動機を駆動する初期のインバータにおいてはパワートランジスタ6個をモジュール化した主回路、8bitマイコンが用いられていましたが、現在では、IGBTモジュールによる主回路の損失低減および32bitマイコンによる高度なセンサレス制御方式実現しています。

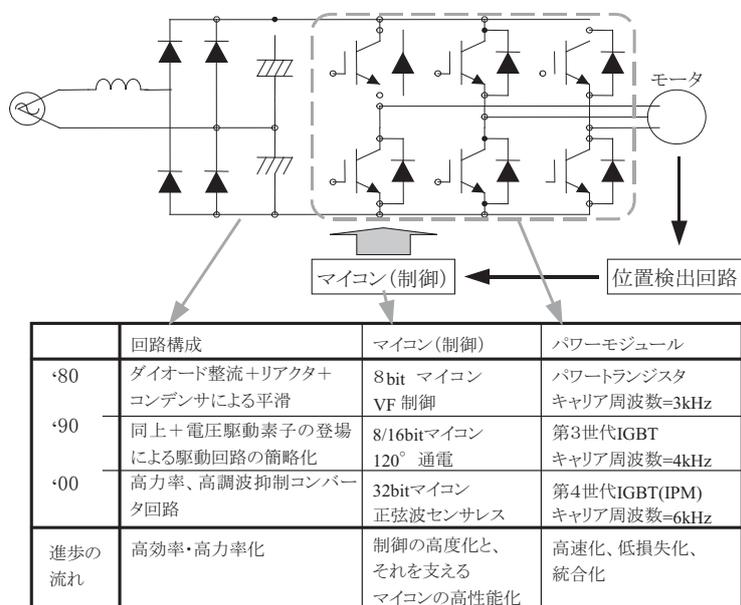


図4. エアコン・インバータ部の変遷

コンバータおよびインバータは、汎用部品を組み合わせるのが主流ですが、空調機に特化したカスタムパワーモジュール等も開発されています。IPMSM 駆動には永久磁石の磁極位置を検出するための位置センサが必要ですが、高温・高圧な圧縮機内部にセンサの設置が困難なため、各種センサレス制御が開発されており、120度通電方式の無通電期間に現れる逆起電圧、固定子巻線の中性点電位、更には、モータに供給している電圧・電流情報とモータモデルを用いて磁極位置を演算する方式があり、モータ制御の主流となりつつあります。

### 3. おわりに

エアコンにおけるエレクトロニクス技術、特にパワーエレクトロニクスについて紹介しました。今後、地球温暖化防止やグローバル市場、暖房/給湯のヒートポンプ化拡大などにより、日本発のインバータ・PMモータに代表される省エネ技術が広がること予想されます。また、エアコンのシステム化を支える通信・遠隔監視技術や、機器の小型化に貢献する実装技術の重要性も増すと考えられ、エレクトロニクス技術者/研究者の活躍する場面が増えていくことは間違いありません。

(ダイキン工業株式会社 <http://www.daikin.co.jp>)

## 編集後記

2009年は、前の年の米国自動車産業の破綻に端を発した経済危機を筆頭に、感染力の強い新型インフルエンザ、大雨や地震などの自然災害による被害などに加えて、政治の世界の先行き不透明性もあって不安な年となっています。特に若い学生諸氏にとっては、その不安は大きいのではないのでしょうか。

このような中で、せめて大学くらいは「夢」や「希望」を持った活動をしたいものです。最近では電気関係教室に属する研究室の研究・開発も多岐にわたり、従来の「電気」や「電子」と言う言葉のイメージにおさまらない領域まで含むようになってきました。これまでにない「夢」や「希望」に向かって大学では日夜、研究開発が進んでいます。産官学の連携も緊密になり、大学だけの勝手な「夢」や「希望」ばかりを追ってはられないのが現実ではありますが、社会の中にある「夢」や「希望」の芽をうまく摘み取って、大学での研究開発の「夢」や「希望」に仕立てていくことも重要なことと感じます。cueは電気関係教室からの情報発信誌ですが、読者の皆様とも情報交換を行って、大学での「夢」や「希望」の種を作ることができればと思います。cueが「夢の架け橋」になれば幸いです。cueを読まれてご意見があれば、是非編集部（cue@kuee.kyoto-u.ac.jp）までお寄せ下さい。

[Y.G. 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21年9月

編集：電気系教室 cue 編集委員会  
高橋 達郎、和田 修己、佐野 史道  
船戸 充、田野 哲、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

