

**新設研究室紹介**

**電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（松尾研究室）**

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

**「計算電磁気学とその応用」**

電気電子機器の開発において電磁界シミュレーションは必須の技術となっており、計算の高速化・高精度化とともに、材料物性を組込んだ解析・設計技術や、複数の物理現象との連成解析などが求められています。そのためには物理現象の高度なモデル化手法の開発が必要であり、電磁界解析においては電磁界方程式の数理的な性質に立脚した効率的で応用範囲の広い解法の開発が重要です。本研究室では、電磁界や電気電子材料の計算機解析におけるキーとなる理論や手法の研究を行っています。すなわち、Maxwell 方程式の性質に基づいた計算電磁気学の理論的な研究や、それを応用した高速電磁界解析手法の開発、ならびに、磁性材料の磁気特性シミュレーション手法の開発などに取組んでいます。

**1. 磁性材料のマルチスケールモデリング** 磁性材料モデル化のキーとして、 $\mu\text{m} \sim \text{mm}$  オーダの中間スケールの振舞いを記述する磁区構造モデルの開発に取り組んでいます（図1）。このスケールは高性能磁性デバイスの開発が期待される領域であるとともに、マクロスケールの磁気特性を支配する結晶粒のスケールであるにも関わらず、有効なモデル化手法に乏しいのが現状です。磁区構造モデルの集合により、ミクロからマクロに至る各スケールにおいて、磁性体の振舞いを記述し、材料特性を計算機上で再現することが可能になります。将来的には、電気電子機器に要求される性能に応じた材料特性が得られるように、磁性材料製作へフィードバックできるような、計算材料物理学の構築を目指しています。

**2. 時空間計算電磁気学** 電磁界計算では空間と時間が別々に取扱われることが通常です。しかし、電磁界の方程式においては、両者を時空間として統一的に取扱うことができます。時空間で計算格子を構成する（図2）ことにより、柔軟な計算格子の生成が可能になり、電磁界計算の自由度は大幅に向上します。たとえば、必要に応じて時間刻み幅を場所によって変えることが自然に行うことができます。また、移動物体がある場合など空間格子を時間的に変化させて解析する場合、空間格子の時間的な変化を連続的に取扱うことができます。そこで、本研究室では、時空間格子を用いた計算電磁気学の新しい枠組みの構築に取り組むとともに、メタマテリアルなど先進光学素子開発への応用を目指しています。

**3. 高速大規模電磁界解析** 複雑かつ微細な構造を持つ解析対象に対応して計算格子が細密化されるのに伴って、とりわけ3次元解析では計算規模が爆発的に増大する傾向があります。そのため、解析の大規模化に対応した効率的な計算技術の開発が重要となります。そのキーとなる技術の一つに大規模疎行列解法があり、国際的にも活発に研究が行われています。本研究室では、電磁界方程式の数理的性質に着目した新しい発想に基づく疎行列解法の開発と、その効率的な並列処理手法の研究に取り組んでいます。図3のように、高速疎行列解法の導入により計算が100倍程度高速化される例もあります。

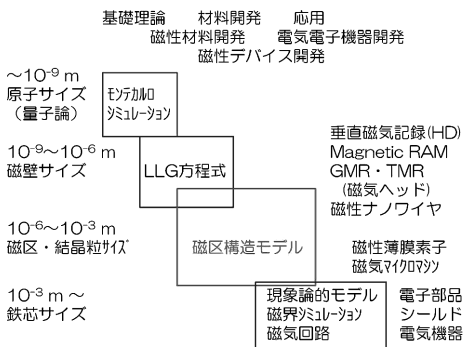


図1 磁区構造モデルの位置付け

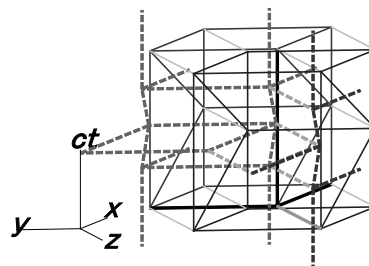


図2 4次元時空間格子の例：主格子（実線）とその双対格子（破線）はローレンツ計量にて直交している。

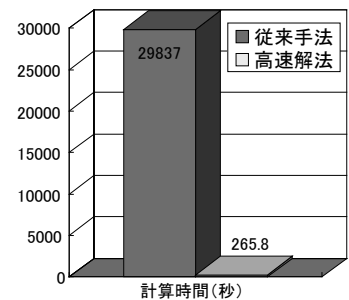


図3 計算高速化の例

## 研究室紹介

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

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

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科(大学院)

##### 電気工学専攻

複合システム論講座(土居研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野(松尾研)\*

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野

##### 電子工学専攻

集積機能工学講座(鈴木研)

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野(松重研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創生部門先進電子材料分野(藤田研)

#### 情報学研究科(大学院)

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)#

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤亨研)

##### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

#### エネルギー科学研究科(大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野(中村祐研)

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電波科学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)☆

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研)

#### ベンチャービジネスラボラトリー

#### 高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(小山田研)

#### 学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野(中村裕研)

## 電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

<http://www-lab04.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.j.html>

### 「高温超伝導線材の非線形電流輸送特性を利用したブレークスルー：輸送機器用高温超伝導誘導 / 同期駆動システムの研究開発」

当研究室をリーダーとする産学プロジェクトグループでは、電気駆動式自動車を中心とする輸送機器への応用を目指した高温超伝導ダイレクトドライブシステムの研究開発を実施しています [1]。開発対象とする高温超伝導誘導 / 同期回転機 (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) は、汎用されているかご形誘導機の簡易な基本構造を有しているものの、2次側巻線を HTS 導体で構成するだけで高効率な定常同期回転が可能他、既存の回転機では実現不可能な高性能化・高機能化を実現可能です [2]。

HTS-ISM の大きな特長の一つとしては、HTS 線材における非線形電流輸送特性を積極的に利用していることが挙げられます。世界的に研究開発されている HTS 回転機の多くは、HTS 線材の第一義の特長である超低損失大電流通電特性や、その2次的特長である高磁界発生特性を利用したものが殆どです。しかしながら、臨界電流（形式的に抵抗ゼロで通電可能な最大電流）を絶対的な制約条件と考える限りにおいては、マテリアルサイエンスの観点から新機能を実現することは困難です。HTS-ISM は、上記課題を解決し、HTS 回転機に関するブレークスルーを達成する可能性を持っています。つまり、HTS 線材におけるゼロ抵抗状態と有限抵抗状態の境界は、高温動作に伴う高い比熱も幸いして実用低温超伝導線材のように明確に定義出来るものでなく、その電界と電流密度の構成関係がブロードに変化します。この特性は、熱力学的には超伝導状態でありながらも損失を発生する磁束フロー状態と呼ばれます。HTS-ISM では、磁束フロー状態を積極的に利用することによって、次の様な新機能が得られます。

#### (1) すべり回転ならびに同期回転モードの両立性 [2]

停止状態にある HTS-ISM において、HTS ロータバーが磁束フロー状態に遷移するような起磁力が与えられると、回転子が磁束フロー状態に遷移してすべりモードで始動し、その後加速するとともに自己引き入れ現象によって同期回転を実現可能です。つまり、HTS-ISM は自己始動が可能なインテリジェンスを有していると言えます。

#### (2) 過負荷に対するロバスト性ならびに過負荷耐量の概念の成立性 [3]

同期回転状態にある HTS-ISM において、最大同期トルクを超える過負荷が与えられても、すべり回転（磁束フロー状態）に遷移して暫時運転状態を継続可能です（過負荷に対するロバスト性）。また、この特性を積極的に利用すれば、電気自動車などで一般に設定される短時間定格と過負荷耐量の概念を取り入れた設計が可能になります。

#### (3) 自律安定性 [4]

Ohm の法則に従う常伝導かご形巻線の抵抗値を単純に小さくした場合、一般には巻線インダクタンスとの関係で決定される回転数以上において回転不安定となり、制御不能になると危惧されます。一方、HTS ロータバーの起磁力依存抵抗を利用することによって回転安定性が保証されることを明らかにし、自律安定性の概念を提唱しました。

以上、高温超伝導材料の非線形電流輸送特性をうまく利用し、高温超伝導輸送機器実現を夢見て日々研究開発を行っています。

## 参考文献

[1] 中村武恒, 超電導 Web21, 2011 年 3 月号 (2011) pp. 13-14

[2] T. Nakamura, et al. Superconductor Science and Technology, vol. 20 (2007) pp. 911-918.

[3] 中村武恒 他, 2011 年度春季低温工学・超電導学会, 2A-a06 (2011)

[4] 中村武恒 他, 2011 年度春季低温工学・超電導学会, 2A-a07 (2011)

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/>  
 家庭内配電システムにおける電力カラーリングとルータの開発

既存の電気エネルギーネットワークに、再生可能エネルギーによる分散電源や蓄電機器を情報通信ネットワークと統合して導入し、高効率で新しいエネルギー供給システムの構築を目指す、いわゆるグリーン ICT (Information and Communication Technology) の研究に注目が集まっている。残念ながら東日本大震災の後の事情から、電力会社の電力供給への信頼度の低下の中で、分散電源の運用に対する議論として喫緊の課題となっている。これまで家庭内の配電は電力会社の管理外に有り、その範囲で HEMS (Home Energy Management System) などの研究において家電機器の制御による省エネ、利便性の確立が試みられてきた。しかしながら、電力会社の電源自体が遮断される可能性はほとんど考慮されず、逆に配電システムを保護するための規制があり、分散電源をコミュニティ等で有機的に運用する自由な発想が実現できない状況にある。

本研究室では総務省・情報通信研究機構 (NICT) の委託研究の一環として、平成 21 年より本学学術情報メディアセンターの岡部寿男教授と共に、家庭内に電力会社からの供給電源、売電可能な PV 電源、売電が規制された燃料電池、そして蓄電池などが共存するシステムを想定し、ICT による新しい電力マネージメント手法を検討している。その中で、電力に電源の由来情報、配電先のアドレス情報などからなるタグを付け (カラーリング) し、これらの情報を物理量である電力 (例えば電圧波形) に通信により直接重畳し、その情報に基づきネットワーク上の分岐点に設置した電力ルータによって負荷の要求に合わせて配電 (ルーティング) する、いわゆる回線切替え型のルーティングを提案している [1, 2]。図 1 に開発した AC ルータの写真を示す。本装置では、電源どうしが直接に接続されないため同期を取る等の制約が無く、電力の質に応じた使い方を可能とする。このような電力ルータは情報通信分野のルータ以上の性能が要求され一層の研究開発が必要となるが、バッファ機能となる蓄電装置を設置によって家庭内の給電に関して同時同量という制約を外すことができるため、家庭内から電力マネージメントにおけるパラダイムシフトへの大きな一歩を提案することになると期待している。

さて、上述の装置の実現可能性が問題となる。このような電力マネージメント機器がこれまでに議論されて来なかった理由の一つに、パワーデバイスの性能がある。従来の Si パワーデバイスでは、同様のルータを開発しても小型化、集積化できず、損失も大きい。そのため、SiC パワーデバイスの開発とその回路実装技術がキーテクノロジーとなる。現在、SiC パワーデバイスの実装に関する研究も、木本恒暢教授、舟木剛教授 (元京都大学、現大阪大学) の協力を得て、京都環境ナノクラスター事業において実施している。

**参考文献** [1] T. Takuno, M. Koyama, and T. Hikihara, In-home Power Distribution Systems by Circuit Switching and Power Packet Dispatching, 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 4-6 Oct. 2010, Maryland, USA. [2] T. Takuno, Y. Kitamori, R. Takahashi, and T. Hikihara, "AC Power Routing System in Home Based on Demand and Supply Utilizing Distributed Power Sources", *Energies*, 4(5), 717-726(2011).

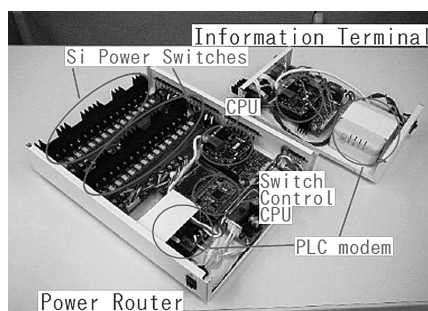


図 1 開発中の電力ルータ

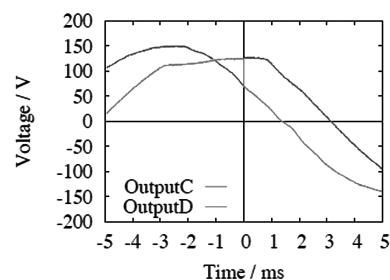


図 2 ルータ出力に見る二電源の切替え波形

## 集積機能工学講座（鈴木研究室）

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

## 「新しい高温超伝導体のトンネル型ジョセフソン接合形成を目指したエピタキシャル薄膜成長」

銅酸化物高温超伝導体は1986年にベドノルツとミュラーらによって発見され、翌年には超伝導転移温度  $T_c$  が液体窒素沸点 77K をはるかに超え、現在最高の  $T_c$  は 135K に達しています。高温超伝導体の種類も 100 以上になりました。その後、 $MgB_2$  系や Fe 系など新しい系の高温超伝導体が発見されましたが、その  $T_c$  はたかだか 39K あるいは 53K と言ったところです。なぜ銅酸化物高温超伝導体の  $T_c$  は群を抜いてこれまでに高いのかその理由は誰もが知りたいところです。

高温超伝導体の  $T_c$  が高いこと、あるいは超伝導が発現する理由はまだ十分分かっていません。従来の金属超伝導体ではその発現機構はわかっているとして良いのですが、それが高温超伝導体にそのまま成り立つとは言えないのです。高温超伝導体の発現機構がわかれば更に高い  $T_c$  を有する物質を発見する糸口が得られることになるので興味深いと同時に大変重要でもあります。

超伝導発現機構を理解するには超伝導状態の物性を明らかにすることが必要ですが、その中でも超伝導エネルギーギャップと準粒子状態密度の詳細を明らかにするトンネル分光は大変重要です。高温超伝導体のトンネル分光はこれまでは走査型トンネル顕微鏡と固有トンネル分光法で信頼性の高いデータが得られてきました。対象となった物質は  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  を代表とする Bi 系高温超伝導体と呼ばれる物質のみと言えます。この物質は清浄な劈開表面が得られることと、結晶構造そのものがトンネル接合になっているために上記のトンネル分光が可能になっています。それ以外の高温超伝導物質では、清浄な表面や界面の形成が困難であり質の高いトンネル分光が可能な接合は得られていないという状態です。

高温超伝導の機構を理解するには個々の物質に依存しない共通する固有の特徴を見出すことが大切です。そこで我々は2つの単結晶を融合させて1個の粒界を有するバイクリスタル基板を用いてその上にバイエピタキシャル成長により新しい物質のトンネル型ジョセフソン接合を形成してトンネル分光実験をすることを考えています。その物質としてこれまでまだエピタキシャル成長がなされていない (Pb, Bi)  $Sr_2(Y, Ca)Cu_2O_{8-y}$  (PbBi1212) という高温超伝導体を選びました。この物質は  $T_c$  は 90K 以上で、トンネル型粒界ジョセフソン接合を形成する可能性が高い物質です。これまで高周波マグネトロンスパッタ法を用いてエピタキシャル成長を検討してきましたが、通常の方法でのエピタキシャル成長は非常に困難でありました。この度 Pb の蒸発を防ぐ工夫を施した高温アニール法によりエピタキシャル成長に近い薄膜を得ることができました。その X 線回折図形と表面状態の SEM 写真を図 1 と図 2 に示します。まだ異相が数% 存在しますがこれを 1000 分の 1 以下まで減らしたトンネル接合の実現を目指しています。

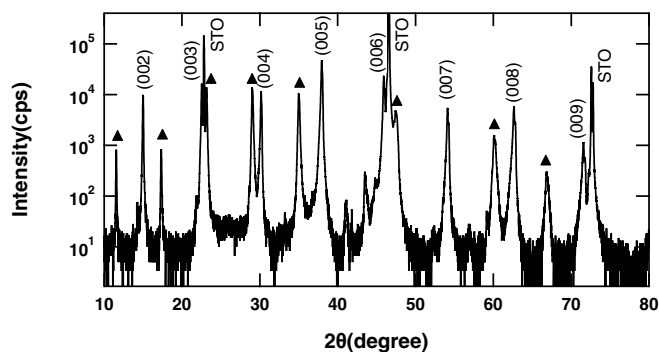


図 1 PbBi1212 薄膜の X 線回折図形

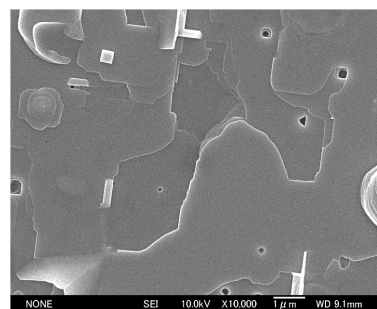


図 2 PbBi1212 薄膜の表面 SEM 写真

## 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)

### 「電界放出微小電子源アレイを用いた真空トランジスタの開発」

現代の微細加工技術を用いて数 $\mu\text{m}$ 以下の大きさの微小電子源を作製し、これを様々な分野に応用しようという研究分野を真空ナノエレクトロニクス (Vacuum Nanoelectronics, VNE) と呼びます。電子源の大きさが極端に小さくなることで、従来では考えられなかった機器が実現する可能性があります。例えば、ディスプレイの一画素よりも小さい電子銃が作れるようになった現在では、各画素に対応した電子銃を置くことで、フラットパネルディスプレイも実現されています。

VNE デバイスでは、電界電子放出という現象を利用して電子を真空中に取り出します。電界電子放出では、従来の真空管が利用していた熱電子放出とは異なり、固体内の電子にエネルギーを与える必要がないため、消費電力を極めて小さくできるという利点があります。また、強電界で電界電子放出をする場合には、放出電流の温度依存性が小さく、放射線等を浴びても電子電流の変化が少ないことが期待されています。これらの特徴を利用した新しいトランジスタや集積回路は古くから考えられてきましたが、実際の研究例は極めて限られていました。

当研究室では、これまで VNE デバイスの開発に取り組んで来ました。苛酷な環境下でも安定な電子電流を得るための陰極材料開発はその主なテーマです。高い融点と高い電気伝導性、強い原子間結合と表面の化学的な安定性が必要とされる条件です。当研究室では窒化物や炭化物に着目し、高温における耐酸化性などの評価も行い、窒化ハフニウム (HfN) を陰極材料の一つの有力な候補としています。

電界電子放出が起こる電界強度を実現するためには、電子を放出する陰極 (エミッタ) の形状を鋭い突起状にします。フォトリソグラフィという技術を利用して先端曲率を  $10\text{ nm} \sim 30\text{ nm}$  程度にします。また、対向電極 (ゲート) を作り込み、電子を集める第3電極 (コレクタ) を設けて3極管とします。エミッタ・ゲート (EC) 間電圧を制御することでコレクタ電流を図1のように制御することができます。当研究室ではこのようなデバイスを「真空トランジスタ」と呼んでいます。

真空トランジスタの特性の一つである、コレクタ特性を図2に示します。横軸はコレクタの電圧、縦軸はコレクタの電流を表します。バイポーラトランジスタのコレクタ特性とよく似た特性が得られています。能動素子としての性能も市販されている一般的な半導体素子に近づいてきました。今後、過酷な条件下での動作について調べていく予定です。

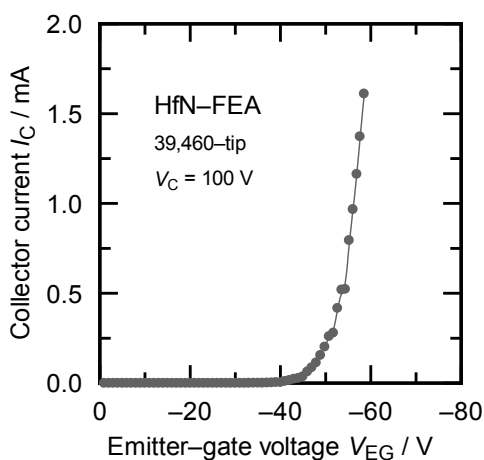


図1 エミッタ・ゲート間電圧とコレクタ電流の関係

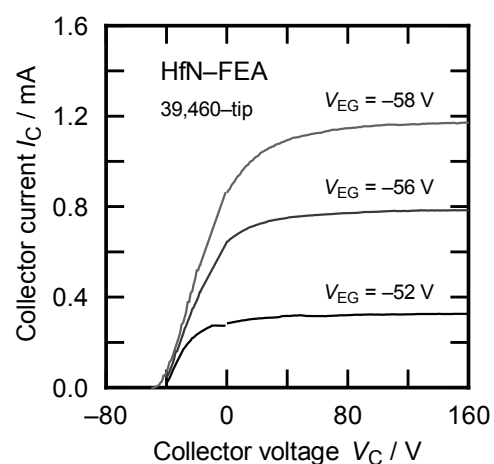


図2 コレクタ電圧電流特性

## 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 結晶中の欠陥低減とキャリア寿命の増大」

変電所等の電力インフラ用変換器には、超高耐圧のパワーデバイスが要求されます。現在は、6kV級のSiサイリスタ等が用いられていますが、変換時の電力損失が大きく、発熱に弱いという問題を抱えています。このような超高耐圧応用では、SiC バイポーラデバイス (PiN ダイオード、サイリスタ、IGBT など) が有望です。このような超高耐圧 SiC バイポーラデバイスにおいて、十分な伝導度変調効果を得るために必要なキャリア寿命は約 3~10  $\mu\text{s}$  と見積もられます。SiC は間接遷移型のバンド構造を有するにも関わらず、従来、報告されているキャリア寿命は 0.5~1  $\mu\text{s}$  と短いことが課題となっていました。本研究室では、最近、(1) 主要なキャリア寿命制限欠陥の同定、(2) キャリア寿命制限欠陥の低減、そして (3) キャリア寿命の大幅な増大に成功しましたので紹介いたします。

まず、キャリア寿命制限欠陥 (ライフタイムキラー) については、様々なドーピング密度、欠陥を含む SiC 結晶のキャリア寿命を測定し、結晶中の拡張欠陥、深い準位 (点欠陥に起因) との相関を調べることによって、伝導帯底から 0.65 eV 低いエネルギー位置に存在する深い準位 ( $Z_{1/2}$  センター) が、SiC における主要なキャリア寿命制限欠陥であることを明らかにしました [1]。

次に、この欠陥 ( $Z_{1/2}$  センター) を低減する手法の確立に取り組みました。この欠陥は熱的に極めて安定で、1600°C 以上の熱処理 (不活性ガス雰囲気) を施しても、ほとんど密度が変化しません。しかしながら、SiC 結晶を熱酸化することにより、この欠陥を大幅に低減できることを見出しました [2]。図 1 に成長直後、および熱酸化処理後に測定した DLTS スペクトルを示します。図に示すように、成長直後には数種類のピーク (欠陥) が観測されますが、熱酸化を施すと、全てのピークが消滅します。熱酸化により結晶表面から欠陥が減少し、その密度を検出限界 ( $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ) 以下に低減できることが分かりました。

図 2 に成長直後および熱酸化後の SiC 結晶で測定した光伝導度減衰カーブを示します [3]。この光伝導度減衰カーブの傾きから、結晶中のキャリア寿命を求めることができます。成長直後の試料では、0.69  $\mu\text{s}$  という典型的なキャリア寿命が得られました。この試料を高温で熱酸化し、形成された酸化膜を除去して測定するとキャリア寿命が大幅に向上し、9.5  $\mu\text{s}$  に達しています。さらに、この試料の表面に酸化膜を堆積し、界面窒化処理を行って表面再結合を抑制すると、キャリア寿命は 13  $\mu\text{s}$  まで向上しました。これは超高耐圧 SiC デバイスの高性能化に十分な値であり、今後のデバイス開発に寄与します。

[1] K. Danno et al., Appl. Phys. Lett. 90 (2007), 202109.

[2] T. Hiyoshi et al., Appl. Phys. Exp. 2 (2009), 041101.

[3] T. Kimoto et al., J. Appl. Phys. 108 (2010), 083721.

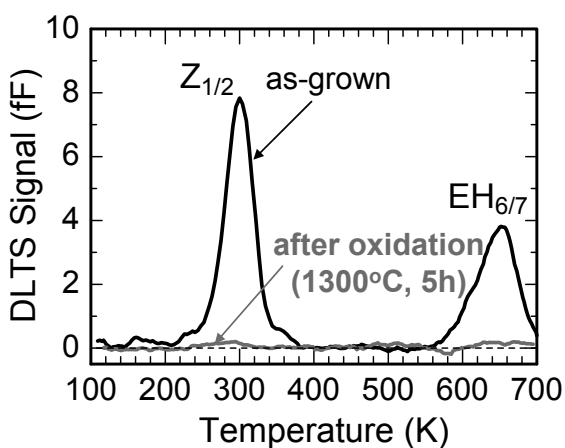


図 1 熱酸化による深い準位の低減 (DLTS)

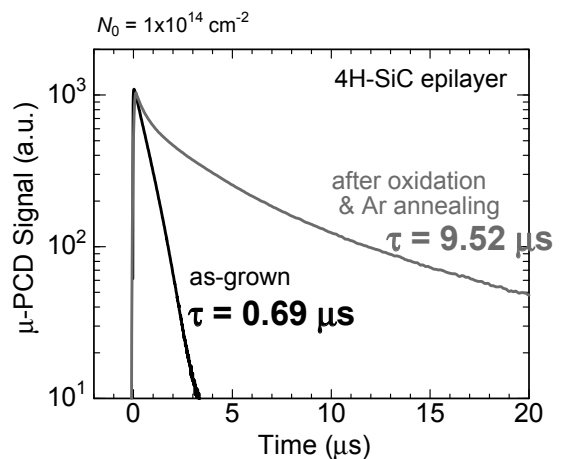


図 2 熱酸化によるキャリア寿命の増大 ( $\mu$ -PCD)

## 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/>

## 「デュアルプローブ近接場光学顕微鏡の開発」

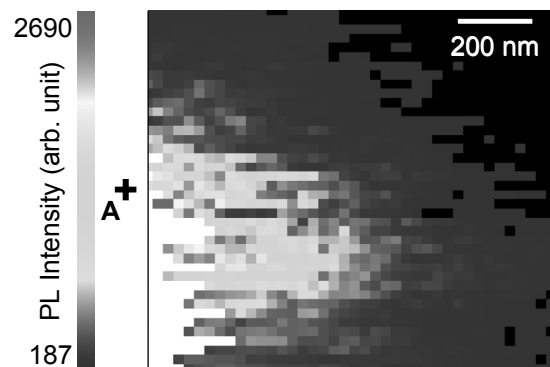
物質中の素励起状態 [励起子ポラリトン, 表面プラズモンポラリトン (SPP) など] は, 物質中を伝播しながら最終的に基底状態に緩和する. この緩和過程が輻射再結合である場合に, 物質からの発光が観察される. 逆に言えば, 物質からの発光過程を理解するためには, 伝播→再結合の過程を解明することが必須である. このような過程を観察することを目的として, デュアルプローブ近接場光学顕微鏡 (DSNOM) を開発した.

従来の SNOM では, 1 本のプローブで光励起あるいは光検出を行っていたため, プローブ開口外への素励起状態の拡散に関する情報は, 遠視野で空間平均として検出されていた. それに対して本装置は, 2 本のプローブを持っており, 一方のプローブで試料を光励起し, 他方のプローブでその周囲を走査して発光を検出するため, 励起プローブの開口外へ拡散した素励起状態について, どの方向に拡散して, どの位置で輻射再結合しているのかを同定することができるという特長をもっている. 装置開発上の問題は, 2 本のプローブと試料の 3 体間の距離の nm スケールでの制御であった. これを解決するために, 二つの変調信号を各々, 試料-プローブ間, プローブ-プローブ間の距離のシア・フォース検出に用いるデュアルバンド変調方式を開発した. これにより, それらの距離を独立に, かつリアルタイムに制御することに成功した. しかも, 本装置では, 従来のシングルプローブ測定と DSNOM 測定のいずれもが可能であり, 両者の比較により, プローブを通して局所的に励起された状態が, 周囲のポテンシャル分布の影響を受けて拡散していく過程を観測することができる.

図は, DSNOM を用いて, InGaN 系量子井戸における励起子の拡散過程を可視化した例である. 励起子による発光の強度分布が励起点 A の周りに同心円状に広がるのではなく, ある特定の方向に広がっていることがわかる. その範囲は 500 nm 程度であり, 光励起された励起子が, その程度の距離を異方的に拡散して輻射再結合していることを示している. スペクトル解析によってポテンシャル分布を調べたところ, そのような強発光領域は, 高いポテンシャルによって囲まれていた. 励起子の拡散が, ポテンシャルバリアによって妨げられていることを示唆している.

ポテンシャル揺らぎは, 励起子の局在を引き起こすことは既に知られていたが, 加えて, 励起子の拡散方向や距離を決定する要因であることが明らかとなった. 開発した DSNOM 技術は, 局所領域のポテンシャルプロファイルと, 素励起状態の拡散および再結合過程の関係を詳細に調べることができるため, 窒化物半導体だけではなく, 金属導波路中の SPP 伝播の観察や量子ドットなど不均一系フォトンクス材料などの評価法としても有用であろうと考えている. 参考: A.

Kaneta, T, Hashimoto, K, Nishimura, M, Funato and Y. Kawakami, *Appl.Phys.Exp.* **3**, 102102 (2010).



DSNOM により観察した InGaN 系量子井戸からの発光の様子. プローブにより A 点で局所光励起し, その周りを別のプローブで光検出した.



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)  
 「ナノ粒子イオンビーム照射による微細加工」

半導体微細加工技術や単一分子操作・計測技術など、ナノメートルサイズ（原子・分子レベル）で扱うことができるナノテクノロジーの開発が急速に展開しつつあります。また、電子やイオンを用いた荷電粒子ビーム技術は、材料プロセス技術や評価分析技術として、様々な分野で用いられています。種類が基本的に1種類の電子に対して、イオンは多種多様なナノ粒子であり、その中で、原子・分子状あるいはクラスター状のイオンビームが注目されています。特に、アルコールや水のような多原子分子イオンビームは、イオンの運動エネルギー、電荷、質量の輸送に加えて、多原子分子を構成する官能基（例えば、アルキル基やヒドロキシル基）特有の化学反応を付与できます。さらに、クラスターイオンビーム照射では、クラスターイオンの運動エネルギーを熱エネルギーに変換でき、照射表面を局部的に加熱できるので、基板温度が室温でも化学反応を促進できます。本稿では、大きさがナノメートルの粒子のエタノールクラスターイオンを基板表面に照射し、従来のウェットプロセスやモノマーイオンビーム照射では得られない表面反応を活用して、シリコン基板表面の微細加工を行いましたので、その結果を紹介いたします。

エタノールを加熱して、数気圧のエタノール蒸気をノズル喉部の小孔を通して真空中に噴射します。このとき、断熱膨張によってエタノール分子の塊状集団、すなわち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は、形状がコーン状のスキマーを通過してイオン化部に導入され、電子衝撃によってイオン化されます。イオン化されたエタノールクラスターイオンは、イオン化部から引き出された後、減速電界法によってサイズ分離されます。サイズ分離されたエタノールクラスターイオンは加速され、ファラデーカップ内に装填された基板に照射されます。生成されたエタノールクラスターのサイズは、ピークサイズが約1500分子で、数百分子から数万分子に分布しています。

図1は、エタノールクラスターイオンをシリコン基板に照射し、形成した線幅が $0.5\mu\text{m}$ ～ $3.0\mu\text{m}$ のラインパターンを示します。エッチングされた深さは $0.3\mu\text{m}$ ～ $0.8\mu\text{m}$ です。エタノール分子の官能基による化学反応によって、室温でもシリコン表面が高効率にエッチングされたと考えています。また、図に示すように、線幅が $0.5\mu\text{m}$ の場合でも、エッジは直線的に形成されており、底部のエッチングされた面は平坦で低損傷であります。クラスターイオン照射特有のラテラルスパッタリング効果や低エネルギー照射効果によると考えています。さらに、図2に示すように、円形や矩形の周期構造のパターンも形成されます。また、マスクパターンによって、凸型や凹型のパターンが形成できます。こうしたナノ粒子イオンビーム照射による微細加工技術は、LSIデバイスや光学デバイスなどの製作に適用でき、有用な材料プロセス技術として注目されています。

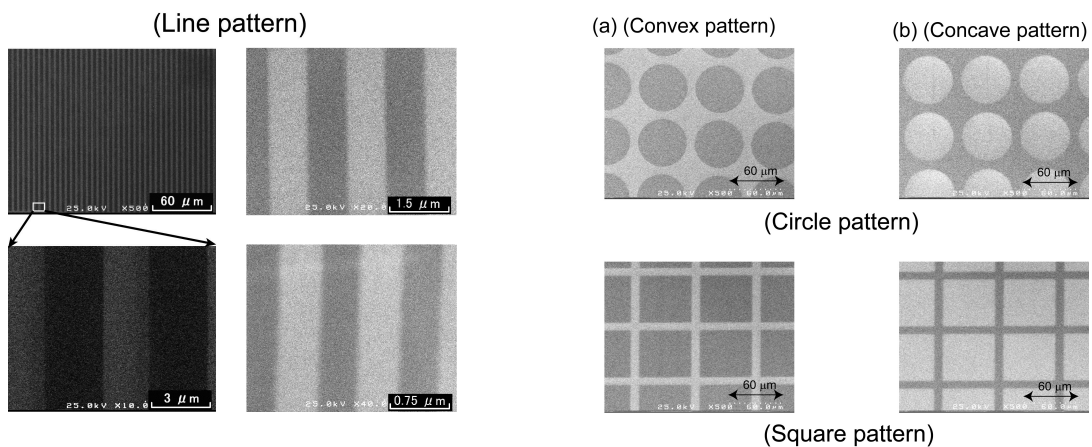


図1 線幅が $0.5\mu\text{m}$ ～ $3.0\mu\text{m}$ のラインパターン (シリコン基板上)

図2 (a) 凸型および (b) 凹型の円形や矩形の周期的構造のパターン (シリコン基板上)

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野（藤田研究室）  
<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html>  
 「環境に優しいものづくり」

環境にやさしいものづくり技術をいわば Green Chemistry というべきであろうか、環境問題への対応が必須である昨今においてますます重要性を増している。とくに太陽電池やリチウムイオン電池など、環境に優しいデバイスを提供しようとする分野や、レアメタルを使わないデバイス創成を目指すような分野では、その要望がきわめて高い。われわれが環境に優しく、レアメタルの使用を代替する酸化物薄膜作製技術として、「ミスト CVD 法」の研究を始めてから数年が経た。この技術は、有機金属を使わない酸化物薄膜作製技術として企業の強い要望のもとに開発を進めたものであるが、実用に至る目途が見えてきた。同時に、「CVD」に限らず「deposition」の技術を含め、有機薄膜など当初念頭に置いていなかったさまざまな薄膜への応用に向けた大きな期待が高まっていることを感じている。

図 1 に成膜技術の概略を示す。有機金属を原料に用いる有機金属成膜技術 (MOCVD) の基本的な考え方は、金属元素をガス状態で供給するために蒸気圧の高い有機金属を用いるということにある。しかし一般に有機金属は可燃性が高く、高価であるという問題点がある。とくに酸化物の作製においては、酸素や水といった原料を酸素源として用いながら、金属元素の原料として有機金属を用いるのでは、装置が複雑化し、大気圧下のプロセスなど不可能である。しかし、何らかの方法で安全な原料をもとにガス状で金属元素を供給することができれば、飛躍的に安全な成膜技術につながる。われわれはその方法として、安全な原料の水またはアルコール溶液に超音波を印加し、得られる霧状の微粒子 (ミスト) をキャリアガスで輸送して成膜するという技術を開発している。この技術は多くの企業の支持を得て、強力な共同研究を行った結果、実用化に一步のところまでくることができた。当初透明導電膜を目指す研究であったが、その後絶縁膜、電池電極、コーティング材、半導体単結晶といったさまざまな分野での応用を目指す要望が寄せられるようになった。さらに有機材料を原料とした「deposition」も興味ある応用分野の展開につながっている。私はこの原稿をいまロサンゼルス国際空港で書いているが、トランジットの時間を利用して米国企業の研究者と会い、共同研究の相談をしてきたばかりである。でもそういう時間を利用してでも相談をしたいと興味を持って下さる方はありがたい限りである。

今回は公開できない内容を含めた故に舌足らずのご報告しかできず申し訳ないところであるが、ニーズをいただければ対応可能なところが多い技術であると考えており、HP に公開した論文をご参考の上でご兄弟からのご示唆をいただけると幸いである。

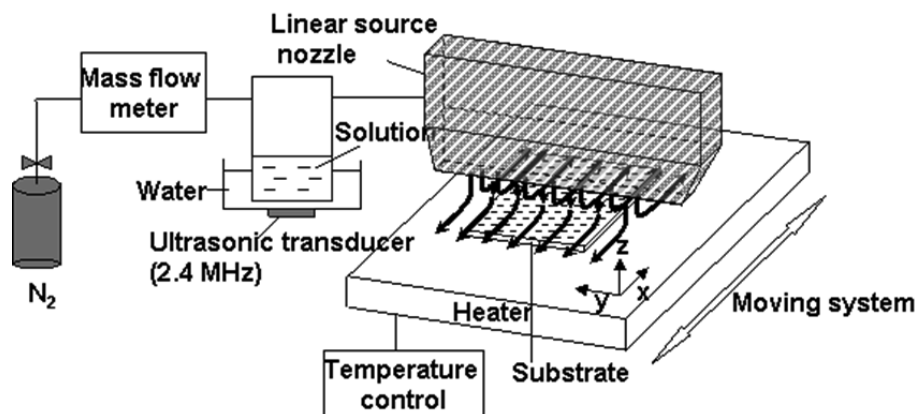


図 1 ミストデポジション法の概略。

## 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/>

## 「ゲーム理論の分散無線リソース制御への応用」

無線通信の利用により、電波が届く範囲であれば有線での配線が難しい場所でも通信を成り立たせることが可能である。これは、電波が様々な方向に放射されるためである。一方で、同一周波数帯で同時に複数の無線通信を行おうとすると、単純には同一チャネル干渉が生じる。この干渉は、複数の無線通信の間の相互作用と捉えることができる。

相互作用を数学的に定式化する方法として、ゲーム理論が知られている。ゲーム理論とは経済学で発展してきた理論であり、端的に言えば「ゲーム」と呼ばれるある種の最適化問題を扱う数学理論である。ゲームの中で最もシンプルな戦略形2人ゲームとは、次式のような問題設定のことを指す。

$$\begin{cases} \max_{x_1} f_1(x_1, x_2) \\ \max_{x_2} f_2(x_1, x_2) \end{cases} \quad (1)$$

片方の式のみであれば単純な最適化問題であり、上の最適化問題は  $x_2$  が与えられた場合に関数  $f_1$  が最大となる変数  $x_1$  を求めるという問題である。ただ、2つの最適化問題が同時に存在するため、下の問題に上の問題の解が影響を与え、更に上の問題の解が下の問題の解にも影響を与える。これが戦略形ゲームで定式化できる相互作用である。

無線通信システムでは、各無線局のスループットや遅延といった通信品質は、自局の送信電力や使用周波数といったパラメータのみならず、干渉により他局のパラメータ設定にも依存する。無線局1と2が存在し、各局のパラメータを  $x_1$  と  $x_2$ 、各局の通信品質を  $f_1$  と  $f_2$  というように表せば、先の最適化問題のような形となることが分かる。従って、電力制御やチャネル割当といった無線リソースを分散的に制御する際に、ゲーム理論を応用することが可能である。これまでに、ポテンシャルゲーム、進化ゲーム、少数派ゲームといった様々なゲームに対する知見を用い、干渉制御のための送信制御手法を提案している [1]。図1は少数派ゲームを応用した送信スケジューリングの結果を表している。複数の無線局からの

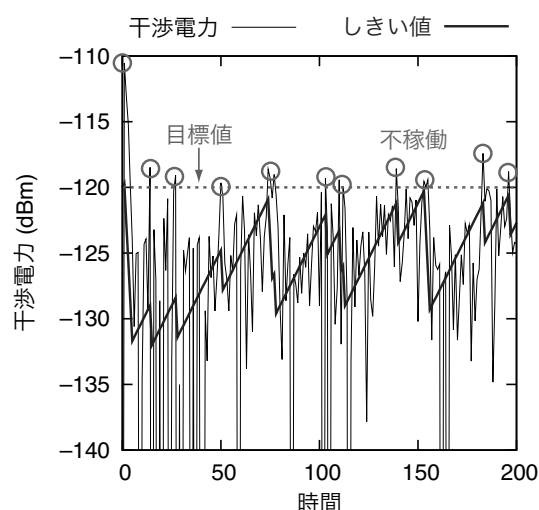


図1 少数派ゲームを応用した送信スケジューリングの結果

の干渉電力を縦軸に取っており、分散制御にも関わらず、定められた目標値以下にほぼ抑えられていることが分かる。

現在、無線通信システムの設計にあたって直面している問題は、単に技術的な問題に留まらない。新しい技術がペイするかという経済的な問題、地上テレビ放送をアナログからデジタルへ切り替えるのに約10年かかるといった社会システム的な問題がある。ゲーム理論は、これらの分野で既に成果を上げており、これらを含めた広い意味での社会インフラシステムの構築に役立つことが期待される。

**参考文献** [1] Y. Saito, K. Yamamoto, H. Murata, S. Yoshida, "Robust interference management to satisfy allowable outage probability using minority game," Proc. IEEE PIMRC 2010, Istanbul, Sept. 2010.

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/>  
 「カバー率 100%を目指す無線 LAN ネットワークの研究」

光ファイバーによる通信回線のブロードバンド化にともない、ユーザー端末とネットワークを接続する無線アクセスネットワークが重要となっています。すでに大学構内、オフィス、家庭内と様々な場所で IEEE 802.11 標準規格の無線 LAN が広く実用化されています。しかし、限られたエリアであっても、100%に近いエリアカバー率を実現するには図1のように無線 LAN 中継システムが必要となります。IP ネットワークとはアクセスポイント (AP: Access Point) で接続され、無線端末局 (STA: Station) とは中継局 (RS: Relay Station) を介して接続されます。単純に中継システムを導入すると無線リソースを多く必要とし、せっきくのブロードバンド環境が損なわれてしまいます。そこで、VoIP (Voice over IP) 等のリアルタイム情報を扱う双方向トラフィックに対して有効なネットワークコーディングという技術を用いてこの問題の対処を図ります。図2はネットワークコーディングの原理を示しています。単純な中継方式では4回のパケット伝送が必要であったものが3回で済むと言う特徴を有しています。従って、この場合には4/3倍にスループットが向上します。さらに図1に書かれている構成の場合、STAに比してAPやRSのパケット送信機会が多くなければ、システム全体のスループットは改善できません。本研究ではランダムアクセス方式である IEEE 802.11 規格を順守しながら、APやRSにSTAと比較してパケット送信機会をより一層優先することにより、システム全体の伝送品質向上を図ることを目指しています。図3にはAPとRSに最適な送信優先権を与える QoS (Quality of Service) 制御を行った時のパケットロス率を示しています。音声伝送では3%のパケットロス率を目安にネットワークが設計されますので、データ通信端末数が増加してきた場合に、QoS 制御が有効に動作していることがわかります。

図1は無線 LAN 中継システムの構成を示しています。IP ネットワークはクラウドで表され、AP (Access Point) が接続されています。AP は RS (Relay Station) と接続されており、RS は STA (Station) と接続されています。VoIP 端末と通常の STA が示されています。

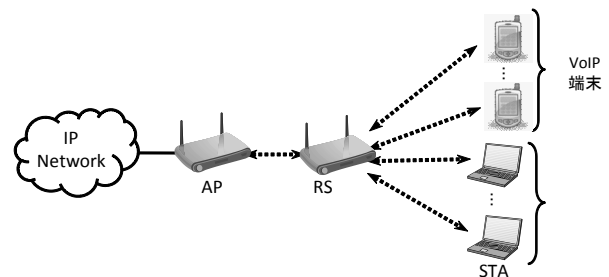


図1 無線 LAN 中継システムの構成

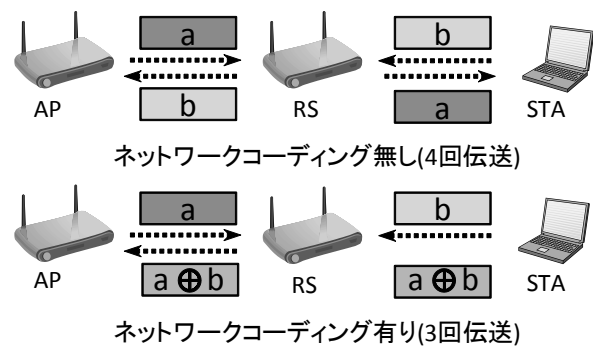


図2 ネットワークコーディングの原理

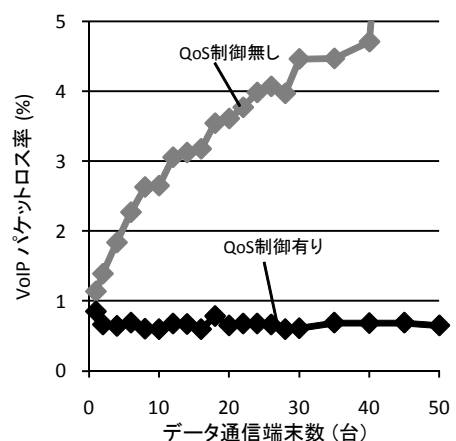


図3 VoIP パケットロス率

参考文献 C. Huang, D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Enhancement of CSMA/CA and network coding in single-relay multi-user wireless networks," IEICE Trans. on Commun. (B), vol.E93-B no.12 pp.3371-3380, Dec. 2010

## 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/>

## 「特性ばらつきを考慮した集積回路設計技術の開発」

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を実現するために、特性ばらつきや劣化の評価と抑制技術の開発に取り組んでいます。本研究では、重要な要素回路であるフリップフロップ (FF) がデバイスの特性ばらつきに対して脆弱であることと、その対策を明らかにしました。

微細化に伴う特性ばらつきの急増は、微細デバイスが抱える本質的な課題です。現在のところ、デバイスの特性ばらつきを考慮するために、すべてのデバイスが最悪特性をとると仮定した最悪値設計が行われています。しかし、微細デバイスのばらつきはランダムな成分が支配的です。そのため、最悪値設計は過度に悲観的な結果になると考えられています。しかし、本研究では、ランダムなばらつきが存在する場合、デジタル回路を構成する重要な要素回路である FF の動作特性は、最悪値設計での想定特性より悪化する事を明らかにしました。例えば65nm プロセスを想定したセットアップ時間のシミュレーションでは、全てのトランジスタ特性が最悪値を取ると考えたスローコーナーでの必要時間より、一部のトランジスタが最良値を取る場合の必要時間の方が88%も長くなります。

チップ内ばらつきに対する脆弱性の原因は、FF 内を信号が伝搬する際の遅延と、FF 内の信号伝搬を制御するクロック信号の遅延にずれが生じるためであることを解明しました。ここで、FF 内のクロックドライバは、低消費電力化のために小さい寸法のトランジスタで構成されています。一方、トランジスタ寸法が小さいと、ランダムなばらつき量は増加します。すなわち、クロック遅延のランダムなばらつきが増加します。そこで、クロックドライバのトランジスタ寸法を大きくすることにより、チップ内ばらつきへの耐性を強化した FF を開発しました。ばらつき耐性を評価するために、開発した各種の FF による分周回路をそれぞれ 270 個チップ上に配置した LSI を 65nm プロセスで試作しました (図 1 参照)。合計 12 個のチップについて、電源電圧 0.7V における各分周回路 (FF) の最高動作周波数を測定しました。図 2 に、標準の FF (STD)、クロックドライバ寸法を 1.5 倍にした FF (CD1.5)、2 倍にした FF (CD2.0) それぞれ 3,240 個の最高動作周波数の分布を示します。STD に比べて、CD1.5 と CD2.0 は特性ばらつきの幅が減少しています。CD1.5 と CD2.0 の特性ばらつきの標準偏差は、STD の 57% と 45% に減少しました。一方、消費電力は STD に比べて 5% と 14% 増加します。従って、実際の設計においては、各 FF のタイミング余裕を考慮して、適切な FF を用いることが重要です。

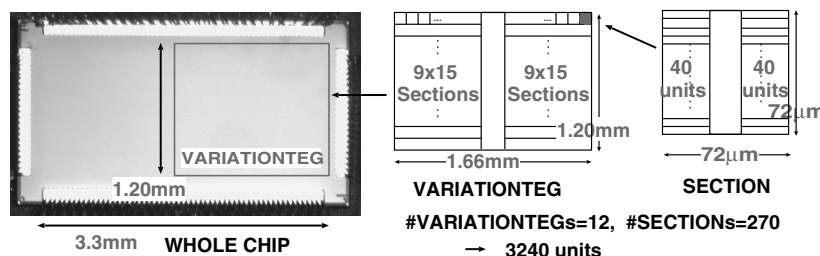


図 1 65nm プロセスで試作した FF 特性ばらつき評価回路

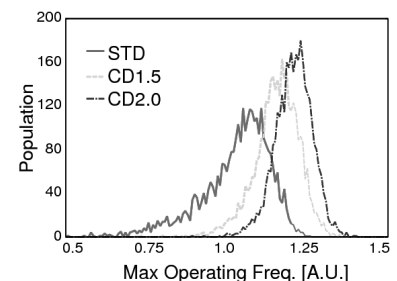


図 2 標準 FF(STD)とばらつき耐性 FF(CD1.5,CD2.0) の最高動作周波数分布

## システム情報論講座 医用工学分野 (松田研究室)

## 「三次元医用画像における構造・力学特性の統合表現法の開発」

近年、内視鏡下手術に代表される先端医療技術の普及とその安全管理、手術時間の短縮と医師の負担減少などが患者と医師の双方のニーズとなっている。CTやMRIなどの撮像機器の進歩により、一人の患者から一回で1000枚程度の大規模な断層画像集合（以下、三次元医用画像）が取得される機会も増加し、診断だけでなく、手術計画や術中ナビゲーションへの利用が期待されている。医用画像のセグメンテーションに代表される画像認識・分類に関する研究により、多くの臓器を解剖学的単位で抽出できるようになりつつある。一方、手術計画や術中ナビゲーションに必要不可欠な人体・臓器の局所構造と力学特性に関する情報は別の枠組みとして扱われてきた。現状では形状・力学モデルの製作に四面体メッシュ形式などに関する工学知識が必要で、かつ、時間も要している。症例データごとに逐次メッシュの制作を必要とする従来の方式は、多忙な医師が数日後に実施する手術をシミュレートするという臨床現場におけるニーズに十分に答えられていない。さらに生体の大部分を占める軟組織に関してはその力学現象の複雑さと計測の困難さ故に、シミュレート対象とすること自体が難しく、力学計算モデルを含めて解決が望まれる研究テーマとなっている。

本研究では、次世代のモデリングフリー手術支援の確立を目指し、三次元医用画像における人体・臓器の局所構造・力学特性の統合表現法の開発を目指している。医師が医用画像を読み込むだけで、モデリングフリーで手術プロセスや術中に生じる力学現象を即座に検討できるワンクリック手術支援シミュレーション環境、及び、そのために必要な次世代の医用画像・力学特性の記述形式について検討している（図1, 2）。また、手術時における内視鏡の位置・姿勢検出装置と連携し、従来の内視鏡映像を拡張する可視化手法、術前計画・術中の手術支援を目指したシステムの構築に取り組んでいる。本枠組みは、手術シミュレーションへの応用を前提として人体・臓器の複雑な力学特性を効果的にモデル化し、かつ、シミュレーションの実施に要する知識・作業コストのハードルを大幅に下げる可能性を持つ。国内多数の機関で開発されている手術シミュレーションの医師による実用を可能にし、臨床現場における普及に大きく貢献できるものと考えられる。日本はCT・MRIの普及率が世界一であり、世界に先駆けて医用画像と構造・力学特性の統合形式を整備することは意義が大きい。泌尿器科、呼吸器外科、胆肝膵移植外科、形成外科、整形外科等との幅広い共同研究実績を持ち、外科医との定期的なディスカッションを通して臨床におけるニーズを抽出しつつ情報学における研究テーマを模索する点、臨床現場への導入を想定した開発・評価を試みる点も本研究の特色の一つである。

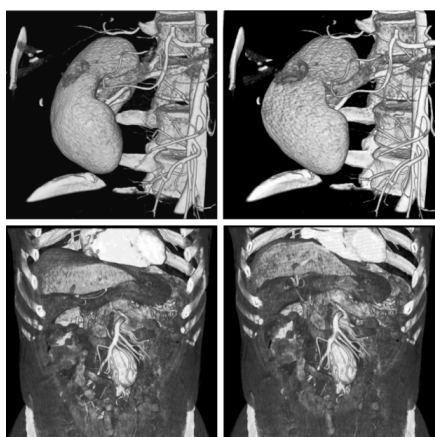


図1. 腎臓・肝臓のボリューム変形

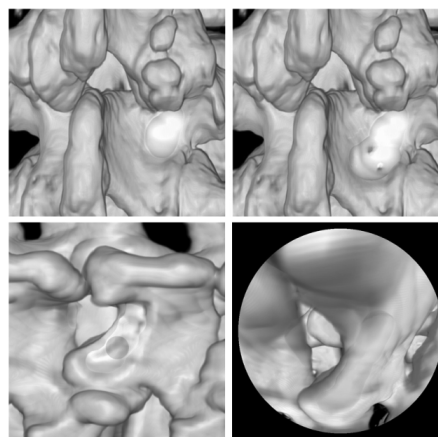


図2. 椎骨のボリューム切削と内視鏡ビュー

参考 URL :

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

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野

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

「携帯情報端末を用いた環境配慮行動の足跡コミュニケーション場」

近年、化石エネルギー資源の枯渇が問題となっており、我々は限りある資源を効率よく利用していく必要がある。家庭部門における個人のエネルギー消費量をみると、第1次オイルショック当時に比べて、現在の人々は2倍以上のエネルギーを消費している。そのため、今後、一人一人がより一層省エネルギー行動などの環境に優しい行動をとる必要がある。省エネルギー行動に限らず、人々が生活の中でとる環境に優しい行動は、環境配慮行動（Pro-Environmental Behavior; PEB）と呼ばれている。

この研究では、スマートフォンのような携帯情報端末とソーシャル・ネットワーキング・サービスを用いて、情報ネットワーク上にコミュニティを構築し、それらを用いて人々が日常生活でできる PEB を促進・継続させることを目標としている。具体的には、情報ネットワークを介して PEB を行ったことを伝え合うゆるくつながったコミュニティ「PEB 足跡コミュニケーション場」を実現するシステムを構築し、本システムを用いて「ゆるいつながり」が PEB 促進・継続に有効であることを示した。

本システムでは、図1に示すように、住居内に設置した数個の Bluetooth ステーションを用いて携帯情報端末を持ったユーザの位置を特定し、携帯情報端末からその場所と時間に合った PEB を推薦する。さらに、ユーザがその PEB を実行した場合、図2のように、そのことを「足跡」として情報ネットワーク上の PEB 足跡コミュニケーション場に送信する。コミュニティに属するユーザはこの PEB 足跡コミュニケーション場を共有することで他のユーザが同じような場所で同じような PEB を実行していると感じる「場所・行動共有感覚」を覚え、社会的促進の効果により PEB 実行を促進することができる。また、この効果を継続させるためにはコミュニティへの継続参加が必要であるが、人は本来、社会への帰属意識を持っている反面、長期における他者との深い関係を避けようとする。そこで、コミュニティに継続して参加させるために、強制感・ストレスの無い「ゆるいつながり」のコミュニケーションを実現している。

このような PEB 足跡コミュニケーション場システムを用いてゆるいつながりの PEB 促進・継続への有効性評価実験を実施した結果、PEB が促進・継続された実験協力者のほとんどが「場所・行動共有感覚」を感じており、「場所・行動共有感覚」が PEB 促進・継続に有効であることが分かった。また、システムを継続して使い続けられた理由を尋ねたところ、「強制感・ストレスの無いコミュニケーション」に関する理由を挙げていた実験協力者が複数名いた。このことから「ゆるいつながり」がシステムの継続利用に有効であり、さらに他者からの影響を受け続けることにより PEB 促進・継続に寄与することが分かった。



図1. ユーザの位置による適切な PEB の推薦

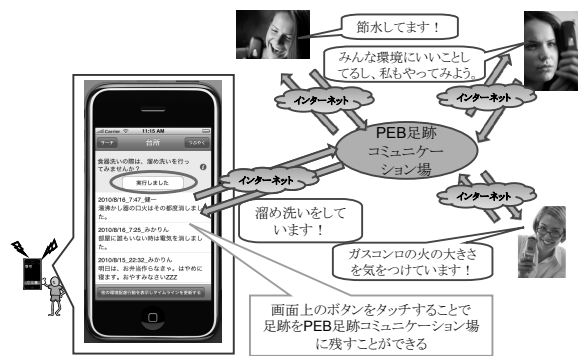


図2. 足跡コミュニケーション場

## エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野（白井研究室）

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

## 「有負荷下自己復帰可能な超電導故障電流限流器」

1. はじめに 近年の電力系統の大規模化・複雑化等により、事故電流増大による遮断器の負担増加、系統安定度低下が懸念されている。超電導限流器を用いる事で事故電流の抑制、事故端電圧維持を実現し、上記のリスクを下げる事が期待できる。

我々はこれまでに単相の巻き戻し構造を持つ変圧器型超電導限流器 (SFCL) を作製し、模擬電力系統で実験を行った。変圧器型 SFCL では、巻き戻し構造を採用することによって、より良好な限流特性とできることを確認している。この SFCL は事故電流が小さい時にはリアクタンス成分で、事故電流が更になると抵抗成分が加わって限流する。これまでの実験により、発電機の出力を安定させる効果を確認し、有負荷下（無電流時間なし）での自己復帰動作（次の事故に備えた待機状態に復帰）を確認している。これらの結果をもとに、現在、高温超電導線材（BSCCO2223）を用いて、三相同軸構造の三相 SFCL を作製（図 1：写真）し、特性試験を進めている。

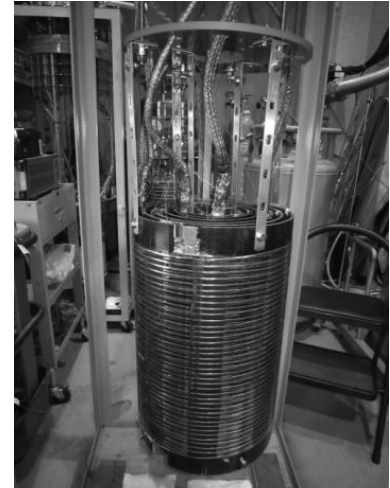


図 1 製作した三相同軸超電導限流器

2. 三相超電導限流器 作製した三相変圧器型 SFCL は、各相二つの巻き戻しソレノイドから成り、同軸の合計 6 つのコイルで構成されている。各相平衡と同時に相間の影響が出来るだけ小さくなるよう巻き数、線材長を決定した。図 2 は限流器の A 相の一次電流に対する限流インピーダンスの変化を示している。インピーダンスは 40A 付近からリアクタンスを主として増加し始め、電流が大きくなると一次コイル抵抗が発生し、その増加に伴い抵抗成分を主とした限流に移っていく。図 3 に限流器を設置した場合と、ない場合の三相通電電流実験結果を示す。大きな限流効果が確認できる。

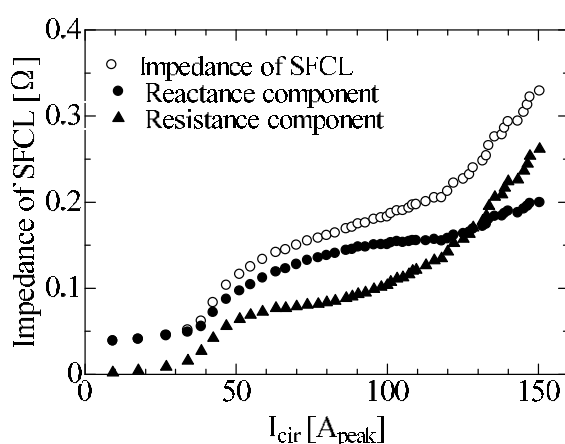


図 2 通電電流に対する限流インピーダンスの変化

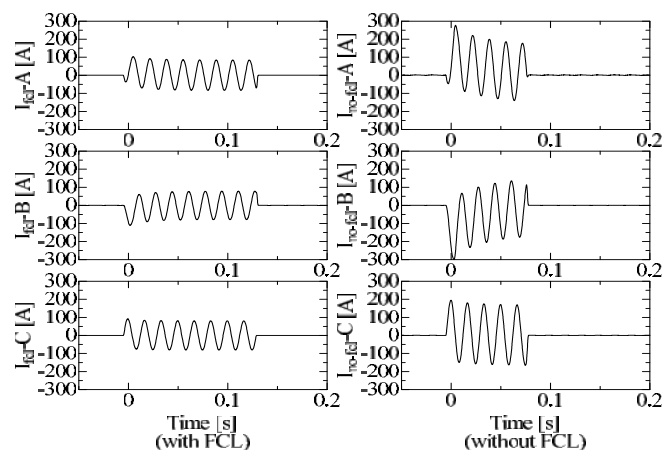


図 3 三相短絡故障時の限流電流と限流器のない場合の事故電流



## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野 (佐野研究室)

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

「ヘリオトロンJにおける少数イオンモードでのイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱の数値解析」

核融合発電を目指す磁場閉じ込め方式のプラズマ研究は国際協力によるITERを中心として各国で進展しています。重水素、三重水素による核融合を考えた場合、反応によって生成される $\alpha$ 粒子の閉じ込めは、プラズマ温度を維持するために重要な課題です。外部磁場のみで閉じ込め磁場を形成する単純なヘリカル系装置においては無衝突領域のリップル損失が存在するため、これを低減する磁場配位を考える必要があります。ヘリオトロンJ装置では5組のコイル電源による電流比制御により、さまざまな配位を作ることができます。磁場成分のうちトロイダル方向の磁場リップルであるバンピネスを変化させICRF加熱を用いて高速粒子を実験的に調べました。ここでのバンピネスの値は $B_{04}/B_{00}$  ( $B_{04}$ がバンピー成分、 $B_{00}$ が平均磁場成分)で表して、規格化平均半径0.67の位置でそれぞれ0.15(高)、0.06(中)、0.01(低)です。

閉じ込め磁場中のイオンは、磁力線の周りを旋回します。そのため磁場と速度のなす角、すなわちピッチ角がイオン軌道を決める重要なパラメータとなります。ヘリオトロンJプラズマでイオン温度が0.2から0.3keV程度の電子サイクロトロン加熱プラズマを用い、ICRFパルス中の少数(水素)イオンの高エネルギー粒子の実効温度(1-7keV)のピッチ角分布の測定結果を図1に示します。計測には中性粒子エネルギー分析装置を用いました。ピッチ角120度付近では明らかな差が分かります。実験で計測可能な範囲に制約があるため、ICRF加熱機構をモデル化したモンテカルロ計算を行い、さらに広いピッチ角での高速粒子の振る舞いと実空間上での粒子分布等を求め、バルクイオンの加熱効率を評価するために必要なモデルの構築を行う必要があります。数値モデルをもとにモンテカルロ法による計算結果を図2に示します。ピッチ角120度付近での依存性は実験と一致しているのが分かります。ヘリオトロンJ磁場は3次元構造を持つため、波動電場、パワー吸収分布の評価にも3次元解析が必要となるため、TASK/WMコードを用いた放電管内の高周波モード解析および吸収分布解析を検討中です。

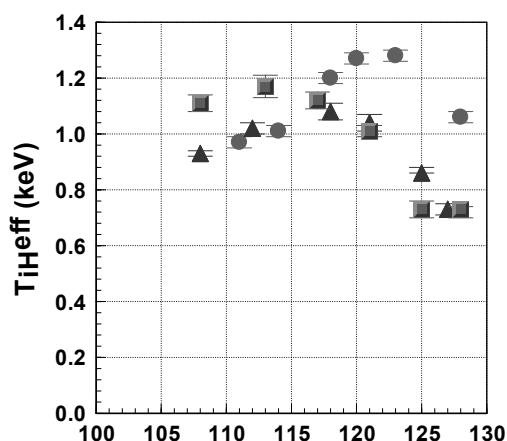


図1 実験で得られた少数イオンの実効温度のピッチ角依存性 (●:高バンピネス、▲:中、■:低)。

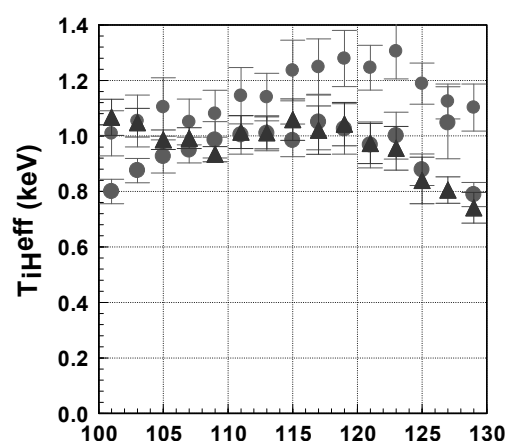


図2 モンテカルロ計算で得られた少数イオンの実効温度のピッチ角依存性。

## 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)

### 「高精度衛星測位データを用いた気象予測システムの構築」

地上 GPS 受信網（国土地理院の GPS 連続観測網：GEONET 等）または低軌道衛星（COSMIC 等）搭載の GPS 受信機を用いて、衛星測位電波の大気伝播遅延による「測位誤差」から水蒸気量等の「大気情報」を得る逆転の発想の大気計測法は「GPS 気象学」とよばれ、いままでに多くの研究成果が生み出されてきました。とりわけ、GPS 測位データに含まれる水蒸気量の情報を気象数値予報モデルに同化すれば、予報精度が格段に向上することが実証され、大変有効であることが分かりました。しかしながら、急激に時間変化する集中豪雨等の場合、前兆現象として現れる水蒸気量の増加ならびに水平分布の変動をリアルタイムで把握することが重要であると考えられますが、現状のデータ同化手法では GPS 測位データを 3 時間ごとに初期値として用いているため、真に水蒸気情報をリアルタイムで活用しているわけではありません。

平成 22 年度よりスタートした地球観測技術等調査研究委託事業「高精度衛星測位データを用いた気象予測システムの構築」では、京都大学をはじめ、国立極地研究所、気象庁気象研究所の 3 機関が連携し、地上型 GPS 気象学の手法により水蒸気量の高度積分値（可降水量：PWV）を優れた時間分解能で連続的に求め、それらを迅速にデータ収集・解析し、データ同化を経ずに数分以内に水蒸気変動特性を提供することで、大気現象の現状監視・予測に活用するシステムを開発することを目指しています。従来の地上型 GPS 気象学の手法では、仰角約 5 度以上に見える総ての GPS 衛星からの電波を用いるため、推定される可降水量は半径約 20km の水平平均値でした。しかし、この水平平均値では直径数 km の局所的降雨には対応できません。そこで、2010 年 9 月に日本版測位衛星として打ち上げられた準天頂衛星「みちびき」がほぼ天頂の方向に長時間連続的に滞在するという特長を利用しようと考えました。準天頂衛星は現在 1 基打ち上げられていますが、仰角 70 度以上に約 8 時間滞在するという特長があります。将来的に 3 基体制となり常にいずれかの衛星がほぼ天頂方向に存在することになります。この衛星を用いることによって可降水量推定の水平分解能を約 1km に改善でき、局所的降雨を捉えることができると考えられます。多数の廉価な一周波受信機を都市域に稠密に展開し、大量の測位データをリアルタイムに収集・解析して、急激な可降水量分布の時空間変動を把握することによって、気象災害を引き起こす局所的集中豪雨等の早期監視への活用を提案します。また、定常気象観測が疎なアジア・アフリカ諸国に適用し、熱帯域で頻発する洪水・干ばつの予測等の災害リスクマネジメントへの国際貢献を図ります。

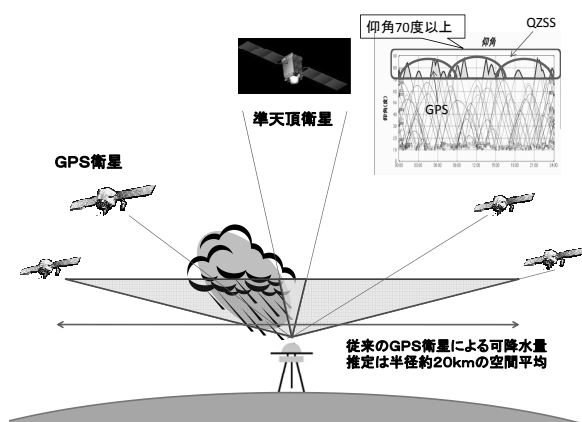


図 1 準天頂衛星の特長を活かした水蒸気水平分布監視システム

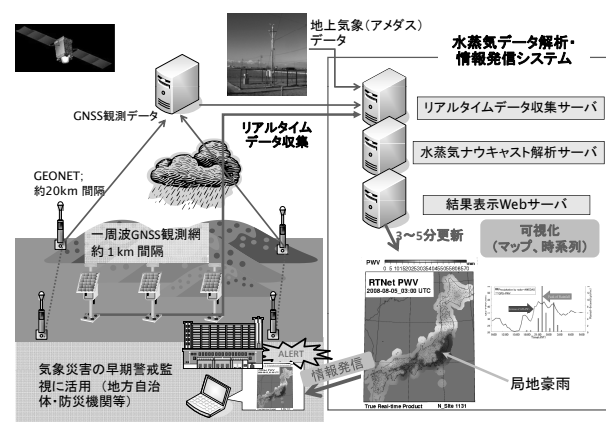


図 2 衛星測位データを用いた気象予測システムの構築

## 情報メディア教育開発部門（小山田研究室）

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

## 「モバイル端末を利用したタイル型表示装置向けインタラクション技術」

近年、スーパーコンピュータから生成される大規模シミュレーションデータから新たな知的発見を導き出すために、大規模データをわかりやすくかつ高度にインタラクティブ操作が可能な可視化技術の研究開発が注目されている。それを受けて可視化技術とネットワーク及び計算機技術が融合した環境整備が極めて重要とされる。さらにタイル型表示装置（TDW, Tiled Display Wall）や没入型表示装置といった大規模表示システムは複数の計算機が連携して動作する大規模な可視化システムとして非常に有用とされる。またこれらは並列データ処理やデータ転送にも用いることができるクラスタコンピュータで構成されており、超高速ネットワークと連携してネットワーク帯域をフルに利用することで高臨場感な可視化表示が可能となる。しかし、これらの要件を満たすためには、可視化技術やデータ転送及び負荷分散、可視化データに対するインタラクション技術が統合された基盤環境が必要とされるが、十分な研究開発の取り組みがなされておらず、実現に至っていない。

本研究室では、スーパーコンピュータ上の大規模かつ複雑なシミュレーションから得られる超大規模非構造データ向け粒子ベースボリュームレンダリング手法（PBVR法）を開発している。さらに生成された可視化結果を、超高速ネットワークを介してTDW等の大規模表示システムに高解像度画像表示を実現する基盤ミドルウェアを開発している。加えて、ユーザからの大規模可視化結果に対するインタラクションを可能とするユーザインタフェースを開発及び実装を行っている。

図1は、本学学術情報メディアセンター南館に設置されている40台のLCDモニターで構成されるTDW（10,240 × 5,120画素）に、大規模口腔流体シミュレーションの結果を表示している様子である。PBVR法を用いることによって、7,200万要素からなる大規模データに対してリアルタイムでの可視化を実現しており、加えて、ユーザはモバイル端末を利用して対話的に可視化パラメータ等の変更を行うことが可能である。

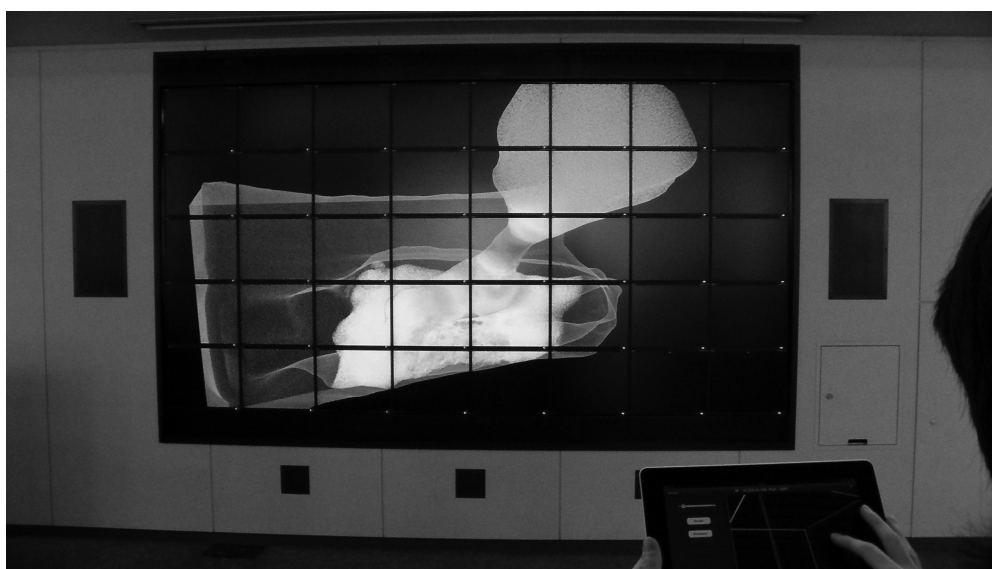


図1 タイル型表示装置上での口腔流体シミュレーションデータの可視化結果。ユーザ（右下）はモバイル端末を使って、物体の回転や可視化パラメータの変更等の操作を対話的に行うことができる。

教育支援システム研究部門 遠隔教育システム研究分野（中村研究室）  
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>  
 「協調的物体認識のためのインタラクション設計」

認識手法の高性能化・計算機処理の高速化の相乗効果から、自動認識の適用可能な範囲がますます広がっている。従来のような高度に統制された環境下だけでなく、より一般的な環境下での画像認識の利用とその高性能化が期待される。しかし、一般環境における高度な自動認識には、様々な条件、例えば、向き・照明・動き・隠れ・個体差などの多様性やそれらの経時的な変化への対応が必要である。特に観測対象や系に人間が含まれている場合、複雑な状況や想定外の事態が多く発生すると考えられるため、それらの対応はより強く求められる。ただし、人間が系に含まれていることは、認識にとって悪い点だけではなく、実は良い点も持ち合わせている。例えば、人間の認識・判断能力をうまく利用する手法や、人間に手伝ってもらうことで認識問題を簡単にする、などが考えられる。

このような背景から、画像認識を行うシステムがある程度の性能を持ち、加えて利用者がシステムに協力できる場合に、その適用範囲をより広くしたり精度をさらに高める方法、また、その際に人間の負荷をできるだけ増やさないようにする枠組みとして、「協調的認識」の検討・提案を行っている（図1）。協調的認識のモデルには人間（利用者）が系に包含されており、従来の自動認識である（A）コンピュータによる検出や認識、に加え、（B）利用者への情報フィードバック、（C）利用者によるシーンの改善や問題自体の変更、を含むループ系が構成される。このループをスムーズに回す、すなわち利用者からの小さな協力で認識精度を大きく改善することを、（B）における利用者への情報フィードバックをうまく設計することで達成する。フィードバックされる情報は大きく分けて、認識の状態・悪状況・状況改善策の三つである。利用者は認識の状態を見ることで自動認識が正しく行われているのか、それとも不安定な状態なのかを知り、後者であった場合には提示されている悪状況を通じて認識を困難にしている原因を把握する。各悪状況にはそれを改善するための状況改善策が併せて提示されており、利用者による協力を支援する役割を果たす。

上記インタラクションモデルに基づいて、机上作業における協調的物体認識の環境構築（図2）、および被験者実験を行ったところ、認識が失敗の状態から正しい認識の状態により高頻度により速く復帰できることが確認された。実用化に対しては、高精度に悪状況の検出や改善策の提案を行うこと、複数の改善策から最適なものを選択すること、利用者のシステム習熟度に応じた提示を行うこと、などの課題が残されているが、人間の活動をうまく助ける仕組みの1つとなることを期待している。

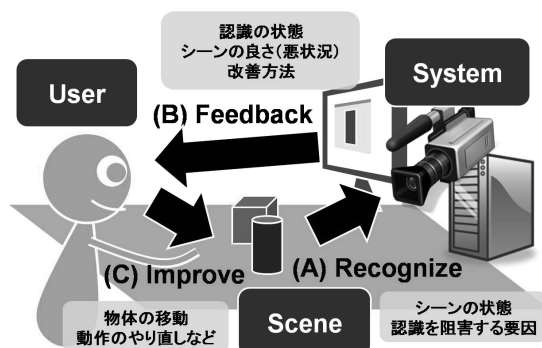


図1 協調的認識のモデル

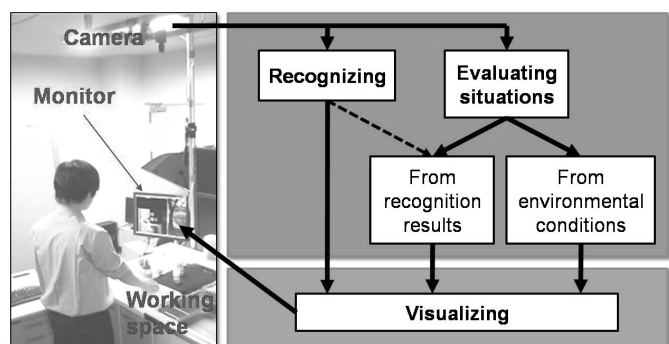


図2 机上作業における協調的物体認識環境