

## 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」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 (荒木研)
- 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野 (島崎研)
- 電磁工学講座 超伝導工学分野 (牟田研)
- 電力工学講座 電力発生伝送工学分野
- 電力工学講座 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 (奥村研) ☆
- 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)

#### 電子物性工学専攻

- 集積機能工学講座 (鈴木研)
- 電子物理学講座 極微真空電子工学分野 (石川研)
- 電子物理学講座 プラズマ物性工学分野 (橋研)
- 機能物性工学講座 半導体物性工学分野 (松波研)
- 機能物性工学講座 電子材料物性工学分野 (松重研)
- 量子工学講座 光材料物性工学分野 (藤田茂研)
- 量子工学講座 光子電子工学分野 (野田研)
- 量子工学講座 量子電磁工学分野 (北野研)

#### 附属イオン工学実験施設

- クラスターイオン工学部門

### 情報学研究科

#### 知能情報学専攻

- 知能メディア講座 言語メディア分野
- 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 (森広研)
- 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 大規模集積回路分野 (小野寺研)
- 集積システム工学講座 情報回路方式論分野 (中村研)
- 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 画像情報システム分野 (英保研)

#### 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

#### エネルギー社会・環境学専攻

- エネルギー社会環境学専攻 エネルギー情報分野 (吉川榮研)
- エネルギー基礎科学専攻
- エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (近藤研)
- エネルギー応用科学専攻
- 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野 (塩津研)
- 応用熱科学講座 エネルギー応用基礎学分野 (野澤研)

### エネルギー理工学研究所

- エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野
- エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野 (吉川潔研)
- エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野 (大引研)
- 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)

### 宙空電波科学研究センター

- 地球電波科学研究部門
- 大気圏光電波計測分野 (津田研)
- 宇宙電波科学研究部門
- 宇宙電波工学分野 (松本研) ☆
- 電波科学シミュレーション分野 (大村研)
- 電波応用工学研究部門
- マイクロ波エネルギー伝送分野 (橋本研)
- レーザーリモートセンシング工学分野 (深尾研)

### 京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (KU-VBL)

### 国際融合創造センター

- 創造部門
- 先進電子材料分野 (藤田静研) §
- 融合部門
- ベンチャー分野 § §

注 § 工学研究科電子物性工学専攻藤田茂研と一体運営

§ § 工学研究科電子物性工学専攻橋研と一体運営

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室）  
 「偏微分方程式の高速並列解法のためのブロック化赤—黒順序付け」

近年、CADシステムなどの普及により、実用的な電気機器、電子機器の設計において電磁界解析に対する数値解析的アプローチの重要性が増しています。電磁界解析における偏微分方程式の境界値問題の数値解析において、偏微分方程式の離散化により大規模連立一次方程式が導かれ、その求解のための計算時間が全体の解析時間の大部分を占めることから、大規模連立一次方程式の高速解法の開発が求められています。また、マイクロプロセッサの発達に伴い、ハイパフォーマンスコンピュータの方式も変化しつつあり、計算機の技術変化に対応したアルゴリズムの開発が重要になっています。偏微分方程式の数値解析から派生する大規模連立一次方程式の高速反復解法として、現在最も広く使われている方法のひとつに不完全コレスキー分解前処理付共役勾配法（ICCG：Incomplete Cholesky Conjugate Gradient法）がありますが、そのアルゴリズムの中に、基本的に逐次的で並列化しにくい前進、後退代入計算が含まれることから、ICCG法の並列化は容易でなく、盛んに研究が行われています。

連立一次方程式の変数の番号付けを変更すると係数行列の形が変化し、並列化の容易さ、収束性が変化します。変数の番号付けをオーダリングと呼び、ICCGの代表的な並列化手法の一つとして並列オーダリングの利用があります。これまでも様々な並列オーダリングが提案されており、たとえば反復法の高い収束性と並列度を同時に実現する優れたオーダリングとして、大きな色数による多色順序付けがあります。我々は、収束性、並列度に加えて、並列化されたアルゴリズムの中の同期点について考慮し、各代入計算の並列実行における同期点の数を1つにし、かつ前述の手法と同程度の高い収束性の得られる並列オーダリングとして、ブロック赤—黒順序付け法を開発しました。本手法は、節点の幾つかをブロック化し、そのブロックに対して赤—黒順序付け法を適用するものです。各プロセッサが幾つかのブロックを担当することにより、代入計算が並列実行されます。ブロックサイズを増加させることにより収束性が改善され、実行計算機のもつ並列度に合わせた最適なブロックサイズを決めることができます。本手法は近年ハイパフォーマンス計算機の主流となっているスカラー並列計算機上での実装において、高い収束性とキャッシュデータの再利用性を持っています。ポアソン方程式の境界値問題に適用し、約100万自由度を持つ差分解析の計算例において、逐次型ICCG法に比べて16CPUで14.3倍の速度向上を達成しています。ブロック化赤—黒順序付け法における節点のブロック分割と色分け、方法の収束性、並列計算の速度向上を図1、2、3に示します。

文献 [1] 岩下武史、島崎眞昭：同期点の少ない並列化ICCG法のためのブロック化赤—黒順序付け、情報処理学会論文誌 第43巻 第4号、893—904, 2002.

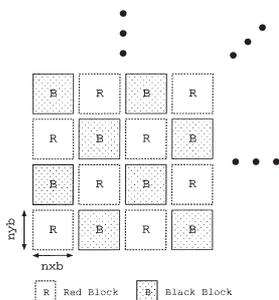


図1 ブロック化赤—黒順序付けにおけるブロック分割と色分け

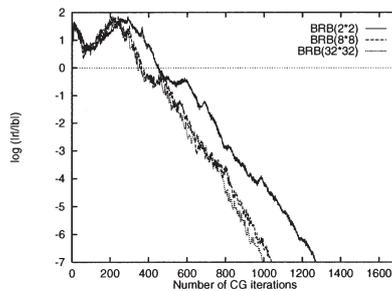


図2 ブロック化赤—黒順序付け法の収束性

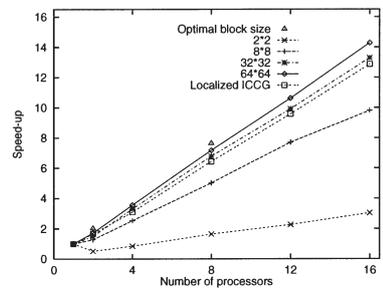


図3 ブロック化赤—黒順序付け法による速度向上

## 電力工学講座 電力発生伝送工学分野

### 「サイリスタ制御直列コンデンサによる軸ねじれ共振の抑制」

サイリスタ制御直列コンデンサ (TCSC) は、図1のようにリアクトルの電流をサイリスタで制御することにより、直列コンデンサの等価的なリアクタンスを変えるものである。送電線のリアクタンスを補償することにより、送電線の輸送能力を向上させるとともに、ループ系統における電力潮流を連続かつ高速に制御する。直列コンデンサで問題となる発電機の軸ねじれ共振 (SSR) の抑制にも効果があり、この性質はTCSCを実系統に適用する上できわめて重要である。本研究室ではTCSCのSSR抑制効果について解析を行ったので、その結果を報告する。

図2は点弧角を変えたとき、発電機の振動に対する電氣的なダンピングトルクを調べたものである。点弧角が $180^\circ$  のときはリアクトルに電流が流れず、振動周波数25Hzあたりに負の急峻なピークが見られる。発電機軸系にはいくつかの固有振動があるが、その周波数が25Hz近傍にあるとSSRが発生する。つぎに点弧角を小さくしていくと $165^\circ$ 、 $160^\circ$ あたりでピーク値が小さくなるのがわかる。 $180^\circ$  のときと比較してかなり小さくなっており、SSRの抑制に効果があることが確認できる。しかしながら、ダンピングトルクは依然として負であり、発電機軸系のダンピングがこれに比べて小さいとSSRが起きる。

図3はサイリスタの点弧角を $165^\circ$  のまわりで軸振動に比例して変化させたときの電氣的なダンピングトルクを示したものである。図より、ゲインを大きくするにしたがって、ダンピングトルクが負から正に変わっていくことがわかる。図4は発電機の軸振動の時間変化をシミュレーションしたものである。ゲインが0、すなわち制御がないときは、軸振動が時間とともに大きくなっていくが、ゲインを1.5にすると減衰するのが観察できる。以上により、適切な点弧角の制御により、SSRを抑制できることが明らかになった。

[1] N. Kakimoto, A. Phongphanphane, "Subsynchronous Resonance Damping Control of Thyristor-Controlled Series Capacitor", IEEE Transactions on Power Delivery, 2003 (掲載予定)

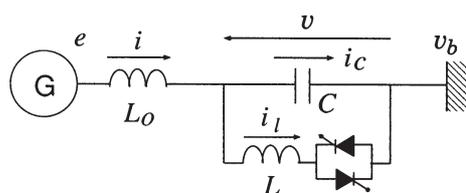


図1 TCSC補償系統

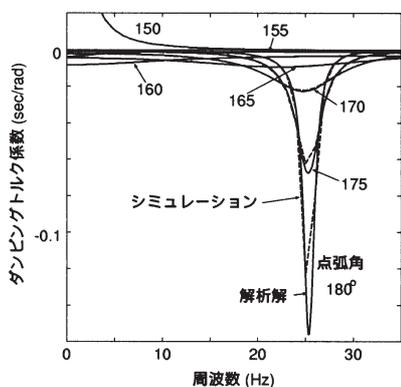


図2 点弧角とダンピングトルク

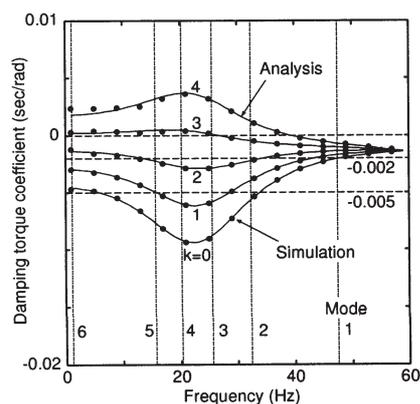


図3 点弧角制御の効果

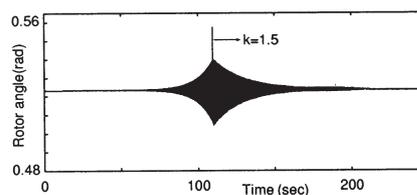


図4 軸振動の時間変化

電工学講座 電力変換制御工学分野 (引原研究室)  
 「実時間DFTによる電力用交直変換器の制御」

電力系統は60Hz若しくは50Hzの一定周波数の交流で運用されています。交流の状態量として位相・周波数及び振幅があり、電力系統においては連系された同期発電機の回転子角・回転速度及び励磁によって自律的に決まっています。「インバータ」という呼称で知られているGTOやIGBT等の半導体素子で構成された静止形電力変換器を交流系統に連系する場合、スイッチ素子のON/OFF及びその位相で入出力電力が定まりますが、変換器自身は発電機における回転子の慣性に相当するものを有していないため、外部より位相情報を与える必要があります。高性能な変換器制御の実現には、位相検出の精度を高くすると同時に、電力系統に接続された様々な機器が発生する高調波や三相不平衡状態に対してもロバストであることが必要となります。このような変換器制御に要求される性能を満たす位相検出方式として、実時間離散フーリエ変換 (DFT) による交流系統電圧の位相検出を提案し、開発を行っています。

我々が提案している制御系のコア部分の処理フローを示したものが図1となります。三相交流では相回転が定義でき、三相各相の成分を相回転と同回転方向の正相成分・逆回転方向の逆相成分・三相で共通な零相成分に分けることができます。正相成分のみの場合が三相平衡状態であり、逆相成分が重畳された場合が不平衡となります。正・逆相成分だけ取り出すためにまずクラーク座標変換により  $\alpha\beta$  相成分を取り出します。逆回転方向の成分は負の周波数成分と等価となるので、 $\alpha\beta$  相成分をフーリエ変換して正・負の周波数成分を抽出することで正・逆相成分を求めます。また、高調波成分に対しても同様に、各高調波の周波数で正・逆回転する成分をフーリエ変換により抽出し、正・逆相成分として求めます。そして、周波数成分毎に変換器電流制御を行う周波数領域での制御演算を行い、実際の変換器出力電圧指令値を時間領域で再合成して出力します。大容量の電力用変換器では、損失低減のためにスイッチング周波数を低くしますが、出力制御可能な周波数成分もその半分以下の周波数しか期待できません。提案方法では制御対象となる状態量を各周波数成分に分解するため、制御対象とする周波数成分を変換器の出力制御可能な領域のみに特定することが可能となります。図2に本制御方式を適用した変換器を、電力用アクティブフィルタとして5次高調波成分の拡大抑制に使用した実験結果を示します。同図から、本制御を適用した高調波補償により高調波拡大量を1/4以下に低減できることが分ります。

なお、我々が提案している変換器制御方式の有効性の検証は、大学内の小規模模擬電力系統モデルを用いた実験だけでなく、電力会社等の所有する大規模電力系統解析シミュレータを用いた実験でも実施しており、産学連携を行っています。

<参考文献>特願2002-224106「自励式変換器の制御方式」

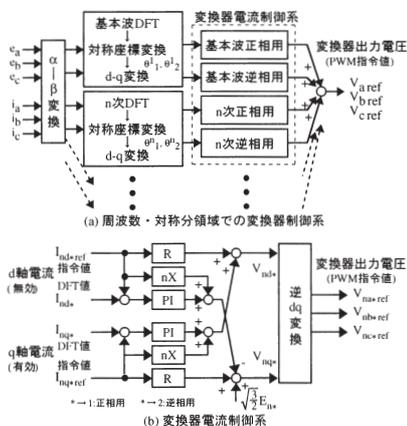


図1 実時間フーリエ変換を適用したインバータ制御系

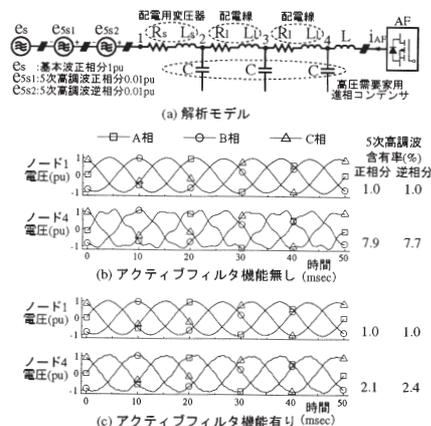


図2 提案制御方式による高調波拡大現象の抑制効果

## 集積機能工学講座（鈴木研究室）

### 「コヒーレント・トンネルデバイスの研究」

古典力学においては、粒子は自分のエネルギーより高い障壁を越えることはできない。一方、量子力学では、自分のエネルギーよりも高い障壁でも越えることが確率的に許され、障壁の厚さが非常に薄くなると、粒子はかなりの割合で（通常0.01%から0.1%）通り抜けることができるようになる。これがトンネル効果と言われる純粋な量子効果である。

トンネル効果はエサキダイオードやジョセフソン素子などへ応用される。最近では走査型トンネル顕微鏡が耳目に新しいが、これもトンネル効果を応用している。トンネル効果を応用したこれまでのデバイスは、電子がトンネルするか否かを検知し、その多寡から機能性を抽出するものである。電子が障壁界面で散乱され、それまで電子が有していた情報を失っても、トンネル電流として検出するかぎり問題はなかった。しかし、トンネルする際に以前の情報を失うということはあまりにも惜しい。電子が情報を失わずに保持したままトンネルすれば、その情報を加味した、新しい機能的なデバイスが可能になる。したがって、電子が情報を保持したトンネル効果を実現することは質的に新しい応用展開が考えられ大変興味深い。電子の有する情報とは、スピンの状態とトンネル方向に垂直な面内における運動量である。スピンと運動量が保持されたままのトンネルをコヒーレント・トンネルと呼ぶことにしているが、このコヒーレント・トンネルを実現することがしたがって大変重要である。このコヒーレント・トンネル効果を利用したコヒーレント・トンネルデバイスは私が着任以来提唱しているもので、私どもの研究室では数年前からこのコヒーレント・トンネルの研究とそのデバイス化の研究を進めている。コヒーレント・トンネルデバイスが実現できれば、たとえば不揮発性高密度高速メモリなどへの応用が可能なスピントンネルデバイスや量子的な重ね合わせ状態を実現するキーデバイスなどが可能であるばかりでなく、その応用の展開は計り知れないものがある。

では、どのような場合にコヒーレント・トンネル効果が起こるのであろうか。実はこの実現が大変難しい。コヒーレント・トンネルにはトンネル障壁の界面が原子の大きさのスケールで平坦であるか、少なくとも幾何学的で周期的であることが要求される。このような障壁界面の形成というものは現在の最先端真空薄膜技術をもってしても実現はおぼつかない。ところが、実はそういう理想的なトンネル接合界面が自然界に存在していることが高温超伝導の研究から4年前に明らかになった [1]。層状結晶構造を有する遷移金属酸化物にはそうしたトンネル接合が自然に含まれているものが存在している。例えば、ビスマス系高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ や巨大磁気抵抗材料と呼ばれるマンガン系酸化物強磁性体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ がそうである。いずれも10年少し前に発見され大変興味を注がれた物質である。高温超伝導体の場合には、理想的なジョセフソン接合となることが確認されている。層状構造マンガン系強磁性体の場合にはコヒーレント・スピントンネル接合が予想されている。このような機能を有する物質は最近集積機能材料と呼ばれるようになった。

私どもの研究室では $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ と $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ のマンガン系強磁性体のエキタキシャル薄膜を形成してコヒーレント・スピントンネルを確認することと、それを用いたコヒーレント・トンネルデバイスの実現へ向けて研究を進めている。これまでに $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ の品質の高いエキタキシャル薄膜が実現している。現在は $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ のエキタキシャル薄膜の成長方位制御に努力しているところである。この研究のキーテクノロジーはエキタキシャル薄膜積層化と考えられる。しかし、その装置購入費がなかなか得られず、ユーティリティなど劣悪な研究環境で苦戦を強いられているが、桂キャンパスに移転すれば少なくとも後者は解決することになっている。

#### 参考文献

- [1] M. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82, 5361 (1999) .

## 電子物理学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

### 「負イオン注入によるナノ超微粒子形成と単電子メモリデバイスへの応用」

21世紀は環境にやさしく、省エネルギーを目指すべき時代と言われています。ところが、コンピュータの消費電力は毎年増え続け省エネルギー政策に逆行しているのが現状です。コンピュータ使用の増加が避けられないとすれば、より省エネルギーの（メモリー）デバイスの開発が急務です。その候補として単電子メモリーがあり極低温で動作するものが研究されていますが、実用的には室温で動作できるものでなければ汎用性がありません。単電子メモリーデバイスの最重要課題は、損傷のない二酸化シリコン超薄膜中の超微粒子（2-3nm径）形成です。イオン注入法は超微粒子元素の注入量、深さ制御が非常に優れているので単電子メモリーの超微粒子形成法として最も期待されている方法ですが、唯一の欠点は正イオンの電荷の帯電によって誘電体が絶縁破壊によって損傷を受けることでした。石川研究室では、絶縁材料表面に帯電がほとんど生じない負イオン注入法を開発しており、この負イオン注入法を用いて二酸化シリコン超薄膜中にナノ超微粒子形成を行い、室温で動作可能な単電子メモリーデバイスを目指そうとしています。

負イオン注入では、負電荷をもつ負イオンを絶縁物に照射したとき、その表面から同じ負電荷をもつ二次電子が放出されるため、表面に電荷がほとんど溜まらず帯電しない特長があります。負イオン注入時の絶縁物の表面電位は負の数eVです。正イオン注入ではイオンの加速電圧（数十kV）まで帯電する可能性があるのに比べると、負イオン注入では桁違いに帯電電圧が低く絶縁膜の絶縁破壊も生じない優れたイオン注入法です。一方、室温で動作する単電子メモリーデバイスを実現するためには、絶縁膜中に形成した超微粒子に室温でクーロンブロッケード現象を生じさせなくてはなりません。そのためには超微粒子に一個の電子が導入されたときの帯電電位が、室温の熱エネルギーより十分高い必要があります。その条件は、超微粒子の静電容量すなわちその大きさが十分小さいことで、直径が数nm以下であることなのです。

図1に、シリコン基板上に熱酸化法で形成した50nmの厚みの二酸化シリコン膜中に、30keVに加速した銀負イオンを $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 注入し、500°Cでアニールした試料の断面TEM写真を示します。銀イオンの注入深さである約25nm付近に、直径3nm程度のナノ超微粒子が整然と数多く形成されていることが分かります。このように、ナノ超微粒子を形成した薄膜の両端に電極を付け室温において電流・電圧特性を測ると、図2のようなステップ状の特性が観測されました。研究室では、さらに、イオンの種類の最適化、アニール処理の最適化、デバイス構造の最適化などを行い、室温動作が可能な単電子メモリーデバイスの開発を進めていく予定です。

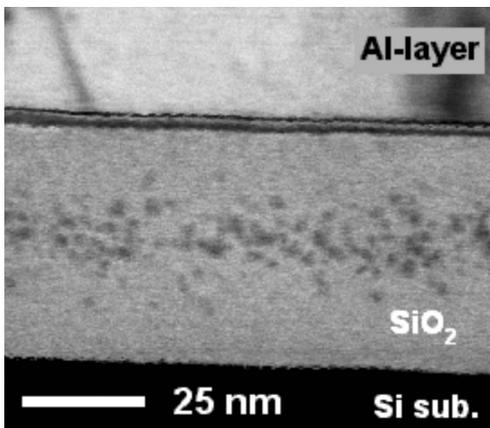


図1 ナノ超微粒子の断面TEM写真

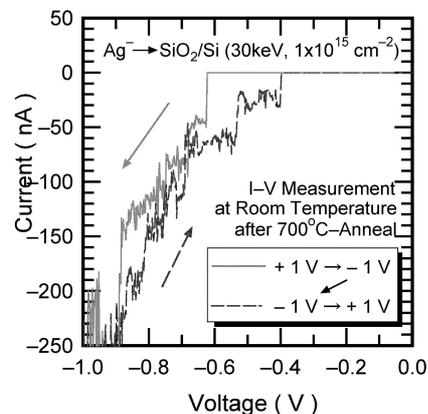


図2 銀超微粒子膜の電流・電圧特性

## 機能物性工学講座 半導体物性工学分野 (松波研究室)

## 「パワー半導体シリコンカーバイドの高品質エピタキシャル成長」

ワイドギャップ半導体シリコンカーバイド (SiC) は、その優れた物性のために、とりわけ大電力を扱うパワーデバイスの分野で、既存のシリコン (Si) 半導体を凌駕する高性能デバイスを実現できると期待されている。SiCは、化学的には同一組成でありながら結晶構造の異なる多型 (ポリタイプ) 現象を示すことでも有名である。ポリタイプ現象は、科学的には興味深いのが、SiCを電子デバイスとして用いるべく結晶成長を行う場合には、異種ポリタイプの混入が問題となる。1987年に我々は、工業的に当時唯一入手可能であった $\{0001\}$ 面に数度のオフ (傾き) を導入することで、異種ポリタイプの混入のない高品質エピタキシャル成長が可能であることを見出した (ステップ制御エピタキシー)。こうして得られた高品質エピタキシャル成長層を用いて作製したショットキーダイオードは、Siを大きく凌駕する高性能を示した。これにより、世界でSiCの電子デバイス応用研究が急速に進展し、現在ではSiCを用いた600V耐圧のショットキーダイオード、ならびにMES型電界効果トランジスタの市販が始まっている。

今後のSiCの発展を考える上で、SiCのエピタキシャル成長には、高品質を保ちつつ高速成長が求められる。例えば、電力系統制御に用いられるパワーデバイスには20kV以上といった高耐圧が要求され、この耐圧を実現するために250  $\mu\text{m}$ 以上もの厚さの超高純度エピタキシャル成長層が必要となる。この要請に対して本研究では、高速成長に適した縦型ホットウォール・タイプの結晶成長装置を導入した。この結晶成長装置により、60  $\mu\text{m}/\text{h}$ という高速成長、あるいは不純物密度 $10^{12}\text{cm}^{-3}$ 台という世界最高水準の高純度層の成長に成功した [1]。これらの成果は、SiCパワーデバイスの電力系統制御のような大電力制御への応用可能性を示している。より実用に近い方面からは、エピタキシャル成長層の膜厚と不純物ドーピング密度の均一性が求められており、この目的に適した横型ホットウォール・タイプの結晶成長装置も導入している。ステップ制御エピタキシー発明当時から用いてきた横型コールドウォール・タイプの結晶成長装置においては、その優れたドーピングの制御性を活かして、1層あたりの膜厚が0.2  $\mu\text{m}$ という多重pn接合を作製できた [2]。このような薄い多重pn接合を用いることで、今後、電子デバイスの特性を飛躍的に向上させる超低損失の超接合デバイス [3] への展開が期待できる。

このように、SiCのエピタキシャル成長技術は目覚ましく進展しているが、その一方で、エピタキシャル成長における諸現象の解明も、大学の重要な役割の一つである。その一例として本稿では、(0001)近傍面 (ほぼオフなし) へのエピタキシャル成長 [4] を取り上げる。SiCは、エピタキシャル成長基板を作製する際の表面研磨工程で入る研磨傷の除去が難しい。最近になって、SiCの研磨技術が向上し、原子レベルで平坦な (研磨傷の見られない) 基板が入手可能となった。こうした原子レベルで平坦な基板に、横型コールドウォール成長装置内で適切な基板前処理を施し、そのまま適切な成長条件・成長プロセスで成長を行うと、0.2度オフ基板 (ほぼオフなし) であっても、異種ポリタイプの混入の見られない、平坦な成長層が得られた。原子間力顕微鏡 (AFM) で見た6H-SiC成長表面を図に示す。表面は原子レベルで平坦であり、均一かつ周期的な単位格子高さのステップが形成されている。とりわけ6H-SiCにおいては、基板の構造欠陥によると思われる表面荒れを除いて基板のほぼ全面で、このように平坦な表面が得られた。しかも、本研究では3.5  $\mu\text{m}/\text{h}$ という実用的な成長速度においても、このように原子レベルで平坦な表面が実現できた。不純物ドーピングを行っても、同様に原子レベルで平坦な表面が得られたので、今後は電子デバイスへの展開が期待できる。

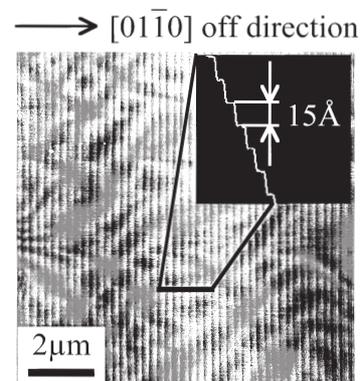


図 成長表面のステップ構造 (AFM像)

[1] K. Fujihira, T. Kimoto, and H. Matsunami: Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 1586-1588.

[2] J. Suda, S. Nakamura, M. Miura, T. Kimoto, and H. Matsunami: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) L40-L42.

[3] 三浦峰生、中村俊一、須田淳、木本恒暢、松波弘之: 平成14年秋季 第63回応用物理学会学術講演会予稿集 25a-P7-12.

[4] 中村俊一、木本恒暢、松波弘之: 平成14年春季 第49回応用物理学関連連合講演会予稿集 28a-ZR-10.

量子工学講座 光材料物性工学分野（藤田茂夫研究室）  
 「近接場光学法による窒化物半導体ナノ構造の発光機構解明」

近年の窒化物半導体の研究進展はめざましく、InGaN量子井戸を活性層とする発光ダイオード（LED）が開発され、カンデラクラスの橙、黄、緑、青、紫色のLEDが実用化されるに至っている。今後、これら発光デバイスへ期待される性能はますます大きくなって行くことが予想される。例えば、LEDの応用範囲を広めるためには効率をさらに高めることが必要であり、蛍光灯の効率が一つの大きな目標となるであろう。

われわれの研究によれば、InGaN活性層からの発光と吸収の間のエネルギーシフトが大きく、発光に関与していると思われる励起子の局在化が観測された。この局在化は、結晶中に自然形成したInリッチな組成揺らぎによって生じたナノサイズのポテンシャルトラップによるものと考えている。このような機構は、励起子やキャリアの活性層面内で生成されてから輻射（発光過程）または非輻射再結合（非発光・発熱過程）するまでの移動距離（拡散距離）を非常に小さくしているものと考えられるため、励起子が貫通転移等の非輻射中心へ捕獲される確率を抑制するように働く。しかし過剰なIn組成不均一は新たな非輻射再結合中心を形成する可能性があり、実際、青緑色より長波長域にて外部量子効率の低下が問題となっている。

このように、励起子再結合の空間・時間分解発光ダイナミクス（図1にその概念図を示す）によってナノスケピックなレベルで発光に関与する局在中心や非輻射再結合中心を同定し、試料の微細構造と発光特性との相関を明らかにすることは、LEDの更なる高量子効率化の糸口を解明するものと期待される。現在までに、InGaN系量子井戸構造の空間マッピング発光測定に関して、カソードルミネッセンス法や近接場光学顕微鏡（SNOM）を用いた顕微分光法による報告が数例ある。これらの報告では、数100nm程度のIn組成揺らぎによって生じた発光波長の不均一を観察しているが、この値は、キャリア・励起子の拡散長に起因した分解能の限界によるものと考えられる。これまでのSNOMによる測定で多くの場合に問題であったのは、光励起はファイバー先端に開けた微小開口から行いフォトルミネッセンス（PL）測定はファーフィールドで行うために、微小領域を光励起しても拡散によって広がった空間領域からの発光を測定してしまう点であった。これに対して光励起とPLプロービングを同一の微小開口 [イルミネーション-コレクションモード (ILモード)] で行えば、拡散長に律速されず、微小開口を小さくすればいくらかでも小さい空間からの発光を観測することができる。しかしながら、高スループットのファイバープローブを設計・加工することが困難なために、特に可視短波長から紫外域では非常に困難な技術であった。

当研究室では、近年、関連企業との共同研究によって短波長域のSNOM技術を開発し、世界で初めてILモードでInGaN量子構造の空間分解PL測定（空間分解能：100nm）[Jpn. J. Appl. Phys. 40, 110, (2000)] に成功した。またごく最近、空間分解能：30nmの定常（CW）PL測定と、空間分解能：300nmでの時間分解PL測定を行い、キャリア・励起子の再結合の空間・時間ダイナミクスに関してより詳細な知見 [Appl. Phys. Lett. (2002) in press] を得るに至っている。図2に測定の一例を示す。局在に伴う発光強度の分布と、それを裏付ける発光再結合寿命のラインスキャン結果が得られている。

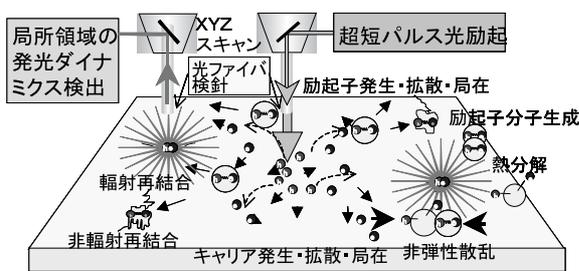


図1 空間・時間・波長分解スペクトロスコピーの概念図

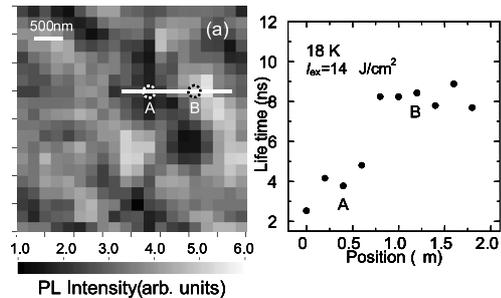


図2 (a) SNOM-PLマッピングと (b) 近接場時間分解PLによる発光寿命

## クラスターイオン工学部門

### 「液体多原子イオンビームの生成と照射効果の研究」

#### 1. 研究の背景

近年のエレクトロニクスデバイスの高集積化・超微細化に伴い、それを構成する材料の表面・界面の特性はデバイスの特性に大きな影響を及ぼしています。このような超微細領域の表面・界面の特性を制御するナノプロセス技術として、イオンビーム技術は様々な工学応用分野で用いられています。その中で、種々の材料のイオンを生成する場合、これまでは主に固体材料や気体材料がイオン発生源のソース材料として用いられており、液体材料は検討されていませんでした。液体材料をソース材料として利用する方法は、固体材料と違って流体であるため連続的に供給でき、さらに流量制御ができる特徴があります。また、液体物質には、有機化合物のように、多種・多様の構造や化学的性質を有した物質が存在します。したがって、種々の異なる化学的性質をもつ液体物質を用いることによって、例えば、固体表面の親・疎水性や潤滑性などの制御や付加・置換反応による表面改質を行うことができます。さらに、多原子で構成された液体分子イオンを加速・照射することによって、固体表面衝突時に液体特有の流動性やイオンの運動エネルギーを活用した表面平坦化などの新しい表面加工法が期待できます。当研究室では、種々の化学的性質を持った液体有機化合物を用いて、液体多原子イオンビームの生成およびイオン照射による固体表面改質をナノレベルで行い、電子・光学デバイスへの応用を行うことを目的として研究を行っています。

#### 2. 研究内容

アルコール系やパラフィン系の液体多原子イオンビーム生成装置の開発を行い、それぞれのイオンビーム特性を明らかにしました。図1は、エタノールを電子衝撃によってイオン化して引き出した後、直交電磁界 (ExB) によって質量分離したイオンビームの強度を示します。水酸基やアルキル基を持ったイオンビームが得られているのが分かります。一方、パラフィン系の液体材料としてオクタンを用いた場合のイオンビームの質量分離特性を図2に示します。種々のアルキル基を持ったイオンビームが得られているのが分かります。これらの質量分離した種々のイオンビームをシリコンやポリカーボネートなどの基板表面に照射し、照射表面の親水性や疎水性を調べた結果、イオン照射によって形成される欠陥や水酸基の増大によって表面の親水性が増大し、アルキル基の増大によって疎水性が増大することが分かりました。

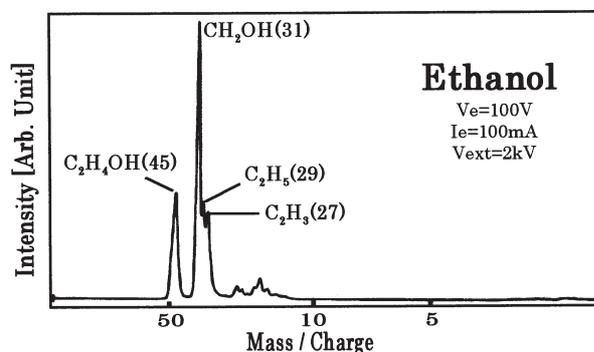


図1 エタノールイオンの質量分離特性

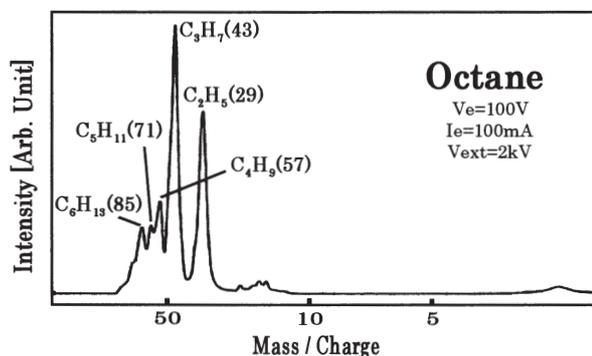


図2 オクタンイオンの質量分離特性

知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研究室)

「装着型アクティブ・ビジョンセンサによる3次元注視対象の検出」

1. 背景

本研究では、視線測定装置とコンピュータ制御可能な2台の首振りカメラで構成される装着型アクティブ・ビジョンセンサを開発した。このセンサを使えば、システムが装着者と視点を共有することができ、装着者が注視している対象の3次元位置や形状を認識することができる【1】。

2. 研究成果

開発したセンサを図1、図2に示す。視線測定装置としては、非接触型で、瞳孔/角膜反射法を実装したNac製EMR-8を用い、右眼の視線情報を獲得する。カメラは、コンピュータ制御によって、パン(水平回転角度±30°)、チルト(垂直回転角度±15°)方向に、カメラの撮像系全体を物理的に回転することができる。

視線測定装置で検出された、装着者の右眼の視線情報と2台のカメラでそれぞれ撮影された画像が計算機に入力される(図2)。装着者の右眼の視線情報は、右カメラで撮影した画像に重ね書きされるようになっている。

この重ね書きを実現するために、EMR-8には、右眼球の回転中心を原点とする視線角度座標系と右カメラのカメラ座標系とを、同一平面上の点を用いてキャリブレーションするアルゴリズムが提供されている。しかし、このアルゴリズムでは、「装着者から校正に用いる点が存在する面までの距離はそれほど遠くなく、かつ、装着者が見ている点は、常に、その面上に存在する」ことを前提としている。このため、見ている対象までの距離が変化するような日常生活環境下では、画像上に重ね書きされる点は、装着者が実際に見ている点から大きくずれるという問題が生じる。

この問題を解決するために、本研究では、2台のカメラによってステレオ視を実現させることによって、見ている点までの奥行きを算出し、その奥行きに応じて、重ね書きする点を補正する自動キャリブレーションアルゴリズムを考案した。この補正により、見ている点の奥行きが変わるような現実的な環境下でも、正確にその視線情報および注視点の3次元位置を検出することが可能になった。

装着者からの奥行きが1.7mである平面上の点を用いて視線角度座標系と右カメラのカメラ座標系とを校正し、次に、装着者から平面までの奥行きを1.7mから5.7mまで0.5mずつ順に移動させ、提案手法による補正を行わない場合と行った場合とで視線検出精度を評価した(図3)。この結果、提案手法による補正の妥当性とその有効性が確認されている。

また、このセンサによって得られる装着者の視線情報から、その人が注視しているかどうかを計算機が判断し、3次元シーン中の注視している領域を平面凸多角形として抽出し、その3次元情報を獲得する手法を考案した。

参考文献

【1】 杉本晃宏、中山章弘、松山隆司：視線情報とステレオ視を用いた注視領域の抽出、ヒューマンインタフェースシンポジウム、pp.441-444, 2001.9

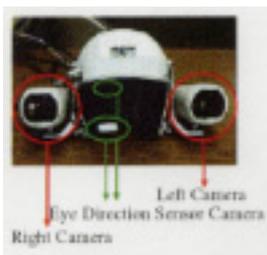


図1 センサのヘッド部

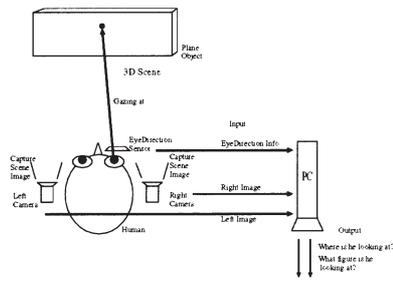


図2 装着型アクティブ・ビジョンセンサの構成

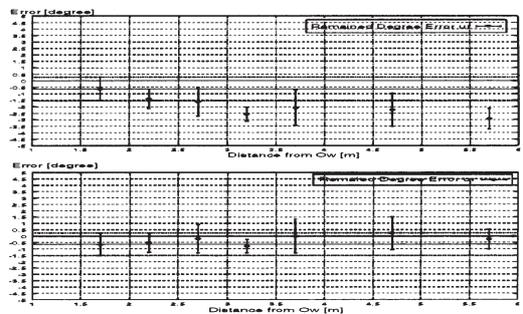


図3 検出された注視点の誤差 (上) 補正しない場合 (下) 補正した場合 横軸：奥行き距離 縦軸：誤差

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室） 「マルチホップ接続によるCDMAセルラシステムの特性改善」

近年、情報のマルチメディア化に伴い無線通信の伝送速度は飛躍的に伸びている。実用化が始まった第3世代移動通信システムIMT-2000の無線伝送方式W-CDMAでは、従来の約40倍の速度を実現しており、今後さらなる高速化が計画されている。一方、速度の向上は送信電力の増大を伴うが、端末の最大送信電力には限りがある。従って、より高速の通信を実現するには、現在500m～1kmといわれる基地局の間隔をより短くする必要がある。また、現在のセルラシステムにおいては端末と基地局との間は直接接続を行うことが原則である。従って、端末と基地局の間に建物などの障害物がある場合や地下鉄構内など、基地局からの電波が通じない場所では通信が困難となる。

本研究では、既存のセルラシステムが持つこれらの問題を根本的に解決する一つの手段として、端末間のマルチホップ接続（今回は2ホップ）通信を提案している。基地局との間の伝搬損が極めて大きな端末は、近くの別の端末に中継を依頼し、その中継端末を介して基地局と通信を行うことによって、総送信電力の低減が見込める。この中継に用いる周波数としては、利用効率の観点から既に使用している周波数帯を利用することが望ましい。しかし、無計画な周波数再利用は既存の通信に深刻な干渉を与える可能性がある。また、CDMAセルラシステムにおいては干渉電力がユーザ容量に反比例する特性を持つため、送信電力を低減できたとしても干渉の増加によってユーザ容量が減少する可能性があり、これを避ける必要がある。

図1のように、基地局と端末間に2ホップの中継接続を行った場合、セル内で基地局が受ける干渉は端末と中継端末間の通信の分だけ増加してしまう。しかし、他のセルの基地局に与える干渉電力は適切な経路を選択することで減少させることが可能である。提案方式においては、端末から基地局に至る経路として、中継端末を含む各区間の送信電力の総和が最小となる経路を選択することにより、隣接セルへの干渉を低減できること、そしてその結果、セル内からの干渉電力とセル外からの干渉電力の和、すなわち総干渉電力を2割程度削減できることを確認した。この環境下における上りリンクでの送信電力を図2に示す。端末の送信電力は直接接続時に比べて10分の1以下になることが確認された。現在、さらに中継段数を増やした場合等について研究を進めている。

（参考文献）

山本高至、村田 英一、吉田 進、他、“移動局間中継導入によるDS-CDMAセルラシステムの容量および送信電力に関する検討,” 信学技報、RCS2002-20, pp. 15-20, Apr. 2002.

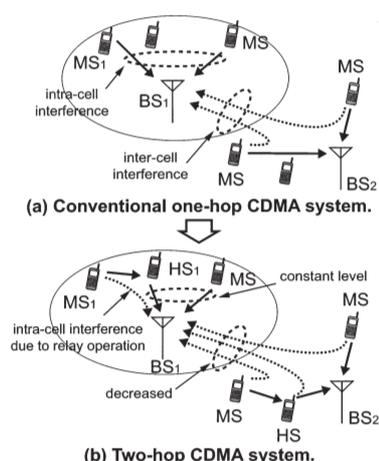


図1 上りリンク干渉電力の変化

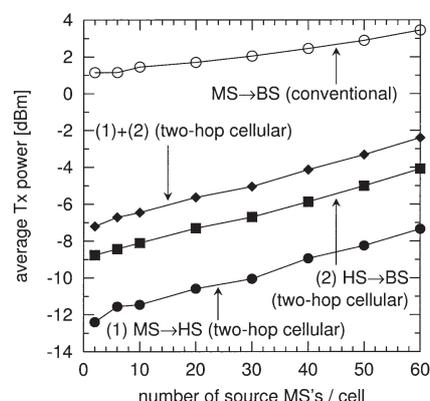


図2 上りリンク平均送信電力特性  
MS：移動機、HS：中継端末、BS：基地局

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）  
 「C言語を用いたハードウェアソフトウェア協調設計」

集積回路の集積度は、2年3倍という「ムーアの法則」にしたがって、上昇してきている。すでに、1つのLSI上に1億個ものトランジスタを集積したLSIも出現している。このような大量のトランジスタを効率よく設計するためには、計算機が必須であり、計算機の発達がLSIの発展を生み、さらにそのLSIが計算機を発達させるという好循環を産み出している。現在の計算機とCADを用いれば、世界初のプロセッサである4004を設計するのは、学生実験程度の簡単な演習となる。

計算機の処理能力の発達により、順調にその設計効率をあげているようにも見えるが、設計生産性は2年3倍には上がっておらず、設計能力と、生産能力の差は年々開く一方である。デジタル回路の設計においては、初期のトランジスタレベルの設計から、ゲートレベル、ハードウェア記述言語を用いたRTL (Register Transfer Level) での設計と、その抽象度を上げてきた。RTL設計では、設計者はレジスタと呼ばれる記憶素子をクロック毎にどのように動作させるかを言語により記述し、レジスタ間の論理は論理合成により自動的に回路を得る。現在の大規模なLSIでは、このRTLの記述量も、もはや人間の手におえない程度まで肥大化しており、更なる設計の抽象化が求められている。

設計の抽象度をあげるために、ソフトウェアの設計に用いられているC言語をハードウェアの設計に利用しようとする動きが近年活発である。我々の研究室では、SystemCと呼ばれるC++のクラスライブラリとして実装された「システムレベル記述言語」を実際のLSIの設計に応用するための研究を行っている。手始めとして、SystemCの動作レベルの記述からの回路合成に、シャープ株式会社の開発した「Bach処理系」を利用した。動作レベルとは、RTLと異なり、クロックの概念のない記述であり、動作合成では、その記述の各処理をどのクロックサイクルで行うか、各処理をどのように演算器に対応させるか等を行う。提案手法は、SystemCにより、ハードウェアとソフトウェアを同じ言語処理系で記述できるために、検証が非常に容易である。図1に、提案手法の設計フローを示す。

携帯機器向けの動画圧縮規格として、近年注目を浴びているMPEG-4の設計を提案手法を用いて行った。WS、PC上のMPEG-4のソフトウェアのうち、ボトルネックとなっている部分を専用ハードウェアに置き換えることにより、スペックを満たすシステムの設計を行った。MPEG-4の処理において、もっとも処理量が多いのが、DCT（離散コサイン変換）である、このDCTのC言語によるソフトウェア記述を、ハードウェア向きに変更し、Bachにより動作合成を行った。図2にSystemCによるDCTの記述例を示す。この一連の設計をわずか1人月により行うことができ、提案手法の有効性を示すことができた。

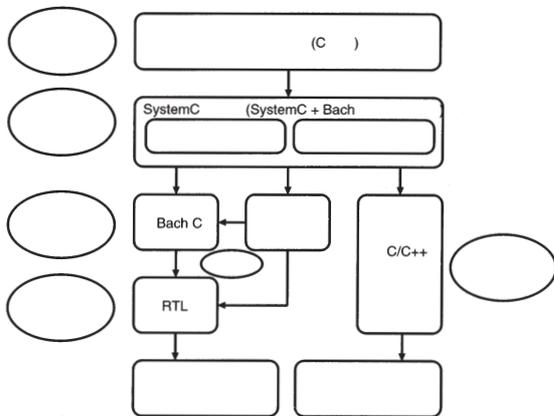


図1 提案する設計フロー

```
void dct::entry(){
    sc_int<18> tmp0, tmp1, tmp2, tmp3;
    sc_int<18> tmp4, tmp5, tmp6, tmp7;
    sc_int<18> tmp10, tmp11, tmp12, tmp13;
    sc_uint<6> ctr; sc_uint<8> i; sc_int<16> data[64];
    while(true){ /** データ転送 **/
        for(i = 0; i < 64; i++){
            data[i] = receive(dct_in);
        }
        /** DCT処理 (C記述を再利用) **/
        for (ctr = 0; ctr < 8; ctr++) {
            tmp0 = data[0+8*ctr] + data[7+8*ctr];
            tmp7 = data[0+8*ctr] - data[7+8*ctr];
            tmp1 = data[1+8*ctr] + data[6+8*ctr];
            tmp6 = data[1+8*ctr] - data[6+8*ctr];
            tmp2 = data[2+8*ctr] + data[5+8*ctr];
            tmp5 = data[2+8*ctr] - data[5+8*ctr];
            tmp3 = data[3+8*ctr] + data[4+8*ctr];
            tmp4 = data[3+8*ctr] - data[4+8*ctr];
            ... <中略> ...
        }
        for(i = 0; i < 64; i++){
            send(dct_out, (TYPE)data[i]);
        }
    }
}
```

図2 DCTモジュールのSystemC記述例

## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室） 「生体情報シミュレーション」

### 1. 研究の背景

当研究室では、今年度より生体情報のシミュレーションに関する研究を行っている。近年、細胞内部の微細構造であるイオンチャネルやポンプ等の機能が急速に解明されており、従来定性的にしか把握されていなかったそれらの機能が定量的にモデル化されるようになってきている。当研究室では、心筋細胞の精密な数理モデルの研究を行っている医学部生理学教室と共同で、生体組織、特に心臓の機能をモデル化してシミュレートする研究を進めている。

生体組織のシミュレーションに関する研究は、世界的にも緒についたばかりであり、アメリカ、ニュージーランドなどで全身の臓器に関するシミュレーションのプロジェクトが計画されはじめたところである。特にアメリカのプロジェクトはポストゲノム計画として、フィジオーム（Physiome）プロジェクトと称して大規模に研究が進められようとしている。

このような生体機能のシミュレーションは、機能や構造の最適性などが理解されていない生体組織の機能を解明するツールとなるばかりでなく、薬物に対する反応を評価できるため、創薬支援などに応用できると期待されている。また、医師が治療方針を決定する際に、投薬の影響をシミュレートできるため、患者一人一人に合わせた投薬計画をたてることが可能であり、オーダーメイド医療の強力なツールとなることが期待されている。

### 2. 心臓シミュレーション

当研究室では、心臓を対象として、臓器全体の運動機能を再現するシミュレーションモデルの構築を行っている。

心筋細胞を含む一般の細胞には、細胞膜上に各種のイオンチャネルやポンプと呼ばれる構造があり、Ca Na Kイオンは、それぞれの濃度とATP濃度などに従って、これらの構造を通じて細胞内外でやり取りされ、細胞の状態を変化させている。また、心筋細胞などに特有の構造として筋小包体と呼ばれる、Caイオンを蓄えておく構造や、アクチンフィラメント、ミオシンフィラメントと呼ばれる、収縮力を発生させる構造が存在する。これら単一細胞レベルの構造は、それぞれ特有の微分方程式でモデル化されており、現在利用している、医学部生理学教室で構築している京都モデルと呼ばれる心筋細胞モデルでは独立変数および方程式の数がそれぞれ50個程度になっている。

心臓という臓器全体をモデル化する場合、この心筋細胞を臓器一つ分並べれば良いことになる。しかしながら、心筋細胞一つの収縮率が15%程度であるのに対して、左心室内腔の体積変化率は70%にも及び、単純に心筋細胞を並べただけでは心臓の機能が再現できないことがわかる。実際には、心筋はシート状の構造をしており、シート間の結合は若干ゆるくなっていると考えられており、さらに、心臓の内壁部のシートと外壁部のシートでは心筋細胞の配向方向が異なることがわかっている。このような構造によって、心臓全体の収縮運動は、全体として回転運動を伴いねじれるように収縮しているといわれている。しかしながら、このような運動を実現する心筋細胞の配向構造はまだ完全には解明されておらず、本研究では、MRIによる断層像（図1、2）や顕微鏡を用いた組織学的研究によって明らかにされている心筋細胞のらせん配向情報などを用いて実際の運動を再現する心臓モデルの構築を行っている（図3）。



図1 胸部MRI断層像

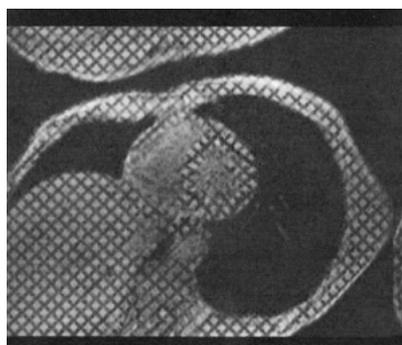


図2 MRI tagging画像



図3 心臓の有限要素モデル

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（吉川榮和研究室）  
 「キャラクタエージェントを用いたネットワークコミュニティの実験」

パソコンやネットワークの利用が日常的な情報化社会では、社会に開かれたオープンネットワークであるインターネットを利用して人間同士が情報交換を行う「ネットワークコミュニティ」の形成が注目されている。当研究室では、「エネルギー・環境問題」に関する社会的啓蒙のため、誰もが自由にアクセスでき相互に意見交換できるWebサイトを目標に、「シンビオ社会研究会ホームページ」の構成を進め、情報提供を行っているが、さらに、様々な人たちが参加しやすく活発に意見交換できる場の提供を検討している。本稿では、ネットワークコミュニティの活性化のために、「社会的エージェント」を導入したネットワークコミュニティ実験を紹介する。

1. 社会的エージェント

社会的エージェントは、ある種の社会的存在となるシステムであり、単なる知的システムとしてだけでなく、感情的要素や、性格、心理学、社会学を含めた総合的な観点から研究され、インタフェースへの導入などが検討されている。本研究では、社会的エージェントの実際の形態として「キャラクタエージェント」を選択し、人間のもつ社会的知性と社会的エージェントのインタラクションによって生じる効果をねらい、ネットワークコミュニティに社会的エージェントを導入した。コミュニティ内でのキャラクタエージェントの利用方法は、図1に示すように、(1) ユーザ自身の代理として発言する「アバタ」、(2) ユーザに自動的に働きかける「ナビゲータ」とした。

2. ネットワークコミュニティ実験

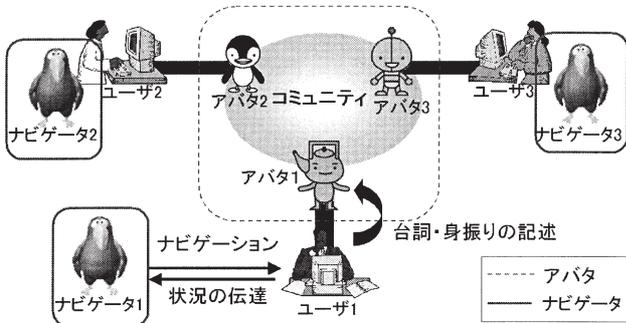


図1 提案するネットワークコミュニティの概要

「アバタ」と「ナビゲータ」を導入し、意見交換ができる掲示板システム「シンビオコミュニティシステム」を開発し、被験者実験を行った。年齢・性別・職業・居住地の異なる16人の被験者に2週間話し合ってもらい、アンケートに回答してもらった結果を統計分析すると、以下の点が示された。

- ・アバタには「親和性」、ナビゲータには「有用性」の印象要因が大きい(図2)
- ・ネットワークコミュニティへの肯定的評価は、ナビゲータの有用性とは相関が高いが、アバタの親和性とは相関が低い
- ・「エネルギー・環境問題」のように、意見が広がりにくいテーマの場合、ネットワークコミュニティ全体としての「ナビゲーション」のあり方の検討が重要である

ネットワークコミュニティの活性化のために社会的エージェントを利用し、コミュニケーションの形態やコミュニティの形成への考察が深められ、今後の情報化社会における新たなコミュニティ生成のための応用が期待される。

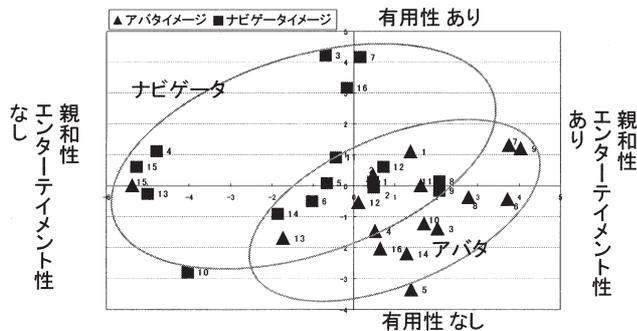


図2 被験者実験の分析結果 (SD法による主成分分析)

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研究室） 「超流動ヘリウム冷却超電導マグネットの安定性」

化石燃料に代わる将来のエネルギー源として期待されている核融合炉においては、一億度に近い超高温プラズマを閉じ込めておくために強い磁場を必要とし、超電導マグネットの利用が不可欠である。大型超電導マグネットは通常、液体ヘリウム（He I：常流動；常圧で沸点4.2K）を冷媒とするが、これをさらに2.17K以下まで冷却すると相転移を起こし超流動ヘリウム（He II）と呼ばれる量子液体となる。超流動ヘリウムは、粘性がないのでコイルの隅々まで浸透し、熱を強制的に排出できるなど優れた冷却特性を有し、冷媒温度が低いことによる臨界電流密度の向上と相俟って超電導マグネットの小型化・高磁場化を実現する冷却材として期待されている。

本研究では、超流動ヘリウム冷却超電導マグネットにおける巻線の機械的不安定に起因する局所的擾乱に対する安定性評価基準を確立するため、コイル巻き線の局所的加熱による常電導転移が拡大伝播するか否かを指標として、超電導体の冷却安定性の外部磁場、ヘリウム温度、およびヒータ入力に対する依存性を評価することを目標とする。

設計製作した大型加圧超流動実験用クライオスタット（図1）は、内径45cm、高さ157cm、液体ヘリウム容量150Lで、容器内部はFRP製のλプレートによって仕切られ、上部が自由液面を持つHe I槽、下部が自由液面を持たないHe II槽に分かれている。He II槽内には、外部磁場印加用超電導マグネット（内径20cm、最大磁場8T）が設置され、その中に試験体が固定される（図2）。

本装置の完成検査を兼ねた最初の実験では、直径0.86mmのNbTi/Cu複合多芯ホルマル線（銅比6.5）をSUS製ボビンに巻きつけた試験体を用いた。コイル中央部の巻線上には、ヒータと電位タップ及び小型測温素子を設けた（図2）。実験は、外部磁界印加用マグネットに通電して一定磁場を与え、試験体に定電流を流した後、ヒータによりパルス状熱入力（パルス巾100ms）を与えて常電導の芽を作り、この常電導部で通電電流によるジュール熱が発生、熱の伝播と共に常電導部が伝播する過程を電位タップにより観測した。そして、熱入力遮断後に、超電導に回復するか、あるいは常電導部が残るかの閾値となる通電電流を限界電流として、試験体の安定性を考察した。図3は、様々な液温、磁場に対して求めた限界電流である。なお、塗りつぶし記号は、試験体の臨界電流を示している。常流動ヘリウム冷却から超流動ヘリウム冷却に移行することで、超電導線の安定性は大きく改善されることがわかった。今後は、実際の核融合装置に使用されるような大型導体を含む種々の試験体を用いて、常流動冷却と超流動冷却を対比して冷却安定性評価を行い、超流動冷却の有効性を定量的に明らかにしたいと考えている。

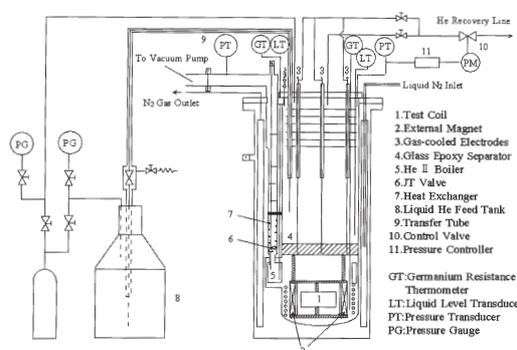


図1 超流動ヘリウム冷却超伝導マグネット試験装置

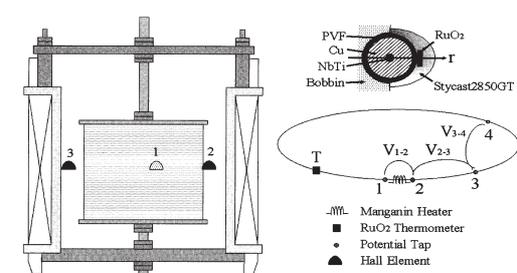


図2 試験体コイル、外部マグネットと測定点

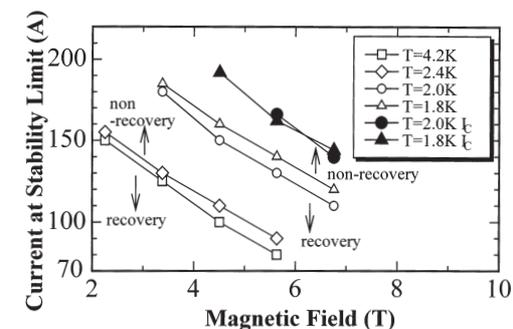


図3 安定限界電流の磁場及び液温依存性

エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野  
「プラズマ・イオン注入の粒子シミュレーション」

構造材料の表面処理は、古くは、メッキに始まり、今日でも主流である窒化・浸炭処理が開発され、表面機能向上を目指して、熱化学反応としてCVDによるセラミック膜が登場し、低温化の要求が高まり物理反応としてPVDが開発されてきました。その後、PVDで形成された膜の密着性を高める方法として、高エネルギーのイオンを打ち込むイオン注入とPVDを併用した手法が開発されています。しかし、イオン注入ではイオンビームの指向性のため、立体形状へのイオン注入は困難でした。

プラズマ・イオン注入 (Plasma Immersion Ion Implantation:PIII) は、高密度プラズマ中に設置した加工対象材料にパルス的に負高電圧を印加することで、材料周囲に形成されるプラズマシースの電界によりイオンを加速して基材に注入する技術です。イオン加速に、プラズマシースを用いるため、イオンビーム注入に比較して、平面形状以外へのイオン注入が可能とされていますが、これまでは利用出来るプラズマ密度の制約 ( $\sim 10^{10}\text{cm}^{-3}$ ) から準平面的なもの以外への適用は困難とされていました。一方、核融合のプラズマ加熱装置の一つである中性粒子入射装置の開発を通して、高密度大容積のプラズマ生成技術 ( $\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ ) が得られており、この技術の利用による、より複雑な形状へのプラズマ・イオン注入の適用と産業応用の研究が、当研究所とイオン工研・産総研などとの共同で始められようとしています。ここでは、超潤滑性を目標として、図1に示すようなCUP形状内面へのダイヤモンドライクカーボン (DLC) 膜の生成を目標としています。

本研究は、このような応用のために必要となるプラズマ密度や印加電圧波形形状などの技術的課題を明確にするために行っているものです。

定常状態でのシースの厚さは、チャイルド・ラングミュアの式で与えられますが、 $10^{12}\text{cm}^{-3}$ のプラズマでも $\sim 77\text{mm}$ と厚く、また、シースを通してのイオン供給が少ないことから、PIIIでは、電圧をパルス的に印加して、シース形成の過渡状態を持ちることから、粒子シミュレーション手法を用いてこの過渡現象を追いかけています。図2は、プラズマ密度  $10^{11}\text{cm}^{-3}$ 、印加電圧  $-50\text{kV}$  の際のイオン衝突量の時間発展を横軸を基材表面に沿った座標に取って表したものです。イオンプラズマ振動周期 ( $\sim 67\text{ns}$ ) の数倍間では内面でもほぼ均一に入射されていますが、これ以後の時間ではシースの成長で内面への入射が不均一になることから、プラズマ密度を増加させると電圧パルス形状への要求が厳しくなることが明らかになりました。

今後は、イオンエネルギーの分布などを考慮した打ち込み量・深さなどの関係を求めて、最適なパラメータを探すとともに、実験との比較検討を行っていく計画です。

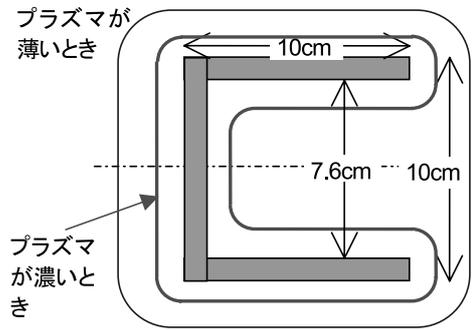


図1 プラズマ密度とシース形状

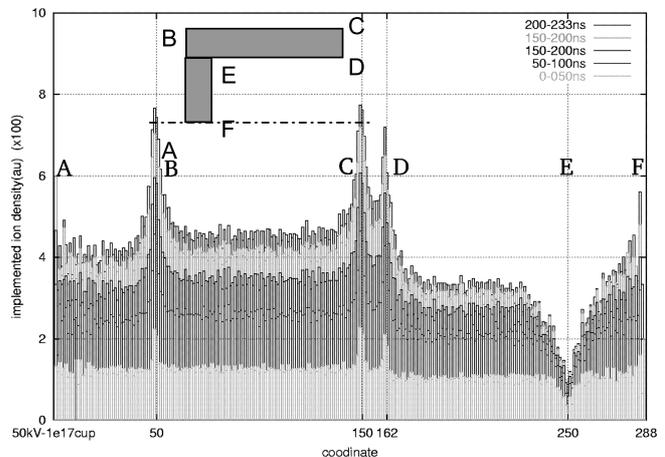


図2 イオン注入量の時間発展

## 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） 「トーラスプラズマのトロイダル電流に関する研究」

当研究室ではエネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターで行われているヘリオトロンJ装置を用いたトーラス磁場による高温プラズマ閉じ込めに対する実験・解析・理論的研究に主眼を置いている。プラズマ内を流れるトロイダル電流（トロイダル方向はトーラスに沿う方向）は、例えばトカマク型装置では閉じ込め磁場を形成するために必須であり、ヘリカル系装置では磁場配位変化を引き起こし閉じ込め特性を変化させる場合がある等の理由から、様々な閉じ込め方式の下で研究されている。トロイダル電流の発生機構は、トカマクでの外部からの印加磁束変化によるもの他に、入射ビーム或いは高周波に起因するもの、電子が磁場の弱い領域に‘捕捉’されることが原因で流れるブートストラップ電流等がある。ヘリオトロンJ装置はヘリカル系装置のひとつであり、プラズマ閉じ込め磁場が外部コイルによる磁場のみで形成され、閉じ込め磁場形成にトロイダル電流を利用するわけではないが、ブートストラップ電流は自発的に流れる可能性がある。磁場配位の最適化によってこの電流を抑制することがヘリオトロンJ装置の基本概念のひとつでもある。この研究ではヘリオトロンJ装置におけるトロイダル電流の発生機構の解明とその制御を研究目的にしている。

トロイダル電流計測はロゴスキーコイルによって行う。ヘリオトロンJ磁場を構成する6組のコイルの中、内部垂直磁場コイル電流を制御しトロイダル方向の磁場成分変化を制御した場合、図1のようにトロイダル電流方向が逆転する。プラズマ生成は70GHz、400kWの電子サイクロトロン加熱を用い、入射高周波はトロイダル電流を生成しないトロイダル方向に対し垂直に入射したものである。閉じ込め磁場を逆転した場合には電流方向が完全に逆転していることも確かめられた。これらの性質はブートストラップ電流の性質と同一であり、理論予測からも同様の傾向が示されている。

電子サイクロトロン加熱（ECH）ビームの入射方向を変化させるとECH高周波によって加速される電子のモーメントによってトロイダル電流が誘起される。プラズマの電子密度が低い条件で入射角に対するトロイダル電流の変化は図2のように、垂直入射を境にして方向を逆転する。電子密度が高くなるとブートストラップ電流の寄与の方が大きくなり、方向逆転は現れない。ただし、電流の絶対値変化は高密度領域でのECHビームによる電流駆動の可能性を示している。ただし、これらの実験で得られた電流値はトカマク型装置でのECHによる駆動電流値と比較すると小さいことが確認された。トロイダル電流とプラズマ閉じ込めとの関係については今後の研究課題の一つである。

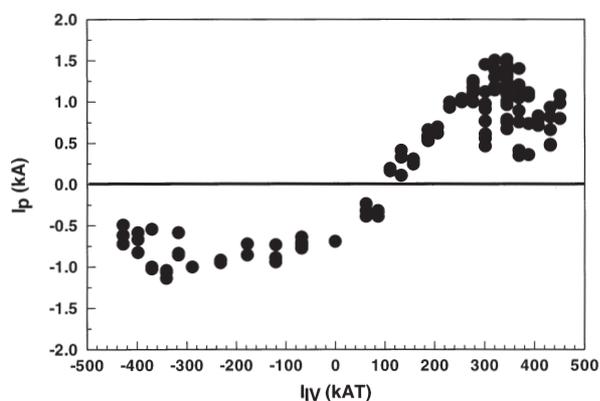


図1 内部垂直磁場電流値とトロイダル電流

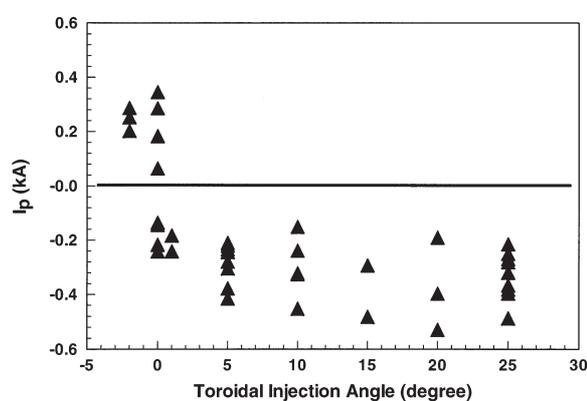


図2 ECHビーム入射角度とトロイダル電流  
(0° はトーラス軸に対し垂直)

## 地球電波科学研究部門 大気圏光電波計測分野（津田研究室） 「大気重力波の数値シミュレーション」

当研究室では、電波・光・音波を利用して、地表面から高度100km以上に至る、幅広い領域の大気現象を観測している。高度80-100kmの大気中では、オゾンや酸素原子等を介した反応に伴う発光現象「大気光」が見られる。近年発達が著しいCCD素子を用い、魚眼レンズと狭帯域フィルターを通して観測することで、大気光のイメージングが行える。その結果分かってきたことは、この高度領域の大気は、大気重力波という、浮力を復元力とする波動に満ちており、大振幅化した波長数10km程度の重力波が、グローバルな大気の流れや温度構造をも左右するということである。これまでの観測から、重力波は熱帯から極域まで幅広く見られることが知られている。

この大気重力波の発生、伝播、作用を究明するため、当研究室では数値シミュレーションを用いた研究を行っている。重力波の発生源として重要なものの一つに、積乱雲がある。積乱雲は、例えば夏の激しいわか雨を引き起こすことで知られるが、積乱雲に伴う激しい鉛直流や凝結熱は大気成層の平衡を乱し、非平衡分が重力波として水平・鉛直に伝播する。大気密度は高度と共に指数関数的に減少するため（高度100kmで地表の数100万分の1である）、重力波の振幅は逆に指数関数的に増加する（単純計算では約1000倍になる）。大振幅化した波動は不安定化して碎ける。碎波の身近な例としては、海岸に押し寄せて碎ける白波を挙げることが出来よう。碎波が起ると、波動が輸送してきたエネルギーや運動量が解放され、大気の温度と流れを変える役割を果たす。

上記の一連の過程を数値シミュレーションで研究するため、シビアストーム等を研究に用いられる「メソモデル」の鉛直カバー範囲を大幅に伸ばし、世界初の、地表面から高度100kmまでをカバーする3次元雲分解シミュレーションを行った。「雲分解」とは、グリッド間隔1km前後の高分解能計算により、モデルの中で雲（今の場合積乱雲）を陽に再現する計算のことをさす。なお、天気予報で用いられる全球・領域モデルのグリッド間隔は数10km以上であり、雲は陽に分解されないため、各グリッド内で発生するであろう積乱雲の統計的な性質を何らかの方式で予測する方法がとられている。

シミュレーションの結果、大気光観測で良く見られる間隔10km前後の縞模様「リップル」の再現に成功し（図を参照）、そのメカニズムを明らかにした。今後、観測と連携を取りつつ、重力波の励起メカニズムや伝播特性、そして大気光に見られる様々なパターンを解き明かしていくつもりである。

参考文献：Horinouchi, T., T. Nakamura, and J. Kosaka, Convectively generated mesoscale gravity waves simulated throughout the middle atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 2002.

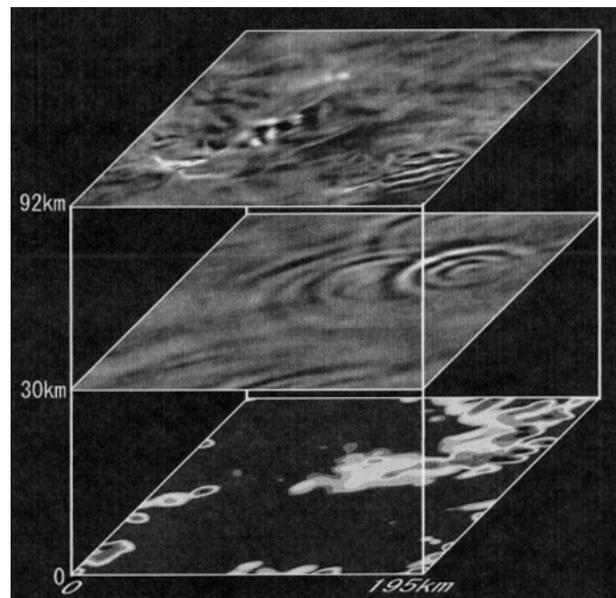


図 数値シミュレーション結果のスナップショット。地表における降水と、高度30, 90kmにおける鉛直風速。値のスケーリングは両高度で異なり、30kmにおける鉛直風擾乱の振幅は1m/s以下であるのに対し、90kmでは数10m/sに達する。高度30kmでは重力波が波紋状に広がっている。90kmにおける右下隅の縞模様はより波長の大きい重力波の碎波による擾乱「リップル」である。

## 宇宙電波科学研究部門 電波科学シミュレーション分野（大村研究室） 「電気推進エンジンによる地球磁気圏の電磁環境の擾乱」

本研究室は、宇治キャンパスにある宙空電波科学研究センターの宇宙電波科学研究部門の一分野として活動しており、全国共同利用設備として導入されている先端電波科学計算機実験装置（A-KDK）を使った計算機実験を中心として研究活動をしています。大学院教育においては、工学研究科電気工学専攻の電波工学協力講座として学生の研究指導を担当しています。本稿では、A-KDKを使った計算機実験プロジェクトのテーマの一つである「電気推進エンジンによる地球磁気圏の電磁環境の擾乱」について紹介します。

宇宙空間はイオンと電子からなるプラズマによって満たされています。宇宙空間のプラズマは希薄であり、無衝突なものとして扱うことができます。特に、地球周辺の宇宙空間は強い地球磁場の影響により太陽から流れてくる太陽風プラズマを遮り、地球大気起源のプラズマが閉じ込められた磁気圏という領域が形成されています。この磁気圏プラズマの空間においては、クーロン衝突による効果よりも、電磁力的な電子とイオンの運動による効果が支配的であり、同時に高エネルギーの電子やイオンから放射される様々な電磁波が磁気圏を満たしています。さらにこれらのプラズマ波動と高エネルギー粒子は複雑に相互作用して、無衝突プラズマであるにも拘わらず異常電気抵抗を生み出し、オーロラの発光や磁気嵐に代表されるダイナミックな地球磁気圏の変動において重要な役割を果たしています。

このようなプラズマ波動現象は、理論では解析することが難しい複雑な非線型現象であり、ここで計算機実験が非線型解析の有力な方法として登場します。当研究室では、これまで長年にわたって開発、改良が続けられたKEMPOコードと呼ばれる、電子・イオンを共に粒子としてその運動方程式を解いてゆく、電磁粒子コードを使った研究を主として行い、磁気圏における様々な現象を解析し成果を上げています。今後、粒子コードによる研究に加えて、新たな研究の展開の一つとして、ロケットに搭載されるイオンエンジンからの大規模な重イオンビーム放出による地球磁気圏プラズマへの広範囲な電磁的な影響を調べるため、電子を流体、イオンを粒子として運動を解き進めるハイブリッドコードを用いた計算機実験で解析しようとする試みがスタートしました。

現在、電気推進エンジンを使用した宇宙機は、宇宙空間で太陽発電衛星（SPS）を建設する際に、低軌道（LEO）から静止軌道（GEO）へ大量の物資を効率的に輸送できる方法の一つとして注目されています。しかし過去の研究においては、電気推進エンジンからのアルゴンイオン等の重イオンビームの放出による磁気圏プラズマへの影響が予想されており、イオンエンジン大規模作動時における重イオンビームと低周波プラズマ波動との相互作用に関して線形解析が行われ、ビームの挙動や、重イオンビームの拡散等について議論が行われています。しかし、背景プラズマの加速、加熱といった現象や、電磁波と重イオンビームの非線型な相互作用までは研究されておらず多くが未知の分野です。図1のように2次元のシミュレーション空間を用意し、中心付近にイオンエンジンに見立てた内部境界から重イオンビームを注入します。この結果、図1のように磁力線が曲げられ、磁場が弱くなったところに、磁場と平行方向に重イオン（図3）と磁気圏のプラズマ（図4）の両方が加速して動いていくことがわかりました。この流れの速度が大きくなれば、プラズマの不安定な状態を作り出して、電波を成長させ、その電波による非線型現象を起こす可能性があります。現在この磁力線に平行方向に加速するメカニズムと、重イオンビーム速度が大きくなった場合の非線型現象の解析を進めています。

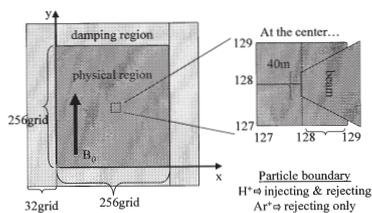


図1 シミュレーション空間

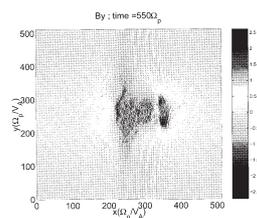


図2  $t=550$ （時間はプロトン gyro 周期の逆数で規格化）の磁力線と同じ方向の磁場強度（磁力線成分を含む）

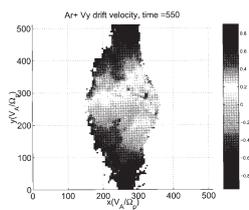


図3 図2と同じ時刻での重イオンの磁力線に平行方向のドリフト速度

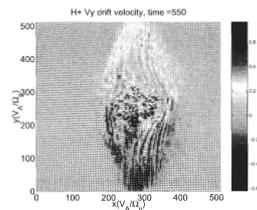


図4 図2と同じ時刻での磁気圏プラズマの磁力線に平行方向のドリフト速度