

# cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.4      DECEMBER 1999

---

[第4号]

.....  
卷頭言

名誉教授 坂井利之

大学の研究・動向

デジタル通信分野・エネルギー情報学分野

.....  
産業界の技術動向

新設研究室紹介

シリーズ：研究内容紹介

博士論文概要

学生の声

教室通信

**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。

**巻頭言****情報化社会でのメーカーとユーザ**

坂井 利之



物を作れば売れる、技術がよければ宣伝は要らぬと言った考え方は遠い昔の話になった。

ここで私が言いたいのは、工業社会の成熟した現在のメーカー、製品の考え方が高度情報化社会に入ってきて、革命的な発想・条件の変革が必要とされているということである。それは、どんな機器も具備すべき条件はオンライン、システム要素、環境適合素材という3つである。

社会がグローバル、ローカルいずれも情報通信の何重ものネットワーク網に囲まれ、家庭も工場のようにオートメーション化されるだろうからである。時代が急展開し、新しい技術・素材・環境が次々に展開すると、行政、メーカー、医療、金融にもアカウントビリティ（説明責任）が必須の条件となる。臓器移植における医師団、地域開発における行政、建設業界のアセスメントや必要性の説明、そして新産業（バイオ、電子商取引）では、技術全般から商品の内容、関連の法律やユーザの安全性、利害を各種ケースについて一般・素人の人への説明が肝要となる。また、製品が活動中は勿論、ライフサイクルの後でもリサイクル率がよく、廃棄物の処理でも自然界の気圏・水圏、地圏に悪影響を及ぼさないという環境適合素材で製造されている性格が重要視されている。ここで、近未来の家庭オートメーションについて上述の3要件を考えてみよう。

家庭の日常生活で、24時間電源が入っている冷蔵庫は電気製品の中ではサイズが大きいので、これが家庭オートメーション化情報の中枢になる可能性がある。家族誰もがアクセスし、その頻度は高い。ただ、そこでインターネット発受信で長時間居れるかが問題ではあるが、短時間メッセージには大丈夫である。冷蔵庫の中の物品管理は生易しい事ではない。庫内の食材の品物、数、有効期限などはスーパーのバーコードスキャナでも入るし、家庭用の常備食品や出来上がり品などは、自家用の表によってパソコンのスキャナで、入力することも出来よう。

それらを冷蔵庫のディスプレイ（インターネットと兼用）に表示させて買物の計画を立てたり、子供

への指示にも使う。時間のなかった時には外出先からオンラインでの問い合わせで買物をこなし、また家庭内でのセキュリティ（監視カメラ）・健康管理には浴場、トイレと結んで、そこにある機器のデータを冷蔵庫に集中させて情報管理するシステムの設計が検討に値するだろう。家庭内の集中管理制御盤を、工場内のプラントや製造、管理ラインの超ミニチュア版で安価に出来ないかということである。10数年前は到底考えられなかった通信システムが、ゲームやパソコンで家庭内に入っている事実は大いに参考になる。

PL法が施行され、ユーザの安全確保、さらに環境破壊・汚染、物品の買替や廃棄時の回収がメーカーに義務付けられるようになると、メーカーは売り放しは不可能となり、物の生涯にわたる世話を見ることになり、この点では人についての市町村と同じような機能を備えねばならない。

すなわち、ユーザとなる人は、生まれる以前の母子手帳を持つ人から、死んで火葬に付されるまでの老若男女、健康に障害のある人々（病院の診療科すべて）のあらゆるレベルにわたる。それらの人の使う環境を充分知るには、メーカーの人は偏った一部の階層の人のみであるから、市町村住民の実態を知る努力が必要と思う。

情報化社会でのメーカーは、直接は本来の業種としての製品供給と、更に間接的にはネットワークを介して上述のあらゆる住民に関与するので、その評価を受ける。特にユーザが商品を探すときは、エージェントがインターネットではユーザ側になり、色々のメーカー、商品を自由に比較できるし、その結果は現在の消費者テストの比ではない。

今では殆どの機器には、マイコンが入っていてオンラインとなり、メモリはユーザあるいはメーカーの設定・更新によって幾度か変わり、機能の向上や故障時には機器の一部のブロックの取替えで対応するなど、機器納入時のままで終わることはない。廃棄時の部品・素材まで考えた製品の設計がメーカーの役割であり、コンピュータ、パソコンのようにその時までは、物も機能も育て見守ってゆくという理念の徹底が求められるのではなかろうか。

**大学の研究・動向****自立分散型無線情報ネットワークの構築に向けて**

京都大学大学院情報学研究科 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  
教授 吉田 進

yoshida@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

講師 廣瀬 勝一

hirose@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

助手 村田 英一

murata@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

**1. はじめに**

情報通信ネットワーク基盤、なかでも携帯電話に代表される移動体通信はいつどこにようと必要な情報を必要なときに受発信できる手段を提供できるために世界的に注目されてきた。既に次世代の携帯電話方式である“ワイドバンドCDMA”の研究開発も見通しがつき、これにより現在の方式に比べて格段に高速な情報伝送が可能となり、移動通信の新たな展開が期待されている。特に、今後は携帯電話としてだけでなく、携帯型のインターネット端末として益々発展することが期待されている。

一方、移動端末どうしが直接的に、あるいは移動端末が中継ノードとなり多段中継（マルチホップ）接続により通信を行なう新しいタイプの自律分散制御無線情報ネットワークがこれから大いに発展すると考えられている。オフィスの中の計算機や周辺装置類を無線で結合する無線LANが最近注目されてきているが、これらは天井などに設置された有線LANに接続されたアンテナとを無線で結合するものであり、建物の中でしか利用できない。別のタイプの無線LANとして、端末どうしが自律分散的にネットワークを組み、必要な情報交換を行ない、会議等を行なえるタイプの無線LANがありアドホック（ad hoc）無線LANと呼ばれている。この無線LANを用いれば、砂浜であれ公園の木陰であれ、ノートパソコンなどを持ち寄ればどこでも会議が可能になる。

また、最近ブルーツース（Bluetooth）と名付けられた企業のコンソーシアムが作られ、微弱な電波を用いて身の回りのあらゆる電子機器に送受信機機能を埋め込む計画が進んでいる。例えば、電子カメラでとった写真を鞆のなかにいれたままのノートパソコンへ電波で送り込み、ノートパソコンで電子メールに添付した後、鞆の中のパソコンから携帯電話経由でインターネットにメールを送信することが可能になる。このように、あらゆる機器に微弱電波の送受信機を組み込むことにより思いもよらなかった新しい応用や展開が可能になって来る。

また、計算機分野では“ウェアラブルコンピュータ”と称する着衣型（身にまとえる）コンピュータが話題になっている。小型化した計算機を出来る限り自然な形で身にまとい、技能工やナビゲーション目的から、いずれビジネスユース等への発展が期待されている。と同時に、携帯通信端末と携帯コンピュータが融合し、その境目がなくなっていくであろう。そして、通信技術の発展によりいずれ情報通信端末さえ持ち歩けば、いつでもどこからでも何不自由なく計算機が自由に使える環境が実現されるであろう。

一方、車の世界では、今はナビゲーションが中心であるが、これからは車どうしや車と路側にあるアンテナ間等で必要な情報をやり取りして、交通安全対策や車の居住環境を大幅に改善しようという計画が進んでいる。いわゆる「フロントシート（前部座席）・インフォメーション」としては、車の

安全運転につながる様々な情報をやり取りするほか、「リアシート（後部座席）・インフォメーション」として、音楽やテレビ、ゲームなど娯楽情報のやりとりが計画されている。

以上のように、移動体通信のインフラとしての携帯電話やPHSのネットワーク、更には衛星携帯電話ネットワークに加えて、自律分散的な全無線ネットワークがこれから大いに発展すると期待され、将来的には両者が融合し、ユーザにとっては全無線ネットワークが表に見えて、インフラ部分は影に隠れた、ネットワークを特段意識しなくても意のままに使えるような、人間に優しい情報ネットワークの構築に多いに寄与することが期待されている。

当研究室では、これまで市街地における高速移動体通信を実現するために必要となる様々な要素技術について研究を行ってきたが、これからはより高度な移動体通信、すなわち超高速移動体通信、ワイヤレスインターネットさらにはマルチホップ型の全無線自律分散情報ネットワークなど無線通信の新たな展開を目指した研究を行っていくつもりである。

ところが、これらの通信の舞台となる市街地やビル内の電波伝搬環境は極めて劣悪であり、通路差の大きな多重経路伝搬に伴うひずみやフェージング、様々な予期しない電波干渉により通信品質が著しく劣化する。また、情報の盗聴や意図的な改竄も容易である。そこで、このような劣悪な通信路上で、将来の高度な広帯域マルチメディア移動体通信の実現や全無線通信の新たな展開を目指して、様々な角度から研究を進めている。いくつかの代表的なテーマ例と現在の研究状況を以下に示す。

## 2. 無線信号処理技術の研究

移動体無線通信に特有の技術課題として 1) 建物などで反射し遅れて到来する遅延多重波、2) 周辺から到来する同じ周波数の干渉波（混信）がある。今後ますます高速なデータ伝送が移動体通信においても求められると考えられるが、変調速度の高速化に伴って遅延多重波の遅延時間が相対的に大きくなり、何らかの対策を施さなければ伝送品質が著しく劣化してしまう。また、電波の有効利用には周辺から到来する干渉波対策が重要である。

一方、大容量の無線伝送路には広い周波数帯域が必要であり、周波数帯域確保の点からより高い周波数を用いる趨勢にある。しかし、電波の減衰は高い周波数になるほど大きくなるため、大容量伝送には受信電界強度の確保が必要であるが、携帯電話等では電池の制約から送信電力を増すことは極めて困難である。元々、伝送速度に比例して所要送信電力は増えるため、減衰の増大と相まって伝送速度の高速化は電力の点からも極めて難しい課題である。このように、大容量無線伝送の実現には大きなブレークスルーが必要である。

これらの問題に対処するための1つのアプローチとして、信号処理の高度化、高性能化がある。これは急速な半導体技術の進歩と共に現実性を帯びてきている有力な手法である。当研究室では遅延多重波対策として有効な最尤復号法を核に、適応推定理論等を応用しつつ干渉波対策を施した無線信号処理方式の研究を行っている（図1に室内実験風景を示す）。なおこの一環として実施中であるトレリス符号化干渉キャンセラの研究成果の一部については“Cue 第2号”43ページを参照されたい。

## 3. 全無線自律分散ネットワークの研究

当研究室ではITS（Intelligent Transport Systems）の基盤技術の1つとして車車間通信に着目し、その実現に必要な諸技術の研究を行っている（図2に概念を示す）。具体的には 1) 車車間通信に適したアクセス方式、2) 車車間通信用自律分散資源割り当て方式、3) 車両時刻同期方式、4) 車車間無線通信用信号処理方式、である。このような要素技術を総合することによって、より安全で効率的な道路交通を実現することを目標としている。

このように道路交通問題の解決に期待の大きいITS車車間通信であるが、この研究領域は従来の通



図1 無線信号処理の室内実験風景（遅延多重波と干渉波を同時に処理可能な信号処理アルゴリズムTCCを試作し、室内伝送実験を行っているところ）

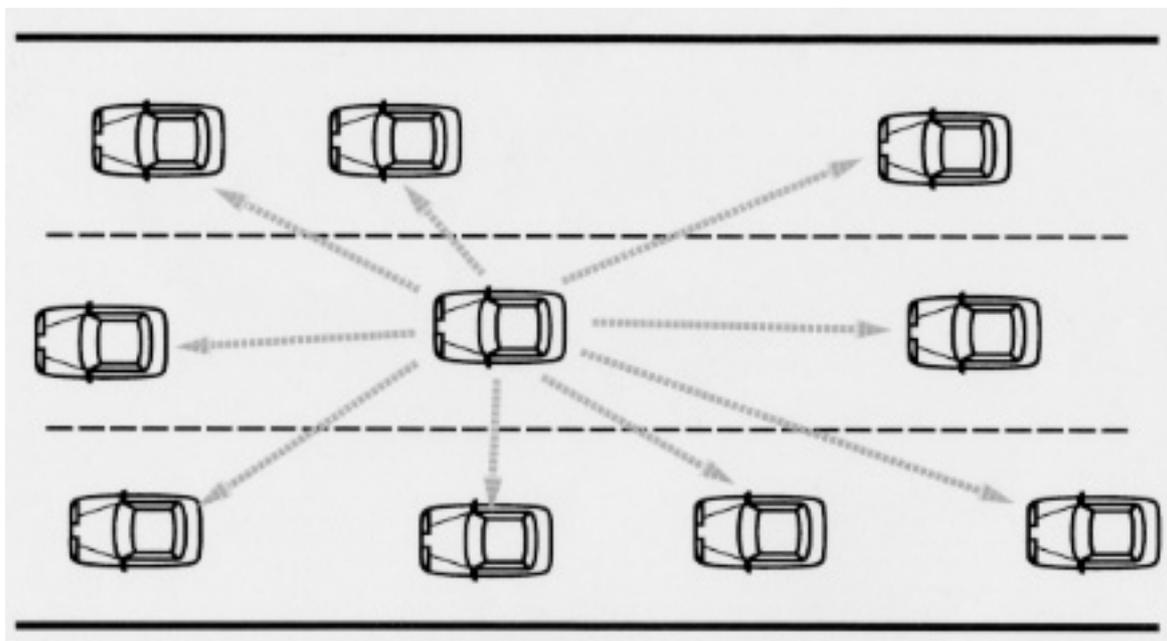


図2 高度道路交通システムITSにおける車車間通信の概念図（車両間で操舵、アクセル、ブレーキ情報をやり取りし安全性を向上する）

信とは根本的に異なった側面を持つ意味からも注目される。すなわち、ITS 車車間通信は特別なインフラストラクチャを用いずに利用者同士が通信を行う形態となる。これは中央集権的な制御機構も持たない、初めての実用的な消費者向け無線通信システムとなる。この機能を発展させれば、全てが無線通信で実現された「全無線インターネット」や「全無線市内網」が可能となり、社会の通信システムに大きな革新をもたらすと予想される。

4. CDMA干渉キャンセラの研究

次世代移動通信システムIMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) は、静止時で2Mbps、歩行時で384kbps、高速移動時でも144kbpsのデータ伝送速度を最低限の目標としており、広帯域の直接拡散CDMA (Code Division Multiple Access) が採用され、2001年には商用サービスが開始される予定である。

CDMA では複数の利用者が同一周波数帯を用いて通信を行うため、他の利用者の信号が他局干渉となる。CDMA 方式の利用者収容能力は他局干渉量に大きく依存するため干渉キャンセラによる他局干渉抑制が必要不可欠である。特に、レプリカ減算型のマルチステージ干渉キャンセラは優れた干

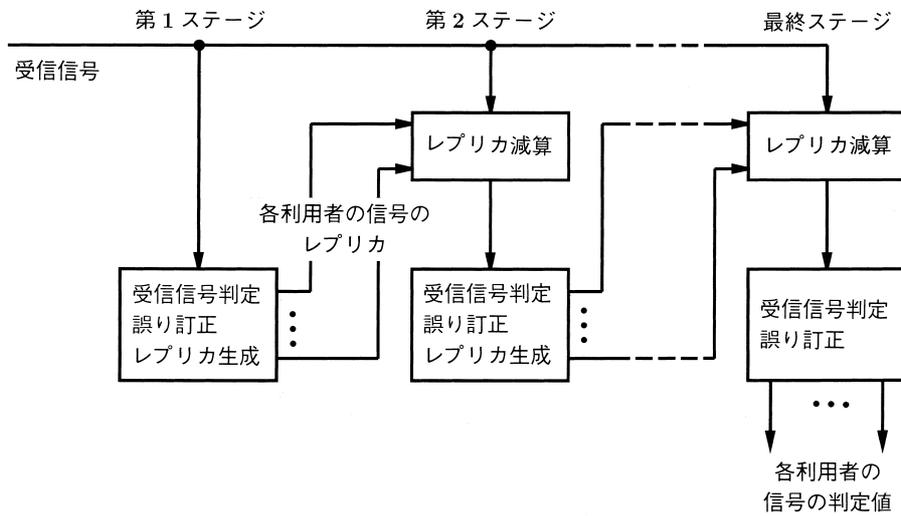


図3 受信信号の判定誤りを誤り訂正符号によって訂正するレプリカ減算型干渉キャンセラ

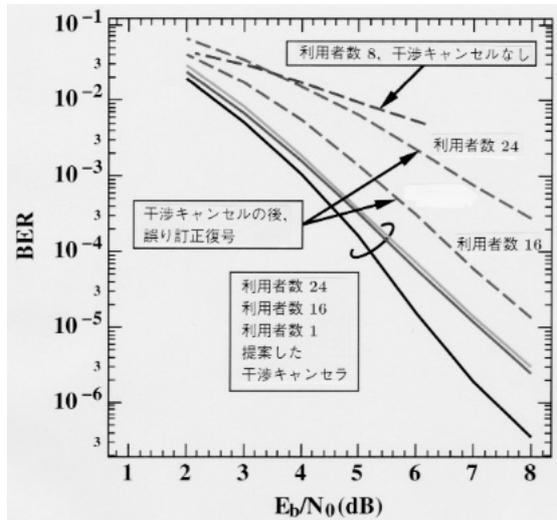


図4 レイリーフェージング伝搬路におけるビット誤り率 (BER) 特性。横軸 ( $E_b/N_0$ ) は1ビット当りの信号エネルギー対雑音電力密度比。

渉除去能力をもつ事が知られている。

レプリカ減算型干渉キャンセラでは受信側で受信予測値を推定し、受信信号から差し引くことで他局干渉を除去する。しかし受信信号推定値の判定を誤った場合、逆効果となり得る。そこで受信信号の判定誤りを誤り訂正符号を用いて訂正する方式について研究を進めている（図3）。この干渉キャンセラでは、マルチステージ処理で受信信号の判定の誤り訂正が繰り返し行われるため、繰り返し復号により、従来の干渉キャンセラの特性を大きく改善することができる。提案干渉キャンセラの特性をシミュレーションにより評価した結果、図4に示すように、レイリーフェージング伝搬路と呼ばれる劣悪な伝搬路においても良好な特性を示すことが確認された。

## 5. 情報セキュリティの研究

情報化社会ではもちろんのこと、上述のマルチホップネットワークにおいては中継される情報の保護、利用者の認証やプライバシー保護といった情報セキュリティの問題が非常に重要となる。セキュリティを保証するために不可欠な要素の一つとして、暗号が挙げられる。

当研究室ではこれまで、認証付鍵共有方式の研究を行ってきた。認証付鍵共有は、盗聴や改ざんの可能性のある危険なネットワークを介して、意図した相手とのみ秘密鍵を共有することを実現する方式である。

当研究室で提案した鍵共有方式は、1976年に Diffie と Hellman が提案した鍵共有方式を利用した方式であり、この安全性は、離散対数問題と呼ばれる整数論に関する問題を解くことが困難であるという仮定に基づく。なお、離散対数問題を効率よく解く解法は未だ知られておらず、多くの研究者は、そのような解法はおそらく存在しないと予想している。

本方式については、第三者による当事者へのなりすましや、妨害の防止などが可能であることが証明される。

## 6. 将来に向けて

今後、情報通信ネットワークは固定通信網と移動通信網、インフラストラクチャをベースとする無線ネットワークと自律分散型無線ネットワーク等が高度に融合し、ユーザは特設ネットワークを意識しなくとも、ネットワーク側が自律的に必要なルートや接続先を探し出し、いつでもどこでも自由に所望の情報が受発信できるネットワークが構築されていくであろう。すべての自動車に広帯域のインターネット・ルータを搭載して、無線インターネットの中継局にしまおうという計画もあながち夢ではなくなるであろう。

また、デジタル信号処理技術の進展は著しく、無線の送受信機は高度に環境適応的な信号処理機能を備えたマルチバンドアンテナ付きの変身自在なソフトウェア無線機（software defined radio）に向けての発展が期待されている。

次世代、次々世代の情報通信ネットワークのあるべき姿を見据え、それに向けての基礎的情報通信技術の追求を進めて行きたいと願っている。

# プラントのマンマシンインタフェース高度化への基礎研究

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻エネルギー情報学分野  
教授 吉川 榮和  
yosikawa@uji.energy.kyoto-u.ac.jp  
助教授 下田 宏  
shimoda@energy.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

近年の計算機情報処理伝送技術の著しい進展に伴い、高度に自動化した機械システムが普及してきた。このことは、人間にとって複雑な機械システムの操作負担を軽減し信頼性向上に役立っているが、あまりにも大規模化、複雑化、ネットワーク化した機械システムがしばしば人間の理解を越える、自動化した機械がブラックボックス化するなどで、機械システムの運転管理や保守点検作業で、ヒューマンエラーによる思いがけない大規模なトラブルを招く原因にもなっている。過日の京都市内の大規模な停電も、変電所の保守作業の人的ミスが原因であった。機械システムの自動化、ネットワーク化による大規模・複雑化では、人間と機械システムとの接点（マンマシンインタフェース）のあり方が大きな課題である。

当研究室では、人間と機械システムとが相互に協調する理想的なインタフェースとして、操作盤の新しい設計や盤面上の情報提示方法の改良といった、従来のアプローチとは全く異なるコンセプトによる新しいコミュニケーション形態の実現を目標にしている。具体的には、人工物としての機械システムと人間との媒介者（インタフェース）を、仮想空間内の知的ロボットとしての「バーチャルコラボレータ」の形態で構成する、擬人化したインタフェースエージェントシステムの研究を進めている。

## 2. バーチャルコラボレータ研究の構想

バーチャルコラボレータとは、仮想映像空間を通じて、人間と同じ形態で、同じように話し、動き、身振りをし、考え、感情を持ち、人間と自然に交流する、擬人化した知的インタフェースエージェントである。この研究では、機械システムの具体的対象として、原子力プラントを取り上げ、その制御操作を支援する知的エージェントとしてバーチャルコラボレータを研究している。このようなコンセプトのバーチャルコラボレータには、大別して、(1)周囲の状況から自律的に判断・思考する機能、(2)仮想映像空間で会話・行動する機能、(3)交流相手の人間の思考や感情等を推定する機能、(4)人間との物理的な接点を提供する機能、が必要であり、これらを有機的に統合して、プラント制御操作の支援のために、仮想映像空間内で人間と自然に交流できる機能を実現する。

## 3. バーチャルコラボレータの全体構成と要素技術の研究

図1に示すように、仮想映像空間中のプラント制御室にバーチャルコラボレータを配置し、人間はその空間に没入してコラボレータと共同で機器の操作を行う。コラボレータは、(1)ヒューマンモデル部を核として、主に、(2)人体モーション生成部、(3)人間情報行動認識部、(4)インタフェースデバイス部から構成される。(1)ヒューマンモデル部は、コラボレータの知能を実現する部分であり、機械システムと人間の状態や状況を入力として、それに応じて判断・意志決定を行い、コラボレータ自身

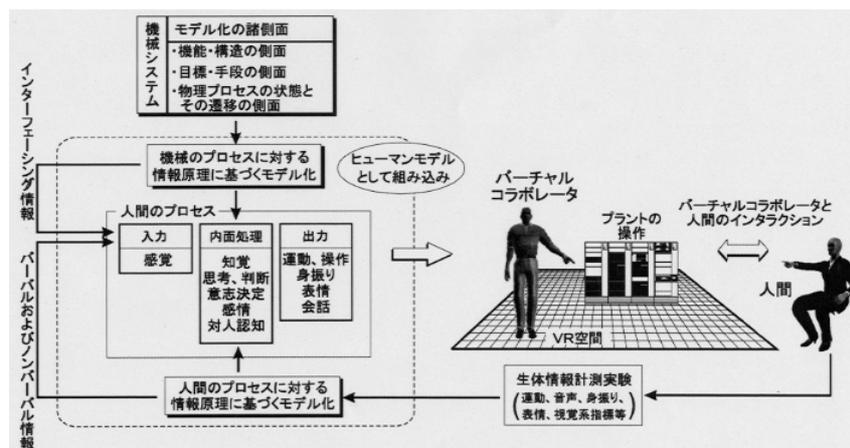


図1 バーチャルコラボレータの構成

の発話や行動を生成する。(2)人体モーション生成部では、その動作指令を受け、コラボレータの行動や表情などの外面的な動きを仮想空間内に実現する。(3)人間情報行動認識部では、人間の発話、身振り、表情、各種生体指標などを測定して、人間の思考や感情などを推定し、ヒューマンモデル部への入力とする。(4)インタフェースデバイス部は、実際に仮想空間を提示すると同時に、物理的な人間情報行動認識のための人間の各種生体情報を計測する。これまでコラボレータの知能としての①ヒューマンモデルと②会話コミュニケーション機能、人間の状態推定として③人間情報行動認識、コラボレータの行動生成として④人体モーションと表情の合成、人間との物理的接点として⑤デバイス開発、の研究開発を進めてきた。次にこれらの研究状況の概要を個別に説明するが、詳細は文献[1]に譲る。

① ヒューマンモデル・・・現在までに、プラント運転員がマンマシンインタフェース (MMI) を介して異常事象を検知・診断する認知行動を対象に、人間の認知情報処理モデルを基礎として、運転員認知モデルとその実時間シミュレーション手法を開発した。さらに、プラントシミュレータを用いた被験者実験で得た、運転員の異常検知・診断の時間対信頼性曲線のデータとの対比により、モデルの妥当性を確認した。今後は人間との会話による双方向コミュニケーションモデルの組み込みを課題としている。

② 会話コミュニケーション・・・音声処理と画面提示を分担するパソコンと、リアルタイムエキスパートシステムG2による知識処理を分担するワークステーションのシステム構成で、音声コミュニケーションを行う会話エージェントを用いたCAIシステムの研究を個別に進めている。

③ 人間情報行動認識・・・バーチャルコラボレータは実体として機械であり、その感覚を人間と同じ五感機能だけに限定する必要はないが、その計測・認識技術はできるだけ人間の負担を与えないものが望ましい。そこで、上記の音声認識以外に、人間の視覚に対応するものとしては顔のビデオ画像を画像処理して動的に表情認識や視線検出から感情を推定する手法、その他に心拍・皮膚電位反応等の電氣的生理指標の心理生理的計測法も進めている。また、人間のMMIでの操作履歴データと思考発話の時系列処理により、内面的な思考過程を実時間で推定する手法の研究も進めている。

④ 人体モーション及び顔表情の合成・・・バーチャルコラボレータの制御室内の移動と盤面操作を対象に、人体動作のVRアニメーション手法と、顔表情の合成法の研究を個別に進めている。

⑤ インタフェースデバイスの開発・・・バーチャルコラボレータを含めた仮想環境と人間との交流のための物理的接点となるインタフェースデバイスに要請される条件として、(1)人間が臨場感をもって没入できること、(2)人間とバーチャルコラボレータとが双方向に交流できる仕掛けを有すること、が挙げられる。これらの条件を満たすデバイスとして、両眼に立体画像を提示しながら赤外線CCDカ

メラにより視点位置や瞳孔径などの視覚系指標をリアルタイムで計測できるヘッドマウントディスプレイEye-Sensing HMDを開発した（写真1）。

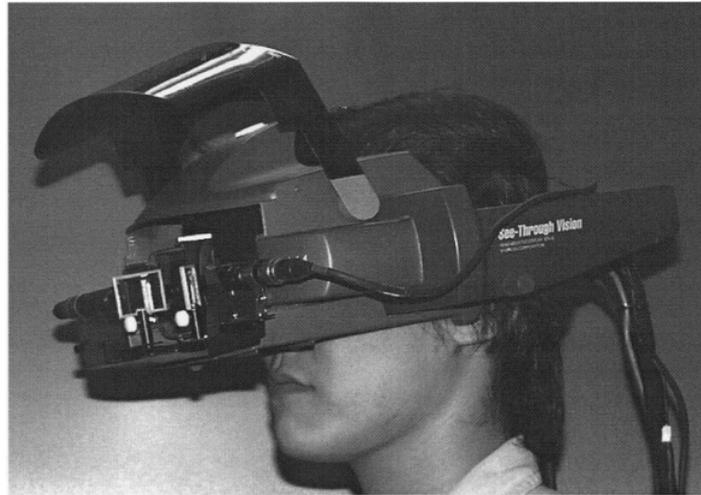


写真1 Eye-Sensing HMD

#### 4. バーチャルコラボレータ：そのプロトタイプと応用の展望

以上の要素技術の①ヒューマンモデル、および④人体モーション合成と、当研究室が三菱電機（株）との共同研究により別途開発した人間機械系総合シミュレーションシステムSEAMAID[2]（注：SEAMAIDは通産省及び原子力発電技術機構の委託により開発された）を統合して、原子力プラントの中央制御室でバーチャルコラボレータが異常発生時の緊急時操作を行う状況をコンピュータネットワーク上で分散統合シミュレーションし、大型ディスプレイ上にアニメーション化して表示する統合

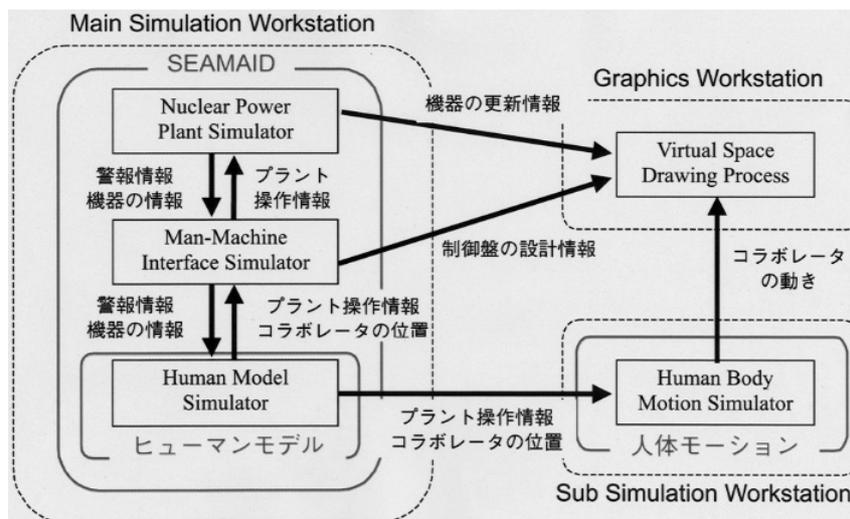


図2 プロトタイプシステムの構成

仮想環境のプロトタイプシステムを完成した。図2にプロトタイプシステムの構成を示し、図3に仮想の制御室中でコラボレータが制御盤を操作する様子を示す。現状ではコラボレータが人間と相互交

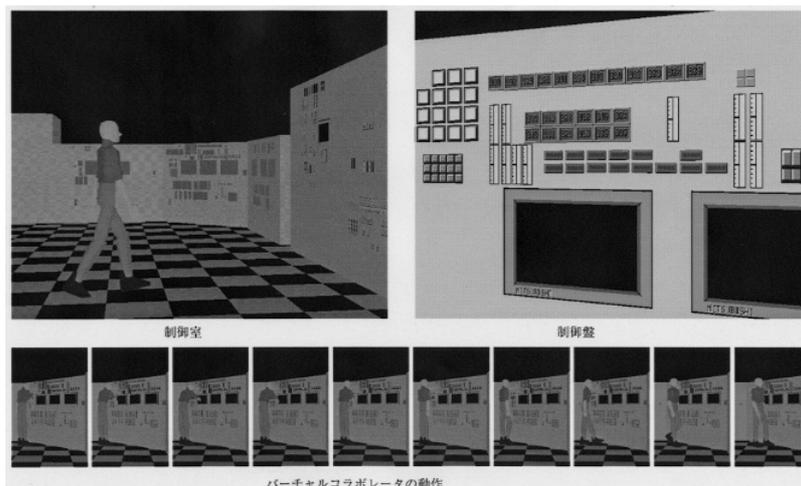


図3 仮想制御室の可視化

流する機能は実現していないが、現状のプロトタイプシステム自体でも、原子力プラントのMMIの設計検証やプラント運転員の教育訓練へ応用することができる。

## 5. おわりに

本稿では人間と機械の新しい交流方法として、擬人化インタフェースエージェントの実現を目指すバーチャルコラボレータの研究状況を紹介した。現在は、バーチャルコラボレータが人間と自然に対話するための音声会話、人間の意図推定、感情推定と生成等の研究を進めており、将来、コンピュータネットワークが構成する分散型共有仮想環境上でバーチャルコラボレータと人間とが相互交流する仮想社会への発展を目標としている。

## 参考文献

- [1] Shimoda,H., et al.: A Basic Study on Virtual Collaborator as an Innovative Human-Machine Interface in Distributed Virtual Environment: The Prototype System and Its Implication for Industrial Application, Proceedings of IEEE-SMC'99, Vol.5, pp.697-702, (1999).
- [2] Yoshikawa,H. et al.: Development of an analysis support system for man-machine system design information, Control Engineering Practice, Vol.5, No.3, pp.417-425 (1997)

# 最近の二次電池産業の動向

日本電池(株)  
田中千秋

## 1. はじめに

1998年の日本での電池総生産量は、数量にして約65億個、金額にして約8,000億円であり、二次電池は数量でその約1/4、金額でその約3/4を占めている。

このうち、特に小型二次電池は、携帯電話やノートブックパソコン、VTRなどの小型ポータブル電子機器の爆発的な伸長により、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池を中心にして市場の拡大や技術革新が目覚ましい。

一方、大型電池の分野では、従来の用途に加えて近年の地球環境保全意識の高揚により、環境汚染防止、省資源、省エネルギーを目的とした電気自動車を中心にして各種環境関連機器向けの鉛電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池などの研究開発が精力的に進められており、今後の市場拡大が期待される。

このような状況の中で、生活の利便性の向上と環境保全の両面から、その根幹に関わるエネルギー産業として、電池産業は今後も大きく成長することは間違いないものと思われる。

以下に主として二次電池、特に将来の発展が期待される小型リチウムイオン電池と電気自動車用電池について、その市場や開発動向について概説する。

## 2. 電池の種類

電池は大きく分けて化学電池と物理電池に分類されるが、一般に電池といわれるのは化学電池である。

化学電池は一回しか使えない一次電池と、充電することにより繰り返し使用できる二次電池（蓄電池ともいう）や、外部から燃料（水素など）と酸化剤（酸素など）を供給すれば発電できる燃料電池、充電により活物質溶液を再生して繰り返し使用できる二次電池の一種である再生型電池がある。

一般に乾電池といわれているマンガン乾電池やアルカリマンガン乾電池は代表的な一次電池であり、鉛電池やアルカリ電池、リチウムイオン電池は二次電池である。

図1に電池の種類を示す。

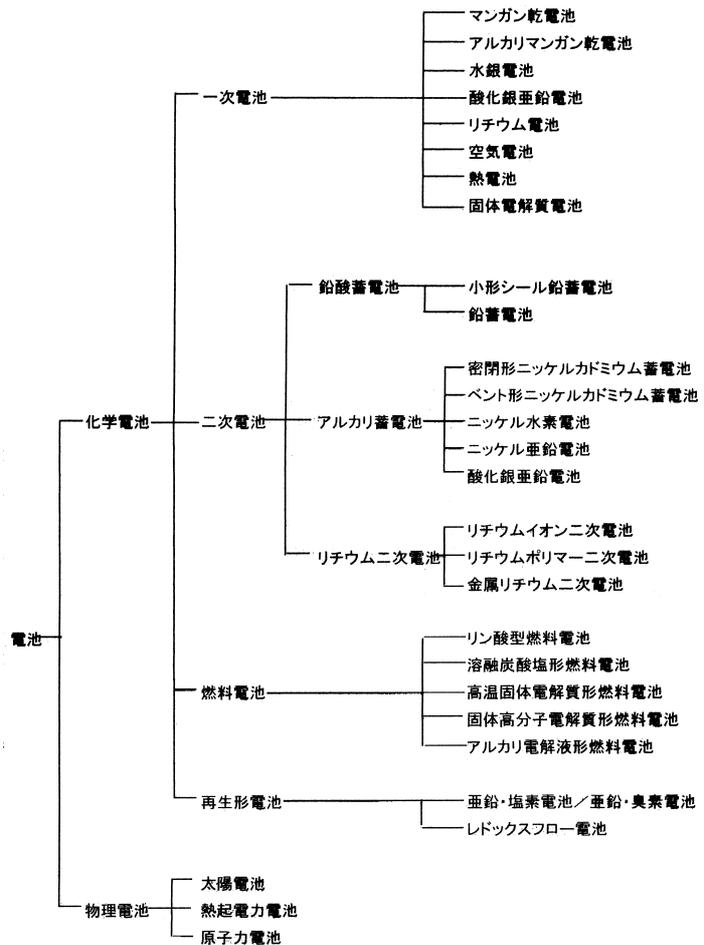


図1 電池の種類

### 3. 電池の市場動向

#### 3. 1 最近の各種電池の販売金額および販売数量の推移

表1に、1994年から1998年の5年間の各種電池の販売状況を示す。

表1 各種電池の販売状況

(1) 販売金額

単位：百億円

種類	年	'94	'95	'96	'97	'98
一 次 電 池		19.9	20.2	19.3	19.8	20.0
二 次 電 池	鉛 蓄 電 池	18.9	18.6	18.2	17.1	15.8
	アルカリ蓄電池	14.2	13.3	10.8	11.3	9.3
	ニッケル水素電池	7.3	9.3	8.9	10.3	9.9
	リチウムイオン電池	—	3.8	13.8	20.6	24.3
	小 計	40.5	45.0	51.7	59.2	59.3
合 計		60.4	65.2	71.0	79.0	79.4

(2) 販売数量

単位：億個

種類	年	'94	'95	'96	'97	'98
一 次 電 池		46.3	48.6	46.9	48.5	50.2
二 次 電 池	鉛 蓄 電 池	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
	アルカリ蓄電池	8.7	8.6	7.1	7.1	6.0
	ニッケル水素電池	1.9	3.0	3.6	5.8	6.5
	リチウムイオン電池	—	0.3	1.1	1.9	2.6
	小 計	11.2	12.5	12.3	15.3	15.6
合 計		57.5	61.1	59.2	63.8	65.8

表からわかるように、現在の電池の市場規模は、一次電池で約2000億円、二次電池で約6000億円、電池全体で約8000億円である。

一次電池と鉛蓄電池がほぼ安定した推移を示し、数量的にはアルカリ蓄電池が減少、ニッケル水素電池が増加傾向にある。

また、1995年から登場したりチウムイオン電池が著しく増加している。これは、特に最近の携帯電話やノートブックパソコン、VTRなどの小型ポータブル電子機器向けの小型電池の需要増大によるものである。

#### 3. 2 二次電池の販売金額および販売数量の長期的推移

図2は、二次電池の販売金額の長期推移、図3は、二次電池の販売数量の長期推移を示す。

金額に関しては1990年から1993年を境にして鉛電池やニッケルカドミウム電池（ニカド）が減少し、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池が増加している。特に、近年はリチウムイオン電池の伸びが目覚ましく、1998年にはリチウムイオン電池の販売金額は2400億円強となり、二次電池のなかでNo.1となっている。

数量に関しては、1992年からニッケル水素、1995年からリチウムイオンの伸びが大きく、逆に小型ニッケルカドミウム電池が減少している。これは、小型電池の勢力分野の大きな変動を意味し、小型ニッケルカドミウム電池が、より高性能なニッケル水素電池やリチウムイオン電池に置き換わっていることを示している。

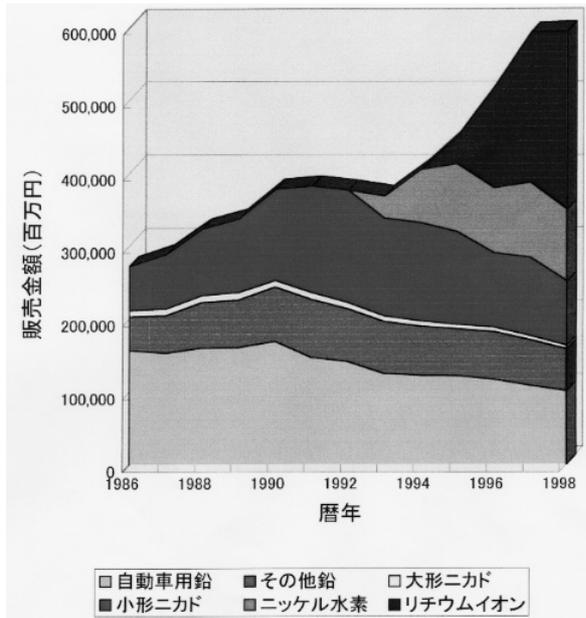


図2 二次電池販売金額長期推移  
(機械統計)

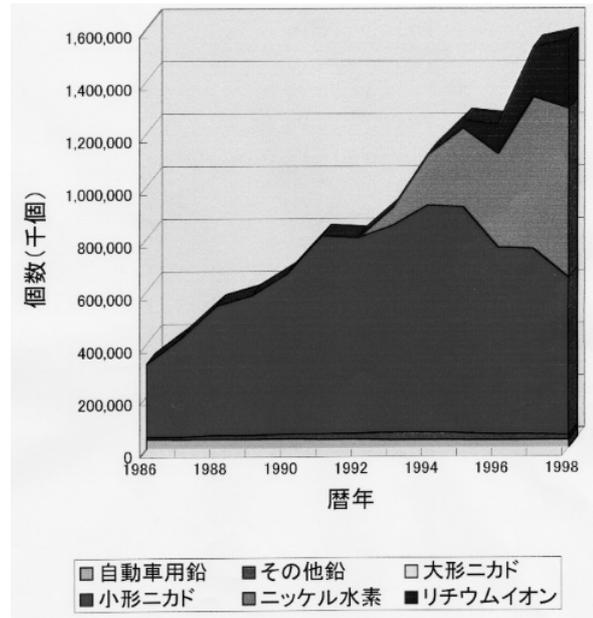


図3 二次電池販売数量長期推移  
(機械統計)

4. 小型リチウムイオン電池の開発動向  
4.1 各種二次電池のエネルギー密度

前述のように、リチウムイオン電池が最も著しい需要増大傾向を示しており、今後に大きな期待が寄せられている。それは、リチウムイオン電池のエネルギー密度が高いことによるものである。

エネルギー密度とは、単位重量または単位体積当りのエネルギー量を表し、Wh/kgまたはWh/lで示される。

図4に各種二次電池のエネルギー密度の比較を示す。

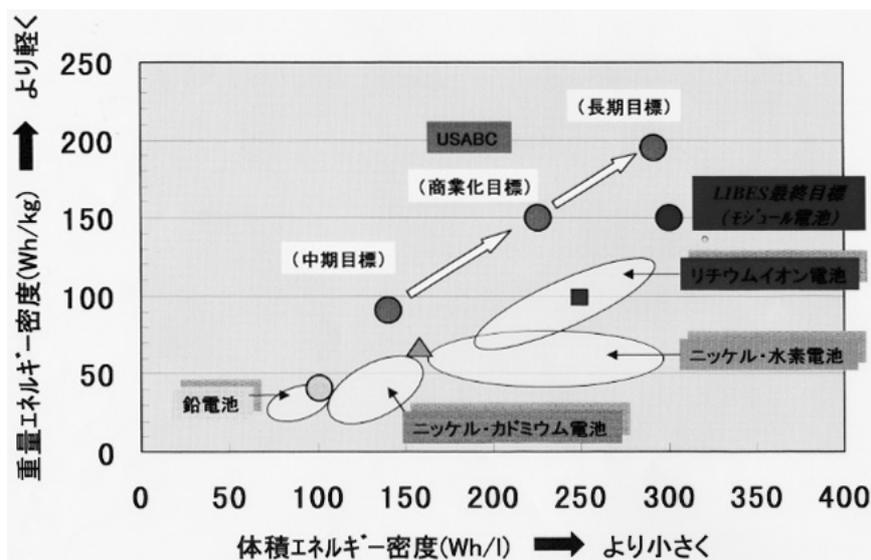


図4 各種二次電池のエネルギー密度

なお、図中のUSABC（United States Advanced Battery Consortium）およびLIEBES（The Lithium Battery Energy Storage Technology Research Association）は、それぞれアメリカおよび日本における電気自動車用電池の開発を目標としている国家プロジェクトである。

#### 4. 2 小型リチウムイオン電池の構造

現在市販されているリチウムイオン電池には、主として円筒型と角型があり、容量としては400mAhから3 Ahのものが圧倒的に多く、用途は、携帯電話、ノートブックパソコン、ポータブルVTRなどの携帯機器である。

代表的なものとして、600mAの角型リチウムイオン電池の構造を図5に示す。

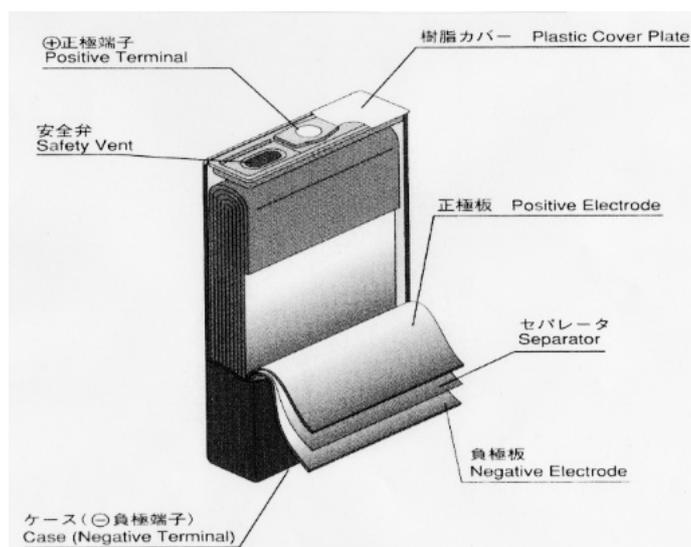


図5 角型リチウムイオン電池の構造

テープ状の、主としてコバルト酸リチウムからなる正極板と、カーボン（グラファイト）から成る負極板の間に、セパレータをはさんで長円状に巻いたものを、鉄製やアルミニウム製の金属ケースの中に入れ、正極端子と安全弁を備えたケース蓋を溶接封着している。電解液には有機液を用いており、ケースは負極端子を兼ねている。

#### 4. 3 小型リチウムイオン電池の開発課題

小型電池には、常により一層の小型軽量化が求められており、このため、開発の主課題は、高エネルギー密度化への取り組みである。

開発当初は、約70Wh/kg、210Wh/lであったエネルギー密度が、5年度の今日では約150Wh/kg、300Wh/lまで高まっている。更に、より一層のエネルギー密度の高度化を目指してはげしい開発競争がつづくものと思われる。

### 5. 電気自動車用電池の開発動向

#### 5. 1 電気自動車の特徴

大型電池の新しい用途として、近年特に話題を集めているものに電気自動車（以下EVという）がある。電気で動く自動車であり、当然使用する電池により車の性能が大きく左右される。また、電池に対する要求も、大幅な高性能化、大幅な低価格化等非常にきびしいものとなる。電池業界もEVに

は非常に大きな関心を持ち、EVを意識しての高性能、低コストの電池開発に精力的に取り組んでいる。

EVの特徴はつぎのとおりである。

- (1) 有害排出ガス（NO<sub>x</sub>、CO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>等）がない、または少ない。
- (2) 充電用エネルギーの多様化、クリーン化。
- (3) エネルギー効率がよく、省エネ化。
- (4) 負荷平準化——夜間電力の有効利用。
- (5) 騒音の軽減。

反面、一充電の走行距離が短いこと、高コストとなるなどの問題があり、EVの普及には、これらの問題の解決が不可欠である。

## 5. 2 ハイブリッド電気自動車

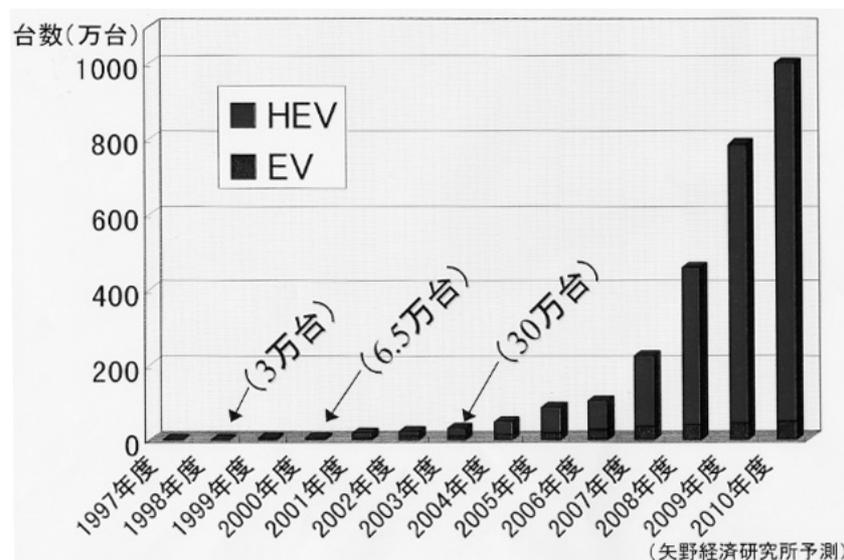
EVの、一充電の走行距離の不足と、高コストという問題を緩和し、環境への悪影響を改善し、省エネとしてガソリンの有効利用をはかる現実的な自動車として、ハイブリッド電気自動車（以下HEVという）がある。

動力源として、エンジンとモーターを併用するもので、エンジンはガソリンの消費が少ない効率の良い条件で使用し、他は電池電力でこれを補うことにより、環境汚染の防止と省エネをはかり、かつ、一充電の走行距離の不足を補い、また、電池もEVにくらべて小容量ですむため、コストもEVほど高コストにはならないメリットがある。

当面の普及は、このHEVが中心となるというのが一般的な見方である。

## 5. 3 EV・HEVの市場規模の将来予測

いろいろな調査機関や研究機関が、EV・HEVの市場規模の将来予測を公表している。その一例を図6に示す。



2010年EV/HEV車市場は、ワールドワイドで1,000万台規模に成長。内90%以上がHEVか。

図6 EV/HEV車市場規模予測の一例

多くの予測に共通しているのは、将来はきわめて大きな市場に成長する、ということぐらいである。どのようなスピードで普及していくか、についての予測はさまざま、これについては、今のところ不透明であるというしか言いようがない。

#### 5. 4 EV用電池の長所と短所

現在、EVまたはHEV用の電池として実用に供されているのは鉛電池とニッケル水素電池であり、また、近い将来実用化されるだろうといわれているのがリチウムイオン電池である。

この三つの種類の電池の、EV用電池としての長所と短所の要点のみの比較を表2に示す。

表2 EV用電池の長所と短所

電池の種類 [活物質：正極/負極]	EVに適用する際の長所と短所	
	長 所	短 所
密閉鉛電池 [PbO <sub>2</sub> /Pb]	低コスト 高信頼性	低エネルギー密度
ニッケル水素電池 [NiOOH/MH]	高エネルギー密度	高コスト 高耐高温度性
リチウムイオン電池 [LiCoO <sub>2</sub> /C]	高エネルギー密度	高コスト 高安全性

鉛電池の長所は、安価で信頼性が高く、原材料も豊富にあることである。欠点は、エネルギー密度が低いため、一充電走行距離が短いことである。

ニッケル水素電池の長所は、エネルギー密度が高いので一充電走行距離が長く、また、表には記載していないがサイクル寿命に優れていることである。欠点は、材料コストが高く、電池が現状では高コストになることである。

リチウムイオン電池もニッケル水素電池と同様である。

将来の、EV用電池としては、上記のほかに、燃料電池が有望視されており、国内外で精力的な研究開発が進められている。

#### 6. おわりに

電池の需要を大きく分けると、① 非常用電源、② 移動体のエネルギー源、③ 電力貯蔵装置 に分けることができよう。

① は、停電や災害発生時にその機能を発揮するもので、ビルの非常用やコンピューターの非常用電源として、これまでも重要な働きをしてきたし、その重要性はこれからも一層強まるであろう。

② に関しては、科学の進歩とともに、いろいろなものの小型軽量化が進み、移動体の量は飛躍的に増加している。それに応じて小型電池の需要も益々大きなものとなっていくと思われる。

③ に関しては、石油エネルギーの枯渇と地球環境保全のため、また、電力供給の面からは負荷の平準化が重要な問題であり、この用途は、むしろこれからの時代にきわめて重要なものとなるであろう。

このようなことから、数年前までは成熟産業といわれていた電池産業は、現在では成長産業といわれるようになり、電池業界は新しい市場に対応すべく、新種電池の開発、既存電池の高性能化に積極的に取り組んでいる。

## 新設研究室紹介

### 集積機能工学講座（鈴木研究室）

#### 「次世代へつながる電子デバイスの創製をめざして」

教授 鈴木 実

本講座では、異なる電子機能を有する異種電子材料を複合集積化することにより、新しいデバイス機能を創製することを主たる目的としています。これを受けて当研究室は今年4月に発足しました。

今日シリコンをベースとするコンピュータの発展は目覚ましく、集積回路の線幅は $0.1\mu\text{m}$ を切り集積度も速度も今なお進展しております。その反面、電力消費も大きくなり一般への急激な普及による環境への影響も一部に憂慮されています。また技術的にも微細化による量子効果が見え始め今後の発展に本質的な限界が迫ってきております。そこでシリコンの次に来るデバイスが研究の対象となりつつあります。ポストシリコンデバイスへは種々のアプローチがありますが、当研究室では多彩な電子機能を有する複合酸化物を対象として次世代のデバイス創製をねらっています。

複合酸化物はこれまで、誘電材料などの一部を除き、電子デバイスの立場からは十分な研究がなされてきたとは必ずしも言えません。また近年の高温超伝導物質の発見や巨大磁気抵抗物質の発見などに見られるように、新しい機能電子材料の未開の分野であると言えます。さらに高温超伝導の発現機構がまだ解明されていないように、物理的にも新しい現象がこれからも期待されます。このような物質を対象とした今日のテクノロジーによるデバイス化の研究は、新デバイスの創製につながるのみならず、この分野の物理の理解にも大きな進展を引き起こします。このような観点から当研究室では以下のような研究を展開する予定です。

#### [1] 高温超伝導体の固有ジョセフソン効果の研究

一部の高温超伝導体には、原子レベルで超伝導層と絶縁層が交互に積層され、物質自身がトンネル型のジョセフソン接合になっているものがあります。固有ジョセフソン接合と呼ばれるこの構造は微細加工することにより本来の特性が観察されます。そこでナノスケールの微細加工技術を用いた素子作製をベースとして高温超伝導のジョセフソン効果を研究し、デバイス応用に展開するとともに、得られた素子を用いてトンネル分光を行い、高温超伝導の発現機構解明に関係する重要な物性を研究します。

#### [2] マンガン系複合酸化物の研究

マンガン系複合酸化物の中には強磁性層と反強磁性層が交互に積層されて、それぞれの層のスピンを変えることにより大きな物理量変化が観察される物質があります。このような複合酸化物を用いて高密度で高速不揮発性メモリを構成することが可能性です。このようなメモリはリフレッシュする電力が不要なため電力消費が小さく将来期待されるものです。

#### [3] ジョセフソン接合配列からのテラヘルツ電磁波発生の研究

高温超伝導体では超伝導エネルギーギャップが従来の超伝導体に比較し10倍から30倍大きく、従来の超伝導体では吸収されて交流ジョセフソン効果が十分発現しなかったテラヘルツ(THz)帯の電磁波が対象領域に入ってきます。高温超伝導体の固有ジョセフソン接合の配列を用いて、THz帯電磁波の検出やコヒーレント放出の研究を進めたいと考えています。

将来は以上のようなデバイスの複合化により一層機能を高めた集積機能デバイスの構築へ展開したいと考えています。

## 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） 「先端 LSI の回路技術と設計技術の研究」

教授 小野寺秀俊

マルチメディアやインターネットなどに代表される現代の高度情報化社会は、集積回路を抜きにしては考えられません。集積回路は電子機器の高機能化、高性能化、低価格化を担うキーデバイスです。1959年に数個の素子の集合として誕生した集積回路は、今や1千万以上の素子を集積することが可能となっています。例えば、来春発売予定の新型ゲーム機に搭載されるLSIには、1050万個のトランジスタが集積化されています。これは、京都府総人口の約4倍の数です。このLSIは、1秒間に62億回の浮動小数点演算を実行しますが、これはスパコンの1CPUで実行できる演算量と同程度です。このように、集積回路の大規模化と高性能化は急速に進んでおり、エレクトロニクスシステム全体を1チップ上に実現する「システムオンチップ」が可能な時代となっています。

大規模化に伴い、新たな技術的課題が生じています。まず、このように大規模で複雑な回路を、いかにして設計すれば良いかという問題があります。全てを一から設計できません。既設計の回路を組み合わせて全体を設計する方法が必須です（設計再利用化技術）。また、配線における信号の遅延も深刻化しています。トランジスタの動作は速くなる一方、配線が細くなるため抵抗が増加し、配線での遅延時間が急増します。そのため、回路の各部をどのように配置し配線するかという物理設計により回路の動作速度が大きく左右されます。物理設計段階での最適化が重要になります（物理設計最適化技術）。また、微細化とそれに伴って電源電圧を下げることにより、製造プロセスのばらつきに起因する回路特性のばらつきが顕著に現れるようになってきました。特性のばらつきは歩留まりに影響します。ばらつきの予測技術や歩留まりの最大化を図る設計技術が重要です（製造容易化設計技術）。これら以外にも、LSI設計の本質的な問題として、どのような信号処理アーキテクチャが大規模集積化に適しているのかという検討も重要です（LSIアーキテクチャ）。

当研究室では、LSI設計に関するこれらの問題に対し、デジタル回路とともにアナログ回路も対象として幅広く取り組んでいます。現在、次のような研究を行っております。

1. LSI アーキテクチャ：低ビットレートの移動体通信を念頭におき、動画像をリアルタイムに圧縮/伸長するアルゴリズムとハードウェアの開発を行っています。機能メモリ型のアーキテクチャや並列ベクトルプロセッサアーキテクチャなどを検討し、実際にLSI化しています。
2. 物理設計最適化技術：システムLSI設計における性能最適化と設計短TAT化ならびに設計再利用の促進に向けて、ライブラリ自動設計技術（オンデマンドライブラリ）とそれをを用いた低消費電力化/高速化設計技術を研究しています。
3. 製造容易化設計技術：製造プロセスの開発にあわせて、必要十分な動作余裕を持つ回路を短期間に設計するため、プロセスばらつきのモデル化と、統計的特性解析ならびに設計最適化技術について研究しています。
4. アナログ回路再利用化技術：アナログ回路の集積化を容易にするためには、再利用可能なアナログ要素回路の開発が重要です。アナログ回路の再利用を図るためには、設計回路ではなく設計手法の再利用化と、製造容易化技術が鍵であると考えています。PLL回路を題材にとり、再利用可能な設計手法を検討しています。

また、大学や高専におけるLSI設計試作を支援する組織として、大規模集積システム設計教育研究センター（VDEC）が東大に設置されていますが、その近畿地区におけるサブセンターとしても活動しています。LSI設計用ライブラリや技術情報の提供をはじめ、試作LSIの評価装置としてLSIテストやEBテスト、集束イオンビーム装置などの設備を備え、LSI設計教育の高度化に貢献しています。

## シリーズ：研究内容紹介

このページでは、電気系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。（\*印は新設研究室）

### 電気系関係研究室一覧

#### 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（宅間研）
- 電力工学講座 電力変換制御工学分野
- 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
- 電気システム論講座 電力システム分野（上田研）

##### 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（藤田研）
- 量子工学講座 光子電子工学分野
- 量子工学講座 量子電磁工学分野

##### イオン工学実験施設

- 高機能材料工学講座**（山田研）

#### 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）
- 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）

#### エネルギー科学研究科

##### 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（吉川栄研）

##### 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（井上研）
- 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）

#### 超高層電波研究センター

- 超高層電波工学部門**（松本研）
- レーダー大気物理学部門（深尾研）
- 数理電波科学部門（橋本研）
- 超高層物理学部門**（津田研）

#### 京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー（KU-VBL）

## 研究室研究テーマ紹介

### 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室）

#### 「電磁界解析における並列処理に関する研究」

近年、CADシステムの普及などにより、実用的な電気機器（モーターやアクチュエータなど）の設計段階において、数値解析によるアプローチが重要となっています。最近の電磁解析分野では、3次元問題、非線形問題、過渡現象問題などの計算量の多い問題を扱う場合が多くなってきており、計算機にもその大容量性、高速性が求められています。これらの要請に対する解決策の一つとして並列コンピューティングがあげられますが、並列プログラミングは容易でないため、なんらかの並列化支援ツールが求められています。そこで、島崎研究室では、電磁エネルギー工学分野を対象とし、大規模並列有限要素解析を支援するシステムの構築や、並列化連立一次方程式反復解法ソルバの構築を行っています。

#### ①大規模並列有限要素解析支援システム

現在、電磁界問題を対象とした数値解析の多くは有限要素解析をベースにしており、大規模な連立一次方程式を解くことに帰着します。本支援システムでは、分散されたメモリ空間上にこの連立一次方程式の係数行列（剛性マトリクスと呼ばれる）を構築し、これを並列に解くための並列化コードを生成します。ユーザーは支援システムに対して、解析モデルの幾何的情報、境界条件、モデルの物理定数、解くべき方程式の記述を行います。これに対して支援システムでは、解析モデルの領域分割、未知変数の最適な番号付け、分散メモリに対応した剛性マトリクス生成、最適な並列化ソルバ選択などを行い、これらを統合した並列化コードをユーザーに提供します。ユーザーはこの並列化コードを並列計算機やPCクラスタ、WSクラスタといった、分散・並列計算環境において実行します。本システムでは、ユーザーとの情報交換をネット上でインタラクティブにできることを目指しています。

#### ②並列化連立一次方程式反復解法ソルバの構築

前者の研究は、大規模な有限要素解析を行うユーザーを指向したのですが、本研究は現在すでに逐次的な（PCやWSなどの1プロセッサでの）有限要素解析を行っているユーザーを指向したものです。即ち、これまでのコードのソルバ部を並列化ソルバ部に置き換えるだけで並列化を行うもので、その簡便さと汎用性を重視したものです。現在、CG法やGMRES法、BICGSTAB法といった代表的なソルバの並列化コードが完成しております。しかし、逐次型の解析コードにおいては、通常、これらのソルバに対して前処理が施されます。最も一般的な前処理である不完全コレスキー分解前処理は、その並列化が困難であることが知られており、なんらかの方策が必要となります。島崎研ではその方策の一つとして、有限要素法より生ずる疎帯係数行列を持つ連立一次方程式を対象とした場合について、ソルバ内で自動的に係数行列のオーダリングを変更して処理する手法を提案しています<sup>[1]</sup>。本手法を3次元渦電流解析に適用し、約22万自由度の問題に対して、22プロセッサ使用で12倍の速度向上を得ています（図2）。今後はより高い速度向上を得るための並列化アルゴリズムの開発や、Algebraic マルチグリッド前処理などの別の前処理手法を用いた場合について検討を行っていく予定です。

文献[1] T. Iwashita and M. Shimasaki, Proc. IEEE COMPUMAG'99, pp.728-729(1999)

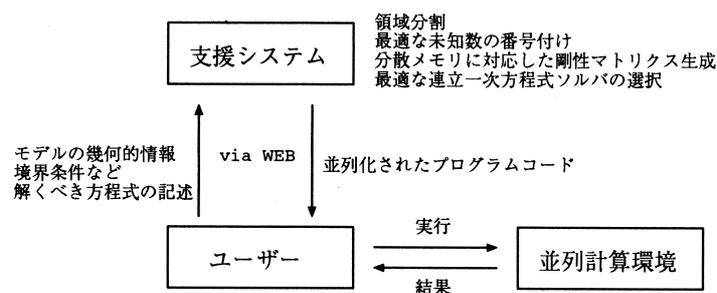


図1 並列化有限要素解析支援システム

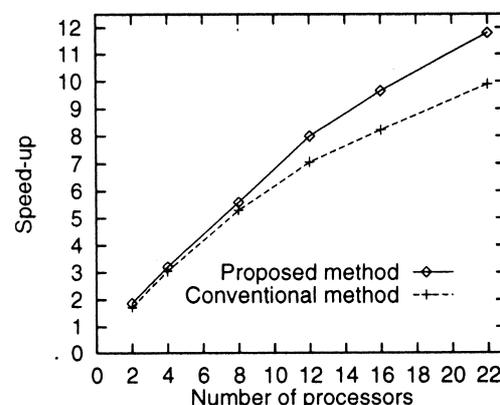


図2 並列化ソルバによる速度向上

電工学講座 電力発生伝送工学分野（宅間研究室）  
「電力系統における内部共振の研究」

わが国の電力系統は富士川を境として、大きく60Hzと50Hzの地域に分かれております。平成11年8月の最大電力は16,749万kWですが、60Hz地域がその54%を、50Hz地域が46%を供給しております。系統構成は地域によって異なり、60Hz地域は九州南端から富士山の麓まで東西に長く伸びた系統であるのに対し、50Hz地域は首都圏を中心とした網状の系統構成となっております。

図1に60Hz地域の系統構成を単純化して示します。500kVの連系線が東西に伸びており、一定区間ごとに発電機が送電線を介してつながっています。母線の矢印は負荷ですが、通常、発電した電気は近くの地域で消費されます。しかし、電力会社間の電気の融通には連系線が用いられ、現在は西から東に向けて電気が流れています。内部共振というのは電力系統の動揺が、動揺形態（モード）の相互作用のために拡大する現象です。

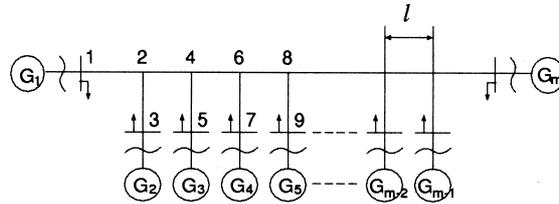


図1：60Hz地域の系統構成

ご承知のように、発電機の回転子は一定の速さで回転しています。火力発電機ならば1分間に3,600回転します。すべての回転子が同じ速さで回転している状態は、ちょうど、高速道路ですべての車が時速90km（少しスピード違反）で走っているようなものです。車と車の距離は一定に保たれ変化しません。車の車間距離は、発電機では回転子の角度差に相当します。しかし、送電線に落雷などがあると、発電機の回転子角が動揺します。その動揺には発電機の相互作用により、図2のような一定の形態（モード）があります。モード1では発電機が東西に分かれて動揺し、モード2では中央と端に分かれて動揺します。

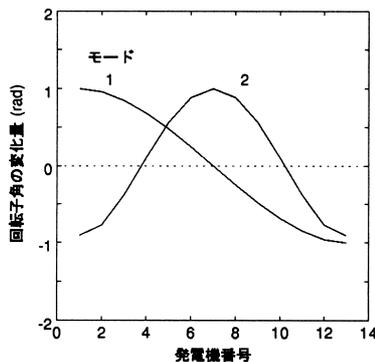


図2：動揺の形態

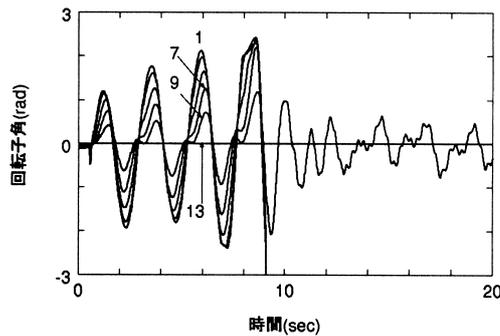


図3：内部共振の解析例

モード1は長周期動揺とよばれ、60Hz系統全体の安定性を左右する重要なモードです。通常、各モードは安定であり、時間の経過とともに動揺は減衰していきます。ところが、動揺の振幅が大きいところでは、二つのモード間に相互作用が生じ、そのためにモードが不安定になって動揺が発散する現象が起きます。内部共振とよばれる現象です。図3は関西電力の大形シミュレータAPSAを使って解析した結果です。本研究室では、この現象についてその物理的原因や抑制方法など基礎的な検討を行なってきました。また、電気学会が作成した詳細な60Hz系基幹系統モデルにより、内部共振が現れることを確認しています。今後は50Hz系についても解析を行なう予定です。

## 電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研究室） 「伝送線路の事故点検出システムの研究」

### 1. はじめに

電力ネットワークでは落雷や地絡事故によるサージの発生、またコンピュータ回路におけるクロストークなど集中定数回路の理論では解決できない問題が分布定数回路(伝送線路)には数多く存在している。当研究室では、数学の方で盛んに研究されているウェーブレット変換を用いると伝送線路における地絡事故点が極めて高速かつ高精度で検出できることを理論面から明らかにした。最近この理論的成果のハードウェア化に着手した。すなわち、ウェーブレット変換をハード化し、地絡事故点を極めて高速にかつ高精度で検出できるシステムを試作した。ここではこの事故点検出システムの概要を紹介する。

### 2. 試作したウェーブレット変換プロセッサによる事故点検出システム

ハードウェア設計CADであるPARTHENON（本学情報学研究科中村行宏教授が開発）を使用し、SFL言語を用いた動作記述によりウェーブレット変換プロセッサと事故点検出プロセッサを設計し、FPGAを用いてハードウェア化している。

システムの構成は図1のようになっている。計測電圧波形はAD変換され、ウェーブレット変換プロセッサに常時転送される。ウェーブレット変換プロセッサはこの入力データを変換し、各レベルに分解する。分解されたデータはレベルごとに用意された事故点検出プロセッサが受け取り、自己相関を元にして得られた関数値が設定値を越えたときに、CPUに対して割り込み信号を送る。UNIX上の制御システムは、割り込み信号を受けて事故点検出プロセッサからデータを読み出し、画面上に位置を表示する。データ転送は高速伝送が可能なPCIバスを使用している。

### 3. 実用化へ向けて

現実のデータの取得が困難なので、伝送線路を波動方程式で表現し、地絡事故時の送電端のインピーダンスの電圧波形を数値逆ラプラス変換によって求めている。この方法により長さ100kmの線路で地絡を起し、事故点の位置検出に要した時間は最大で1ミリ秒程度である。現在の超高压送電ネットワークは事故が起こってから2乃至3サイクルで事故線路を判定し無電圧にしている。これは一見早いように思えるが、関西地方で言えば事故後34ミリ秒から51ミリ秒かかっていることになる。これに比べれば、このシステムでは極めて高速に事故点検出ができる。この検出法が実用化されれば電力ネットワークの保護システムの動作は極めて高速化されることになる。様々な問題点に直面すると考えられるが、それを克服することによって実用化されるものと思われる。

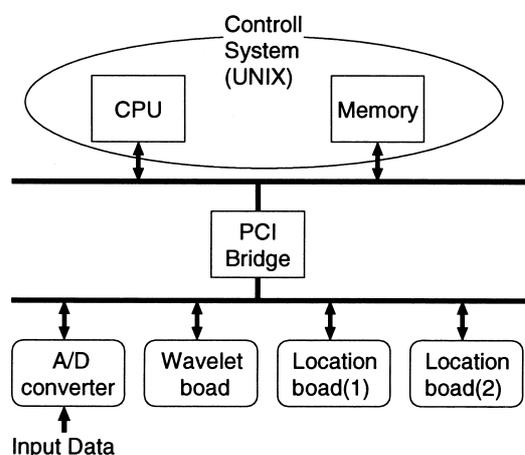


図1：システムの構成



図2：事故点検出システム

## 電子物理学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

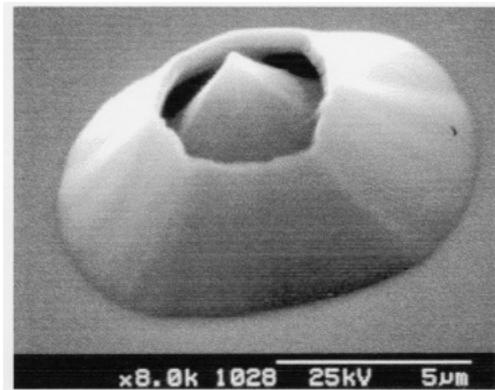
### 「真空マイクロ・エレクトロニクスのための極微電子源に関する研究」

真空マイクロ・エレクトロニクス分野とは、超LSI作製プロセスやマイクロ・マシーニング分野で用いられている光（電子ビーム）露光法、ウエット・エッチング、ドライ・エッチング、薄膜形成などの微細加工法を駆使して、現在の半導体素子とはほぼ同寸法であるミクロン寸法の真空電子デバイスを開発する分野のことです。このような極微真空電子デバイスをマイクロ・バキューム・チューブ（極微真空管）と呼ぶこともあります。それでは、極微真空電子デバイスができると、どのようなことが期待できるのでしょうか。

まず、真空中の電子は半導体中の電子のように格子との衝突をせずに進むので、同じ加速電圧でも10倍から100倍早いスピードで電極間を走行します。したがって、極微真空電子デバイスは半導体より10倍から100倍高速で動作できることになり、テラ・ヘルツ（ $10^{12}$ Hz）デバイス実現への期待が出てきます。真空デバイスですから、大電力動作にも強く放射線などにも誤動作しません。また、ミクロン寸法の極微電子源が実現できると、次のような新しい領域が開かれます。平面上に極微電子源を多数配列し、その前面に蛍光面を配置すれば、厚さが1 - 2 mm程度の超薄型のディスプレイができます。このようなディスプレイは、ブラウン管と同じ優れた特長を備えていますから、液晶のように視野角が狭く応答速度が遅いとか、PDPのように輝度が低いといった欠点はありません。次世代のフラット・パネル・ディスプレイとして大いに期待されています。さらに、2010年頃の超LSIのデザイン・ルールは0.05ミクロンが見込まれていますが、それに対応できる技術としてマルチ極微電子源を用いた電子ビーム露光が注目されています。このように、真空マイクロ・エレクトロニクスは、次世代に向けて数多くの新領域を生み出しつつある分野です。

この真空マイクロエレクトロニクス分野における最重要課題は、安定な極微電子源の実現です。普通、電子源といえば、タングステンなどの耐熱金属を加熱することにより得られる熱電子放出によるものを考えますが、極微電子源ではこの方法は使用できません。エミッタ、ゲート、アノードなどの電極が絶縁膜でつながっているため、エミッタだけを独立して昇温することができないからです。したがって、昇温不要で微小領域から電子放出が可能な電界放出陰極または薄膜型陰極が用いられます。研究室では、極微電子源として主として電界放出エミッタ（アレイ）を取り上げ、安定な電子源の実現に向けて研究を進めています。

電界電子放出量を決める主要な要因は、エミッタ材料の仕事関数と表面形状です。電子放出面にガスが吸・脱着すると局部的に仕事関数が変化して雑音の原因になります。電子放出面にイオン衝撃があったり原子が表面をマイグレーションすると表面形状が変わり電界集中の程度が変化して、やはり雑音の原因になります。研究室では、フィールド・エミッタから発生する雑音量にはエミッタの仕事関数と相関があり、仕事関数が低いほど雑音量が少ないことを明らかにしてきました。したがって、雑音の少ない安定なフィールド・エミッタ材料は、低仕事関数で、マイグレーションが少ない高融点で、イオン衝撃に耐える強い原子間結合をもつものによいことになります。研究室では、フィールド・エミッタ材料として最適な材料を探索するために、イオンビーム（アシスト）蒸着法を主として用いて種々の新材料を作製し、それらの電界放出諸特性を測っています。



写真：作製した極微電子源の例

## 機能物性工学講座 半導体物性工学分野（松波研究室）

## 「電子デバイス応用をめざしたⅢ族窒化物半導体の結晶成長の研究」

Ⅲ族窒化物半導体は、可視短波長～紫外領域の発光デバイスが実現できる材料として近年大きな注目を集めている。一方、この材料は、大きなバンドギャップ、高い電子の飽和ドリフト速度という物性を持つので、パワーデバイスへの応用を考えた場合にも、SiやGaAsという既存の半導体が物性の限界で及ばない領域に対して、大きなポテンシャルを持っている。

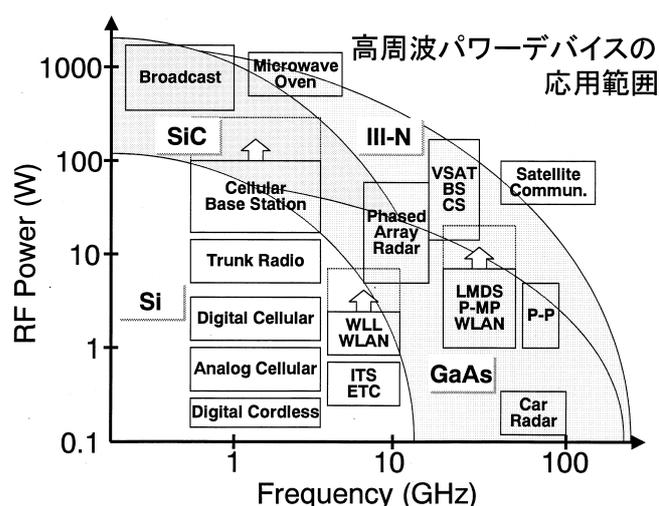
本研究室では、長年にわたりデバイス応用を目指してワイドバンドギャップ半導体シリコンカーバイド（SiC）の結晶成長およびデバイス提示の研究を進め世界をリードしてきた。SiCは大きなバンドギャップ、高い飽和ドリフト速度という特長に加え、酸化プロセスによりSiO<sub>2</sub>が形成可能であり、Siで大成功を取ってきたMOSデバイスへの展開ができるので、低損失パワーデバイスとして熱く注目されている。

一方、Ⅲ族窒化物半導体は、酸化プロセスは使えないものの、AlNとGaNが全域で固溶体を形成するため、バンドギャップエンジニアリングが可能であるという特長があり、最近のマイクロ波帯の高周波デバイスで商業的にも飛躍的な発展を遂げている放送・通信用ヘテロ電界効果トランジスタ（HFET）への展開が可能であるという利点がある。

それぞれの特色からSiCとⅢ族窒化物半導体は、使用用途に応じた住み分けがなされると予想されるが、研究という観点では共通する考え方やアプローチも少なくない。そこで、本研究室では、HFET実現のために必要となる原子層レベルでの構造制御、不純物制御が可能である分子線エピタキシャル成長法に着目し、最終的には高周波パワーデバイスへの応用も視野に入れた、高品質Ⅲ族窒化物半導体結晶成長の実現を目指した研究を行っている。

実験には、MBE、XPS/UPS、FIB/FEBシステムが真空トンネルにより結合された装置を使用しており、XPS/UPSによる成長層表面のその場分析や、FIB/FEBによるその場加工が可能になっている。研究のスタートは4年ほど前であり、日は浅いものの、有機金属Ga原料を用いることで準安定相である閃亜鉛鋅構造型のGaNを優先的に成長できることを見出した。安定相であるウルツ鋅構造に対して閃亜鉛鋅構造は、結晶構造の対称性の高さに基づくいくつかのメリットを有しており、未知の可能性が期待できる。また、結晶成長のメカニズムとしても非常に興味深く、SiCにおけるポリタイプ制御との共通点もありそうだということが最近の研究から分かってきた。

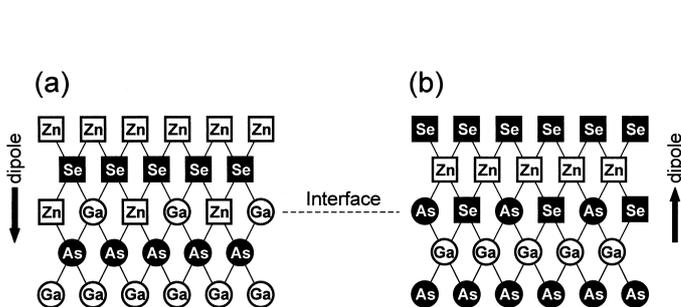
また、最近では、研究室における長年のSiCに関する研究成果を生かすべく、Ⅲ族窒化物とSiCとの融合による高性能デバイスの実現を目指した研究に着手している。なかでも、AlNはSiCとは周期律表で隣同士に位置しているため、格子定数が近く、親和性も高い。SiC上へのAlNの結晶成長が鍵になると考えられる。SiC上のAlNは、SiCデバイスという観点からは、表面パッシベーション膜や絶縁膜としての利用の可能性が、GaN系デバイスという観点では、熱伝導の非常によい基板として、高周波パワーデバイスの電力密度の向上への活用が期待される。



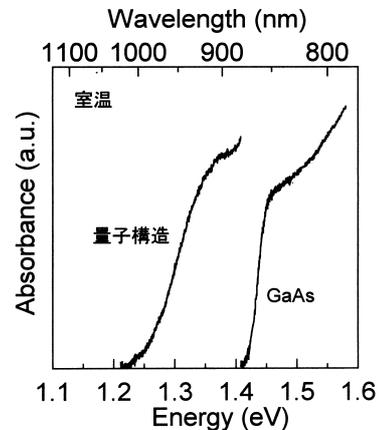
量子工学講座 光材料物性工学分野（藤田研究室）  
 「価電子不整合系半導体ヘテロ構造における物性制御」

レーザーダイオードをはじめ現在の半導体光デバイスの多くは、異なる半導体を積層したヘテロ構造を基本構造としている。ヘテロ構造を用いることにより、光やキャリアをある特定の半導体中に閉じ込め、高い発光効率などを実現することができるためである。これまで、高品質なヘテロ構造を作製するためには、格子定数や価電子の整合を取ることが重要であると考えられてきたが、これに対して本研究室では、格子不整合、価電子不整合、結晶構造不整合などいくつかの不整合系に関する研究を行っている。不整合系には整合系にはない特徴があり、それを活かすことで、新しいデバイスの基礎となりうる特性を開発できるのではないかと考えてのことである。ここでは、価電子不整合系に関する研究を紹介する。

ヘテロ構造の特性を決定する要因のひとつは、ヘテロ界面に生じるバンド不連続量であるが、この物理量は、GaAs-Al(Ga)As系に代表される従来型の、同族の半導体材料によって構成された（つまり、価電子整合系）ヘテロ構造では一定値であり、材料の選択をした時点でバンド不連続量の設計の余地は残されていなかった。これに対して本研究では、II-VI族半導体のZnSeとIII-V族半導体のGaAsによる価電子不整合系ヘテロ構造という新しい構造に注目した。界面に生じるZn-AsやGa-Seといった価電子不整合結合（オクテットでない結合）を積極的に利用したバンド不連続量の人為的な制御を達成し、デバイス設計に新たな自由度を与えることが目的である。その原理を図1に示した。電荷の過不足を持った不整合結合間で電荷が移動するため、結合の相対的位置関係によって界面双極子の向きが反転し、それによってバンド不連続量が変化するのである。このことは逆に、界面での原子位置を制御することができれば、バンド不連続量を制御できる可能性があることを意味している。本研究では、有機金属気相成長法によってヘテロ構造を作製したが、界面での原料の切り替えタイミングを詳細に検討することにより、GaAs上のZnSe、ZnSe上のGaAs、いずれの構造においても、価電子帯のバンド不連続量を0.6から1.1 eVの間で制御することに成功した。[J. Appl. Phys. 82,2984 (1997), 85, 1514 (1999)] さらに、この結果をふまえ、界面でのバンド不連続量を制御しながら、ZnSe、GaAs極薄膜を積層した量子構造を作製し、その光吸収特性を測定した。GaAs量子井戸層の両側でバンド不連続量を異なった値にすれば、井戸内に電界が内包され、実効的な禁制帯幅が小さくなると期待される。禁制帯幅はデバイスの発光波長などを決定する重要な物理量であるから、バンド不連続量の制御を通じて禁制帯幅を制御することの意義は大きいと考えている。光吸収端は禁制帯幅と強い相関を持っているので、これを測定することにより、禁制帯幅変調に成功しているかどうか判断することができる。図2に測定例を示す。参照用に示したGaAs単層膜と比較して量子構造では吸収端が低エネルギー側にシフトしており、確かに禁制帯幅の変調が起こっていることが確認された。また、理論的に検討したところ、ほぼ設計どおりの変調が生じていることもわかった。[Phys. Rev. B, (印刷中)] 本研究では、対象をZnSe-GaAs系に絞ったが、ここでの結果は、ZnS-GaPなど他の価電子不整合系にも普遍的に拡張できる内容であると考えている。



図：1 バンド不連続量制御のモデル



図：2 ZnSe-GaAs量子構造の吸収測定例

## 高機能材料工学講座（山田研究室）

### 「クラスターイオンビームのラテラルスパッタ特性」

数千個の原子の集団からなるクラスターイオンビームと固体表面との相互作用を研究している。このような研究の中で、単原子イオン照射の重ね合せでは得られない非線形照射効果を見出した。また、表面が平坦化されるラテラルスパッタリング現象を見つけた。このラテラルスパッタ特性は、新しいナノスケールの材料プロセスとして応用展開が可能である。ここでは、表面加工プロセスにおけるクラスターイオンビームのラテラルスパッタ特性の研究成果について述べる。

#### 1. 研究の背景

デバイスの高密度、高集積化に伴い、プロセス技術への要求がますます厳しくなっている。特に、ナノスケールの電子デバイスの製作においては、イオン照射時の電荷蓄積によるデバイスの破壊、照射による基板表面の結晶破壊などが重要な問題になっている。また、デリケートな光学薄膜形成の分野では、薄膜の特性はもちろん、付着力、表面・界面特性の改善が望まれている。さらに、従来の単原子イオンビームの照射では、照射に伴い表面の凹凸が増加し、微細加工が困難になっている。このような状況の中で、低エネルギーで高速スパッタ加工が可能で、しかも照射損傷の少ない表面加工が望まれている。

#### 2. 研究の成果

比較的サイズの大きなクラスターイオンを固体表面に照射すると、多体衝突効果のために、入射原子は基板に平行な運動成分を得て基板表面原子を放出させ、高効率のスパッタ作用を示す。また、クラスターイオンでは、低エネルギー照射効果により、照射損傷の少ない表面加工が可能である。

図1はクラスターイオン照射による表面相互作用を示す。クラスターイオン照射特有のラテラルスパッタ効果によって、原子サイズの超平坦面形成が可能になる。この効果は、スパッタ粒子の角度分布の測定や分子動力学法による計算機シミュレーションによって、実験的および理論的にも明らかにしている。また、図2はダイヤモンドの表面平坦化の一例を示す。ダイヤモンドの他に、SiCなどの高硬度炭素系材料、Cu、Au、Niなどの金属、ステンレスなどの合金、さらに多結晶Siなどの半導体でも同様の結果が得られている。

今後、クラスターイオンビームによる高効率スパッタ作用、原子サイズの超平坦面形成作用は、ますます要求される材料プロセスとして、イオンビームの応用分野を広げ、ナノスケールの表面加工プロセスとして展開できると思われる。

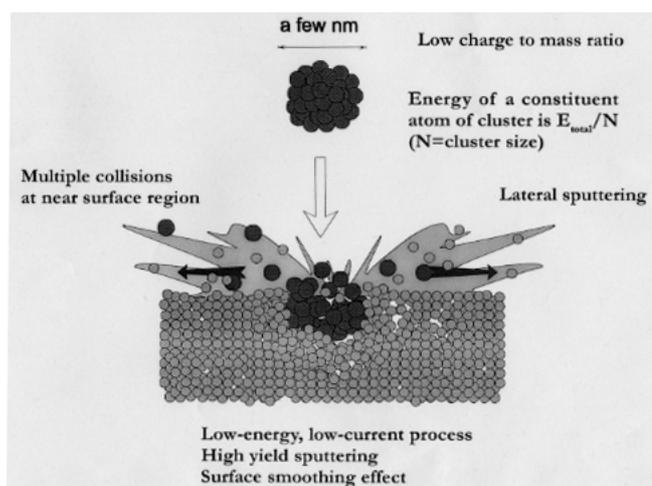


図1 クラスターイオン照射による表面相互作用

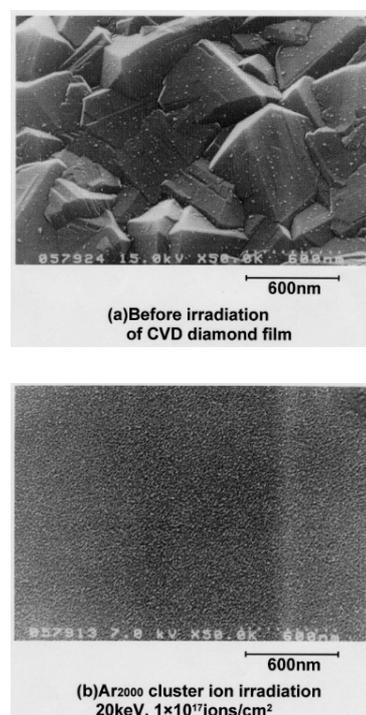


図2 Arクラスターイオン照射前(a)および照射後(b)のCVDダイヤモンド薄膜表面のSEM像（表面粗さ：照射前40nm、照射後8nm）

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）  
 「視点固定型パン・チルト・ズームカメラ」

1. 背景

近年、セキュリティ・モニタリングをはじめ、遠隔会議・講義さらにはTVスタジオの自動化のために、首振りビデオカメラをコンピュータで自動制御するシステムの開発が盛んに行われている。本研究では、(1)高精度、高解像度の360°全天空全方位パノラマ画像の撮影 (2)移動対象の自動追跡撮影のための首振りカメラとして視点固定型パン・チルト・ズームカメラを開発した。

2. 研究成果

一般に首振りカメラでは、パン：水平方向の回転、チルト：垂直方向の回転、の機能を備えており、異なった方向を向けて撮った複数枚の画像を張合わせてパノラマ画像を合成したり、対象の動きに合わせてカメラを回転させることによって移動対象を自動的に追跡しながらその映像を撮ることができる。しかし、通常的首振りカメラでは、回転によって画像上の対象の見え方が変化する（運動視差が生じる、図1左）ため、(1)カメラを回転させながら撮影した画像群を継目無く張合わせたり、(2)画像処理の結果に基づいてカメラの回転制御を行うには複雑な計算が必要となる。

運動視差が生じるのは、カメラの回転中心と画像の投影中心がずれているためで、この両者を一致させれば簡単な画像処理によって上記の(1)(2)が実現できるようになる（図1右）。

本研究では、(1)カメラの回転中心と画像の投影中心を一致させるためのカメラキャリブレーション法、(2)任意のビデオカメラを搭載でき視点固定型パン・チルトカメラを実現するためのカメラ雲台、(3)カメラを回転させながら撮影した画像群から1枚の全天空全方位パノラマ画像を高速に合成するソフトウェア（図2）、(4)市販の首振りビデオカメラを視点固定型パン・チルト・ズームカメラとして利用し移動対象を実時間で自動追跡するカメラシステムを開発し、その実用的有効性を示した<sup>[1][2]</sup>。

参考文献

[1] 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司：視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No.6, pp.1182-1193, 1998  
 [2] 松山 隆司, 和田 俊和, 物部 祐亮：視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた実時間対象検出・追跡, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.8, pp.3169-3178, 1999

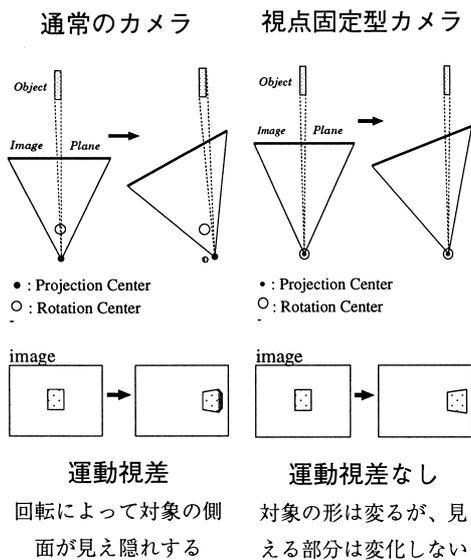


図1：視点固定型カメラ

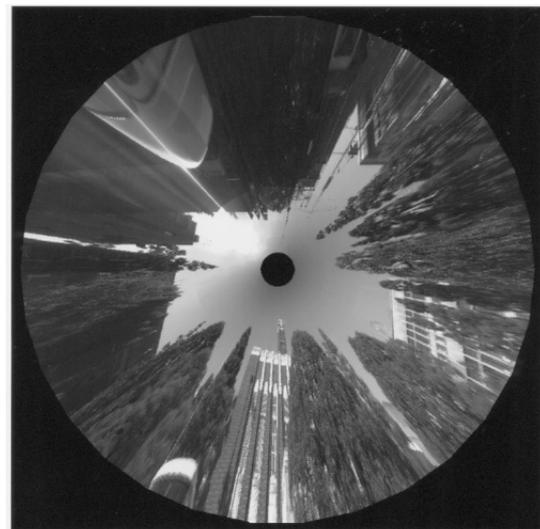


図2：京大時計台の全天空全方位パノラマ画像

## システム情報論講座 画像情報システム分野 (英保研究室) 「核医学心筋画像と冠動脈造影像の重ねあわせと表示」

本研究では、心筋梗塞に代表される虚血性心疾患の診断支援のために、SPECT (Single Photon Emission CT) などの核医学心筋画像と冠動脈造影像との重ね合わせ表示を行う。

核医学心筋画像は、患者の体内に注入した放射性薬剤の分布をCTの原理により画像化することにより得られる。空間分解能は低いものの、2次元断面像を積み重ねた3次元画像である。詳細は省略するが、心筋の元気さを表した画像が得られる。図1にSPECTによる心筋画像の一例を示す。図1には、左心室心筋を輪切りにした断面像 (心短軸断面) の系列を示したが、臨床では、図2のようにして作成される Bull's Eye Map という表示形式が好んで用いられる。これは、心尖 (しんせん = 心臓の先の尖った部分) を中心とした極座標  $(r, \theta)$  上に心筋を展開表示したものである。空間情報の一部を失うが、心筋全体を一覧できるという利点がある。

冠動脈造影像は、心筋に栄養を送る冠動脈の形態を調べるためにX線により撮影される2次元の投影像である。図3に冠動脈造影像の一例を示す。虚血性心疾患は何らかの原因でこの冠動脈に狭窄 (きょうさく) を生じ、心筋への血流が不足することにより引き起こされる。重度の狭窄により心筋への血流が遮断されるなど、最悪の場合には心筋は回復不能なダメージを受ける。これが心筋梗塞である。従って、狭窄の程度と心筋の元気さとは密接な関連があり、治療計画の上で冠動脈造影像が必要不可欠である。

通常の診断過程では、医師はこれらの画像を別々にあるいは並べて観測することにより、冠動脈の形態の変化と心筋の元気さとを対応付けて判断を下す。しかしながら、冠動脈の3次元の走行に個人差があることや、冠動脈造影像が2次元投影像であるなどの理由により、この作業は簡単ではない。本研究では、冠動脈造影像と核医学心筋画像の空間的な位置を合わせた重ね合わせ画像を作成して診断過程を支援する。

臨床的な理由により、これらの画像の位置合わせに利用できる情報にはさまざまな制限がある。このため本研究では、撮影された画像に映し出されている情報や医学的解剖学的知識を主として利用することにより重ね合わせを実現する方法を開発した。具体的には、冠動脈が心筋の表面を走行していること、心筋の短軸断面がほぼ円輪で近似出来ることなどを利用している。図4に最終結果の重ね合わせ像を示す。このような表示方法の有用性が医師により確認されたので、現在、臨床での実用化を目指したシステムを開発中である。また、当研究室ではこの例以外にも、複数医用画像の重ね合わせとそれを利用した解析に関する研究を進めている。

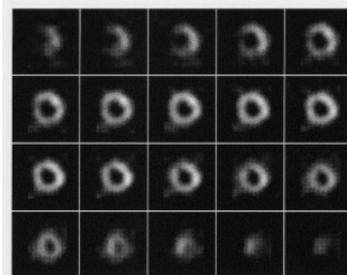


図1 SPECT像 (心短軸断面像)

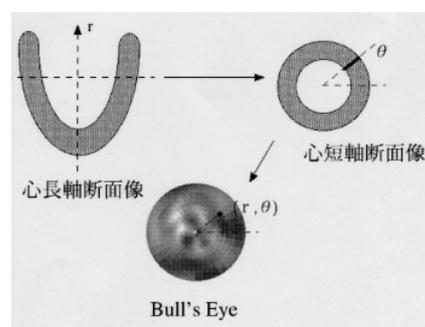


図2 Bull's Eye Mapの作成法

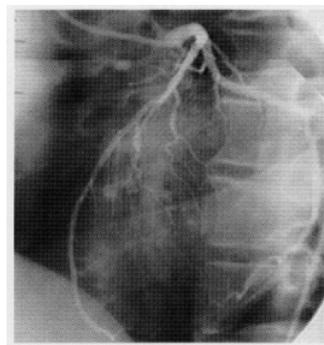


図3 冠動脈造影像

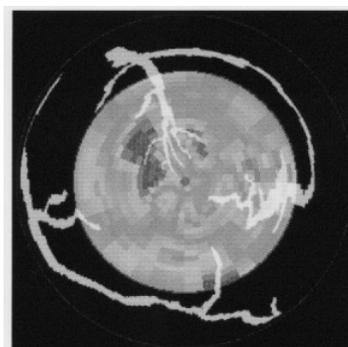


図4 冠動脈造影像と核医学心筋画像の重ね合わせ表示の例

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研究室） 「動作開始電流調整可能な超伝導限流器の研究」

本分野は、1996年に発足した新しい研究室である。先進的なエネルギー機器における工学的極限状態での熱科学的諸問題の解決からその応用を中心として電気工学と機械工学の境界領域を研究領域としている。具体的には、核融合炉のダイバータから電子機器までにおける高密度除熱、核融合炉用やエネルギー貯蔵用大型超伝導マグネットの液体ヘリウムあるいは超流動ヘリウム冷却特性、高温超伝導線材の液体窒素冷却特性、及び超伝導マグネットのエネルギー機器応用などに関する研究を進めている。本稿では、その内の一つとして超伝導故障電流限流器について簡単にご紹介する。

**研究の背景と概要** 電力系統は、大容量化・大規模化が進んでおり、系統安定度のため系統連系を進めると短絡容量が増え事故時の遮断器の負担が大きくなるというトレードオフの間隙をぬった系統設計が行われている。この問題を解決する機器としての限流器は、常時運用時には、インピーダンスを持たないが、系統事故時には事故電流がある値を超えるとインピーダンスを発生しこれを限流するものである。特に、超電導・常電導相転移を利用した故障電流限流器は、常時インピーダンスをほぼゼロとできることと過電流の検出機構が要らないなどの特長を持つ。

限流器に要求される仕様について検討を行った結果、動作開始電流値に比較的高い精度が必要な場合があることが明らかとなった。この要求を満足するために動作開始電流値の調整可能な超電導限流器を提案し、試作限流器を用いて基礎的な動作検証実験を行った。

**動作開始電流調整可能な限流器** 提案する超電導限流器の基本構造は、2つの超電導コイルを同軸円筒状に配置した変圧器型超電導限流器であり、内側が1次コイルで系統に接続され外側が2次コイルで両端は短絡されている。1, 2次コイルは、電氣的に絶縁されているので、電圧階級なども別々に設計でき、限流インピーダンスは1次コイル、動作開始電流値は、2次コイルのS-N転移電流値と1次・2次コイル間の磁氣的結合によって決まる。試作限流器の断面図を示す。2次コイルのみを図-右に示すようにスライドでき、動作開始電流値を微調整できる。大幅な変更では、2次コイルのみを交換することで対応できる。

待機状態では1, 2次コイルともに超電導状態にあり、系統側から見た限流器のリアクタンスは小さい。系統事故時には2次コイルのみが常電導転移して系統側から見たリアクタンスが増加し故障電流を抑制する（動作状態）。この時、1次コイルは超電導状態に保たれているように設計する。ある大きさの回路電流 $i_{FCL}$ が流れている状態で、模擬事故を起こして試作限流器を動作させ、過渡状態での動作開始電流値を測定した。波形の例を図に示す。試作限流器は、 $i_{FCL}$ がスライド距離に応じた動作開始電流値に達したときにシャープに限流を開始していることが確認された。また、事故を解消したあと電流遮断による超電導限流器の復帰特性を測定した結果、100ミリ秒以下の電流遮断で待機状態に復帰することを確認した。抵抗型限流と異なり、限流中の熱発生が小さいので良好な復帰特性が得られていることが確認された。これは、現用遮断シーケンスにおいても十分短い時間での動作である。

**発表論文** 1] K. Fujikawa, et al.; Proc. of 15th International Conference on MT-15, pp.571-574, Sep. 1998, Science Press, ISBN 7-03-006720-7 2] K. Fujikawa, et. al.; IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.9, No.2 pp.1351-1354 3] Y. Shirai, et. al.; IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.9, No.2 pp.1381-1394

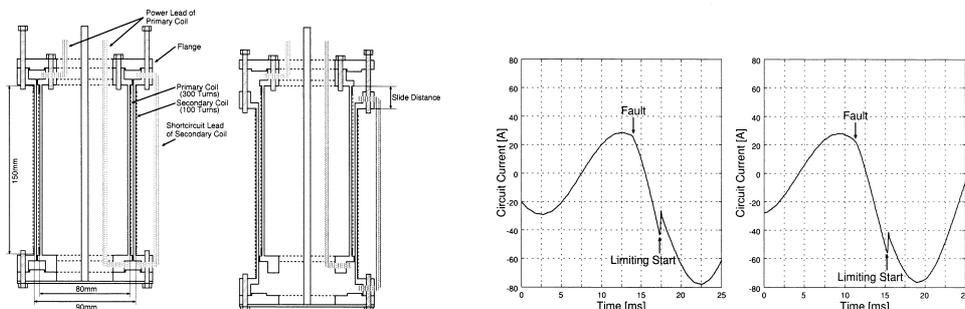


図 試作限流器の断面図（スライド無し[左]、有[右]）とそれぞれの実験波形

## エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野（井上研究室） 「放射ダイバータの研究」

自己点火条件に達した核融合炉では、核融合により生成されるアルファ粒子によるプラズマ加熱パワーと制動輻射などの系外への損失パワーが等しくなります。例えば、国際協力で設計された国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER）では、アルファ粒子加熱パワー300MWの内、約100MWがプラズマ中心部よりの制動輻射やシンクロトロン放射で放出され、残りは周辺から逃げる粒子により、ダイバータへと排出されます（図1）。しかしながら、このままではダイバータへの熱負荷が過大であり、長時間運転での工学的信頼性を確保するためには、熱負荷を5MW/m<sup>2</sup>以下（ITERの場合、合計で50MW以下）に低減する必要がありますとされています。この目的で、原子番号の大きいXe, Ar, Krなどの元素を、ダイバータ周辺やプラズマ表面に注入し、線輻射パワーを100MW程度まで増大させることが検討されています。

当研究室では、プラズマ周辺部へ不活性ガスのアイスレットを撃ち込んで、表面全体で光らせることにより、輻射エネルギーを増大させる方法について検討を行っています。これまでの研究では、入射した不純物ペレットがプラズマにより蒸発する過程を計算するペレットコードと、不純物による放射損失を考慮できるように改造した一次元エネルギー輸送コードの組み合わせにより、プラズマ性能を変化させることなく、どれくらいの量の不純物までプラズマ表面（プラズマ半径の1/5付近）へ入射可能であるかを調べています。

キセノンを入射した場合の、不純物密度の電子密度に対する割合とプラズマの閉じ込め時間・電子温度・輻射パワーの変化の計算例を図2に示します。この例では、プラズマのパラメータを大きく変動させることなく、輻射パワーを増大させることができます。図示した割合以上に注入するとエネルギーバランスが崩れ、プラズマを維持できません、また不純物を注入し始めるタイミングも重要であることがわかっています。

今後は、現在のコードでは考慮できていない不純物の拡散・中性ガスの輸送のモデル化、ペレット溶解計算へのプラズマパラメータ変動の反映などを進めていく計画です。

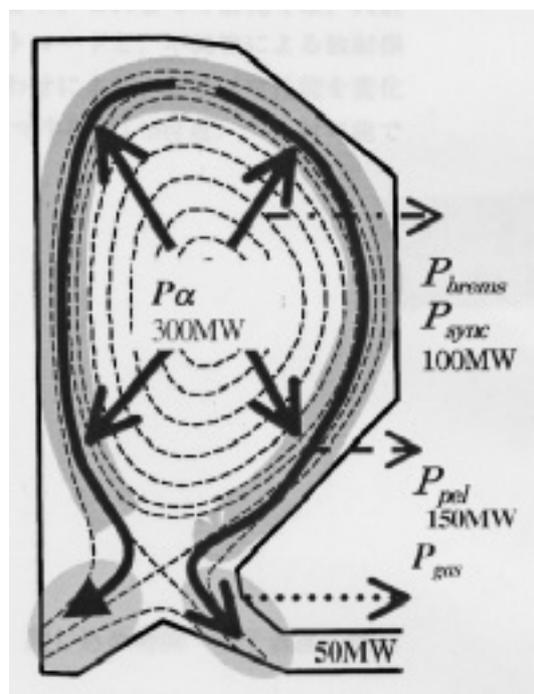


図1 ITERにおけるエネルギーフローの模式図

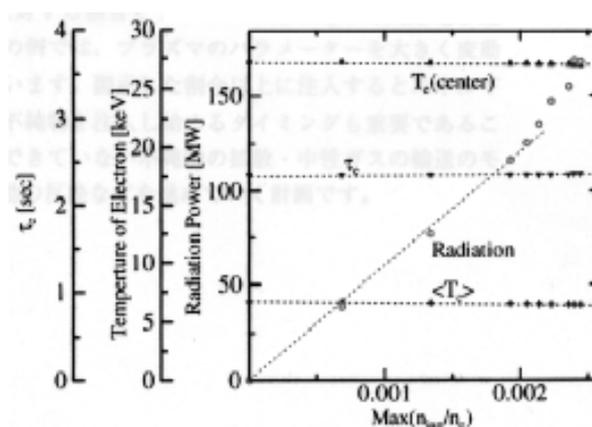


図2 キセノン原子密度の電子密度に対する割合を変化させたときの、閉じ込め時間・電子温度・輻射パワーの変化

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)  
 「TVトムソンシステムを用いたプラズマの温度・密度の2次元計測」

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・プラズマ実験に対する実験・解析・理論的研究に主眼を置いている。プラズマ物理の探求のためにはプラズマのパラメータを正確に測定する必要がある。プラズマパラメータに対称性が存在すれば計測に必要な次元も減少するがそうでない場合には2次元、3次元の計測も要求される。本研究ではプラズマの1放電によってプラズマの電子温度・電子密度の1次元分布、多放電によって2次元分布を計測し、同時に電子の速度分布関数を求めている。トムソン散乱計測は単色光であるレーザーをプラズマに入射し、その散乱光を計測してドップラー広がりから温度、さらに散乱強度の情報を加えて電子密度を局所的に求める。トムソン散乱装置の装置構成は、単色入射光としてのレーザー（ルビー、YAG）、レーザーからプラズマ実験装置までの入射光学系、プラズマ中での散乱光を検出しその波長分布を測定する測定装置（分光器とTVカメラシステムあるいは光電子倍增管）からなる。ルビーレーザーを用いたヘリオトロンE装置でのプラズマ温度の2次元分布の測定例を図.1に示す。この場合にはプラズマ磁気面の中心は理論計算では $x = -4\text{cm}$ であり、温度分布の最大値位置がプラズマの磁気軸と一致していることが分かる。

以前は検出器として光電子倍增管を用いてきたが、その検出器では空間分解能、波長分解能に限界があったため、現在はフレーミングカメラと冷却CCDカメラを検出器として整備を進めている。CCDカメラは $1000 \times 1000$ ピクセルでこれらを2分割して用いている。空間軸では1000点、波長方向で500点の測定チャンネルが得られる。図.2はカメラシステムを分光器出口に設置して得たルビーレーザーのトムソン散乱光分光像である。縦軸が空間軸、横軸が波長軸に対応している。左部分にはレーザー入射時間の像が入り、右には校正用にプラズマの背景光のみ入っている。各像の中央には水素プラズマ中の水素原子からの $H\alpha$ 光が現れている。左図の左端部にレーザー入射光の迷光が見られる。散乱光は左図の入射光と $H\alpha$ 光を除いた部分にうっすらと現れている。この分光像はヘリオトロンEプラズマのものであるが、本年度から新しいプラズマ閉じ込め装置ヘリオトロンJ装置実験が開始される。さらに高精度の温度・密度測定を行い、プラズマの加熱・閉じ込め実験に寄与するとともにプラズマの物性解析の基礎となるデータを蓄積するべく、新実験装置のための入射・集光光学系を開発しつつある。

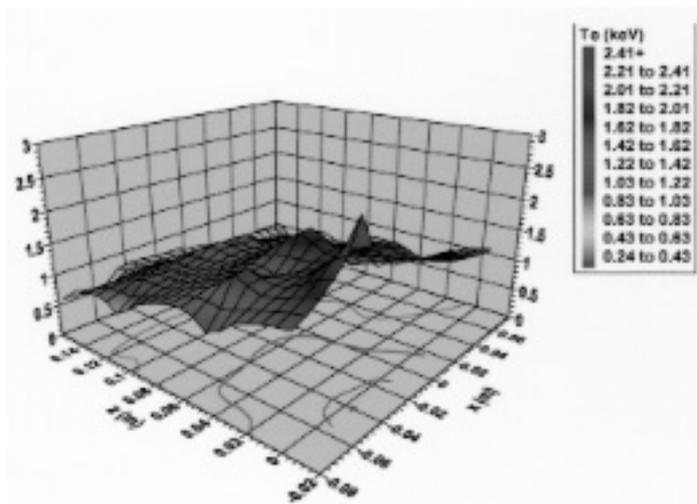


図.1 ヘリオトロンEプラズマの電子温度分布

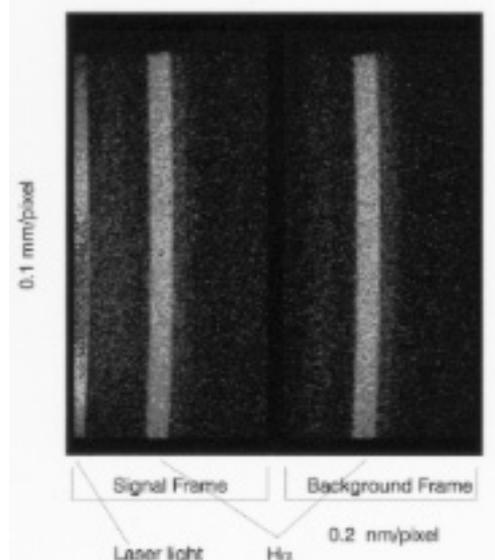


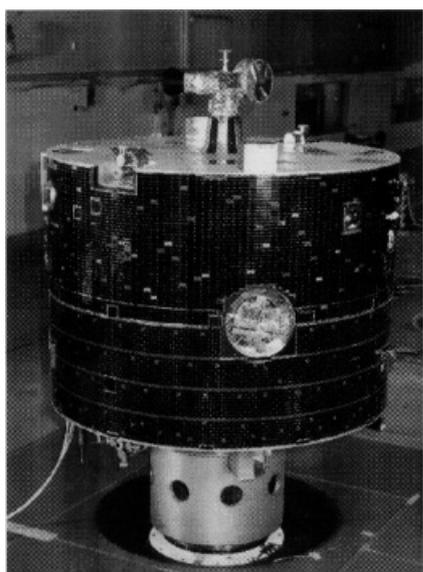
図.2 プラズマからの散乱光（左部分）と背景光（右部分）

## 超高層電波研究センター 超高層電波工学部門（松本研究室） 「科学衛星による宇宙空間におけるプラズマ波動観測」

当研究室は、宇治の超高層電波研究センター及び大学院情報学研究科通信情報システム専攻に所属し、来るべき21世紀の人類宇宙開拓の時代に向けて、太陽系空間電磁環境や宇宙太陽発電所(SPS)の研究など、理学、工学の両面から宇宙科学・宇宙電波工学の研究を行なっています。本稿では研究テーマの一つである「科学衛星による宇宙空間におけるプラズマ波動観測」に関する研究を紹介します。

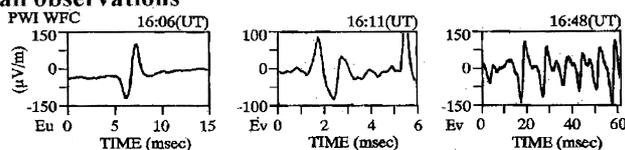
惑星間空間や惑星の上層大気は、いわゆる気体が電離した「プラズマ」状態にあります。宇宙空間に存在するこの宇宙プラズマは、基本的に無衝突プラズマであり、そこでのエネルギーの散逸は「波動」を介して行われます。そのため、宇宙空間には、プラズマ波動が多数存在しており、それらを測定することによって、そこで発生しているミクロな物理プロセスを解析することができます。当研究室では、文部省宇宙科学研究所と協力して地球周辺や惑星に科学衛星を送り込み、そこで発生したり伝搬してきたりするプラズマ波動を観測しています。地球周辺でのプラズマ波動観測は、当センターが電離層研究施設の時代より行ってきた研究ですが、そのプラズマ波動観測も1992年に打ち上げられたわが国の衛星Geotail（ジオテイル）によって、世界を一歩リードするに至りました。このGeotailは、その名が示す通り「地球の尻尾」を観測する衛星です。「地球の尻尾」とは、太陽と反対方向に伸びる地球磁場領域のことをいいます。このGeotail衛星に、世界で初めて波形観測データ捕捉用メモリを衛星内部にもつ「波形受信機（WFC: Wave-Form Capture）」を我々は搭載しました。地上で測定を行っている方々は驚かれるかもしれませんが、これまで世界的にみてもプラズマ波動観測では、「スペクトル」のみの観測が一般的でした。これは、観測データを地上に送信するテレメータの伝送容量に限界があったからです。Geotailではオンボードのメモリを搭載することによりこのテレメータの制限を緩和し、波形によるプラズマ波動観測に成功し、その結果、1974年以来、その発生原因で議論が繰り返されてきた「広帯域静電ノイズ（BEN: Broadband Electrostatic Noise）」が実は波形でみると、孤立的なパルス波の集まりであるということを示すことに成功しました。そして計算機実験との共同研究により、その孤立波は電子ビームの非線形発展によってできる「電子の泡」であることも示すことに成功しました。このGeotailによる宇宙空間の「電子の泡」の発見は世界中の研究者の注意を喚起し、その後、多くの科学衛星によって、この「電子の泡」は宇宙プラズマの至るところで発生している現象であることがわかってきました。

現在我々の研究室では、これまでの地球周辺での観測経験を活かし、火星、水星などの惑星周辺でのプラズマ波動観測にも取り組んでいます。

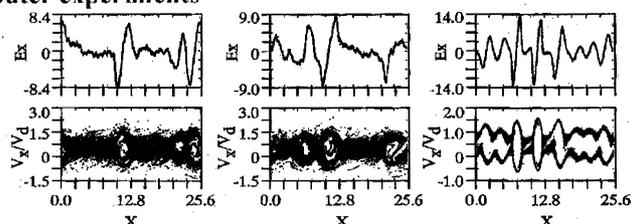


科学衛星GEOTAIL（文部省宇宙科学研究所にて）局さ1.6m、直径2.2m

### Geotail observations



### Computer experiments



Geotail衛星で観測された孤立波形（上段）と計算機実験によって再現された波形（中段）及びその波形に相当する電子の泡（下段）

## 超高層電波研究センター 超高層物理学部門（津田研究室） 「GPS電波を用いた地球大気の計測」

GPSとは地球を周回する衛星からの電波を受信して位置を定める衛星測位システムであり、最近では民生用途にも広く活用されている。GPSによる位置推定では一般に変調コードを解読する方法が用いられる。しかし、搬送波位相を用いれば数cm程度という高精度の位置測定が可能であり、地殻変動の検出や地震・火山噴火予知に応用されつつある。

GPS電波は電離層や大気を通過して地表に達するため、伝播遅延が測位誤差の原因となる。ここで電離気体の屈折率には分散性があることから、GPSでは2周波を用いることで電離層遅延を補正している。また、乾燥大気による伝播遅延長（天頂角により数mから20m程度）は地上気圧から推定できる。しかし、水蒸気による遅延（気象条件により数cmから20cm程度）は、水蒸気分布が大きく時間空間変化するために正確には補正できず、測位精度を追求する上で重要な課題となっている。逆に、伝播遅延から水蒸気情報を得て、気象予報モデルの精度向上に利用する研究が、測地学、電波工学、気象学の学際的分野（GPS気象学）として近年注目を集めている。GPS電波の伝播遅延から測定できるのは、大気中に含まれる水蒸気の積分量（可降水量と呼ばれる）である。従来、可降水量は気球により一日に2回程度求められていたが、GPSではこれと同等の精度で連続的に測定できる<sup>[1]</sup>。

GPS受信機は国土地理院により約20km毎に全国の約千ヶ所に設置されており、定常観測が行なわれている。この観測網から可降水量の時間空間変化が正確に得られ、天気予報モデルの精度向上に貢献している。また大学・研究所等により稠密なGPS観測キャンペーンも行なわれ、集中豪雨等の気象擾乱の解明が進められている。さらにトモグラフィ解析により水蒸気の三次元分布の推定も試みられている。

ところで、もう一つのGPS大気計測法として、低高度の傾斜軌道上を周回する小型衛星（LEO）にGPS受信機を搭載し、地球大気をかすめて伝播してくるGPS電波を解析して、大気温度や湿度の高度プロファイルを推定する新技术（GPS掩蔽法）が考案されている<sup>[2]</sup>。LEOから見てGPSが地平線に没する際に、時間とともにGPSからLEOへ到達する電波が通過する大気層が厚くなり、GPS電波の伝播遅延量も時々刻々増大する。この遅延量の時間変化から大気屈折率の高度変化が算出できる。さらに、非電離の乾燥大気として扱える高度領域（約5kmから約60km）においては、屈折率から大気温度が一意に求まる。一方、低高度の湿潤大気においては、標準大気モデルの温度プロファイルを併用すれば湿度が推定できる。GPS掩蔽法により既存の定常気球観測に匹敵する空間間隔で地球全体の温度プロファイルを継続的に観測できると期待されている。

そもそも1960年代にNASAが打ち上げた惑星探査機からの電波を用いて、金星をはじめとする惑星大気の構造や惑星の輪の研究が行なわれてきた。この方法を地球にも応用することは、1980年代初頭よりロシアの研究者によって理論的検討が重ねられてきた。近年、衛星軌道が十分な精度で決定できるようになるに至って、この方法の実現が具体化した。NASAが1995年4月にGPS掩蔽法の検証実験を行い、高度45km以下で大気温度が約1kmという優れた高度分解能、かつ1K程度の精度で求められた。このデータは未解明であった赤道域の対流圏界面の温度構造の季節経度変化、ならびに大気大循環に大きな影響を与えるとされている大気波動のグローバルな分布特性の解明に活用されている<sup>[3]</sup>。

### 参考文献

- [1] 吉原貴之, 津田 敏隆, 平原和朗, GPSキャンペーンデータを用いた高時空間分解能による水蒸気変動の推定, 月刊地球「GPS: 汎地球測位システム」, 号外25巻, 96-101, 1999.
- [2] 津田敏隆, 「GPS掩蔽法」, 気象研究ノート第192号, 第11章, 159-178頁, 日本気象学会, 1998.
- [3] 津田 敏隆, 西田真啓, GPSが捕えたグローバルな大気の振舞い, 月刊地球「GPS: 汎地球測位システム」, 号外25巻, 108-113, 1999.

## 博士論文一覧

### 【課程博士一覧】

栗本 祐司	ヘリオトロンE装置におけるプラズマ中の高速イオン軌道及び速度緩和過程に関する研究	平成11年 1月25日
長尾 昌善	極微小フィールドエミッタの仕事関数制御による安定性向上に関する研究	平成11年 3月23日
秋月 誠	Gas Cluster Ion-Solid Surface Interaction and Thin Film Formation (ガスクラスタライオンと固体表面の相互作用及び薄膜形成に関する研究)	平成11年 3月23日
大塚 雄一	A statistical study of the mid-latitude ionosphere based on the MU radar observations (MUレーダー観測に基づく中緯度電離圏の統計的研究)	平成11年 3月23日
陳 嵐	Dynamic Channel Allocation for Mobile Communication Networks (移動体通信ネットワークに適したダイナミックチャネル割り当て方式)	平成11年 3月23日
森 直樹	熱力学的遺伝アルゴリズムによる適応的問題解決手法に関する研究	平成11年 3月23日
岡田 和久	形状自由度を考慮したレイアウト設計CAD手法に関する研究	平成11年 3月23日
平田 昭夫	超微細CMOS論理ゲートの性能評価手法に関する研究	平成11年 3月23日
近藤 正樹	MOSFETのパラメータ抽出と統計的モデル化に関する研究	平成11年 3月23日
豊田 紀章	Nano-Processing with Gas Cluster Ion Beams (ガスクラスタライオンによるナノ構造形成プロセスの研究)	平成11年 3月23日
Ahmet Onat	Application of Recurrent Neural Networks to Reinforcement Learning under Incomplete Perception (リカレントニューラルネットワークの不完全知覚下での強化学習への応用)	平成11年 3月23日

---

傍島 正朗	Effects of Optical Geometry and Optical Guiding on Evolution of Free Electron Lasers (自由電子レーザー生成における光共振器形状と光ガイドの効果)	平成11年 3 月23日
David M. Mulati	Electrical Characterization of Multi-crystalline Silicon Solar Cells for High Efficiency (多結晶シリコン太陽電池高効率化へ向けての電氣的評価)	平成11年 5 月24日
福島 省吾	人間の視覚系との調和を目指す仮想現実感機器の試作と視覚系機能の心理生理特性に関する実験研究	平成11年 5 月24日
寺川 朗	Hydrogenated Amorphous Silicon Germanium Alloys for High Efficiency and Stable Solar Cells (高効率・高安定太陽電池用非晶質シリコンゲルマニウム合金の研究)	平成11年 5 月24日
浦島 智	多点単色光オーロラ観測画像のトモグラフィ再構成解析に関する研究	平成11年 5 月24日
山本 宗継	赤外波長域半導体 3 次元フォトニック結晶の開発とその光学特性に関する研究	平成11年 7 月23日
康 龍雲	非平衡電離ディスク形MHD発電機-電力系統連結システムの動作特性に関する解析的研究	平成11年 9 月24日
陳 新奇	Studies on Nanometer-scale Polarization Characteristics of Ferroelectric Organic Thin Films by Scanning Probe Microscopy (走査型プローブ顕微鏡による有機強誘電体薄膜のナノスケール分極特性に関する研究)	平成11年 9 月24日
中川 隆志	新しい人間機械系相互作用シミュレーションのインタフェース設計評価への応用に関する研究	平成11年 9 月24日

栗本 祐司

「ヘリオトロンE装置におけるプラズマ中の高速イオン軌道及び速度緩和過程に関する研究」  
平成11年1月25日授与

1991年11月、大型トカマク型核融合実験装置JET(Joint European Torus)において人類史上初のD-T熱核融合実験が行われた。人類はアルファ粒子を含んだ熱プラズマという新たな物理実験対象を手にした。D-T反応で発生する3.52 MeVのアルファ粒子は周りのプラズマに熱を与えきってしまうまで炉の中に存在し、ヘリウム希釈による核融合反応停止を避けるために最終的に系外に排出されなければならない。つまり高速イオンの(1)粒子閉じ込め時間と(2)速度緩和時間は厳密に制御されねばならず、これらを基準に核融合炉の工学的要請の多くが決まる。現存の実験装置において、2つの基本的時間スケールを調べることは重要である。本論は、上記2つの視点から高速イオンについて述べたものである。

ヘリカルヘリオトロン磁場は、非軸対称トーラス状の磁場であり、宇尾光治京都大学名誉教授によって発明された。ヘリオトロンE装置は3番目に建設された装置であり(大半径2200mm,平均小半径210mm,ヘリカルコイル定格磁場2T)、加熱装置として0.6MWの電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)と、3MWの高速中性粒子入射加熱装置(NBI)を備えている。プラズマパラメーターは3MWのNBI加熱を行なったとき、電子温度800keV,イオン温度1keV,電子密度 $2\sim 8\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ である。NBIにより生じた高速イオンのエネルギースペクトラムを荷電交換中性粒子分析器によって観測した。

本論の特徴は、受動的観測ではなく、プラズマに内外部から擾乱を与え応答を観測する能動的な手法を用いたことである。すなわち、我々はプラズマ擾乱を高速イオンに対するプローブとして用いた。

まず、高速イオン挙動を粒子閉じ込めの視点から議論した。外部からリミター挿入及びペレット入射などの人為的擾乱をプラズマに与えた。高速イオンエネルギースペクトラム上へこみが観測され、エネルギー依存性をもっていた。解釈に負の径電場を導入し議論を行なった。さらにプラズマ自体が起こす内部擾乱に注目した。MHDバーストに同期し、ヘリカル捕捉粒子のエネルギー依存性をもった軌道変化が観測された。トカマクでは不安定現象による高速イオン軌道変化は知られているが、それがヘリカル系でも観測されたことになる。これらの発展型として、外部操作によるプラズマ特性改善に挑戦した。

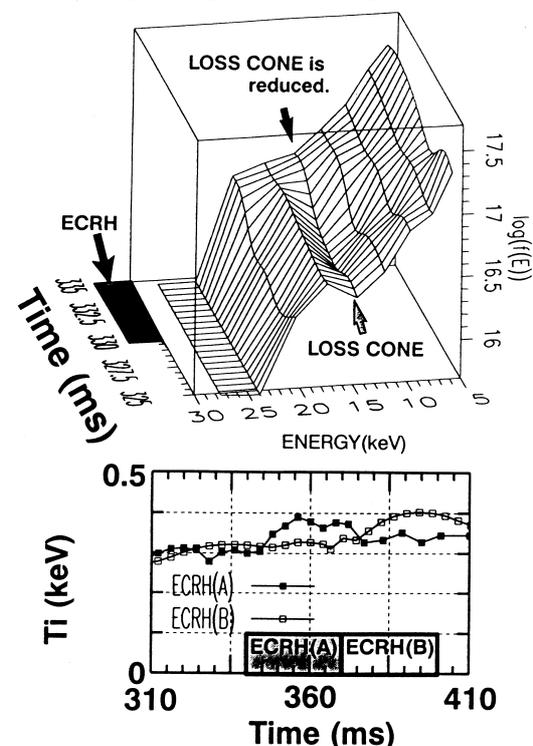


図1：ECRH重畳時の高速イオンエネルギースペクトラムとイオン温度の変化

この試みは、ECRH入射により径電場を正に変化させ、高速イオン軌道を変え、プラズマを改善するという動機に基づいている。結果、図1に示すように、ECRH重畳により高速イオンエネルギースペクトラム上のへこみが緩和される(粒子損失減少)とともに熱領域イオン温度の改善が観測された。

このようにECRHが粒子軌道損失機構、即ち粒子閉じ込め時間を変えうるということがわかった。次に高速イオン速度緩和過程に対し、ECRHが及ぼす影響を調べた。ECRH入射によって擾乱を与えられたプラズマ中で、古典的には説明されない高速イオン速度緩和過程を観測した。これらより、ECRH入射が高速イオンの振る舞いを支配する2つの根本原理の両者に影響を及ぼしうることがわかった。

我々はヘリオトロンEプラズマ中の高速イオン挙動を、能動的な手法によって観測し、(1)粒子閉じ込め及び(2)速度緩和過程の両原理に基づき整理した。結果、プラズマに対する擾乱、とくに周辺部の変化や不安定現象、電磁波の存在がヘリカル捕捉粒子の速度緩和過程と粒子軌道の両者に影響を及ぼしうることが解ってきた。さらにECRH入射でプラズマを改善できる可能性を提示できた。

長尾昌善

「極微小フィールドエミッタの仕事関数制御による安定性向上に関する研究」

平成11年3月23日授与

極微小フィールドエミッタとは、 $1\mu\text{m}$ 程度の非常に小さな真空電子源である。この極微小フィールドエミッタを平面上に多数集積することで超薄型ディスプレイを実現することができる。極微小フィールドエミッタを用いた薄型ディスプレイは、フィールドエミッションディスプレイ(FED)と呼ばれる。FEDは、真空中に電子を放出させそれを加速して蛍光体を発光させるので、動作原理としては現在主流のブラウン管とほぼ同様であるため、ブラウン管の持つ長所を持ち、かつ超薄型を実現できるという特徴がある。したがって、液晶ディスプレイやプラズマディスプレイといった他の薄型ディスプレイと比べ、輝度も高く、高精細で、視野角の問題もまったくない。このような特徴から、近年注目を集めるようになった。しかしながら、FEDに用いられる極微小フィールドエミッタは、動作が不安定であるという問題を抱えているため、現在では実用化に至っていない。本研究は、この極微小フィールドエミッタの持つ不安定性の問題を克服し、実用化に近づけるのが目的である。

フィールドエミッタにおける電子放出の不安定性は、真空中の残留ガスとエミッタ表面との相互作用が原因である。したがって、残留ガスの影響を受けにくいような表面を形成することができれば、安定性の向上につながる。本研究ではエミッタ表面のもつ物性のうちどのようなものが安定性に最も影響を与えるかを調査し、その物性を制御することで安定性の向上を図ってゆく。

まず、極微小フィールドエミッタの電子放出特性から、エミッタ表面の仕事関数やエミッタの形状を評価することのできる新たな評価方法『S-Kチャート』を提案した。このS-Kチャートは、フィールドエミッタの電子放出特性を特徴づけるFowler-Nordheimプロットの切片と傾きをグラフ上にプロットすることで、仕事関数や先端形状が把握できる画期的なものである。このS-Kチャートを用い仕事関数や先端形状と電子放出の安定性の関係を調べた。その結果、仕事関数が電子放出の安定性を大きく左右することを明らかにした。このことは、逆にいうと仕事関数を制御することで安定性を向上させることが可能であるということになる。これをもとに『仕事関数制御による安定性の向上』を提案し、以下これを実践してゆく。通常、仕事関数の低い材料はアルカリ金属など表面が活性なものが多く、そのような表面の活性な材料を用いても安定化はできない。したがって、表面の活性度などを変化させることなく仕事関数を下げる必要がある。本研究では、この仕事関数制御を2つの方法で実践した。

一つはエミッタ材料として化学的に不活性なダイヤモンド薄膜を取り上げ、その表面を酸やプラズマで処理することで仕事関数を制御する方法である。ダイヤモンド薄膜の電子放出を調べた結果、酸処理を行った表面より水素プラズマ処理を行った表面が電子放出の際の実効仕事関数も低くなることからS-Kチャートにより明らかになり、また、電子放出も安定である。二つ目の方法はエミッタ材料として遷移金属の窒化物を用い、その窒素組成を制御する方法である。イオンビームアシスト蒸着法を用いることで窒化ジルコニウムおよび窒化ニオブの窒素組成を制御した。また、それぞれの薄膜の仕事関数をケルビン法で測定し、窒素組成との関係を調べた結果、窒化ジルコニウムの場合は窒素組成を下げることで仕事関数を減少させることができ、窒化ニオブの場合窒素組成を上げることで仕事関数を減少させることができた。さらに、この窒化物薄膜を用いてエミッタを作製し、仕事関数と電子放出の安定性を調べた結果、窒化ジルコニウム、窒化ニオブのいずれにおいても仕事関数が低いほど電子放出も安定であり、仕事関数を $0.2\text{eV}$ 程度減少させることで、電子放出の安定性は2桁程度向上させることに成功した。

以上2つの方法により、仕事関数制御という方法は、電子放出の安定性を向上させる方法としては非常に効果があることを示すことができた。このように、仕事関数制御という極微小フィールドエミッタの安定性向上のための方法として全く新しい方法を提案し、それを実践したのは本研究がはじめてである。また、この方法は仕事関数を低く制御することにより安定性が向上すると共に動作電圧も低く抑えることができるため、雑音が少なく低電圧動作可能な極微小フィールドエミッタを実現することができ、実用化へ大いに寄与するものと期待できる。

秋 月 誠

「Gas Cluster Ion - Solid Surface Interaction and Thin Film Formation」  
 (ガスクラスターイオンと固体表面の相互作用及び薄膜形成に関する研究)  
 平成11年3月23日授与

本論文は、ガス状原子の巨大集団であるガスクラスターイオンビームと固体表面の相互作用の解明と、ガスクラスターイオン援用照射による薄膜形成に関する研究結果をまとめたものである。

これまでに、単原子・分子をイオン化して固体表面に照射する表面改質技術は飛躍的な発展を遂げ、多くの工業分野で応用されている。しかしながら、半導体産業に代表される今日の日覚ましい技術発展の中で、さらなる低エネルギーのイオンビーム技術の開発が求められている。ガスクラスターイオンビームは、ガス状原子の巨大集団をイオン化するため、大電流かつ低エネルギーのイオンビームが容易に形成される。さらに、ガスクラスターイオンを固体表面に照射すると、クラスターイオンの持つ運動エネルギーが高密度に照射されるという特徴を有しており、従来の単原子・分子イオンでは得られない表面改質効果が期待される。

本研究では、このような特徴を持つガスクラスターイオンと固体表面との相互作用を調べるとともに、高品位薄膜形成への応用が可能であることを初めて明らかにした。具体的には、まず、ガスクラスタービームの生成過程の考察から、気体材料に対してガス冷却法、希ガス混合法の適用を提案し、表面プロセスに必要な大電流クラスターイオンビームの形成に成功した。また、希ガスバブリング法による液体材料のクラスター化を提案・実証し、広範囲の材料分野におけるガスクラスターイオンビーム形成方法を確立した。次に、30keV以下の低加速エネルギー領域におけるクラスターイオンと固体表面との相互作用を実験的に観察し、構成原子当りの平均エネルギーが単原子における閾値エネルギー以下でもスパッタリングが生じること、構成原子当り数eVのガスクラスターイオン照射により表面化学反応が強く促進されることなどを初めて見出し、これらの照射効果がクラスター特有の多体衝突、高密度エネルギー照射により得られることを明らかにした。さらに、図に示すように、ガスクラスターイオン援用蒸着法を考案し、室温で低抵抗・高透過率のITO薄膜が形成されることなど、幾つかの薄膜形成を通して高品位薄膜が低温で形成できることを実証するとともに、本手法による薄膜形成プロセスを明らかにした。

本研究により、ガスクラスターイオンと固体表面との相互作用に対する理解が大きく前進したとともに、実用化のために必要となる大電流ガスクラスターイオンビームの生成が可能となり、さらに、その薄膜形成への応用の第一歩が開かれた。今後、装置改良が進むとともに、各種薄膜の低温での高品位薄膜の形成への展開が進み、実用化されることが期待できる。

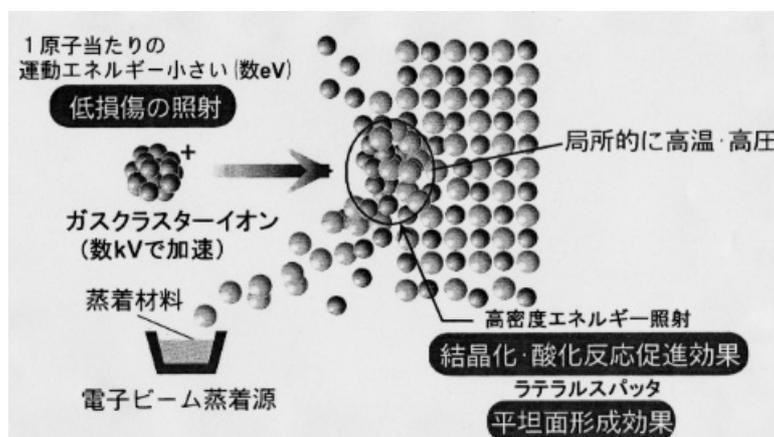


図 ガスクラスターイオン援用蒸着法の概念図

大塚 雄一

「A statistical study of the mid-latitude ionosphere based on the MU radar observations」

(MUレーダー観測に基づく中緯度電離圏の統計的研究)

平成11年3月23日授与

本研究は、アジア圏唯一のインコヒーレント散乱(IS)レーダーである京都大学MUレーダーを用いて中緯度電離圏F領域の熱的・力学的構造を統計的に明らかにしたものである。電離圏F領域は、高度約200から1000kmに位置し、太陽の紫外線によって電離された気体の存在する領域である。しかし、この領域は電離気体の一万倍以上もの中性大気からなる熱圏と重なっており、その両者が複雑に相互作用し合っている。地球大気のこの領域を観測する手段として、ISレーダーは高い時間・空間分解能をもつ観測装置であり、電離圏研究に貴重なデータを提供してくれる。ISレーダーは、緯度方向には赤道域から中・高緯度域まで存在しているが、経度方向にはMUレーダーが設置されるまでは欧米圏にしか存在しなかった。アジア圏ではMUレーダーが唯一のISレーダーであり、アジア圏における電離圏構造を明らかにすることは電離圏研究にとって重要な意味をもつ。本研究では、観測から得られた最終的な物理量を用いて研究を進めていくという立場と同時に、観測から如何にして重要な情報を抽出するかという観点からも研究が行われている。レーダー観測の生データから電離圏物理量を推定するまでの過程には多くの複雑なデータ処理過程が存在する。これらの過程には一定の決まった方法により処理される部分もあるが、経験的なものに基づいて処理される部分も多い。対象とする時空間スケールや抽出すべき現象に応じた解析手法の開発や改良が必要となる。本研究では、ISレーダーとしては必ずしも感度が充分ではないMUレーダーによる観測から信頼出来る熱圏中性大気風速を推定する方法を開発している。

本研究では、1986年から1996年までのMUレーダー観測データを解析することにより、以下の3点について研究を行っている。

(1)電子・イオン温度の平均日変化、高度変化、季節及び太陽活動度依存性を明らかにしている。ISレーダー観測により得られた中緯度電離圏F領域における電子・イオン温度の統計解析は、本研究によって初めて行われたものである。日中における電子温度の時間変化、季節変化、太陽活動度依存性は、電子密度変化と逆相関を示し、イオン温度の変化は正の相関を示す。これは、電子とイオンとのクーロン衝突によって電子からイオンにエネルギーが輸送される過程が、電離圏プラズマの温度構造を決定する支配的な要因であることを示している。また、電子温度の日変化は、明け方及び夕方に顕著な極大を示すが、中性大気風速がこの現象の重要な成因となっていることを指摘している。

(2)電離圏の年変化、特に春と秋との非対称性に着目し、電離圏構造が熱圏構造の影響を受けていることを明らかにしている。従来のアイオノゾンデや人工衛星による観測には高度方向の情報がないため、現象の物理機構について十分な理解がなされていなかった。本研究では、中緯度電離圏F領域の年変化について高度変化を含めて明らかにすることによって、電離圏物理量の春・秋非対称性は、熱圏の春・秋非対称性が原因であることを明らかにしている。電離圏F領域下部においては中性大気組成の、F領域上部においては中性大気風速の春・秋非対称が主な原因であることが明らかにされている。

(3)MUレーダーの特徴である、高速ビーム走査性を活かした移動性電離圏擾乱の観測を行い、熱圏大気重力波の水平伝搬特性を明らかにしている。平均では、水平伝搬速度は周期(40~130分)に依らず240m/sであり、伝搬方向は南向きのものが多いことを明らかにしている。分散関係は従来の他観測結果と良い一致を示すこと、また大気重力波理論との比較から、エネルギー消散がなく鉛直波長が150~200kmとした場合と良く一致することを示している。さらに観測された大気重力波の水平伝搬速度について、時間変化、季節変化、太陽活動度依存性がほとんど見られないことを指摘している。

以上のように、本研究ではほぼ太陽活動一周期にわたるMUレーダー電離圏観測データを統計的に解析することにより中緯度電離圏構造を明らかにし、それが熱圏中性大気の影響を著しく受けていることを指摘したものである。

陳 嵐

「Dynamic Channel Allocation for Mobile Communication Networks」  
(移動体通信ネットワークに適したダイナミックチャネル割り当て方式)  
平成11年3月23日授与

“いつでも、どこでも、誰とでも”通信が行える移動体通信の市場が急成長している。PHSも含めた携帯電話の数が、日本でついに4000万台を超え、固定電話の半分以上の水準になった。加入者数の急速な伸びにより、都市部では、限られた周波数資源の不足が既に深刻な問題になっている。一方、マルチメディア化の進展に伴い、非音声型通信の割合が上昇している。例えば、PHSの通信回数の半分は文字メッセージとなっているのが現状である。このように、マルチメディア移動体通信ネットワークの構築が欠かせない課題となっている。従って、周波数資源の更なる有効利用及びマルチメディアへの対応のため、柔軟でかつ効率の高いダイナミックチャネル割当の研究が必要不可欠である。本論文では、次世代さらには次次世代の移動体通信ネットワークの構築に向けて、マルチメディアへの対応及び周波数資源の更なる有効利用のため、柔軟でかつ効率の高いダイナミックチャネル割り当て方式に関する研究成果を取りまとめたものであり、その概要は以下の通りである。

序論に引き続き、第2章では、検討の対象となる移動体通信ネットワークとアプリケーションのモデルや評価関数、シミュレーション環境を紹介している。第3章では、異なるトラフィック（音声、画像、データなど）が混在した場合に、それぞれの特徴を考慮した上で、良いパフォーマンスが確保できる、メディア間に周波数資源を融通させたリソース割当方式を提案、評価している。第4章では、移動局から基地局まで（上り）又は基地局から移動局まで（下り）の非対称なトラフィックが混在したシステムに注目し、実際のトラフィック量に対応し、上り/下りの無線リソース資源を動的に割り当てる新しい方式を提案している。提案方式では、音声の特性を劣化させないと同時にデータの伝送遅延を大幅に改善できる。第5章は、周波数資源の更なる有効利用を図るため、周波数資源を繰り返して利用するセルラー環境におけるアレーアンテナを用いたシステムについて、干渉電力の強い自セルの同一チャネル干渉方向に優先的にアレーアンテナビームのヌルを置くダイナミックチャネル割当方式を提案している。従来方式と比べ、より大きな特性改善が期待できる。第6章では、セルラーシステムにおけるパケット通信方式の特性改善を目的に、効率の高いダイナミックスロットアクセス方式を二つ提案している。これらの方式では、それぞれの端末の送信許可確率を端末の位置情報を利用して決定することと再送スロットを適切に選択することによって、パケットの遅延を減らし、破棄率を改善できる。

以上のように、本論文では、高速かつ大容量の移動体通信ネットワークに適した、柔軟でかつ効率の高いダイナミックチャネル割当方式について詳細な検討及び新たな提案を行っている。これらの提案方式は2001年からサービス開始の第3世代方式および2007年ごろサービス開始を検討中の第4世代方式のマルチメディア移動通信ネットワークの構築に寄与することが期待できる。

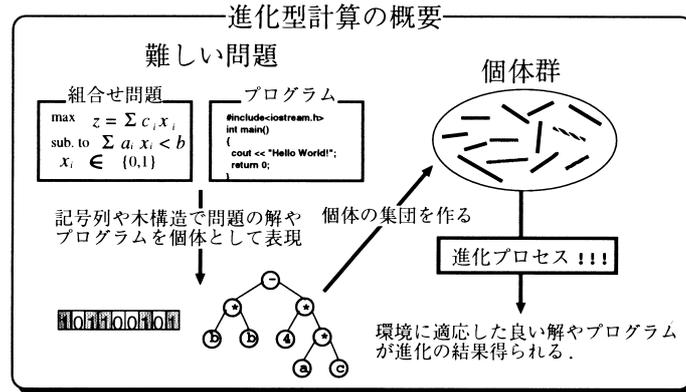
博士課程に在学中の3年間、吉田進教授のご指導のもとで、マルチメディア移動通信ネットワークの構築に向かって、ダイナミックリソース割り当てなど最先端技術の勉強および研究ができた。また、この3年間を通じて、私は課題の研究だけでなく、研究に必要な問題発見、解決および取りまとめなどの能力を養成できたと思う。ここで、この場を借りて、吉田先生をはじめとする電気系の先生方々に心から感謝の意を申し上げたい次第である。

## 森 直 樹

## 「熱力学的遺伝アルゴリズムによる適応的問題解決手法に関する研究」

平成11年3月23日授与

近年、生物進化のダイナミクスを工学的な問題解決に応用しようとする進化型計算と呼ばれる手法が積極的に研究されている。進化型計算とは下の図に示すように、問題の解を個体と考え、コンピュータ上で疑似進化を起こすことにより問題を解こうとする手法である。



本研究では、進化型計算の中でも特に遺伝アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)と呼ばれる手法に着目した。GAは、多くの研究成果が報告されており、広範囲の応用が可能な手法として期待されている。しかしGAには、探索の初期段階に、個体群が同一の個体で占められてしまう「初期収束」と呼ばれる問題が指摘されている。これはちょうどすべての人間がまったく同じになってしまうことに相当する。我々の社会でも個性の多様性が重要なように、GAにおいても個体群の多様性は非常に重要である。しかし、従来のGAでは初期収束を回避し、個体群の多様性を明示的に保つ系統的な手法は提案されていなかった。このため、GAの適用には問題ごとに、多様性維持のための多大な調整の手間が必要であった。

そこで、本研究では容易に初期収束の問題を解決することができる新しいGAとして、温度とエントロピーの概念を導入した熱力学的遺伝アルゴリズム(Thermodynamical Genetic Algorithm: TDGA)を提案した。そして、このTDGAを適応的な工学的問題解決手法構築のための最適化手法として位置付け、以下のような考察を行った。

まず、解空間が離散的な組合せ最適化問題を用いて、従来のGAに対するTDGAの優越を確認した。次に、トレードオフの関係にある複数項目の最適化を明示的に扱う多目的最適化問題の合理解であるPareto最適集合から多様な解をTDGAにより一括して求める手法を考案した。最後に、工学的システムで重要な、動的に変化する問題へのTDGAの適用を検討した。

以上の研究結果からTDGAが広範な問題領域に適用可能な柔軟な手法であり、適応的問題解決手法の構築の際に有用であることがわかった。本研究で得られた成果を生かして、今後は未知の問題に対しても進化的に適応することができる工学システムの構築を目指したいと考えている。

博士学位取得のための研究は本当に大変であったが、研究者として独り立ちするために必要な貴重な経験ができたと思う。最後に、この場をお借りして、本論文に関して御指導いただいた先生方を始めとして御協力いただいたすべての皆様に心から感謝を申し上げます。

## 岡田 和久

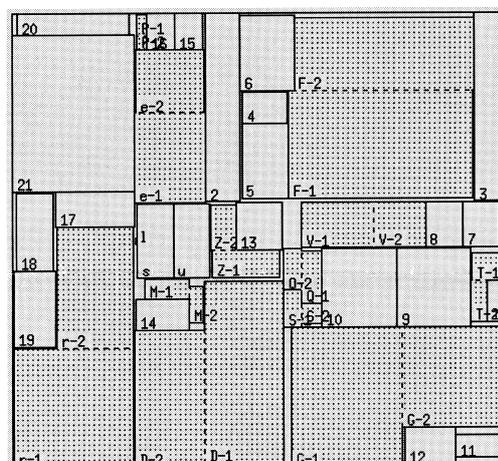
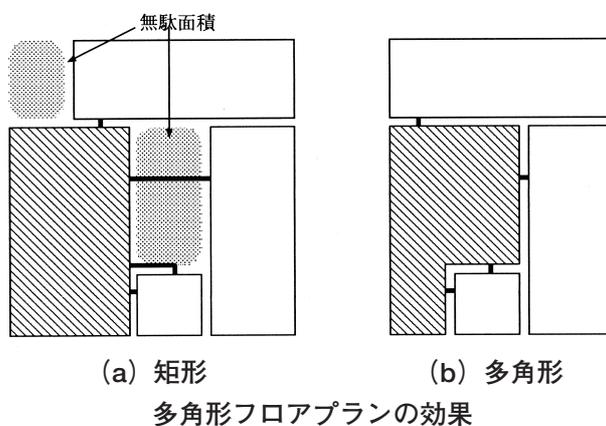
## 「形状自由度を考慮したレイアウト設計CAD手法に関する研究」

平成11年3月23日授与

レイアウト設計とは、目的の回路をシリコンのチップ上に実現するために、回路を構成する各部品をチップ上のどの位置に配置するかを決め、さらに、それらの間をどのような経路の配線で接続するかを決定する設計工程である。この時、チップ上にできるだけ隙間なく部品を配置してチップ面積を小さくする事が重要である。なぜなら、これにより、1枚のシリコンウェハから、より多くのチップが取れ、製造コストを削減できるからである。また、チップ上の各部品間の配線の長さを短くする事も同じく重要である。配線が短くなると、配線自体が持つ電気抵抗や静電容量が小さくなり、回路がより高速に動作し、消費電力が少なくなるからである。携帯電話やノートパソコンに代表される近年の情報機器は、小型で低消費電力である事が必須であり、チップのレイアウトをうまく設計する事は非常に重要である。

一方、これらの情報機器の機能は複雑化の一途である。このため、1チップを構成する部品の個数が莫大となり、人手による設計は不可能となっている。本研究は、このような複雑なLSIのレイアウト設計を自動的に行う手法に関する研究である。レイアウト設計を自動化するCADは以前から研究されてきたが、それらは回路を構成する部品の形状の自由度を十分考慮しているとは言えなかった。すなわち、ある形状の部品を、別の適切な形状にしてやると他の部品とうまく収まって、隙間なく配置でき、しかも短い配線で接続可能であるにもかかわらず、そのような別の形状を計算に入れる事ができないため、不必要に面積が大きく、配線長の長いレイアウトしか得られないというような場合があった。これに対して、本研究の手法では、部品の様々な形状を考慮に入れて、そのうちから最も良い形状を選び出すことが可能である。これにより、従来のCAD手法よりも小面積で短配線長のレイアウトを得る事ができる。本論文では、このような特長を持つ3つのレイアウト設計CAD手法「形状最適化コンパクション」、「多角形フロアプラン」、「サリサイドプロセス用セル生成」を提案している。

これらの中から、「多角形フロアプラン」を簡単に説明する。大規模なLSIは、LSIを構成する機能単位毎に回路が設計される。よって、レイアウト設計においては、これらの部分回路をチップのどこにどのような形状で配置するかをまず決定せねばならない。この工程をフロアプランと呼ぶ。従来のフロアプラン手法は、機能ブロックの形状としては矩形形状のみを扱っていた。これに対して、「多角形フロアプラン」は、機能ブロックの形状として直角多角形形状を扱う事ができる。これにより矩形形状では収まりの悪い場所に対しても、機能ブロックを最適な多角形形状にして配置することが可能である。本手法により、より小面積、短配線長のレイアウトが得られ、LSIチップを小型化・省電力化する事が可能となる。



多角形フロアプラン結果

平 田 昭 夫

「超微細CMOS論理ゲートの性能評価手法に関する研究」

平成11年3月23日授与

近年のLSIの進歩は目覚ましいものがあります。LSIの規模はますます大きくなっており、一からすべてを設計するのは大変困難です。そこで大規模なLSIを設計するときにはあらかじめ設計されたセルと呼ばれる論理素子を組み合わせて行われるのが主流となっています。こうしたセルの集合をライブラリと呼んでいます。こうして設計された回路は設計が容易な分、用いるライブラリによっては本当に最適化されて設計された回路より、回路面積や消費電力が大きくなると考えられます。私の研究ではこのセルライブラリを設計する回路規模や動作させたい速度などの条件に応じて最適なものを自動生成することにより、設計が容易でかつ最適な回路を設計する手法を提案しています。

このような設計手法を実現するためにはセルの動作速度や消費電力といった特性値を高速に見積もる手段が必須となります。従来の固定化されたライブラリを作る場合ですとセルの動作を表す微分方程式を元に細かく時間を区切って計算するというやり方(回路シミュレーション)により特性値を求めています。この方法ですと正確に特性値を求めることが出来る分、時間がかかっていました。そこで私は主に解析式を用いる方法で、回路シミュレーションを行う方法に比べて約1000倍高速で、誤差は平均3%程度で見積もれる手法を考案しました。そしてその手法を組み込んだP2Lib(Process Portable Library)と呼ばれるセルライブラリ自動生成システムを構築しました。さらに設計回路規模や制約条件に応じてどのようなセルライブラリを生成すれば良いかという理論を打ち立て、回路設計を行って実証しました。

本研究の意義としましては理論の提案を行うだけでなく、実際に回路設計して検証まで行ったという点にあるかと思います。また、1996年に発足した大規模集積システム設計教育センター(VDEC)にP2Libで生成したライブラリを提供し、他大学においても広く使われたという点も大きな成果として挙げることができます。また私自身もVDECを通じてKUE-CHIP2という8bitのマイクロプロセサをP2Libを用いて設計し、実際にチップが動作することをLSIテスターと評価用ボードの両方で確認するというところまでやりました。

本研究はどちらかと言うとトップダウン的というよりはむしろボトムアップ的に進められたものでした。どういうことかと言いますと、まず初めに着手したことはセルの特性値を解析式を用いて表すことでした。それと並行してP2Libのシステムを徐々に構築してゆき、それらが整ったところでセルライブラリを最適生成するという理論を構築、実証していったのでした。思えば、私が研究室に4回生で入ったころ(1993年)にはVDECもまだなく、大学でLSIのチップを実際に作るということは経済的な面からも大変困難な状況でした。P2Libは当初「標準ライブラリ」と呼ばれており、各大学におけるLSI設計アルゴリズムの研究評価用に自由に使うことができるセルライブラリがなかったことから、それを提供するという目的で開発が進められたものでした。私は研究室の先輩からそれを引き継ぎ、P2Libに研究要素的な面(解析式を用いた高速特性値生成)を持たせつつ、実際の設計にも用いることができるよう、より現実的なシステムを目指して開発を行っていきました。その結果として、VDECの発足にあたりP2Libで生成したライブラリを公開することができたのは大きな喜びでした(もちろんP2Libは私一人で作ったものではなく、幾人かの後輩達や先生方の協力があったからこそです)。

大学最後の年には企業との共同研究(STARC)となり、関わる学生の数も大変多くなりました。私が行った研究そのものはまだまだ完成度の面で難があり、実用化までにはなお努力を要するものと思われませんが、今後の研究のますますの発展を心よりお祈りしたいと思います。

近 藤 正 樹

## 「MOSFETのパラメータ抽出と統計的モデル化に関する研究」

平成11年3月23日授与

博士課程での研究テーマは、集積回路に用いる半導体素子の性能ばらつきをモデル化し、回路シミュレーションで素子ばらつきの影響を再現するというものでした。半導体素子の性能がなぜばらつくのかと言うと、沢山の素子を作り込む過程で、一つ一つ条件が微妙に食い違ってくるためです。これをプロセス変動と呼びます。一つ一つの素子の性能がばらつけば、当然回路全体の性能にもばらつきが生じることとなります。さて、ここ最近、より多くの素子を一つのチップに集積するために低消費電力化が積極的に推し進められていますが、それに伴って電源電圧がどんどん低下しています。なぜ電源電圧の話を持ち出したかと言うと、実は、電源電圧が下がると素子ばらつきの影響がより大きく見えてくるという問題があるからです。電源電圧を下げるということは、それだけ回路が動作する電圧範囲が狭くなるということですから、ばらつきへの耐性は弱くなります。一方、素子ばらつきは微細加工技術の世代が進んでもそれほど小さくなりませんから、相対的に回路特性への影響は大きくなってしまおうというわけです。つまり、特に低電源電圧回路では、設計の段階で素子ばらつきの影響を考慮した工夫をしておかなければ、仕様通りに動作するチップが取得できる確率(良品率または歩留り)が著しく低下する危険性が高いのです。

集積回路を設計する時には、回路シミュレーションという手法が多用されます。回路シミュレーションとは素子モデルを用いて回路特性を擬似的に算出するための手段です。素子モデルは素子の電流電圧特性や容量特性を表す数式とパラメータから成っています。実際にシミュレーションを行うには、あらかじめ実素子の特性を良く近似するパラメータ値を求めておく必要があります。更に、先ほど述べた素子ばらつきを考慮するためには、パラメータの分布を調べた上で、それを統計的にモデル化してやらなければなりません。集積回路に使われる半導体素子の特性は複雑であるため、そのモデルも単純ではありません。特に、代表的な半導体素子であるMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)の特性を高い精度で再現するためには、非線形性の極めて高い複雑な数式と多数のパラメータを必要とします。このように複雑な素子モデルのパラメータを求めることは大変な作業であり、何人もの専門家が数ヶ月がかりで成し遂げるというのが普通です。設計期間の短縮が強く叫ばれる中、ばらつきも含めたMOSFETモデルの効率的なキャラクタライズ手法(実際にはパラメータの抽出と統計解析)の確立が急務でした。

前置きが長くなりました。本研究の特徴を一言で言うと、中間モデルという新しい概念を導入することによって、MOSFETモデルのパラメータ抽出と統計解析の手順を整理・系統化することに成功している点に尽きます。中間モデルとは実素子の測定データが持つ情報のエッセンスを抽出して定式化するための道具で、その上で一旦定式化された情報はどのようなMOSFETモデルのパラメータにも容易に反映させることができます。もう少し具体的に説明します。いくつかの世代の異なるMOSFETモデルを比較してみると、どのモデルにも共通する核となる部分が存在することが分かります。それはMOSFETの基本的な動作原理を受け持つ部分で、重要な数式やパラメータが集中しています。MOSFETモデルはこれらの基本的な数式やパラメータを更に細分化することによって進化してきたのです。であれば、その細分化のプロセスを逆に辿れば、全てのモデルパラメータは少数の基本パラメータに行き着くこととなります。つまり、いくつかの基本パラメータさえ押さえおけば、その枝葉であるモデルパラメータを求めることは比較的容易にできるわけです。中間モデルとはすなわちこの基本動作方程式とパラメータのことです。測定データは一旦中間モデルのパラメータという形で整理され、その後パラメータ変換という形式的な操作で所望のモデルのパラメータが求められます。ばらつきに関しても同様で、一旦中間モデルのパラメータの分布を定式化した後、変換式を使ってモデルパラメータの分布を再現します。これによって、どのようなMOSFETモデルを使う場合でも、統一的な手順でパラメータ抽出と統計解析が実現できるようになりました。

中間モデルのアイデアは単純ではありますがそれだけに実用上有効であり、特に実際に回路を設計されている企業の関係者から好評を博しました。学問性よりは実用性を重視したという点において博士課程の研究としては異色であるとも言えますが、こういう研究もたまにはあってもいいんじゃないかという点で。

**豊田紀章****「Nano-processing with Gas Cluster Ion Beams」****(ガスクラスターイオンによるナノ構造形成プロセスの研究)**

平成11年3月23日授与

各種イオンを用いた微細加工技術は、ナノメートルオーダーでの加工を実現するための重要なプロセス技術である。これまで、ドライエッチングプロセスにおいては、反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching ; RIE)などのプラズマソースを用いた微細加工技術が、優れた量産性と微細加工性のため広く用いられている。しかし、高エネルギー粒子に起因する基板の損傷やチャージアップによるデバイス破壊等の問題があり、低エネルギーで低電荷のエッチングプロセスが求められている。さらにデバイスの超微細化に伴い、表面の凹凸を原子レベルで平坦にすることが要求され、化学的機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing ; CMP) がシリコン表面の平坦化などに用いられている。しかし、CMPでは研磨表面の制御がドライエッチングプロセスに比べて困難であり、またポリッシャを直接基板表面に接触させて平坦化を行うため、微細な構造や三次元的形状を持つ試料、機械的強度の弱い試料に対しては研磨が困難である。

本研究では、これらの加工プロセスの限界を打破するために、巨大原子集団であるクラスターをイオン化して基板に照射し、新たな照射効果を得るガスクラスターイオンビーム技術に着目した。クラスターは直径数ナノメートルの粒子であり、その中に数千個の原子が含まれるため、基板への衝突時には数千個の原子がほぼ同時に極狭い領域に入射し、基板原子とクラスター構成原子との多体衝突が起こる。この結果、クラスターイオンの全エネルギーが基板表層部に集中して付与され、単原子イオンでは得られない非線形現象を起こし、表面平坦化効果や化学反応促進効果等、従来のイオンビームプロセスでは得られない表面改質効果が期待される。また、クラスターイオンは原子数に対する電荷量が少なく、低電流で大量の原子・分子を輸送することができる。さらに、クラスターイオン中の一原子が持つエネルギーは、加速エネルギーをクラスターサイズで割った値であり、超低エネルギーイオンビームを容易に実現することが出来る。

本研究では、クラスターイオン源の開発を行い、飛行時間法を用いた質量分析により平均クラスターサイズ数千の巨大クラスターイオンが生成されることを確認し、また、そのイオン化特性も明らかにした。表面平坦化効果においては、従来加工困難であったダイヤモンド薄膜やSiC基板を表面荒さ数Åまで平坦化可能であることを示した。これまでクラスター衝突時に基板水平方向にスパッタされた原子が分布するラテラルスパッタリング現象は分子動力学シミュレーションによって予測されていたが、これを実験的に実証すると共に、本現象が表面平坦化効果に大きく影響していることを明らかにした。

また、反応性クラスターイオンが基板に衝突した場合、クラスターの崩壊とともに反応性分子の解離が起こる。高温・高圧状態のクラスター衝突領域では、解離した反応性分子と基板との化学反応が促進され、エッチングレートが飛躍的に増大する。さらに、シリコンのマイクロレンチ加工形状を観測した結果、異方性エッチングが実現されており、電荷によるチャージアップの影響も少ないことが分かった。このようにクラスターイオンを用いることにより、超平坦面の形成や微細パターンの加工といったナノ構造形成プロセスへの応用が可能であることを明らかにした。

本研究において、ガスクラスターイオンビームの生成やイオン化特性を明らかにしたことは、実用的な大電流クラスターイオンビーム照射装置の開発指針となると考えられる。また、クラスターイオン衝突時における基板原子との相互作用への理解が大きく進展し、この結果、微細加工や表面平坦化への応用が促進されるものと期待できる。

Ahmet Onat

「Application of Recurrent Neural Networks to Reinforcement Learning under Incomplete Perception」

(リカレントニューラルネットワークの不完全知覚下での強化学習への応用)

平成11年3月23日授与

Designing control strategies for complex tasks in the real world such as autonomous navigation of robots is a difficult problem because some properties of the working environment may not be known in advance. In such cases, it is necessary to build a control strategy by learning from the interactions with the environment. The reinforcement learning paradigm is suitable for solving such problems. It is a similar paradigm to what many animals use when they encounter problems with no known solution.

In reinforcement learning, the learning agent starts with arbitrary rules of interacting with its environment. After each interaction, it receives a scalar valued reward or punishment called “reinforcement”. The aim of the agent is to explore its environment through a series of trial and error interactions and update its rules of behavior so as to maximize the reinforcement signal over time.

Established reinforcement learning algorithms such as Q-learning(Watkins, 1989) and many others require the perfect detection of the state of the environment in order to achieve optimal performance. However, in most real world tasks, the environment has states which are not directly detectable by the learning agent because sensors are not sufficient, or because the state set of the environment is too large to manage. This is called the “incomplete perception” problem. To be able to obtain the optimal performance with reinforcement learning in real world tasks, it is necessary to develop methods that can overcome the problems caused by incomplete perception.

This thesis proposes two solution methods for the problem of incomplete perception in reinforcement. In both methods the learning agent autonomously develops a dynamic model of the environment using the history of interactions between itself and the environment. This model complements the sensory inputs of the agent, and provides the missing information about the state of the environment. The decisions of the agent are then based on the states of the model in order to overcome the problem of incomplete perception. Recurrent neural networks are used for building the dynamic model in the proposed methods.

The first method, called “Q-learning with recurrent neural networks” is a general method that implements Q-learning with recurrent neural networks. Several types of learning agent structures are proposed. Validity of the method is examined using computer simulations and test environments, such as environments having discrete state spaces and governed by symbolic rules, and environments having a continuous state space, governed by differential equations.

The method is successful in discovering the optimal behavior. The examination of the dynamic models developed during learning show that such models develop gradually, incorporating more and more details of the environment, and eventually produce an accurate representation of the actual environment states. Further, the evaluation of the environment states is close to the theoretical optimum.

The second method is called “stochastic gradient ascent with recurrent neural networks”, based on the SGA algorithm(Kimura et al., 1996). It calculates the local gradient of the reinforcement signal with respect to the internal parameters of the recurrent neural network, and improves its behavior pattern using this gradient. Two architectures with recurrent neural networks are proposed. Results of numerical simulations show that they are capable of developing non trivial representation of the environment state to obtain the optimal behavior, even under severe sensor restrictions.

傍島 正 朗

## Effects of Optical Geometry and Optical Guiding on Evolution of Free Electron Lasers

(自由電子レーザ生成における光共振器形状と光ガイドの効果)

平成11年 3月23日授与

自由電子レーザ(Free Electron Laser; FEL)とは、アンジュレータと呼ばれる周期的な磁場中に光速近くまで加速された電子ビームを入射して蛇行させることにより、蛇行の際に発生するシンクロトロン放射光を重ね合わせて、さらにその放射光と電子ビームとを共鳴的に相互作用させることによりコヒーレント光を得るものです。

FELはその発振波長がアンジュレータの磁場強度、周期長、電子ビームのエネルギーに依存するため、原理的にはマイクロ波領域からX線まで連続的に変化させることが可能で、固体レーザや気体レーザのように発振波長が原子、分子、及び固体の電子のエネルギー準位に束縛されないという特徴を持っています。またFELは電子ビームのエネルギーを直接電磁波のエネルギーに変換するため使用済みの電子ビームのエネルギー回収、再利用が容易であるため高効率化が可能で、さらにレーザ媒質がないため絶縁破壊が起こらず高いピークパワーが得られます。

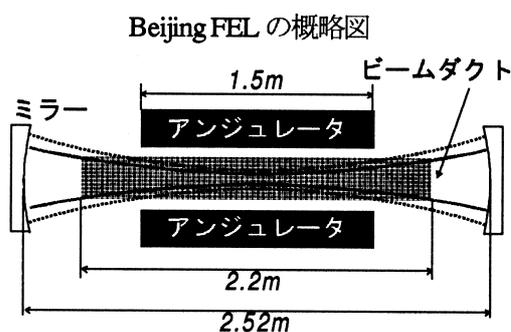
世界初のFEL発振が達成されて約20年たった現在では、アメリカ、ヨーロッパ、日本、韓国などでFEL施設が建設され、リニアック、電子蓄積リングを用いた多くのFEL発振が報告されており、生医学、生物物理、物性研究などに利用されています。

FELをより普及させるためには、安定、安価、小型であることが必要ですが、一台の装置でカバーできる波長領域を拡大することも重要です。波長領域拡大の妨げとなっている要因の一つに回折損失があります。これは左下図のようにビームダクトと呼ばれる真空チャンバに回折によって広がった光が衝突することにより生じる損失で、波長が長くなるほど大きくなります。本研究ではこの回折損失が顕著な中国Beijing FELについて、今回新たに開発したシミュレーションコードを用いて解析し、回折損失の軽減方法を研究しました。私の開発したコードの特徴は、光が電子ビーム付近に導かれる光ガイド効果とビームダクトの効果が正確に計算できる点にあります。

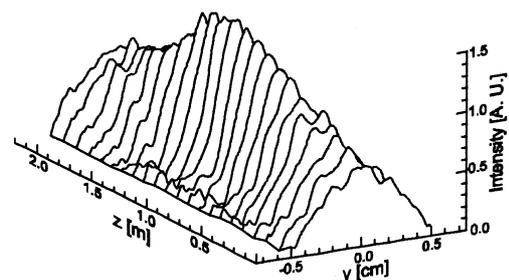
回折損失の軽減方法として、まず、光がビームダクトに衝突する割合を低減するために、ビームダクト長を短くし断面形状も変更する方法を提案し、シミュレーションを行いました。その結果、形状変更前の5倍のレーザ出力を得られる可能性が示されました。

また、光がビームダクトを通過する回数を減少させるため、光共振器形状をリング型にした装置をシミュレートしたところ、26%の出力向上の可能性を見出しました。

さらにシミュレーションによってビームダクト内で形成されているモードが求められ(右下図)、基本モード(TEM<sub>00</sub>)以外にTEM<sub>02</sub>モードの高調波成分が発生することでレーザの利得が低下していることが新たに分かりました。



ビームダクト内のレーザ場強度分布 (y 軸上)



David M. Mulati

「Electrical Characterization of Multi-crystalline Silicon Solar Cells for High Efficiency」  
(多結晶シリコン太陽電池高効率化へ向けての電氣的評価)

平成11年5月24日授与

エネルギー枯渇や地球環境問題を解決するクリーンエネルギー源として太陽光発電が脚光を浴び、多結晶シリコン太陽電池が電力発生用として実用化されている。本論文では、多結晶シリコン太陽電池の更なる高効率化を目指して、局所的な電氣的短絡特性を統計的に処理して太陽電池の性能と関連づけ、エネルギー変換効率に大きく影響する半導体の少数キャリア寿命を正確に測定し、ホール効果や電子線誘起電流像の解析法に検討を加えて太陽電池の性能と関連させている。

[局所的短絡現象の太陽電池性能への影響]

多結晶シリコンの $n^+p$ 接合に、ホトリソグラフィと化学エッチングによって直径0.2~1.2mmの大きさの異なるメサ(台形)構造太陽電池を70個以上作製して、それぞれの電流-電圧特性を光照射をしない(暗時)状態で測定し、開放電圧、曲線因子、逆方向電流などの太陽電池特性の面内分布を調べた。開放電圧の小さなものは再結合電流が大きく(電氣的短絡)、太陽電池内で局所的に分布していることを明らかにした。逆方向電流密度 $10^{-4}A/cm^2$ を境界として、太陽電池の性能が良好、不良に分類でき、良好なものでは逆方向電流密度が小さくて開放電圧が0.5V以上あるが、不良なものでは逆方向電流密度が大きくて開放電圧が0.25V以下であることを示した。エネルギー変換効率が13%以上の高効率太陽電池では、良好なもの割合が全体の63%を超えることを見出した。

[多結晶シリコンの少数キャリア寿命の決定]

暗時の順方向再結合電流値をメサ構造の[周辺長/面積]比の関数として描き、外挿法によってメサ構造の大きさに依存しない値を決定して、少数キャリア寿命を推定する静的方法を提案した。ついで、暗時のスイッチング時間の測定結果を、[周辺長/面積]比の関数として描き、同様に外挿法によって少数キャリア寿命を決める動的法を、初めて多結晶シリコン太陽電池に適用した。メサ構造の周辺部が大きな影響を与えるが、[周辺長/面積]を変えることによってその効果が除去でき、厳密な数値が求められることを示した。単結晶シリコンでは約 $105\mu s$ 、多結晶シリコンでは、高効率(13.4%)の太陽電池で約 $85\mu s$ 、低効率(5.2%)の太陽電池では約 $20\mu s$ であり、効率と大きく関係していることを明らかにした。この方法では、太陽電池が製作された後に少数キャリア寿命が測定できるので、太陽電池の効率と関連させることができ、性能評価に大いに役立つ。

[多結晶シリコンの電子物性評価と電子線誘起電流測定法]

太陽電池母体であるp型多結晶シリコンのホール効果の測定結果から不純物の種類を推測するとともに、多数キャリアの輸送現象を精密に解析した。温度依存性から約50meVのイオン化エネルギーをもつアクセプタの存在を指摘し、さらに詳細な解析結果からこれよりも大きなイオン化エネルギーをもつ複数のアクセプタの存在を指摘した。二次イオン質量分析結果からは母体のp層よりもエミッタの $n^+$ 層に鉄(Fe)が多く含まれていることを見だし、 $n^+$ 層形成時の不純物ゲッタリング(収集)であろうと推測した。

太陽電池における電子線誘起電流の強度比分布(contrast)が反射電子線の強度と相反することを示し、高効率化のために施される表面の織地模様(texture)の端部や先端では反射電子線強度が大きくなるため、半導体内で生成される電子-正孔対の数が少なくなり、電子線誘起電流値が小さくなるとしている。電子線誘起電流が少ないことを再結合過程の増加と説明すべきでないことを指摘した。

## 福島 省 吾

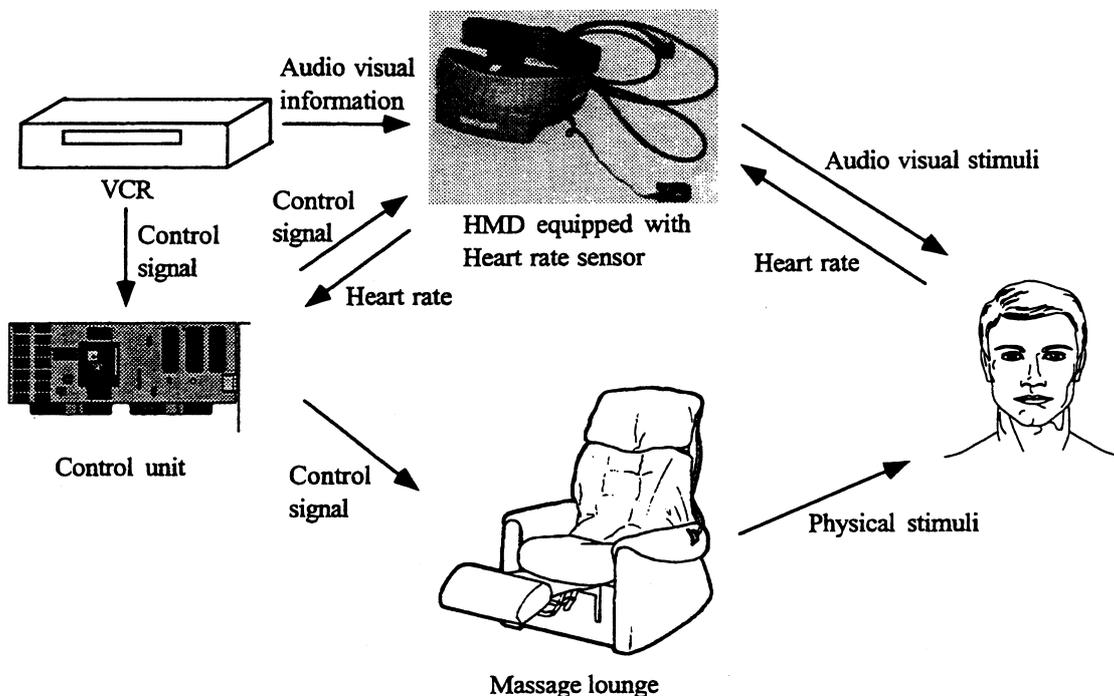
### 「人間の視覚系との調和を目指す仮想現実感機器の試作と視覚系機能の心理生理特性に関する実験研究」

平成11年 5月24日授与

本論文は、人間の主要な情報取得チャンネルである視覚系とより調和のとれた仮想現実感システムを構築することを目的とする研究をまとめたものです。主な内容は、ヘッドマウントディスプレイを用いた新しい心身賦活装置の開発、視機能に関する客観的評価指標の提案、および視環境に対する心理生理特性に関する実験的研究の結果です。ヘッドマウントディスプレイを用いた新しい心身賦活装置は、ヘッドマウントディスプレイのほかに、立体映像生成器、マッサージ機、およびマイコンからなる図のような装置です。ビデオ信号に基づいた立体映像生成や脈拍測定による入眠判定などを行うことによって、奥行き感による心理的賦活の促進および入眠時における適切な対応を可能としています。

このような装置の開発に加えて、瞬目と認知負荷との関連を実験的に調べています。その結果、点系列相関係数を瞬目生起リズムの指標として用いることによって、認知課題がもつ周期と瞬目リズムとがほぼ一致することが明らかにされています。また、認知負荷の増大につれて瞬目が抑制されることも確認されています。

さらに、眼球測定装置を組み込んだヘッドマウントディスプレイ（これをアイセンシング・ヘッドマウントディスプレイと呼びます）を開発し、それに瞳孔画像処理回路を付加することによって、汎用パーソナルコンピュータを使って瞬目、瞳孔の大きさ、および眼球運動の同時計測を可能としました。このアイセンシング・ヘッドマウントディスプレイを用いてステレオアノマリーの簡便な判定法を提起しています。



寺川 朗

## 「Hydrogenated Amorphous Silicon Germanium Alloys for High Efficiency and Stable Solar Cells」

(高効率・高安定太陽電池用非晶質シリコンゲルマニウム合金の研究)

平成11年5月24日授与

太陽光を電気エネルギーに変換する太陽電池は、クリーンエネルギーとして大きく期待され、特に、水素化非晶質シリコン(a-Si:H)を基材とするアモルファス太陽電池は低コスト電力用として実用化が待たれている。a-Si:H系材料を用いる積層型太陽電池は、太陽光スペクトルを広く活用する高効率化と、材料の薄膜化による安定性の向上が実現できる。非晶質シリコンゲルマニウム合金(a-SiGe:H)は、Geの添加量によって光学ギャップが任意に制御できるので、上部にa-Si:H太陽電池を持つ積層型の下部太陽電池用材料として有望視されている。しかしながら、三元系であるために、材料設計が複雑で、これまで十分な知見が得られていなかった。本論文では、SiH<sub>4</sub>、GeH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>の混合ガスからプラズマCVD法によってa-SiGe:Hを堆積し、製膜条件、組成、水素結合構造、光学ギャップ、電気特性と太陽電池特性および光安定性の相関関係を明らかにして材料設計の指針を構築し、大きな課題であるアモルファス太陽電池の高効率化と安定化を目指している。

[a-SiGe:Hの製膜条件と組成、光学ギャップの関係]

太陽電池の性能を決める光学ギャップが、材料中のGe量と水素量の組み合わせで決まることを示し、水素量制御の重要性を論じた。欠陥密度を最小化し太陽電池の変換効率を最大にする最適組成が存在すること、水素量が多すぎるとSi-H<sub>2</sub>量が増加し、少なすぎると非晶質ネットワークの柔軟性が低下して欠陥修復が不完全となるため特性が低下することを見いだした。

[水素結合構造の解明]

赤外吸収スペクトル法を用いて材料中の水素結合構造を詳しく調べ、構造が不均一、複雑であるために、水素がGeよりもSiと結合しやすい選択性を考察した。組成の異なる材料を比較し、Ge1原子あたりの水素結合量は組成によらずほぼ一定で、水素量の変化に伴う水素結合構造の変化は主にSi原子周辺で生じること、水素量の増加に伴いSi-H<sub>2</sub>結合量が増加し、付着係数は材料中の水素量、Ge量の増加と共に大きくなることを示した。これらを基に、水素結合の選択性は製膜機構に起因するとの仮説を導いた。さらに、水素量と[Si-H<sub>2</sub>]/[Si-H]比の相関関係を記述する水素結合形成モデルを提案し、実験結果と比較して、高水素希釈下で製膜した場合、両者はほぼ平均しているのに対して、低水素希釈下で製膜した場合、Si-H<sub>2</sub>結合が多いことを明らかにした。

[アモルファス太陽電池の光安定性]

光学ギャップの異なる材料群と光学ギャップが一定で組成が異なる材料群を用いて、変換効率の光劣化過程を系統的に比較し、光学ギャップが光安定性に及ぼす影響を調べた。光劣化の時定数は光学ギャップが小さいほど大きい、熱回復の時定数は光学ギャップにはほとんど依存しないことを見いだした。また、光学ギャップが小さいほど光劣化の温度依存性が大きくなるが、これも光誘起欠陥生成過程の光学ギャップ依存性によって説明できることを示した。

[太陽電池への適用]

上記の知見を積層型太陽電池の下部材料設計に適用し、高効率・高安定太陽電池を試作した。組成の最適化により、小面積(1cm<sup>2</sup>)a-SiGe:H単一の太陽電池で安定化後効率3.3%(上部a-Si:H太陽電池での光吸収分を除去したときの効率)を達成し、小面積(1cm<sup>2</sup>)a-Si:H/a-SiGe:H積層型太陽電池で、安定化後効率10.6%を達成した。さらに、大面積(1200cm<sup>2</sup>)a-Si:H/a-SiGe:H太陽電池として安定化後効率9.5%を達成した。これらの安定化後効率はそれぞれ当該面積では世界最高の値である。

浦島 智

「多点単色光オーロラ観測画像のトモグラフィ再構成解析に関する研究」

平成11年5月24日授与

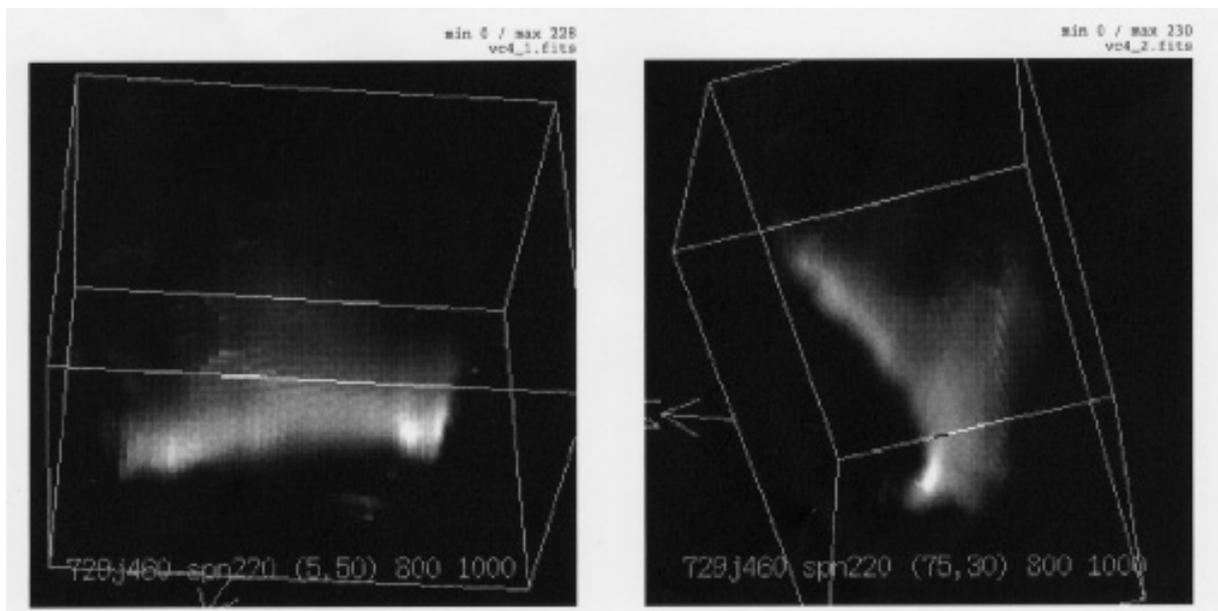
この論文は、複数の観測点で観測された単色光オーロラ画像を用いて元のオーロラの発光強度分布を推定する手法（これをオーロラのトモグラフィ再構成法とよびます）について研究した結果をまとめたものです。研究の要点はつぎのとおりです。

まず、良好な再構成結果をうるには、使用するデータが確実なものでなければなりません。そこで、この研究ではまず、ALIS（Auroral Large Imaging System）と呼ばれる国際多点撮像観測網で使われるカメラの方向および感度の校正方法を提案しその精度の検証をおこなっています。

つぎに、トモグラフィ再構成法ですが、オーロラの場合には、医療応用などと比べて極めて少ない観測方向のデータしか得られません。したがって、問題は必然的に ill-posed となります。これに対して何らかの意味のある解答を与えるためには先見知識を活用するなどの工夫が必要となります。この論文ではオーロラの特性を利用して近似を行う方法、および再構成領域の選択を行う方法を新たに提案しています。また、これらの方法と従来から知られている手法とを総合して用いることで、高精度でオーロラの発光強度分布が推定出来ることを示しています。

さらに、上記の方法を実際の観測データに適用して再構成を試みています。得られた結果は、発光強度が最大となる高度や沿磁力線発光強度プロファイルの形状などについて、従来の物理学的知見に合致するものとなっています。また、この方法の信頼性を、計算機内で発生させたオーロラモデルを使って評価し、一般的には信頼度の高い結果が得られるが、特定の条件のもとでは大きな誤差が生じうることを明らかにしています。

オーロラ画像の再構成の一例を掲げておきます。



## 山本 宗 継

「赤外波長域半導体3次元フォトニック結晶の開発とその光学特性に関する研究」  
平成11年7月23日授与

フォトニック結晶とは、その内部に周期的屈折率構造を有する新しい光材料であり、光のエネルギーに対するバンド構造を形成するという特徴がある。このバンド構造のうち禁制帯をフォトニックバンドギャップと呼び、このエネルギー範囲の光はフォトニック結晶中には存在し得ず、このためフォトニック結晶中に置かれた発光体からは自然放出も含めて発光が禁止される。また、周期構造に人為的に乱れ(欠陥)を導入することにより、フォトニックバンドギャップ中に欠陥に起因した許容順位(欠陥順位)が生じ、この順位に集中した発光や、欠陥列にそった光伝播といった現象が生じうる。このような性質を利用して、無閾値レーザーや極微小曲率を持った光導波路など従来技術では不可能であった新しい光デバイスの実現が期待されている。このようなデバイス応用を行なうためには、(1) 全方向に対するバンドギャップ(完全バンドギャップ)の持ち、(2) 任意の位置に欠陥が導入可能であり、(3) 発光体を内部に導入することが可能であり、(4) 電流注入による外部からの制御が可能という条件を満たしたフォトニック結晶の実現が不可欠である。ところが、フォトニック結晶の作製には光の半波長程度の周期を持つ3次元構造を作製する必要があり、これらの条件を満たす作製法は存在しなかった。そこで本研究はこれらの条件を満たしうるフォトニック結晶実現法を考案し、実際の作製を行ない光の波長域で完全バンドギャップを持つフォトニック結晶を実現することを目的とした。

本研究で考案したフォトニック結晶実現法は以下のような手順である(図1)。(i) エッチング停止層、フォトニック結晶層のエピタキシャル成長、(ii) フォトニック結晶層への2次元基本構造の形成、(iii) ウエハ融着による一体化、(iv) 選択エッチングによる基板、エッチング停止層の除去し、2次元基本構造の積層構造を得、(v) (iii), (iv)の繰り返しによる3次元構造を形成する。この実現法では、ウエハ融着を行う際に2次元構造間の精密な位置あわせが要求されるが、レーザー光回折を用いた位置あわせ法を開発した結果、誤差100nm未満という高精度位置合わせを達成した。実際に空気/GaAs回折格子を8層積層したフォトニック結晶を実現した、この結晶に対して透過スペクトル測定による光学特性評価を行なったところ、8 $\mu\text{m}$ 付近を中心として4層積層フォトニック結晶では16dB、8層積層では30dBというフォトニックバンドギャップに起因する大きな減衰が得られた。また、入射角度を変化させた場合についても測定を行ない、その結果全方位に対するバンドギャップが形成されていることを初めて明らかにした。

以上のように新しいフォトニック結晶実現法を考案し、それに基づき光の波長域でフォトニック結晶を実現した。また、光学特性評価により完全バンドギャップを有する事を初めて明らかにした。今後は、本件急で提案する作製法に基づき発光体や結晶欠陥を持ったフォトニック結晶を実現し、自然放出制御などの新しい物理の解明や、フォトニック結晶デバイスなどへの展開が期待できる。

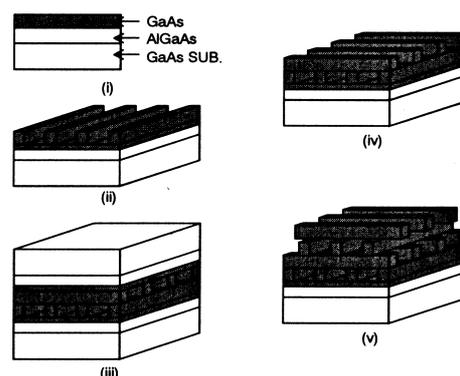


図1：3次元フォトニック結晶実現法の模式図

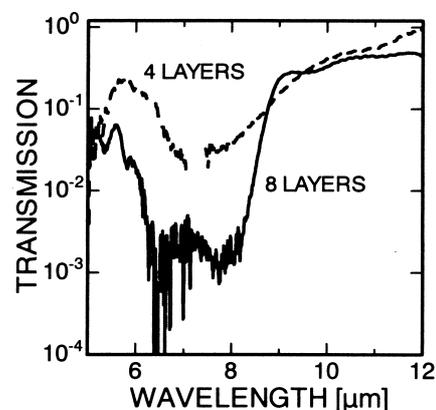


図2：透過スペクトル特性

康 龍 雲

「非平衡電離ディスク形MHD発電機-電力系統連結システムの動作特性に関する解析的研究」

平成11年 9月24日授与

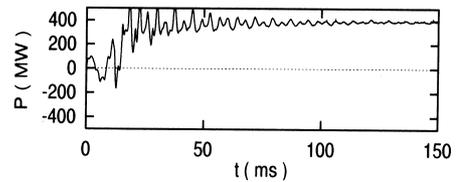
MHD発電は、導電性流体を磁界内に流すことにより発電を行う直接発電の一種で、2000℃から2700℃程度の高温領域の熱エネルギーを電気エネルギーに変換できるため、高いエネルギー変換効率を達成できる。また、低公害性についても実験にて実証されており、エネルギー資源の有効利用と地球環境保全という要望に適合した発電方式として実用化が待たれている。非平衡電離MHD発電方式は、天然ガスや核融合エネルギーなど多様なエネルギー源から熱交換器を介して加熱された希ガスを用いて発電するもので、代表的なMHD発電方式の一つである。非平衡電離MHD発電の実用化に向けて、現在までに、東京工業大学を中心として優れた発電実験結果が蓄積されており、また、我々の研究グループも数値解析を中心とした理論研究の進展に多大な貢献をしてきた。

MHD発電機は直流発電機であるため、交流電力系統に接続する際には、インバータによって電気出力を交流に変換する必要がある。本論文は、セシウムをシードしたアルゴンを作動流体とする非平衡電離ディスク形MHD発電機の直流電力をインバータを介して交流電力系統に供給するシステムの動作特性を、数値シミュレーションにより検討したものである。論文の主な内容は以下の通りである。

(1) MHD発電機-電力系統連結システム(以下、連結システムと呼ぶ)に対する基本動作特性の検討を行った。定格運転時には連結システムは安定に動作するが、MHD発電機が短絡状態に近くなると、発電機内にプラズマの電離不安定現象が生じることを明らかにした。また、この電離不安定現象が電力系統へ及ぼす影響を軽減するためには、MHD発電機を2分割した分割出力取り出し方式の採用が効果的であることを示した。図1に2分割出力取り出し方式の連結システムの模式図を示す。

(2) 連結システムにおいて、インバータ故障や送電線故障が発生した場合、故障が除去されてもMHD発電機は短時間では元の定格状態に戻らないことを示し、MHD発電機を定格状態へ回復させるためには、インバータの制御角を制御する必要があることを示した。図2に、送電線一線地絡事故時の解析結果を示す。送電線有効電力、MHD発電機内ガス流速とも事故から速やかに回復している。

(3) MHD発電システムのサイクルでは、従来の同期発電機より上流(高温部)にMHD発電機を用いて発電効率を高める。そこで、上流部のMHD発電機と下流部の同期発電機を並列に電力系統に接続する連結システムの動作特性を検討し、連結システムは安定に動作することを明らかにした。



(a) 送電線有効電力

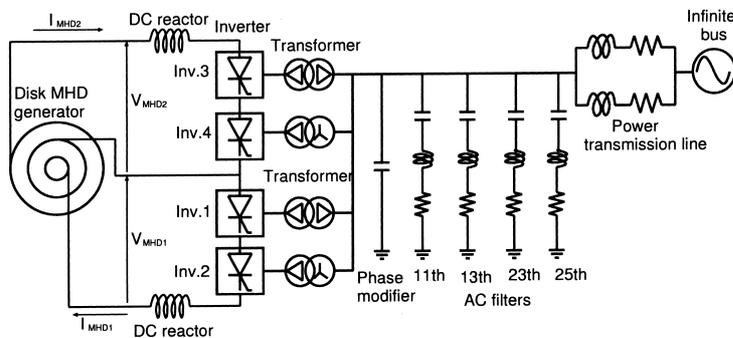
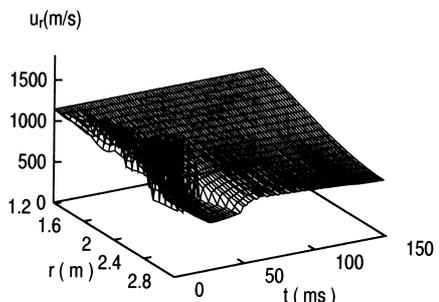


図1. MHD発電機-電力系統連結システム



(b) MHD発電機内ガス流速分布

図2. 送電線事故時の解析結果

## 陳 新奇

## 「Studies on Nanometer-scale Polarization Characteristics of Ferroelectric Organic Thin Films by Scanning Probe Microscopy」

(走査型プローブ顕微鏡による有機強誘電体薄膜のナノスケール分極特性に関する研究)

平成11年9月24日授与

走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscopy: SPM) の探針に高電界を加えることにより強誘電体薄膜の分極領域の配向を局所的に制御する記録法は、再書き込み可能な超高密度メモリーとして広く注目を集めている (図1参照)。記録密度を決定する分極領域のサイズは、探針直下の電界に大きく依存することから、電界集中のために強誘電体薄膜の厚さをできるだけ小さくする必要がある。一方で、無機強誘電体薄膜においては、その膜厚がナノスケールまで薄くなると、結晶グレイン間あるいは基板との界面効果のため、その強誘電性はしばしば消失する。これに対して、有機強誘電体材料においては、一般に有機分子間あるいは基板表面との相互作用は小さく、界面の影響は小さいと考えられることから、薄膜化しても強誘電性が維持される可能性がある。しかしながら、現状では、有機強誘電体の超薄膜化による物性への影響や局所分極領域の強誘電性、あるいは分子分極の機構の詳細については十分な知見が得られていない。

本研究では、SPMを用いた有機強誘電体超高密度メモリーへの応用に向けて、有機強誘電体超薄膜を作製し、その表面構造および微小分極領域の電気特性をナノメートルスケールで評価した。

本研究で用いた試料、ポリフッ化ビニリデン-三フッ化エチレン共重合体 P(VDF/TrFE) は、その分子鎖が全トランス構造をとり、常温で $\beta$ (I)型と呼ばれる自発分極を有する結晶形態をとる。本研究では、有機溶媒に溶かした P(VDF/TrFE) 溶液を導電性基板上に滴下し、スピン・コート法により薄膜化した後、熱アニーリングすることで試料薄膜を作製した。溶液濃度、スピンコート条件、熱処理条件など試料作製条件と薄膜の表面構造との関係が原子間力顕微鏡 (AFM) による高分解能観察により明らかにされた。その結果、薄膜は、幅約100 nm、長さ約1000 nmの棒状構造体で構成されており、さらにこの棒状構造体には内部構造があることを明らかになった。

次に、導電性 AFM 探針により試料の局所領域に電界を加えることで作製されたナノスケール分極領域の電気的特性を評価した。分極領域は圧電応答性があることから、同じ導電性 AFM 探針により微小振動電界を薄膜に加えその逆圧電振動を検出することで、分極領域を検出・測定することが可能となる。この測定方法により有機及び無機強誘電体超薄膜の圧電定数を測定し、圧電定数の膜厚依存性を評価した。また、ポーリング電界の大きさや加える時間と得られる分極領域のサイズ・電気特性の関係についても評価した。その結果、有機強誘電体薄膜はその膜厚が小さくなると、ポーリング電圧の極性に対してその圧電応答は非対称となることが分かった。すなわち、基板との界面効果により薄膜に分極反転不可能な分極層が存在しており、超薄膜においてはその影響が顕著になると考えられる。この基板の存在に起因する双極子配向については、堆積直後の薄膜の表面電位あるいは局所分極領域の圧電応答から測定することが可能であり、その双極子は下に向いていることが明らかになった。

一方、最適のポーリング条件下では、厚さ 30 nm の P(VDF/TrFE) 薄膜に対して、30 nm 径の分極領域を達成できた。これは 230 Gbit/in<sup>2</sup> 相当の非常に高密度なメモリーが作製可能なことを示唆している。この局所分極領域は長時間にわたって安定であることも確認された。

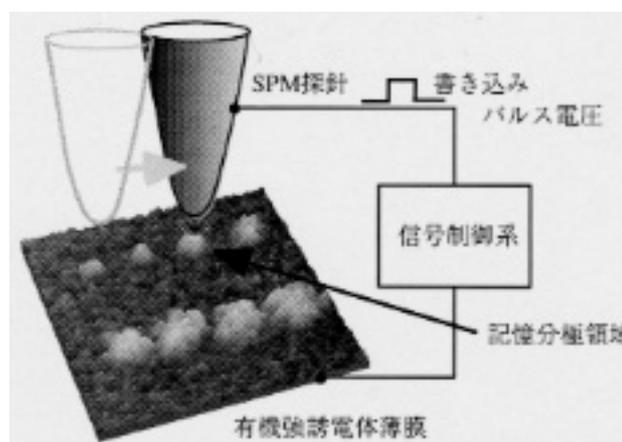


図1 有機強誘電体薄膜上へのナノスケール分極記録。

中 川 隆 志

「新しい人間機械系相互作用シミュレーションのインタフェース設計評価への応用に関する研究」

平成11年 9月24日授与

米国スリーマイル島原子力発電所事故や、名古屋空港中華航空機事故が典型的であるが、システムとシステムを運用する人間の関わり方に起因した大規模工学システムの致命的な大事故が最近発生している。大規模工学システムの安全性、信頼性をより一層向上させるには、ハードウェア一辺倒の改良だけではなく、システムを構成する人間とハードウェアとを一体として捉え、マンマシンシステム全体の信頼性向上を図ることが重要である。本研究では、原発のマンマシンシステムの設計改善に有効かつ効率的に反映できる、システムと人間との適合性を分析・評価する手法の実用化を目標に、新しい手法の研究と関連ソフトウェアシステムの開発を進めた。

これまで、原発のマンマシンシステムの設計検討では、実際の制御室の原型モデルを製作して、実際の運転員がそれを操作し、その過程での人間機械系相互作用（人間と機械との接点である、マンマシンインタフェースでの人間の監視、操作行動と、それによってもたらされる機械システムの動的応答との相乗的インタラクションをいう）を観察して、制御室設計の妥当性を評価するという、膨大な経費と時間を要する実験評価法を用いていた。本研究では、このような方法に代わる経済的な設計分析法として、運転員の標準的操作行動を再現するシミュレータと設計図に基づく機械側の機能を再現するシミュレータによって人間機械系相互作用を計算機により再現する、新しい人間機械系相互作用シミュレーション手法を提案し、その機能を検証した。次いで、マンマシンインタフェースの設計の妥当性を評価する際に必要な、様々な評価の視点（肉体的負荷、ヒューマンエラーの確率、操作に要する時間等）をシミュレーション結果から効率的に導出し、様々な評価視点から、マンマシンインタフェース設計を総合的に評価・分析する手法を提案した。そして、人間機械系相互作用シミュレーション手法と評価・分析手法とを統合し、ソフトウェアによるマンマシンインタフェース評価システムとして開発した。（図参照）

本研究では、更に、このマンマシンインタフェース評価システムを用いて、実際の原子力発電プラントの中央制御室やその他の制御設備の設計案の分析と評価を行った。その結果、設計案に潜在するヒューマンエラー要因や各種の評価指標間の定量的なトレードオフの評価を行って、設計の潜在的問題点の抽出と、どのように設備の設計改善に反映できるかを示し、本評価システムの妥当性と、現実のマンマシンインタフェース設計へ有効に適用できる有用性を示した。

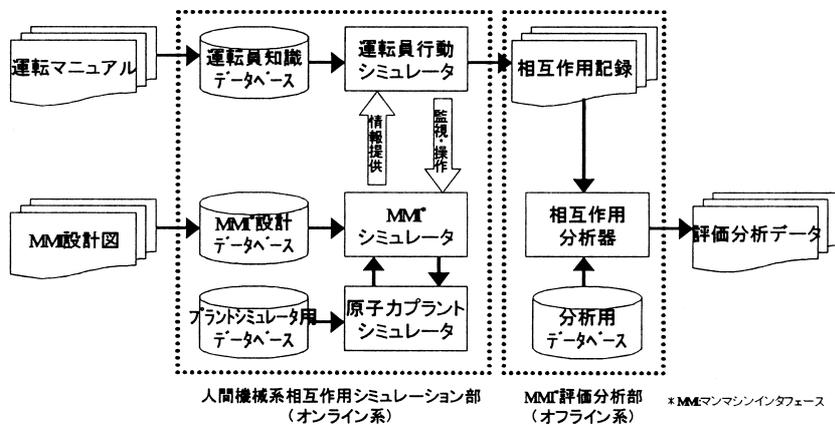


図 マンマシンインタフェース評価システムの基本構成図

## 【論文博士一覧】

森田 和元	自動車用情報表示装置の安全性に関する研究	平成10年 9 月24日
小嶋 浩嗣	Study on the Plasma Waves in the Geomagnetic Tail Region via Spacecraft Observations (科学衛星観測による地球磁気圏尾部プラズマ波動の研究)	平成10年11月24日
吉田 豊彦	Studies on High Performance Microprocessor Architecture (高性能マイクロプロセッサアーキテクチャの研究)	平成10年11月24日
福本 克巳	マイクロ波発振器の負荷特性と同期特性に関する研究	平成11年 1 月25日
都築 伸二	Sequence Design and Access Protocol for Baseband DS-CDMA Networks (ベースバンド DS-CDMA ネットワークのための系列設計とアクセスプロトコル)	平成11年 1 月25日
小林 和淑	A Study of the Functional Memory Type Parallel Processor (機能メモリ型並列プロセッサに関する研究)	平成11年 1 月25日
三谷 公二	超高精細カラー動画撮像システムに関する研究	平成11年 1 月25日
佐藤 寿倫	History Directed Processor Architecture (オンチップメモリ上に構成された動的な実行履歴を利用するプロセッサアーキテクチャに関する研究)	平成11年 1 月25日
栗林 元隆	機能ブロック混載LSIのレイアウトとタイミング検証の高度化に関する研究	平成11年 3 月23日
三橋 隆	高性能LSIのレイアウト設計自動化に関する研究	平成11年 3 月23日
藤井 洋重	2分決定グラフの処理技術と論理回路の設計／検証技術に関する研究	平成11年 3 月23日
工原 美樹	InGaAsP系 p-i-nフォトダイオードの動作機構の解析と光加入者系送受信器への応用に関する研究	平成11年 5 月24日
水田 忍	マルチモダリティ医用三次元画像の自動位置合わせ手法に関する研究	平成11年 7 月23日
伊藤 茂生	低電圧電界放出ディスプレイの開発に関する研究	平成11年 9 月24日
小坂 英男	面発光機能素子の開発とその応用に関する研究	平成11年 9 月24日

**学生の声****雑感**

通信情報システム専攻 佐藤研究室（三菱電機所属） 内 藤 出

修士課程を修了後10年余り、「社会人特別選抜」（いわゆる社会人博士）の制度を利用して情報学研究所の博士後期課程の学生として再び入学し、約一年が経ちました。社会人博士というのは、会社等の承認の下、会社等に在職したまま入学するのですが、幸い所属上長の理解もあり、入学する機会を与えられたことは有り難いことだと感謝しています。日常は会社の業務に従事しつつ、時間を見つけては講義に出席したり、研究の途中経過や投稿論文を持参して指導教官の先生にご指導いただくという生活を送っています。

入社以来、研究所に在籍している関係で、「研究」は身近な存在、というより仕事そのものなのですが、卒業後10年も経つと、やはり「学校」という場は新鮮に感じられます。例えば、「通信情報特別セミナー」では、全く専門外の分野に関する最新の研究動向を、素人にもわかるような平易な解説で聴くことができます。一旦就職してしまうと、このような機会はなかなか持てないもので、思いもよらないものの見方を教わったりして、非常に刺激になります。また、指導教官の先生に論文のご指導を頂く場合にも、会社で指摘されるのとは全く違った角度からの指摘を頂くことが多々あります。企業では、たとえ研究所であれ、迅速な製品化への貢献が求められます。これは、企業として当然なのですが、場合によっては基本的検討が不十分になる場合があり、研究のやり方について考えさせられる機会となります。いずれにせよ、卒業後約10年のこの時期に入学し、自分を見つめ直す良い機会になっているのは確かです。今後も、大学の門戸が広く開かれ、一旦社会に出た人の再教育・活性化のためにこの制度が活用されることを願っています。

**京都大学の印象**

電気工学専攻 自動制御工学研究室 博士後期課程1年 周 軍

日本に来るまえに、日本では、京大で勉強していたことは卒業後日本社会のパスポートを持つことになると言われた。これは、京大の教育および研究レベルが高くて、日本でも世界でも大きな影響力を持っているからである。このようなイメージを心にこめ、わたしも去年涼しい秋風を伴って、京大に入ってきた。

これまで、もう一年経った。京都大学は心にどう映るか。ここで記述したのはただ京大のいくつかの側面に限るが、全く自らの実感である。これらは京大の真実かもしれないと思っている。

その1つは、京大の業績が一生懸命に努力し、優秀な人材を育てている教授らのお蔭であると考えている。夜遅くまで頑張っている研究者の姿がよくみられる。これをみながら、私も誰にも負けないという気持ちで仕事を進めていく。このような競争が 大学全体として京大の業績をあげるにほかならない。私自身ももっと力を入れて研究しつづけていこうという思いに至る。

一方、学生たちの中には、激しい受験戦争に勝ち、京大に入学したことを努力の終結に等しいこととするものもみられた。この現象は京大の立派な形象と多少マッチしないのではないだろうか。

2つめは、現在日本では技術だけでなく、独創性をもつ理論的な研究も目立っている。後者の発展は京大のような日本の大学にいる研究者の努力に依存するわけである。優れた技術が日本で学べ、新しい科学思想をアメリカで探せるといふ言い方は、もう歴史の言葉になるのだった。わたしの所属する研究室のスタッフは素晴らしい研究を進めて、学生を厳しく指導している。このような研究環境において、学生にとってはたいへんな感じがしたことがある。しかしながら、将来いい研究結果ができると思う。

京大は日本の代表的な教育機関として、世界の知識界と教育界の人々に知られていて、今後どんな姿で世界にアピールするかが現在のキャンパスの至るところでよく聞いた話題である。京大で短い間暮らす留学生たちでも京大が一層優秀な大学にするのを願っている。

## 教室通信

### 今年度の就職状況

厳しい不況を反映して求人企業数、各企業の求人数は、共に例年より減少しましたが、幸にしてほとんどの学生の進路が決まりつつあります。今後多少の変動は予想されますが、平成11年10月末の時点で把握できている学部4回生および修士2回生の進路はおおよそ下表のような状況です。

なお電気電子工学科の進学予定者107名の内訳は、工学研究科57名、情報学研究科44名、エネルギー科学研究科6名です。大学院修士課程については、現在までに資料の得られた電気・電子物性工学専攻および通信情報システム専攻（電気関係研究室分のみ）について示します。修士課程の進学者の進路はいずれも同一専攻の博士後期課程です。

学科・専攻 進路	電気電子工学科	電気・電子 物性工学専攻	通信情報 システム専攻
進学	107	3	5
官公庁	1	2	1
電力会社	3	6	3
電気・電子メーカ	6	25	20
その他製造業	5	5	1
通信事業者	1	9	5
その他企業	2	6	2
就職先未定	2	1	2
留年・研究生	12	0	0
合計	139	57	39

## 編集後記

お蔭さまをもちまして、cue も発刊以来はや第4号を迎えることができました。丸2年が経ち、記事の内容や体裁もおおむね固まりつつありますが、ご期待に添えているでしょうか？ 刊行に当っては、お忙しい中、ご執筆をお引き受けいただいた皆様はもちろんのこと、その他、数々の方々にお助けいただいた上ではじめて皆様のお手元にお届けできていることを、改めて実感している次第です。2000年という節目を迎えるにあたり、まだまだ至らぬ点もあろうかと存じますが、引き続きご支援を賜われますようお願い申し上げます。

(T.H.記)

## おわびと訂正

「cue」第3号の平成10年度修士論文テーマ紹介につきまして、編集上の不手際により以下の論文一件が掲載されませんでした。関係各位にご迷惑をおかけしましたことを深くお詫びしてここに掲載いたします。

=====

岸本豪（深尾教授）「中緯度E領域沿磁力線イレギュラリティの生成に関する計算機シミュレーション」

中緯度電離圏E領域沿磁力線イレギュラリティの観測で見られる筋状構造を伴った準周期エコーの生成機構の解明を目的として、電離圏E領域の計算機シミュレーションを行い、準周期エコーを説明できるスプラディックE層の形状やプラズマ密度構造の検証を行った。

=====

発行日：平成11年12月

編集：電気電子広報委員会

奥村 浩士、佐藤 亨、小野寺秀俊、  
萩原 朋道、野田 進、川上 養一

発行：電気電子広報委員会

〒606-8501 京都市左京区吉田本町  
京都大学工学部電気系教室内

E-mail: [cue@kuee.kyoto-u.ac.jp](mailto:cue@kuee.kyoto-u.ac.jp)

印刷・製本：株式会社 田中プリント