

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ンネル割り当て方式)	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。

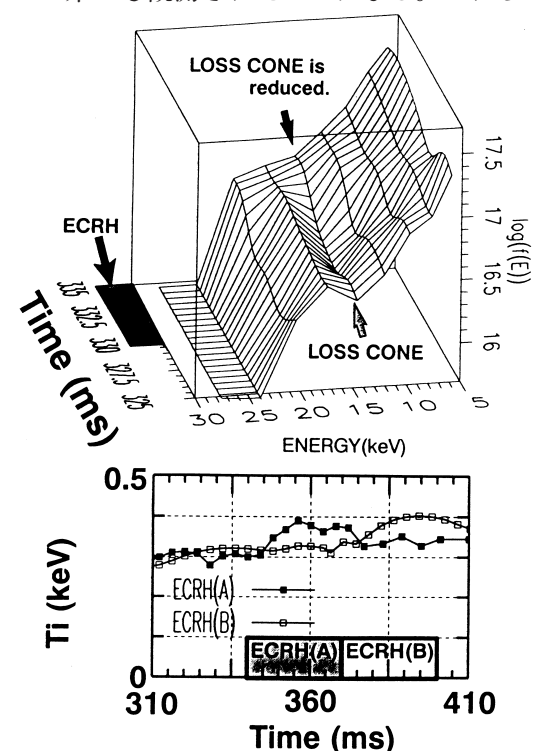


図1：ECRH重畳時の高速イオンエネルギースペクトラムとイオン温度の変化

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 0.2eV 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。

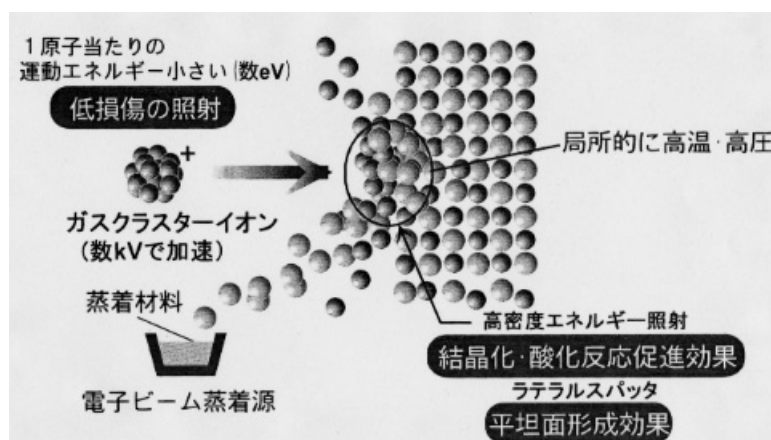


図 ガスクラスターイオン援用蒸着法の概念図

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。

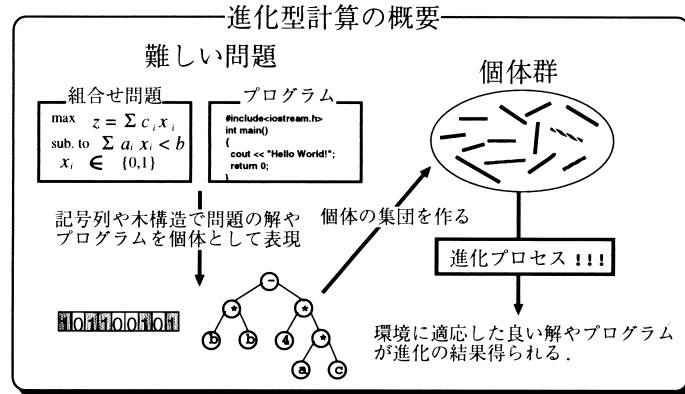
博士課程に在学中の3年間、吉田進教授のご指導のもとで、マルチメディア移動通信ネットワークの構築に向かって、ダイナミックリソース割り当てなど最先端技術の勉強および研究ができた。また、この3年間を通じて、私は課題の研究だけでなく、研究に必要な問題発見、解決および取りまとめなどの能力を養成できたと思う。ここで、この場を借りて、吉田先生をはじめとする電気系の先生方々に心から感謝の意を申し上げたい次第である。

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

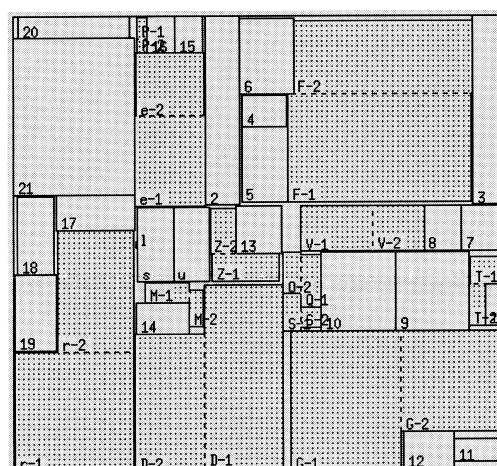
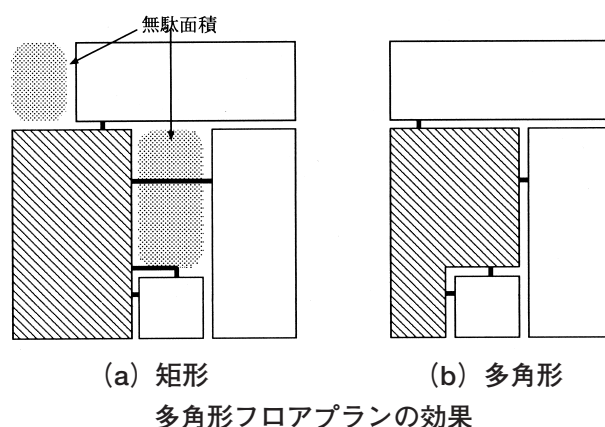
「形状自由度を考慮したレイアウト設計CAD手法に関する研究」

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のマイクロプロセッサを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。

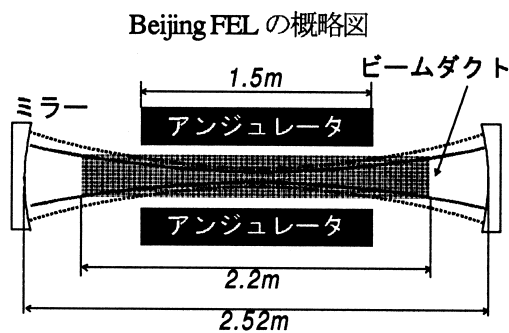
世界初のFEL発振が達成されて約20年たった現在では、アメリカ、ヨーロッパ、日本、韓国などでFEL施設が建設され、リニアック、電子蓄積リングを用いた多くのFEL発振が報告されており、生医学、生物物理、物性研究などに利用されています。

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。

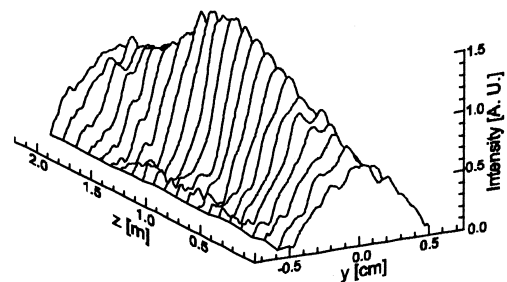
回折損失の軽減方法として、まず、光がビームダクトに衝突する割合を低減するために、ビームダクト長を短くし断面形状も変更する方法を提案し、シミュレーションを行いました。その結果、形状変更前の5倍のレーザ出力を得られる可能性が示されました。

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(TEM00)以外にTEM02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%を越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

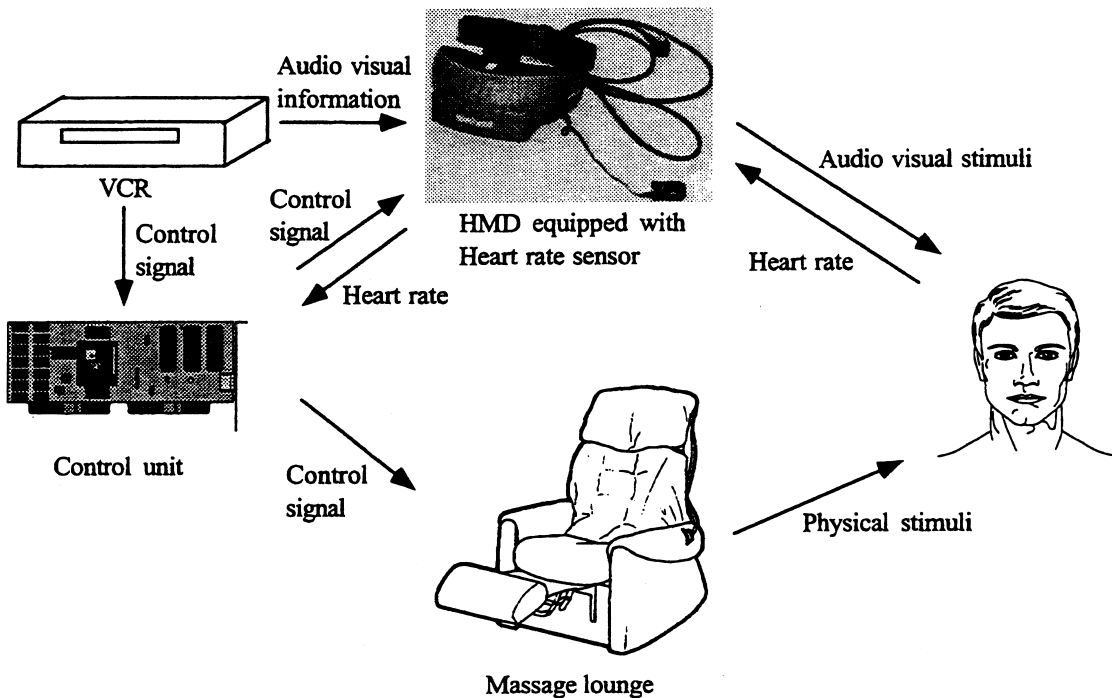
「人間の視覚系との調和を目指す仮想現実感機器の試作と視覚系機能の心理生理特性に関する実験研究」

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、SiH₄、GeH₄、H₂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-H₂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-H₂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-H₂]/[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-H₂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(1cm²)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(1cm²)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(1200cm²)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

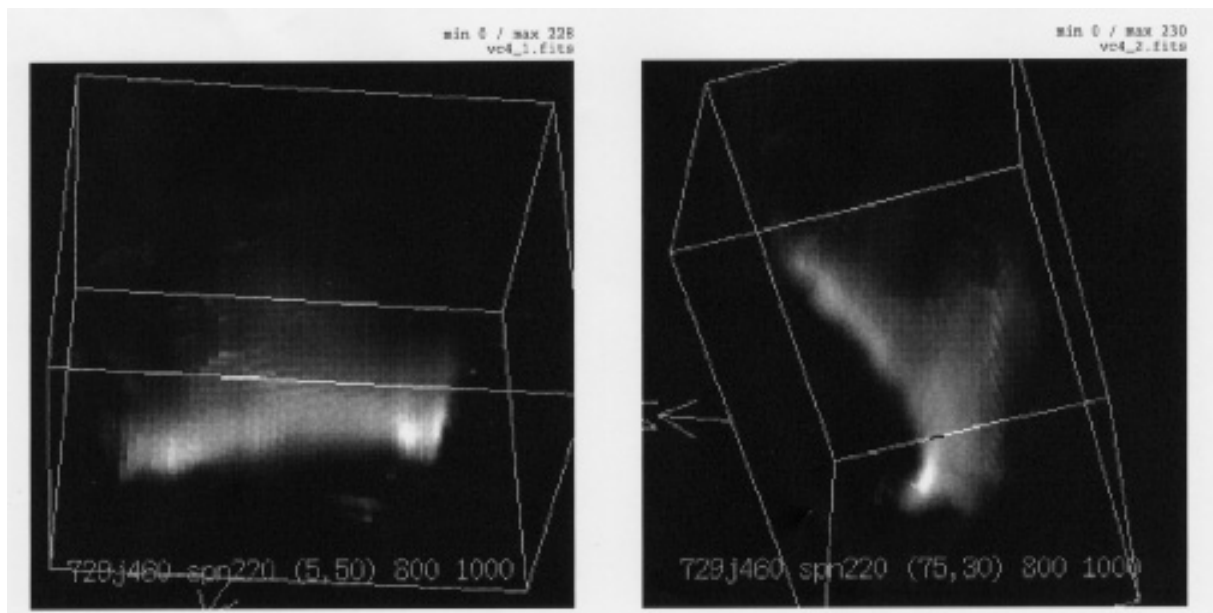
この論文は、複数の観測点で観測された単色光オーロラ画像を用いて元のオーロラの発光強度分布を推定する手法（これをオーロラのトモグラフィ再構成法とよびます）について研究した結果をまとめたものです。研究の要点はつぎのとおりです。

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るが、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 μm 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。

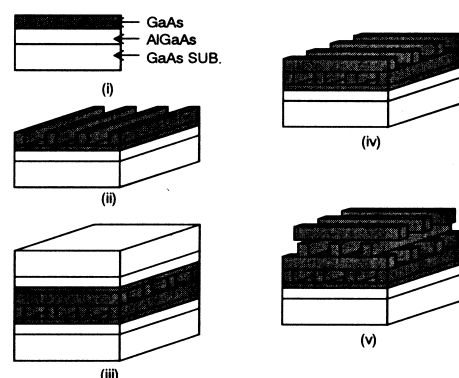


図1：3次元フォトニック結晶実現法の模式図

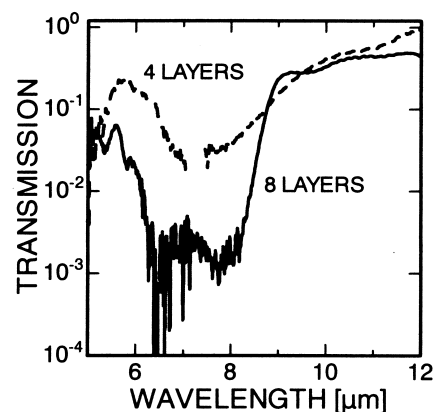


図2：透過スペクトル特性

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

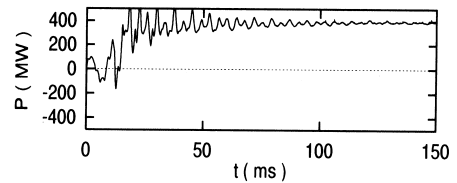
MHD発電は、導電性流体を磁界内に流すことにより発電を行う直接発電の一種で、2000℃から2700℃程度の高温領域の熱エネルギーを電気エネルギーに変換できるため、高いエネルギー変換効率を達成できる。また、低公害性についても実験にて実証されており、エネルギー資源の有効利用と地球環境保全という要望に適合した発電方式として実用化が待たれている。非平衡電離MHD発電方式は、天然ガスや核融合エネルギーなど多様なエネルギー源から熱交換器を介して加熱された希ガスを用いて発電するもので、代表的なMHD発電方式の一つである。非平衡電離MHD発電の実用化に向けて、現在までに、東京工業大学を中心として優れた発電実験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

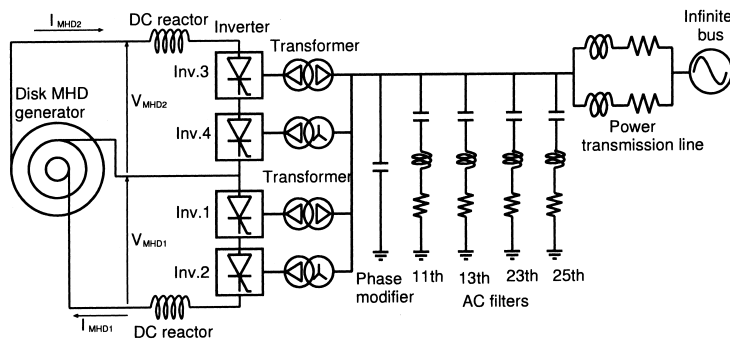
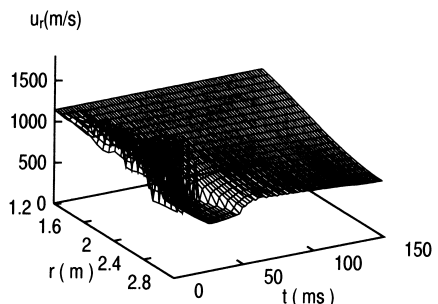


図1. MHD発電機-電力系統連結システム



(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 β (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/in² 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。

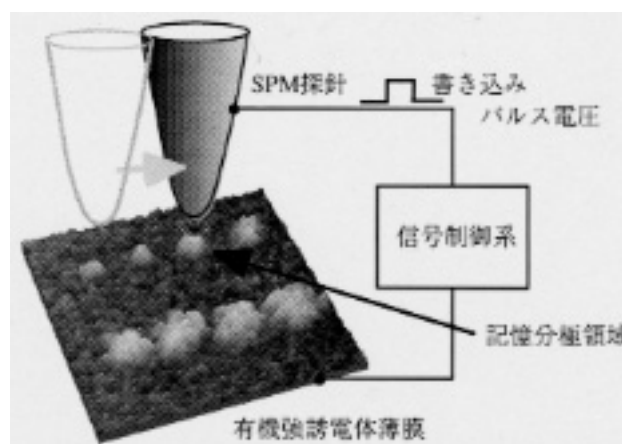


図1 有機強誘電体薄膜上へのナノスケール分極記録。

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。

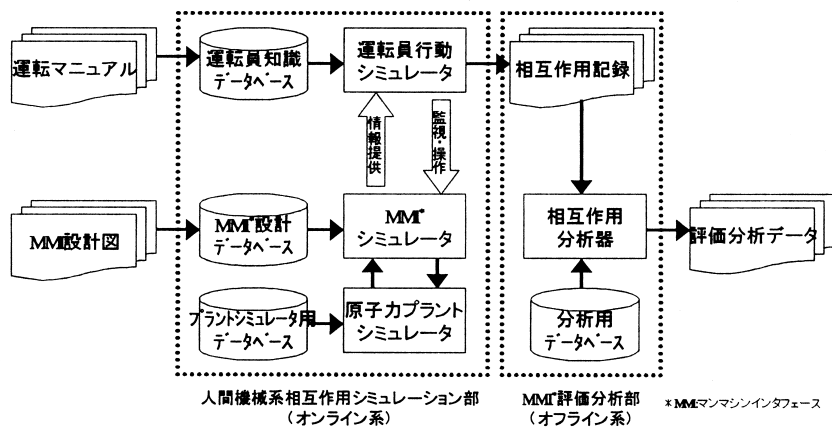


図 マンマシンインタフェース評価システムの基本構成図

【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