

学位論文審査報告

李, 柱
九州大学大学院システム情報科学研究科

堀, 浩一
九州大学大学院システム情報科学研究科

西原, 栄太郎
九州大学大学院システム情報科学研究科

古賀, 勝
九州大学大学院システム情報科学研究科

他

<https://hdl.handle.net/2324/1525451>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 2 (2), pp.311-355, 1997-09-26. Graduate School of Information Science and Electrical Engineering Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

学位論文審査報告

氏名(本籍) 李 柱 (韓国)
 学位記番号 シ情 博甲第3号 (工学)
 学位授与の日附 平成9年1月23日
 学位論文題名 3-DIMENSIONAL FEM ANALYSIS
 OF CONTROLLED-PM LINEAR
 SYNCHRONOUS MOTORS (制御PM
 リニア同期モータの3次元有限要素法に
 よる解析)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 吉田 欣二郎
 (副査) " " 竹尾 正勝
 " " " 安元 清俊

論文内容の要旨

制御PM(永久磁石)リニア同期モータ(LSM)は、制御PMと固定子鉄心間の磁気吸引力を浮上力とし、制御PMは同時にLSMの界磁として推進力を発生できる。PMの一定磁束はPMに直巻した制御コイルを設けその電流を制御することによって、浮上電力をほとんど必要としないコンパクトな推進兼用浮上システムを構成できる。NdFeBやSmCoなどの強力なPMを用いて、制御PM LSMは磁気浮上列車からアクチュエータやキャリアまで広範囲の応用が可能となり、その実用化が期待されている。制御PM LSMによる推進浮上システムの最適な設計や制御のためには、制御PM LSMの精密な特性解析が必要である。しかし、制御PM LSMのエアギャップは空気とほぼ同じ透磁率を持つ希土類PMと固定子のスロット構造のため非常に大きく、横方向端部に大きい漏れ磁束が発生し、複雑な磁束分布になる。2次元解析ではこれを考慮することは不可能で、3次元解析に頼らざるを得ないが、特に横変位がある場合は更に複雑な三次元問題であり、数値解析プログラムの開発が期待されていた。

本研究は、制御PM LSMを3次元解析するためにPMを含む静磁界問題用有限要素法ソフトウェアを開発して、小形キャリア用及び磁気浮上列車用制御PM LSMの特性解析を行い、その特性を明らかにしたものである。

本論文は6章より構成されている。

第1章では、本研究の背景、範囲と目的を説明し、概要を述べた。

第2章では、磁気スカラーポテンシャルと磁気ベクトルポテンシャルを用いた静磁界有限要素法の定式化について述べた。磁界の支配方程式をMaxwellの電磁方程式から誘導し、その方程式にGalerkin法を適用、行列方程式を得る

ことができる。本章では、2次元解析には1次三角形要素を、また3次元解析には1次四面体要素を用いた。支配方程式のパラメータの中で透磁率は磁束密度によって非線形に変化するので、Newton-Raphson法とCubic-Splineによる非線形方程式の解法について説明した。磁気スカラーポテンシャルか磁気ベクトルポテンシャルかによって境界条件の物理的な意味や適用が異なるので、その適用例と物理的な意味についても説明した。

第3章では、制御PM LSM 2次元及び3次元解析のための有限要素法ソフトウェアの開発について述べた。有限要素法ソフトウェアのPreprocess, SolutionやPostprocessからコンピュータ数値解析システムを構成し、特に3次元解析には非常に大きいメモリや非常に長い計算時間が必要であるので有効な行列解析アルゴリズムを適用した。本有限要素法ソフトウェアには1次元配列やスパース行列処理などのメモリセーブのアルゴリズムを、また行列計算アルゴリズムとしてはJacobi Conjugate Gradient (JCG) という間接法を使用した。またPostprocessとしては磁束密度の空間ベクトル分布、エアギャップ磁束密度の空間分布や3次元力(推進力、浮上力、案内力)の計算などができるプログラムを含む3次元有限要素解析システムを開発した。

第4章では、3次元有限要素法による横変位時の磁気浮上キャリア用制御PM LSMの特性解析について述べた。横変位が小形2極制御PM LSMの特性に及ぼす影響を解明するため、磁束密度の空間ベクトル分布とエアギャップ磁束密度の空間分布を詳細に検討した。その結果、横変位によって、固定子と移動子の重なり部分の磁束密度の変化は小さいが、特に横方向端部の磁束については歪曲しながらも主磁束となるものと制御PM側へ漏れる磁束が共に増大することが判った。主要なパラメータ、すなわち(1)エアギャップ、(2)横変位、(3)固定子と移動子の相対位置、(4)固定子電流、(5)PM制御電流、に対する推進力、浮上力、案内力(横力)の解析を行い、その特性を定量的に明らかにした。特に3次元力の横変位に対する依存性を詳細に検討し、横力は横変位に対する依存性が非常に大きい浮上力と推進力はこれにあまり依存しないことが判った。解析の精度や信頼性は実験結果との比較から確認され、これにより横力を含む3次元力の実用解析と6自由度のダイナミクスシミュレーションが可能になった。

第5章では、3次元有限要素法による磁気浮上実験車用制御PM LSMの特性解析について述べた。実験車は4隅に10極の制御PMを搭載しており、縦方向端部効果の影響が非常に小さいので、この解析モデルは周期境界条件を適用し1/2極分だけを解析すれば充分である。大きい電気的なエアギャップから発生する横方向の漏れ磁束の影響を解明するため、3次元解析から得られたエアギャップ磁束密度の空間分布を詳細に検討した。2次元解析と比較した結果、3次元解析によって始めて解析できた横方向磁束のた

め、3次元解析による磁束密度は減少し2次元解析のそれより小さくなる。これは、2次元解析の浮上力が3次元解析のそれよりエアギャップ5mm~14mmに対して5%~20%も過大評価をする原因であって、実験によっても確認された。また、主要なパラメータに対する推進力や浮上力の解析を行い、その特性を明らかにした。特に、ディテント力は大型スロットの構造のため非常に大きくなることが明らかになった。しかし、浮上力はスロットの構造にあまり依存しないこと及び推進力に及ぼすディテント力の影響は固定子電流が増加するに従って小さくなることが判った。得られた特性データや解析技術は実用機の設計や制御に活用されている。

第6章では、以上述べた各章の結果を総括した。

論文調査の要旨

制御PM（永久磁石）リニア同期モータ（LSM）では、界磁としてPMとその制御コイルから成る制御PMを用いることによって、推進力と浮上力を同時に発生し制御することができる。制御PM LSMは、電磁石界磁方式に比べて、NdFeBなどの高性能なPMを用い電力最小化制御を適用することによって、浮上電力をほとんど必要とせず、大きな磁気浮上力を安定に供給できると共に、固定子の電気装荷を小さくできるため、軽量でコンパクトな推進浮上システムを構成できる特徴を有している。制御PM LSMは、近未来の磁気浮上列車からアクチュエータまで広い範囲の応用が期待されている。しかし、制御PM LSMの最適な設計や制御のためには、高精度な特性解析が必要である。リニアモータ応用では一般に回転機に比べて固定子と移動子間の機械的エアギャップが大きく、また非常に長い固定子の製作組立て上の問題からスロットが大きなものとなる。しかも高性能なPMの透磁率が空気のそれにはほぼ等しいため、これらを総合した電氣的エアギャップは非常に大きくなる。その結果、横方向に大きな漏れ磁束が発生し、これを厳密に解析しなければならない。横方向を含む2次元解析では推進方向の解析が不可能であり、特に横運動に伴う横変位がある場合は解析誤差が大きい。3次元解析が不可欠であるが非常に複雑な問題であり、その解析とプログラム開発が期待されていた。

本論文は、制御PM LSMの3次元数値解析を行うためPMを含む静磁界問題用有限要素ソフトウェアを開発し、磁気浮上列車及びキャリアに応用した制御PM LSMの解析を行ってその特性を解明した研究をまとめたもので、その主な成果は次のとおりである。

(1) 3次元数値解析が可能であってPMを容易に考慮できるT- Ω 法を適用した静磁界問題用有限要素ソフトウェアの開発には、可能な限りメモリを節約し計算時間を短縮できるスパースマトリックス処理を工夫して、119,016個の4面体要素と22,420節点を有する解析をスーパーコンピュータ

を用いずワークステーションレベルで可能にした。

(2) 機械的エアギャップにおける3次元磁束密度分布を詳細に数値計算し、横方向磁束がPM側へ戻り有効磁束とならない漏れ磁束成分の挙動を解明し、2次元解析と3次元解析の本質的な違いが横方向磁束による有効磁束の減少であることを明らかにした。

(3) 横変位を考慮したキャリア用制御PM LSMの実験機を数値解析し、推進力、浮上力、案内力の3次元力の重要な設計パラメータのエアギャップ、固定子電流、制御電流、横変位に対する非線形な依存性を明らかにした。特に横変位に対する依存性を定量的に明らかにすると共に、実験によってこれを検証した。

(4) 磁気浮上列車用制御PM LSMの実験機を数値解析し、重要なパラメータに対する推進力と浮上力の依存性を求め、実験と比較して解析誤差は5.5%以内であることを明らかにした。特に問題となる大型スロットの構造が推進力に及ぼすディテント力の影響を定量的に明らかにし、これを固定子電流によって補償できることを示した。

(5) 制御PM LSMによって推進浮上するキャリアと磁気浮上車両実験機のダイナミックシミュレーションに必要な詳細な特性データが得られた。

以上要するに、本研究は、制御PM LSMの3次元有限要素法による解析プログラムを開発し、磁気浮上列車及びキャリア用制御PM LSMの横方向漏れ磁束を厳密に考慮した高精度な特性解明を行ったもので、電気工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏名（本籍） 堀 浩一（福岡県）
 学位記番号 シ情 博甲第4号（工学）
 学位授与の日附 平成9年1月23日
 学位論文題名 SF₆ロータリーク開閉機器の実用化研究

論文調査委員

（主査）九州大学 教授 原 雅 則
 （副査） " " 岡 田 龍 雄
 " " " 渡 辺 征 夫

論文内容の要旨

近年、電力システムの経済運用と信頼性確保ならびに設備保全における安全確保の観点から、電力開閉機器が担う責務はますます大きくなると共に、社会、環境との調和から、安全性、不燃性、低騒音化あるいは美観まで含め、極めて広範で高度な要求が課せられるようになった。このため、開閉機器の消弧、絶縁媒体として、従来の油や空気では上記の諸要求を満たすことが困難になり、代りにSF₆ガスや真空等の新しい消弧、絶縁媒体の適用が各所で進めら

れた。その中で、SF₆は、優れた絶縁性能故に特別高圧以上で多用されたが、本質的に発生過電圧が低いことから3～6kVの普通電圧にも好適であることが予想されたものの、コンパクトで長開閉寿命を必要とする普通高圧用の消弧手段がなく、新しいSF₆消弧方式の開発が囑望されていた。

本研究では、このような背景のもとで、SF₆中で遮断電流を円筒電極外側のブローコイルに流すことによって磁界を発生させ、この磁界とアーク電流の間に作用するローレンツ力によって円筒電極内でアークを高速回転させ消弧するロータリアーク方式を、世界に先駆けて普通高圧を中心とした中電圧分野（3～30kV）で提案した。さらに、SF₆ロータリアーク開閉機器を開発するに当たり、機器設計の基礎になる遮断、絶縁、接点現象の解明を行って、多くの新しい知見を得ると共に、開発した機器の実用化を図る上で必要な諸特性を明らかにすることができた。本論文はこれらの内容をまとめたもので、以下の6章からなる。

第1章は緒論であり、SF₆や真空等の新しい消弧、絶縁媒体が出現した経緯やSF₆消弧技術の変遷をひもとくと共に、ロータリアーク方式を実用化する上で必要な研究課題を、遮断、絶縁、接点の3要素技術に分けて整理し、本研究の位置付けを明らかにした。

第2章では、ロータリアーク方式の大電流と遅れ小電流の遮断現象を明らかにした。まず、分光学的手法等によって、ロータリアークの大電流時の運動特性やアークコラム内の熱的特性を求め、アークの対流損失が伝導損失よりも大幅に大きくなり消弧に寄与していることを明らかにした。次いで大電流消弧には、電流零点近傍の磁界が有効であり、ある臨界値以上の磁界と共に、磁界と電流間に位相差が必要で、遮断性能は遮断容量一定型を示すことを明らかにした。また、遅れ小電流遮断現象では、遮断電流値は、アークと並列に存在する静電容量と接点开極速度の平方根に比例しアーク速度の2乗にほぼ比例すること、およびこの時の遮断サージ電圧は、負荷インダクタンスと接点开極速度、アーク駆動磁界で決まり、異常な高周波サージへ進展する電圧拡大形多重再発弧サージは、高周波電流の遮断能力が小さいため発生しないことを明らかにした。

第3章では、中電圧SF₆開閉機器内の誘電絶縁現象として、150kV程度までのSF₆中ギャップおよび沿面絶縁破壊特性を、SF₆アーク分解ガス共存時を含めて明らかにすると共に、アーク分解ガスによる絶縁物の劣化現象を解明した。まず、ギャップ絶縁破壊では、平等電界設計が重要であり、アーク分解ガスは高濃度でも絶縁破壊電圧に殆ど影響しないこと、背後電極構造の沿面絶縁破壊では、不平等電界条件の場合、樹脂の肉厚やひだの効果が大きいことを明らかにした。次に、SF₆アーク分解ガスによる各種エンジニアリングプラスチックやセラミックスの沿面絶縁抵抗の劣化特性を求め、特にガス開閉機器で多用されるアルミ

ナおよびシリカフィラー入りエポキシ樹脂では、アルミナフィラー入りの方が好適であるが、シリカフィラー入りでも吸着剤の封入によって実機器に使用することが可能であることを明らかにした。

第4章では、SF₆中の接点現象について、Cu-WとAg-WC接点の負荷電流域での遮断および投入時の接点消耗と、通電発熱による硫化から通電障害に到る現象を明らかにした。まず、アーク消耗は陽極の蒸発消耗が支配的であり、ガス圧が低く磁界が高くなる程消耗は減少し、接点材料では、W粒径が小さくCu50～70wt%組成のCu-Wが最も消耗が少なく長開閉寿命用に最適であることを明らかにした。次に、SF₆中では微量水分によりAgは250℃程度、Cuは200℃程度以上で、SF₆と水分が直接反応しAg₂SやCu₂S皮膜を生じることを実験から求め、負荷電流通電時には、Cu-W接点は接触部の温度が上がりこの硫化皮膜生成による通電障害が発生する可能性があること、Ag-WCは接触抵抗が低いいためその恐れがないことを明らかにした。

第5章では、SF₆ロータリアーク開閉機器の実用化状況を説明し、本研究が長期信頼性の検証と共に実用化に向けて大きく寄与したことを示した。

最後に、第6章では本研究で得られた成果を要約し、研究の結論とした。

論文調査の要旨

電力システムは、システム構成の変更、負荷の接続開放、故障系統の除去、ならびに電力機器の点検修理の際の無負荷状態での電路の開放など、種々の目的で開閉される。この開閉操作時にはアークが発生して開閉装置内が局所的に高温になると同時に回路電流の変化による高電圧の誘起を伴うので、電流遮断を確実にいかつ再発弧などの異常現象を起こさせないためには、電流遮断方式の適切な選定、電流遮断現象の解明、電流遮断に伴う再起電圧特性の解明、アーク環境下における絶縁特性の解明などが行われなければならない。さらに、開閉操作は接触部の消耗とともにアークによる絶縁系の劣化現象を伴うので、電力システムの長期信頼性確保には開閉装置の寿命も大切な検討課題になる。

消弧媒体として古くは空気と油が使用されたが、最近では、消弧性能を上げる目的で真空雰囲気およびSF₆ガスを使用した開閉装置が開発されている。しかし、開閉頻度が高く負荷に近接して設置される開閉装置では、接点消耗が少ないこと、再起電圧が低いこと、保守が不要で低コストであること、ならびに低騒音、不燃、小形など環境との整合性が良いことなどが求められ、消弧性能は優れているが再起電圧の高い真空遮断器や大型のSF₆遮断器に代わる新しい方式の開閉装置の開発が望まれていた。

本論文は、ロータリアーク消弧方式と呼ばれる新方式を3-30kVの中電圧用機器に適用して、上記の欠点を克服し

た開閉機器の実用化に成功した成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、遮断電流をブローコイルに流すことによって磁界を発生させ、この磁界とアーク電流の間に作用するローレンツ力によって、アークを円筒電極内で回転させて（このアークをロータリアークと呼ぶ）消弧する「ロータリアーク消弧方式」の中電圧SF₆開閉機器への応用を、世界に先駆けて提案している。

第二に、SF₆中のロータリアークの電気的特性、力学的特性、熱的特性などを測定し、磁気駆動されたアークのこれらに関する特性が高速気流中の静止アークの場合と同様になり、狭い空間で消弧出来ることを示している。さらに、磁界条件、ブローコイルの回路条件、消弧媒質のガス圧条件、ならびに消弧室形状を変えて、電流遮断特性、再起電圧特性、再発弧特性を詳細に調べ、ロータリアーク方式の電流遮断機構を解明するとともに、遮断性能に最適な磁界の大きさとアーク電流に対する位相、ブローコイルの回路条件、およびガス圧条件を見だし、SF₆ロータリアーク開閉機器の設計指針を与えている。

第三に、負荷としてリアクトルと高圧電動機を接続した時の、ロータリアークによる電流遮断に基づく多重再発弧現象とサージ特性を検討し、遮断電流値がアークと並列の静電容量と接点开極速度の積に依存するのに対し、遮断サージ電圧は、負荷のインダクタンスと接点开極速度ならびに磁界強度に依存することを見だしている。また、真空遮断器で観測される再発弧—高周波消弧に基づく大きな再発弧サージは、ロータリアーク方式ではほとんど発生せず、開発した開閉機器が誘導性負荷の開閉に好適であることを示している。

第四に、SF₆ガスとエポキシ絶縁物表面のアーク分解ガス中における長期絶縁性能を実機ならびに模擬環境下で調べ、アークによるSF₆ガスの絶縁劣化は少ないが、沿面絶縁特性は絶縁物中のフィルターの種類によっては劣化が認められ、SF₆ロータリアーク開閉機器の長期信頼性確保の観点からはアルミナフィルター入りエポキシ樹脂が絶縁支持材およびブッシング材として好ましいことを示している。さらに、絶縁信頼性の面からSF₆媒質中の水分低減が極めて大切であることを指摘している。

第五に、ロータリアーク条件下で銅系と銀系接点の開閉時における接点消耗現象と通電特性を調べ、接点消耗に対するガス圧、磁界強度、材料組成の影響を明らかにしている。また、SF₆ガス中における通電発熱による接点表面の硫化被膜形成機構を解明し、アーキング接点には銅系が適し、アーキング接点と通電接点を兼ねさせて良好な通電特性を確保しつつ接点寿命を長くするには、銀系の接点においてガス圧を下げ、磁界強度を上げることが実用上大切であることを見だしている。

最後に、開発したSF₆ロータリアーク開閉機器を電力シ

ステム内で多数使用し、その有用性を実証している。

以上要するに、本論文は、SF₆ガス中におけるロータリアークの電流遮断現象、接点消耗現象、ロータリアーク条件下のSF₆ガスと絶縁物沿面の絶縁破壊現象を解明し、これを基に中電圧用SF₆ロータリアーク開閉機器を世界に先駆けて開発し、その有用性を実証した結果をまとめたもので、電力工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 西原 栄太郎 (佐賀県)

学位記番号 シ情 博甲第5号 (工学)

学位授与の日附 平成9年3月5日

学位論文題名 医用画像診断システムの画像配送制御方式に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 香田 徹

(副査) " " 牛島 和夫

" " " 二宮 保

論文内容の要旨

医療の効率を上げ、高度な医療を広く提供できる環境を整えるための方策として、情報システムの医療施設への導入が進められている。これまで病院内では、会計情報や検査オーダーを扱うHIS (Hospital Information System: 病院情報システム)、検査部門内の検査支援、管理を行うRIS (Radiology Information System: 放射線科情報システム)等が構築されてきたが、CT画像、MRI画像、X線画像等の医用画像の情報システムによる管理は、それらの情報量及び発生量が膨大な為、未だフィルムにより行われている。

画像管理の効率改善、診断能の向上を目的として、これらの医用画像情報をデジタルデータとしてデータベース化し、必要な場所に設置されているCRT上に表示して読影に供するPACS (Picture Archiving and Communication System: 画像保管通信システム)が既に提案されているものの、現在のオーダーシートとフィルムによる運用と同等のスループットを達成できていないこと等により、一部の導入にとどまり部門の日常業務を置き換えるには至っていない。その主な原因は、第一に、大量の画像を保管する光ディスクのアクセス速度が遅いため、日常業務で頻繁に行われる過去の画像のアクセスの際待ち時間を生じること、第二に、読影の優先度が考慮されていないため、「即時読影」に遅れを生じること、第三に、PACS以外のシステムで管理しているカルテ、レポート等の診断情報の準備と画像のそれとの同期が取れていないこと等である。

本論文は、PACSの実用化が、画像診断部門のフィルムレス化、ひいては病院の情報システム化に不可欠な課題であ

るということに鑑み、旧来のPACSとRISとを統合し一つのシステムとして部門の運用を行う統合RIS/PACS (Integrated RIS/PACS) のアーキテクチャ及びそのシステムにおける各種の画像配送制御方式を提案し、このシステムを一病院で実現し、その日常運用の結果を確認した事等を纏めたものである。

先ず、グローバルな医療情報システムを構築するために病院単位の画像情報のデジタル管理が必要であり、これに先立って画像診断部門での画像管理の実用化が不可欠であることを示した。また、これまでのHIS、RIS及びPACS構築の事例を調査し、スループットを含む実システム構築上の課題を纏めた。

次に画像診断部門の運用の解析を基に日常運用で使えるための要求性能を分析し、現状の技術、標準化動向に基づいた実現手段を検討した。その結果、上記のスループットの問題を解決するためには、大量の画像を保管する光ディスクからの応答速度の高速化、HISからの検査依頼情報を部門内で共有する手段、及び複数の場所やシステムに分散している診断情報をPACSに集中させる制御方式の開発等がシステムの技術課題であることが明らかになった。また、旧来のPACSとRISとを一つのシステムとして統合し画像診断機器(モダリティ)と密に接続することにより、部門の業務の流れに沿った運用を行う統合RIS/PACSのアーキテクチャを提案した。

更に、統合RIS/PACSのスループットを向上させる以下の三つからなる画像配送制御方式の提案を行った。その第一は、画像やレポートなどの読影に必要な情報をデータベースから画像観察装置 (Viewing Station: VS) にあらかじめ配送しておく事前配送 (Preloading) において、臓器、画像診断機器毎の範疇別に配送先のVSを事前設定し、さらに同じ範疇に属する複数のVSへの配送順序をそこの読影の進捗に従って適応的に変化させる「動的事前配送方式」(Dynamic Preloading) である。第二は、検査オーダーの優先度を明示的に表示する「読影順序制御方式」である。第三は、カルテなど電子化されていない情報を画像と同期して準備するための人手による手動システムへのガイド情報を与える「画像配送同期制御方式」である。また、300床規模の総合病院への実際の導入例に基づいて、そのシステム内の各フェーズにおける処理時刻を記録し、実際の運用で最もスループットに影響を与える「即時読影」検査の画像診断部門通過時間を指標としてシステムのスループットを測定し、その向上を確認した。これにより、本提案のアーキテクチャ、画像配送制御方式の有用性を実証した。

最後に、臨床医師による旧来のフィルム読影とCRT読影の所要時間の比較結果に基づいた評価を行い、スループット以外の項目でもシステムが使用できるレベルにあることを確認した。

論文調査の要旨

医療の効率を上げ、高度な医療を広く提供するための方策として、情報システムを医療施設に導入し、病院内の各部門間及び病院間での情報の共有を図り、相互の連携を深めることが必要とされている。これまで病院内では、会計情報や検査オーダーを扱うHIS (Hospital Information System)、検査部門内の検査支援、管理を行うRIS (Radiology Information System) 等が構築されてきたが、画像診断部門での医用画像の管理は、画像の情報量及び発生量が膨大な為、未だフィルムにより行われている。医用画像情報をデジタルデータとしてデータベース化し、必要な場所に設置されているCRT上に表示して読影に供するPACS (Picture Archiving and Communication System) が既に提案されているものの、一部での導入にとどまり画像診断部門の日常業務に活用されるには至っていない。

本論文は、画像診断部門に無フィルム化が、病院内外でも医療情報システムの構築に不可欠な課題であるという認識に立脚し、PACSとRISとを統合し一つのシステムとして画像診断部門の運用を行う統合RIS/PACSのアーキテクチャ及びそのシステムにおける各種の画像配送制御方式を提案し、このシステムを一総合病院で実現し、その日常運用の結果を確認した成果を纏めたものである。

著者は、先ず、これまでのHIS、RIS及びPACSの構築の事例を調査し、実システム構築上の課題を纏め、PACSの実用化を阻んでいる要因は、オーダーシートとフィルムによる現行の運用と同等の総合処理性能を有していない事である事を明確にした。

次に著者は、PACSが日常運用で使えるための要求性能の分析と実現手段の検討を行い、上記の問題点を解決するためには、大量の画像を保管する光ディスクからの応答速度の高速化、HISからの検査依頼情報を部門内で共有する手段、及び複数の場所やシステムに分散している診断情報をPACSに集中させる制御方式の開発がシステムの技術課題であることを明らかにした。また、統合RIS/PACSのアーキテクチャを提案し、今後システムを構築する際の重要な示唆を与えた。

更に著者は、統合RIS/PACSの総合処理性能を向上させる以下の3種の画像配送制御方式の提案を行った。その第一は、画像等をデータベースからVS (Viewing Station) にあらかじめ配送しておく事前配送において、複数のVSへの配送順序をそこの読影の進捗に従って適応的に変化させる「動的事前配送方式」である。第二は、検査オーダーの優先度を明示的に表示する「読影順序制御方式」である。第三は、カルテなど電子化されていない情報を画像と同期させて準備するための人手による手動システムへの案内情報を与える「画像配送同期制御方式」である。また、300床規模の総合病院への実際の導入例に基づいて、そのシステ

ム内の各フェーズにおける処理時刻を記録し、実際の運用で総合処理性能に最も影響を与える「即時読影」検査の画像診断部門通過時間を指標としてシステムの性能を測定し、その向上を確認した。

最後に著者は、臨床医師によるフィルム読影とCRT読影との所要時間の比較結果に基づいた評価を行い、総合処理性能以外の項目でもシステムが使用できるレベルにあることを確認した。

本論文の成果は、今後の画像診断部門の無フィルム化、病院のシステム化の際の設計指針を与え、日常運用で使用できるシステムの構築を世界に先駆けて可能にしたことにある。

以上要約するに、本研究は、PACSとRISとを統合した統合RIS/PACSのアーキテクチャ及びそのシステムにおける各種の画像配送制御方式を提案し、このシステムを一総合病院で実現し、その日常運用における有効性を確認したものであり、情報システム工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 古賀 勝(福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第6号(工学)
 学位授与の日付 平成9年3月5日
 学位論文題名 繰り返し型最適値探索によるカオス制御方式と非線形関数の実現方式に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 平澤 宏太郎
 (副査) " " 二宮 保
 " " " 香田 徹

論文内容の要旨

近年、システムの多様化、複雑化にともない、線形/非線形、定常/非定常を問わず、従来のような評価指標最適化指向ではなく、システムみずからが環境変化に自己組織的に適応、協調、共存するようより高度なやわらかい制御システムの構築が求められている。

本論文では、このような知的制御システムの構築を目的とし、複雑非線形動的システム全体を学習ネットワークで統一的に取り扱い、その上で、あらたなシステム制御理論や最適化理論などを具体化するための基本技術の検討をおこなっている。

まず、第1章の序論では本研究の背景、目的および各章の概要を述べる。

第2章では、ニューラルネットワークをニューロン関数、ネットワーク接続、時間遅れの点で拡張した一般化学習ネットワーク理論とその高次微分の計算方式を要約する。

一般化学習ネットワークは、さまざまな非線形現象を自然なかたちでモデル化可能であること、制御系における対象システムとコントローラを統一した枠組であつかえること、高次微分の計算が可能であること、さらに、任意の遅れ時間をブランチに配置することができ、特に負の遅れ時間によりネットワークに予測機能を実現できるなどの特徴を有する。

第3章では一般化学習ネットワーク理論の高次微分を活用した学習ネットワークにおけるカオス制御方式について述べる。カオスは脳や神経系、自然現象および社会現象などの最も重要な本質のひとつといわれているため、カオス現象を積極的に利用したより知的なシステム制御理論を構築する第一歩として、ネットワークのカオスダイナミクスを制御する方式を検討した。提案するカオス制御方式は、カオス動作モードを加えた従来のカオスニューラルネットワークとはことなり、パラメータの学習により、ノード出力を有界とする一般化学習ネットワーク上のリアブノフ指数を正の値にすることでカオス現象を発生させ、負の値にすることで消滅させる方式である。したがって、通常非線形学習ネットワーク上でカオス制御が実現できる特徴がある。リアブノフ指数が1次微分のため、パラメータの学習には、2次微分の計算を活用した勾配法を適用する。しかし、リアブノフ指数は、パラメータの微小変動により大きく変化することと、リアブノフ評価指標は凸関数でないことから、勾配法のみでパラメータの学習をおこなうことは困難な場合がある。そこで、勾配法とランダムサーチを併用し、この問題を克服することを考えた。シミュレーションの結果、提案方式により、すでに提案されているカオスニューラルネットワークとは異なり、シグモイド関数のニューロンがリカレントに接続された通常ニューラルネットワークのパラメータを学習するのみで、カオス現象の発生および消滅が実現できることを示し、そのメカニズムの考察をおこなった。また、ノード間のブランチの数とその遅れ時間がカオス制御に与える影響を定量的に評価している。

また、より知的なシステムを構築するには、ネットワークでモデル化されたシステムを最適化するための手法を確立することが重要である。第4章では、ランダム探索に基づく最適化手法、Likelihood Search Method (L.S.M.)を提案し、理論的および実用的側面より有効性を評価している。L.S.M.は、目的関数の微分情報を活用し探索の集中化と多様化を統一した枠組で実現する最適化手法であり、ローカルミニマムからの脱出能力および探索効率の向上等の特徴を有する。探索の基本的アイデアは、勾配のノルムが大きいときに改善解が近傍にある可能性が高いと考え、集中化探索をおこない、逆にノルムが小さいときに改善解が近傍にある可能性が低いと考え、多様化探索をおこなうことである。探索の集中化により勾配法のように確実な目

的関数の改善をおこない、探索の多様化により通常のランダム探索のようにローカルミニマムからの脱出が可能となる。また、L.S.M.は無限回の探索により確率1で最適値に収束し、ある条件下において通常のR.S.M.よりもはやく最適値に収束することをあきらかにしている。多変数非線形関数最小値探索問題のシミュレーションにより、L.S.M.では探索の集中化と多様化をシステムティックにおこなっていること、および、勾配法および一様乱数もちいたランダム探索法に比較し、ローカルミニマムからの脱出、探索効率の向上の点で改善されていることを確認した。また、ニューラルネットワークの学習問題により、L.S.M.では通常もちいられているバックプロパゲーション学習法(B.P.)よりよい結果がえられることをあきらかにした。

第5章で本研究で提案した手法とその検証によりえられた成果を要約し、これを本論文の結論とした。

論文調査の要旨

近年、システムの多様化複雑化にともない、線形・非線形、定常・非定常を問わず、システムみずからが環境変化に自己組織的に適応、協調、共存できるようなより高度なやわらかい制御システムの構築が求められている。

本論文は、このような知的制御システムの構築を目的として、複雑非線形動的システム全体を学習ネットワークモデルで取り扱い、このネットワーク上でシステム制御理論や最適化理論を構築するための基礎技術の検討をおこなったものであり、以下の点で評価できる。

第一に、物理現象、社会現象、経済現象などの非線形な複雑大規模システムを自然な形でモデル化し制御するための枠組である一般化学習ネットワークを提案していることである。一般化学習ネットワークは、教師付きニューラルネットワークパラダイムの拡張であり、連続微分可能な任意の非線形処理ノードが、任意のサンプル遅れ時間を介して、任意にマルチ接続された離散時間型のネットワークである。このネットワーク上で静的・動的、階層型・リカレント型、Time Delay Neural Network、多重ブランチなどの各種の構成を統一的にあつかえる学習アルゴリズムを提案している。特に、通常の1次微分のみでなく、高次微分を体系的に計算する手法を開発し、これにより高度な学習が可能となることを示している。

第二に、一般化学習ネットワークの高次微分を活用したカオス制御方式を提案し、その有効性を実証していることである。カオスは脳や神経系、自然および社会現象などの最も重要な性質のひとつといわれているが、このカオス現象を利用したより知的な制御システムを構築する第一歩として、ネットワークのカオスダイナミクスを制御する方式を検討している。提案するカオス制御方式は、特殊なカオス動作モードを付加した従来のカオスニューラルネットワークとはことなり、通常的一般化学習ネットワークの

パラメータを学習する方式である。ノード出力を有界とする一般化学習ネットワーク上のリアプノフ指数を正の値にすることでカオス現象を発生させ、負の値にすることでカオス現象を消滅させるが、リアプノフ指数が1次微分で表現されるため、パラメータの学習には、2次微分の計算を活用している。3個のノードから構成されるリカレントネットワークのシミュレーションの結果、提案方式により、カオス現象の発生および消滅が実現できることを明らかにし、また、カオス発生消滅のメカニズム、およびノード間のブランチの数とその遅れ時間がカオス制御に与える影響の考察をおこなっている。

第三に、知的な制御システムを構築するには、ネットワークでモデル化されたシステムを最適化するためのより使いやすい手法を確立することが重要であると考え、ランダム探索法に基づく最適化手法であるLikelihood Search Method (LSM)を提案し、理論的および実用的側面より有効性を評価していることである。LSMは、目的関数の微分情報を活用し、探索の集中化と多様化を統一した枠組で実現する最適化手法である。探索の基本アイデアは、微分情報のノルムが大きいときに改善解が近傍にある可能性が高いと考え、集中化探索をおこない、逆にノルムが小さいときに改善解が近傍にある可能性が低いと考え、多様化探索をおこなうことである。探索の集中化により勾配法のように確実な目的関数の改善をおこない、また、探索の多様化により通常のランダム探索のようにローカルミニマムからの脱出をおこなっている。LSMでは無限回の探索により確率1で最適値に収束し、一定の条件下において通常のランダム探索法よりもはやく最適値に収束することを理論的に示し、さらには、多変数非線形関数最小値探索問題のシミュレーションにより、LSMは勾配法および一様乱数もちいたランダム探索法に比較し、ローカルミニマムからの脱出、探索効率の向上の点ですぐれた手法であることを明らかにしている。また、ニューラルネットワークの学習にLSMを適用した結果、通常使用されているバックプロパゲーション学習法に比較して、初期値依存性が小さく、学習速度が速いことを明らかにしている。

以上要するに、本論文は、複雑非線形動的システム全体を学習ネットワークで統一的に取り扱い、知的制御システムを構築するための基礎技術であるカオス制御方式とランダム探索に基づく最適化手法を提案したもので、システム制御工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 趙 建 軍(中国)
学位記番号 シ情 博甲第7号(情報科学)
学位授与の日附 平成9年3月27日
学位論文題名 PROGRAM DEPENDENCE ANALY-

SIS OF CONCURRENT LOGIC PROGRAMS AND ITS APPLICATIONS

(並行論理型プログラムにおけるプログラム従属性の解析とその応用)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牛島和夫

(副査) " " 長谷川隆三

" " " 程京徳

論文内容の要旨

並列処理に関する研究は計算効率の飛躍的向上を目指して始められ、並列処理システムは数値計算だけでなく、記号処理や知識処理といった非数値分野の利用も期待されている。記号処理や知識処理に関する並列処理システムにおいて中心的な役目を果たすのは並列宣言型プログラムである。その内、並行論理型プログラムは論理的に並列的な実行モデルを持つため、計算機の物理構成から独立したプログラムを自然に記述できる。また、暗黙の通信と同期によりアルゴリズムの記述に専念できること、抽象度の高い記述により複雑なデータ構造が容易に扱えることなど、非数値分野の記述に適している。しかしながら、並行論理型プログラムの理解、テスト、デバッグ、保守などは命令型プログラムと比べ非常に難しい。信頼性の高い並行論理型プログラムを効率的に開発するためには、並行論理型プログラムの挙動に関するモデルを構築し、それに基づいて並行論理型プログラムの開発支援環境を整備しなければならない。

以上の背景において、本研究では、信頼性の高い並行論理型プログラムの開発支援環境の基礎を与えるために、並行論理型プログラムの挙動における新しいプログラム従属性概念を提案し、並行論理型プログラムの従属性モデルを構築することを目指す。また、構築される従属性モデルを並行論理型プログラムの理解、テスト、デバッグ、保守及び複雑さ計測へ適用し評価すると共に、信頼性の高い並行論理型プログラムの開発支援に対するその有効性を明確にする。命令型プログラムのプログラム従属性理論は、命令型プログラムの開発支援に関連して研究が進んでいるが、論理型プログラムのプログラム従属性を用いた開発支援環境の研究はまだなされていなかった。

本論文は、並行論理型プログラムにおけるプログラム従属性の解析とその応用について述べたものであり、10章から構成される。

1章は序論であり、研究の動機、目的および成果について述べる。

第2章では、並行論理型プログラミングの概念、論理型プログラムにおける従属性解析の背景およびモード解析について述べる。

第3章では、並行論理型プログラムにおける制御流れ解

析について述べる。まず、並行論理型プログラムにおける制御流れの抽象表現モデルとして並列制御流れネット(PCFN)、並列制御流れネット(APCFN)を定義する。これらは枝が分類された有向グラフである。PCFNは並行論理型プログラムの中の複数の制御の流れを表現する。APCFNは並行論理型プログラムの中の複数の制御の流れと、引数情報を表現する。そして、ソースプログラムからこれら2つのモデルへの変換ルールについて説明する。

第4章では、並行論理型プログラムにおけるプログラム従属性の解析について述べる。従来提案された命令型プログラムにおける従属性概念は並行論理型プログラムに適用することができないので、本研究では、まず、並行論理型プログラムにおけるプログラム従属性モデルを構築するために、3種類の基本的なプログラム従属性を新たに提案する。すなわち、引数間の共有変数による共有従属性、引数間の通信による通信従属性および引数間の同一化による同一化従属性である。共有従属性は一つの節の中にデータ流れを表現する。通信従属性は一つの節の中にプロセス間の通信を表現する。同一化従属性は二つの節の間のデータ流れを表現する。そして、並行論理型プログラムにおけるプログラム従属性を明示的に表現するモデルとして引数従属ネット(ADN)を提案する。ADNは枝が分類された有向グラフである。そして、並行論理型プログラムにおける各従属性の解析アルゴリズムを開発する。

第5章では、並行論理型プログラムにおける静的スライシングについて述べる。本研究では、まず、並行論理型プログラムにおける静的スライスと実行可能スライスを定義する。静的スライスはある並行論理型プログラムにおけるリテラルの集合である。実行可能スライスはある並行論理型プログラムにおける実行が出来る部分プログラムである。そして、4章で提案した並行論理型プログラムにおけるプログラム従属性モデルとして引数従属ネット(ADN)に基づいてスライスを計算する手法を述べる。本手法の特徴としては一旦対象プログラムを変換してADNで表現すれば、スライスはネットの到達性問題として容易に計算することができる。

第6章では、並行論理型プログラムにおける複雑さ評価尺度を提案する。まず、並行論理型プログラムにおける3種類の複雑さ評価尺度を定義する。すなわち、制御流れに基づく複雑さ評価尺度、プログラム従属性に基づく複雑さ評価尺度と、スライスに基づく複雑さ評価尺度である。これらの評価尺度を用いて色々な面から並行論理型プログラムにおける複雑さを評価することができる。

第7章では、さらに、提案したADNに基づいて並行論理型プログラムのデバッグ、テスト、理解、保守への応用が可能であることを示した。

第8章では、並行論理型プログラムの開発支援環境の構築について述べる。まず、このような環境の全体構成を説

明する。次に、各構成要素を提示する。最後に、このような環境の特徴とまとめについて述べる。

第9章では、本研究の関連研究について述べる。

第10章では、本論文のまとめと今後の課題を述べる。

論文調査の要旨

並列処理に関する研究は、計算効率の飛躍的向上を目指して始められたが、並列処理システムは数値計算だけでなく記号処理や知識処理といった非数値計算分野の利用も期待されている。記号処理や知識処理に関する並列処理システムにおいて中心的な役目を果たすのは並行宣言型プログラムである。その内、並行論理型プログラムは、複雑な通信プロトコルを持つプロセス間の通信や複雑な情報の流れを持つデータ構造などを素直に記述することができるという大きな特徴を持っている。しかしながら、ソフトウェア工学の観点からみれば、並行論理型プログラムにはプロセス間の通信と同期が暗黙的に存在するため、その理解、テスト、デバッグ、保守などには副作用を持つ命令型プログラムに対するものとは違った難しさがある。また、並行論理型プログラムの開発支援環境も殆ど整備されていない。信頼性の高い並行論理型プログラムを効率的に開発するためには、並行論理型プログラムの挙動に関するモデルを構築し、それに基づいて並行論理型プログラムの開発支援環境を整備しなければならない。本研究は、並行論理型プログラムの開発支援環境の基礎を与えるために、並行論理型プログラムの挙動における新しいプログラム従属性概念、並行論理型プログラムの挙動の従属性モデル、およびこのモデルに基づいた並行論理型プログラムの開発支援環境を提案したものである。

著者は、まず、並行論理型プログラムにおける多重制御流れの抽象表現モデルとして並列制御流れネットと拡張された並列制御流れネットを定義し、対象プログラムをこれらのネットに変換する規則を与えた。これらのネットは、枝が分類された有向グラフであり、並行論理型プログラム中の複数の制御の流れ、および引数に関する情報を明示的に表現するものである。そして、著者は、並行論理型プログラムにおける引数間の共有変数による共有従属性、引数間の通信による通信従属性、および引数間の同一化による同一化従属性という3種類の基本的なプログラム従属性を新たに提案し、拡張された並列制御流れネットに基づいて、それらの形式的定義を与えた。共有従属性は一つの節の中にデータの流れによって決定される従属性であり、通信従属性は一つの節の中にプロセス間の通信によって決定される従属性であり、同一化従属性は二つの節の間のデータ流れによって決定される従属性である。これらの概念は、いずれも著者による独創的なものである。著者は、さらに、並行論理型プログラムに暗黙に存在する各種の従属性を解析するアルゴリズムを開発し、これらの従属性関係を明示

的に表現するモデルとして、並行論理型プログラムの引数従属性ネットを新たに提案した。これらの研究成果によって、著者は、従来なかった並行論理型プログラムの挙動の従属性モデルを構築した。

次に著者は、構築した引数従属性ネットの、並行論理型プログラムのスライス作成及び複雑さ計測等への応用を示した。まず、並行論理型プログラムの静的スライスと実行可能スライスを定義し、引数従属性ネットに基づいてこれらのスライスを計算するアルゴリズムを開発した。これは、並行論理型プログラムのスライス作成問題を初めて提示し、そのアルゴリズムを与えた研究成果として、既に国際的に参照され引用されている。その手法の特徴としては、一旦対象プログラムを変換して引数従属性ネットで表現すれば、そのスライスをネットにおける到達性問題として容易に計算することができるというものである。次に、並行論理型プログラムにおける3種類の複雑さ評価尺度、すなわち、制御流れに基づく複雑さ評価尺度、プログラム従属性に基づく複雑さ評価尺度、およびスライスに基づく複雑さ評価尺度を定義した。これらの評価尺度を用いて様々な側面から並行論理型プログラムの複雑さを計測することができる。

更に著者は、構築した従属性モデルが並行論理型プログラムの開発にとって有効であることを示すために、その従属性モデルに基づく並行論理型プログラムの開発支援環境を提案し、その全体構成と各構成要素を提示した。また、開発したアルゴリズムを実現し、並行論理型プログラムにおける従属性を解析するツール、並行論理型プログラムからその引数従属性ネットを生成するツール、および並行論理型プログラムのスライス作成ツールの開発を行っている。提案した並行論理型プログラムの挙動の従属性モデルとそれに基づいて開発しているツール群を並行論理型プログラムの理解、テスト、デバッグ、保守及び複雑さ計測へ適用し評価する方法も与えている。

以上要約するに、本研究は、信頼性の高い並行論理型プログラムの開発支援環境の基礎を与えるために、並行論理型プログラムの挙動における新しいプログラム従属性概念を提案し、並行論理型プログラムの挙動の従属性モデルを構築した。また、並行論理型プログラムのスライス作成、理解、テスト、デバッグ、保守及び複雑さ計測にこのモデルの応用を示すと共に、並行論理型プログラムの開発支援に対するその有効性を明らかにしたものであり、ソフトウェア工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) Muhammad Masroor Ali(バングラデシュ)
学位記番号 シ情 博甲第8号(情報科学)
学位授与の日附 平成9年3月27日

学位論文題名 Studies on Dynamic Programming Based One Dimensional-Two Dimensional Character Recognition Algorithm (動的計画法に基づく1次元-2次元型文字認識アルゴリズムに関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 迫江 博 昭
 (副査) " " 谷 口 倫一郎
 " " " 岩 間 一 雄

論文内容の要旨

文字認識、なかでも手書き文字の高精度認識は長い研究の歴史にもかかわらず、いまだ未解決の問題を残している。また、より広義のパターン認識における各種問題が、具体的かつ普遍的な形で集約されており、パターン認識研究の格好の場を与えている。この論文で検討している1次元-2次元型の認識アルゴリズムは、最も低レベルな形態である2次元ドットパターンとして表現される入力パターンと、線分の時系列として表現される1次元標準パターンとのマッチングを行う。標準パターン線分長を制御パラメータとして動的計画法を適用し、入力パターン上の各部に標準パターンの線分を最適に対応付けするという構造解析を実行し、字形変動に対して安定な類似度を得る。最適対応の評価関数としては、線分列が経由するピクセルの濃度値の総和を用い、入力ドットパターンを直接扱うというパターンマッチング法の特徴と、文字変形への適応能力が高いという構造解析法の特徴とを併せ持っている。この型の認識アルゴリズムは、ふるくはKovalevsky (旧ソ連) や迫江 (NEC) によって英数字認識に対して試みられ、それらを受けて山本や山田 (電総研) によって輪郭線マッチング法に変形され漢字認識に適用されるとともに、もとのドットパターン解析の形で医用画像認識に適用された。

本論文はこの1次元-2次元型認識アルゴリズムの認識能力の向上を目的としてなされた2つの研究をまとめたものである。すなわち、第1に、迫江の方法では、線分長の制御能力を有するが各線分方向が固定され、柔軟性に欠ける点、Kovalevskiの方法では線分方向変動に対する柔軟性はあるが、線分長の制御能力を持たず、字形の記述能力に欠けるという点を改良し、両者の長所のみを併せ持つ方法を検討している。第2に、省略筆記や異字体など、大幅かつ本質的な文字変形処理能力を1次元-2次元型認識アルゴリズムに付与することを検討している。

論文は7章よりなる。第1章では文字認識研究の歴史、現状、代表的な認識法について簡単に概観し、1次元-2次元型認識アルゴリズムに着目するとともに、その線分方向に関する柔軟性の不足を指摘している。また、関連するいくつかの研究の調査を行っている。第2章では、代表的な1次元-2次元型認識アルゴリズムである迫江の、Rub-

ber String Matching (RSM) を研究の出発点と位置づけ、その概要を述べるとともに、RSMでは標準パターンの各線分長を値域が規制される制御パラメータとして動的計画法を適用していたのを、単位長線分の接続回数を各線分の制御パラメータとする形に等価変形し、以後の研究の準備としている。

第3章と第4章では線分方向の変動に関係する改良について検討している。単位長線分の繰り返し回数に加えて、新たに単位長線分の指定方向からの偏角を制御パラメータとして導入し、動的計画法で最適化するという改良を提案し、偏角の範囲を最大 $\pm 20^\circ$, $\pm 45^\circ$ の各場合の比較を行った。マッチングの結果得られる類似度比較による強制判定認識率で、各97.08%, 99.75%, 98.76%の結果が得られ、線分方向柔軟化の効果が確認された。最大偏角の最適値は、 $\pm 20^\circ$ という結果であったが、これは数字を対象とした場合の最適値と見るべきであろう。

第5章と第6章では、線分長と線分方向の制御では実現できない、本質的で大幅な書体変形への対応を検討している。この問題に文字線方向の偏角で対処しようとする、異なった文字との間の不自然なマッチなマッチングが多発し、かえって認識性能の低下を招く。このため、1次元時系列として表現されていた標準パターンを有向グラフ表現に拡張し、枝分かれとして、文字パターンの一部の省略、変形を記述し、RSMと同様なDPに基づくマッチング処理過程をスタックによって制御するという手法を提案している。実験はETL-6数字データを対象とし、主として大幅な書体変形に対するアルゴリズムの追従能力の確認を主目的として線分方向最大偏角は $\pm 0^\circ$ (もとのRSMに相当) として行った。直線部を波打たせた書体に追従出来るなど、明確な効果を示す事例が確認され、本改良の有効性が確認された。

最後に第7章で本研究を総括し、今後の展開を述べた。

論文調査の要旨

1次元パターンである音声の時間の歪み問題がダイナミックプログラミング (DP) の適用によって解決されたのを受けて、その考えを2次元パターンに拡張して、手書き文字の変形に対処しようとする多くの試みがなされている。幾多の論文が発表されているが、それらの中にあって、標準パターンを線分の系列 (1次元) で与え、ドットマトリクス表現の入力パターン (2次元) 上に展開する過程で、線分の伸縮として文字変形を整合するという方法が有望視されている。代表的なものとしては、迫江は各線分方向を固定とし、線分長を制御変数としてDPを適用するという方法を提案し、非現実的な変形を排除するために線分長の変域に制御を設けて制御している。Kovalevskyは線分方向をも可変として整合の柔軟性を向上したが、線分長を制御する仕組みは実現していない。当然、両者の長所を備え、

線分長が制御可能で、かつ線分方向の柔軟性を有するアルゴリズムが理想的と考えられるが、両アルゴリズムの単純な組み合わせでは実現できず、未解決の問題となっていた。また、現実の文字認識では、書体の違いや略字のように、線分方向や線分長の柔軟化では整合しきれない大幅な変形の問題が存在するが、この問題に対するDPの立場からの検討はなされていない。

本研究では、これらの2つの問題にそれぞれ解を与えたもので、前半では、迫江の方法を出発点とし、線分長が制御可能で、かつ線分方向に柔軟性を持つ1次元-2次元型の整合法を実現している。後半では、迫江の方法の標準パターンを単なる時系列表現からグラフ表現に拡張することによって変形を表現し、スタックを用いてDPを制御しつつ、整合を実行するアルゴリズムを提案し、大幅な変形への対処を可能としている。

著者はまず、迫江の方法とKovalevskyの方法を調査し、前者では線分方向に関する柔軟性に欠ける点、後者では線分長の制御機能に欠け、不自然な整合を発生するおそれがあることを指摘している。これらの問題を解決する準備段階として、迫江の方法で用いられていた、線分長の概念を単位長線分の接続回数に等価変換し、この繰り返し回数を制御変数とするインクリメンタルなDP漸化式とワークエリア構成を示している。

ついで著者は、このインクリメンタルなDPアルゴリズムを、単位長線分の方向に関して、標準パターンで指定される方向から $\pm 45^\circ$ の偏差を許容する形に拡張している。このアルゴリズムを用いた予備実験を通じて、 $\pm 45^\circ$ の偏差では柔軟すぎて不自然な整合を生起する恐れが大きいことを指摘し、改善策として $\pm 20^\circ$ 偏差のアルゴリズムを提案している。ETL-6手書き文字データベース中の数字データ8820字を用いて偏差 $\pm 0^\circ$ （迫江の従来法）、偏差 $\pm 20^\circ$ 、偏差 $\pm 45^\circ$ の各場合を比較する認識実験を行い、それぞれ97.80%、99.75%、98.76%の認識率を得、線分方向の柔軟化の効果と $\pm 20^\circ$ 偏差の妥当性を確認している。

さらに著者は、線分長と線分方向の変化としては記述が不可能な大幅な字体変形の問題を検討している。迫江の方法で標準パターンが時系列表現となっていたのをグラフ表現に高度化し、グラフ中の分岐として字体変形を記述出来るように拡張した。このグラフと2次元ドットパターンとの整合のDP過程においてスタックを用いて分岐を制御する方法を提案している。実験によって、従来法で整合不可能であった文字データが整合可能となった明確な事例を示して、提案した手法の有効性を示している。

以上要約するに、本研究は時系列標準パターンとドット表現入力パターン間の整合問題に対して、整合の柔軟性と適用可能範囲に関して改良されたアルゴリズムを提案し、実験的に有効性を示し、文字認識研究の発展に寄与したもので、知能システム学上価値ある業績と認められる。

よって本論文は博士（情報科学）の学位論文に値するものと認める。

氏名（本籍） 石田 健一（山口県）
学位記番号 シ情 博甲第9号（工学）
学位授与の日附 平成9年3月27日
学位論文題名 境界整合の手法に基づく回折トモグラフィの再構成法に関する研究

論文調査委員

（主査）九州大学 教授 立居場 光生
（副査） " " 西 哲生
" " " 安元 清俊

論文内容の要旨

マイクロ波等の波動性の強い駆動源を物体に照射し、物体による散乱波から、物体内部を再構成しようとするものは、回折トモグラフィと呼ばれている。回折トモグラフィは、X線CTよりも安全であり、簡便な装置が達成できることから、実用化が期待されている。また、X線とは伝搬特性が異なるため、X線では写りにくい組織の再構成、地下探査や気象観測等に適用できると考えられている。

回折トモグラフィの再構成法の問題は、非線形逆散乱問題の一つである。当初、ホルン近似等の線形化近似を用いた解析が行われたが、これは、不均質性が非常に弱い物体にのみ有効である。そこで、ホルン近似を越えて不均質性が強い物体にも適用できる再構成法として、逐次線形化反復法や最適化問題へ帰着させる手法等が幾つか提案されている。最適化問題へ帰着させる手法は、解が局所的最小値に陥る可能性があるため、その適用範囲を調べることは重要である。しかしながら、計算時間や計算中に混入する離散化誤差の問題から、その適用範囲は十分に検討されなかった。

本論文は、一つの回折トモグラフィの再構成法を提案し、計算機シミュレーションにより、さまざまな物体を再構成することで、その特徴および適用範囲を明らかにしようとするものである。

本論文は、5章から構成されている。

第1章は、序論であり、研究の背景、回折トモグラフィの再構成法の研究状況、本論文の構成について述べている。

第2章では、境界整合の手法に基づいた軸対称多層円柱の屈折率分布の再構成法を提案している。初めに、平面波が軸対称多層円柱に入射されたとき、散乱波の算定法について述べ、次に、逆問題を解くために、仮定した屈折率から算定される散乱波と観測散乱波との平均二乗誤差を定義する。これより、この平均二乗誤差の最小点を求める最適化問題を解くことによって、屈折率分布を再構成する手法が、考えられる。最後に、平均二乗誤差の最小点を、円柱

の層を次第に増加させながら、準ニュートン法を利用して求めるアルゴリズムを示している。このアルゴリズムは、最適化法に基づくものであるが、物体が軸対称多層円柱であるとき、順問題を厳密に、短時間で解くことができる。従って、さまざまなモデルを再構成することで、アルゴリズムの有効性を調べるのに適している。

第3章では、軸対称屈折率分布の再構成の計算機シミュレーションを行っている。まず、均質円柱をモデルとし、平均二乗誤差の最適化の様子を可視化している。散乱波の平均二乗誤差は、屈折率の虚部が小さい領域で凹凸が多く存在しており、その付近で最小点の探索が困難であることを示している。次に、4層の円柱をモデルとし、系統的に屈折率分布およびサイズを変えた円柱に対する再構成シミュレーションから、本手法の適用範囲を検討している。無損失円柱について、不均質の強い物体に対する適用範囲は、内側の屈折率が高い4層円柱に対して、最大比屈折率差と円柱外部の波長で規格化した半径の積が、E波入射で0.6以下であり、H波入射で0.9以下である。また、外側の屈折率が高い4層円柱に対する適用限界は、全ての層にわたる平均した屈折率で比較すれば、上述ものと大差ないことを示している。損失のある円柱に対しては、この適用範囲を超えて再構成できる。また、円柱内部の層の厚みが1/8波長程度以下のとき、正確な屈折率の再構成ができなくなり、解像限界に達することを示している。更に、観測散乱波に含まれる雑音の影響も検討している。円柱の損失が小さいとき、信号対雑音比が20dB程度の雑音により再構成像が致命的に劣化することは極めて少ない。偏波の違いについては、H波入射の際、雑音による再構成値の誤差が大きくなり、また、損失性円柱を再構成するときには、無損失円柱のときに比べ、雑音による再構成値の誤差が大きくなり、特に内側の層で大きい誤差を伴っている。その他、3層円柱のように、実際の円柱の境界と再構成のとき設定する境界が一致しない円柱の再構成例、生体モデルに近い屈折率を持つ円柱の再構成例も示している。

第4章では、非軸対称2層円柱の再構成を検討している。非軸対称2層構造の円柱については、安浦の方法を用いて、散乱波を算定している。但し、その算定には、軸対称多層円柱の場合とは異なり、連立一次方程式を解く必要があり、計算量が多くなっている。第2章と同様に散乱波に関する平均二乗誤差を用いることにより、最適化問題として円柱を再構成している。2種類の円柱に対する再構成例をあげ、真値とよく一致した再構成値が得られることを示している。観測散乱波に雑音が含まれる場合は、内側の層の精度が悪くなっている。

第5章は、結論であり、本研究で得られた結果を要約し、また、残された課題について述べている。

論文調査の要旨

回折トモグラフィは、マイクロ波などの電磁波を物体に照射し、散乱波から物体内部の屈折率分布の断層像を得る非破壊計測技術の1つで、生体観測の分野で特に注目されている。それは、X線CTに比べ、安全で装置が安価に作製できるからであり、その上、X線CTでは写し難い組織を映像化できることが想定されるからである。しかし、未だに回折トモグラフィが広範に実用化されていないのは、適用範囲の広い像再構成法が確立していないことによる。

回折トモグラフィによる像再構成は理論的には非線形逆散乱問題を解くことに帰着される。生体観測への応用を考えれば、物体の屈折率の不均質性が強い場合に有効な再構成法を確立する必要がある。これはボルン近似などの線形化近似が有効でないことを意味し、現時点では逐次線形化反復法、非線形最適化法などの手法を用いて、像の再構成が試みられている。しかしながら、それらの手法の適用範囲は、順問題の精密解析の困難さ、反復計算による離散化誤差の蓄積、計算の大容量化等により、明確でない。

そこで著者は、順問題が正確に解析でき、離散化誤差を伴わず、大容量の計算を要しない、再構成物体モデルと再構成法を提案して、回折トモグラフィの再構成法の適用範囲について研究してきた。本論文は、その研究結果をまとめたもので、以下の3点で評価できる。

(1)軸対称多層円柱断面の屈折率分布の再構成法を、波動関数展開と境界整合の手法に基づいて提案している。その特徴はつぎの2点にある。①推定屈折率分布からの散乱波を求める順問題が級数展開によって厳密に解かれる。②推定屈折率分布からの散乱波と観測散乱波との平均2乗誤差を最小にすることで、屈折率分布を再構成するが、その際平均2乗誤差が級数和で厳密に表される。上記の特徴により、従来の方法に比べ、繰り返し解かれる順問題の計算に離散化誤差が混入することなく、再構成のための計算時間が格段に短縮された。更に、多層の屈折率分布を再構成する際に、層の数を1層から順次増しながらその都度平均2乗誤差を最小にすることで、局所最小点に陥る割合を低減化し、再構成法の適用範囲の拡大を図っている点にも特徴がある。

(2)上記の再構成法を用いて数多くの計算機シミュレーションを行い、再構成法の適用範囲を示し、その根拠を検討している。まず均質円柱断面の再構成において、散乱波の平均2乗誤差を多くの屈折率に関して計算し、本再構成法の適用範囲を示している。次に多層からなる軸対称円柱断面の再構成において、E及びHの両偏波に対して、各層の屈折率が単調に変化する場合に散乱波の平均2乗誤差と屈折率再構成誤差を物体断面の径と最大屈折率をパラメータとして計算し、本再構成法の適用範囲を定量的に示した。この結果は、散乱波の平均2乗誤差を最小にすることで像

構成を行う際に再構成可能な屈折率分布の目安を初めて提示したものである。

(3)更に上記の計算機シミュレーション結果から、物体に損失がある場合には、本再構成法はその適用範囲が従来の方法に比べて大幅に広がり、物体屈折率の不均質性の観点からは生体観測に有効であることを指摘している。しかも、たとえ雑音が存在しても散乱波の観測において20dB以上のSN比が保たれていれば、本再構成法は充分適用可能であることを示している。但し、この結果は軸対称な屈折率分布の際構成に限られている。そこで、非軸対称2層円柱断面の屈折率分布の再構成法を、(1)で述べたと同様、波動関数展開と境界整合の手法に基づいて提案し、計算機シミュレーションによって限られた数値例ではあるがその有効性を示している。

以上要するに、本論文は、電磁波を用いた非破壊計測技術の研究開発に関連して、波動関数展開と境界整合の手法に基づいて回折トモグラフィの再構成法を提案し、数多くの計算機シミュレーションにより、屈折率が単調に変化する軸対称多層円柱断面の再構成に関しその適用範囲を示したもので、電磁波工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 伊 東 栄 典(宮崎県)
 学位記番号 シ情 博甲第10号(情報科学)
 学位授与の日附 平成9年3月27日
 学位論文題名 並行処理プログラムのテスト充分性評価法に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 牛 島 和 夫
 (副 査) " " 島 崎 眞 昭
 " " " 程 京 徳

論文内容の要旨

プログラムの開発において、テストは信頼性向上手法として重要である。テストに開発費用の50%が費やされている、とも言われており、開発費用を削減するために効率的なテスト法が研究されてきた。

テストによりプログラムの正しさを証明する事は実用的に不可能である。テストでは実行したテストデータおよび実行系列に対してのみプログラムの正しさを保証するからである。そのため何時テストを終了するのかが問題となる。終了を判定する方法の一つに被覆率を用いる方法がある。これは、テスト基準に従いプログラムの構造や仕様からテストすべき項目(測定事象)を定め、テストにおいて実行された測定事象の割合(被覆率)により充分性を評価する方法である。被覆率に基づいてテストの終了を判定することをテスト充分性評価という。

計算機の低価格化やネットワーク化に伴い、並行処理プログラムが実用化されてきている。それに伴ない並行処理プログラムの品質評価や信頼性向上手法の1つとしてテストが重要になってきている。逐次処理プログラムのテスト充分性評価法については、さまざまな研究がなされており、実用的なツールも開発されている。並行処理プログラムのテスト法については、試行的研究がなされているに留まっている。

並行処理プログラムは、逐次処理プログラムに比較すると、複数のプロセスが同時に実行され、さらにそのプロセス間に同期や通信などの相互作用が存在するため、動作が複雑であるので、逐次処理プログラムのテスト手法をそのまま並行処理プログラムのテスト法として利用するだけでは不十分である。しかしながら、これまで並行処理プログラムのテスト法として提案されてきた手法は、プログラムの動作のモデル化において状態数が爆発的な数になるなど、時間的に実行可能なものではなかった。

本論文は、並行処理プログラムのテスト充分性評価について述べたものであり、7章から構成される。

第1章は序論であり、研究の背景、動機および目的について述べる。

第2章は並行処理プログラムのモデル化について述べる。本研究では並行処理プログラムの動作をインターリーブモデルで解釈する。このモデル上で解釈できるプログラムの実行系列について定義する。

第3章では、提案する順序列テスト基準について述べる。並行処理プログラムの特徴は、プロセス間の同期や通信、実行の非決定性の2つである。並行処理プログラムのテスト基準としては、この2つの特徴を考える必要がある。順序列テスト基準では、プログラム内の通信や同期に関する文を要素とする系列を測定事象とする。通信や同期を行う文を扱うため、通信や同期に関する誤りを検出することが可能になる。また順序のある列を用いることにより、並行処理プログラム特有の実行の非決定性をテストすることが可能になる。

第4章では、順序列テスト基準についての定性的な検討について述べる。並行処理プログラムの誤りは、計算誤り、通信誤り、同期誤りに分類できる。同期誤りは、生存性破壊誤り、安全性破壊誤り、公平性破壊誤りに分類できる。本論文では通信誤り、生存性破壊誤り、安全性破壊誤りに対する信頼性を詳細に検討した。また既存のテスト基準と順序列テスト基準との包含関係を明らかにした。

第5章では、試作したテスト充分性評価システムについて述べる。このシステムはUNIX上で動作可能なC並行処理プログラムを対象としている。システムの入力は並行処理プログラムのソースコードであり、出力は長さ2の順序列テスト基準の被覆率である。まずシステムの構成及び機能について説明する。次に実際のプログラムを適用した結

果と、それに対する考察を述べる。

第6章では、研究の評価を行なう。本研究で提案した順序列テスト基準と他の手法との比較を行なった。また順序列テスト基準の測定事象数の削減方法について考察した。順序対テスト基準であっても、実用プログラムへの適用に当たっては測定事象の数が多くなり、確認に手間取る。これを効率化するために実現不可能な順序列の削除が必要である。あるいは順序列テスト基準の精密化が必要である。

第7章では、本論文のまとめとして、成果および今後の課題について述べる。

論文調査の要旨

あらゆるソフトウェア開発において、テストはプログラムに潜む誤りを検出しプログラムの信頼性を向上させる重要な過程である。ここでは、対象プログラムに様々なテストデータを与えて実行させる。可能な入力データを全て列挙しそれらを用いて対象プログラムをテストすることは実際に不可能である。そこで、何らかのテスト基準を設けてそれに従ってプログラムの仕様や構造などに基づいてテストすべき項目(測定事象)を定め、テストにおいて実行された測定事象の割合(被覆率)によりテストの充分性を評価する。被覆率に基づいてテストの終了を判定する方法をテスト充分性評価法という。逐次処理プログラムのテスト充分性評価法については、様々な研究がなされており、実用的なツールも開発され使用されている。一方、近年益々普及してきた並列分散処理システムにおいて中心的な役目を果たす並行処理プログラムには多重制御流れと多重データ流れが同時に存在しうるので、その挙動は一般に非予測的かつ非決定的である。このため、逐次処理プログラムのテスト手法をそのまま並行処理プログラムのテスト法として利用するだけでは不十分である。並行処理プログラムのテスト法については、試行的な研究が幾つかなされているが、実用の域に達していない。

本研究は、並行処理プログラムのための新たなテスト基準として順序列テスト基準を提案し、それを用いたテスト充分性評価ツールを試作し、実用プログラムに適用しその有効性を示したものである。

まず、著者は、並行処理プログラム内の通信や同期に関する文(通信同期文)を要素とする系列を測定事象として定義し、このような系列の長さを指標とする順序列テスト基準を提案した。測定事象の系列の長さが k である順序列テスト基準を OSC_k と表す。順序列テスト基準は、並行処理プログラムにおけるプロセス間の通信と同期のみに着目することによって測定事象数の削減ができる点、また、ソースコードに基づくことによって動的に生成されるプロセスの実体による測定事象数の増大を削減できる点で優れている。順序列テスト基準 OSC_k では、 k を長くすればより詳細なテストになるので、より多くの誤りが発見できる。一方、

測定事象数が k のべき乗で増大するのでテストに時間がかかる。順序列テスト基準 OSC_k は、テストに許される時間に応じたテストを行なうことが k の値の選択によって可能になるので、ソフトウェア開発者が対象プログラムの規模と重要性およびそのテスト実施時間の制限に応じて適当な k の値を選んでテストを行なうことができるという柔軟性を持っている。

次に、著者は、並行処理プログラムの誤りを分類し、順序列テスト基準で発見できる誤りについて解析した。並行処理プログラムに特有の誤りとして通信誤りや同期誤りがある。著者の解析結果として、(1)順序列テスト基準 OSC_2 によって発見できる通信誤り、(2)並行処理プログラムの中で同時に実行されるプロセス数を n としたときに、順序列テスト基準 OSC_{n+1} によって発見できる同期誤りの中の生存性の破壊誤り、(3)ある資源を同時に操作可能な最大プロセス数を r としたときに、順序列テスト基準 OSC_{r+2} によって発見できるその資源についての安全性破壊誤り、の範囲を明らかにした。

更に、著者は、C並列プログラムを対象とする、順序列テスト基準 OSC_2 を用いたテスト充分性評価ツールを試作し、実用プログラムに適用した。その適用結果の分析から、ツールの改善やテスト実施環境の整備によって被覆率を95%まで向上させることができることを示した。

以上に要約すると、本研究は、並行処理プログラムのテスト充分性を評価するために、並行処理プログラムの特徴である通信や同期に着目した順序列テスト基準を新たに提案し、また、並行処理プログラムの誤りを分類してそれぞれの誤りに対する順序列テスト基準の信頼性を検討し、更に、提案した順序列テスト基準を用いたテスト充分性評価ツールを試作して、実用プログラムに適用し、その有効性を明らかにしたものであり、ソフトウェア工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 佐藤明雄(大分県)
学位記番号 シ情博甲第11号(工学)
学位授与の日附 平成9年3月27日
学位論文題名 アクセス系無線通信における電波伝搬特性の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 立居場 光生
(副査) " " 香田 徹
" " " 赤岩 芳彦

論文内容の要旨

本研究は、我が国初の準ミリ波を用いたアクセス系無線方式である26GHz帯加入者無線システムの実用化に向け

を行った一連の電波伝搬特性の研究に関するものである。本システムでは、都市内において地上高の高い無線鉄塔や高層ビル屋上に設置した基地局と、その周囲のオフィスビル群に散在する多数のユーザを結ぶ広帯域無線通信サービスを提供する。さらに、オフィスビルのユーザだけでなく一般住宅のユーザまでサービス対象に含めた可搬型の加入者無線システムへ発展している。本システムの実用化においては、都市内空間のいろいろな場所に存在する多数のユーザに対し、できるだけ多くのユーザを効率的に収容できるような無線ゾーン構成を明らかにすることが基本的な要求である。このため、準ミリ波帯を用いることから電波伝搬上の検討課題として、まず、建物の遮蔽が無線ゾーン構成に与える影響を定量評価する必要がある。更に、伝搬路周囲の建物による反射波の干渉特性評価法を新たに確立する必要がある。

本研究では、まず、準ミリ波都市内伝搬特性を解明する上で不可欠な建物分布モデルを高層ビルから一般住宅にわたる広い領域で明らかにしている。次に、この建物分布モデルを用いた建物遮蔽の影響について見通し率による定量的な評価法を提案している。更に、干渉波発生原因であるビル壁面反射特性を実験的に検討し、確率分布による反射特性の評価法を提案している。最後に、見通し率評価法および壁面反射特性評価法を用いた都市内無線ゾーン設計法について検討している。

第一章は序論であり、26GHz帯加入者無線システムの開発経緯と準ミリ波を中心とした周波数帯における都市内伝搬特性についての研究背景をまとめ、本研究の目的および本論文の構成等を説明している。

第二章では、見通し率を用いた無線ゾーン設計法を構築するため、まず、各種建物データを用いて建物分布のモデル化を行った。建物高さ分布や建物幅分布の定式化により、検討対象地域の都市構造を定量化した。更に、対象領域を広げるため、比較的入手しやすい中高層ビルの建物データを用いて一般住宅まで含む建物モデルへ拡張する手法を明らかにした。次に、建物分布モデルを用いた見通し率計算法を理論的に導出し、その妥当性を見通し率の実地調査および建物データを用いた計算機シミュレーションにより検証した。また、複数の基地局の無線ゾーンを重複させた場合の見通し率改善効果を実効見通し率の概念を導入して検討した。複数基地局に対する見通し率の角度相関特性についての検討結果も示した。最後に、見通し率を用いた無線ゾーン構成の検討から、東京都内をモデルに無線ゾーン半径と所要の基地局数を明らかにし、具体的な無線ゾーン構成例を示した。

第三章では、まず、建物壁面反射特性評価法を確立するために行った各種建物壁面の反射特性測定により、加入者無線方式に割り当てられた25.25GHz~27.0GHzの周波数帯域内において、建物壁面反射係数は壁面の凹凸による反

射波相互の干渉により大きく変動することを示した。次に対象とする周波数帯域内で変動する反射係数について確率分布を求め、一回反射係数は平均値-8dBのレイリー分布で表せることを明らかにした。壁面で二回反射した場合の反射係数の確率分布を、一回反射係数の確率分布から導出し、測定による検証を行った。更に、ユーザの無線装置が屋内に設置され、窓越しに基地局へアクセスする場合に問題となる窓ガラスの影響を検討し、その透過特性、整合層による透過損失軽減効果及び雨滴がガラス表面に付着した場合の影響を明らかにした。以上の検討から、26GHz帯における建物壁面反射波レベルの定量的評価を可能にした。

第四章では、第二章で検討した見通し率推定法と第三章で検討した建物壁面反射特性評価法を用いて建物反射波干渉特性を検討した。まず、干渉波となる建物壁面反射波が受信点に到来する確率について扇形ゾーンにおける計算法を示した。検討対象エリアにおける建物密度や建物高さ特性等の建物分布パラメータ及び基地局高や距離の置局パラメータとの関係を明らかにした。次に、基地局と加入者局間の伝搬路における直接波と建物反射波の通路長差の確率分布をシミュレーションで求め、通路長差に基づくレベル差の分布を得た。更に、これを反射波レベルの確率分布へ拡張し、直接波と反射波のレベル比における指向性アンテナの干渉量抑圧効果を明らかにした。最後に、複数基地局が同じ周波数の組合せを用いる場合に発生するオーバーリーチ干渉及び建物壁面反射波干渉量を、ある基地局配置モデルにおいて計算し、上記検討結果により干渉特性を考慮して基地局の配置及び使用周波数の割り当てや無線ゾーンの傾きまで設計できることを示した。

第五章は以上の研究をまとめた結論である。

論文調査の要旨

データ、映像等のマルチメディアに対応した無線伝送の実用化が、高周波回路技術の進歩と相まって、社会的要求として検討された。準ミリ波を用いたアクセス系無線方式である26GHz帯加入者システムの実用化に対しては、都市空間の多数の加入者をできるだけ効率よく収容する無線ゾーン構成を確立する必要がある。このため、建物による遮蔽特性と周辺の建物からの反射波干渉特性を的確に評価することが、電波伝搬に関する基本的課題として必須となった。

そこで著者は、まず消防庁のデータに基づき建物分布モデルを高層ビルから一般住宅に亘る広範囲で確立して、その分布モデルから建物遮蔽の影響を電波見通し率で定量的に評価することを試みた。次に干渉波の発生原因となるビル壁面からの反射特性を実験的に検討して、反射特性を確率論的に評価する方法を提案した。更にこれらの評価法を用いて都市内無線ゾーン設計法を検討した。本論文は、これらの研究結果をまとめたもので、以下の4点で評価でき

る。

(1) 先ず中高層ビルのデータから、中高層ビルが密集する地域での建物分布モデル、即ち、建物の高さ分布、幅分布及び密度分布を求め、次にこの建物分布モデルを低層建物を含めた全建物に適用できるように拡張して、航空写真との比較によりそのモデルの妥当性を示した。建物の位置と方向は一様ランダム、建物の水平断面は正方形であるとの仮定を建物分布モデルに導入して、基地局から加入者局を直接見通せる確率（見通し率）を計算する式の導出に成功した。それによる計算値を東京、大阪での測定値と比較して、見通し率計算式の有効性を示している。

(2) 上記の見通し率計算式を用いて、複数の基地局で構成される都市内無線通信システムにおいて、無線ゾーンの構成を検討している。即ち、1つの基地局の無線ゾーンに多数の加入者局が存在し、基地局の無線ゾーンを重複させることで見通し率の改善を図る場合、基地局の数と無線ゾーンの半径に関する構成法を実際の観点から検討している。この構成法を中高層建物が多い東京の中心部と低層建物の多い世田谷区内で適用し、所望の見通し率を確保できる基地局数とゾーン半径を算出している。

(3) 5つのビルに対して実験を行い、ガラス、タイル、鉄柱、金属面、コンクリートからなるビル壁面の凹凸による26GHz帯(25.25~27.0GHz)の反射特性を明らかにして、電力反射係数の確率分布に関して次の結果を導出した。1回反射による反射係数は平均値が-8dBのレイリー分布で、2回反射による反射係数は第2種変形ベッセル関数を用いた密度関数でそれぞれ近似的に表される。更に送受信機をビル内に設置した場合を想定して、ガラスに対する26GHz帯の透過特性を、雨天時による水滴の影響までも考慮に入れて実験的に明らかにした。また、ガラスによる透過損失を低減するため、個々の周波数、入射角に簡単に対応でき、大きな改善効果が得られる整合層を提案している。

(4) 先の見通し率計算式と建物分布モデルを用いて、多重反射波の到来個数確率を定式化して、その到来個数の基本特性（建物分布、加入者の距離と高さ、到来角等への依存性）を先ず明らかにした。次にこの基本特性と先の反射係数の確率分布を用いて、扇形無線ゾーンにおける直接波と反射波の干渉レベルに対する確率分布を求め、指向性アンテナの干渉抑圧効果を定量的に明らかにした。最後に、他ゾーンの基地局からの干渉レベルを最小にする問題に上記の確率分布を適用して、複数の基地局が存在し各局で4つのゾーン毎に異なる周波数を使用する状況下で、新たに1つの基地局を増設する際のゾーン設計例を示している。

以上要するに、本論文は、アクセス系無線方式である26GHz帯加入者システムの実用化に際し、建物分布モデルを確立して電波の見通し率と周辺の建物からの反射波干渉レベルを確率的に評価することに成功し、都市内基地局無線ゾーン構成の基盤を与えたもので、通信工学に寄与する

ところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 見山 雅英(広島県)
 学位記番号 シ情 博甲第12号(工学)
 学位授与の日附 平成9年3月27日
 学位論文題名 クエンチとサイズ効果を考慮した浸漬冷却超伝導コイルの絶縁設計と冷媒の絶縁破壊特性に関する基礎研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 原 雅 則
 (副査) " " 竹尾 正 勝
 " " " 船木 和 夫

論文内容の要旨

電力の高効率変換性と高い制御性のために、我国のエネルギーシステムにおける電力システムの役割は増大し、今後電力需要は堅調に増加するものと長期予測がなされている。一方、近年電力設備用地の取得困難化により、電力設備の新增設が停滞する傾向にある。さらに、電力需要の都市部への集中、電力消費の昼夜間・季節間格差は、短絡電流の増加、設備利用率の低下による供給コストの上昇をもたらしかねない。これらの電力システムにおける技術的課題を抜本的に解決する1つとして超伝導技術の電力分野への導入が注目され、既存電力機器の小型軽量化・高効率化、および高効率電力貯蔵等の新規電力機器開発という観点から研究開発が進められている。

これら超伝導電力機器の実用化には超伝導機器の運転電圧やクエンチ発生時の誘起電圧等に対する電気絶縁の高信頼化が主要な開発課題として認識されている。特に、浸漬冷却超伝導コイルでは冷媒の液体ヘリウムが絶縁媒体を兼ねるため、これまでコイル運転環境下における出現電圧や液体ヘリウムの絶縁破壊特性が調べられてきた。しかし、それはいずれも個別の現象解明に留まるものであり、超伝導コイルの電気絶縁設計法として体系化されているとは言い難い。また、商用運転時における電気絶縁の信頼性を確認するために実施される超伝導コイルの高電圧試験は既存電力機器の規格に沿って実施されており、必ずしも超伝導コイルの耐電圧特性を反映していない。超伝導コイル用の高電圧試験条件を検討するには、異物混入等による偶発事故まで含めて商用運転時のコイル耐電圧特性を総合的に検討することが必要と考えられる。

本研究では、浸漬冷却超伝導コイルの電気絶縁の高信頼化に資することを目的として、クエンチを考慮したコイル内の絶縁距離決定法を体系的に検討すると共に、超伝導コイルの導体規模における液体ヘリウムの絶縁破壊強度をサイズ効果に基づいて検討した。更に、異物混入等によるコ

イル内での偶発的な短ギャップ形成時のコイル耐電圧特性に関する基礎的な検討を行った。本論文はこれらの成果をまとめたものであり、以下の5章から構成されている。

第1章は序論であり、まず電力システムの技術的課題に対する超伝導電力機器に必要性和開発状況、超伝導コイルの電気絶縁に対する高信頼性の必要性について述べた。次に浸漬冷却超伝導コイルの出現電圧、絶縁環境、その絶縁環境下における絶縁系の耐電圧特性を整理した。さらに、本研究と関連した従来の研究を概説した。

第2章では、浸漬冷却超伝導コイルの絶縁距離決定フローチャートを提案し、ケーススタディを通じて常規運転時およびクエンチ時のそれぞれについて所要耐電圧の確保に必要な絶縁距離の決定方法を具体的に示すと共に、クエンチ発生時のコイル耐電圧特性の評価とそれに影響をおよぼす主要なパラメータの解明を図った。その結果、浸漬冷却超伝導コイルの耐電圧は常規運転時よりもクエンチ時の方が低下し、特にコイル蓄積エネルギーの外部回路への転送放出時にコイルの絶縁裕度が最低となり得ることを明らかにした。その際、絶縁裕度および所要耐電圧を確保するのに必要な絶縁距離がクエンチ発生からの経過時間およびクエンチ保護操作条件に大きく依存することを示した。

第3章では、4.2Kの飽和沸騰液体ヘリウム (Hel) と1.85Kの飽和超流動液体ヘリウム (Hell) について、微小電極系で得られた絶縁破壊強度から超伝導コイルの耐電圧を推定するのに不可欠なサイズ効果および絶縁破壊機構を検討した。その結果、液体ヘリウムの絶縁破壊特性に対しては体積効果よりも面積効果が支配的であること、および面積効果が特にHellの直流破壊において顕著に現れることを見出した。また、液体ヘリウムの絶縁破壊における初期電子は電極表面からの電界放出により供給されることを確認すると共に、統計遅れ時間の電極面積および電界に対する依存性を導出し、それが実験結果とよく一致することを示した。さらに、Helの面積効果は電極面積の増加に伴い次第に飽和することを実験的に明らかにし、その結果から第2章で設定した常規運転時の絶縁距離に対する安全係数の妥当性を示した。

第4章では、異物混入やコイル電磁応力による絶縁距離短縮時のコイル耐電圧評価において大切となる常温ヘリウムガスの短ギャップ絶縁破壊特性を調べた。その結果、Paschen ミニマムよりも左側の領域では電極の並行のずれ等に起因したギャップ長の不均一性により破壊電圧がPaschen曲線から予想される破壊電圧よりも低下することを示した。破壊電圧のPaschen曲線からの逸脱は、ギャップ長一定下において圧力を低下させるよりも、圧力一定下においてギャップ長を短縮した方が顕著であることを明らかにした。また、ギャップ長が $1\mu\text{m}$ 以下になると電極に加わる電界が著しく高くなるため、電界放出が破壊を支配する主要なファクタとなり、その結果、Paschen曲線から推定され

る破壊電圧以下であっても破壊が生じ得ることを明らかにした。

最後に第5章では、本研究で得られた結果を要約し、本論文を総括すると共に、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

最近の電力需要の増大、ピーク負荷の先鋭化、大都市圏近傍の電源立地の困難性のために電力システムにおける諸問題が顕在化しており、超伝導電力機器を導入して、システムの高効率化、高密度化、高安定化、周囲環境への設備の適合化を図ることにより、これらに効果的に対処することが期待されている。このために、超伝導電力機器の開発が各所で行われているが、機器の実用化が近づいたが、超伝導電力機器における電気絶縁技術確立の重要性が認識されるようになってきている。超伝導電力機器では、常電導機器と異なって、超伝導の常電導転移 (クエンチ) が起こり、絶縁媒体を兼ねる冷媒が相転移して絶縁系の耐電圧が著しく低下する可能性がある。これまで、超伝導機器の電気絶縁は経験によって行われていたが、クエンチを考慮した絶縁設計法の確立とそのための絶縁設計基礎データの集積が望まれている。

本研究は、クエンチを考慮した浸漬冷却電力用超伝導コイルの絶縁設計法を提案してこれを計画中の小形SMESに適用するとともに、実験室規模の装置による絶縁試験データを実規模の電力機器設計に適用する場合の破壊統計現象と絶縁試験において考慮されるべき微小ギャップのガス中における破壊特性について検討し、新しい知見を得ている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、浸漬冷却超伝導コイルの常規運転とクエンチ時のストレス電圧推定、クエンチ時の絶縁環境推定、および耐電圧評価の方法を検討し、これをもとにクエンチ現象を考慮した絶縁設計法を提案し、小形SMESに適用して絶縁設計を行っている。さらに、提案した方法をもとに絶縁距離に対するコイル運転条件とコイル導体パラメータの影響を検討し、絶縁信頼性確保には、クエンチ時の貯蔵エネルギーの放出法、クエンチ保護回路の動作遅れ時間、クエンチ発生時のコイル電流ならびに保護抵抗の適正な選択が大切であることを指摘している。

第二に、飽和沸騰と超流動液体ヘリウム中の破壊統計現象を実験と理論の両面から調べ、破壊電界確率がワイブル分布に従うことを示すとともに、破壊電圧と電極系のサイズならびに破壊遅れ時間との関係を検討している。サイズに関しては、破壊のトリガーに関与する電極表面積 (統計的課電面積) および冷媒体積 (統計的課電体積) の計算基準を実験により見出し、種々の電極系の破壊電圧と統計的課電面積および体積の関係を考察し、破壊電圧特性において面積効果が支配的で、主な破壊弱点が電極表面上に存

在していることを示している。また、破壊遅れ時間に関しては、電極面上の突起から電界放出が起きるとして破壊遅れ時間分布を理論により求め、急峻波パルス電圧による破壊遅れ時間の測定結果によく合うことを確かめている。さらに、面積効果を考慮して実験室電極系による破壊電圧特性のデータから、実系統に接続予定のSMESにおける液体ヘリウムの耐電圧評価を行っている。

第三に、超伝導コイル製作過程ならびにクエンチ条件下で起きる可能性のあるガス中における極短ギャップの破壊の特性と機構を検討し、特にパッシェンミニマムより左側の〔ガス圧〕・〔ギャップ長〕積領域においては、破壊電圧がガス圧の影響を受けること、ギャップ長の現象に伴って電子増殖機構がガス中の衝突電離から電界放出に移行することを見いだしている。さらに、超伝導コイルの絶縁試験に当たって、ギャップ条件がパッシェンミニマムの左側の〔ガス圧〕・〔ギャップ長〕積領域になる場合は、本研究で見いだされた現象を考慮して等価絶縁試験におけるガスの圧力と温度の設定が大切であることを指摘している。

以上要するに、本論文は、浸漬冷却超伝導コイルの絶縁設計法を提案し、絶縁距離を支配するコイルの運転と保護に関係する主要パラメータを示すとともに、超伝導コイルの絶縁設計と絶縁試験の基礎になる液体ヘリウムの破壊におけるサイズ効果と破壊遅れ、ならびに微小ギャップの破壊特性を明らかにした結果をまとめたもので、電力工学士上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 秋山秀之(熊本県)
 学位記番号 シ情博甲第13号(工学)
 学位授与の日附 平成9年3月27日
 学位論文題名 脂質膜のインピーダンス特性を利用した
 味覚センサに関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 山藤 馨
 (副査) " " 吉田 啓二
 " " " 原 雅則

論文内容の要旨

人間の感じる味覚は、その知覚対象が科学物質であるため、味覚と併せて化学感覚と呼ばれることが多いが、味覚という感覚量は、化学物質そのものの分析ではなく化学物質と人間の味覚受容器との相互作用に基づいて生じるものである。したがって、人間の味覚受容機構になるべく近い受容システムを構成することが感覚量としての味覚を測る最善の手法である。従来の味覚センサの研究においても、この発想に基づいて人間の味細胞の味覚受容膜の膜電位変化のしくみを模倣したマルチチャンネル型味覚センサシ

テムの開発研究が積極的に行われてきた。しかし、この種の味覚センサは、電荷をもつ呈味物質が脂質膜の膜電位のもととなっている拡散電気二重層を直接変化させる効果の再現に留まっており、非電解質や弱電解質の呈味物質に体する応答が極めて鈍く、呈味物質に電荷の有無が本質的ではない呈味効果の高感度の検出には不適當であった。物質の電荷によらない味覚には苦味や甘味があるが、現行の味覚センサではこれらの物質の電荷の有無あるいは正負によってセンサ応答が全く異なり、苦味や甘味のもとになる呈味効果を忠実に検出できていなかった。

本論文は、現行型味覚センサで検出できていない呈味効果を検出できる新しい味覚受容システムを有する味覚センサシステムの開発を目指して行った基礎研究の成果をまとめたものであり、6つの章より構成されている。このうち第2章と第3章においてリン脂質LB膜を受容膜とする苦味センサに関する研究結果について述べ、第4章と第5章において非電解質の呈味物質の検出方法として、脂質高分子膜(Lipid/polymer membrane)のインピーダンス計測に基づいた味覚センサに関する研究結果を述べている。

第2章では、苦味物質は受容膜の脂質膜部分に吸着して膜の構造を変化させる物質であることから、まず膜構造変化を定量的に検出できる可能性がある人口受容膜として、リン脂質を膜材料としたLangmuir-Blodgett(LB)膜の作製を試み、伝統的な単分子膜累積法である垂直浸漬法では困難であったリン脂質単分子膜の累積を水平付着法という手法を用いて実現し、このLB膜の試作に成功した。そこで、このLB膜の膜電位変化を測定することにより苦味の検出を試みた結果、この方法では苦味物質に共通する応答を検出できないことを示している。

第3章において苦味物質によるリン脂質LB膜の膜構造変化を直接検出する方法として膜の交流インピーダンス測定を検討した結果、苦味物質がこのLB膜の膜抵抗を増加させることを明らかにしている。これらの研究により、リン脂質LB膜の膜抵抗を測定する方法によって苦味を検出できる可能性があることが示された。また、このリン脂質LB膜の呈味物質によるインピーダンス変化の計測実験の過程において、非電解質であるショ糖に対しても膜抵抗の増加が観察され、脂質膜のインピーダンス計画によってこれまでの味覚センサでは困難であった非電解質の膜への吸着を検出できることが明らかとなった。しかし、LB膜は実際の食品の味覚測定に使用するには構造の安定性や耐久性の面で問題があり、繰り返し使用に耐えうる脂質膜が必要である。

第4章では味覚受容膜として脂質高分子膜(Lipid/polymer membrane)に着目し、この膜のインピーダンス変化を測定することにより、従来の膜電位測定では不可能であった非電解質の膜への吸着を検出することを試みた研究の結果について述べている。この脂質高分子膜は従来のマ

ルチチャンネル型味覚センサに使用されている人口脂質膜であり、これまでの様々な食品の測定によりその耐久性の高さは実証済みである。測定の結果、非電解質の膜への吸着が検出できることが示されたが、反面、膜全体のインピーダンスが非常に高く、かつ膜容量の値が非常に小さいという問題点が明らかとなった。これらは実験で用いた脂質高分子膜の膜厚が大きすぎることに起因すると考えられる。

第5章においては上記の問題点の改善を試みた結果について述べている。その結果、脂質高分子膜の薄膜化によって上記の問題点が2つとも解決された上に、電解質の呈味物質についても膜容量の増加の形で呈味物質の膜への吸着が検出可能であることが示され、この脂質高分子薄膜のインピーダンス計測によって非電解質に限らずあらゆる呈味物質の膜への吸着効果を検出できる可能性が示唆された。これらの研究結果より、同じ脂質高分子膜を用いながらも、膜インピーダンス計測という異なる手法を用いることによって膜電位測定によって得られるものとは異なる味覚情報が得られることが示された。

本研究の結果、人間の感じる味覚のもとになる呈味効果は味質ごとにそれぞれ異なり、その呈味効果を再現する受容膜およびその検出法もそれぞれに最適な方法を選ぶ必要があることが示された。今後の味覚センサの更なる発展にはそれぞれの呈味効果の検出に最適化された複数の受容膜と計測手段を併用し、これらをゆうきてきに組み合わせ、いわばハイブリッド型のセンサシステムの実現が不可欠である。

論文調査の要旨

味覚は人間の生活に密着した五感の一種であることから、味覚センサは食品工業における食品の開発・製造や品質管理のみに留まらない広い用途を有している。

味覚は呈味物質が人間の味細胞の生体膜の電位変化を引き起こすことによって生じるため呈味物質の種類と量の分析のみでは味覚を測定できないことから、従来の味覚センサは生体膜類似の人口脂質膜の呈味物質による電位変化の測定によって得られた情報を処理するタイプのものであった。しかし、生体膜中に存在して呈味物質の特異的受容を行う蛋白質を人口の受容膜中に含ませることが技術的にもコスト的にも困難であるため、非電解質や弱電解質の呈味物質に対する応答強度が強電解質の場合に比して極端に小さく、処理を行う情報源にアンバランスな情報を内蔵している欠点があった。本論文は、従来の味覚センサにおけるこのような欠点を改善する目的で著者が行った一連の研究をまとめたものである。

著者はまず人口脂質膜の構造の改善を試みている。従来の人口脂質膜は、脂質膜を可塑剤や高分子で支持・固定して水相の呈味物質との界面に脂質単分子膜を形成させる構造のものであった。著者はリン脂質のLB膜を水平付着法を

応用することによって初めて作製することに成功し、これを測定電極上に11層堆積させて呈味物質による電位変化を測定した。しかし、膜の均質化に伴って再現性はやや改善されたものの、弱電解質や非電解質の応答強度についての改善はみられなかった。

著者はそこで、電位測定以外の測定によって上記の問題点を改善することを試みている。まず、苦味物質は種類が多く、弱電解質および非電解質の物質が含まれていることに着目し、これらの苦味物質が膜に吸着されて膜構造を変化させることから、上記のリン脂質LB膜の種々の苦味物質によるインピーダンス変化を測定している。しかし、弱電解質や非電解質に対しては、LB膜の電気抵抗も静電容量も共に有効な情報処理の対象になり得る程の変化を示さなかった。次に、従来の味覚センサに用いられている高分子支持の脂質膜について同様なインピーダンス計測を種々の呈味物質について系統的に行ったところ、弱電解質や非電解質の応答強度はやや増加したが、やはり不十分であった。

最後に著者は、従来の高分子支持の脂質膜が支持上の理由で200 μm 程度の厚さを有していることに着目し、膜厚を減少させることを試みて5 μm 程度の薄膜を安定に作製することに成功している。この薄い高分子支持脂質膜に対して膜のインピーダンス測定を詳細に行い、苦味物質のみならず従来応答強度が弱かったショ糖や旨味物質についても、膜抵抗及び膜容量の両者とも有効な情報処理の対象に充分なり得る応答強度を得ることに成功している。

以上の研究結果は、人間と同様に呈味物質による脂質膜の電位変化のみを情報源としていた従来の味覚センサから脱却した、膜のインピーダンス測定から得られる情報をも併用するハイブリッド型味覚センサの可能性を具体的に示唆したもので、センサ工学上価値ある業績である。よって本論文は博士（工学）の博士論文に値するものと認める。

氏名(本籍) Vasa Nilesh Jayantilal (インド)
 学位記番号 シ情 博甲第14号(工学)
 学位授与の日附 平成9年3月27日
 学位論文題名 Study on Spectral Narrowing of Tunable Solid-State Lasers (可変波長固体レーザーの狭帯域化に関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田 三男
 (副査) " " 吉田 啓二
 " " " 安元 清俊
 " " " 岡田 龍雄

論文内容の要旨

可変波長レーザーを用いたレーザー分光法は、高い検知感度、優れたスペクトル・時間・空間分解能を持ち、分光学

の研究に画期的な進歩をもたらした。またその適応範囲も、基礎的な分光学から、分光分析、プロセス計測、プラズマ計測、大気環境計測等工業的な分野へと拡大しつつある。

レーザー分光法の最も重要な道具である可変波長レーザーには、これまで色素レーザーが広く使われてきたが、最近無機結晶を用いる新しい可変波長固定レーザー材料が次々開発され注目を集めている。特に Ti^{3+} :サファイア(Ti^{3+} : Al_2O_3)レーザーは、従来の色素レーザーに比べ広い同調域、高い発振効率、優れた耐久性を持っており、広く実用に供されつつある。この種の固体可変波長レーザーはスペクトル幅の制御性においても色素レーザーより優れており、より安定した単一モード動作が可能である。また Cr^{3+} :LiSAF(Cr^{3+} : $LiSrAlF_6$)レーザーは半導体レーザーの直接励起で発振し、コンパクトな可変波長レーザーを構成できる特徴を有する。

本論文は、新世代の可変波長レーザーとして注目されている Ti^{3+} :サファイアレーザー及び Cr^{3+} :LiSAFレーザーに関して、そのスペクトル狭帯域化について研究したもので、狭帯域化に際してインジェクションシーディング(injection seeding)技術の適用に関し種々の新しい提案と実験を行なっている。インジェクションシーディングとはあらかじめスペクトルを狭帯域化してレーザー光を、パルスの可変波長レーザーの共振器中に注入して、その発振スペクトルを注入光と同じモードに引入れる技術である。

本論文は5章より構成される。第1章は序論で、本研究の背景、目的、ならびに各章の概要について述べた。

第2章は Ti^{3+} :サファイアレーザーにもう一台のパルス Ti^{3+} :サファイアレーザー光を注入する場合、即ちパルス光によるインジェクションシーディングについて研究した。この方式の特徴は一台の励起用レーザーを使い、広い同調域を制御できることである。パルス光の注入では注入を行なうタイミングが重要で、レート方程式によりそのメカニズムを解析し、最適な注入のタイミングを求めた。インジェクションシーディング時の同調可能域についてはQスイッチングの理論を適用して求めることができ、その結果は実験的にも検証された。

第3章は、 Ti^{3+} :サファイアレーザーへの単一モード半導体レーザーによる連続(CW)注入について研究した。その際、 Ti^{3+} :サファイアレーザー側を直線型とリング型の共振器にした場合の違い、さらに第2章のパルス光注入の場合との違いなどについてスペクトル拡がりを考慮したレート方程式により理論解析を行なった。得られた結果は実験と良い一致が見られた。さらにCW光注入時の注入パワーの減少法について考察した。このCW注入方式は良好な単一モード発振を得るのに有効な方法であるが、半導体レーザーを用いるため広い範囲の同調はできない。

第4章ではまず、半導体レーザーで直接励起が可能な Cr^{3+} :LiSAFレーザーを試作開発し、二重共振器と斜入射

回折格子を組合せた構成で単一縦モード発振が得られることを示した。そして、二重共振器型可変波長レーザーの同調可能域を理論と実験により明らかにした。次に、その回折格子をファイバグレイティングに置き換えても単一縦モード発振が可能であることを示した。ファイバグレイティングというのは、通常の石英ファイバーのコアに紫外線レーザーで屈折率の周期構造を焼き込んだもので、それによって、極めてコンパクトで狭いスペクトル幅を有するCW可変波長レーザーを実現させることができた。さらに本章では、上述の単一モードCW Cr^{3+} :LiSAFレーザーを Ti^{3+} :サファイアレーザーの注入源としたインジェクションシーディングの実験を行ない、 Ti^{3+} :サファイアレーザーを単一モード化することができた。その際、 $500\mu W$ の注入により最大 $38mJ$ のパルス出力を得た。この方式ではコンパクトな注入源で広い同調域を得ることが可能になる。

第5章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

現在レーザーシステムは、大きな世代の交代期のさしかかっている。「固体化」がその変革のキーワードとなっており、高出力レーザーの分野でも、半導体レーザー励起のいわゆる「全固体化レーザー」が主流となりつつある。レーザー分光計測や同位体分離等の応用分野に広く使われている可変波長レーザーも、従来の色素レーザーにかわって新世代の固体化された可変波長レーザーが次々に登場してきた。可変波長レーザーは固体化によって小型化、同調域の拡大、コヒーレンス・発振効率・耐久性の向上など、種々の面での性能改善が期待できる。新しい固体可変波長レーザー材料の中で最も注目されるのは、 Ti :サファイア(Ti^{3+} : Al_2O_3)と Cr :LiSAF(Cr^{3+} : $LiSrAlF_6$)である。前者は従来の色素レーザーに比べより広い同調域と高い発振効率を持ち、後者は半導体レーザー励起のコンパクトな全固体化可変波長レーザーを実現できる特徴を持っている。

本論文は、 Ti :サファイアレーザーと Cr :LiSAFレーザーを分光学的に应用到に用いる際に最も重要な発振スペクトルの狭帯域化について研究したもので、その際インジェクションシーディング(injection seeding)法の適用に関し種々の新しい提案を行なっている。ここでインジェクションシーディングとは、共振器内に特定モードの光を注入して、そのレーザーの発振を注入したモードに引き込んでスペクトルの狭帯域化を行なう技術である。

本研究により得られた重要な成果は以下のようにまとめられる。

(1) Ti :サファイアレーザーに、半導体レーザーによるCW(連続)光を注入してスペクトル狭帯域化する実験はこれまでにも行なわれてきたが、もう一台の Ti :サファイア

レーザーによるパルス光注入の実験をあわせて行ない、CWとパルス光注入のメカニズムについて理論的・実験的に明らかにした。

(2)レート方程式による解析で、パルス光注入のタイミングには最適な値が存在すること、またインジェクションシーディング時の同調可能域はQスイッチングの理論から求められることを明らかにし、そのことを実験的にも検証した。

(3)Ti：サファイアレーザーへの単一モードCW半導体レーザー光の注入実験を、直線型とリング型共振器の両方について行ない、単一縦モード発振を得た。その際、注入パワーの低減法について理論的指針を与えた。

(4)Cr：LiSAFレーザーを半導体レーザー励起で発振させ、斜入射回折格子を用いた二重共振器で、単一モードのCW発振を得ることに成功した。

(5)上述の回折格子を、コアに屈折率の周期構造を持つファイバグレーティングに置き換えることによって、同様の単一モード発振が得られることをはじめて示した。この構成によって極めてコンパクトな全固定化可変波長レーザーが実現できた。

(6)単一モードCr：LiSAFレーザー光をパルスTi：サファイアレーザーに注入して、最大38mJの高出力単一縦モード発振を得ることができた。この方式では半導体レーザーの注入と異なり、広い可変波長域がインジェクションシーディング時にも確保できる。

以上要するに本研究は、新世代の固体可変波長レーザーとして注目されているTi：サファイア及びCr：LiSAFレーザーのスペクトル狭帯域化に有効な種々の新しい方式を提案し、その実現をはかったもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 竹下達也(鹿児島県)
学位記番号 シ情博甲第15号(工学)
学位授与の日附 平成9年3月27日
学位論文題名 InGaAs歪量子井戸型半導体光能動素子の高性能化に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田 三男
(副査) " " 黒木 幸令
" " " 岡田 龍雄

論文内容の要旨

光ファイバ伝送システムの実用化により、基幹系伝送容量の増大と伝送コストの低減が進み、通信網及び情報サービスは質・量ともに著しい進展を続けつつある。これらの光ファイバ伝送技術はローカルエリアネットワークやコンピュータ内部の配線にも適用され、光技術の裾野を拡げつ

つある。このような伝送システムにおいては、実用的な光源又は光ファイバ増幅器励起光源として半導体レーザーは最適であり、また、光スイッチとして利得を持ちON/OFF比の高い半導体レーザー型光スイッチは有望であると考えられる。その際、システムを構成している半導体レーザー光源と光ファイバ増幅器励起用半導体レーザーの高性能化の要望が増大している。さらに、システムの多機能化に向け、信号切り替え光スイッチへの高性能化の要請が増加している。

本論文では、このような要請に応えるため、素子構成材料及び素子構造の観点からキャリア注入型半導体光能動素子の高性能化を目的として、半導体レーザーの閾値電流の低減とその高速化・高出力化、半導体レーザー型光スイッチの動作電流の低減と広帯域・偏波無依存化の研究を行った。本論文は5つの章より構成されている。

第1章は序論で本研究の背景、意義ならびに本論文の概要を述べた。

第2章ではリッジ導波路構造半導体レーザーの低閾値電流化について研究した。はじめに、リッジ導波路レーザーのリッジ頂上p電極の作製によって閾値電流特性のバラツキが生じることについて指摘し、改善のためにp電極用の自整合コンタクトホールの作製方法を提案し、アレイ型レーザーにおいて閾値電流特性のバラツキの低減に有効であることを示した。次に、閾値電流のリッジ導波路構造依存性について検討し、リッジの深さは閾値電流特性に影響することを実験により示し、リッジ導波路構造による閾値電流特性を解析した。また、活性層の材料による閾値電流の低減について検討し、従来GaAs量子井戸レーザーと活性層にInを添加したInGaAs歪量子井戸レーザーの基本特性と閾値電流支配要因を解明して、InGaAs歪量子井戸レーザーが低閾値電流化に有利であることを実験によりはじめて明らかにした。さらに、活性層構造と端面コーティング膜の観点から、リッジ幅、素子長、活性層数及び端面反射率が利得と損失に関与することを示し、活性層構造と高反射膜の点から最適化を行い、閾値電流2.8mAの低閾値電流の半導体レーザーを実現した。

第3章では第2章で開発した低閾値電流の構造を持つ半導体レーザーの高速化・高出力化について述べた。半導体レーザーを直接変調すると光出力の緩和振動が観察され、高速化を行う上で緩和振動は直接変調周波数の上限を示す目安になっている。ここでは、InGaAs歪量子井戸レーザーを用い、微分利得係数が大きくなる第二量子準位に着目し、第一量子準位の波長帯で反射率が低く、第二量子準位の波長帯で反射率が大きくなる反射膜を用いて、素子長に依存せず第二量子準位波長帯で発振するレーザーを新しく提案・作製し、本レーザーの緩和振動周波数が約2倍に増大することを実験的に確認した。次に、エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)の励起光源として有望な0.98 μ m帯InGaAs歪量子

子井戸レーザの高出力化について研究した。低反射膜と高反射膜の端面コーティングと素子長は外部微分量子効率と閾値電流密度に深く関与することを指摘して、高出力化と低動作電流化のためのレーザ構造の最適化の指針を与えた。さらに、単一モード光ファイバに高効率で結合させるためには基本横モードが必要であり、高出力下で基本横モード発振を得るためのリッジ導波路構造を明確にした。

第4章では第2章で示した低閾値電流のInGaAs歪量子井戸レーザを用いた光スイッチの動作電流の低減とダブルヘテロ構造のレーザを用いた光スイッチの利得の偏波無依存化について示した。まず、素子に反射防止膜を施し、その利得特性を測定して、ゲート型光スイッチとして使用するために重要な、低動作電流化を行った。その際、光スイッチを0又は5 dBの低利得と10dB以上の高利得に分け、それぞれの動作において低電流動作させるための最適活性層構造を明らかにした。最後に、この種の光スイッチにバルク活性層を採用するとともに、偏波利得差の低減のため活性層を正方形に加工し、無損失帯域40nmで、偏波による利得差0.3dBを切る低偏波利得差のLDSWのモジュールを実現した。

最後に第5章では本研究で得られた結果について要約するとともに、今後の展望について述べた。

論文調査の要旨

光ファイバ通信の高速大容量化は年々急速に進み、すでに10Gb/s以上の容量を持つ長距離通信システムが実用段階に入ろうとしている。光ファイバ伝送システムは、このような高速大容量の基幹通信システムにおいて主役を演じているだけでなく、ローカルエリアネットワークや広帯域ISDNなどマルチメディア時代のデータ伝送をになう最も重要な装置である。光ファイバ伝送システムの多様化に伴い、そのキーデバイスの一つである半導体レーザも、単なる発振器としてだけでなく、光ファイバ増幅器の励起用光源、光スイッチング素子等へと応用が広がるとともにシステムの多機能化にむけてデバイスのさらなる高性能化が要求されている。

キャリア注入型半導体レーザは、1970年二重ヘテロ接合の導入により著しく閾値電流が低下し、実用化が急速に進むと同時に、その発振波長域も拡大され、今日の光エレクトロニクス発展の基盤を築いてきた。さらに近年、プロセス技術の向上により多重量子井戸構造が導入され、低閾値化、高出力化が進みつつある。

本論文は、波長約1 μ m付近で動作するInGaAs系半導体レーザに歪量子井戸構造を導入し、発振閾値の低減、高出力化、高速化を実現するとともに、エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)励起用光源、さらにはゲート型光スイッチとしての性能向上についての研究を行なったものである。

本研究により得られた重要な成果は以下のようにまとめられる。

- (1)InGaAs半導体レーザに歪量子井戸構造を導入し、それが発振の閾値電流を低減するのに有効であることをはじめて実験的に実証した。
- (2)リッジ導波路構造を有するInGaAs歪量子井戸型半導体レーザの活性層構造や端面コーティング等の最適化に努め、閾値電流2.8mAの低閾値化に成功した。
- (3)リッジ導波路におけるリッジ頂上のp電極のコンタクトホール作製方法を改良し、アレイ型レーザにおける閾値電流のバラツキを低減させた。
- (4)歪量子井戸レーザの微分利得係数が第1量子準位より第2量子準位の方が大きい点に着目し、適当な反射膜をコーティングして第2量子準位で動作させた場合、通常より緩和振動の周波数が2倍に増加し、変調の高速化ができることを実験により確認した。
- (5)InGaAsレーザの波長がEDFAの励起源として有用であることに着目して、基本横モード発振時におけるリッジ導波路構造について検討し、その高出力化の指針を与えた。
- (6)InGaAsレーザをゲート型光スイッチ素子として用いる場合の動作電流の低減と、利得の偏波無依存化について研究し、二重ヘテロ構造の光スイッチではじめて利得差0.3dB以下の偏波無依存化を達成した。

以上要するに本研究は、InGaAs半導体レーザに歪量子井戸構造を導入して閾値電流の低減をはかるとともに、光ファイバ通信用コンポーネントとして種々の性能向上を達成したもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 松下重治(兵庫県)
 学位記番号 シ情博甲第16号(工学)
 学位授与の日附 平成9年3月27日
 学位論文題名 III-V族化合物半導体へのドーピング技術の開発とその応用に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 谷口研二
 (副査) " " 鶴島稔夫
 " " " 黒木幸令

論文内容の要旨

III-V族化合物半導体電子デバイスは、マイクロ波あるいはミリ波集積回路などの基本デバイスとして、近年、大きな進歩・発展をみせ、Siデバイスとは異なった独自の地位を確立するに至っている。今後、その一層の高性能化に加え、広範な新しい応用を拓くために、より低価格化を実現することが求められている。そのためには、基本素子であるFETの高性能化に重要なソース部などの低抵抗化や動

作層の高濃度薄層化が実現でき、かつ均一で再現性の良い低コストのドーピング技術を確立する必要がある。

本研究の目的は、このような要求に対し、第1に活性化率の高いイオン注入技術を開発して、低価格化に有利なプレーナ構造ゲートを持つGaAs系FETの高性能化を実現し、各種の用途に適用できるデバイスを実用化することにある。第2にイオン注入に代わり低コストで選択的に不純物をドーピングできる技術として、III-V族化合物半導体の分野ではあまり用いられてこなかった拡散技術の実用的な方法を提案し、新しいデバイスへの応用展開の可能性を確かめることにある。

本論文は、III-V族化合物半導体デバイス製作プロセスに整合する新しいイオン注入技術と拡散技術の開発、ならびにその電子デバイスへの応用に関する研究をまとめたもので、6章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景、目的ならびに本論文の各章の概要を述べた。

第2章では、イオン注入層の活性化アニール用保護膜として電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance: ECR) プラズマCVDで作製したSiN膜を採用したGaAsへのSiイオン注入技術について論じている。まず、短時間アニールにおいて膜破損が生じないためのSiN膜の基本的な特性とその膜形成プロセスを示した。次に、この保護膜を用いたアニールでは、またGaAs表面に多数の微小ピットが発生するという問題を見出し、この問題を解決するためにSiN 2層構造膜を考案した。そして、SiN2層膜の膜特性、特に下層膜の膜特性を最適化することにより、GaAs表面でのピットの発生抑制と注入層の高活性化を同時に実現できることを明らかにした。また、本イオン注入技術は、低エネルギー注入層において、従来の注入技術より高い活性化が得られることを示した。

第3章では、第2章で述べたイオン注入技術を用いて作製したGaAs MESFETについて述べている。まず、ECRプラズマCVD SiNアニール用保護膜を有効に適用でき、かつMESFETの高性能化のためのゲート・ソース間距離を自己整合的に規定できるダミーゲートプロセスの開発について述べた。そして、このプロセスを用いて高濃度薄層の動作層を有するGaAs MESFETを作製し、良好なFET特性ならびに制御性を持つことを示すとともに、ゲート長の短縮により、500mS/mmを越える高い相互コンダクタンスを有するGaAs MESFETを実現した。また、この技術の応用として、3V程度の低電圧で駆動できるPHS (Personal Handy Phone System) 端末用高出力FETを開発した。

第4章では、イオン注入技術のヘテロ接合デバイスへの応用について述べている。プレーナ型ヘテロ接合デバイスでは通常、オーミック電極とのコンタクト領域にイオン注入技術を用いてn'層を形成するため、アニール工程が必要

となるが、この場合、エピタキシャルn-GaAs層のアニールによるキャリア濃度の減少等が問題となる。そこで、まずn-GaAs薄膜におけるドーパントの不活性化量を定量的に取り扱うことのできるGa空孔による補償モデルを提案し、実験結果と計算結果を比較することにより熱処理温度に対するドーピング層のパラメータ (膜厚、ドーピング濃度) とドーパントの電気的不活性化率の関係を明らかにした。また、物質的に重要な真性GaAsにおけるGa空孔濃度を記述する式の導出も行った。そして、このようなGaAs薄膜のアニール特性に関する実験的あるいは理論的データをヘテロ接合デバイスである2モードチャンネルFET (Two-Mode Channel FET: TMT) のウェハ設計に応用し、低電圧 ($\leq 2V$) 動作L帯送受信用プレーナ型TMT及びミリ波用プレーナ型TMTを開発した。

第5章では、イオン注入に代わって選択的にドーピングできる技術として、GaAs, AlGaAsのn型導電層を形成できる新しいSi拡散技術について述べている。この技術では、プラズマCVD法を用いて組成を制御したシリコン酸化膜 (SiO₂) とシリコン窒化膜 (SiN) を基板上に積層し、その後、短時間アニールをするという簡単な方法でSi原子を拡散させ、高濃度でかつ極めて急峻なドーピングプロファイルを有する導電層を形成できることを示した。このようなSi拡散が生じるための下層のSiO₂膜の膜質と上層のSiN膜の役割を明らかにして、Si拡散の生じるメカニズムを提案した。また、その拡散メカニズムを基に、SiO₂膜やSiN膜の膜特性を制御して、ドーピングプロファイルを制御できることを示した。さらに、拡散ドーピング層の急峻な濃度プロファイルを利用して、GaAs/AlGaAs及びInGaAs/AlGaAsヘテロ接合基板にSiを拡散させることにより2次元電子ガス層を形成できることを示し、高性能化・高機能化を目指した低次元電気伝導デバイスの実現などの新しい応用展開を示唆した。

第6章では、本研究の総括を行うとともに、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

III-V族化合物半導体電子デバイスは、Siに比し高速性や低雑音性で優れていることから、近年、マイクロ波あるいはミリ波集積回路などの基本デバイスとして大きな進歩・発展をみせ、独自の地位を確立するに至っているが、さらに新しい応用を拓くための高性能化・高機能化と、より一層の実用化を推進するための低価格化が求められている。

III-V族化合物半導体においては、Siのような単一元素半導体と異なって、化合物を構成する複数種の元素が、イオン注入によるドーパント (添加不純物) の電気的活性化やデバイス電極部のオーミックコンタクト形成のためのアニール等の製造プロセスにおいて熱解離を起こしやすく、これが製造プロセス条件を制約している。また、イオン注

入よりも単純で量産性に優れた熱拡散プロセスも同様な理由で適用されていなかった。一方、デバイス的高速化のためのチャンネル長短縮とともに薄い動作層の形成が不可欠になり、そのためデバイス表面の不純物濃度が高くなるが、これに伴うドーパントの電気的活性化率の低下や表面欠陥の発生といった問題が生じる。

本研究はこれらの問題を解決するために行ったもので、電気的活性化率が高く、また薄い動作層を実現できる不純物ドーピング技術の開発と実用化、III-V族化合物半導体に適用可能な実用的な拡散技術の提案と新しいデバイスへの応用のための基礎検討を行ったものであり、以下の点で評価できる。

第一に新しいGaAsへのSiイオン注入技術としてイオン注入後の活性化アニール時にGaAs表面からのGaの熱解離を防ぐための保護膜として、電子サイクロトロン共鳴(ECR)プラズマCVDで作製したSiN膜を取り上げ、新たにSiN 2層構造膜を提案し、SiN 2層膜の膜特性、特に下層膜の特性を最適化することにより、従来問題であったGaAs表面のピットの発生の抑制と注入層の高活性化を実現できることを明らかにしている。

第二に、上記のイオン注入技術を用いた高性能GaAs MESFETの開発に成功している。まず、ECRプラズマCVD SiNアニール用保護膜が有効に適用でき、かつMESFETの高性能化のためゲート・ソース間距離を自己整合的に規定できる、ダミーゲートを用いるプロセスを開発している。そして、このプロセスを用いて高濃度で薄い動作層を有するGaAs MESFETを作製し、そのFET特性ならびに制御性を示すとともに、ゲート長の短縮ならびに動作層の高濃度薄層化を測ることにより、500mS/mmを越える高い相互コンダクタンスをもつGaAs MESFETを実現している。また、この技術の応用として、3V以下の低電圧で駆動できるPHS用高出力FETを開発している。

第三に、イオン注入技術をヘテロ接合デバイスであるプレーナ型TMT (Two Mode Transistor) に適用し、その高機能・高性能化に成功している。プレーナ型ヘテロ接合デバイスでは通常、オーミック電極とのコンタクト領域にイオン注入技術を用いてn⁺層を形成するためアニール工程が必要となり、この場合、エピタキシャルn⁻GaAs層のアニールによるキャリア濃度の減少が問題となる。そこで、まずn型GaAs薄膜におけるドーパントの不活性化を定量的に取り扱うことのできるGa空孔による補償モデルを提案し、実験と計算の結果を比較することにより、熱処理温度に対するドーピング層のパラメータ(膜厚、ドーピング濃度)とドーパントの電気的不活性化率の関係を明らかにしている。また、GaAsの物性として重要な真性GaAsにおけるGa空孔濃度を記述する式を導いている。そして、このようなGaAs薄膜のアニール特性に関する実験的あるいは理論的データをプレーナ型TMTに応用し、低電圧(2V以

下)動作のL帯送信用のプレーナ型TMT及びミリ波用プレーナ型TMTを開発している。

第四に、GaAs, AlGaAsにn型導電層を選択的に形成できる新しいSi拡散技術として、ECRプラズマCVD法を用いて組成を制御したSiO_x膜とSiN膜を基板の上に積層し、その後、短時間アニールをするという実用的な方法でSiが拡散され、高濃度でかつ極めて急峻なドーピングプロファイルを有する導電層が形成できることを示している。また、これに基づいたSiO_x膜の膜質と上層のSi膜の役割を明らかにして、Si拡散の生じるメカニズムを提唱している。また、その拡散メカニズムを基に、膜の特性を制御して、ドーピングプロファイルを制御することも可能であることを明らかにしている。さらに、拡散ドーピング層の急峻な濃度プロファイルを利用して、GaAs/AlGaAs及びInGaAs/AlGaAsヘテロ接合基板にSiを拡散させることにより選択的に2次元電子ガス層を形成できることを示し、高性能化・高機能化を目指した低次元電気伝導デバイスの実現などの新しい応用展開の可能性を指摘している。

以上要するに、本研究は、超高速化合物半導体デバイスにおける不純物元素ドーピング技術として、電気的活性化率が高く、かつ低欠陥のイオン注入技術の開発と実用化、III-V族化合物半導体に適用可能な実用的な拡散技術の提案とその新しいデバイスへの応用のための基本特性の確認に成功したものであり、電子デバイス工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 合志和晃(熊本県)
 学位記番号 シ情博甲第17号(情報科学)
 学位授与の日附 平成9年3月27日
 学位論文題名 Design, Implementation and Applications of ALPS-HI: An Annotated Logic Programming System with Hypothetical Implications(仮説的含意を導入した注釈付き論理プログラミングシステムALPS-HIの設計, 実装, 応用)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牛島和夫
 (副査) " " 程京徳
 " " " 長谷川隆三

論文内容の要旨

複数の知識源から得た知識には矛盾が存在しうる。したがって、知識処理システムは、矛盾を扱える必要がある。矛盾を扱うには二つの方法がある。一つは、知識中に矛盾の存在を許さず矛盾のない状態で知識を利用する方法であ

る。もう一つは、知識中に矛盾の存在を許し矛盾が存在しても知識を利用しつつ、可能ならば矛盾を取り除いていこうとする方法である。前者は知識利用の観点からみれば理想的である。しかし現実の知識は矛盾を含み得るものであるため常に矛盾のない状態に保てるとは限らない。このため、より実際の知識を扱おうとするには後者が適している。

知識処理システム構築の方法として論理プログラミングによるアプローチがある。矛盾を扱える論理プログラミングシステムへの基本要件は以下のものである。(1)プログラミング言語は矛盾の記述と矛盾の処理が可能である。(2)矛盾に関する情報を提供できる矛盾解析ツールを備える。しかし、これまで上記の要件を満たす論理プログラミングシステムは存在しない。

本研究では、矛盾を扱える知識処理システム構築の枠組みを提案することを目的とし、上記の要件を満たす論理プログラミングシステムALPS-HI (Annotated Logic Programming System with Hypothetical Implications) を設計し、その実装、応用を行った。

本論文は、ALPS-HIの設計、実装、応用について述べたもので6章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景、動機および目的について述べる。

第2章では、ALPS-HIプログラムの文法を定義する。ALPS-HIプログラムの文法は、矛盾を記述することができる注釈付き論理プログラミングにおける文法の定義を基に、矛盾を処理するために仮説的含意を扱えるように拡張したものである。

第3章では、ALPS-HIの概要について述べる。ALPS-HIは上記の2つの基本要件に対応する言語とツール、および(3)矛盾に関する情報の視覚化ツールから構成されている。基本要件(1)に対応する、矛盾の扱いに適したプログラミング言語とは、矛盾を記述することができる注釈付き論理プログラミングにおけるプログラミング言語を基に、矛盾を処理するために仮説的含意を扱えるように拡張したものである。すなわち、注釈による真理値の表現によって矛盾の記述を可能にする。さらに、仮説的含意の表現によって矛盾が起こった際の対処法の知識の記述や、矛盾が起こらないように知識を修正する際の修正案となる知識の記述を可能にする。基本要件(2)に対応する、矛盾解析ツールとは、矛盾の原因個所の候補(サスペクト)に関する情報を提供するツールである。その情報は矛盾が起こった際に、矛盾の真と偽のどちらが本当か判断する際や、矛盾が起こらないように知識を修正する際にユーザにとって判断材料となる。(3)視覚化ツールとは、矛盾解析ツールによって得られた矛盾に関する情報をユーザにわかりやすい形で提供するツールである。ユーザは矛盾の原因個所の候補となる節の位置をグラフ化した証明木の上で知ることが可能である。

第4章では、ALPS-HIの実装について述べる。本研究では、MS-Windows95/NT上でSWI-Prologを用いてALPS-HIを実装した。基本的な着想は注釈を引数として扱うことである。ALPS-HIはシェル、節コンバータ、導出ソルバー、サスペクトディテクタ、サスペクトビューアの5つの部分からなる。ALPS-HIの主な部分はPrologで記述してあるのでALPS-HIの移植性は高い。この実装によって矛盾を扱える論理プログラミングシステム構築の手法を提案した。

第5章では、ALPS-HIの知的ヘルプシステムへの応用を示す。ソフトウェアの複雑化、多機能化によってユーザーインターフェースの重要性が増加している。複雑なシステムのユーザーインターフェースとしてグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)について広く研究が行われている。しかし、GUIを用いても、複雑なシステムを操作するにはユーザはたくさんの知識を持つ必要がある。そこで、ユーザの知識不足を補うために、知的なヘルプシステムが研究されている。知的なヘルプシステムは、ユーザに能動的なヘルプと受動的なヘルプを提供し、ユーザやシステムの状況に応じたヘルプの内容を知識処理によって提供するものである。このような知的なヘルプシステムを備えたユーザーインターフェースは知的ユーザーインターフェースと呼ばれる。本研究では、ALPS-HIを知的ヘルプシステムの知識処理に応用し、その知識中に存在する矛盾への対応を行った。この応用において矛盾を扱える知識処理システムによる知識中の矛盾への対処方法を提示した。

第6章では、本論文のまとめと今後の課題を述べる。

論文調査の要旨

経験・実験科学に基づいて形式化された形式理論は、殆どの場合、不完全であるので、何らかの矛盾を間接的に含んでいる。このような形式理論に基づいて構築した知識ベースにも当然矛盾が間接的に存在しうる。一方、知識ベースにおける知識は複数の知識源から得たものであれば、それにも矛盾が直接的・間接的に存在しうる。矛盾の存在を確認しそれに対処することは、新しい仮説を提出したり、新しい概念を形成したり、新しい原理・規則を帰納したり、古い知識を廃棄し修正したりするだけでなく、新しい理論を構築することの出発点であり、しばしば、重要な科学的発見のきっかけでもある。従って、知識処理システムがその知識ベースに存在しうる矛盾を如何に取り扱うかということは発見的・進化的知識処理を実現する鍵の一つである。しかし、従来の知識処理システムは、知識ベースに矛盾の存在を許さず、矛盾のない状態でしか知識を正しく利用し推論を遂行することができない。従って、知識ベースに矛盾が存在しても推論を適切に行うことができる知識処理システムの設計と開発は、経験・実験科学の様々な分野における実際の知識処理にとって非常に重要な課題である。

知識処理システムを構築する道具の一つに論理型プログ

ラミングシステムがある。しかし、従来の論理型プログラミングシステムは、矛盾の存在を許さない古典数理論理に基づいているのでそのままでは矛盾を取り扱うことができない。知識ベースに矛盾が存在しても推論を適切に行うことができる知識処理システムを構築する道具として利用するためには何らかの拡張が必要である。

まず、著者は、矛盾を扱える知識処理システムを構築する道具として利用できる論理型プログラミングシステムが満足すべき基本要件を明確にし、それらの要件を満たす論理型プログラミングシステムALPS-HI (Annotated Logic Programming System with Hypothetical Implications) を設計した。ALPS-HIプログラムの文法は、矛盾を記述することができる注釈付き論理型プログラミング言語の文法を基に、仮説的含意を扱えるように拡張したものである。これによって、矛盾の取り扱いも容易になった。ALPS-HIプログラミング言語は、注釈による真理値の表現によって矛盾の記述を可能にし、更に、仮説的含意の表現によって矛盾が起こった際の対処法の記述や、矛盾が起こらないように知識を修正する際の修正案の記述を可能にしている。また、ALPS-HIは矛盾解析ツールを備えている。これは矛盾の原因箇所の候補に関する情報を提供するツールである。その情報は、生じた矛盾の真と偽のどちらが本当か判断する際や、矛盾が起こらないように知識を修正する際に利用者にとって判断材料となる。知識ベースにおける矛盾に利用者が対処しやすくするために、ALPS-HIは矛盾に関する情報の視覚化ツールも提供している。それは、矛盾解析ツールによって得られた矛盾に関する情報を利用者によりわかりやすい形で提供するツールである。利用者はこのツールを用いて矛盾の原因箇所の候補となる節の位置をグラフ化した証明木の上で知ることが可能である。

次に、著者は、MS-Windows95/NT上にSWI-Prologを用いてALPS-HIを実装した。実装における基本的な着想は注釈を引数として扱うことである。ALPS-HIの主な部分はPrologで記述してあるのでその移植性は高い。

更に、著者は、知的ヘルプシステムにおける知識処理にALPS-HIを適用した。ソフトウェアの複雑化、多機能化によってユーザインターフェースの重要性が増加している。知的なヘルプシステムは、利用者に能動的なヘルプと受動的なヘルプを提供し、利用者やシステムの状況に応じたヘルプの内容を知識処理によって提供するものである。著者は、知的ヘルプシステムの知識処理において矛盾の処理が必要であることに着目し、知的ヘルプシステムの構築にALPS-HIを応用し、知識ベースにおける矛盾への対処方法を提示している。

以上要約するに、本研究は、矛盾を扱える知識処理システムを構築する道具を提供するために、矛盾の記述と矛盾の取り扱いが可能であり、矛盾に関する情報を提供できる論理型プログラミングシステムALPS-HIを設計し、その実

装を行い、また、知的ヘルプシステムにおける知識処理にALPS-HIを適用しその有用性を明らかにしたもので、知識工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 古賀文隆(福岡県)
学位記番号 シ情博甲第18号(工学)
学位授与の日附 平成9年3月27日
学位論文題名 薄形磁気ヘッドによるトルクセンサの研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 二宮 保
(副査) " " 吉田 欣二郎
" " 吉田 啓二
" " 助教授 笹田 一郎

論文内容の要旨

近年、マイクロコンピュータの著しい高性能化に伴い、産業ロボット、自動車等輸送機械、工作機械等様々な機械システムの自動化、知能化が進められている。この中で、センサは、対象システムの種々の状態に関する情報を検出し、コンピュータへの情報入力を担う。

多くの機械システムでは、動力は回転力、すなわちトルクの形で与えられる。軸トルクセンサは、このような駆動力の検出や負荷トルクを介しての負荷状況のモニタを可能とし、機械システムの自動化、知能化にとって極めて重要なセンサである。トルクセンサには、回転軸に対して非接触であること、瞬時トルク検出が可能であること、構造が簡単で小形堅牢であることが要求される。このような条件から、磁気ひずみ効果を用いたトルク検出法が最も適していると考えられる。

磁気ひずみ効果に基づくトルクセンサの中で、実用鋼軸そのものの磁気ひずみ効果を利用し、軸に対向配置された鉄心入り検出コイルでトルク検出を行う、いわゆる磁気ヘッド形トルクセンサは、軸に特別な加工を必要とせず構造も簡単で堅牢であり、実用上多くの利点を持っている。しかし、検出コイルにソレノイドコイルのような回転対称性がないため、鋼軸表面の磁気特性が不均一であると、軸回転に伴ってセンサのゼロ点変動し問題となる。このゼロ点変動は、変動の平均化のために磁気ヘッドを軸周に複数個配置する、いわゆる多ヘッド構造とすることにより軽減できるが、従来検討されてきた磁気ヘッドは構造上小形化に限界があり、小形コンパクトな多ヘッド形トルクセンサの実現には適していなかった。また、トルクセンサの精度を低下させる他の要因にセンサの入出力間のヒステリシスがある。この問題に関しては、励磁条件によってヒステリシスのループの向きが変化する現象が知られているが、

その原因の詳細はわかっていなかった。磁気ヘッド形トルクセンサには、トルク検出に適した磁気特性と機械的強度を併せ持つ鋼軸の選択が重要となる。そのような鋼軸の候補として、構造用鋼の中で優れた機械的性質と焼入性をもつクロムモリブデン鋼 (SCM) やニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM) が上げられる。ニッケルクロムモリブデン鋼については、従来の磁気ヘッドを使用したトルクセンサとの組み合わせにおいて、基本特性が調べられている。しかし、鋼軸表面の異方的透磁率とゼロ点変動の関係や、ヒステリシス特性に焦点を絞った鋼軸の評価はこれまでなされていなかった。

本論文は、他ヘッド構成を容易にする薄形磁気ヘッドの開発、ヒステリシスのメカニズムの解明、ゼロ点変動の原因追求を目的としたもので、5章から構成される。

第1章は序論であり、従来研究されてきた磁気ひずみ効果型トルクセンサについて概説し、その問題点について述べた。

第2章では、薄形化と装着容易性を追求した新方式のヘッドを提案し、その動作原理について述べた。

第3章では、まず、この薄形磁気ヘッドを用い、表面硬化処理を施した3種類のニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM420, SNCM616, SNCM447) とクロムモリブデン鋼 (SCM420) について感度特性を評価し、磁気特性の劣化した表面硬化処理軸からでも十分トルク検出が可能であることを示した。

またその中で、高感度が得られたニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM420, SNCM626, SNCM447) について、さらにヒステリシス特性の評価を行った。SNCM420については励磁電流の増加に伴ってヒステリシスループの向きが反転する現象が見られた。そこでこの原因追求のため、1つの検出コイルのインピーダンスがトルク印加に伴ってどのように変化するかを、トルク無印加の初期状態での値を基準とした変化分によって調べた。その結果、ヒステリシスが反転するのは、印加トルク開放後の検出コイルのインピーダンス変化分の位相が、励磁電流と共に変化しているためであることがわかった。

さらに、最もヒステリシスの小さかったSNCM420については、軸回転に伴うゼロ点変動について評価を行った。浸炭処理軸では、非熱処理軸と比較して感度が約1桁低下したが、トルクに換算したゼロ点変動は非熱処理軸と同レベルとなっていた。これは、非熱処理軸に見られた軸製造時に生じた集合組織を主要因とする異方的透磁率が、浸炭処理を施す際の加熱に伴う組織の均一化によって、平均化されたためであることがわかった。直径25mmのSNCM420浸炭処理軸に対して、ヒステリシスがゼロとなる励磁条件である励磁周波数 $f=60\text{kHz}$ 、励磁電流 $I=0.3\text{A}$ としたとき、ゼロ点変動は $1.3\%/FS$ ($FS=1000\text{Nm}$) という優れた特性が得られることを示した。

第4章では、L-Rブリッジ構成、およびフルブリッジ構成による磁気ヘッド形トルクセンサの感度を最大にするための、検出抵抗と同期整流する際の同位位相の最適化法について述べた。1対の磁気ヘッドと1対の検出抵抗からなるL-Rブリッジ構成における最適な検出抵抗と同期位相、および2組のヘッド対からなるフルブリッジ構成における最適な同期位相は、励磁周波数とその周波数における磁気ヘッドのインピーダンスから容易に決定できることを示し、その方法を与えた。また実験により本方法の妥当性を確かめた。

第5章では、本論文の結論及び今後の展開について述べた。

論文調査の要旨

機械システムに電子技術を融合し、より高度の機能を実現しようとする場合、情報のインタフェースとなるセンサが必要である。なかでも、トルクセンサは、機械の駆動力の多くがトルクで与えられているため、必要度が高くまた応用範囲も広い。軸トルクの検出原理は軸のねじれひずみ検出に基づくものと軸表面の応力検出に基づくものがある。後者のなかでも強磁性体に特有の磁気ひずみ効果を利用するトルク検出法は、小形で堅牢な応力磁気変換機構の実現と磁気結合による非接触構造が容易であるという特長を有し、実用性の点で最も有望視されている。磁気ひずみ効果によるトルクセンサの実現法には、磁気ひずみ特性に優れた磁性体を軸に固定する方式のものと、強磁性体である鋼軸そのものを利用する方式のものがあ、後者の鋼軸を利用するトルクセンサは、構造が簡単で堅牢であるという特長を有する。しかし、軸の機械強度を高めるために、通常、鋼軸には焼き入れ等の熱処理が施されており、これが、鋼軸を利用するトルクセンサの感度、ひいては検出精度の低下を招いている。この方式のトルクセンサの実用化を進める上で、軸の機械強度を維持しながら検出精度の主要因であるヒステリシスとゼロ点変動を低減する技術の確立が最重要課題となっている。

本論文は、実用鋼軸の磁気ひずみ効果を利用して、軸トルクを非接触に検出する新方式薄形磁気ヘッドによるトルクセンサを提案し、その入出力間ヒステリシスの解明とヒステリシスが小さくなる鋼軸材の探索、ゼロ点変動の評価法、ブリッジ形検出回路の最適化法について研究した結果をまとめたものである。

著者はまず、薄形化と装着容易性を追求した直交8の字コイル対を用いる新方式の磁気ヘッドを提案し、その動作原理、および、トルクセンサの基本構成について述べている。新方式磁気ヘッドは、十分な磁極面積を保持したまま薄形化が可能で、保磁力の大きな焼き入れ軸に対しても十分な励磁能力を持つこと、また、鋼軸の周囲に複数個磁気ヘッドを配置することの空間的制約が緩和され、軸回転に

伴うゼロ点変動の平均化を可能とする多ヘッド構成の実現が容易となることなど、従来方式に対する優位性を示している。

次に著者は、表面硬化処理を施した3種のニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM420, SNCM616, SNCM447) とクロムモリブデン鋼 (SCM420) について感度特性を調べ、ニッケル含有量の多い順に感度が高いことを示している。さらに、感度の高かった3種のニッケルクロムモリブデン鋼について、入出力間のヒステリシスの評価を行い、このうちSNCM420については励磁電流の増加に伴ってヒステリシスループの向きが反転するのを見つけ、これがブリッジ形検出回路の交流出力から直流出力を得るための同期整流機構に起因していることを突き止めている。これをさらに進め、トルク印加による検出コイルのインピーダンスの変化分が、最大トルク印加時とトルク解放時とで直交する励磁条件 (60kHz, 0.3A) の下ではヒステリシスがゼロになることを予測し、実験によってこれを確認している。その結果、軸径25mm、印加トルク範囲-1000Nm~1000Nmに対し非直線誤差0.8%と高精度な特性を得ている。

さらに著者は、ヒステリシスをゼロにできるSNCM420に対して、軸回転に伴うゼロ点変動について評価を行っている。浸炭処理を行うと、熱処理前に比べ感度が約1桁低下するにもかかわらず、フルスケールで換算したゼロ点変動は熱処理前後でほぼ同レベルであり、これは、浸炭処理を施す際の加熱に伴い軸表面の組織の均一化が起きているためであることを、本研究で新たに開発した異方的透磁率分布パターンイメージング法による観察結果から導いている。このとき、ゼロ点変動は1.5%と比較的小さいことを示している。

最後に著者は、L-Rブリッジ構成、およびフルブリッジ構成による磁気ヘッド形トルクセンサの感度を最大にするための、検出抵抗と同期整流する際の同期位相の最適化法について述べている。この中で、著者は、一对の磁気ヘッドと一对の検出抵抗からなるL-Rブリッジ構成における最適な検出抵抗と同期位相、および2組の磁気ヘッド対からなるフルブリッジ構成における最適な同期位相は、励磁周波数とその周波数における磁気ヘッドのインピーダンスから容易に決定できることを示し、実験により本方法の妥当性を確かめている。

以上要するに、本論文は、磁気ひずみ効果を利用する磁気ヘッド形トルクセンサの小形高性能化のために、新方式薄形磁気ヘッドによるトルクセンサを提案し、ヒステリシスの解明を行い、トルクセンサに適した鋼軸の探索を容易にするヒステリシスならびにゼロ点変動評価法、ブリッジ形検出回路の最適化法を提示したものであり、電子工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文に値すると認める。

氏名 (本籍) 和久田 毅 (石川県)
 学位記番号 シ情 博甲第19号 (工学)
 学位授与の日附 平成9年3月27日
 学位論文題名 酸化物超伝導体の交流損失に関する基礎的研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 竹尾 正勝
 (副査) " " 船木 和夫
 " " " 山藤 馨

論文内容の要旨

交流損失は超伝導交流機器の設計において最も重要なパラメータの一つであることから、超伝導材料の交流損失に関しても活発な研究が行われている。交流損失のうち、周波数に比例する履歴損失の解析には、試料内部の遮蔽電流密度は臨界電流密度に等しいとする準静的過程を仮定した狭義の臨界状態モデルに基づく解析が行われた。従来の金属系の超伝導体はほぼ折れ線状の強い非線形の電流電圧特性をもつことから、 10^2 Hz以下の低周波交流損失の履歴損失からの外れが小さいために狭義の臨界状態モデルに基づく解析によって金属系超伝導体の低周波交流損失は定量的に良く記述することができる。

酸化物超伝導体は発見以来実用化にむけて精力的な研究が続けられており、現在のところ電力ケーブル、電流リードや変圧器などの交流応用分野においても積極的な基盤研究が進められているし、さらに広い産業分野においても、液体窒素温度付近の高温領域での応用が期待される。しかし、酸化物超伝導体ではピン止め力が弱いことや特に高温領域において熱揺動による磁束線の運動に起因する磁束クリープの影響を大きく受けることから、電流電圧特性は従来の金属系伝導体のそれとは異なり非常になだらかな曲線となる。このため、超伝導体内部に誘起される電界によって、電流密度はある電界基準で与えられる臨界電流密度から大きく外れ得る。したがって、従来の材料では準静的過程が成立すると考えられていた比較的低周波領域においてさえも、交流損失は従来理論値よりも外れることが予想される。このため、従来の狭義の臨界状態モデルによる解析に代わる新しい理論を確立する必要があるが、従来理論の限界を十分把握しておく必要がある。本研究で、酸化物超伝導体の電流電圧特性が交流損失におよぼす影響についての評価を行い、酸化物交流機器の設計の指針となる交流損失理論の導出を目的として行われたもので、以下の5章からなる。

第1章は序論であり、交流損失発生機構や酸化物超伝導体の電流電圧特性などの基礎的概念の概説を行い、従来理論の不備など、本研究の背景について述べ、本研究の目的

と本論文の概要を述べている。

第2章では、酸化物超伝導体の交流損失の解析に対して従来理論を適用することの限界を示すため、従来理論からの外れを実験および数値解析によって定量的に示している。まず、Bi-2223焼結試料に対して、液体窒素温度、ゼロ磁場中で交流電流通電時および交流磁界印加時の損失の測定を行い、従来理論からのはずれを観測した。数値解析によって試料内部の電磁界分布を計算したところ、試料内部には臨界電流密度を決める通常の電界基準よりも数百倍もの電界が誘起されており、したがって電流密度は臨界電流密度よりも数割大きくなっていることが示された。また、電流電圧特性がべき則で記述される時の交流損失と従来理論との比が、試料の半径 R 、周波数 f 、臨界電流密度 J_c とすると、 $J_c R^2 f$ の関数になることを示し、これに対して従来理論との比をプロットしてマップを作製した。これにより n 値が小さい程、従来理論とのはずれが大きくなることを指摘している。

第3章では、酸化物超伝導試料においては種々の局所的不均質性が予測されるため、測定された電流電圧特性に基づいて理論的に交流損失を評価した結果が観測値と一致するかどうかは不明であるにもかかわらず、この点についての研究は行われていなかった。ここではBi-2223円筒形試料に対しさまざまな温度、バイアス磁束密度下で電流電圧特性と交流損失特性を測定した。電流電圧特性から数値解析によって求めた損失値と測定値が温度、バイアス磁束密度によらず定量的に一致することから、ある程度の不均質性があっても電流電圧特性に基づいて交流損失を評価できることを示している。

第4章では、交流磁束密度振幅に対して十分に大きなバイアス磁束密度下で、酸化物超伝導平板に正弦波状に変化する交流磁界を印加する場合の交流損失の表式の導出について述べている。酸化物超伝導体においても交流損失の評価は、測定された電流電圧特性とMaxwell方程式を解いて求め得ることが明らかになったことから、電流電圧特性としては n 値モデルと通常の臨界状態モデルのあいだをつなぐ拡張臨界状態モデルを提案し、このモデルとMaxwell方程式を数値的に解いて交流損失の観測結果と一致したことからこのモデルの妥当性を示している。次に、このモデルとMaxwell方程式を近似的に解いて超伝導体内部の磁束密度分布を求め、そこから磁化曲線の面積を求めることによって交流損失の準静的過程における交流損失の表式は、簡便であることから広く使われているが、拡張臨界状態モデルを導入した交流損失の表式は、このBean modelの交流損失の表式において臨界電流密度を等価的な電流密度で置き換えた形で表現し、表式の利用者への便宜を図った。

第5章では、本研究で得られた結果を要約し、本論文を総括するとともに、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

電力应用到に用いられる超伝導材料に体する最大の要請は高電流密度化と低損失化である。液体ヘリウム温度領域での使用に限定されていた従来の金属系超伝導材料と異なり、酸化物高温超伝導材料は液体窒素温度領域での使用の可能性をも有しているため、電力応用上格段の優位性を内蔵している。懸案とされていた高電流密度化も発見後10年間に亘る精力的な研究の結果ある程度の日処が付き始めて種々の超伝導電力機器の研究が活発化しつつあるが、機器の設計上の基礎的知見として酸化物高温超伝導材料の低周波領域($10^{-1}\text{Hz}\sim 10^3\text{Hz}$)における交流損失の理論的予測は重要である。しかし、これに関する理論的表式としては、従来の金属系超伝導材料に対して提出された臨界状態モデルに基づくものしか存在せず、しかも、この表式の適用性さえも系統的には調べられていなかった。本論文は、著者が酸化物高温超伝導材料の低周波交流損失に関する従来のこのような不満足な状況を改善する目的で行った一連の基礎的研究をまとめたものである。

著者はまず、臨界状態モデルに基づく従来の交流損失の理論的表式の適用性について調べている。Bi-2223焼結体の円柱状試料において電界 E ・電流密度 J 特性と交流損失を測定した結果、交流損失に周波数依存性が現れ、これが臨界状態モデルでは説明し得ないことを指摘している。この試料では $E\propto J^n$ といういわゆる n 値モデルにほぼ従う E - J 特性が観測されたことから、この E - J 特性に依りてMaxwell方程式を数値的に解いて試料内部の電磁界分布を求め、臨界状態モデルと異なる電磁界分布が現れること、および相異度は n 値が小さくなる程著しくなることを示している。

著者は次に、酸化物高温超伝導材料における交流損失の理論的予測法についての検討を行っている。酸化物高温超伝導材料は種々の不均質部分を含んでいるため、平均量である E - J 特性に関する情報のみから交流損失を予測できるかどうかの確認は重要である。著者は典型的なBi-2223円柱状試料に対して E - J 特性を測定し、測定曲線を細かい折れ線状曲線で近似してMaxwell方程式を数値的に解き、得られた交流損失の値が周波数依存性を含めて測定データと数%以内で一致することを確かめている。

最後に著者は、設計上利用しやすい簡単な低周波交流損失の理論的表式を提出している。まず、最近提出された E - J 特性の複雑な理論式を単純化して拡張された臨界状態モデルを提案している。このモデルは、含まれる3つの物質パラメーターのうちの2つが或る極限值をとる場合に従来の臨界状態モデルと n 値モデルに帰する一般的なものである。このモデルの適用性を確かめるために、3つの物質パラメーターの値を測定された E - J 特性から定めてMaxwell方程式を数値的に解いた結果、得られた交流損失の値

が測定値と数%以内の定量的一致を示すことを確かめている。次に、提案した拡張臨界状態モデルに基いて直流バイアス磁界下における小、中振幅交流磁界中の低周波交流損失の表式を、Maxwell方程式を近似的に解いて導いている。得られた表式は従来の臨界状態モデルに基づく式と形式的に同じであるが、臨界電流密度を各周波数に依存する等価的な量で置き換えたものになっており、その形が極めて簡単なことから設計面で利用しやすい式であると思われる。さらに、得られた表式を測定結果と系統的に比較して、数%以内の定量的な一致を示すことを確かめている。

以上の研究結果は、酸化物高温超伝導材料の低周波交流損失に関して、従来の金属系超伝導材料に対する表式を拡張して設計上利用し易い形の理論的予測を行い得ることを示したもので、超伝導工学上価値ある業績である。よって本論文は博士（工学）の博士論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 中村 史朗(山口県)
学位記番号 シ情 博乙第2号(工学)
学位授与の日附 平成9年1月23日
学位論文題名 超電導発電機における回転子諸特性に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 山藤 馨
(副査) " " 吉田 啓二
" " " 竹尾 正勝
" " " 船木 和夫

論文内容の要旨

回転子の界磁コイルを超電導化した超電導発電機は、強大な起磁力と発電機の非磁性化により発電機効率の向上、小型・軽量化、電力系統安定度の向上といった優れた特徴をもつ。省エネルギー・省資源、系統運用上の効果、及び経済上の効果からもその開発研究の意義は大きく、これ迄内外で多くの研究開発が進められてきた。しかし、従来の研究は比較的小規模の試作開発による原理実証にとどまり、将来の事業用同期発電機（実用機）に適用可能な超電導回転子構造について十分な検討が行われていなかった。さらに、超電導発電機に固有の電磁特性についても検討が不十分で、特性評価法の提案とその妥当性の実証が望まれていた。

本論文は、これら従来の研究で不十分であった点をカバーするために、まず超電導界磁コイル支持方式を始めとした超電導回転子構造に関する新たな提案を行い、その実現可能性について論じた。

具体的には、

(1)超電導界磁コイルの固定・支持構造として、従来型発電機で高い実績があるスロット・ウェッジ支持方式の

適用を提案し、そのための巻線組立方法や回転子構造強度について論じた。

- (2)超電導界磁コイルにトルクを伝達するためのトルクチューブ構造として、可とう部やスライド部のない剛構造トルクチューブ方式を提案し、その実現可能性を超電導回転子の強度面や振動特性面から論じた。
- (3)超電導回転子の外周部に配置する電磁ダンパの強度評価を行い、発電機端子や系統での短絡事故時に作用する強大な電磁力に十分耐えられる構造について論じた。

更に本論文では、超電導発電機固有の電磁特性について検討を行い電磁特性の算定・評価を提案するとともに、それらの適用により超電導発電機の電磁特性を明らかにした。

具体的には、

- (1)境界積分方程式法にもとづく三次元静磁界解析法を、超電導回転子の界磁コイルが作る磁界分布解析に適用し、その適用性、特徴について論じた。
- (2)電流ベクトルポテンシャルと磁気スカラーポテンシャルとを未知数とする有限要素法解析を超電導発電機の非同期定常磁界解析に適用し、その適用性について論じた。
- (3)以上の二種類の解析により、従来検討が不十分であった超電導発電機の定常時及び過渡時の電磁特性を考察した。

さらに本論文では、これら考察の結果を具現化するものとして、大規模な実験機(30MVA超電導発電機)を試作し、その試作を行う中で、超電導発電機の優れた基本性能を確認すると同時に本論文で提案した超電導回転子構造や電磁特性評価法の妥当性に関し実証を行なった。具体的には、超電導界磁コイルの励磁特性試験、超電導回転子の冷却試験・回転試験、電磁特性試験についてそれらの試験結果を述べ、その上で理論的な検討結果との比較・考察を行なった。これらの結果から、本論文で述べた新構造方式や解析手法の妥当性を確認することができた。

主要な成果を以下に示す。

- (1)超電導コイルの長期信頼性を目指す支持構造として提案したスロット・ウェッジ支持方式の優れた特性を確認し、今後の実用機に十分に適用可能であることを実証した。
- (2)提案した可とう部のない剛構造トルクチューブ方式は、極低温下で良好な回転子振動特性を得るため一つのアプローチであることを明らかにした。
- (3)二重ダンパ超電導回転子の基本的な電磁特性を明らかにした。更に、適用した三次元電磁界解析による発電機電磁特性評価法が今後の実用超電導発電機の設計を行う上で有効な方法であることを実験結果により実証した。

最後に本論文では、以上の研究成果を踏まえて今後の超電導発電機の実用化の課題ならびに、実用超電導発電機の展望をまとめた。

論文調査の要旨

超電導発電機は、現在発電に使用されているタービン発電機に比して、効率向上、小型軽量化、大容量化及び系統安定化の面で優れているため、次世代発電機の有力候補として開発研究が活発に行われている。発電機の超電導化は、回転子の直流界磁コイルのみを超電導化する部分超電導化方式と固定子の交流電機コイルをも超電導化する全超電導化方式とに分けられるが、商用周波数の運転に耐えられて上記の諸メリットを十分実現し得る交流用超電導導体がまだ開発されていないため、現在迄のところ、超電導発電機の開発研究は部分超電導化方式について行われて来た。しかし、従来の研究は、上記の諸メリットが実現できるという原理面の実証を行うための比較的小規模の試作機の開発研究に留っていて、数十年の長期間に亘る高速安定運転を要請される大規模な実機に適用可能な超電導回転子構造については十分な検討が行われていなかった。さらに、超電導回転子の電磁的応力の特性の解析法についての検討も不十分であったため、材料特性への過大と思われる要請を適正化できていなかった。本論文は、従来の研究で不十分であったこれらの問題点を解決する目的で著者が行った一連の研究をまとめたものである。

著者はまず超電導界磁コイルの支持方式を含めて、実機に適用可能な超電導回転子の構造に関する研究を行っている。超電導界磁コイルの固定・支持方式に対しては従来の小型の超電導試作機に用いられている方式が大型の実機に対しては適用可能でないため、現在の常電導発電機で用いられているスロット・ウェッジ支持方式に着目し、この方式で超電導化を行っても十分な構造強度が保てることを指摘している。しかし、常電導コイルとコイル形状が異なるため従来の巻線方式ではこの支持方式が実現不可能であったことから、新たな巻線組立方式を提案してこの支持方式の実現を可能にしている。また、超電導界磁コイルにトルクを伝達するトルクチューブの構造として、可とう部やスライド部がない剛構造を提案し、チタン合金を用いれば実機規模の回転子においても強度面や振動特性面で適用可能であることを有限要素法解析によって示している。さらに、超電導回転子の外周部に配置するダンパの強度評価を行い、発電機端子や系統での短絡事故時に作用する強大な電磁力に十分耐え得るダンパ構造を提案している。

著者は次に、超電導発電機の電磁特性の解析法について検討を行っている。まず、従来は2次元解析しか行われていなかったが、境界積分方程式に基づく3次元静磁界解析法を界磁コイルの静磁界分布の解析に適用している。さらに、電流ベクトルポテンシャルと磁気スカラポテンシャル

を未知数とする有限要素法解析を超電導発電機の非同期定常磁界解析に適用している。これらの結果、従来は十分理解されていなかった超電導発電機の定常時及び過渡時の電磁特性を定量的に明らかにし、2次元解析では材料強度特性に対して2倍程度の過大な要請になっていた事等、種々の有用な知見を得ている。

著者はさらに、著者の提案を採用して著者らのグループが試作した、当時世界最大の試作機(30MVA超電導発電機)について試験を行い、超電導発電機の優れた基本性能がこの規模の発電機でも十分発揮されることを確認すると共に、本論文で提案した超電導回転子構造や電磁特性評価法の妥当性を、超電導界磁コイルの励磁特性試験、超電導回転子の冷却試験・回転試験および電磁特性試験を通じて定量的に確認している。

以上の研究結果は、実機規模の超電導発電機に適用可能な超電導回転子構造と超電導発電機電磁特性の評価をはじめ提案し、大規模試作機の試作及び試験を通じてその妥当性を実証したもので、著者が提案した超電導回転子構造がその後の大規模試作機にも適用されつつある事実も含めて、実用規模の超電導発電機の実現の可能性を拓いたものとして超電導工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の博士論文に値するものとする。

氏名(本籍) 江口 賢和(佐賀県)
学位記番号 シ情 博乙第3号(工学)
学位授与の日附 平成9年2月28日
学位論文題名 データベースシステムにおけるデッド
ロック検出に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 日高 達
(副査) " " 牧之内 顕文
" " " 松尾 文碩

論文内容の要旨

並行実行制御は、オペレーティングシステムのマルチタスクシステムにおけるプロセスやデータベースシステム(DBS)におけるトランザクションの同期の問題として研究され、一般に、データ(資源)をロック(施錠)する方式が用いられている。

ロック方式を用いると、複数のトランザクションが、互いに他のトランザクションにロックされたデータを用いないと処理が続行できない状態、いわゆるデッドロックが生じることがある。デッドロックはシステムの効率を著しく低下させるため、何らかの対応策が必要である。

本研究の目的はデッドロックを効率的に検出するアルゴリズムを開発することである。

デッドロック問題へのアプローチには、防止、回避、お

よび検出と回復の3通りの方法がある。DBSでは、あるトランザクションが要求するデータは事前にはわからない場合が多く、また、ロックの対象となるデータがオペレーティングシステムの資源に比べて比較にならないほど多いことから、事前に要求データの情報を必要とするような回避方法やデータのアクセス順序に制限を付けるような防止方法は適さない。従って、検出と回復の方法が多く用いられるため、オーバーヘッドが小さくて効率の良いデッドロック検出アルゴリズムの開発が望まれる。

DBSには、データベースが一つのコンピュータシステム上で管理される集中型システムとネットワーク上に分散された複数のコンピュータ（サイト）上で管理される分散型システムがある。集中型システムでは、デッドロック検出に必要な情報を集中管理することができるため、その情報を得るのに時間的遅れがないが、分散型システムでは、その情報は物理的に離れた場所で発生するため集中管理が難しく、各サイトに分散して管理する方法がとられることが多いため、その情報を得るためのメッセージ交換が必要となり、時間的な遅れが発生する。従って、このような環境を留意したアルゴリズムの開発が必要である。

デッドロック検出アルゴリズムの開発は多数の研究者によって行われているが、これらのアルゴリズムの中には正しく動かなかったり、オーバーヘッドが大きいなどの問題も多い。従って、正しくデッドロックを検出し、オーバーヘッドも小さくて効率の良いデッドロック検出アルゴリズムを開発することは意義がある。

本研究は、集中型および分散型DBSにおける排他型ロックと共有型ロックの両方を許す1資源モデルに対して、発生したデッドロックを正しく検出し、しかも、オーバーヘッドの小さいデッドロック検出アルゴリズムを提案すると共に、その効率性について考察する。本論文は、本文4章からなる。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、従来の研究を概説した。

第2章では、集中型DBSのデッドロック問題に対するシステムモデルとしてトランザクションデータグラフ(TDG)を定義し、そのTDGのもとで、トランザクション頂点とデータ頂点にレベルを付けることによる効率的なデッドロック検出アルゴリズムを提案する。また、このアルゴリズムが連続型と周期型の両方式に有効であることを示す。更に、本アルゴリズムの効率性について、 $N^{3/2}$ のオーダーになることを示す。また、一般的なTDGに対しては計算機シミュレーションにより、レベルを用いることにより追跡枝数を5~7割程度減らすことができることを示す。

第3章では、分散型DBSにおける分散デッドロック検出アルゴリズムを2種類提案し、その効率性について考察する。ここでは、分散型DBSを、トランザクションマネージャとデータマネージャの集合で、かつこれらのマネージャ間

でメッセージ交換の操作の集合として把えてモデル化し、そのシステム状態を記述するために、グローバルトランザクションデータグラフ(GTDG)を導入する。初めに、このシステムモデルのもとで各データマネージャ間を巡回するトークンを導入して、第2章で提案した集中型システムのアルゴリズムを分散型DBSに適用した効率的な分散デッドロック検出アルゴリズムを提案する。また、そのアルゴリズムの特徴や第2章で示す効率性が得られることについて考察する。次に、GTDGにおける各枝に時刻印を付けることにより、デッドロックの存在を検査するためにGTDGの枝に沿って転送されるメッセージ量を減らすことができる分散デッドロック検出アルゴリズムを提案する。また、N個のトランザクションからなる単一待合わせ列が生成されるまでにデッドロックの存在を検査するためにGTDGの枝に沿って転送される平均メッセージ量は時刻印を付けることにより $1/2N-1$ 以上減らすことができることを解析的に示す。

第4章では、第2章と第3章の結果を要約するとともに、今後の研究課題について述べる。

論文調査の要旨

本論文は、集中型および分散型データベースシステムにおける新しいデッドロック検出法の提案とその性能評価に関する研究をまとめたものである。データベースシステムでは複数のユーザプログラム（トランザクション）が同じデータ項目に同時にアクセスを要求する状況が頻繁に起こる。この際に生ずる誤動作を防ぐための一手段としてロック方式が採用されている。あるトランザクションがアクセスするデータ項目を一時的に施錠(lock)して、他のトランザクションからアクセスされないようにする方法である。ロック方式を用いると、複数のトランザクションが、互いに他のトランザクションが施錠しているデータ項目を用いないと処理が続行できない状態、いわゆるデッドロックが生じることがある。デッドロックはシステムの効率を著しく低下させるため、デッドロックを早く検出して回復処置を講ずる必要がある。データベースシステムでは、OSにおけるプロセスへの資源割付け問題とは異なり、ロックの対象となるデータ項目の数が格段に多いため、デッドロック検出には時間がかかる。1983年頃からデッドロック検出アルゴリズムが種々提案されているが、まだオーバーヘッドが大きすぎ、実用の分散型データベースシステムでは、待ち時間の超過によってデッドロックの発生を推定し、回復処置を行うシステムがほとんどであり、効率の良いデッドロック検出法の開発が期待されている。

本研究では、排他型ロックと共有型ロックの両方を含むデッドロック検出問題に対するシステムモデルとしてトランザクション・データ・グラフTDGを採用し、縮小された枝追跡によってTDGにおける閉路を発見することでデッド

ドロックを高速に検出する方法の提案とその評価を行っている。TDGは、各トランザクションと各データ項目を節とし、データ項目へのロックと待ちを枝とする有向グラフであり、各節にはレベルと呼ばれる自然数が、有向枝に沿って単調増加するように、付値されたものである。稼働中のトランザクション節Tからデータ節Dに新たな待ち枝が延びた時点でのみデッドロックが発生する可能性がある。本研究で提案する枝追跡法によるデッドロックの検出では、節Dから出発して節Tのレベル以下の節しか辿る必要がなく、枝追跡の縮小により高速化を図ることができる点に本研究の着想がある。本研究の主要な成果は次の3点に要約される。

1. 一般的なTDGに関する解析的な能率計算は難しいので、TDGにおいてN長さの単一待合わせ列が生成されるまでに、デッドロック検出のためにシステムが追跡した枝数を能率比較の目安として用いている。最悪の場合の枝追跡回数が、レベル情報を用いない従来方式の場合には $O(N^2)$ となるのに対して、レベル情報を用いる本方式の場合には $O(N^{3/2})$ となり、大幅に能率の改善が図られることを証明している。

2. 一般的なTDGに対しては、計算機シミュレーションにより能率比較を行い、レベル情報を用いたデッドロック検出は、用いない場合に較べて追跡枝数を大幅に減らすことができることを示している。

3. TDGによるデッドロック検出アルゴリズムを分散型データベースシステムに応用した分散型デッドロック検出アルゴリズムを提案している。これは、各トランザクションと各データ項目にTDGを分散管理するマネージャを配置して、マネージャ間の通信によってデッドロックを検出する方式である。検出アルゴリズムの実行に要するマネージャ間の通信メッセージの総量をレベル情報を用いる場合と用いない場合と比較し、レベル情報を用いることによって高速なデッドロック検出が可能であることを立証している。

以上要するに、本研究はデータベースシステムにおける新しいデッドロック検出方式を提案し、計算理論とシミュレーションの両面からその評価を行い、枝追跡法による従来のデッドロック検出法に較べて大幅に能率が改善されることを立証したもので、情報工学上価値ある業績と認め、よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

~~~~~

氏名(本籍) 佐藤輝被(大分県)  
 学位記番号 シ情博乙第4号(工学)  
 学位授与の日附 平成9年2月28日  
 学位論文題名 PWM制御を行う電圧共振形コンバータ  
 の回路方式に関する研究  
 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 二宮 保  
 (副査) " " 吉田 欣二郎  
 " " " 和田 清  
 " " " 黒木 幸令  
 " " " 西 哲生

## 論文内容の要旨

スイッチング電源に用いられる変成器、エネルギー蓄積用インダクタあるいは平滑キャパシタはその動作周波数を上昇させることにより小形化が可能であるため、スイッチング周波数の高周波化はスイッチング電源の小形化に非常に有効である。この際に問題となるのは、高周波化に伴い半導体スイッチのスイッチング損が無視できなくなり、電力効率が低下することである。そこで、最近、この問題を解決するためにスイッチを流れる電流波形あるいはスイッチにかかる電圧波形を正弦波状にし、これらが零の時にオン・オフすることでスイッチング損を低減する回路方式を用いた、いわゆる共振形コンバータが提案されている。

このような共振形コンバータは急峻な電圧変化、及び電流変化を伴わないために、スイッチングノイズが小さいという特長も併せ持っている。一方、出力電圧調整のために、通常、スイッチング周波数制御方式が用いられるが、この方式は出力フィルタを最低スイッチング周波数に対して設計する必要があり、小形化を妨げるという欠点がある。従って、共振形コンバータに対してスイッチング周波数を高周波に固定したまま出力電圧調整を行える回路方式を開発することが重要な課題となっている。

本論文は、共振形コンバータのスイッチング周波数を固定したままパルス幅制御(PWM)できる新しい回路方式を提案し、その基本特性を明らかにすることを目的としたもので、5章から構成されている。

第1章は序論であり、従来の方形波PWMコンバータの基本動作について概説し、装置の小形・軽量化のためのスイッチング周波数の高周波化とその問題点について述べた。次いで、この問題の解決策として従来提案されてきた共振形コンバータの基本動作について概説し、さらに、それらの問題点について述べた。

第2章では、本研究の解析に用いた拡張状態平均化法について概説した。また、これを電圧共振形コンバータに適用した解析例を示した。

第3章では、固定スイッチング周波数で出力電圧調整が可能となる回路方式の一つとして、従来の共振形コンバータの共振スイッチを並列に接続した並列駆動方式電圧共振形コンバータを提案し、その静特性および小信号動特性の検討を行った。まず、並列駆動の典型的な場合として2つの共振スイッチを用いた基本回路の動作原理の説明を行い、動作モードと状態遷移を明らかにし、これを基に定常特性の解析を行った。その結果、本コンバータの電圧変換

比は2つのスイッチ駆動の位相差によって制御可能であること、および電圧ストレスは従来の共振形コンバータと同じであることが定量的に明らかにされた。さらに、小信号動特性の解析を行った結果、本コンバータの制御電圧対出力電圧の伝達関数は従来の共振形コンバータと同様に2次系であり、共振スイッチの並列駆動によって、コンバータの安定性は阻害されないことが明らかにされた。

第4章では、従来の共振形コンバータのスイッチを双方向スイッチに置き換えるだけの簡単な回路構成でPWM制御が可能な回路を提案し、その定常特性および小信号動特性について検討を行った。その結果、無損失スイッチングの条件、電圧ストレス、電圧変換比、制御時間対出力電圧の伝達関数など諸特性が明らかにされ、さらに実験により、部品点数の少ない本回路方式の有用性が確認された。

第5章では、共振休止期間を持つ共振形コンバータを提案し、その基本特性について検討を行った。まず、基本動作の説明を行い、動作モードと状態遷移を明らかにした。次に拡張状態平均化法を用いて、静特性および動特性の解析を行い、実験によって解析の妥当性を確認した。その結果、静特性については、本コンバータの共振休止期間を制御することにより、出力電圧調整が可能となることを明らかにした。次いで、動特性については、制御電圧対出力電圧の伝達関数が従来の共振形コンバータと同様に2次系であり、共振休止期間を設けることが安定性能の低下を引き起こさないことを明らかにした。本コンバータは、従来の共振形コンバータにスイッチを1個追加するだけの簡単な回路構成でPWM制御が可能であるという点で、第4章で提案した回路と同様の長を有するが、出力電圧の制御範囲がより広いという点で優れている。

第6章では、3つの提案回路の諸特性を整理比較し、以上の研究を総括した結論を述べている。

## 論文調査の要旨

スイッチング電源の容積の大部分を占める変成器、インダクタおよびキャパシタはその動作周波数を上昇させることにより小形化が可能であるため、スイッチング周波数の高周波化はスイッチング電源の小形化に有効な手段となる。しかし、従来のパルス幅制御(PWM)を行うスイッチング電源では、高周波化に伴って発生する半導体スイッチのスイッチング損の増加による電力効率の低下およびスイッチングノイズの増大が大きな問題となる。最近、これらの問題を解決するために、スイッチの電流あるいは電圧の波形を正弦波状にし、これらが零の時にオン・オフすることでスイッチング損およびノイズの低減を図る回路方式が提案され、共振形コンバータと呼ばれている。しかし、この共振形コンバータは、出力電圧調整のためにスイッチング周波数制御を必要とし、従って、出力フィルタを最低スイッチング周波数の条件で設計することになり、小形化

が妨げられる。共振形コンバータにおいてスイッチング周波数を高周波に固定したまま出力電圧調整を行える回路方式を開発することが重要な課題となっている。

本論文は、このような背景のもとに、共振形コンバータのスイッチング周波数を固定したままPWM制御できる新しい回路方式を3種類提案し、従来方式と動作特性を比較検討して新方式の有効性を明らかにしたものである。

著者はまず、固定スイッチング周波数で出力電圧調整が可能となる回路方式の一つとして、従来の電圧共振形コンバータの共振スイッチを並列に接続した並列駆動方式電圧共振形コンバータを提案している。並列駆動の基本的な場合として2つの共振スイッチを用いた回路の動作原理を説明し、その静特性および小信号動特性を検討している。その結果、提案回路の電圧変換比は2つのスイッチ駆動の位相差によって制御可能であること、およびスイッチの電圧ストレスは従来の共振形コンバータと変わらないことなどを定量的に明らかにしている。また、小信号動特性の解析より、本回路方式の制御信号対出力電圧の伝達関数は従来の共振形コンバータと同様に2次系であり、共振スイッチの並列駆動によってコンバータの安定性が阻害されないことを確認している。

次いで著者は、従来の共振形コンバータのスイッチを双方向スイッチに置き換えるだけの簡単な回路構成でPWM制御可能な回路を提案し、その定常特性を検討している。その結果、無損失スイッチングの条件、電圧ストレス、電圧変換比、制御伝達関数などの諸特性を解析により明らかにし、また、部品点数の少ない本回路方式の有用性を実験により実証している。

最後に著者は、共振休止期間を持つ共振形コンバータを提案し、静特性および小信号動特性の解析を行い、実験によって確認している。その結果、静特性については、本コンバータの共振休止期間を制御することにより出力電圧調整が可能となることを述べ、小信号動特性については、従来の共振形コンバータと同様な2次系となり、共振休止期間を設けることが安定性能の低下を引き起こさないことを示している。また、本コンバータは、先に提案した回路と比較して出力電圧の制御範囲をより広くとれるという優位性を確認している。

以上要するに、本論文は、スイッチング電源の小形化および低ノイズ化に有効な方式である共振形コンバータに関し、スイッチング周波数を固定したまま出力電圧調整可能、かつ部品点数が少なく実用的な回路方式を3種類提案し、解析と実験の両面からそれらの有用性を示したものであり、電子回路工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 大林 正直(茨城県)

学位記番号 シ情 博乙第5号 (工学)  
学位授与の日附 平成9年2月28日  
学位論文題名 繰り返し型最適点探索方式による制御系  
設計法に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 平 澤 宏太郎

(副 査) " " 和 田 清

" " " 長谷川 勉

## 論文内容の要旨

近年、制御理論についての研究は、線形制御理論の成熟とともに徐々に非線形制御理論が中心となってきている。非線形システムの制御系設計法は1. 対象システムを数式で表し、数学分野の知見を利用した制御系設計法、2. 対象システム及び制御系をニューラルネットワーク表現やファジー表現する設計法、3. 両者の中間的方法、に分類可能である。どの方法を用いるかは対象システムの性質により異なる。例えば、対象システムが数式表現し易く、かつ、非線形性が弱い場合は制御系の安定性を厳密に計算できる利点がある1. の方法が用られる場合が多い。しかし、対象システムが複雑化し、かつ非線形性が強くなると1. では不可能で2. もしくは3. の方法を用いることになる。

本論文では、対象システムの数式表現が可能で非線形性が弱い1. の場合制御系設計法を、第2章、第3章にて取り扱い、数式表現が不可能、または、非線形性が強い2. または3. の場合の制御系設計法を、第4章、第5章にて取り扱った。また、本論文における制御系設計の目的は「制御システムが、速応性・ロバスト(安定、性能)性・高機能・高性能の内、いずれか、もしくは複数の性質を特徴的に備えていること」とした。これらの目的を達成するために具体的に提案した方式は、全章を通じて、最小化すればその目的が達成されるような評価指標を設定し、また、その最小化は、繰り返し計算を通じて達成される方式とした。

先ず、第2章では、制御系の時間応答(速応性)改善と安定性を考慮した極配置設計法について述べた章であり、線形システムを対象として、ある一定程度以上の速応性を達成すべく閉ループ極を指定領域に配置するとともに評価指標を最小化するフィードバックゲインを求める実現が容易な方法を提案した。提案法は、領域外の極は全て領域内へ一度に移動可能であることから、移動させる必要がある極が多くなるにつれて本提案法の有効性は増す。数値例によりその有効性を確認した。

第3章では、第2章で取り扱った制御対象システムが「モデル化誤差がない」とした設計法であるのに対し、本章では、モデル化誤差を含む線形システムを対象としてのロバスト極配置設計法の提案を行った。更に、本設計法を、数式表現可能な非線形性の弱い非線形システムの制御系設計に応用した。その方法は非線形システムを線形分割された

システムの集合とみなし、各線形システムは分割による境界領域モデル化誤差を持つとする。そして、各線形システムにロバスト極配置法を適用することにより全体として非線形制御器を構成した。本方法は、非線形制御を線形システム理論の枠内で捉えた簡単かつ有効な制御方式であり、非線形クレーンシステムを対象とした数値例により、よく知られている標準最適サーボ設計法と比較し、制御系の安定性・制御性能ともに、提案法が優れていることを検証した。

第3章が、非線形システムの制御器を線形制御器の集合で構成したのに対し、第4章および第5章では、対象システムが数式表現不可能もしくは非線形性が強く等の理由で線形システムに分割できない、または分割しにくい場合を取り扱うこととし、非線形制御器を学習ネットワークで直接構成した。第4章では、制御システムにロバスト(安定・性能)性を持たせる制御器の構成法について論じた。本提案の意味は、「良く知られているニューラルネットワーク等の学習ネットワークによる制御器を用いて構成した制御システムでは、学習時のシステム環境と制御時の環境が異なる場合、制御器は設計どおり動作しないか、または、システム全体が不安定になる場合が考えられる。本章では、このような場合でも、安定性を確保しかつ良好な制御性能を維持することを目的とした制御系を構成することにする。

4.1節では、本章での中心的役割を果たす、フォワードプロパゲーション一般化学習ネットワークにおいて、2次微分、3次微分、…、n次微分等の高次微分計算法を導出した。その後、導出した2次微分計算を利用したロバスト制御系設計法を提案した。上記のシステム環境の変化として、システム状態初期値変動、システムパラメータ変動、外部入力変動等が考えられる。4.2では、システム状態初期値変動の場合、4.3ではシステムパラメータ変動の場合、そして、4.4では外部入力変動の場合についての設計法を述べた。それぞれの場合について、数値例により、提案法が従来のニューラルネットワーク制御系と比較し、安定性・性能等において優れていることを確認した。

第5章では、制御の究極の手本と言われる能が持つ「機能局在」「学習機能」の両者を備えた新しいタイプの学習ネットワーク(Learning Petri Networ: L.P.N.)を制御系設計に適用する場合の問題点を明らかにし、その解決のための方策を提案した。数値例にて、ニューラルネットワークによる制御器では良好な制御が実現できない場合でも、L.P.N.による制御器では、「機能局在」「学習機能」が実現でき、高性能な制御が可能であることを明らかにした。

第6章は、第2章から第5章までを総括し、結論としている。

## 論文調査の要旨

システムの制御系を構成する場合、先ず、制御すべき実

システムのモデル化を行い、その後、モデル化したシステムに対して制御系の設計を行い、これを実システムに適用する手順が一般的である。この過程において、(1)実システムの正確なモデル化は実際上不可能でモデル化には必ずモデル化誤差が伴う、従って、この誤差を考慮した制御系の設計が必須となるが、システムが複雑になるにつれそのための設計は困難となる、(2)多くの実システムは非線形システムであり、これまでの線形制御理論は非線形性が強いシステムには適用が困難である、(3)制御系に要求される仕様が複雑且つ多様化してきており、これらに対処できる技術が不十分である等の問題点が明らかになりつつある。これらの問題点に対して、学習や人間の知識を利用したニューラルネットワーク (NN) やファジィ等の知的制御系設計法、および数式処理を主とする制御理論を利用した制御系設計法がある。いずれの設計法にしろ、大規模複雑な非線形制御については上記(1)(2)(3)の課題解決のための提案は少なく、検討が充分なされていない。

本論文は、主に非線形制御の観点から上記問題点解決のための方式を提案しており、以下の点で評価できる。

まず第一に、知的制御系設計法ではNNが良く活用されているが、NNでは、複雑多様化した仕様への対応が困難なため、NNにはない高次微分計算機能を持つフォワードプロパゲーション一般化学習ネットワーク (Forward Propagation Universal Learning Network: FPULN) を提案している点である。ネットワーク内の任意の変数に関する評価指標の高次微分を活用すると、制御系の解析が広範囲の動作点で可能になるため、非線形システムの大域的安定性の解析およびシステムの速応性と安定性を考慮した制御系の設計が可能になることを明らかにしている。

第二に、上記の高次微分の計算を利用して、モデル化誤差を統一的に考慮できる簡単な制御系設計法を具体的に提案している点である。モデル化誤差としては、経年変化、故障、動作条件の変化等によるシステムパラメータの変動や、制御系設計時点でのシステムの環境と制御実施時点での環境の違い等が考えられる。本論文では、評価指標として本来の制御目的を達成するための評価項目以外に、上記モデル化誤差を考慮した評価項目を付加した統合評価指標を考え、これを最小にする学習により、本来の制御目的を達成すると共にモデル化誤差によるシステムの変動を抑制する制御系を実現している。上記種々のモデル化誤差が発生した場合について、NNによる制御系設計法との比較を数値シミュレーションにより行い、本提案法の有効性を明らかにしている。

第三は、学習ペトリネットワーク (Learning Petri Network: LPN) を利用した高性能な非線形知的制御系設計法を開発した点である。LPNは制御の究極の手本と言われる脳が持つ機能局在、学習機能の両者を備えた新しいタイプの学習ネットワークであるが、従来LPNの適用はパターン

認識等の静的な問題に限られていた。本論文では、LPNを動的制御に適用する場合の問題点を明らかにし、その解決のための方策を提案し、高性能な制御系を実現する具体的な方式を示している。NNによる制御系とLPNによる制御系の比較を数値シミュレーションにより行い、LPNによる制御系が制御性能の点で優れていることを定量的に明らかにしている。

第四は、非線形性が比較的弱くかつ数式表現可能な非線形制御について、線形システム制御理論を利用した簡単かつ有効な制御系設計法を提案している点である。提案する方式は、非線形システムを線形分割されたシステムの集合とみなし、各線形システムの境界領域にモデル化誤差を持つ方式である。この各線形システムに著者が開発したモデル化誤差を考慮したロバスト極配置法を適用することで、評価指標の最小化と共に、システムの速応性を保証した非線形制御器を構成している。数値例により、よく知られている最適サーボ設計法と比較し、提案方式が制御系の安定性・制御性能の点で優れていることを明らかにしている。

以上要するに、本論文は、非線形システムを対象とした制御系の構成において、制御系に、速応性、安定性、ロバスト性の内いずれか、もしくは複数の性質を持たせることで実システム適用時の問題点を解決する設計方式を提案したものであり、制御工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。

氏名 (本籍) 松野 哲也 (熊本県)  
 学位記番号 シ情 博乙第6号 (工学)  
 学位授与の日附 平成9年2月28日  
 学位論文題名 Study of Information Processing of Phase Pattern in Nonlinear Coupled-Oscillator System  
 非線形結合振動子系における位相パターン情報処理に関する研究  
 論文調査委員  
 (主査) 九州大学 教授 山藤 馨  
 (副査) " " 西 哲生  
 " " " 香田 徹

## 論文内容の要旨

結合振動子系モデルは時空間的振動現象を記述する一つの単純な数理モデルである。本研究では、動物の神経回路網における振動的挙動を理解し、そこで行われている振動的情報処理様式を工学的に応用することを目指す基礎研究の一環として、結合振動子系の力学構造を数値的かつ解析的に考察した。まず、学習機能を有する位相パターン認識システムを構成することを試みた。適応パラメータとしては固有振動数、結合係数が考えられるが、ここでは両方の

場合について調べた。次に、位相パターンの連想記憶機能を有するシステムを構成し、その系における巨視的ダイナミクスについて考察を行った。

主要な結果を、考察や今後の課題を含めて以下に示す。

1. 固有振動数分布を適応的に変化させるシステム（結合は平均場型で結合強度は一定値）の振舞いを調べた。現在のところ、位相ダイナミクスを積極的に時間パターンの認識に用いるという研究は存在しないので、本研究によって高周波で振動する素子の結合系で時系列高速認識システムを構築することが出来る可能性が示されたことになる。位相関係が本質的なダイナミクスが観測される系として、PLL（位相同期ループ）回路や超伝導Josephsonデバイス系が揚げられる。これらの系を基本素子とする結合系を用いて、ここで調べられたモデルを物理的に実現できる可能性がある。
2. 上記の時間パターン認識システムにおいて、学習した時間パターンの入力に対しては規則的応答を、未学習の入力時間パターンに対してはカオスの応答をすることが見いだされた。この様な現象（未学習信号に対する複雑な応答）は次に述べるタイプ（結合係数可変型のBoltzmannマシン型）の結合振動子系（固有振動数分布がある場合）においても見いだされたものであり、後で述べるように、生物学的にも工学的にも重要なダイナミクスである。
3. 結合強度を適応的に変化させるシステムの振舞いを調べた。学習ルールとして変形Boltzmann学習則を用いることによって、ある特定の位相パターンに対してある特定のアナログ値（出力ユニットに属する振動子集団の位相の揃い具合：コヒーレンシー）を出力させるようにすることができた。未学習のパターンに対しては既学習の入出力関係を反映した適切な出力を行うようになること（内挿特性（interpolation characteristics）の自己組織化）も見いだされた。これは生物が未知の状況にどう対応して行動するかを記述する簡単なモデルとなりうる、と同時に柔軟性の高いパターン認識システムを構築できる可能性を示すものである。ここでの研究は、出力として振動子集団のコヒーレンシーを用いたことが特徴であり、このことが、内挿特性や、次に述べるような複雑な応答特性をもたらしたのと考えられる。
4. 上記のシステムにおいて、固有振動数分布を導入すると内挿特性が部分的に崩壊することが見いだされた。破壊された部分は、システムが未知の入力パターンに対してカオスの応答をする領域に対応する。この複雑

な振動的応答は、振動子で構成された系に特徴的なものであると考えられる。また、これはシステムが入力パターンが未学習であることを認識した、と解釈することが出来る。応答の複雑度を観測する別のシステムを用意しておき、複雑な応答を、学習プロセスの開始信号としておけば、自発的に学習を進め始めるシステムを構成できる。未学習入力に対するカオスの応答は動物実験において観測されており、このシステムは動物の神経回路網の挙動を単純に記述するモデルとなりうる。

5. 連想記憶システムを結合振動子系を用いて構成し、その定常ダイナミクスを数値的かつ解析的に調べた。結合非線形性が十分弱い極限における記憶容量、及び、固有振動数分布の想起状態への影響が初めて解析的に調べられ、数値的に確認された。非線形性が十分小さい領域では記憶容量はイジングスピンの神経回路網モデルと比較すると数倍小さなものとなり、また固有振動数分布の熱擾乱的な働きにより、記憶容量を低下させることが見いだされた。固有振動数分布存在下での、想起状態における、それぞれの振動子の振動数分布も解析的に記述できた。
6. 非線形結合強度を全体的に決定するパラメータを導入し、システムの振舞いが、このパラメータ、及び記憶率にどのように依存するかを解析的かつ数値的に調べた。位相パターンの想起ダイナミクスを巨視的に記述する方程式が統計力学的手法によって本研究で初めて解析的に導かれた。この解析においては、非線形性を微量とする近似は一切用いていないので、この巨視的記述は非線形性がかなり強い領域まで有効である。実際、非線形度の増加に伴う記憶容量の大幅な増加、及び過度の非線形性による記憶容量の減少が理論的に導かれ、数値シミュレーションにより、このことが確認された。非線形性がある程度大きな領域では、振動的想起やカオスの想起過程が数値的に見いだされたが、これらのダイナミクスの解析的記述は今後の課題である。
7. 記憶容量（パターンの埋め込み数の臨界値：storage capacity）の他に、情報容量（information content）も評価した。記憶容量も情報容量もイジングスピンの神経回路網と比較すると、やや小さい値となった。スパースコーディング等、パターン埋め込み方法を工夫することで情報量を増加させることが考えられる。イジングモデルのスパースコーディングは結合振動子系モデルにおいては、振動子の位相がほぼ揃っている状況に対応する。故に、この埋め込み法を採用した結

合振動子系モデルは実際の脳で頻繁に観測されるような、神経細胞集団のコヒーレントな振舞いを説明し得ると考えられるが、これに関する研究は今後の課題である。

8. クラスタリング等、強非線形多体系において普遍的に観測される現象が、ここで取り扱った連想記憶モデルにおいてもみられた。このモデルは、現在盛んに研究されている複雑系 (complex system) の1つの例でもある。複雑系の研究は多くの場合において数値的である。本研究で取り扱ったモデルは巨視的ダイナミクスを解析的に記述できる広い領域が存在するので、その領域を起点として複雑現象を定量的に評価、記述することが可能であることが期待される。

## 論文調査の要旨

動物の神経回路網においては振動的挙動が普遍的に観測されることから、そこでは何らかの振動的情報処理が行われているものと推定されている。

最近、振動系を対象に神経回路網を模擬する情報処理システムを構成してその工学的応用を目指す基礎研究が行われ始めている。本論文は、従来振動特性が詳細には研究されていなかった非線形結合振動子系を対象に上記の目的の下に行った一連の基礎研究の結果をまとめたものである。

著者まず、非線形結合振動子系を用いて学習機能を有する振動位相の時間パターン認識システムの構成を試みている。最初に、平均場型結合の強度が一定である系に対して固有振動数分布が適応的に変化し得る時間パターン認識システムを構成してその挙動を数値的に考察した結果、このシステムが時間的信号を学習・認識できることを明らかにしている。振動の位相ダイナミクスを時間パターンの認識に積極的に応用する目的の研究は従来存在しなかったことから、著者はこの結果を発展させて位相同期ループ (PLL) 回路やジョセフソン回路等の高周波振動をする結合素子系を用いて時系列高速認識システムを構築する可能性を示唆している。

著者は次に、平均場型の結合強度が適応的に変化し得るシステムを構成してその学習・認識機能について数値的に考察し、学習ルールとして変形ボルツマン学習則を用いることによって、以下のような比較的柔軟性に富む認識性能を持たせ得ることを示している。

- (i) ある特定の位相パターンに対してある特定のアナログ値を出力させる学習が可能である。
- (ii) 2個の既学習の位相パターンの中間的な未学習パターンに対しては、既学習パターンからの違いの程度に応じた内挿的アナログ値を出力するという意味の内挿特性の自己組織化を行い得る。
- (iii) 全く未学習の位相パターンに対しては生体系においてもみられるようなカオス的な応答特性を示す。

著者はまた、結合振動子系を用いて連想記憶性能を有するシステムを構成し、その定常ダイナミクスを解析的及び数値的に調べている。まず結合強度の非線形性が比較的弱い場合に対して学習させた位相パターンの想起出力変数の時間発展を記述する方程式を統計力学的手法に基づいて導き、その近似解を求めている。この結果を用いて、記憶容量と記憶形態を結合定数の非線形性の関数とする相関を解析的に求めて数値解析と比較し、その妥当性を確認している。さらに、数値解析によってこのシステムの想起特性を詳細に調べて他の神経回路網との得失を論じている。

以上の研究結果は、非線形結合振動子系を用いる位相パターン情報処理に関していくつかの新しいシステムを構成してその学習・認識機能に対し数値的・解析的に詳細な考察を行ったもので電子デバイス工学的に価値ある業績である。よって、本論文は博士 (工学) の博士論文に値するものと認める。

氏名 (本籍) 小田部 莊 司 (茨城県)  
 学位記番号 シ情 博乙第7号 (工学)  
 学位授与の日附 平成9年2月28日  
 学位論文題名 超伝導体の交流磁化特性に与える量子化磁束の可逆運動の影響に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 山 藤 馨  
 (副査) " " 吉 田 啓 二  
 " " " 船 木 和 夫

## 論文内容の要旨

超伝導体においてほぼ無損失で流す事のできる電流密度の最大値である臨界電流密度を測定する事は、工学的に重要である。臨界電流密度の測定のうち、交流磁界を用いるCampbell法、交流帯磁率法などは、非接触、非破壊で臨界電流密度を評価する事ができ、工学的に有用である。しかし、この種類の測定法では臨界電流密度と交流磁化特性の関係を知る必要があり、超伝導体内の電磁現象の正しい理解が不可欠である。これを取り扱うモデルに、量子化磁束に働くLorentz力とピンニング力が釣り合うものとし、量子化磁束の運動を不可逆と過程して電磁現象を記述する臨界状態モデルがあり、これまで広く使われてきた。しかし、ピンニング・ポテンシャル内の量子化磁束の運動はほとんど可逆であるため、不可逆な臨界状態モデルは量子化磁束の変位量がピンニング・ポテンシャルの幅より大きくなった場合にしか使えない。このため量子化磁束の可逆運動が顕著な際に臨界状態モデルを用いると臨界電流密度の過大評価といった誤った結果を導いてしまう。こうした量子化磁束の可逆運動は超伝導体のサイズが小さい時または交流磁界の振幅が小さい時に顕著となる。最近の超伝導工学の

進歩により、金属系の超伝導線材中の超伝導フィラメントの直径は $1\mu\text{m}$ またはそれ以下になってきている。また、酸化物超伝導体の線材中においては、均一なしゃへい電流が流れる有効サイズは小さい。しかしながら、交流特性に及ぼす量子化磁束の可逆運動の効果についての研究はまだ極めて不十分な状況にあった。

本研究においては、量子化磁束の可逆運動が交流磁化特性に与える影響についてのこれまでの研究の問題点をふまえて、次のことを目的とした。

1. 量子化磁束の可逆運動が顕著な際に交流磁化特性を利用した測定方法、つまりCampbell法、基本波交流帯磁率法、第三高調波交流帯磁率法がどのような影響を受けるかを、可逆運動の効果を考慮したCampbellモデルをもとにした数値計算により理論的に明らかにする。
2. この結果から、量子化磁束の可逆運動が顕著な場合に対しても、これらの測定から臨界電流密度などのピンニング・パラメータの評価を行える方法を提案する。
3. 具体的な金属系、酸化物高温超伝導体系の試料に対してこれらの測定を行い、理論と実験を比較検討し、提案した方法の有用性を確認する。

これらの目的の下に行なった本研究の結果をまとめた本論文は6章より構成され、以下のような内容になっている。

第2章では量子化磁束の可逆運動がCampbell法による臨界電流密度の評価にどのような影響を与えるかを理論的に調べた。これまでのCampbell法では臨界状態モデルを仮定して臨界電流密度を求めていたために、臨界電流密度の過大評価を招く結果となった。したがって、ここでは正確な臨界電流密度を評価する方法として直流磁化測定の結果を用いて補正する方法を提案した。また、具体的に熔融法Y-Ba-Cu-O超伝導体においてCampbell法と直流磁化測定を行なうことで実際に臨界電流密度の電流が流れている領域がある事を示した。またCampbell法と直流磁化測定の結果から非破壊でクラックの平均間隔を評価する方法を示した。

第3章では基本波交流帯磁率について量子化磁束の可逆運動が与える影響を具体的な試料を用いて調べ、試料の特性評価を試みた。試料としては超伝導体の有効サイズを変えた3つのY-Ba-Cu-O酸化物高温超伝導体試料を準備した。それぞれの試料について基本波交流帯磁立の虚部 $\chi''_1$ の温度依存性を測定した結果を、Campbellモデルにより量子化磁束の可逆運動を考慮した理論予測と比較することで、超伝導体の有効サイズやピンニング・パラメータについての検討を行った。その結果、それぞれのパラメータは妥当であり、3つの試料の $\chi''_1$ の温度依存性を統一的に説

明することができた。したがってCampbellモデルを用いた理論計算により基本波交流帯磁立に与える量子化磁束の可逆運動の影響を説明できることが分かった。

第4章では、第三高調波交流帯磁立を用いた臨界電流密度の評価法について、Campbellモデルを適用した理論結果を示した。そして量子化磁束の可逆運動が顕著な際でも、第三高調波交流帯磁立のピークから臨界電流密度を正しく評価する方法を提案した。これらの理論予測は超伝導平板と超伝導円柱にそれぞれ並行に磁界を印加した場合について行った。

第5章では様々な試料を用いて実験を行った結果に対して第4章で得られた理論予測との比較検討を行った。

まずNb-Tiのバルク試料において実験を行ったが、これは超伝導体の有効サイズが十分に大きいときに不可逆な臨界状態モデルで現象が記述でき、臨界温度付近の温度においてのみ量子化磁束の可逆運動がみられるという点で標準的な試料という意味を持つ。次に有効サイズが小さく量子化磁束の可逆運動が顕著な典型的な例として金属系のNb-Tiの多芯線の基本波、第三高調波交流帯磁立を測定し臨界電流密度を評価した。次に酸化物超伝導体として熔融法で作製されたY-Ba-Cu-O酸化物超伝導体において測定を行った。またアルカリ金属をドーブしたフラーレン系の超伝導体である $\text{Rb}_3\text{C}_{60}$ についても測定した。この試料は発見後まもないこともあって、十分に大きな有効サイズを持つバルク試料がまだ作製されていない。このような場合でも評価の可能性を確かめるために測定を行った。最後にY-Ba-Cu-Oの粉体の試料を準備しこれについて測定を行った。この試料においては $\text{Rb}_3\text{C}_{60}$ とは異なり、粒間の電気的な接合がないように絶縁物を混ぜて測定を行った。

その結果、全ての試料において交流帯磁率に関する実験結果は、異なる臨界電流密度が共存すると予想される場合を除き、第4章の理論によりかなりよく説明することができ、臨界電流密度の値は直流磁化測定や基本波交流帯磁率より評価した値とおおよそ一致する結果を得た。したがって量子化磁束の可逆反応を考慮した解析により、第三立高調波交流帯磁率から精度よく臨界電流密度を評価することができることを示した。

第6章においては超伝導体の交流磁化特性に与える量子化磁束の可逆運動の影響及び臨界電流密度測定について総括を行い、そして本研究によって得られた知見についてまとめている。また今後の課題について述べている。

## 論文調査の要旨

超伝導のパワー応用に際しては、超伝導材料の高電流密度化と低損失化が最重要課題の一つである。高電流密度化は実用上超伝導状態とみなせる低損失状態で流し得る電流密度の最大値である臨界電流密度(Jc)を向上させることであり、このためにはJcの評価が必要になるが、非接触、



非破壊で $J_c$ を評価することが要求される場合が多い。この場合には、磁化の測定データから $J_c$ を評価するのが一般的であるが、この種の評価法は試料内部の磁束分布を規定する法則が既知であるとする臨界状態モデルによって $J_c$ を評価していたが、線材・導体内の超伝導部分の直径や厚さが低損失化の要請から小さくなるに従い、量子化磁束のピンニング・ポテンシャル内の可逆運動の影響が顕著になって、これに伴う $J_c$ の過大評価が問題になって来ている。しかし、この問題に関する系統的な詳細な研究は極めて不十分な状況にあった。

本論文は、このような状況を改善する目的で著者が行った一連の研究をまとめたものである。

著者はまず最も一般的に用いられている、いわゆるCampbell法による $J_c$ の評価について研究を行っている。この方法は厚さ $2d$ の超伝導スラブに微小交流磁界を印加してその振幅を変化させて $J_c$ を評価するものである。著者は、直流磁化からの測定可能量である量子化磁束の可逆運動によって余分に磁束が侵入する距離( $\lambda'_0$ )をパラメータにとって試料内部の磁束分布をCampbellの微分方程式から数値解法で求め、 $(d/2\lambda'_0)$ が小さくなると臨界状態モデルを仮定した従来の評価式では数倍程度も $J_c$ の過大評価になることを指摘している。さらに、数値計算結果から従来の評価式の補正式を提案し、直流磁化測定とCampbell法測定を併用すると測定可能になる量のみを含むこの補正式を用いれば、四端子法等非接触・非破壊でない他の直接測定法から得られる結果と一致する $J_c$ の評価を行うことができることを示している。

著者は次に、交流帯磁率の測定結果から $J_c$ を評価する方法について研究を行っている。まず、厚さは $2d$ の超伝導スラブに対してCampbell延び文方程式を近似的に解いて基本波成分の虚部( $\chi''_1$ )に対して $(d/2\lambda'_0)$ の因子を考慮した補正式を求めている。この補正式の有効性を確かめるために逆に $J_c$ を温度 $T$ の関数として四端子法で測定して、 $\chi''_1$ の測定データが説明できることを示している。しかし、 $\chi''_1$ は試料に含まれている不均質部分の影響を受け易いことから、Campbellの方程式を数値計算で解いて第3高調波成分の実部( $\chi''_3$ )と虚部( $\chi''_3$ )のピーク値とピークをとる磁界を $(d/2\lambda'_0)$ と $J_c$ の関数として表す近似式を導いている。この式を用いれば、直流磁化測定によって得られる $\lambda'_0$ と $\chi''_3$ の測定によって $J_c$ の評価が行えることを提案している。さらに、この方法を円柱状試料に対しても拡張している。

酸化物高温超伝導体のように不均質部分やウィーク・リンク部分が多く含まれている場合には、四端子法による $J_c$ 測定によっては材料固有の $J_c$ の値が測定出来ない。著者は、このような場合には著者が提案した上記の評価式のいずれにおいても、 $d$ を均一な電流が流れ得る領域の平均幅と解釈すれば妥当な評価になることを、試料の微細構造の観察

を行って示している。

最後に著者は、典型的な実用材料であるNbTiバルク材やNbTi多芯線について種々の磁化測定を行い、著者が提案したいくつかの補正式が妥当な $J_c$ の評価をもたらすことを示している。亦、最近話題になった $Rb_3C_{60}$ 超伝導体やQMG法によるYBCO超伝導体及び意図的に絶縁体粒を混入したYBCO超伝導体についても著者の提案した方法で $J_c$ の評価を行い2種類以上の $J_c$ が異なる輸送電流が流れる場合を除き、ほぼ妥当な結果が得られることを示している。

以上の研究結果は、量子化磁束の可逆運動の影響が顕著に現れる最近の超伝導線材に体して非接触・非破壊で臨界電流密度を評価する有効な方法を提案したもので、超伝導工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の博士論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 木室 義彦 (佐賀県)

学位記番号 シ情 博乙第8号(工学)

学位授与の日附 平成9年3月27日

学位論文題名 全方位球面画像処理に関する研究  
論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 長谷川 勉

(副査) " " 谷口 倫一郎

" " " 平澤 宏太郎

## 論文内容の要旨

知能ロボットでは、自律的に環境を計測・認識し、作業目標に応じて作業対象物や環境に関する情報を抽出できる能力が重要となる。近年、このロボットを取り巻く環境の計測手法として、カメラを水平回転させたり、魚眼レンズや円錐鏡を用いることにより、ロボットの周囲 $2\pi$  [rad]を観察することができる全方位ビジョンが提案されている。通常のカメラによる撮像素は中心投影を基本とするものであり、このようなカメラ移動や画角の拡大による広範な撮像領域を画像処理するためには、その対称性から球面画像(全方位 $4\pi$  [sr])が最も適している。しかし、従来、球面画像を扱うことができる画像データ構造としては処理手続きが複雑な三角形画素によるものしかなく、実画像を用いた球面画像処理を実行することができなかった。本研究の目的は、以上の問題に対し、実用的な球面画像データ構造を開発し、実画像を用いた全方位球面画像処理を実行することにある。

本論文は球面画像データ構造ならびに球面画像処理アルゴリズムに関する研究をまとめたものであり、6つの章から構成されている。このうち、第2章では、球面の離散表現手段と画像の階層化とを考慮した球面画像データ構造に関する研究結果について述べ、これ以降の第3章、第4章および第5章で、この画像データ構造を用いた球面画像処

理アルゴリズムに関する研究成果を述べている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的ならびに本論文の各章の概要を述べた。

第2章では、球面画像データ構造の設計について論じている。全方位球面画像処理を実行するためには、画像の球面化と共に、膨大な画像データを扱うための画像階層化が重要となる。この章では、まず、デジタル画像処理の基本である画素形状に着目し、六角形画素を用いた平面画像のための画像データ構造を設計した。この時、画素の重なりという概念を導入し、従来、困難視されてきた等方的な六角形画素の階層化(画像ピラミッド)を実現した。次に、正20面体を初期分割とする測地ドームを用い、この双対多面体が六角形面片を再帰的に生成できること、および2次元配列表現が可能であることを示し、先の平面六角形画素画像を球面に拡張、球面六角形画素画像データ構造を構成した。

第3章では、ロボットの環境情報取得のための球面画像処理の一手法として、人工環境中での環境構造の推定を行なった。人工環境中では環境の座標系に一致する十分長い空間直線がしばしば現れるというヒューリスティクスに着目し、球面画像上において3つの画像処理を実行した。すなわち、(1)球面画像における前処理の一手法であるエッジ抽出(微分計算)、(2)このエッジ要素を基にした、平面画像中の直線検出に相当する球面画像上での大円検出、および(3)この大円群の組み合わせによるシーン内の消失点の候補抽出を行ない、この消失点候補から環境の構造を定める座標系に一致すると思われる消失点の組を決定することができた。

第4章では、全方位シーン内に現れる物体の輪郭線を記述するためのチェーン符号化法について述べている。球面の閉曲線は平面の場合とは異なり、外角の和が $2\pi$ よりも減少する。この性質は差分チェーン符号の総和の変化として現れるため、球面図形のチェーン符号化法はこの変化を表現できるものでなければならない。提案している球面画像データ構造では、例外的な12個の五角形画素によりこれが実現できることを証明し、実際に球面画像上でチェーン符号化を実行した。符号化対象としては、ロボットの作業環境に現れる人工的な物体よりもさらに複雑な輪郭形状を持つものとして地球の衛星画像を用い、この球面画像上での六角形画素チェーン符号化法が有効であることを確認することができた。

環境の動的な変化、操作対象物の移動、移動障害物の発見等には物体移動に伴う動画像中の輝度変化を発見するオプティカルフローが有効である。第5章では、全方位球面画像上でのこのオプティカルフローの計算手法について述べている。まず、球面画像内の全ての画素でオプティカルフローを計算するために勾配法と呼ばれる局所計算手法を採用し、これを球面画像に拡張した。この球面画像上では

カメラの回転および並進移動により特徴的なオプティカルフロー分布が現れる。この性質を利用することにより、従来、シーン内の物体に関する知識なしでは困難であったカメラ運動5自由度の推定が可能となることを示し、その計算アルゴリズムを設計し、実際に、実画像を用いこれが有効に機能することを示した。

第6章では、結論として本論文で得られた結果を総括している。

## 論文調査の要旨

コンピュータビジョンによる視覚機能は、自律的に作業環境を計測・認識し作業目標を達成する知能ロボットに欠かすことのできな機能である。ロボットが視覚システムにより周囲の環境を全方位にわたって観測できれば、視野の限定された従来の視覚システムに比べ、移動中の自己位置の定位が容易かつ頑健なものになるうえ、動的な環境変化も見落しなく認識できるようになる。この目的のため、カメラを水平回転させたり、魚眼レンズや円錐鏡を用いて周囲を観測する視覚システムが最近になって提案されてきているが、これらは厳密な意味での全方位とはいえない。全方位の画像処理には球面画像が適しているが、球面画像を処理することのできる画像データ構造としては、これまで三角形画素によるものしかなく、処理手続きが複雑で実画像の球面画像処理には用いられていなかった。

本研究は、実用的な球面画像データ構造を考案し、実画像の全方位画像処理に必要な手法を開発して、知能ロボットのための新たな全方位視覚を実現したもので以下の点で評価できる。

第一は、六角形画素による球面画像の分割とその計算機内部データ構造を提案し、実画像を用いた全方位画像処理を実現した点である。この画素分割では、分解能の異なる階層化において、画素の配置を工夫することにより各階層での対称軸が同一になる自然な階層化が実現されている。また、2次元配列に格納された画像データは、配列添字による高速なアクセスが可能である。これらにより、球面画像処理でも従来の平面四角形画素による画像処理アルゴリズムと同様な効率よい処理を可能にしている。

第二は、建造物内部など人工環境で特徴的に観測される水平あるいは垂直線が球面画像上で大円として検出されることに着目し、球面画像上でのエッジ処理、大円検出、および大円群の組み合わせに基づく消失点の抽出を行い、環境構造を推定する手法を開発した点である。これにより全方位画像処理が移動ロボットの自己位置定位に有効であることを示している。

第三は、全方位球面画像で観測される物体の輪郭線を記述するチェーン符号化法を提案し、球面の閉曲線がもつ性質を保存していることを明らかにした点である。実際に地球の衛星画像を用いて、複雑な形状を有する大陸の輪郭を

記述することにより、提案した六角形画素チェーン符号化法が、全球面にわたる膨大な画像情報からの情報圧縮に有効であることを示し、さらに全方位球面画像処理による物体記述の可能性を明らかにしている。

第四は、全方位シーン中での物体移動ないしカメラ移動に伴う状況変化を検出するため、全方位球面画像上でのオプティカルフローの計算手法を開発したことである。球面画像上ではカメラの回転および並進運動により特徴的なオプティカルフロー分布が現れることに着目し、これによりシーン内の物体に関する知識を用いることなく5自由度のカメラ運動の推定が可能であることを明かにした。さらにその計算アルゴリズムを考案し、実験により、その有効性を示している。

以上要するに本論文は、ロボットの周囲環境を同時に観測できる視覚のための全方位球面画像処理に関し、画像データ構造と画像処理アルゴリズムを考案し、環境構造の推定、物体形状記述、ならびに自己運動の推定を行う手法を開発したもので、ロボット工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 岡田 伸 廣(鳥根県)  
 学位記番号 シ情 博乙第9号(工学)  
 学位授与の日附 平成9年5月8日  
 学位論文題名 パーツピッキングのためのアクティブビジョンシステムと作業プランニング

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 長谷川 勉  
 (副査) " " 谷口 倫一郎  
 " " " 平澤 宏太郎

## 論文内容の要旨

省力化、生産性の向上、および製品の均質化等を目的として、生産現場への産業用ロボットの導入が推進されている。それらのロボットの殆んどは、単一動作の繰り返しのみを行なうもの(play back type)である。一方で、ロボットに求められている作業の中には、単一の動作の繰り返しによってはなされないものも多い。例えば、多数の部品を乱雑に詰め込んだる容器から部品を一つずつ取り出す作業である。このような作業は、パーツピッキング(parts picking)と呼ばれる。パーツピッキング作業において部品の位置や姿勢は個々の部品毎に異なるため、部品を取り出すロボットマニピュレータは、それに対応して毎回異なる動作をしなければならない。従って、パーツピッキング作業に応用するロボットには、部品の位置姿勢を十分な精度で計測することの出来るセンサが必要となる。また生産現場においては、作業時間が生産コストに直接反映するため、

ロボットやセンサを含めた作業システムには作業を効率よく実行できることが望まれる。さらに、製品の生産性を向上させるためには、部品や作業システム自身の破損を生じないように作業を行なうことができることも要求される。

そこで本研究では、効率がよく且つ生産性の高いパーツピッキング作業を実現することを目標とする。そのためのセンサとして、効率よく作業対象の位置姿勢を測定するアクティブビジョンシステムを提案し、その構築を行なった。また作業の効率と生産性を向上させるための作業手順を決定するプランニング手法を開発した。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、5章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的と本論文の概要を述べた。

作業対象の様子を測定する装置としては、比較的高速且つ高精度に情報を得られるビジョンシステムを用いることとした。第2章では、そのような装置として、対象までの距離を測定することのできるレンジファインダ装置の製作を行なった。レンジファインダは2台のCCDカメラとレーザスリット光投射器を用いて作業対象の3次元的な位置と姿勢を計測する。このようなレンジファインダをロボット作業システムのセンサとして用いる際には、装置のキャリブレーションも非常に重要である。従来のキャリブレーション手法では、精度よくキャリブレーションを行なうための作業が煩雑であった。第2章では、レンジファインダの構成のモデル化を工夫することによってキャリブレーションを行なう必要のあるパラメータの数を減らすことと、対象として平面を用いる新しいキャリブレーション手法を考案することをしない、それらによって簡略な作業で高い精度のキャリブレーション結果を得た。

第3章では、このレンジファインダと作業対象の濃淡画像を得る単眼システムとの2つのビジョンシステムを組み合わせることで、パーツピッキング作業のためのセンサシステムを構築した。その際、各センサが自身や相手によって得られた情報を用いて注視する領域を限定するための手法を開発し、その手法を実際に応用することで、センサシステムをアクティブビジョンシステムとした。本アクティブビジョンシステムを用いることによって作業対象の情報を得る際の処理を高速化することができ、よってパーツピッキング作業を効率化することができた。

また、工場における作業では、作業の効率とともに生産性も重要である。第4章では、作業の効率と生産性を向上させる手段として、パーツピッキング作業中による部品群の山の崩落および作業中の部品群とマニピュレータとの衝突を防ぐことを行なった。そのために、作業によって山が崩れるかどうかの危険性、およびマニピュレータがパーツピッキング作業を行なう際に部品との衝突無しに作業できるかという作業の行ない易さを評価する手法を開発し、実験を行なった。

第5章は結論であり、本研究によって得られた成果を総括するとともに、今後の研究課題について述べた。

## 論文調査の要旨

今日広く普及している産業用ロボットは、動作の直接教示とその再生を基本とする操作制御方式をとっており、整備環境での繰り返し動作による少品種大量生産に成功している。一方、生産現場で頻繁に必要となる手作業として、乱雑に重なり合った多数の部品の山から、部品を一つずつ取り出し、所定の姿勢に制御して箱詰めしたり機器へ供給したりする作業がある。これはパーツピッキングあるいはピンピッキングと呼ばれ、人間にとっては単調な繰り返し作業であるが、作業対象部品の位置姿勢が未知でありしかも部品毎に異なるため、あらかじめ教示した同一動作の繰り返しでは実行できず、ロボットによる自動化が困難な作業である。専用の整列供給装置を用いる方法は異種部品に対応できないため作業システムとしての柔軟性が失われてしまう。視覚センサでパーツの位置と姿勢を調べる方法は汎用的ではあるが、三次元物体の見え方の変化や重なりによる隠ぺいに対する処理に時間がかかりすぎるといった問題がある。

本研究は、迅速確実な三次元視覚情報処理を可能にする視覚センシングの手法を考案し、部品の山からの部品取り出し手順を計画するアルゴリズムを開発して、パーツピッキング作業のロボット化手法を提案したもので、以下の点で評価できる。

第一は、ロボットの作業環境の距離画像を高精度かつ効率的に獲得するレンジファインダを開発した点である。平行投影にもとづくカメラモデルの採用により距離計算の高速化を実現したうえで、作業環境中央部付近の精度が最良になるようなキャリブレーション手法を開発して高精度の距離情報を得ている。さらに、距離画像の水平方向の分解能を制御して、視野全体からデータ密度の粗な距離画像を得、あるいは視野の一部のみの詳細な距離情報を得るなど必要に応じた適応的な動作を実現し、三次元距離データ入力と入力後の処理の効率化を実現している。

第二は、距離画像を得るレンジファインダと濃淡画像を得る単眼カメラシステムとを組み合わせたアクティブビジョンシステムを開発し、作業対象部品の位置姿勢情報を高速かつ高精度に得ることに成功した点である。入力と処理に時間がかかるが3次元情報が直接得られるレンジファインダと、入力と処理は高速であるが3次元情報の得られない単眼濃淡画像カメラとを相互補完して使い、まず注視点を決定しその注視点周辺のみから分解能の高い3次元距離データを入力処理するアルゴリズムの考案により、高速で信頼性の高い視覚システムを実現している。

第三は、乱雑に積まれた部品の山からの部品取り出し順序のプランニング手法を開発したことである。個々の部品の

位置姿勢から重力に対する相互支持関係を推論する手法ならびに部品とマニピュレータとの衝突回避の観点から部品のとり易さを評価する手法を考案し、これらに基づいて部品の取り出し順序を決定する。これにより、部品の山の崩落を回避し時間のかかる全視野の再計測をできる限り少なくして、パーツピッキング作業が効率よく実施できることを示している。

以上要するに本論文は、ロボットによる自動化が困難であったパーツピッキング問題に関し、分解能と計測範囲を適応的に変更可能なステレオレンジファインダを開発し、これと単眼による濃淡画像処理と組み合わせたアクティブセンシングの手法ならびに部品の山の崩落を回避するための部品取り出し順序の計画手法を考案して、作業が効率よく実施できることを示したもので、ロボット工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 藤本和久(山口県)  
 学位記番号 シ情博乙第10号(工学)  
 学位授与の日附 平成9年5月27日  
 学位論文題名 微小磁区をもつ磁性ガーネット膜におけるブロッホラインの挙動解析とメモリ素子構成に関する研究

### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 谷口研二  
 (副査) " " 鶴島稔夫  
 " " 岡田龍雄  
 " " 助教授 松山公秀

## 論文内容の要旨

磁性ガーネット膜中に存在する磁区周囲の磁壁中の微細な磁化構造を情報の担体とするブロッホラインメモリは高記憶密度化に適しており、理論的には1Gb/cm<sup>2</sup>以上の記憶密度を達成できる可能性がある。また、現在実用化されている磁気バブルメモリと同様に、小型かつ不揮発という特徴を生かして、信頼性、耐衝撃性及び耐環境性に優れたメモリになり得る。この特徴を生かすことにより、携帯型情報機器への適用が期待できる。

本研究は、磁区幅1μmの磁性ガーネット膜において、ブロッホラインメモリ(BL)対の書き込み、BLからバブル磁区への変換、及び記憶部におけるBL対の転送を実証し、これにより256Mb/cm<sup>2</sup>の高記憶密度素子の可能性を示すことを目的として行ったものである。本研究では、磁区幅1μmの磁性ガーネット膜におけるBL対の書き込み、記憶、読み出しの機能部動作を達成するために、まず最初に、磁区幅5μmの磁性ガーネット膜における各機能部動作のマージンが狭いという問題の改善を行い、その結果をもと

に、磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜での機能部動作の検証を行った。

本論文は、ブロッホラインメモリの高記憶密度化を目的として磁区幅  $1\mu\text{m}$  レベルの磁性ガーネット膜を用いたメモリの可能性を追求し、BLの挙動解析とメモリ素子構成に関する研究をまとめたものであり、6章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景、目的、概要と、ブロッホラインメモリの概要及びその検討に用いるシミュレーションの概要について述べた。

第2章では、まず、BL対の転送、及びBL対からバブル磁区への変換のための磁区切断動作を解析するために開発したシミュレータについて述べた。次にブロッホラインメモリの基本となる磁性ガーネット膜の基本特性及び作製方法について述べた。そして、各機能部動作の評価に用いた試験素子の構成を述べ、最後に本研究を進める上で必要となるBLの観察方法について述べた。

第3章では、書き込み及び読み出し動作への一軸磁気異方性定数の影響について述べた。ここでは、磁性ガーネット膜を用いて、材料特性と動作特性の関係について考察した。その結果、一軸磁気異方性定数が動作特性に影響し、それを大きくすることで特性改善が可能であることを明らかにした。

第4章では、書き込み及び読み出し動作を行う場所、またバブル磁区の転送路であるメジャーラインとBL対を記憶するマイナーループの連結部であるゲート部における動作について、以下の3つの検討を行った。第一に、磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜における書き込み動作の検討を行った。まず、磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜においてBL対の発生が可能であることを明らかにし、書き込みパルス電流の立ち上がり時間を短くすることで、電流振幅を小さく抑えられることを示した。次に、書き込み機能部の最適化を図り、書き込み用導体の幅を狭くすることによりパルス電流振幅を小さくできることを示した。また、動作マージンの素子温度依存性を調べ、磁性ガーネット膜の飽和磁束密度の素子温度依存性にほぼ等しいことを明らかにした。最後に、実際のメモリ素子の機能を備えた試験素子上で、動作特性の最適化を図った。

第二に、磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜におけるBL対からバブル磁区への変換動作の検討を行った。磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜において、材料の飽和磁化と交換ステイフネス定数の関係に起因して、動作マージンが磁区幅  $5\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜の場合に比べて半分以下に減少するという問題が指摘されていた。その改善方法について計算機シミュレーションを用いて検討を行った。その結果、動作特性に反磁界が影響しておりその影響を大きくすることで特性改善が可能であることを明らかにし、原理実

験により確認した。最後に、実際のメモリ素子の機能を備えた試験素子上での検討において、磁区切断動作中の水平BLの発生も動作マージンの劣化に影響を与えていることを明らかにし、動作特性改善を図るために新しい読み出し電流パルスの形状を提案した。

第三に、ゲート部において、メジャーラインに施されるハードバブル抑制層がゲート動作時のストライプ磁区端部のBL対に与える影響について検討を行った。その結果、ハードバブル抑制層にストライプ磁区を侵入させるとBL対が消滅する可能性があることを明らかにした。そして、バブル磁区転送路の入口に導体を設けることにより、磁区の侵入を防ぐことを提案した。

第5章では、磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜におけるBL対の転送について検討を行った。まずBL対転送の問題点の抽出及び改善を行うため、BLの観察が容易な磁区幅  $5\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜を用いて検討を行い、その結果をもとに、実際のメモリ素子の機能を備えた試験素子上で、磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜におけるBL対の転送の検証を行った。

磁区幅  $5\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜では、永久磁石膜パターンによるビット位置規定方式を用いた記憶において、転送用駆動磁界の波形の最適化を図った。次に、BL対の転送実験の中から、BL対の転送方向により特性に差が生じる問題を指摘した。その問題点について、計算機シミュレーションの結果に基づいて考察し、永久磁石膜パターンからの漏洩磁界の垂直成分が原因となっていることを明らかにした。同時に、面内バイアス磁界の大きさがある値以下にすることによってBL対の転送方向による特性の差を小さくできることを明らかにし、実験により確認した。さらに特性の改善を図るために、転送方向による特性の差が小さいと考えられる膜厚変調方式によるビット位置規定を用いた記憶部の検討を行い、転送特性が転送方向に依存しないことを明らかにした。

最後に、第4章で動作確認した書き込み、読み出し動作機能部を利用し、磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜を用いた時の、膜厚変調方式によるビット位置規定を適用した記憶部におけるBL対の転送動作確認を行った。

第6章では、本研究で得られた結論について述べた。

## 論文調査の要旨

磁性ガーネット膜中に存在する磁区周辺の磁壁中に形成される微細な磁化構造を情報の担体とするブロッホラインメモリは、新しい概念の固体磁性メモリであり、超高密度記憶の可能性をもち、また、不揮発性という特徴を生かして、信頼性、耐衝撃性及び耐環境性に優れたメモリになり得ると期待される。しかしながら新しい概念、構造のメモリであるが故に、基本部であるブロッホライン (BL) そのものの挙動の詳細や理解やメモリ素子構成法の検討を全く

の基礎から行わねばならない。特に微細加工技術と並んで素子高密度化の鍵を握る磁性材料特性の観点からこれらの問題を検討し、実用化への見通しをつけることが重要である。

本研究は磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜において、BL対の書き込み、BL対からバブル磁区への変換、及び記憶部におけるBL対の転送を実験とシミュレーションによって確認することによって  $256\text{Mb}/\text{cm}^2$  以上の高記憶密度素子の可能性を追求したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、BLの挙動を解析するために、BL対当たりの磁壁構造が受ける力を積分した集中力として扱うことによって微細構造に適用でき、かつ計算時間の短縮を可能とした転送シミュレータ、およびブロッホラインの読み出し動作のために必要な磁区切断部解析のため高速フーリエ変換法を採用したシミュレータを開発している。また、ブロッホラインメモリの基本となる磁性ガーネット膜の特性、作製および観察の方法について考察を加えるとともに、書き込み、読み出し特性と磁性ガーネットの磁気異方性との関係とその改善方法を明らかにしている。

第二にメモリセル部であるマイナーループ、入出力部であるゲート動作部の動作について詳細に、かつ総括的に論じており、以下のような結果を得ている。

- (1)磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜においてもBL対の発生が可能であること、書き込みパルス電流の振幅を小さくでき、これによって低消費電力化が図れることを示している。また、動作マージンの温度依存性が、磁性ガーネット膜の飽和磁束密度の温度依存性にほぼ等しいことを明らかにしている。
- (2)磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜において、材料の飽和磁化と交換スティフネス定数が関係した動作マージンの劣化問題に対する改善方法の検討をシミュレーションによって行い、動作特性に反磁界が影響しており、その影響を小

さくすることによって特性改善が可能であることを明らかにし、原理実験により確認している。また、実用時と同じくメモリ素子の機能を備えた試験素子において、磁区切断動作中の水平ブロッホラインの発生も動作マージンの劣化に影響を与えていることを明らかにし、動作特性改善を図るため、新しい読み出し電流パルスの波形形状の採用を提案している。

(3)ゲート部においてメジャーラインに施されるハードバブル抑制層がゲート動作時のストライプ磁区部のBL対に与える影響を明らかにし、その対策としてバブル磁区転送路の入口に導体を設けることによって磁区の侵入を防ぐことを提案している。

第三に磁区幅  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜におけるBL対の転送について論じ、 $5\mu\text{m}$  および  $1\mu\text{m}$  の磁性ガーネット膜を用いた実験とシミュレーションによってこの確認を行うとともにその最適化を図っている。すなわち、まず永久磁石パターンによるビット位置規定方式を用いた場合について転送用駆動磁界波形の最適化を図るとともに、BL対の転送方向により特性に差が生じることを明らかにしている。この問題をシミュレーションに基づいて考察し、永久磁石パターンからの漏洩磁界の垂直成分が原因であることを明らかにしている。その結果として膜厚変調方式によるビット位置規定の採用を提案し、これを用いたときには、転送特性の方向依存性がみられないことを確認している。

以上要するに、本研究は磁区幅  $1\mu\text{m}$  級の磁性ガーネット膜におけるブロッホラインの書き込み、バブルへの磁区変換、および記憶部における転送動作を実証し、 $256\text{Mb}/\text{cm}^2$  以上の高密度ブロッホラインメモリの可能性を示すとともに、これら各部の動作マージン向上法を提案し、その有効性を明らかにしたもので、電子デバイス工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

