

氏 名	舟 健 二
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 及 通 信 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	モ ン テ カ ル ロ 法 に よ る 軟 磁 性 薄 膜 の マ イ ク ロ 磁 化 機 構 の 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 中 村 慶 久
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 中 村 慶 久 東 北 大 学 教 授 脇 山 徳 雄 東 北 大 学 教 授 荒 井 賢 一 東 北 大 学 教 授 高 橋 研 東 北 大 学 助 教 授 村 岡 裕 明

論 文 内 容 要 旨

磁気記録の高密度化により記録パターン及び磁気ヘッドの微細化が急速に進行し、それに伴いマイクロマグネティックスの考え方が必要となってきた。そこで、筆者はモンテカルロ法を用いた軟磁性薄膜中の微細磁化機構の計算機シミュレーション手法の開発及びそれを用いた解析を試みた。

従来の手法はエネルギー極小状態からの脱出が難しく、そのため初期状態の選択を誤ると、正しい結果が得られない。隣接セルの磁化ベクトル間の角度差の二乗に比例する交換相互作用エネルギーを仮定しているが、これは磁気ヘッドサイズの系に対するシミュレーションを行う場合、非常に大きな誤差を含む。従来の手法では以上の様な問題点が存在した。

一方、モンテカルロ法では温度による揺らぎ効果を導入することができる。このことは、この現象を積極的に利用することで、上述の極小状態からの脱出が可能であることを示す。本シミュレーションにおいて、系のエネルギーは、それぞれのセル内の異方性エネルギー、セル境界に発生する全てのマグネティックチャージ間の静磁エネルギー、外部印加磁界によるゼーマンエネルギー、最近接セル間の磁壁エネルギーの四つを考えた。ここで用いている磁壁とは隣接セルの磁化ベクトル間に角度差 ϕ がある場合、このセル間に存在していると、 ϕ 度磁壁と考えた。今回のシミュレーションに用いたパラメータは、交換スティッフネス 1×10^{-4} [J/m]、飽和磁化1 [T]とした。比較のため引用した物質 (CoZrNb, Ni₈₀-Fe₂₀) のこれらの定数は、この値に近いものであると考えられる。

また、従来の方法では、静磁エネルギーの過大評価が行われている。マグネティックチャージの計算方法として、磁化ベクトルによりセル表面に発生する面チャージを計算している。この値は、セルの分割方向により過大評価される場合が発生する。そこでこの過大評価の問題に対処する方法として、収束状態でマクロに見てチャージが発生しない範囲で、セル境界に発生するマグネティックチャージによる静磁エネルギーを小さく設定することを行った。但し、収束状態において、磁化がチャージを打ち消すような完全な閉ループを形成しない場合、チャージの値を厳密に設定した。

磁壁における磁化構造を求めるために、計算機シミュレーション用計算を行った。計算モデルとして、磁壁に対して垂直な膜厚方向の断面を対象とした二次元モデルを用いた。エネルギーとしては交換相互作用エネルギー、静磁エネルギーの二つを考えた。今回の計算においては、異方性エネルギーの大きさが他の二つのエネルギーに比べ極めて小さい値であるため、異方性エネルギーは考慮しなかった。モンテカルロ法により得られた計算結果をもとに有効場を用い

たエネルギー最小化法により最終的な磁化状態を計算した。エネルギー最小化法として、各メッシュの中心における有効場を計算し、各メッシュの磁化ベクトルを有効場ベクトルに近づける方法を用いた。このとき磁化ベクトルの長さは一定に保った。新たにできた各メッシュの磁化ベクトルに対し、再び有効場ベクトルを求め同様の操作を繰り返すことで、系を最小エネルギー状態に近づけた。具体的に磁化ベクトルを有効場ベクトルに近づける方法として、磁化ベクトルと有効場ベクトルで作られる平行四辺形の対角線上に動かす方法を採用した。

磁壁に於ける磁化構造の計算機シミュレーションの結果を以下に示す。膜厚 2000 Å の CoZrNb について四つの異なるランダムな初期状態 A, B, C, D について、併用法を用いて計算を行った。計算を行ったのは磁壁角度 180, 150, 120, 90, 60 である。180 度磁壁については全ての場合において閉磁路構造をもつ磁化状態となった。150 度磁壁に関しても四つのパターン全てにおいて閉磁路構造を採ったが 180 度磁壁の場合の閉磁路構造に比べ、対称性の悪いものであった。また、120 度磁壁、90 度磁壁、60 度磁壁において共通して言えることは、膜表面ではネールの磁化変化をしているが、膜中心部ではブロッホ的变化をしている。この構造を採ることで、本来発生するブロッホ磁壁による表面チャージを抑制している。但し、磁壁角度が低下するに従い、膜中心部でのブロッホ的磁化変化が膜面方向に傾き、ネールの磁化変化に近づく傾向を示した。この結果のエネルギーをそれぞれ磁壁角度での磁壁エネルギーとし、これをもとに磁壁角度とエネルギーを簡単な関数で近似した。今回の 180 度磁壁の結果は、他のシミュレーション手法により得られた 180 度磁壁の磁化構造及びエネルギーと一致し、解析式とは大きな差異があった。低角度磁壁において今回の結果は解析式とよい一致を示したが、磁壁角度が大きくなるに従いその差は増加した。同様に、膜厚 1000 Å, 膜厚 200 Å についても計算した。この方法により求めた磁壁エネルギーをもとに、モンテカルロ法を用いて、薄膜での磁化構造のシミュレーションを行った。以下にそのことについて述べる。

乱数の違いによる結果の比較として、 $64\mu\text{m}\times 32\mu\text{m}$ 、膜厚 2000 Å の薄膜を $N_x\times N_y=40\times 20$ の分割で計算した。その結果、異なる乱数系列を用いることにより、一つ閉ループのみの磁区構造と 90 度磁壁のみにより形成された二つの閉ループを有する磁区構造の二つの結果が得られた。この計算結果に対応する現実の系として、物理定数がほぼ等しい $\text{Ni}_{80}\text{-Fe}_{20}$ の膜厚 2000 Å の薄膜をサイズは $64\mu\text{m}\times 32\mu\text{m}$ に加工し、そこに存在する磁区構造をビッター法により観測した。その結果、多数回の交流消磁により得られる二つのビッターパターンは計算の結果と一致した。

磁区構造の磁気異方性依存性を調べるために、異方性を付与した CoZrNb についての計算を行った。膜厚 2000 Å, $204.8\mu\text{m}\times 51.2\mu\text{m}$ の CoZrNb 薄膜で幅方向に $H_k=2.5\text{ [Oe]}$, 5.0 [Oe] の異方性を付与した場合、膜厚 1000 Å において同様の条件で $H_k=5.0\text{ [Oe]}$ とした場合の異なる 8 通りの乱数系列によるシミュレーションを行った。 $H_k=5.0\text{ [Oe]}$ の場合、膜厚 1000 Å の結果は異方性がつきずらいという結果が得られた。この理由として、薄い膜厚領域に於いて単位体積当たりの磁壁エネルギーが、相対的に増加したことが挙げられる。

一様磁界による磁区構造変化について、実測及びシミュレーションを行った。膜厚 2000 Å, $55\mu\text{m}\times 55\mu\text{m}$ サイズの $\text{Ni}_{80}\text{-Fe}_{20}$ 薄膜を用いて磁界を印加したときの磁区構造の変化についてビッター観察を行った。また、膜厚 2000 Å, $51.2\mu\text{m}\times 51.2\mu\text{m}$ サイズの $\text{Ni}_{80}\text{-Fe}_{20}$ 薄膜に 4 [Oe] , 10 [Oe] , および 12 [Oe] 磁界を印加したときの磁区構造の変化をシミュレーションし、ビッター観察と同様に、三角磁区の変形、180 度磁壁の出現、移動という現象が確認できた。

また、磁気抵抗効果型ヘッドについてもシミュレーションを行った。まず、磁区制御を施した場合の磁気抵抗素子の一様磁界に対する磁化状態の変化をモンテカルロ法でシミュレーションした。磁区制御膜の無い中央部分のサイズは $2.56\mu\text{m}\times 3.04\mu\text{m}$ 、膜厚 200 Å、材料は $\text{Ni}_{80}\text{-Fe}_{20}$ を仮定した。この結果はエネルギー最小化法による過去の結果とよく一致する。エネルギー最小化法、モンテカルロ法双方で中心部のみ磁化変化が見られ、その変化は左右非対称であった。この様に全く異なる手法によりほぼ同一の結果が得られた。

次に、垂直磁化パターンからの漏れ磁束に対する磁気抵抗効果型ヘッドの磁化状態をシミュレートした。記録パターンのサイズは、 $20\mu\text{m}\times 0.256\mu\text{m}$ 、記録層厚 500 Å、飽和磁化 500emu/cc 、記録層の下には膜厚、透磁率無限大の軟磁性裏打ち層があると仮定し、記録パターン中央にスペーシング $0.06\mu\text{m}$ で磁気抵抗素子が存在する場合の素子の磁化変化を調べた。今回考える孤立磁化状態では飽和磁化の半分の磁化が存在すると考えた。磁区制御の施されていない部分のサイズとして、 $3\mu\text{m}\times 1.92\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}\times 1.92\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}\times 3.84\mu\text{m}$ の三通りの場合の磁化変化をシミュレートした。ここでも磁化の非対称性が見られた。これらから、磁化変化に対する、素子の幅及び高さ依存性が確認できた。

モンテカルロ法を用いた今回の軟磁性薄膜に対するシミュレーションにより可能となった主な事柄として、次のものが挙げられる。

- (1) 特別な初期状態を設定する必要なく磁区構造が計算できた。
- (2) 乱数の系列の違いによって、許されるいくつかの結果が得られた。
- (3) 熱力学的観点でのシミュレーションが可能となった。

以上のことから本手法は軟磁性薄膜における磁化状態を計算機シミュレーションにより得る場合、非常に有力な方法であると言える。また、計算時間においても本手法は実用的である。

今回導かれた、軟磁性薄膜シミュレーションに於いて重要であると考えられる結論として次のものが挙げられる。磁気ヘッドサイズの軟磁性薄膜の計算機シミュレーションを行う場合、従来の交換相互作用エネルギーの部分で置き換える必要がある。また、軟磁性薄膜シミュレーションにおいては、多数個のスピンをセルとし、一つの磁化ベクトルで代表される場合が多い。しかし、この場合セル形状に起因する静磁エネルギーの過大評価が発生する。このことは従来議論されてこなかったが、静磁エネルギーの大きい厚い膜厚の薄膜等では非常に重要となる。

今後の展望として、今回開発したモンテカルロ法を用いた軟磁性薄膜シミュレータの有用性が確認できたことから今後は以下の分野に応用が考えられる。

- (1) 磁気ヘッドの熱による影響の解析
- (2) 様々な不均一磁場中での軟磁性薄膜の磁化変化のシミュレーション
- (3) ノイズの解析
- (4) 積層膜等三次元的構造をもつ系の解析

審査結果の要旨

磁気ヘッドにおいては、軟磁性薄膜の磁化状態が直接記録再生の性能に影響を与えるため、その微細磁区構造を正確に把握することが求められる。本論文は、モカテカルロ法を応用した軟磁性薄膜の磁化機構のシミュレーションアルゴリズムを完成させ、実験と対応させるとともに、磁気ヘッド用軟磁性薄膜の磁化構造の制御条件を明らかにするための研究成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、従来から用いられてきた軟磁性膜の解析手法の問題点を指摘し、従来では解を得るために適切な初期磁化状態を与える必要があったのに対し、初期条件に依存せずに解が得られるモンテカルロ法の利点を示している。

第3章では、現実的な磁区計算を行なう際に問題であった磁壁エネルギーを独自の手法で近似する方法を示し、これを適用してシミュレーションを完成させている。これは従来膨大な計算量を必要とした磁性体に対するモンテカルロ法の適用に新しい工夫を加えて、計算量の低減を達成したもので、磁性膜の磁化挙動をシミュレーションする上で有用な知見である。

第4章では、膨形状や異方性などが異なる種々の薄膜に本シミュレーションを適用し、実験で観測される磁区構造や磁壁が計算から予測できることを示して、本シミュレーションの妥当性を確認している。

第5章では、高感度ヘッドとして用いられる磁気抵抗効果型ヘッドの磁性膜センサーの磁化状態を本シミュレーションを用いて求め、磁化スピンの回転が磁性膜センサー内で非対称分布を呈し、トラック方向に再生感度の非対称性が生じることを示している。磁気ヘッドの実動作時においては軟磁性膜の観測が困難なことから、これは応用上重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、モンテカルロ法を用いた軟磁性薄膜のシミュレーション解析を行ない、その微細磁区構造を明らかにして、磁気ヘッド用軟磁性膜設計への適用の有用性を示したもので、磁気工学及び情報記録デバイス工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。