

氏 名	田 河 育 也		
授 与 学 位	工 学 博 士		
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 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	高密度磁気記録機構の計算機シミュレーションによる解析とその応用に関する研究		
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	東北大学助教授 大内 一弘	

論 文 内 容 要 旨

現代の高度情報化社会を担う三つの要素は、コンピュータに代表される「情報処理」、光通信などの「情報伝送」、そして「情報蓄積」である。三つ目の「情報蓄積」は、多量の情報が記録でき、しかも必要な情報をより早く正確に取り出すことのできるシステムを必要とする。これらの条件を満たす磁気記録技術は現代社会を支える基幹技術の一つと言え、さらに大容量化が要求されている。我々の研究室では、次世代の記録技術である垂直磁気記録方式の実用化に向けて研究を行っており、原理的には1mm²当たり1Gビットもの記録が可能であることを確認している。しかし、現段階での実験的な記録密度はその千分の一程度に過ぎない。このため、磁気ヘッドや記録媒体の最適化により、記録密度を飛躍的に向上させて行かなければならない。

効率よく最適化を図るためには実験と共に理論的な考察が不可欠である。もし、高精度のシミュレーションが可能になれば、実験では決して得ることのできない媒体内磁化状態や磁界分布などが得られ、高密度高性能な装置設計に役立つものと期待される。本研究はこのような観点から、磁気記録再生過程を定量的に再現できる新しい計算機シミュレーション・ソフトを作ること、そして、これを用いた記録再生機構の解析から高密度記録のためのシステム設計指針を与えることを目的として行うものである。

磁気記録の計算機シミュレーションにおいて高い信頼性を得るには、記録媒体の磁化機構を正確にモデル化する必要がある。多くの磁気記録用媒体は微結晶粒構造をしており、それぞれの結晶粒子は単磁区的で、その磁化機構は粒子内磁化の回転や反転によるものと考えられる。このような媒

体の磁化モデルとしては一般に Stoner-Wohlfarth (S-W) モデルが用いられてきたが、これでは垂直記録媒体の磁気特性を再現することができない。そこで、筆者は新たに Curling モデルを基本とした媒体磁化モデルを導入した。S-W モデルは、磁性粒子の異方性エネルギーと静磁エネルギーのみ考慮したモデルであるが、Curling モデルでは、これらに加えて粒子内スピンの交換相互作用エネルギーも考慮される。この新しい磁化モデルを用いることにより、微粒子の性質を示すあらゆる磁気記録媒体について、M-H 曲線、磁気トルク曲線、回転ヒステリシス損失、抗磁力の角度依存性などが、S-W モデルを用いたときと比べて格段に精度良く再現できることを確認した。従って、複雑な磁化挙動を示す磁気記録のシミュレーションに、この磁化計算法を適用することは極めて有効であると言える。

磁気記録のシミュレーションを行うには、もう一つの課題、すなわち磁気ヘッドや垂直二層膜媒体の下地層となっているパーマロイ層などの、軟磁性体の非線形的磁化過程を正確に計算することも必要である。軟磁性体のヒステリシスは一般に非常に小さいため、これを無視しても大きな誤差は生じないが、材料や作成条件によって初透磁率 μ_1 や飽和磁束密度 B_s などは大きく異なる。このような軟磁性体の磁気特性は、一般に μ -B 曲線により表され、その磁化過程は、磁区などの微視的構造による影響が小さいとき、有限要素法を用いることにより精度良く解析できることが知られている。有限要素法は、磁気ヘッドの磁界解析などには既に用いられているが、記録再生過程への応用に関しては、媒体の磁化挙動を単純な数式で近似するなど、未だ初歩的な段階を抜け出していないのが現状であった。そこで、筆者は、有限要素法の中に Curling モデルを基本とした媒体磁化モデルを組み込むことにより、全く新しいシミュレーション・ソフトを開発した。シミュレーションにおける計算の全体の流れは通常有限要素法と同様であるが、媒体記録層内の磁化を計算するときには新しい磁化計算モデルを用いる。

磁気記録再生過程では、記録起磁力、あるいはヘッドと媒体の透磁率や飽和磁束密度、更には既に記録された領域の磁化分布状態により、ヘッド媒体間の磁氣的相互作用が変化する。このため、記録ヘッドが同一であっても記録磁界分布は常に変動する。媒体磁化モデルを導入した新しい有限要素法を用いると、媒体記録層内のベクトル的な磁化状態を考慮した磁界分布の計算が行えるうえ、ヘッドと媒体の両者の非線形性を考慮した磁気ヘッド動作時の挙動が詳細に再現できる。このため、従来のシミュレーションと異なり、磁氣的相互作用の変化に柔軟に対応してヘッドの記録磁界分布も変化する。このことは、記録起磁力とヘッド磁界分布の関係、および、ヘッドや媒体の軟磁気特性とヘッド磁界分布の関係を調べることにより確認されている。

計算機シミュレーションによれば、任意の磁気特性、すなわちまだ実現されていない磁気特性や、任意の幾何学的定数、すなわち自由な形状を持つ記録媒体や磁気ヘッドを設定した解析を行うことができる。計算機シミュレーションにより、垂直磁気記録における二層膜媒体の磁気特性と高密度特性の関連についての詳しい解析を行った結果から、

- (1) 記録層厚 δ は薄いほど記録再生分解能ともに高いが、出力は低下する。
- (2) 飽和磁化 M_s が大きいほど記録分解能が高くなる。
- (3) 抗磁力 H_c が大きいほど再生出力は高いが、記録分解能は低下する。

- (4) 粒子配向性は極めて悪くない限り記録再生特性は不変である。
(5) 粒子 H_c 分布の分布幅が狭くなるにしたがい記録分解能は著しく向上する。
ことがわかった。

これらのシミュレーションにおける記録メカニズムを詳しく調べると、高記録密度領域において高い再生出力が得られるのは孤立磁化転移時の磁化転移幅が狭いときであり、そのためには、

- (a) 磁化転移を起こさせる記録磁界の媒体内での等磁界強度線の間隔が短い、すなわち記録ヘッド磁界の磁化容易軸方向成分の磁界勾配が急峻である。
(b) 媒体内磁性微粒子の抗磁力のばらつきが小さい（微粒子の抗磁力が揃っている）、すなわち粒子抗磁力分布が急峻である。

ことの二つの条件が必要であることがわかった。ここで、粒子抗磁力分布とは、例えば、媒体の H_c が1500 Oe とは限らず、ある範囲に分布するというを表すパラメータのことである。

上述(1)~(5)の結果が得られたそれぞれのシミュレーションにおいて、記録ヘッド磁界分布を調べると、(1)の媒体記録層の厚さを変えたとき、および(2)の記録層の飽和磁化を変化させたとき、ヘッド磁界分布も変化していた。すなわち、記録層厚が薄いほど、また飽和磁界 M_s が大きいほどヘッド磁界は急峻になっていた。前者の理由は、記録層が薄くなることにより軟磁性体である媒体下地層と主磁極の間の距離が短くなり、ヘッドと媒体の磁氣的結合が強まるためである。また、 M_s を大きくすると、記録層の透磁率が高くなったのと同様の効果が得られ、ヘッド媒体間磁氣的相互作用が強まるため、 M_s が大きいほどヘッド磁界も急峻になる。これらのことから、膜厚を薄くしたり M_s を大きくしたりすると、ヘッド磁界が急峻になるため磁界転移幅も狭くなり、その結果として高密度特性が向上することがわかった。しかし、媒体の薄膜化には物理的な限界があるうえ、薄膜化とともに再生出力も減少してしまうため、現状以下の薄膜化はあまり有効とは言えない。また、高 M_s 化についても、800 emu/cc 以上になると垂直異方性が損なわれることが知られており、やはり著しい高 M_s 化は困難であると言える。

一方、(3)のように、記録層の抗磁力 H_c を変化させたとき、反磁界の強い低密度域では、 H_c が大きいほど自己減磁作用を受け難いため、媒体内磁気モーメントが大きくなり、出力も H_c にほぼ比例して著しく増大する。しかし、記録密度が高くなると高 H_c 媒体の出力は急激に減衰し、低 H_c 媒体との差が小さくなる。 H_c が変化してもヘッド磁界分布はほとんど変化していないので、これは、先ほど述べた粒子抗磁力分布に起因するものと考えられる。そこで、粒子抗磁力分布を調べると、分布の中心値である媒体の抗磁力 H_c が大きくなるにしたがい分布幅も広がっていた。このため、 H_c の大きい媒体の抗磁力密度特性はあまりよくなかったことが理解できる。

粒子の抗磁力は、粒子の形状磁気異方性および結晶磁気異方性から導かれる異方性磁界 H_k により決定され、異方性磁界 H_k とは一対一に対応する。従って、粒子抗磁力分布を変化させるには、粒子の異方性磁界 H_k の分布を変化させればよい。そこで、抗磁力 H_c を一定にして粒子異方性磁界の分布幅のみ変化させてシミュレーションを行ったところ、上述の(5)のように、異方性磁界分布が急峻なほど、すなわち粒子抗磁力分布が急峻なほど高密度特性が向上することがわかった。

このように、粒子抗磁力分布はヘッド磁界分布に匹敵するくらい重要なパラメータであるにもか

かわらず、測定が困難であったことから、これまで、ほとんど議論されることなかった。これに対して筆者は、実測の M-H 曲線から簡単に粒子抗磁力分布を推定できるパラメータ ΔH_c を考案した。 ΔH_c は、磁化容易方向メジャーと抗磁力 H_c から反転させたマイナー曲線の、 $M_r/2$ における磁界の幅である。

粒子抗磁力分布と高密度特性の関係を実験的に調べるため、様々な Co-Cr スパッタ膜媒体について ΔH_c および D_{50}^* を測定した。 D_{50}^* とは、主磁極厚み損失の影響を補正するため導入したパラメータで、複数のディップ点を持つ記録密度特性曲線の極大値を結んだ包絡線上において、出力が低密度での値の半分になる記録密度である。これらの実測値は、スペーシング損失のためシミュレーションから得られた値より全体に小さくなっているが、その傾向は計算値と良く一致しており、粒子抗磁力分布を急峻にすることにより高密度特性が向上することを実験によっても確認できた。このように、粒子抗磁力分布はヘッド磁界分布とともに高密度特性に強い影響を与えるパラメータであるうえ、ヘッド磁界分布を急峻にするための媒体薄膜化、高 M_r 化などと異なり、出力の減少、垂直異方性の低下などをもたらすこともないことが明らかである。従って、粒子抗磁力分布を急峻にすることは、これからの媒体の重要な設計指針であると言える。

本研究では、Curling モデルと有限要素法の採用により、高精度で定量性ある磁気記録の計算機シミュレーション・ソフトを開発した。この新しいシミュレーションは、有限要素法を用いているため、今までのシミュレーションでは取り扱えなかった、磁気ヘッドの形状や軟磁気特性を自由に設定できる。また、媒体の磁気特性を複数設定できるうえ、オーバーライトやピークシフトなどに関する解析も可能である。高記録密度域における媒体の高出力化と共に、磁気ヘッドの再生感度の向上が緊急の課題となっている現在、今後のシミュレーション解析により、高い再生分解能を持つ磁気ヘッドの設計指針が得られるものと期待される。その一方で、三次元解析が行える有限要素法シミュレーション・ソフトを開発すること、また、ヘッドや媒体の磁壁の挙動まで取り扱えるような、マイクロマグネティクスに基づくヘッドや媒体の新しいモデルを開発することが今後の課題である。

審査結果の要旨

磁気記録技術は現在の高度情報化社会を支える重要な柱であり、磁気メディア上で1ビットの記録情報の占有面積はサブ μm^2 になろうとしている。この様な微細領域での非線形で複雑な記録再生機構を解析し、一層の高密度化を実現する磁気メディアや磁気ヘッド、記録再生信号処理方式などを設計するための手段として、計算機シミュレーションの実用化が強く望まれている。本論文は、電磁界解析に広く使われている有限要素法に磁気メディアを構成する磁性微粒子の磁化モデルを導入してこれを実現し、記録特性の解析や高密度記録システムの設計に応用した成果をまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、磁気メディアは単磁区微粒子や微結晶粒の集合体で、粒子内のスピンは磁化反転時にカーリングモードをとるとし、磁気メディアのベクトル磁化過程を粒子の磁気異方性の方向と強さの分散を考慮して計算機で追跡する手法を提案して、種々の磁化変化に対する磁化曲線が計算機で復元できることを示している。これは有用な成果である。

第3章では、ヘッドとメディアの磁氣的相互作用を考慮しながら電磁界が解析できる有限要素法にこの微粒子集合体の磁化解析法を導入し、媒体内のベクトル磁化分布を確率統計的に計算しながら記録、再生の両過程を追跡して記録特性を定量的に予測する手法について述べている。

第4章では、これを現在の長手磁化方式による記録特性の解析に適用し、回転磁化モートの形成が記録限界を与えること、高密度化を実現するには磁性層を薄くし保磁力を高める必要があることなど、実測結果をシミュレーションで解析し、有効性を確かめている。

第5章では、垂直磁化方式について解析し、単磁極ヘッドの磁界はメディアとの磁氣的相互作用で著しく急峻になり、また高密度ほどメディア内の減磁界が弱まるため、理想的な磁化状態が実現できることを示している。

さらに第6章では、磁気記録の高密度化の可能性を計算機シミュレーションの上から論じ、長手磁化方式では減磁界のような電磁氣的理由で記録限界が決まるのに対し、垂直磁化方式では磁性微粒子や結晶粒の粒形状や結晶性の様な物性的限界で決まり、その結果、ビット間隔数10nmの超高密度記録が可能であることを明らかにしている。これは実測でも確かめられている極めて有用な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、マイクロマグネティックスに基づく磁気メディアの磁化機構モデルを導入して非線形的で複雑な磁気記録再生過程を計算機で定量的にシミュレーションする手法を確立したもので、磁気工学、記録工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。