

磁気力顕微鏡像を用いた媒体の 記録磁化状態の解析に関する研究

学位論文内容の要旨

世界的な情報ネットワークの拡大やマルチメディアの普及に伴い、小型、大容量、高信頼性、低ビットコストなどの特徴を持つハードディスク装置（HDD: hard disk drive）が、現代の情報ネットワークシステムを支える最も重要な要素の一つとして位置づけられている。このハードディスク装置を支える磁気記録技術は、誕生から1世紀を過ぎた今もなお、活発な開発が行われている。記録媒体、磁気ヘッド、位置決め、記録再生、信号処理などの技術の総合的な発展により、ハードディスク装置の面記録密度は急速に増加し、1990年以降においては、MRヘッドおよびPRMLチャネルの実用化により、記録密度の伸びは年率60%にも達した。さらに1999年、2000年の2年間ににおいては、反強磁性結合を用いた長手記録媒体、垂直記録媒体、TMRヘッドなどのブレークスルーによって年率150%の伸びを記録している。

高密度化のためには記録再生特性の向上が不可欠であり、GMRヘッドやTMRヘッドに代表される高感度な再生ヘッドの開発が進む一方、媒体側においては低ノイズ化の要求がますます高まっている。薄膜媒体では、膜の組成を変えずに成膜条件により、保持力や残留磁化などのヒステリシス特性が変化することが実験的に知られている。これは、ヒステリシス特性が媒体の微細磁気構造(magnetic microstructure)に強く依存していることを示唆するものである。薄膜媒体では磁氣的に相互作用し合う多数の結晶粒が密に集合しているために、そのヒステリシス特性は個々の結晶粒が本来持っている磁気特性だけでなく、磁氣的相互作用(静磁氣的相互作用、交換相互作用など)と密接な関係を持っている。したがって、高密度記録に適した低ノイズ媒体の開発を行うためには、媒体の微細磁気構造を詳細に把握し、磁気特性や記録再生特性との関係を明らかにする必要がある。この関係が明らかになれば、記録再生特性の良好な媒体を実現するための明確な設計指針を得ることができる。

物質の微細磁気構造を観察する代表的な手段として、磁気力顕微鏡(MFM: Magnetic Force Microscopy)が広く用いられている。MFMは観察試料に特別な前処理を必要とせず、試料表面が非磁性層に覆われていても観察可能なことから、磁気記録媒体の微細磁気構造観察手段として広く用いられている。これまでに行われてきたMFMによる媒体の磁化状態評価例の多くは、媒体のMFM観察像から一次元プロファイルを求め、クラスタサイズやS/N値などを算出するといった、一次元的なデータ解析を行っていた。しかしながら、これらの解析ではMFM観察像のもつ二次元データの特徴を十分に反映しておらず、詳細な媒体の微細磁気構造を把握することができなかった。

本研究では媒体のMFM像を二次元確率信号データとして扱い、確率統計論や画像解析の概念を取り入れた解析を試みる。また、本研究の解析を通じ、記録と媒体の記録磁化状態、再生ヘッドによる電磁変換特性との関係を明らかにすることを目的とする。

本論文は6章で構成される。1章は序論であり、磁気記録技術の変遷と従来のMFM像を用いた定量解析について述べる。2章では磁気記録技術の概念と観察手段として用いたMFMの装置原理と

構成について述べる。

3章では、媒体の主なノイズ要因であるトランジション領域における磁化状態の揺らぎに着目し、従来法では不可能であった磁化状態の揺らぎの定量解析手法を提案した。手法を構築するにあたり、MFM信号の分布の傾向を画像解析手法の一つである領域分割、検定を行うことによって調べ、その分布の性質に基づいた解析モデルに従って媒体の特徴解析を行った。また、この手法を用いて得られる統計量のうち、分散に着目した定量解析を行い、得られる分散プロファイルの特徴と、媒体のトランジション領域における記録磁化状態の揺らぎの関係の解明を行った。その結果、分散は磁化遷移位置や幅の揺らぎ、トラック幅方向の相関長の揺らぎなどがプロファイル形状に反映される特徴量であることがわかった。したがって、その形状や、形状のばらつきにより、媒体のどのパラメータの揺らぎが主に存在しているかを推測することができる。また、この分散プロファイルを利用した媒体の記録磁化状態の揺らぎを評価する評価値L/Wを提案した。提案したパラメータによって、トランジション領域における磁化の揺らぎがビット領域の磁化状態に与える影響の度合いを定量的に評価することができ、また再生ヘッドによる記録再生特性を予測することが可能になった。

3章で解析を行ったトランジション領域における記録磁化状態の揺らぎは、媒体上が数十個の結晶粒の集合から成る磁気クラスタを形成し、そのクラスタを単位として磁化反転を行うことに起因している。また、このトランジション領域における磁化状態は、DC消去状態における媒体の磁気クラスタ構造に依存すると考えられている。したがって、DC消去状態の磁気クラスタ構造解析を行う必要があり、これまでもいくつか解析が行われてきた。しかしながら、従来の解析は、磁気クラスタ構造を1次元特徴量である“クラスタサイズ”に着目したものがほとんどであり、2次元でのクラスタ構造の定量解析は行われていなかった。4、5章では、磁気クラスタ構造の2次元の特徴を解析し、クラスタサイズ以外の2次元クラスタ構造の特徴とトランジション領域における揺らぎの関係の解明を試みた。二次元の磁気クラスタ構造解析を行うにあたり、その解析手法の確立をおこなった。磁気クラスタ境界に存在する磁極領域に着目し、その領域の分布を調べることで2次元構造解析を行う解析手法を提案した。4章では、MFM観察画像から磁極存在領域に相当する画素値をもつ領域を抽出するにあたり、あらかじめ閾値を決めることなく、最適にMFMの分解能を考慮した領域を抽出する手法の構築を行った。領域抽出を最適化問題ととらえ、遺伝的アルゴリズムを用いて磁極領域を抽出し、MFM観察像上にマッピングすることが可能となった。また、磁極領域を抽出するために用いる最適な閾値を定量的に求めることが可能になった。5章ではその閾値を用いて、磁極領域の分布の特徴解析を行った。ここでは、磁化リップルのブランチに着目し、クラスタの形状や磁化の分散の特徴抽出を可能にする解析手法の構築を行った。その結果、得られる磁極分布は媒体依存の特徴が見られ、特定方向依存性が強く現れる媒体と、扁平な分布を示す媒体が確認された。この磁極分布の方向性と媒体上で形成されているクラスタ構造の関係を考察した結果、これまでに報告されている縦波モードのリップルに比べ、各クラスタが孤立した構造になっている傾向が確認された。また、分布の方向性とクラスタ形状、局所的な磁化の分散の特徴について検討した結果、トラック方向に近い角度に強い分布が現れるほど、トラック方向に長い形状のクラスタが形成されており、また磁化の分散が大きい媒体は磁極が分布する方向のばらつきも大きいことが明らかになった。また、得られたDC消去状態における磁気クラスタ構造の特徴と、トランジション領域における磁化状態の関係解明を試みた。その結果、DC消去状態において磁極分布に特定方向性が確認される媒体は、比較的低密度領域のトランジション領域における磁化状態の揺らぎが大きく、さらに高密度領域では、パーシャルイレジャー(PE)生成確率も高くなる傾向が確認できた。また、DC消去状態において特定方向に強い磁極分布が確認される媒体のうち、よりトラック方向に近い分布が存在するほど、高密度領域におけるPE生成確率が高くなることが確認できた。

第6章は結論であり、本研究で得られた主な知見と成果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	武 笠 幸 一
副 査	教 授	山 本 眞 史
副 査	教 授	岡 田 亜紀良
副 査	助教授	長谷山 美 紀
副 査	助教授	末 岡 和 久

学 位 論 文 題 名

磁気力顕微鏡像を用いた媒体の 記録磁化状態の解析に関する研究

世界的な情報ネットワークの拡大やマルチメディアの普及に伴い、小型、大容量、高信頼、低ビットコストなどの特徴を持つハードディスク装置 (HDD: hard disk drive) が、現代の情報ネットワークシステムを支える最も重要な要素の一つとして位置づけられてきている。記録媒体、磁気ヘッド、位置決め、記録再生、信号処理などの技術の総合的な発展により、ハードディスク装置の面記録密度は急速に増加してきた。さらなる高密度化のためには記録再生特性の向上が不可欠であり、高感度な再生ヘッドの開発が進む一方、媒体側においては低ノイズ化の要求がますます高まっている。高密度記録に適した低ノイズ媒体の開発を行うためには、媒体の微細磁気構造を詳細に把握し、磁気特性や記録再生特性との関係を明らかにする必要がある。この関係が明らかになれば、記録再生特性の良好な媒体を実現するための明確な設計指針を得ることができる。

物質の微細磁気構造を観察する代表的な手段として、磁気力顕微鏡 (MFM: Magnetic Force Microscopy) が、磁気記録媒体の微細磁気構造観察手段として広く用いられている。これまでに行われてきた MFM による媒体の磁化状態評価例の多くは、媒体の MFM 観察像から一次元プロファイルを求め、クラスタサイズや S/N 値などを算出するといった、一次元的なデータ解析である。これらの解析では MFM 観察像のもつ二次元データの特徴を十分に反映しておらず、詳細な媒体の微細磁気構造を把握することができない。

本研究では媒体の MFM 像を二次元確率信号データとして扱い、確率統計論や画像解析の概念を取り入れた解析を試みる。本研究の解析を通じ、媒体の記録磁化状態、再生ヘッドによる電磁変換特性との関係を明らかにすることを目的とする。

本論文は6章より構成されている。第1章は序論であり、磁気記録技術の変遷と従来の MFM 像を用いた定量解析について述べている。第2章では磁気記録技術の概要と観察手段として用いた MFM 装置の測定原理と構成について述べている。

第3章では、媒体の主なノイズの要因である磁化遷移領域における磁化状態の揺らぎに着目し、従来法では不可能であった磁化状態の揺らぎの定量解析手法を提案した。手法を構築するにあたり、領域分割、検定を行うことにより媒体の特徴解析を行った。この手法を用いて得られる

統計量のうち、分散に着目した定量解析を行い、得られる分散プロファイルの特徴と、媒体の磁化遷移領域における記録磁化状態の揺らぎの関係の解明を行った。その結果、分散は磁化遷移位置や幅の揺らぎ、トラック幅方向の相関長の揺らぎなどがプロファイル形状に反映される特徴量であることがわかった。また、この分散プロファイルを利用した媒体の記録磁化状態の揺らぎを評価する評価値 L/W を提案した。提案したパラメータによって、磁化遷移領域における磁化の揺らぎがビット領域の磁化状態に与える影響の度合いを定量的に評価することができ、再生ヘッドによる記録再生特性を予測することが可能になった。

第3章で解析を行った磁化遷移領域における記録磁化状態の揺らぎは、媒体上が数十個の結晶粒の集合から成る磁気クラスタを形成し、そのクラスタを単位として磁化反転を行うことに起因している。また、磁化遷移領域における磁化状態は、DC消去状態における媒体の磁気クラスタ構造に依存すると考えられている。第4章、5章では、磁気クラスタ構造の2次元的特徴を解析し、クラスタサイズ以外の2次元クラスタ構造の特徴と磁化遷移領域における揺らぎの関係の解明を試みた。磁気クラスタ境界に存在する磁極領域に着目し、その領域の分布を調べることでより2次元構造解析を行う解析手法を提案した。第4章では、領域抽出を最適化問題ととらえ、遺伝的アルゴリズムを用いて磁極領域を抽出し、MFM観察像上にマッピングすることが可能となった。また、磁極領域を抽出するために用いる最適な閾値を定量的に求めることが可能になった。第5章ではその閾値を用いて、磁極領域の分布の特徴解析を行った。ここでは、磁化リップルのブランチに着目し、クラスタの形状や磁化の分散の特徴抽出を可能にする解析手法の構築を行った。その結果、得られる磁極分布は媒体依存の特徴が見られ、特定の方向依存性が強く現れる媒体と、扁平な分布を示す媒体が確認された。この磁極分布の方向性と媒体上で形成されているクラスタ構造の関係を考察した結果、これまでに報告されている縦波モードのリップルに比べ、各クラスタが孤立した構造になっている傾向が確認された。また、分布の方向性とクラスタ形状、局所的な磁化の分散の特徴について検討した。また、得られたDC消去状態における磁気クラスタ構造の特徴と、磁化遷移領域における磁化状態の関係解明を試みた。

第6章は結論であり、本研究で得られた主な知見と成果をまとめている。

本論文は磁気記録媒体のMFM像に対し、確率統計論、画像解析手法を導入し、媒体の微細磁気構造の解析を可能とする新手法を提案したもので、有益な多くの新知見を得ており、磁気記録工学ならびに像情報工学の分野に貢献するところ大なものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。