

HDDにおけるナノスケール シミュレーション技術

Nano-Scale Simulation Technologies

あらまし

ハードディスクドライブ（HDD）の開発・設計に利用されている物理シミュレーション技術においても、HDDの高記録密度化に伴い、ナノオーダーの精度を問題とする領域に達しつつある。例えば、ヘッドの浮上量は年々低下し、現在では10 nm程度に至っている。したがって、浮上ヘッドスライダの浮上面の平坦性では1 nmの凹凸も問題となる。また、磁気ヘッドのリード・ライト素子も高密度化に対応して、微細化しており、100 nm以下のパターン幅が要求されており、ナノオーダーの寸法精度が要求され始めている。

富士通は、これらナノオーダーレベルの要求精度に対する課題を解決するため、新たなシミュレーション技術を開発している。本稿では、HDDの高記録密度化に向けて適用されている物理シミュレーションの中で、ヘッド素子の熱突出しと、イオンミリング・デポジションプロセスに関する数値解析モデルを構築し検証した内容を中心に紹介する。

Abstract

Physical simulation technologies are employed in various areas of hard disk drive (HDD) development and design. To further increase HDD recording density, it is necessary to achieve nano-order precision in heat dissipation analysis and manufacturing process analysis. To meet this requirement, Fujitsu has developed and is actively using simulation techniques for analyzing head element protrusions and the ion milling and deposition processes. This paper focuses on the following analyses that are performed to increase HDD recording density: the analysis of head element protrusions to minimize the head flying height and the analyses of ion milling and deposition performed to reduce the size of head element structures.



中田敏幸（なかだ としゆき）
先行技術開発部 所属
現在、HDDに関するシミュレーション技術の開発に従事。



青木健一郎（あおき けんいちろう）
先行技術開発部 所属
現在、HDDに関するシミュレーション技術の開発に従事。



古屋 篤（ふるや あつし）
HPC適用推進センター 所属
現在、HDDヘッド製造におけるプロセスシミュレーション解析業務に従事。

ま え が き

ハードディスクドライブ（以下、HDD）の高記録密度化に伴い、ヘッドの浮上量は低下し、現在10 nm程度が要求されている。一方、ドライブ内の温度変化やライト電流によるヘッドの温度変化により、ヘッドの素子部分はディスク媒体（以下、媒体）表面に向かって突出し、素子と媒体面との隙間は減少することになる。この隙間変化は、リード・ライト特性やドライブの信頼性に大きな影響を及ぼすことになる。したがって、今後の低浮上化に対しては、隙間変化をできる限り小さくしなければならず、そのためには、隙間変化をあらかじめ正確に把握する必要がある。

ヘッドのリード・ライト素子も高記録密度化に対応し、微細化が進んでいる。両素子ともに幅はサブミクロンオーダーが要求されており、形成・加工プロセスにおいて、その3次元形状をいかに制御するかが課題となっている。

富士通は、この課題を解決するため、物理シミュレーションを行っている。

本稿では、HDDの高記録密度化に向けて適用されている物理シミュレーションの中で、ヘッド低浮上化に対応するためのヘッド素子突出しと、ヘッド素子構造の形成に対応するためのイオンミリング・デポジションプロセス解析を中心に紹介する。

ヘッド素子突出し解析

まえがきで述べたように、近年、HDDの高記録密度化により、浮上量は10 nm程度まで低下している。一般的に、ライト素子やリード素子およびそれらを取り巻くシールド層は金属であり、ヘッドのベース基材であるアルチックに対し、大きな熱膨張係数を持つ。そのため、周囲環境温度の変化や素子自身の発熱により、素子部は媒体表面に向かって突出し、素子と媒体間のスペーシングは減少する。この突出しは数nmオーダーで発生するため、ヘッドと媒体が接触する危険性が増し、製品の信頼性に大きな影響を及ぼす。この熱突出しは発生の要因により環境温度に起因する素子突出しT-PTP（Ambient Temperature-induced Pole-Tip Protrusion）とコイルの発熱に起因するライト電流素子突出しW-PTP（Write current-induced Pole-Tip Protrusion）の

二つに分類できる。環境温度による素子突出しT-PTPは、ヘッド材料の熱膨張係数の違いに起因し、ライト電流素子突出しW-PTPはライトコイルに電流が流れたときに発生する熱による温度分布に起因する。

信頼性の高い磁気ヘッドの開発を行うためには、実測結果との比較により高精度な数値解析手法を確立し、熱突出しのメカニズムを解明し、変形を予測することが不可欠である。しかし、従来の研究では、実稼働状態と大きく異なる自然対流状態でのW-PTPの比較や、実験か解析単体での分析にとどまっており、T-PTPとW-PTPについて、実験・解析両者による解析精度の検証や突出しメカニズムの解明は十分にされてこなかった^{(1)・(5)}

そこで、本章では、まず媒体なしの自然対流状態と媒体にロードされている浮上状態という二つの境界条件下の熱経路の違いを説明し、その後、T-PTPとW-PTPについて解析精度の検証や突出しメカニズムの説明を行う。

数値解析モデル

著者らはヘッドスライダ全体についてモデル化し、とくに磁気ヘッドのコイル構造とGMR { Giant Magnetoresistive (Head) } 素子周辺のシールド構造に関してはコイルの発熱をシミュレーションするため詳細にモデル化した。ヘッドに用いられているアルチック、アルミナ、パーマロイの熱伝導率、熱拡散係数、ヤング率のような物性値は実測値を使用した。加えて、解析には市販の汎用有限要素法ソルバであるABAQUSを使用した。

T-PTPを計算するため、均一な温度分布を仮定し、室温（25℃）から70℃への温度変化した場合の熱応力解析を実施した。また、W-PTPを計算するため、熱電気連成解析を実施しライトコイル発熱時の温度分布を求め、この温度分布を用いて、熱応力解析を実施した。

さらに参考文献（6）により、浮上状態でのABS（Air-Bearing Surface）の熱伝達を計算により求めた。著者らはマイナー項を無視し、ABSの熱伝達係数を下記のように近似した。

$$h = \frac{k_{air}}{FH + 2 \cdot \dots \cdot P_0 / P} \quad \dots (1)$$

h はABSの熱伝達係数、 k_{air} は空気の熱伝導率、 P はABSの圧力、 P_0 は大気圧、 FH は浮上量、

は空気分子の平均自由行程を表す。は定数で1.5と仮定した。流出端の圧力を10 atm、浮上量を10 nmと仮定した場合、流出端での熱伝達係数は 10^5 のオーダーに達する。一般的に自然対流条件下では、空気中のスライダ表面の熱伝達係数は20-30 W/m²Kであり、実稼働状態である浮上状態ではABS表面に非常に高い熱伝達が生じていることが分かる。著者らは参考文献(7)で自然対流条件と浮上状態の違いを詳細に分析している。両条件ともライトコイル発熱による熱はほとんどアルチック基板に逃げるが、自然対流状態においては、熱の86%がサスペンションに至り、浮上状態においては、熱の96%が媒体に至る。これらの熱経路の違いは、熱伝達係数の分布の違いによって発生し、自然空冷状態と浮上状態は全く異なることを示している。よって、媒体の稼働状態の熱突出しを予測するためには、浮上状態における境界条件を正確に設定する必要がある。

熱素子突出しの精度検証

有限要素解析により、環境温度とコイル発熱によるT-PTPとW-PTPを解析した。環境温度が45 上昇したことによるT-PTPの3次元の変形と実測との比較結果を図-1に示す。変形図ではシールドやライトコイル、フォトレジストを中心として突き出している。これらの熱膨張係数は周囲のアルミナやアルチックよりも大きく、T-PTPの主要な発生要因となっている。さらに、この結果をABS面のセンターライン上で光学干渉測定器を用いた実測結果と比較した。本実測ではこのエリアの構成材(アルミナ、アルチック、パーマロイ、など)の違いに起因

する光学特性の不均一を補うため、Pd-Ptをこのエリアにコーティングしている。解析結果では環境温度45 上昇時に、最大3 nmの突出しが発生し、実測結果と良好に一致している。この結果は詳細なモデルと信頼性の高い物性値を用いることで、正確なシミュレーション結果が得られることを示している。

W-PTPについては、先に述べた浮上状態の境界条件を用いて温度分布を算出し、その温度分布を用いてW-PTPを計算した。W-PTPの3次元変形図とリード素子における実測と解析の比較結果を図-2に示す。図より、ライトコイルを中心とした変形が観察され、コイル発熱時の温度分布がW-PTPの形状を決定すると考えられる。浮上状態では光学干渉測定器での測定が難しいため、Walance Spacing測定器を用いて、リード素子での突出し量を比較した。条件として、ライトコイルを発熱させ、温度分布が定常状態に達した後に、ライト電流を停止し、発熱がなくなった場合の突出し量の変化を時系列で比較している。比較結果として、両者は良好に一致しており、時間経過とともにコイル温度が低下し、W-PTPもそれに伴い低下していく過程が実測/解析ともに示されている。本結果よりABSの熱伝達係数分布に関して、浮上状態を仮定して正確に見積もることで、定常状態と過渡的な状態について精度の高い解析結果を得ることができた。

イオンミリング・デポジションプロセス解析

本章では、3次元形状シミュレーションを用いたHDDヘッドプロセス解析について計算手法と適用事例について報告する。

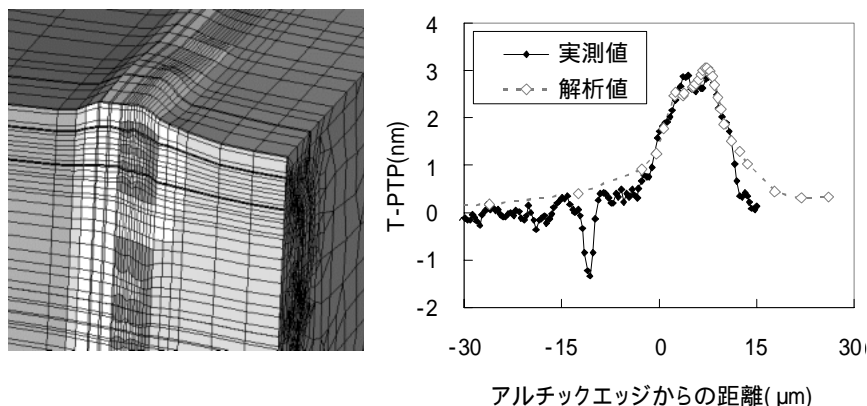


図-1 T-PTPの3次元変形図とABS中心線における実測と解析の比較結果
Fig.1-Three-dimensional deformation in T-PTP and comparison of T-PTP along ABS centerline.

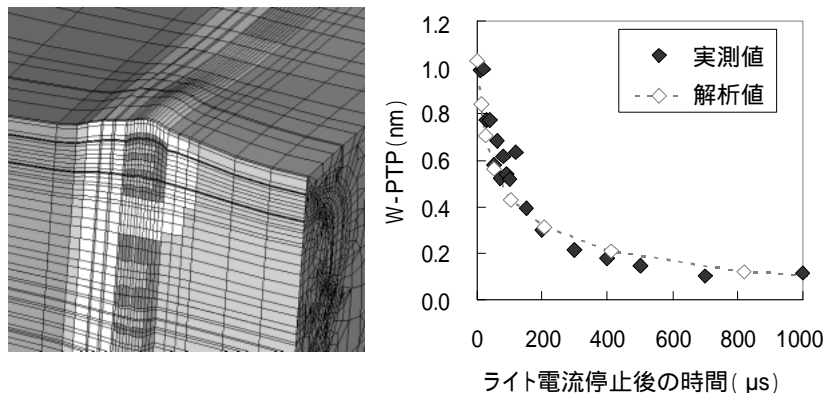


図-2 W-PTPの3次元変形図とリード素子における実測と解析の比較結果
 Fig.2-Three-dimensional deformation in W-PTP and comparison of W-PTP in dynamic timescale.

イオンミリング・デポジションプロセス解析の目的

HDDの高記録密度化に伴い、素子の微細化が進んでいる。媒体に磁気記録された情報を読み取りするのに、外部磁場変動に応じて抵抗変化することを利用したGMRおよびTMRヘッドが用いられているが、近年の高密度装置では素子幅は100 nm前後まで微細化しており、これらの素子を精度よく製造する必要がある。

リード素子部分のみの製造工程としては以下のような工程を経る。

- (1) まずシールド層上に絶縁膜およびGMR膜が形成され、
- (2) GMR上にフォトリソが形成される。
- (3) その上からイオンミリングによりレジストで保護されていないGMR層は削りとられ、
- (4) デポジションによるハードバイアス膜および端子膜が成膜される。
- (5) その後、デポジションにおける付着物ごとレジストを除去し、
- (6) 上面側の絶縁膜およびシールドを形成する。

とくに、GMR素子作成プロセスにおいては、(3)のGMR素子形状を形成するイオンミリングと、(4)のハードバイアス膜・端子膜を形成するデポジション成膜がGMR素子形状を決めるため、3次元形状シミュレーションによるイオンミリングおよびデポジションでの3次元素子形状予測が素子開発の効率化には欠かせない。

本章ではLevel Set法[®]を用いた3次元形状シミュレータをイオンミリング・デポジションプロセス解

析に適用した結果を報告する。分子動力学での第一原理から解析するのではなく、実験値に基づく物理モデルを構築することで現実的な計算時間での形状予測が可能である。

数値解析モデル

本解析では3次元形状変化が安定に扱えるLevel Set法を形状表現手法として用いている。Level Set法では直接界面のデータ構造を扱わず、界面からの距離を表すレベル関数を格子点に配置することにより形状を表現する。レベル関数は対応する表面において0となり、物質の内側では負の距離、外側では正の距離で定義される。レベル関数は式(2)のHamilton-Jacobi方程式に従って時間変化する。

$$\frac{d}{dt} + F_{srf} | \nabla \phi | = 0 \quad \dots (2)$$

ここで、 ∇ はナブラ演算子 (nabla operator) である。式(2)において F_{srf} は表面鉛直方向の移動速度を表しており、各製造プロセスにおける表面の物理機構により決定される。

イオンミリングプロセスではArガスなどをプラズマ化し電極により加速させ、被エッチング素材に照射することで物理的にエッチングする。これらの製造プロセスをシミュレーションするためには照射条件に合わせた各表面要素におけるエッチング量や堆積量のモデル化が必要である。本解析では材料ごとにエッチングレート^{たい}の角度依存性を実測し、それを基に3次元での形状変化を計算する。また、エッチング面においていったん削られた粒子は直線的に飛散し最初に到達した面に一定の確率で吸着する

と仮定する。これらのモデル化により表面移動速度 F_{surf} は以下のように定式化することができる。

$$F_{surf}(x, y, z) = - \int I_{ion}(\theta, \phi) Er(\theta, \phi) d\theta d\phi + \int I_{redepo}(\theta, \phi) \cos(\theta) d\theta d\phi \quad \dots (3)$$

ここで (θ, ϕ) は各表面からみた仰角と方位角, $I_{ion}(\theta, \phi)$ と $I_{redepo}(\theta, \phi)$ はイオンビームおよび付着粒子の流束密度, $Er(\theta, \phi)$ は表面素材のエッチングレートである。

つぎに $I_{ion}(\theta, \phi)$ と $I_{redepo}(\theta, \phi)$ の計算手法を示す。凹凸のある立体物に対してイオンビームを照射した場合、表面位置によりイオンビーム源との間に照射量や入射角度が異なる。さらに、各表面においてイオンビームの流束密度は立体角 (θ, ϕ) に依存するため、表面およびイオン源がどのような位置関係にあるのか存在するか3次的に評価する必要があるが、この可視性の評価計算が最も処理時間がかかる。

そこで3次元構造での可視性を評価するため、CADで用いられるZバッファ法を応用した手法を開発した。これは、表面形状を一時ポリゴンと呼ばれる三角要素の集合として表し、照射状態を計算したい位置から周囲にあるポリゴンの位置関係を計算することでビーム照射量を高速に計算する方法である。詳しくは参考文献(9),(10)を参照いただきたい。

解析事例

イオンミリング・デポジションプロセスでは薄膜エッチングの際、被エッチング粒子がレジスト壁面

へ付着する現象が見られる。この付着がレジスト除去後に残らないようにするため、ひさし形状のあるレジストを用いる方法があるが、再付着およびレジストのシャドウ効果から薄膜のエッチング形状が予測しにくい問題がある。そこで、図-3に示されるような薄膜上にひさし形状を持つレジストを形成し、イオンミリングする場合でシミュレーションと実測との精度検証を行った。GMR層の傾斜角度およびレジスト壁面への付着厚さを実測と解析結果とで比較した結果、傾斜角度が誤差20%と実測との一致が確認された。ひさし形状のあるレジストを用いた場合、GMR層は垂直ではなく、ある傾斜をもってエッチングされる。これは3次的なイオンビーム入射に対するレジストの斜影効果および再付着効果により形成されており、3次元計算を行うことで精

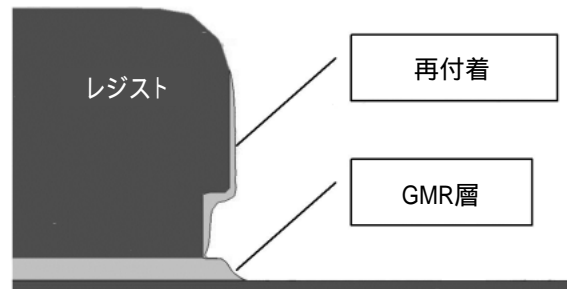


図-3 ひさしのあるレジストにおけるGMRイオンミリングシミュレーション結果
Fig.3-Results of ion milling process simulation.

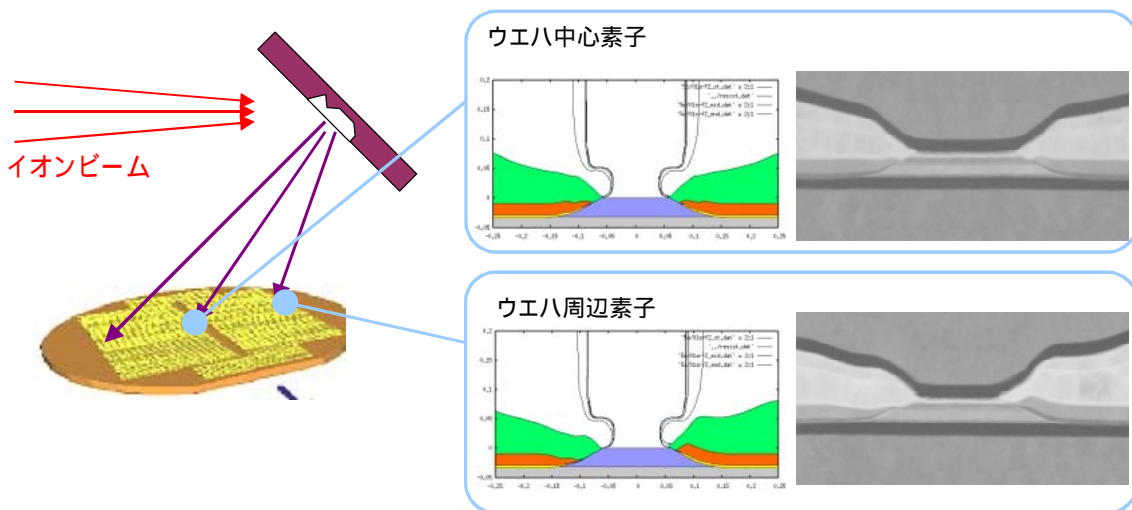


図-4 指向性スパッタにおける成膜素子形状の素子位置依存性
Fig.4-Results of deposition simulation showing differences in form between center and edge of wafer.

度よく再現することができたと考えられる。

つぎに、局所的にイオンビームをターゲットに照射し成膜するプロセス工程における成膜形状の素子位置依存性について解析を行った結果を示す。ターゲット照射面を小さくすることで成膜粒子の指向性を高めレジスト壁面への付着を抑えることができるが、ウエハ上の素子位置により成膜入射角度が異なり成膜形状の違いが生じる。また、ウエハ回転角度により時々刻々と入射角度が異なるため、入射量の角度依存性を正確に扱う必要がある。図-4にその解析結果を示す。ウエハ中心では左右対称でかつ直線的な素子形状が得られるのに対し、ウエハ端素子では左右非対称で端子形状にこぶがみられる形状になることが非常によく再現できることが確認できる。著者らは、この解析手法を成膜形状の均一化などに利用し、素子特性の安定化や性能向上を図っている。

本例ではイオンミリングと指向性デポジションに着目した事例を紹介したが、表面物理や装置内環境に応じたモデル化により原理的にはRIEなどの様々なプロセスへ適用が可能である。ただし、それぞれの装置や現象に応じたモデル化とシミュレータの拡張が必要であり、汎用的な解析ツールの構築が困難である。そのため装置ごとに応じたモデル化とチューニングが行えるよう、ソフトウェアの自社開発を行うことで高精度な予測技術を確立することが可能になると考えている。

む す び

本稿では、ヘッド素子突出し解析とイオンミリング・デポジションプロセス解析に関して詳細に述べた。両解析ともに、実験とよく一致することが確認され、HDDの高記録密度化に対応した製品設計やプロセス設計に有効な手段であることが確認された。今後も、HDDの性能向上に対応した各種シミュレーション技術の開発・改善を行い、HDDの性能向上に貢献したいと考えている。

参 考 文 献

- (1) L. Pust et al. : Thermomechanical head performance . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.38 , No.1 , p.101-106 (2002) .
- (2) V. Nikitin et al. : Spatial and temporal profiling of protrusion in magnetic recording heads . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.40 , No.1 , p.326-331 (2004) .
- (3) B. K. Gupta et al. : On the thermal behavior of giant magnetoresistance heads . *Trans. ASME, J. Tribology* , Vol.123 , p.380-387 (2001) .
- (4) T. Imamura et al. : In situ measurements of temperature distribution of air-bearing surface using thermography . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.38 , No.5 , p.2147-2149 (2002) .
- (5) J. Xu et al. : Thermal analysis of a magnetic head . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.40 , No.4 , p.3142-3144 (2004) .
- (6) L. Chen et al. : Thermal dependence of MR signal on slider flying state . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.36 , No.5 , p.2486-2489 (2000) .
- (7) K. Aoki et al. : Thermal pole-tip protrusion analysis of magnetic heads for hard disk drives . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.41 , No.10 , p.3043-3045 (2005) .
- (8) D. Adalsteinsson et al. : A level set approach to a unified model for etching, deposition, and lithography : three-dimensional simulations . *J. Comp. Phys.* , Vol.122 , No.2 , p.348-366 (1995) .
- (9) T. Nakada et al. : Nano-Scale Simulation Technologies . *FUJITSU Sci. Tech. J.* , Vol.42 , No.1 , p.103-112 (2006) .
- (10) 古屋篤史ほか：3次元形状シミュレータによるMRヘッドプロセス解析．第28回日本応用磁気学会学術講演概要集，2005，p.2．