

31Mbits/mm² (20Gbits/in²)以上の面記録密度を仮定したライトヘッドのマクロ磁界解析

金井 靖^{† a)}

Write Head Field Analysis for Areal Density of over 31Mbits/mm² (20Gbits/in²) Recordings

Yasushi KANAI^{† a)}

あらまし 渦電流を考慮した有限要素法による3次元非線形過渡解析計算により、面記録密度が31~155Mbits/mm²(20~100Gbits/in²)の記録素子の検討を行っている。まず、ヨーク長が20μm程度であれば、記録磁界は1GHzまでの記録電流に追従することから、周波数軸上では31Mbits/mm²(20Gbits/in²)を超える面密度に対しても対応可能であることを述べている。次に、155Mbits/mm²(100Gb/in²)で予測されているトラック幅0.1~0.15μmと400kA/mを超える高保磁力媒体の組合せを仮定した検討を行った。まず、stitchedヘッドはトラック幅0.1~0.15μmでは記録磁界強度が不足することに加え、その構造に起因する2次書き込み磁界が発生することを述べている。また、ウェーハ面からFocused Ion Beamでトラックをトリム加工した記録素子は2次書き込み磁界を避け得ること、stitchedヘッドに比べ強い記録磁界を発生し得るが、高保磁力媒体に記録するには不十分である。今後、記録素子の開発では材料の検討とともに、構造の検討が重要であるため、磁界解析計算の果たす役割が大きいことを述べている。

キーワード 記録ヘッド、有限要素法、155Mbits/mm²(100Gbits/in²)記録、高周波記録

1. ま え が き

市販ハードディスクドライブの面記録密度が15.5Mbits/mm²(10Gbits/in²)を超えた。最近1年間の面記録密度の伸びは年率100%とされており、今後、年率100%の面記録密度の伸びが維持されると2002年には77.5Mbits/mm²(50Gbits/in²)、2003年には155Mbits/mm²(100Gbits/in²)の製品が市場に登場することになる。これは、2005年には124Mbits/mm²(80Gbits/in²)のハードディスクドライブが市販される、との1998年における予測[1]を大きく上回るものである。更に、上記の仮定の下では、10年後に1.55Gbits/mm²(1Tbits/in²)の製品が発売されることになる。一方、研究レベルでは31Mbits/mm²(20Gbits/in²)を超える面記録密度のデモンストレーションが相次いで行われた[2]~[4]。また、垂直記録を利用した1.55Gbits/mm²(1Tbits/in²)の可能性もシミュレーションにより示された[5]。

従来、スピンバルブ素子など再生ヘッドに比べ、記

録素子の研究に関する報告例は少なかったが、1998年によろやく国内外で集中した議論が行われた[6]~[10]。その後、1999年には、情報ストレージ研究推進機構(Storage Research Consortium: SRC)シミュレーションワーキンググループのベンチマーク問題[11]として、3.1Mbits/mm²(2Gbits/in²)用ライトヘッドの渦電流を考慮した3次元過渡解析が行われた[12]~[16]。更に、エレクトロンビームを用いた記録磁界の直接計測と計算結果の比較[17]により、数値解析が記録ヘッド開発のための重要なツールとなることが確認された。また、31Mbits/mm²(20Gbits/in²)用ライトヘッドの解析と記録再生特性の比較も行われており[4]、ライトヘッド開発における数値解析技術の重要性が実証されたように思われる。しかし、例えば構造の異なるライトヘッドに1GHzの記録電流を加えた場合にどのような記録磁界が発生するかなど、種々のライトヘッドをいろいろな条件のもとで解析計算により検討した報告例はないように思われる。

本論文では、渦電流を考慮した3次元非線形過渡マクロ磁界解析計算により、31Mbits/mm²(20Gbits/in²)を超える記録素子の検討を行う[18]。ここで、マクロ磁界解析とは磁性体の特性を透磁率や導電率を用いて表現し、

† 新潟工科大学工学部情報電子工学科、柏崎市
Department of Information and Electronics Engineering, Niigata Institute of Technology, Kashiwazaki-shi, 945-1195 Japan
a) E-mail: kanai@iee.niit.ac.jp

Maxwell の方程式から導いた支配方程式を解析するものであり、磁壁内部の磁化構造などを考慮したマイクロ磁界解析と区別するために用いている。まず、計算の妥当性に関し、種々のモデリングによる計算を行う。すなわち、計算時間の短縮とメモリの削減を目的として、バックコンタクトよりも後方の要素分割が必要であるかを検討した。更に、ヨーク厚み方向の分割層数による記録磁界の変化を求め、渦電流を正しく考慮することが可能となる分割層数を検討した。これら、解析計算の妥当性にかかわる準備の後に 31 ~ 155Mbits/mm²(20 ~ 100Gbits/in²)を仮定した記録ヘッドの計算を行った。まず、トラック幅とギャップ長を固定し、ヨーク長を変えて計算することにより、記録磁界の記録電流に対する追従性を調べる。これより、ヨーク長が 20 μ m 程度であれば 1GHz の記録電流まで、記録磁界強度が低下することなく、追従することが明らかとなった。次に、今後の狭トラック化を仮定して、一般的な stitched 構造でギャップ長とヨーク長を固定して、トラック幅を変えて計算を行った。その結果、155Mbits/mm²(100Gbits/in²)記録で予測されている 0.1 ~ 0.15 μ m なるトラック幅と 400kA/m を超える高保磁力媒体[19]の組合せに対しては、記録能力が大きな問題になり得ることがわかった。更に、従来のオフトラック磁界のほかに、stitched 構造に起因する無視できない大きさの 2 次的な書き込み磁界(以下、2次磁界)が生ずることを示した。最後に、2次磁界を避け得る、Focused Ion Beam でトラックをウェーハ面からトリム加工(FIB trimmed)した構造[20]を仮定して、ギャップ長、トラック幅及びヨーク長を固定して計算を行った。その結果、FIB trimmed ヘッドは一般的な stitched 構造と比べて強い記録磁界が得られるが、400kA/m を超える高保磁力媒体に対しては、なお不十分であることがわかった。また、オフトラック方向の漏洩磁界が大きい^{えい}ため、イレーズ領域が広がる。今後、構造、材料の両面で更なる検討が必要であり、マクロ磁界解析計算の役割が大きいことを述べている。

2. 計算に用いた解析プログラム

ここでは、渦電流を考慮した 3 次元非線形過渡解析プログラム(日本総合研究所製、JMAG-Works)を用いた。解析に用いた支配方程式は

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left\{ -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \right\} = 0 \quad (2)$$

である。ただし、式(1),(2)において、 μ , \mathbf{A} , \mathbf{J}_0 , 及び ϕ はそれぞれ透磁率、磁気ベクトルポテンシャル、強制電流密度、導電率及び電気スカラーポテンシャルである。

なお、本解析では材料非線形性、及び渦電流を考慮し、磁化をマクロとして取り扱い、材料の異方性、ヒステリシス、メディア及び変位電流[21]などは考慮していない。

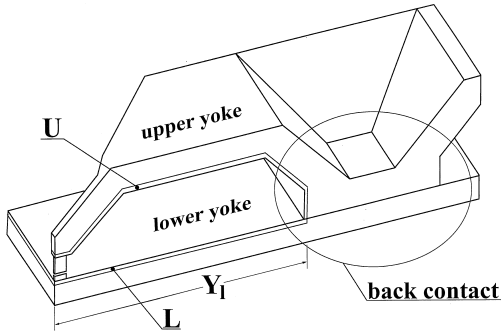
ここで、解析プログラムそのものは異方性を考慮した解析が可能であるが、そのためには複雑な形状の記録ヘッドのあらゆる箇所^{箇所}で異方性をデータとして入力する必要がある。しかし、場所ごとに異方性を実測することは不可能であり、その結果、異方性を考慮した解析計算を行う意味は少ないように思われる。また、メディアの磁化過程プログラムと組み合わせた解析も可能であるが、計算時間などの問題がある。そのため、記録ヘッドのみを考慮して記録磁界の周波数依存性、構造への依存性などを解析計算することは重要である。

3. 解析計算の妥当性の検証

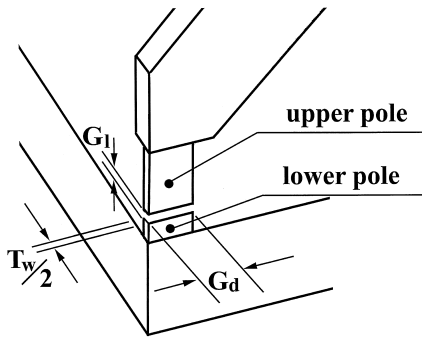
図1を用いて本論文で検討を行なった、stitched 構造記録ヘッドの主要なパラメータと略号を説明する。

トラックをなすポールとヨークを連続に作成している従来の構造では、ポールとヨークの幅が同一になり、プロセス上、狭トラック化が困難である。また、狭トラックを実現できたとしても、ヨークの磁気飽和により強い記録磁界を発生することが難しい。このような背景から、ポール部とヨーク部を別々のプロセスで作製し、構造的にはポールにヨークを重ねたこと(またはヨークにポールを重ねたこと)を特徴とした stitched 構造記録ヘッドが考案された。stitched 構造記録薄膜磁気ヘッドでは、例えば、ヨーク部に磁ひずみが小さい材料を用い、ポール部に飽和磁束密度が大きい材料を使用することが可能である。

図1中の略号は G_g :gap length (ギャップ長), G_d :gap depth or throat height(ギャップ深さ), T_w :track width(トラック幅), Y_1 :yoke length (ヨーク長)である。また、上部ヨークのギャップ側の層U及び下部ヨークのギャップ側の層Lは、4.2で材料を変えた検討を行うために設けた層である。なお、図中には示していないが、ABS (air bearing surface)面から観測点までの距離を sp :



(a) whole view



(b) magnified gap region

図1 stitched構造記録ヘッドの概念図

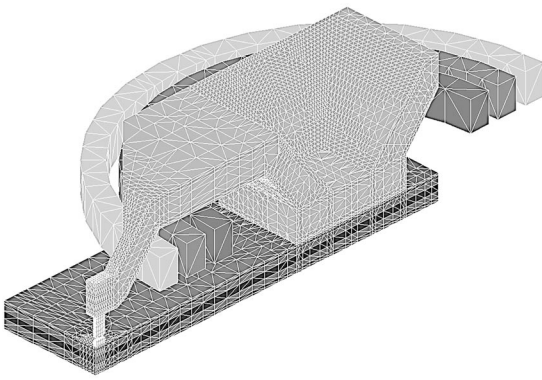
Fig.1 Schematic view of a stitched head.

spacing (スペーシング)で, 材料の飽和磁束密度を B_s , 比初透磁率を μ_n , 導電率を σ で表す.

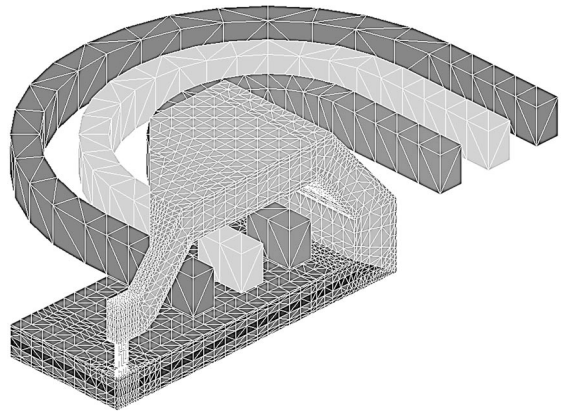
ここでは, 計算の妥当性に関し, 種々のモデリングによる計算を行う. まず, 計算時間の短縮とメモリの削減を意図して, バックコンタクトよりも後ろの部分が必要であるかどうかを検討する[18]. 図2(a)に上部, 下部ヨークともバックコンタクトよりも後ろまで分割したモデル(モデルA)を, 図2(b)に下部ヨークはバックコンタクトよりも後ろまで分割し, 上部ヨークはバックコンタクトよりも後ろの部分省略したモデル(モデルB)を, 図2(c)にバックコンタクトよりも後ろの部分省略したモデル(モデルC)を示す. 更に, 図2(d)はバックコンタクト部をより簡単化したモデル(モデルD)である. また, 図2(e)にはこれらのモデル共通のギャップ近傍拡大図を示す. また, 特に断らない限り各部の寸法は表1の値を用い, 本章ではヨーク長を $20\mu\text{m}$ に固定した. 図3にこれらのモデルに 500MHz の

方型波を加えた場合の記録磁界を示す. また, 図4には記録電流が正の最大値となった時刻($t=0.5\text{ns}$)における, これらのモデルの渦電流密度分布の絶対値を示す. 図4よりバックコンタクト付近の渦電流密度分布には差が見られるが, 図3からわかるように, モデルA, B, Cの記録磁界には差が見られない. また, モデルDの記録磁界はモデルA, B, Cのそれに比べ立上り, 立下り時間が約 0.014ns 速いが, 次章以降で比較を行う上で大きな問題とはならない. すなわち, 図3, 図4からバックコンタクト部のモデリングにより渦電流密度分布は変わるが, 記録磁界分布には大きな影響を与えないことがわかる. 紙面の都合で詳細は省略するが, 記録電流の周波数を 1GHz とした場合と, ギャップ長やギャップ深さが異なるモデルでも検討を行ったが, いずれも同様の結果であった. これらの結果より, 次章以降ではバックコンタクト部をモデルDのように簡単化して計算を進めることとする. 本章の検討によれば, 要素数を約 $257,000$ (モデルA) から約 $197,000$ (モデルD) に削減でき, 計算時間を $2/3$ 以下に短縮可能であった (951min を 594min に短縮可能, 使用計算機: Pentium II 450MHz).

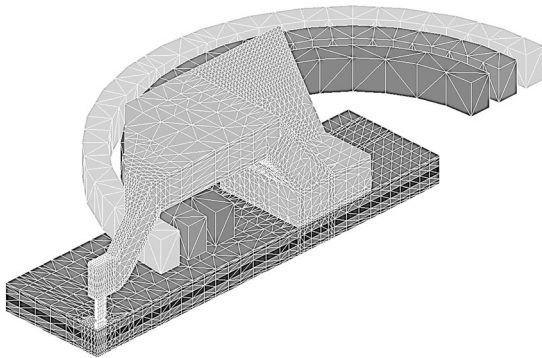
次に, 31Mbits/mm^2 (20Gbits/in^2) では記録周波数が約 350MHz に, 62Mbits/mm^2 (40Gbits/in^2) では約 500MHz になることが予想されている. 表2に示す表皮厚さの周波数依存性からわかるように, 数 100MHz ではヨーク全体をスキンドプスの数分の一に分割することは, 計算時間, メモリの両面から困難である. 実際には表皮効果を考慮し, 導体を厚み方向に均等分割せず, 導体の表層付近を薄く中心付近を厚く不均等に分割するが, 表層を十分に分割できない場合には, 渦電流解析計算が破綻するおそれがある. したがって, ヨーク厚み方向の分割数による記録磁界の変化を確認する必要がある. 図5にヨークの厚み方向を $5, 7, 11$ 層に分割した場合の記録電流に対する記録磁界の追従性を示す. 同図からわかるように, ヨーク厚み方向の分割数は 5 層以上であれば計算結果に大きな影響を与えない. 更に, これらのモデルを用いて 1GHz の記録電流に対する記録磁界を求めたが, 厚み方向の分割数による差は見られなかった. ただし, ヨークの厚み方向を 7 層に分割したモデルでは上部ヨークの厚み方向を $0.2, 0.3, 0.6, 0.8, 0.6, 0.3, 0.2\mu\text{m}$ と, 表層付近を薄く, 中心付近を厚く不均等分割している. 7 層モデルの下部ヨークや 5 層, 11 層のモデルも同様に, 不均等分割している. 以下の計算では, 安全のため, ヨークの厚み方向を 7 層に分割



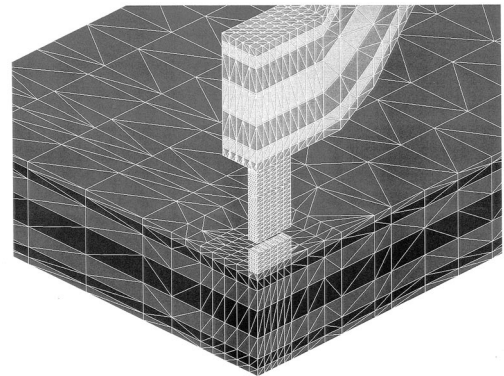
(a) a model both with upper and lower yoke after back contact (model A)



(d) a model with simplified back contact (model D)



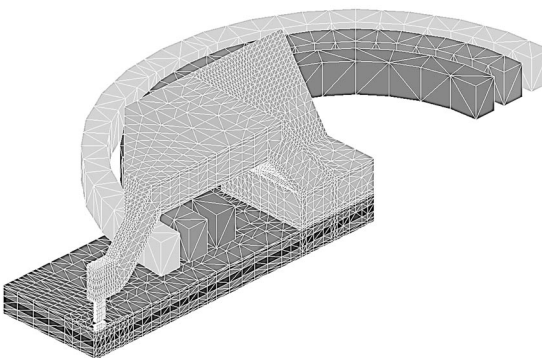
(b) a model with lower yoke, while without upper yoke after back contact (model B)



(e) magnified view of gap region (model A, B, C and D)

図2 バックコンタクトよりも後方の分割が必要であるか検討を行った要素分割図

Fig.2 Finite-element mesh used for investigating the necessity of the elements after back contact.



(c) a model without upper nor lower yoke after back contact (model C)

表1 31Mbits/mm²(20Gbits/in²)用記録素子モデルの主要諸元
Table 1 Major description of a recording write head model for 31Mbits/mm²(20Gbits/in²) recordings.

gap length: G_1	0.25 μ m
track width: T_w	0.50 μ m
throat height: G_d	1.0 μ m
yoke length: Y_1	variable
upper film thickness	3.0 μ m
lower film thickness	2.5 μ m

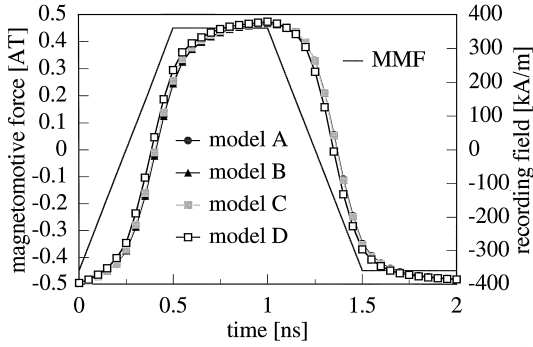


図3 モデリングによる記録磁界の時間応答の差 (500MHz, sp=30nm)

Fig.3 Write field on time for various models (500MHz, sp=30nm).

表2 材料, 周波数による表皮厚さ (単位 μm)
Table 2 Skin depth for various materials and frequency (units in μm).

material	μ_{ri}	σ [S/m]	250MHz	333MHz	500MHz	1000MHz
Ni ₈₀ Fe ₂₀	1000	20	0.45	0.39	0.32	0.26
Ni ₄₅ Fe ₅₅	1000	50	0.71	0.62	0.5	0.36

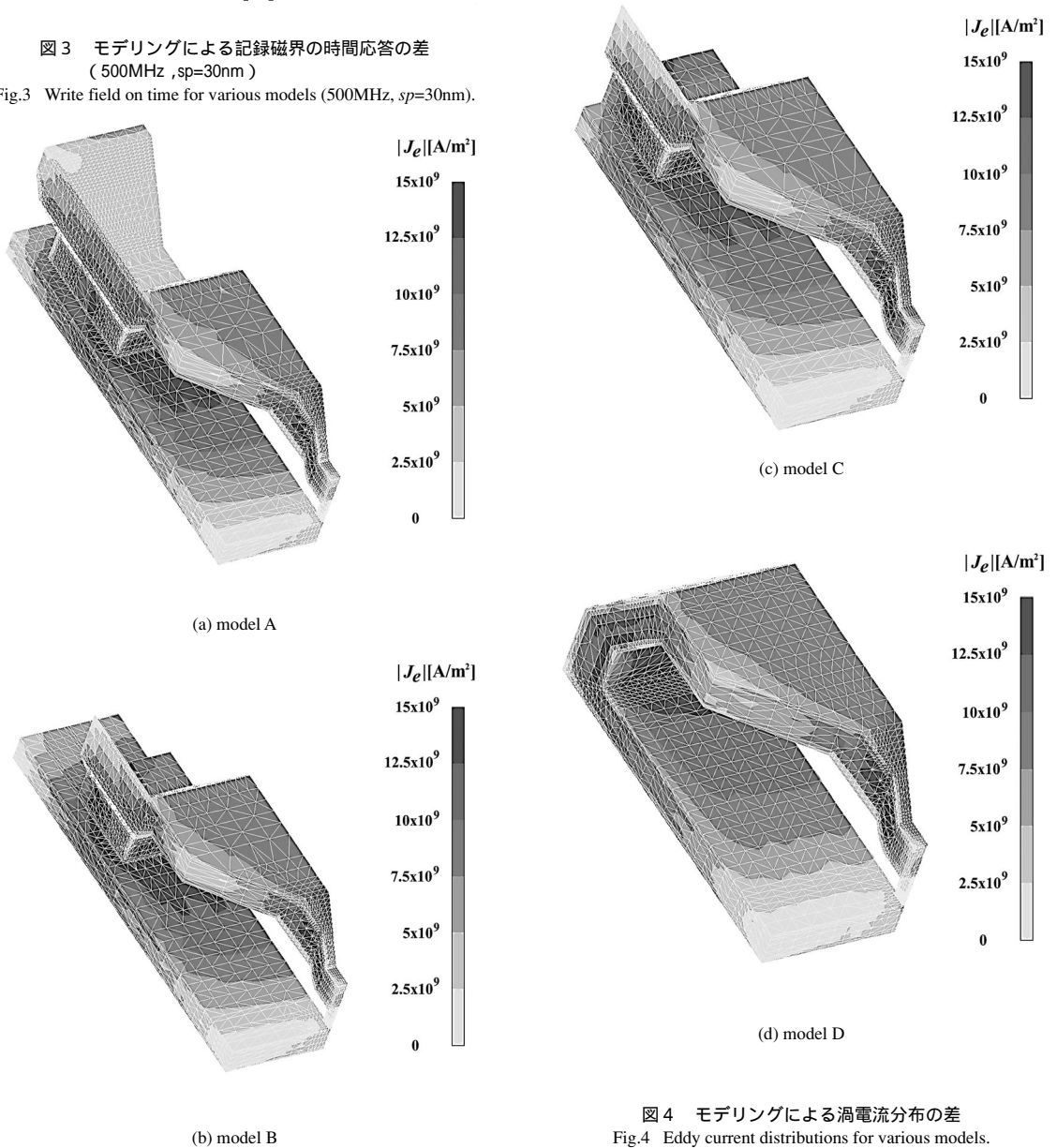


図4 モデリングによる渦電流分布の差
Fig.4 Eddy current distributions for various models.

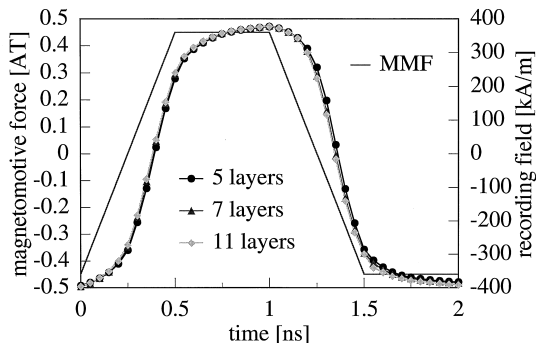


図5 ヨークの厚み方向を5, 7, 11層に分割した場合の記録電流への記録磁界の追従性 (500MHz, sp=30nm)
 Fig.5 Write field on time for models with yoke of 5, 7 and 11 layered mesh (500MHz, sp=30nm).

することとした。

以上をもとに31 ~ 155Mbits/mm²(20 ~ 100Gbits/in²)を仮定した記録ヘッドの計算を行った。

4. ヨーク長による記録磁界の記録電流への追従性

4.1 計算に用いたモデル

計算に用いたstitched構造記録ヘッドモデルは3.の図2(d)に示すモデルDであり、ギャップ近傍は同図(e)のとおりである。主要諸元は表1に記したように、31Mbits/mm²(20Gbits/in²)用の記録素子を仮定している。本モデルにおいて、記録電流に対する記録磁界の追従性を確認するため、ヨーク長を12, 20, 40, 50及び60μmと変化させて計算を行った。ただし、磁気スペーシングを30nmと仮定し、ギャップ中心軸上、ヘッド先端から30nmにおける記録磁界の面内成分を、時刻0を初期状態として求めた。また、計算で仮定した磁性材料の諸特性は表3に示すとおりである。特に断らない限り、上部及び下部ヨーク(図1参照)の材料にはNi₈₀Fe₂₀を、上部及び下部ポール(同図参照)の材料にはNi₄₅Fe₅₅を仮定した。なお、記録磁界のヨーク長依存性はこれまでも検討されている[4], [22], [23]が、本報告のようにヨーク長の範囲を広くとり、かつ記録周波数が高い場合を3次元非線形渦電流過渡解析により検討した例はない。

4.2 解析結果

図6にヨーク長をパラメータとして求めた、記録電流500MHzに対する記録磁界を示す。ヨーク長が20μmまでは記録電流に追従した記録磁界が得られるが、

表3 計算で仮定した材料とその諸特性
 Table 3 Materials and their constants used for calculations.

	Ni ₈₀ Fe ₂₀	Ni ₄₅ Fe ₅₅
B _s [T]	1	1.6
σ [S/m]	5 × 10 ⁶	2 × 10 ⁶
μ _{ri}	1000	1000

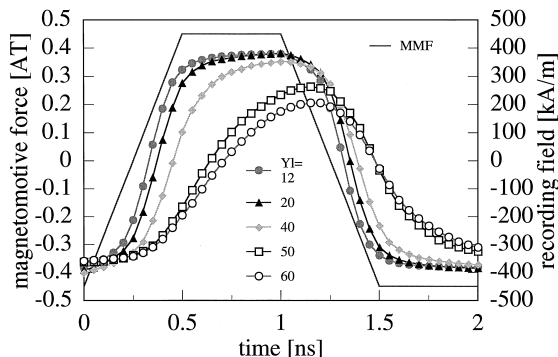


図6 ヨーク長による記録磁界の記録電流への追従性 (ヨーク長 12, 20, 40, 50, 60μm)
 Fig.6 Write field on time for various yoke length (yoke length: 12, 20, 40, 50, 60 μm).

40μmでは無視できない遅れが見られる。更に、ヨーク長が50μm以上では、記録磁界強度も低下することがわかる。ヨーク長を20μm一定とした場合の記録周波数に対する記録磁界強度に着目すると、記録周波数が1GHzでのT/4時刻の記録磁界強度(図6で0.5nsにおける記録磁界強度)は直流時の1/5程度まで低下することがわかる。一方、T/2時刻の記録磁界強度(図6で1.0nsにおける記録磁界強度)は記録周波数により大きく低下することはない。ただし、250MHz及び1GHzの記録電流は図6における500MHzのそれを時間軸方向に伸縮したものである。厳密な意味では、同じ周波数であっても記録電流が-100%から+100%に立ち上がる時間などにより、例えば「T/4時刻の記録磁界強度は直流時の1/5程度まで低下する」などの結論は違ったものになるが、ここでの議論がおおよそ成り立つことは明らかである。

図7に種々のヨーク材料に対するT/4時刻における記録磁界強度の記録周波数依存性を示す。検討した構造は、上下ポール及び下部ヨークのギャップ側に0.5μmのNi₄₅Fe₅₅薄膜を配した構造(図7中の記号L、以下同

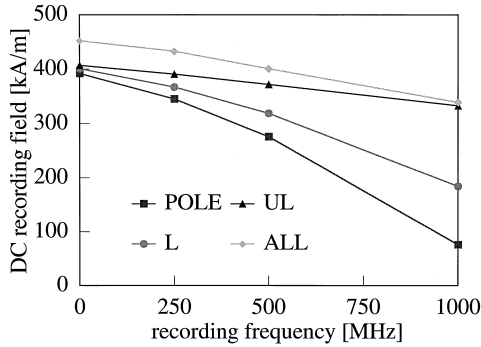


図7 種々のヨーク材料に対する T/4 時刻における記録磁界強度の記録周波数依存 (0.45AT 直流時)

Fig.7 Write field strength on frequency at time T/4 for various yoke materials (0.45AT DC).

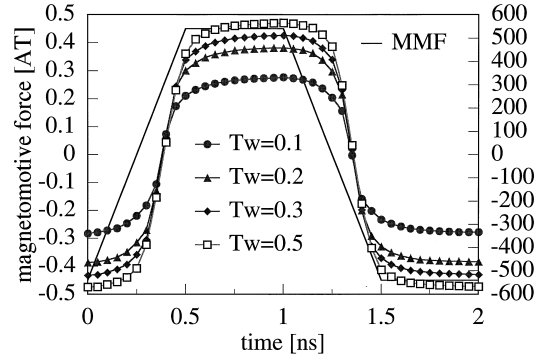


図8 記録磁界の記録電流追従性 (500MHz, $T_w=0.1 \sim 0.5\mu\text{m}$, $G_f=0.1\mu\text{m}$, $sp=10\text{nm}$)

Fig.8 Write field on time (500MHz, $T_w=0.1\sim 0.5\mu\text{m}$, $G_f=0.1\mu\text{m}$, $sp=10\text{nm}$).

様), 上下ポール, 上部及び下部ヨークのギャップ側に $0.5\mu\text{m}$ の $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ 薄膜を配した構造 (UL), ヨーク全体を $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ 材とした構造 (ALL) の 3 種類であり, 上下ポールのみ $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ 材とした場合 (POLE) と比較した。薄膜を配した部分 U, L は図 1(a) を参照されたい。図 7 からわかるように, 直流時にはギャップ側に配した $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ 薄膜の効果は見られないが, 記録周波数が高くなるにつれ, ヨーク全体が $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ の記録磁界強度に近づく。すなわち, 1GHz では渦電流の影響が顕著になり, 特に電流が立ち上がる (立ち下がる) 場合にはヨーク厚み方向の中心付近の材料による差が少なく, ヨーク表層を伝える磁束が支配的になることがわかる。

最大記録磁界 (T/2 時刻における記録磁界強度) と記録磁界の立上りそのもの (T/4 時刻における記録磁界強度) のどちらが高周波記録に重要であるか, 詳しくは実験を待たねばならない。しかしながら, $20\mu\text{m}$ 以下のヨーク長で適当な材料を選択することにより, 記録エレメントそのものは 1GHz までの記録電流に追従し, 記録磁界強度が低下しないことがわかる。

5. $31\text{Mbits}/\text{mm}^2$ ($20\text{Gbits}/\text{in}^2$) を超える密度に対する記録能力の検討

5.1 記録磁界強度のトラック幅依存性

$155\text{Mbits}/\text{mm}^2$ ($100\text{Gbits}/\text{in}^2$) 記録のトラック幅 T_w は $0.1 \sim 0.15\mu\text{m}$ と予測されている。ここでは, $31\text{Mbits}/\text{mm}^2$ ($20\text{Gbits}/\text{in}^2$) を超える面記録密度に対する記録能力を検討するためにギャップ長 G_f を $0.1, 0.2\mu\text{m}$ とし, $T_w=0.5, 0.3, 0.2$ 及び $0.1\mu\text{m}$ として狭トラック化の検討を行う。

$155\text{Mbits}/\text{mm}^2$ ($100\text{Gbits}/\text{in}^2$) 記録においても磁気スペーシング sp は 20nm 以上と予測されることから, $sp=10$ 及び 30nm の記録磁界強度を求める。ここで, 要素分割の段階で, 例えば $sp=22.5\text{nm}$ など, 所望のスペーシングで記録磁界を求め得るメッシュを作成可能であるが, $sp=10 \sim 30\text{nm}$ における記録磁界を $sp=10, 30\text{nm}$ のデータから線形補間により求めても大きな誤差は生じない。なお, 記録周波数は 500MHz に固定した。

図 8 に $G_f=0.1\mu\text{m}$, $sp=10\text{nm}$ としたときのトラック幅による記録磁界の時間変化を示す。同図からわかるように, 電流に対する追従性は良好であるが, トラック幅が狭くなるにつれ, 記録磁界強度は急激に減少することがわかる。図 9 には直流時の記録磁界強度のトラック幅依存性を示した。これから, $G_f=0.1\mu\text{m}$, $T_w=0.1\mu\text{m}$ とした場合の記録磁界強度は $sp=10\text{nm}$ で $359\text{kA}/\text{m}$, $sp=30\text{nm}$ では $279\text{kA}/\text{m}$ とどまることがわかる。したがって, $155\text{Mbits}/\text{mm}^2$ ($100\text{Gbits}/\text{in}^2$) 記録に用いられる $H_c=400\text{kA}/\text{m}$ を超える高保磁力媒体 [19] に対しては記録能力が大きな問題になり得る。なお, 2次元解析計算により得られた, トラック幅を無限大 ($T_w = \infty$) とした場合の記録磁界強度は $G_f=0.1\mu\text{m}$, $sp=10\text{nm}$ 及び $sp=30\text{nm}$ でそれぞれ, $774\text{kA}/\text{m}$ 及び $609\text{kA}/\text{m}$ であった。すなわち, $31\text{Mbits}/\text{mm}^2$ ($20\text{Gbits}/\text{in}^2$) 記録で予測されている $T_w=0.5\mu\text{m}$ では, トラック幅無限大時の 80% 程度の記録磁界が得られており, 狭トラック化の影響は深刻な問題となり得ないように思われる。

ところで, $B_s=2.1\text{T}$ なる高飽和磁束密度材料をポール及び上下ヨークに用いて, $H_c=560\text{kA}/\text{m}$ なる高保磁力媒

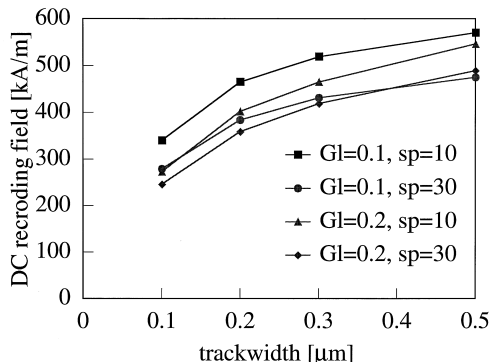


図9 記録磁界強度のトラック幅依存性

Fig.9 Write field strength on track width (0.45AT DC, $T_w=0.1\sim0.5\mu\text{m}$, $G_f=0.1, 0.2\mu\text{m}$, $sp=10, 30\text{nm}$).

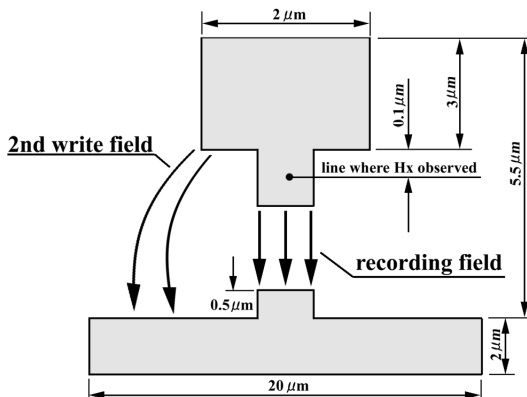


図10 ABS面から見た stitched 構造ヘッドの模式図
Fig.10 An ABS view of stitched write head.

体に記録可能である、との報告がなされた[24] .ここでは、磁性材料の飽和磁束密度の限界値とされている $B_s=2.4\text{T}$ なる材料をポールのみ、及びヨーク、ポールの全体で用いることを仮定して $T_w=0.1\mu\text{m}$, $G_f=0.1\mu\text{m}$ として記録磁界強度を計算した .得られた0.45AT直流時の記録磁界強度はそれぞれ、454kA/m、493kA/m ($sp=10\text{nm}$)、366kA/m、406kA/m ($sp=30\text{nm}$)であり、 $B_s=2.4\text{T}$ なる材料をヨーク及びポールの全体に用いても、 $H_c=400\text{kA/m}$ を超える高保磁力媒体に記録することは困難であると予想される .これに対して、文献[24]で $H_c=560\text{kA/m}$ なる高保磁力媒体に記録可能であったのは、トラック幅が広く ($T_w=1.1\sim 1.2\mu\text{m}$)、5.1の議論からわかるように、強い記録磁界が得られたことが大きな要因と考えられる .

5.2 オフトラック特性及び2次書込み

図10に、ここで検討を加えた記録素子のABS面から見た模式図を示す .同図からわかるように、一般的な stitched 構造をとっており、オフトラック方向への漏洩磁界の他に、2次書込みの影響があると考えられる .ここでは、これらを検討する .

図11に $G_f=0.1\mu\text{m}$ 、 $T_w=0.1\mu\text{m}$ 、 $sp=10, 30\text{nm}$ としたときのオフトラック特性を示す .ただし、トラック中心を $\text{location}=0\mu\text{m}$ としており、トラックエッジは $\text{location}=0.05\mu\text{m}$ の位置である .これからわかるように、トラック中心及びトラックエッジにおける記録磁界強度の面内成分は、それぞれ、359kA/m及び310kA/mである .これに対して、トラックエッジから0.01及び0.02 μm

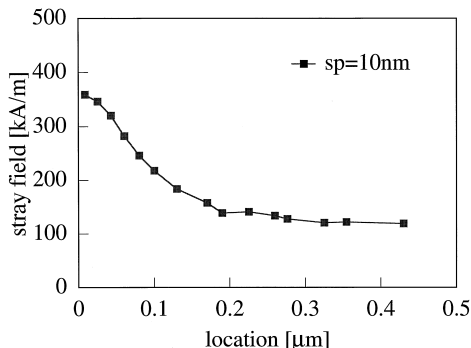


図11 Stitchedヘッドのオフトラック特性
Fig.11 Off-the-track field of stitched write head (0.45AT DC, $G_f=0.1\mu\text{m}$, $T_w=0.1\mu\text{m}$, $sp=10\text{nm}$).

オフトラック側の漏れ磁界強度の面内成分は、それぞれ263kA/m及び255kA/mであり、トラック内部の磁界強度と比べ無視できない大きさである .

次に、2次書込みの影響を検討する .図10に示すように、エッジから主ギャップ側に0.1 μm 、ABS面からの距離10及び30nmにおける線上の値を求めている .これを図12に示すが、 $G_f=0.1\mu\text{m}$ 、 $T_w=0.1\mu\text{m}$ とし、2次書込み磁界の面内成分を求めている .ただし、トラック中心を $\text{location}=0\mu\text{m}$ としており、stitched ポールのエッジは $\text{location}=1\mu\text{m}$ の位置である .これからわかるように、359kA/m($sp=10\text{nm}$)及び279kA/m($sp=30\text{nm}$)の記録磁界強度に対して、2次書込み磁界強度の最大値は240kA/m($sp=10\text{nm}$)及び181kA/m($sp=30\text{nm}$)である .2次

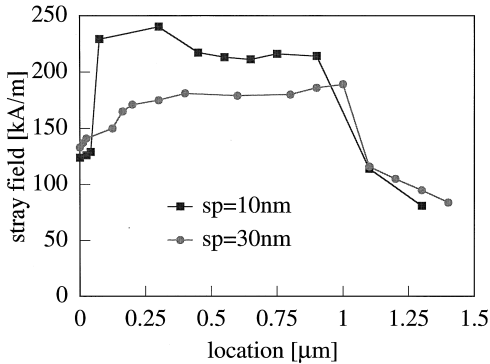


図 12 2次書き込み磁界

Fig.12 Second write field (0.45AT DC, $G_i=0.1\mu\text{m}$, $T_w=0.1\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$ from stitched edge, at distance of 10 and 30nm from ABS).

書き込み磁界については、オフトラック特性と併せて考慮する必要があるが、ABS面に2次ギャップが形成されるような構造は好ましくない。これを避けるために、既に、リセス構造が提案されている[4]が、 $T_w=0.1\mu\text{m}$ を実現するためには、更なる構造の検討が必要であるように思われる。

6. FIB trimmed ヘッドの検討

前章で述べた2次磁界の問題を避け得る、ウェーハ面からFocused Ion Beamでトラックをトリム加工(FIB trimmed)した構造[20]を仮定して計算を行う。検討した記録素子のギャップ近傍模式図を図13に示す。また、計算に用いた要素分割図を図14に示す。ここで検討したFIB trimmed ヘッドの主要諸元を表4に示す。stitched構造ヘッドも同表の諸元で計算し、比較を行った。図15に示すようにFIB trimmed ヘッド、stitched構造ヘッドのいずれも記録磁界は記録電流に良好に追従している。また、stitched構造ヘッドの直流時における記録磁界強度が361kA/mであるのに対して、FIB trimmedヘッドのそれは485kA/mと、30%以上大きな記録磁界を発生することがわかる。このように、ギャップ近傍の構造により発生磁界に大きな差があることに注目されたい。しかしながら、 $H_c=400\text{kA/m}$ を超える高保磁力媒体に記録するには、なお不十分であり、更なる検討を要する。

次に、図16に直流時のオフトラック方向の漏洩磁界を示す。同図からわかるように、トラックより外側にも強い漏洩磁界が存在し、イレース領域が広がると予想される。ただし、リセス部のエッジからの漏洩磁界は観測されない。図17には、トラック中心上の磁界

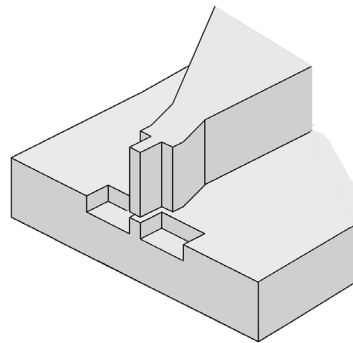
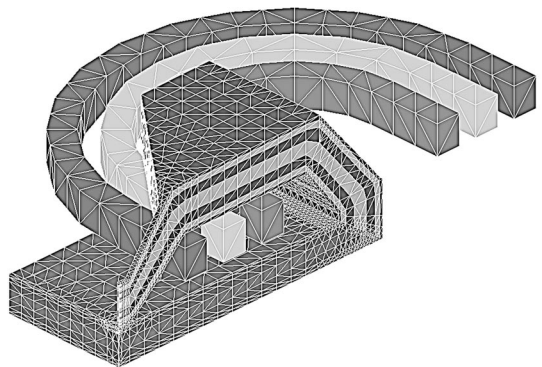
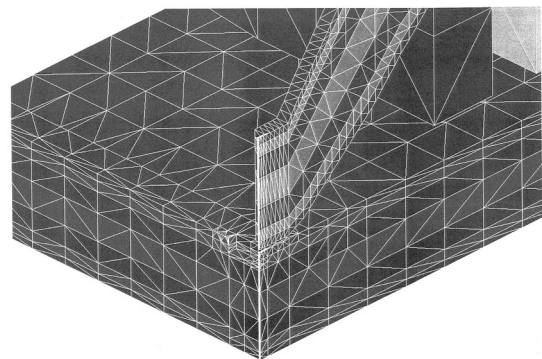


図 13 FIB trimmedヘッドのギャップ近傍模式図

Fig.13 A schematic gap region of FIB trimmed write head.



(a) general view



(b) gap region

図 14 計算に用いた FIB trimmed ヘッド要素分割図

Fig.14 Finite element mesh of FIB trimmed write head used for calculations.

を求め、いわゆるネガティブシュート[25]を検討した結果を示す。これからわかるように、上部ポール端に起因するネガティブシュート(location= $4.2\mu\text{m}$ の位置にお

表4 記録磁界の比較を行った stitched 構造ヘッドと FIB trimmed ヘッドの諸元

Table 4 Major description of stitched and FIB trimmed heads.

gap length: G_1	0.10 μ m
track width: T_w	0.10 μ m
throat height: G_d	1.0 μ m
yoke length: Y_1	20 μ m
upper film thickness	4.0 μ m
lower film thickness	3.0 μ m
yoke material	Ni ₄₅ Fe ₅₅
pole material	Ni ₄₅ Fe ₅₅

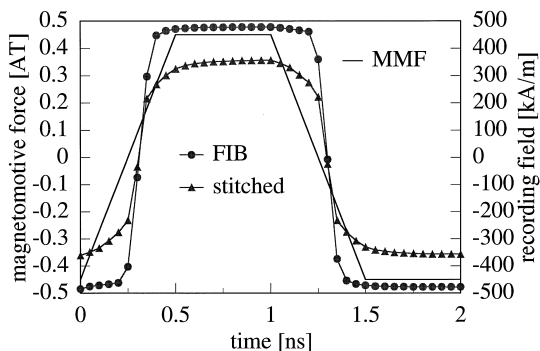


図15 stitched 構造ヘッドと FIB trimmed ヘッドの記録磁界の比較 (500MHz, $sp=10$ nm)

Fig.15 Comparison of write fields on time for stitched and FIB trimmed heads (500MHz, $sp=10$ nm).

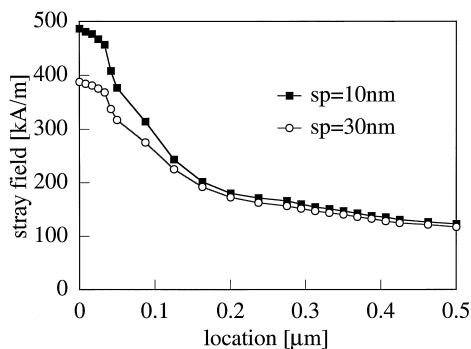


図16 FIB trimmed ヘッドのオフトラック方向の漏洩磁界 (0.45AT 直流時)

Fig.16 Off-the-track field of FIB trimmed head (0.45AT DC).

ける漏洩磁界)は大きな問題とならない。むしろ, 更に上部ヨークを絞り込み, ギャップに磁束が集中する構造が好ましいと思われる。

以上, FIB trimmed 構造は一般的な stitched 構造よりも, 強い記録磁界を発生すること, 2次磁界を避け得

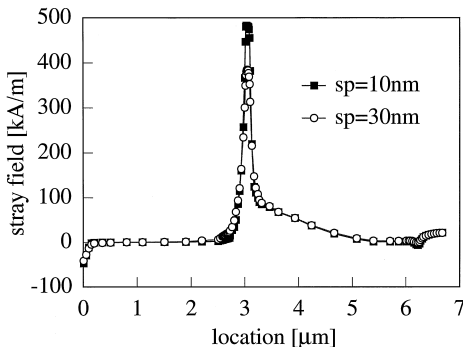


図17 トラック中心上の磁界分布: ネガティブシュートの検討 (0.45AT 直流時)

Fig.17 Write field distribution on the line of track center: investigation of negative shoot (0.45AT DC).

ることなどで有利であるが, 400kA/mを超える高保磁力媒体に記録するには, 記録磁界強度が不十分である。また, オフトラック方向の漏洩磁界が大きく, イレーズ領域が広がると予想される。今後, 材料, 構造面で更なる検討が必要であり, マクロ磁界解析計算の果たす役割が大きいのと思われる。

7. むすび

渦電流を考慮した3次元非線形過渡マクロ解析計算により, 31Mbits/mm²(20Gbits/in²)を超える記録素子の検討を行った。まず, ヨーク長が20 μ m程度であれば1GHzまでは記録磁界の絶対値が低下することなく, 記録磁界が記録電流に追従することを示した。次に, 一般的なstitched構造ヘッドを検討し, 構造に起因する2次書き込み磁界, オフトラック特性と併せて, 0.1 μ mなるトラック幅を実現する強い記録磁界を得るためには, 構造の検討が必要であることを述べた。最後に, ウェーハ面から Focused Ion Beam でトラックをトリム加工した構造を検討し, 一般的な stitched 構造よりも, 強い記録磁界を発生すること, 2次磁界を避け得ることなどで有利であることを述べた。しかしながら, $H_c=400$ kA/mを超える高保磁力媒体に記録するには, なお, 記録磁界強度が不十分である。更に, オフトラック方向の漏洩磁界が大きく, イレーズ領域が広がると予想される。今後, 材料, 構造面で更なる検討が必要であり, マクロ磁界解析計算の果たす役割が大きいのと思われる。

謝辞 本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構 (Storage Research Consortium: SRC)の補助金による。また, 非線形過渡応答解析に用いた3次元磁界解析プロ

グラム JMAG-Works をご提供頂いた株式会社日本総合研究所に深謝する。

文 献

- [1] R. E. Fontana, Jr., S. A. MacDonald, H. A. Santini, and C. Tsang, "Process considerations for critical features in high areal density thin film magnetoresistive heads, a review," *Digests of The Magnetic Recording Conf.*, F6, Boulder, CO, U.S.A., Aug. 1998.
- [2] 岩崎仁志, 福沢英明, 佐橋政司, "スピンフィルタースピンバルブ GMR ヘッド," *信学技報*, MR99-10, July 1999.
- [3] 金井 均, 金峰理明, 橋本淳一, 青島賢一, 野間賢二, 山岸道長, 上野博秋, 上原祐二, 植松幸弘, "PdPtMn/CoFeB 積層フェリスピン・スピンバルブヘッドと 20Gb/in² 記録," *信学技報*, MR99-11, July 1999.
- [4] 吉田 誠, 大池太郎, 照沼幸一, 飯島 淳, 佐々木芳高, "サブミクロントラック幅のインダクティブ/スピンバルブ磁気ヘッドのライト特性," *信学技報*, MR99-12, July 1999.
- [5] R. Wood, "The feasibility study of magnetic recording at 1 terabit per square inch," *Digests of The Magnetic Recording Conf.*, A7, San Diego, CA, U.S.A., Aug. 1999.
- [6] "シンポジウム S 1 記録ヘッドの将来技術," 21aD-1 ~ 6, 日本応用磁気学会学術講演概要集, pp.199-a ~ 204-b, Oct. 1998.
- [7] W. P. Jayasekara, M. H. Kryder, W. Weresin, P. Kasiraj, and J. Fleming, "Inductive write heads using high moment FeAlN poles," *Digests of The Magnetic Recording Conf.*, A1, Boulder, CO, U.S.A., Aug. 1998.
- [8] K. B. Klaassen, "Nanosecond and sub-nanosecond writing experiments," *Digests of The Magnetic Recording Conf.*, A3, Boulder, CO, U.S.A., Aug. 1998.
- [9] Z.-P. Shi, W. Hiebert, A. Stankiewicz, G. Ballentine, and M. Freeman, "Ultrafast laser diagnostics and modeling for high-speed recording heads," *Digests of The Magnetic Recording Conf.*, A4, Boulder, CO, U.S.A., Aug. 1998.
- [10] C. H. Back and J. Heidmann, "Time resolved Kerr microscopy: Magnetization dynamics in thin film write heads," *Digests of The Magnetic Recording Conf.*, A5, Boulder, CO, U.S.A., Aug. 1998.
- [11] 宮内貞一, 北村健一, "シミュレーション分科会レビュー," SRC 第 6 回技術報告会全体会議講演資料, Nov. 1998.
- [12] 池田文昭, "薄膜ヘッドの動磁場解析," *信学技報*, MR98-50, Jan. 1999.
- [13] 磯 浩司, 山田 隆, 河瀬順洋, "有限要素法による磁気ヘッドの磁界解析のための最適メッシュの作成," *信学技報*, MR98-52, Jan. 1999.
- [14] 亀有昭久, "辺要素有限要素法による磁気記録ヘッドの磁場解析," *信学技報*, MR98-53, Jan. 1999.
- [15] 金井 靖, "有限要素法による記録ヘッドの磁界解析," *信学技報*, MR98-54, Jan. 1999.
- [16] 藤原耕二, 高橋則雄, "有限要素法による記録ヘッド検証用モデルの三次元磁界解析," *信学技報*, MR98-55, Jan. 1999.
- [17] K. Fujiwara, F. Ikeda, A. Kameari, Y. Kanai, K. Nakamura, N. Takahashi, K. Tani, and T. Yamada, "Thin film write head analysis using a benchmark problem," *Conf. on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG)*, pp.745-746, Sapporo, Japan, Nov. 1999.
- [18] 金井 靖, "20Gb/in² 超を仮定した記録ヘッドの高周波記録

磁界解析," *信学技報*, MR99-21, Oct. 1999.

- [19] E. S. Murdock, P. J. Ryan, J. Fernandez de Castro, J. Giusti, and K. P. Ash, "Practical issues for magnetic recording heads at 100 Gb/in² and more," *IEEE Int. Magnetics (INTERMAG) Conf.*, BA-02, Kyongju, Korea, May 1999.
- [20] T. Koshikawa, A. Nagai, Y. Yokoyama, and T. Hoshino, "A new write head trimmed at wafer level by focused ion beam," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 4, pp.1471-1473, July 1998.
- [21] 田邊信二, "高周波磁気記録の数値解析法," *信学技報*, MR98-24, Oct. 1998.
- [22] M. Takagishi, K. Komaki, and F. Hikami, "The effect of yoke length on nonlinear transition shift in inductive/MR composite heads," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 5, pp.2821-2823, Sept. 1997.
- [23] 田河育也, 上原裕二, "シミュレーションによる高周波ライトヘッド設計," *日本応用磁気学会誌*, vol. 22, no. 4-1, pp.199-203, April 1998.
- [24] K. Ohashi, N. Morita, T. Tsuda, and Y. Nonaka, "Write performance of heads with 2.1-Tesla CoNiFe pole," *IEEE Trans. Magn.*, vol.35, no.5, pp. 2538-2540, Sept. 1999.
- [25] R. E. Jones, C. D. Mee, and C. Tsang, "Recording heads," in *Magnetic Recording Technology*, 2nd Edition, eds. C. D. Mee and E. D. Daniel, pp. 6.10-6.17, McGraw Hill, New York, 1996.

(平成 12 年 1 月 11 日受付, 3 月 15 日再受付)



金井 靖 (正員)

昭 57 新潟大・工・情報卒・昭 59 同大大学院修士課程了。アルプス電気(株)入社, 新潟事業部勤務。新潟大・工・助教授, 新潟工科大・工・助教授を経て, 平 11 新潟工科大・工・教授。数値電磁界解析, 熱伝導解析及び磁気記録の研究に従事。この間, 昭 61 よりアルプス電気(株)在職のまま新潟大大学院博士課程に在籍。平 1 同課程了。工博。International Compumag Society Founder Member, IEEE, 応用磁気学会, 電気学会各会員。