

# 主磁極先端励磁法による垂直磁化高速書込みヘッド

中村 慶久<sup>†</sup> 板垣 諒<sup>‡</sup> 金井 靖<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東北大学電気通信研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

<sup>‡</sup> 新潟工科大学工学部 〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋 1719

E-mail: <sup>†</sup> nakamura-kq@f3.dion.ne.jp, <sup>‡</sup> {r\_itagaki, kanai}@iee.niit.ac.jp

あらまし 主磁極先端を薄膜コイルで直接励磁する PMR 用書込みヘッドが現用ヘッドより優れた性能を持つ可能性があることを、有限要素法による電磁解析から明らかにする。とくに本報告では、一枚の薄膜コイルを主磁極膜と補助磁極で挟んだ簡略な構造で、低インダクタンスで高効率の書込みヘッドが実現できることを示す。

キーワード 垂直磁気記録、書込みヘッド、主磁極先端励磁、有限要素法、電磁解析

## High Data Rate Write Head for Perpendicular Magnetic Recording Using Main-Pole Tip Exited Method

Yoshihisa NAKAMURA<sup>†</sup> Ryo ITAGAKI<sup>‡</sup> and Yasushi KANAI<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> RIEC, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8577 Japan

<sup>‡</sup> Niigata Institute of Technology, 1719 Fujihashi, Kashiwazaki-shi, Niigata, 945-1195 Japan

E-mail: <sup>†</sup> nakamura-kq@f3.dion.ne.jp, <sup>‡</sup> {r\_itagaki, kanai}@iee.niit.ac.jp

**Abstract** PMR write heads in which a main-pole tip are directly exited by thin film coils have superior performance compared with current PMR write heads. That reason will be cleared from the results obtained by the electromagnetic simulation with Finite Element Method. In this paper, it will be also shown that a lower inductance and higher efficient write head for PMR are realized by the simple structure which is taken a thin film coil between a main-pole and an auxiliary-pole.

**Keywords** perpendicular magnetic recording, write head, main-pole tip exited method, Finite Element Method, electromagnetic analysis

### 1. はじめに

HAMR (Heat Assisted Magnetic Recording) が毎年の様に市場に出ると伝えられている中、最近では、MAMR (Microwave Assisted MR) の開発が進んでいると報じられた[1]。これらは現在市場に出ている PMR (Perpendicular MR) の書込みヘッドに能力の限界であると予測されたことから始まっている[2]。

しかし新方式の開発には年月がかかる。それに力が入られ、従来方式の開発が停滞しているため、HDD の高密度化の動きも止まっている。

これに対し筆者らは、PMR の研究開発を進めてきた経験を思い出しながら、書込みヘッドの励磁方式を変えることで、この停滞状態を少しでも前進させることが出来るのではと考え、主磁極先端を直接励磁する方式の可能性を調べてきた[3, 4]。この検討結果がほぼ結論に近づいたと考え、本文ではこれまでの結果をまとめて報告する。

### 2. 磁気記録の書込みヘッド

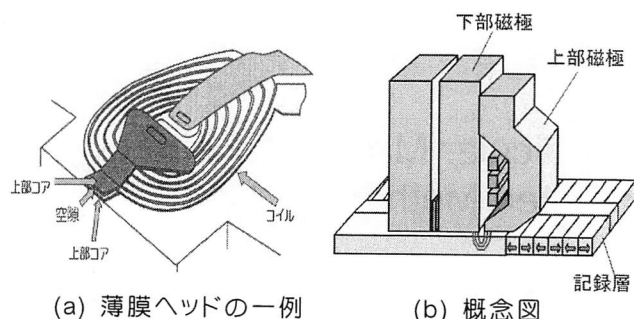
磁気記録では、長い間、環状磁心を用いるリング型

ヘッドが書込みと読出しのために用いられてきた。読出しには、MR (Magnetoresistive) 素子や GMR (Giant MR) 素子、TMR (Tunneling MR) 素子が開発され、より高感度で分解能の高いものに代わった。しかし書込みには依然としてリング型が基本になっている。

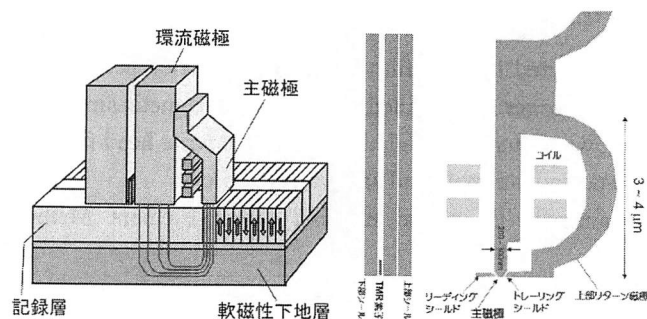
少なくとも日本におけるリング型ヘッドの発明は、鋼鉄線に音声を安定に記録することからなされた[5]。空隙を挟む N と S の両極から生じる長手成分磁界を書込みに使うためである。励磁コイルが生じる磁界でこれらの磁極を励磁するため、磁束（磁界と磁化）を誘導すると考え、環状磁心が用いられた。HDD や VTR などの誕生と共に、その構造もそれぞれの使い方に応じて変化してきたが、とくにアナログ信号記録の VTR では、書込み感度を向上させるため出来るだけ磁極先端に励磁コイルを巻く工夫がなされてきた。

一方、HDD では早くから薄膜ヘッドの開発が進み、高感度化と小型化が図られた。図 1 に薄膜ヘッドの一例とその基本構造図を示すが、これにもコイルで励磁された磁束（磁界と磁化）がヘッド空隙両端まで誘導されるとするリング型ヘッドの基本的な設計思想が引

き継がれている。磁心になる磁性膜には飽和磁束密度が大きく透磁率の高い磁性薄膜が求められてきた。2005年に、これまで長手磁化が主体であったHDDに、熱減磁の心配もなく、高密度化の可能な垂直磁化方式が採用されて市場に出た。図2は、そのときの書き込みヘッドの概念図と現在使われているものの断面図をそれぞれ示している。これらにおいてもコイルで励磁された磁心の磁束（磁化と磁界）が環流磁心を回るという概念で設計されている。



(a) 薄膜ヘッドの一例 (b) 概念図  
図1 長手磁化用薄膜ヘッド

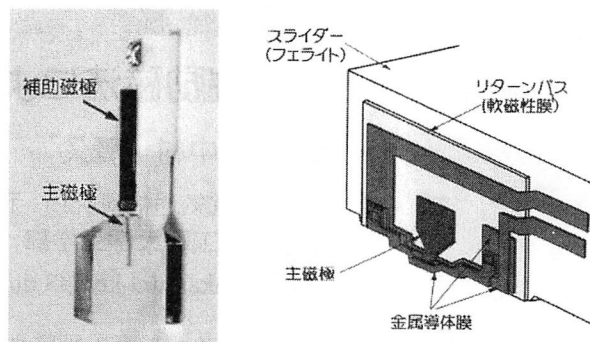


(a) 概念図 (b) 実用ヘッドの断面  
図2 垂直磁化用薄膜ヘッド

この考え方は、HAMRやMAMRの書き込みヘッドでも変わらず、この様な構造の主磁極近くに媒体へのレーザー照射やマイクロ波照射のための素子を埋め込み、弱い磁界強度でも書き込める様にするものである。

これに対して筆者は、長手磁化媒体には双磁極構造の書き込み磁気ヘッドが必要であるのに対し、垂直磁化媒体は単磁極の書き込みヘッドで書き込むことか、主磁極先端部を励磁する必要があることを、垂直磁化方式の研究当初から示してきた。

軟磁性体にコイルを巻いて励磁する磁気回路は、導電率が桁違いに大きい電気回路と違い、磁束が流れるとする考え方は危険である。コイルの発生する磁界とこれで磁化された磁性体の生じる磁界が磁気回路のどの範囲まで磁化できるかで性能が決まる。実用的に性能の良い軟磁性体も微細な磁性粒の集合体であること



(a) 補助磁極励磁型 (b) 薄膜コイル励磁型  
図3 主磁極先端励磁型書き込みヘッド

が最近の常識であるが、どの範囲にある軟磁性粒まで磁化できるかがその磁気回路の性能を決まる。とすると、書き込みヘッドで言えば、磁界を生じる磁性体部分は、双磁極であれ、単磁極であれ、書き込み磁界を発生する部分を優先的に励磁できることが重要である。

筆者は、その様な考え方で図3に示す補助磁極励磁型単磁極ヘッドを考案し、当初の垂直磁気記録の可能性を探る研究を推進してきた。このヘッドはさらに軟磁性薄膜で主磁極先端を挟む薄膜コイル励磁型ヘッドに発展して、垂直磁化方式によるHDDの実用可能性を示した。このヘッドは主磁極先端を直接励磁する書き込み効率の良さだけでなく、構造が簡単で加工し易く、何よりもインダクタンスが小さくて、高速駆動できることが特徴である。

筆者らは、昨年以來、主磁極励磁型ヘッドの可能性を現用ヘッドと比較しながら有限要素法によるシミュレーションで調べてきた[3,4]。同様のシミュレーション結果は以前も報告されているが[6]、それらの報告者の真意、あるいは上述した筆者の真意を、必ずしも考慮されずに書き込みヘッドの開発が進められ、PMRの進展を停滞させていることも考えられる。

そこで本報告では、HAMRあるいはMARMの書き込み性能の向上、それらが市場に出るまでに時間がかかる場合にはPMRやSMR(Shingled Magnetic Recording)の性能を向上させることに少しでも寄与することを念じて、これまで調査してきた結果を整理し、新たに明らかになった結果を加えて、主磁極先端励磁法の可能性を述べる。

### 3. 書き込みヘッドのモデル化と解析条件

図4は、シミュレーション計算のため、図2(b)に示した現用ヘッドをモデル化したものである。ただしここでは主磁極(Main Pole)周辺のトレーリングシールドやリーディングシールド等は除いている。

一方、図5は、主磁極先端励磁ヘッドの代表的な構

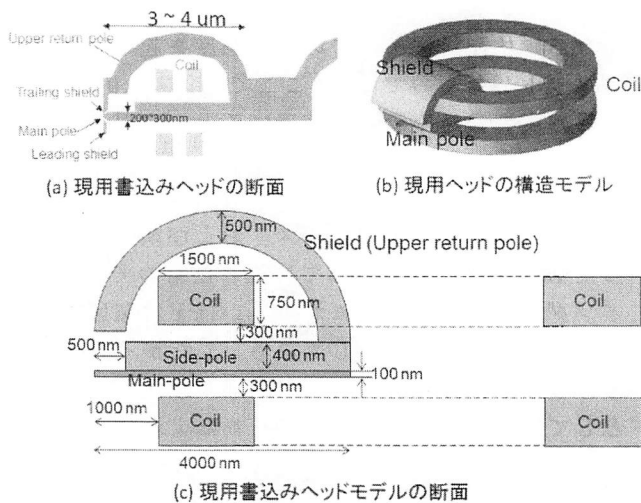


図4 現用書込みヘッドのモデル化

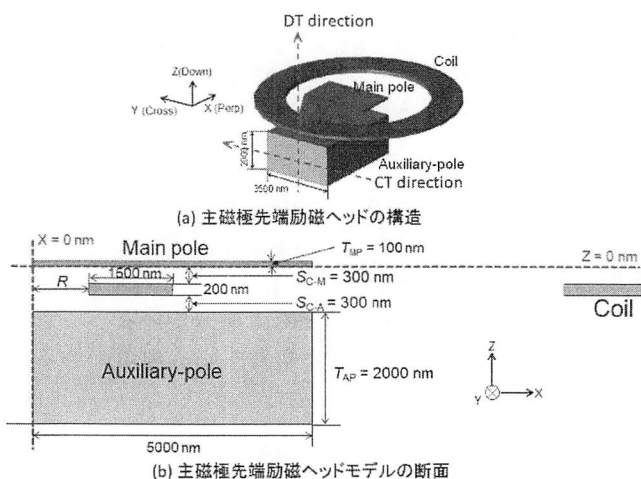


図5 主磁極先端励磁ヘッドのモデル化

造をモデル化したものである。主磁極先端付近に薄膜コイルを置き、さらにこれを効率よく動作させるため、コイルを挟んで補助磁極 (Auxiliary Pole) を置いたものである。ここでは、後述する様に、コイルの ABS (Air Bearing Surface) 面からの位置を  $R$ 、コイルと主磁極および補助磁極間の隙間を  $S_{C-M}$ 、 $S_{C-A}$ 、補助磁極の厚さを  $T_{AP}$  として、これらの影響も調べた。

図 6 は、本報告で主磁極先端励磁の可能性を調査するために想定したヘッド構造の一覧である。Model I と II は、主磁極をコイル 1 枚および 2 枚で励磁するものである。一方、Model I-A はコイルを挟んで主磁極の反対側に補助磁極を置いたもの、Model I-R は Model I-A で主磁極と補助磁極をリターンコアで結んだもの、Model II-R は Model I-R の上にコイルを置いて構造で、Model II の下部コイルを挟んで補助磁極を置いて、それを主磁極とリターンコアで結んだものである。また

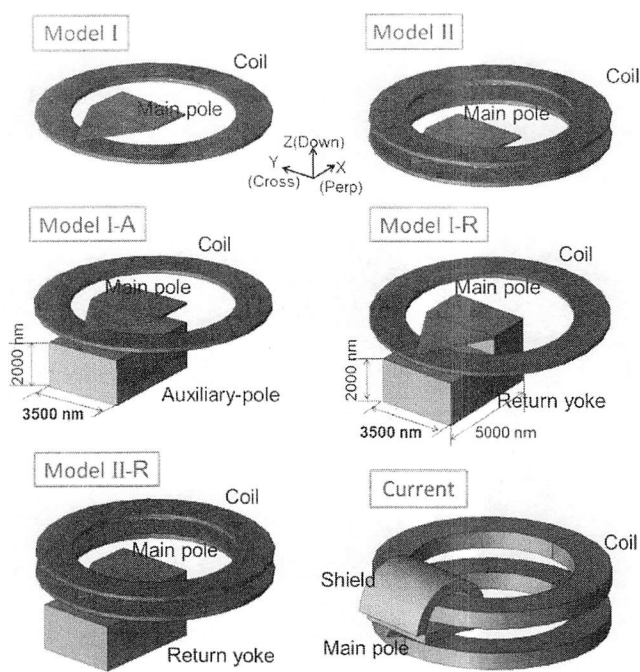


図6 解析した書込みヘッドの構造

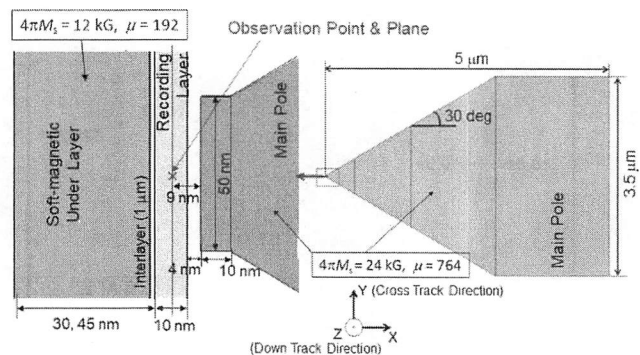


図7 解析条件

Current は現用ヘッドのモデルである。

図 7 は、シミュレーションにおける解析条件を図示したものである。シミュレーションは主に有限要素法による電磁界解析で行った [7, 8, 9]。現用ヘッド、主磁極先端励磁ヘッドを通じて、主磁極とその他磁極、記録媒体の磁気特性や幾何学的条件は同じにしている。解析では、ABS から主磁極中心直下 9 nm の磁界強度とインダクタンスを求め、必要に応じて磁力線分布やヘッド走行 (Down Track) 方向の磁界分布を求めた。

#### 4. ヘッド構造と書込み能力

図 8 は、Model I-A の構造で主磁極厚  $T_{MP} = 100$  nm、ヘッド起磁力  $mmf = 0.3$  AT の場合の DT (Down Track) 方向での磁界強度分布である。ABS 直下の 1 nm と記録層表面および中心層でのものである。また図 9 は、

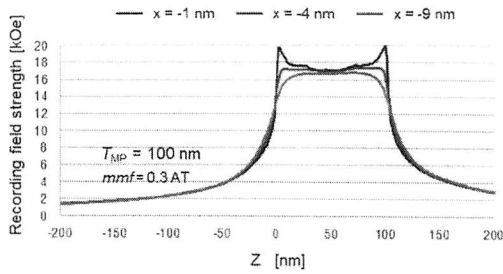


図8 主磁極先端励磁のDT方向磁界分布

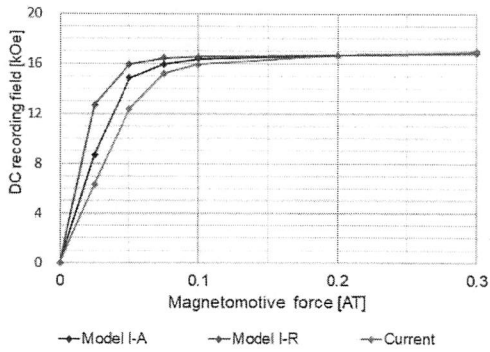


図9 起磁力 vs 記録磁界強度特性

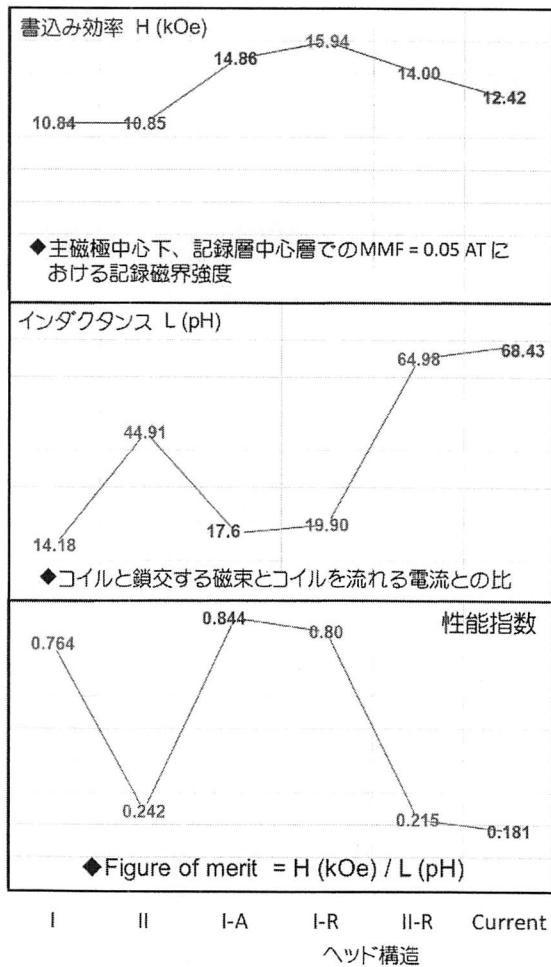


図10 ヘッド構造による性能比較

代表的なヘッド構造について、ABS直下で  $x = -9$  nmにおける媒体記録層中心での磁界強度を起磁力に対してプロットしたものである。ここで、起磁力 0.05 ATでの磁界強度を書込み効率と定義すると、主磁極先端励磁型が現用ヘッドより優れていることが分かる。

図10は、図6に示した6種類のヘッド構造について書き込み効率とインダクタンス、および前者を後者で割った  $H/L$  を性能指数として比較したものである。

インダクタンスは、これが小さいほど電気回路的に高速駆動できることを示している。したがって有限要素法による解析ではこの指数の大きいほど書き込みヘッドとして望ましいことになる。これによれば、リターンコアを設けた構造は書き込み効率は良いがインダクタンスがかなり大きくなり、高速駆動には向かないことが示されている。

### 5. 磁力線分布の比較

図11は、総合的に性能の良いことが確認できた先端励磁型ヘッドの Model I-A と現用ヘッドの磁力線分布を断面で比較したものである。現用ヘッドではコイルの磁界がサイド磁極とシールドを磁化し、主にこの中を磁力線が回って主磁極先端を励磁しにくくなっている。これに対し主磁極励磁型ではコイルの磁界が直接主磁極先端を励磁し、記録媒体の SUL (Soft-magnetic Under Layer) を通って補助磁極に戻っている。これが現用ヘッドより書き込み効率を高めている理由である。

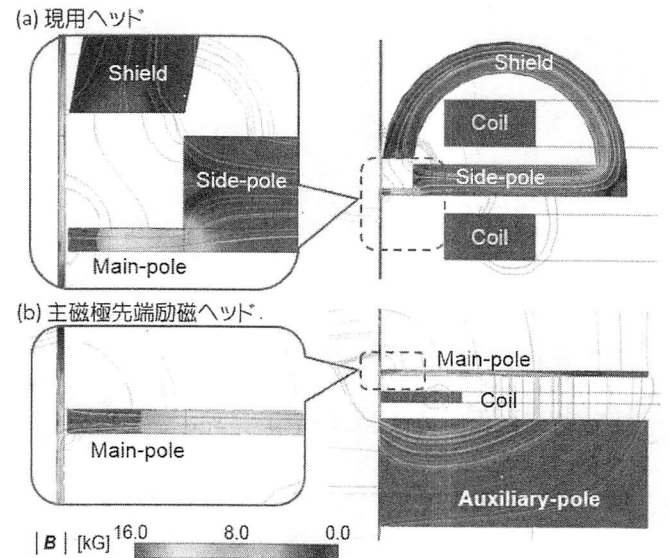


図11 現用と先端励磁ヘッドの磁力線分布

### 6. 諸パラメータの影響

これまでの検討結果から、現用ヘッドの比主磁極先端励磁型、とくに薄膜コイル一枚を主磁極と補助磁極で挟んだ Model I-A 型は構造が単純で、その結果イ

インダクタンスの小さいことで高速書込みが期待でき、書込み磁界も現用ヘッドより強くできることが、有限要素法による電磁界解析から確かめられた。

さらにここでは、この構造を実現する上で影響を与えらると思われる、①コイルの ABS からのリセス距離  $R$ 、②補助磁極の厚さ  $T_{AP}$ 、③主磁極の厚さ  $T_{MP}$ 、④コイルと主磁極との間隔  $S_{C-MP}$  などが書込み効率にどのように影響するかを調べた。

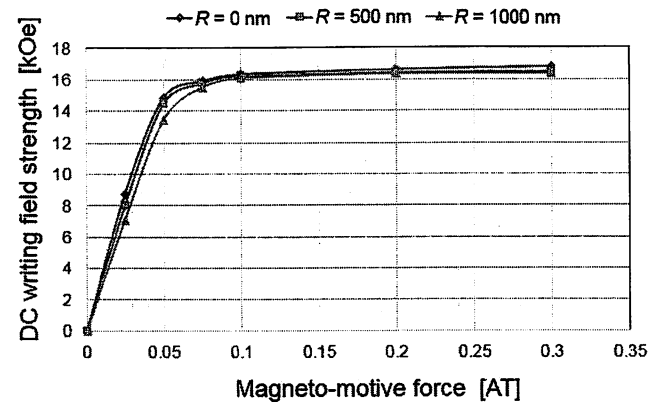


図 12 コイルリセスの影響

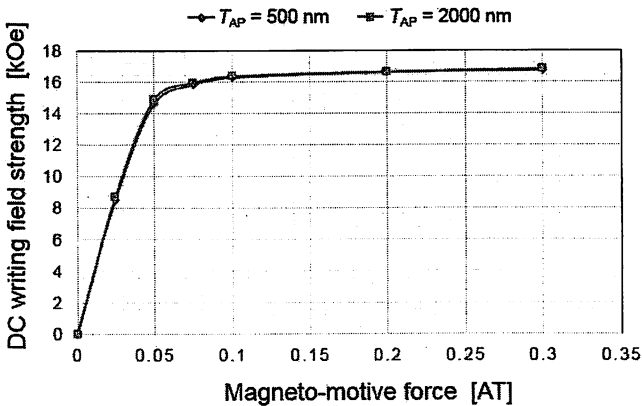


図 13 補助磁極厚の影響

図 12 は、コイルの位置を ABS からリセスさせた①の場合について、距離  $R$  に対するヘッドに加える起磁力に対する主磁極先端から記録層中心に加えられる磁界強度をプロットしたものである。 $R = 1000$  nm で若干書込み効率が低下するが顕著な差はない。図 13 は、補助磁極の厚さ  $T_{AP}$  を変えた②の場合であるが、ほとんど影響のないことが判る。

一方、図 14 は、主磁極の厚み  $T_{MP}$  を変えた③の場合で、同図上、 $T_{MP} = 50, 100, 200$  nm のそれぞれ場合の主磁極直近  $X = -1$  nm、記録層表面  $X = -4$  nm、記録層中心層  $X = -9$  nm での DT 方向での書込み磁界分布である。また図 15 は、主磁極端から  $Z = 25$  nm、DT 方向

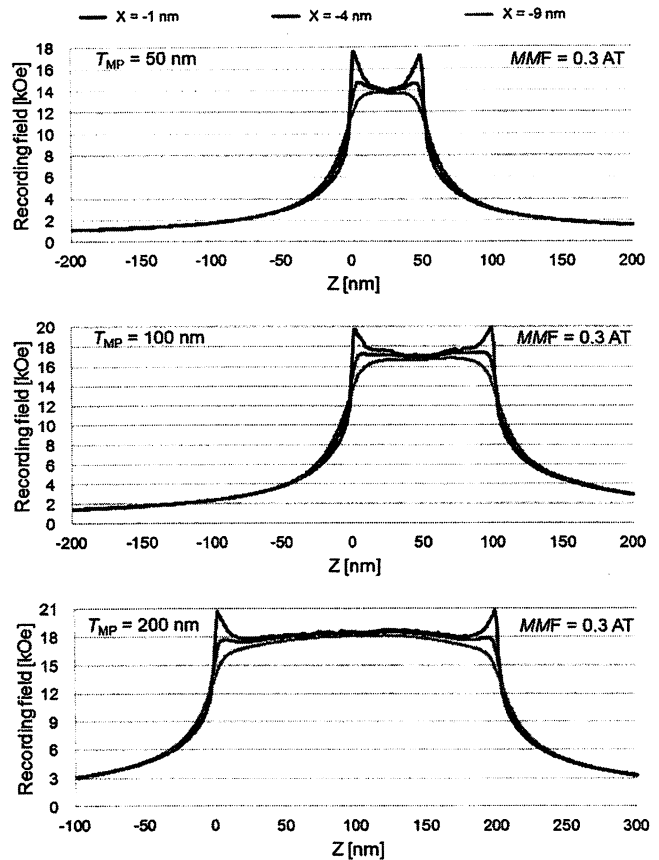


図 14 書込み磁界分布の主磁極厚による違い

で内側に入った位置での、記録層中心層における起磁力に対する書込み磁界強度の変化である。

主磁極が厚いと低起磁力時に磁界強度の増大が抑えられるのは先端部の減磁界が大きいためであり、起磁力が増し磁化が強まると、記録層の SUL との相互作用で減磁界が弱まり、発生磁界が増大する。その結果主磁極端では、膜の飽和磁束密度に近い磁界強度が発生している。さらに主磁極中心付近でも磁界強度が増して分布が幾分盛り上がり、主磁極先端部で減磁界が弱まっていることを示していると思われる。

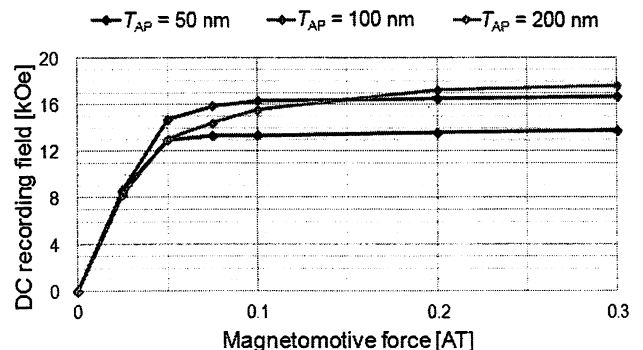


図 15 書込み磁界強度の主磁極厚依存

なお、コイルと主磁極間の間隔  $S_{C-MP}$  についての④の場合に関しては、200 nm から 50 nm まで近づけたがほとんど変わらないことが確かめられた。

つまり本解析の結果は、主磁極と SUL との静磁気相互作用以外は、ここで調査したパラメータの変動程度ではほとんど影響がないことを確認できた。また SUL の厚さについては 30 nm と 45 nm の場合で大きな違いが無いことから、むしろ ABS と SUL との間隔を左右する記録層の厚みや非磁性中間層の厚さなどの諸パラメータが影響すると思われる。

## 7. トレーリングシールドの効果

最後に、現用のヘッドで常識になっているトレーリングシールドの効果調べた。これは書き込み磁界の分布を急峻にして DT 方向の磁化分布を急峻にし、一層の高密度化をはかっているものである。現用ヘッドでは、このほかに側面にもサイドシールドを設けて、書き込みトラック幅が広がることを抑えている。

図 16 (a) はその効果を調べた全体構造、(b) はその解析のための断面図である。DT 方向のトレーリング

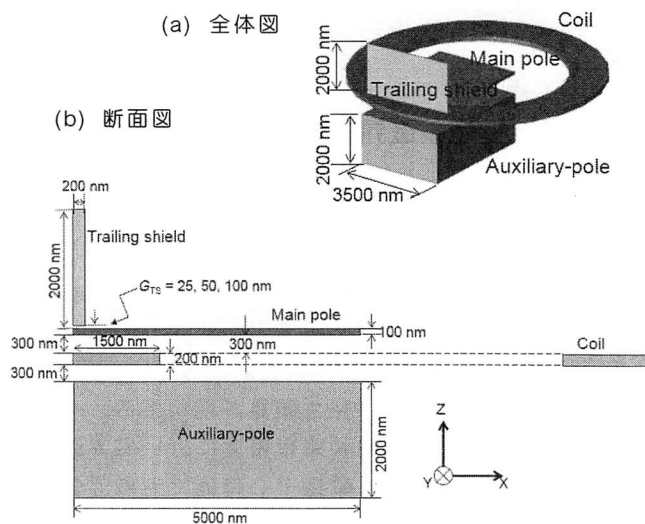


図 16 主磁極先端励磁型のトレーリングシールド

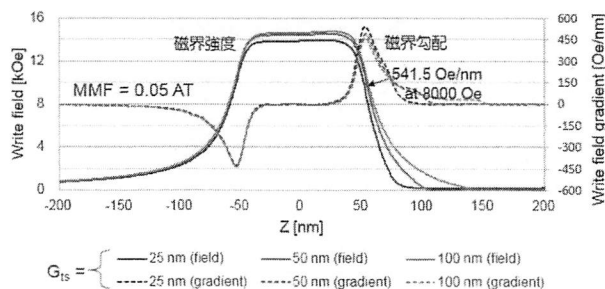


図 17 トレーリングシールドの効果

側に、幅 3500nm、高さ 2000 nm、厚さ 200 nm のシールド膜を置き、主磁極との間隔を変えて、その影響を調べた。図 17 は、その結果の一例を示したものである。シールドを主磁極に近づけるほどトレーリング側の磁界勾配が急峻になるが、書き込み磁界は弱まる傾向にあることが分かる。それでもこの計算では、保磁力 8000 Oe の記録層を勾配 541.5 Oe/nm で書き込めることを示しており、若干の高密度記録も期待できる。

## 8. むすび

筆者が、垂直磁化方式の研究開発に携わってきた経験からこだわってきた主磁極先端励磁の PMR 書き込みヘッドの可能性を、有限要素法による電磁解析で調べた。その結果、現用ヘッドより効率よく主磁極を励磁できるだけでなく、インダクタンスがほぼ 1/4 になることを確かめた。これは電気回路的には時定数を 1/4 にでき、4 倍の高速で書き込みできることを意味している。今後、マイクロマグネシミュレーションで磁気構造そのものの影響を調べることも必要かと思われる。

本報告では、株式会社 JSOL にご提供いただいた磁界解析計算ソフトウェア JMAG を用い、本研究の一部は、情報ストレージ研究推進機構 (Advanced Storage Research Consortium: ASRC, Japan) の補助金によっている。ご協力いただいた皆様に深謝する。

## 文献

- [1] 例えば、<http://www.gdm.or.jp/pressrelease/2017/1012/239073/>.
- [2] J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang, "Microwave assisted magnetic recording," IEEE Trans. on Magn., vol. 44, no. 1, pp. 125 - 131, Jan. 2008.
- [3] 中村、板垣、金井、FEM 解析による高速書き込み用 PMR ヘッドの可能性の検討、信学技報、MR2017-6、pp. 41 - 46、June 2017.
- [4] 中村、金井、板垣、垂直磁気記録用書き込みヘッドの性能改善に関する二三の考察、信学技報、MR2016-37、pp. 45 - 50、Dec. 2016.
- [5] 永井、五十嵐、磁気録音法とその応用について、電信電話学会雑誌第百三十一号別冊、pp.113-118、昭和九年二月。
- [6] 田村、金井、山川、吉田、Greaves、村岡、シールドプレーナー型ヘッドによる高転送レート記録の検討ー主磁極先端形状とシールド構造ー、信学技報、MR2012-22、pp.25-30、Dec. 2012.
- [7] <https://www.jmag-international.com/index.html>
- [8] たに、山田、河瀬、有限要素法による磁気ヘッドの磁界席のための最適メッシュの作成、信学技報、MR98-52、pp. 29 - 35、Jan. 1999.
- [9] JMAG マニュアル、コイルインダクタンス実行手順、mk:@MSITStore:C:\Program%20Files\JMAG-Studio 10.0\Help\ja\Studio.chm::/StudioHelp.htm