

垂直磁気記録媒体の評価・解析技術

Evaluation and Analysis Techniques for Perpendicular Magnetic Recording Media

林 崇 Takashi Hayashi 門田 良一 Ryouichi Kadota 林 善智 Zenchi Hayashi

ハードディスクドライブ（HDD）の高容量化は磁気ヘッドや磁気記録媒体に代表される記録再生部品の発展に加えて、信号処理技術やトラッキング技術などのドライブ技術の発達との相乗効果によって成し遂げられている。垂直磁気記録媒体では、低周波数領域まで含めた R/W 特性が重要である。また、高密度記録化に備え、約 1.3 nm までのトラッキング精度を実現している。これに加えて、サイドシールドヘッドで生じるサイドシールド近傍の記録磁化の乱れを可視化して評価を行い、媒体層構成の最適化で改善を確認している。

Hard disk drives have come to have large capacities as a result of the synergy between the evolution of recording and playback components, as represented by the magnetic head and magnetic recording media, and the advances in signal processing technology, tracking technology and other drive-related technologies. With perpendicular magnetic recording media, Read/Write characteristics, including those of the low-frequency region, are critically important. Also, the realization of tracking precision of up to approximately 1.3 nm paves the way for higher density recording. Additionally, disturbances in the recording magnetization in the vicinity of the side shield of the side shield head were visualized and evaluated to optimize the configuration of the media layer and to mitigate the disturbances.

1 まえがき

ハードディスクドライブ（HDD）の記録容量は、年率約 40% と大きく増え続けている。これには垂直磁気記録方式が実現化されたことはもとより、次に示すさまざまな技術が寄与している。磁気記録媒体における磁性粒の微細化などによるメディアノイズ低減と線記録密度の向上をはじめ、書き込み磁極を狭めるなどの磁気ヘッドの発展、磁気スペーシング（磁気ヘッドと磁気記録媒体の磁性層との距離）の低減に代表される HDI（Head Disk Interface）技術の向上がある。さらには、HDD におけるトラッキング技術（ヘッド位置決め技術）や信号処理技術など、多岐にわたっている。磁気記録媒体の高密度化に伴い、磁気記録媒体特性評価においても新技術を必要としてきている。本稿では、富士電機における電磁変換特性に関する評価・解析技術の開発状況について紹介する。

転させた領域が不安定になるという弱点があった。これに対して垂直磁気記録方式では磁化反転させ、隣のビットと反対向きの磁化になると、隣のビットからの磁場と自身の磁化の向きが同じとなる。そのため、垂直磁気記録では、磁化反転させた領域の間隔が狭いほど安定するという特徴がある。この特徴によって、高密度記録では垂直磁気記録の方が有利となる。

垂直磁気記録方式を採用することにより高密度記録時の安定性問題が軽減できた。このことにより、磁気記録媒体の記録層の磁性粒径またはそのばらつきに起因するジッタ（信号揺らぎ）の低減が、さらなる高密度化への次なる主な課題とされている。そのため、垂直磁気記録媒体においては、一般的にジッタと関係の深い高密度記録時の SNR（信号対雑音比）が重視される。

HDD の記録容量を向上させるため、記録コードの改良もなされてきている。一般にデジタル通信では、DC 信号をそのまま伝送することができないので、連続して同じ符

2 電磁変換特性の評価技術

2.1 垂直磁気記録再生における信号品質の評価

HDD の記録再生に関する近年の最も大きな変化は、何といっても垂直磁気記録方式が長手磁気記録方式に取って代わったことである。

高密度の記録を可能とするためには、ビット間の距離を短くすることによって線記録密度を上げることが必要となる。図 1 は長手磁気記録方式と垂直磁気記録方式におけるお互いに異なる向きで隣り合う二つの磁化の相互作用を比べたものであり、遷移部左の磁化から生ずる磁場と右の磁化との関係を示している。長手磁気記録方式ではビット間の距離を短くすると、隣のビットからの磁場と自身の磁化の向きが逆となる。そのため、長手磁気記録では、磁化反

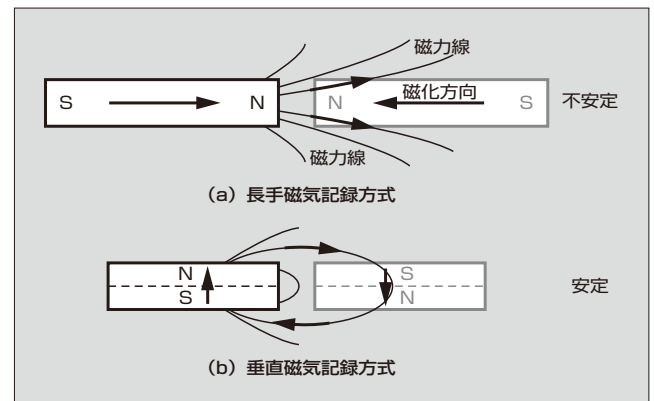


図 1 長手磁気記録方式と垂直磁気記録方式における相互作用の違い

号が続くことに制限を加えた信号変調が行われている。その制限を厳しくして、同符号間隔が短い信号に変調すると冗長性が増し、伝送速度の低下につながる。近年の伝送速度の向上には、同符号間隔の制限を緩めて冗長性を減らした信号が扱えるようになってきたことが大きな役割を果たしている。HDD における磁気記録再生信号においても、磁気記録媒体に実際に記録するデータの冗長性を減らす取組みがされ、より長周期の信号成分を含む記録コードが採用されてきている。しかし、長周期信号記録は垂直磁気記録にとって困難な課題であるため、先の記録密度向上の取組みに加えて長周期信号記録性能との両立が求められる。

磁気記録媒体における長周期信号記録性能は、一般に Reverse Overwrite (ROW) で評価される。ROW とは高密度の記録に低密度の記録を上書きしたときの、元の記録信号強度と消し残り信号強度との比である。ROW の値が高いほど“記録しやすい”ことを意味している。ただし、ROW は“記録しやすさ”の評価はできても実際の記録再生性能を示す指標には必ずしも結びつかない。また、磁気記録媒体の設計においては、ROW を向上させようとすると面記録密度低下に結びつく書き込み幅 (MWW : Magnetic Write Width) と呼ばれる記録信号の幅の増大を伴い、このトレードオフが高密度記録に向けた媒体設計の最適化を難しくしている。このように現在の磁気記録媒体では、さまざまな特性が複雑に相関しており、高密度化に向けた技術開発の方向性も簡単に見いだせなくなっている。

そこで、的確な開発の方向性を与えるために、実際の HDD での記録再生特性を前提として、媒体特性評価の妥当性の向上を目指し、富士電機は現在以下の媒体特性の評価を行っている。

まず、単独トラックでの記録再生性能は、次の三つの特性に着目して評価している。

(a) MF-SpiSNR

最高記録周波数の 1/2 の周波数における信号—ノイズ比で、値が高いほど高密度記録が可能

(b) ノイズスペクトルに重みづけをした SNR

HDD 内での信号処理を想定したもの⁽²⁾

(c) 長周期信号記録時の SNR

図 2 は、実験用の磁気記録媒体を用いて、SNR の記録周波数依存性を測定したものである。高周波側の SNR は

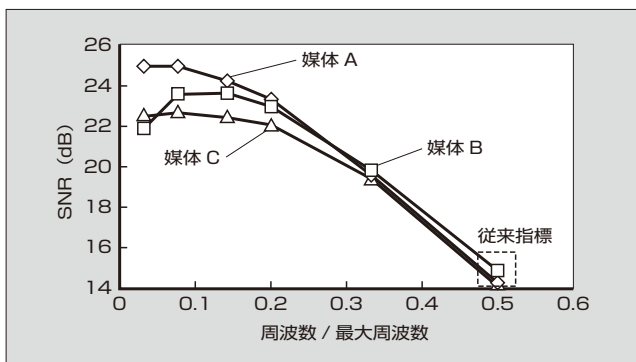


図 2 SNR 周波数特性 (横軸は最大周波数で規格化)

長手磁気記録方式でも重視されてきた特性で、媒体に記録、再生する磁化の分解能に直結する。いずれの媒体においても、高周波側で SNR が低下しているのは、主として高密度記録された信号が再生される際に、異符号の信号が干渉し合うことに起因する。低周波側の SNR は、長周期記録にかかわる特性である。

前述したように、垂直磁気記録方式では、長周期記録特性は低下しやすい傾向がある。HDD によって必要とする周波数帯域は異なるが、近年、長周期記録特性の向上のため低周波側までの記録性能が、要求されるようになってきている。実際の HDD では全帯域での記録再生性能が求められるため、磁気記録媒体の SNR の総合的指標として、周波数ごとに重みづけ加算した SNR を定義して評価するようにした。表 1 は、図 2 に掲載した媒体 A から C に対し、従来の評価基準での評価結果および新たな評価指標での評価結果と HDD 特性結果との関係を示す。従来の評価基準 (MF-SpiSNR) では媒体 B が SNR が大きく、最も高特性の媒体に見える。一方、新たな評価基準 (周波数ごとに重みづけ加算した SNR) で比較した場合、媒体 A が最も高特性媒体と判断され、実際の HDD での特性順位と一致している。図 2 から分かるように、HDD 特性で最高の記録再生性能が得られた媒体 A は、媒体 B に比べて高周波 (短周期) 記録時の特性が劣って見えるものの、低周波 (長周期) 記録時の特性が優れているものである。このように、HDD 特性の向上につなげるための媒体特性の評価としては、低周波側までの記録性能も考慮することが有効であるといえる。

2.2 トラックピッチの評価

単独トラックでの記録再生性能の評価と合わせて重要なのが、トラックピッチの評価である。現在の HDD では磁気記録媒体と磁気ヘッドとの組合せで、線記録密度とトラック密度がともに最適化されることによって高密度記録を実現している。高密度記録用媒体の評価においても、トラック密度を見積もるための評価は重要性を増している。

従来、トラック密度を見積もるための評価として、書き込み幅の評価を行っていた。書き込み幅は、1トラックに信号を記録した際に、実際に磁化反転した平均的な幅を表す量である。これは、実際の HDD で実現できるトラック密度に深くかわる値である。しかし、書き込み幅を用いた評価では磁化反転される領域と元の記録を維持する領域との境界、すなわち書きにじみが評価されない。そのため、場合によっては書き込み幅が低減されたと評価された媒体が、実際の HDD での評価では、トラック密度が向上していない

表 1 図 2 の媒体に関する特性評価値と HDD 特性結果の関係

媒体	HDD 特性順位	周波数積算 SNR (新評価指標)	MF-SpiSNR (従来指標)
媒体 A	1	19.7 dB	14.3 dB
媒体 B	2	19.5 dB	14.9 dB
媒体 C	3	18.8 dB	14.1 dB

といったことがある。磁気記録媒体の評価においても、書き込み幅とともに実際のHDDにおけるトラックピッチの決定方法に準じたトラックピッチの評価方法を採用して開発を行っている。

図3は、実験用の磁気記録媒体について書き込み幅および書きにじみも考慮したトラックピッチを評価した例である。媒体Cは磁性層の膜厚を調整して保磁力のみ変更した媒体群を示す。媒体AないしBでは書き込み幅より大きなトラックピッチを必要とすると評価されるのに対して、媒体Cでは書き込み幅とほぼ同じトラックピッチを実現できると評価される。書きにじみを考慮したトラックピッチ評価で求められたトラックピッチは、HDDで実際に設定されるトラックピッチともよく対応している。現在は、先の信号評価と合わせて実際のHDDと対応がとれるパラメータの評価として重視している。

実際のHDDのトラック密度向上には、書き込み幅の低減だけでなく、トラッキング精度の向上も大きく寄与している。磁気記録媒体の評価においても、従来の評価装置では実現困難な高いトラッキング精度が求められるようになった。富士電機では、再現性が高くヘッド位置の微調整が可

能な piezoアクチュエータによる駆動の採用と統計的手段との併用により、評価精度を1.3nmまで向上させることで、実際のHDD並のトラッキング精度を実現している。

図4は、近年のトラック密度の推移と求められるトラッキング精度を示したものである。今後、トラック密度が著しく高くなると、現状のグラニューラーサイズ（磁性層の結晶粒径、約4~6nm）を大きく下回る数nmのトラッキング精度が必要となり、2013年には1nmのトラッキング精度が求められる見通しである。このことは、グラニューラーサイズが線記録密度だけでなくトラック密度向上の妨げにも大きくかかわってきていることを示しており、微細化がますます重要性を増してきているといえる。

2.3 そのほかの電磁変換特性の評価・解析技術

電磁変換特性に関する評価の一つに、現在の磁気ヘッドで主流となっているサイドシールドヘッドにかかわる評価がある。サイドシールドヘッドでは、主磁極からの磁場による書き込み幅の広がりや抑制される。しかし、図5のように、数トラック離れた位置にあるサイドシールドへ引き込まれる戻り磁場によって、その近傍の磁化が乱されるサイドトラックイレース（STE）という現象があり、これを的確に評価しなければならない。

図6は、全面がDCイレースされた磁気記録媒体に1トラック分の矩形（くけい）信号を記録し、トラック間方向にヘッドを移動しながら再生信号波形を取得することによってSTEを視覚化したものである。センタートラックから離れた位置で、逆向きに磁化されている様子が映

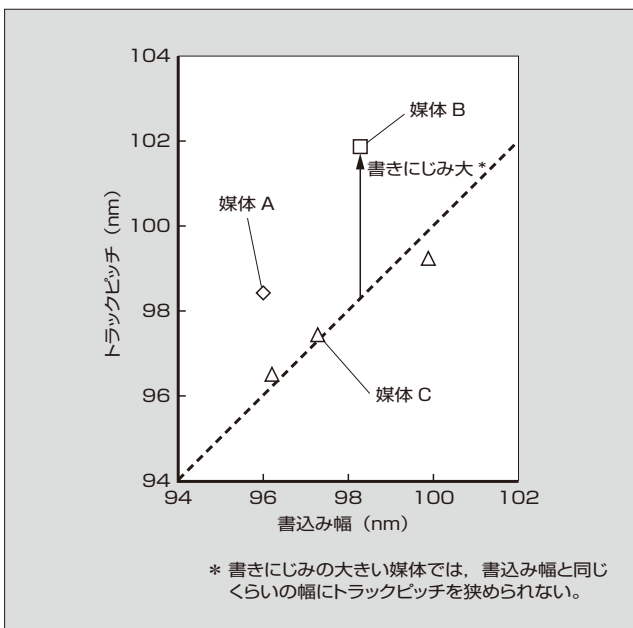


図3 媒体による書き込み幅とトラックピッチの関係の違い

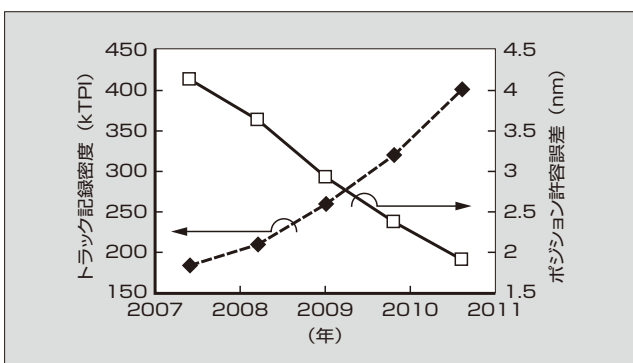


図4 トラック密度の推移と必要なトラッキング精度の推移

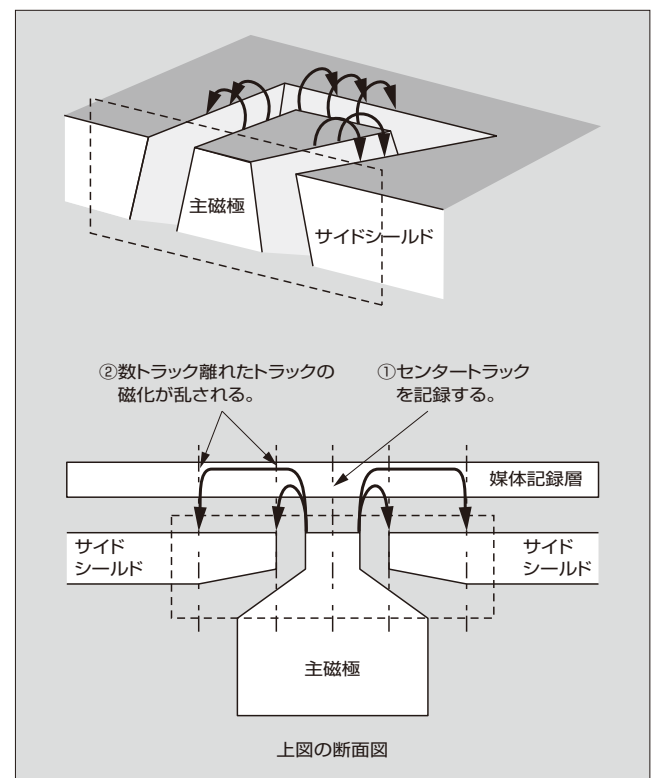


図5 サイドシールドヘッドでの磁束の流れとサイドトラックイレース (STE)

し出されている。実際の垂直磁気記録の HDD では、全面を DC イレースされた状態で使用されることはないため厳しい条件の評価である。磁気記録媒体の信頼性向上のために評価しなければならない特性である。このような STE 現象は、磁性層の磁気特性だけでなく、軟磁性裏打ち層 (SUL : Soft Under Layer), その上の非磁性中間層を含めた磁気記録媒体全体の層設計によって定まる磁路によっても左右される。また、STE 現象の評価は、隣接トラックにおけるサイドイレース評価とは異なる傾向を示すことも多く、磁気記録媒体の層構造最適化における最注力点の一つとして改善を進めている。

高密度記録を達成するには、この STE 対策のほかに、サイドトラックに記録された磁化から発する磁場の重畳をできるだけ抑制することが必要である。これも SUL の性質が深くかかわっている。

図 7 は、センタートラックに記録した信号について、トラック間方向にヘッドを移動させながら再生信号強度の変化をとったものであり、図中矢印で示した信号強度がトラック間干渉の程度を表す。センターから離れたところで信号が残ってしまうことは、信号再生時に異なるトラックからの信号が重畳してしまい、結果として記録密度を上

げにくくなることを示している。トラック間方向に信号が残ってしまうのは、媒体に記録された磁化から発生する磁場がトラック間方向に広がってしまうためである。これは SUL の磁気特性 (特に磁気異方性) に左右される。実線は良好な特性を示すものに対して、破線は SUL 特性に問題があってトラック間干渉を悪化させてしまう磁気記録媒体に見られる現象である。このような特性は、特に低密度記録を行ったときほど SUL 異常媒体でトラックセンター遠方での信号減衰が起こりにくくなることが分かっており、このことを利用して SUL 異常検知手段として導入している。

3 今後の取組み

今後の HDD では、線記録密度の向上よりもトラックの高密度化がより加速していくと予想される。また、現在研究段階である Shingled-Write Recording (瓦書き記録) 方式が実現される日もそう遠くないであろう。これらの技術ではトラッキング精度の向上が最大の鍵である。Shingled-Write Recording 方式の評価では、トラッキング精度を高めた上で一方向に重ね書きされた信号が評価される必要があり、トラック間干渉評価も従来の考え方の延長線での適用は難しい。Shingled-Write Recording をシミュレートしたエラーレート評価や、その先の技術として提唱されている二次元記録再生に必要な要素技術をにらみながら、それらと対応がとれ、より高速に測定可能な評価手段を検討している。

4 あとがき

HDD の大容量化は、高密度記録を可能とする磁気記録媒体、磁気ヘッドの発達とともに信号処理技術、トラッキング技術などドライブ技術の発展が加わって進んでいる。さらなる HDD の大容量化の実現に向けた媒体を提供し続けていくため、最新ドライブ技術を取り入れつつ、評価・解析技術の高度化を進めて高密度記録媒体の開発を行っていき、ストレージの大容量化と、その安定生産に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Alexander Taratorin, Magnetic Recording Systems and Measurements, Guzik Technical Enterprises.
- (2) 及川忠明ほか. ガラス垂直磁気記録媒体. 富士時報. 2008, vol.81, no.4, p.270-274.

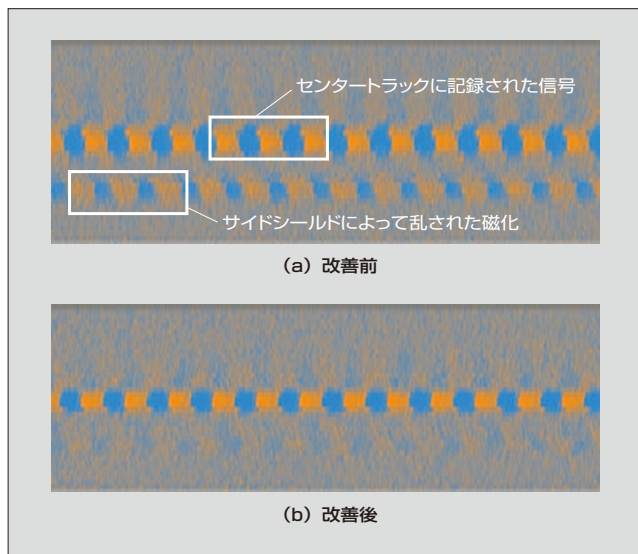


図 6 視覚化した STE (サイドトラックイレース)

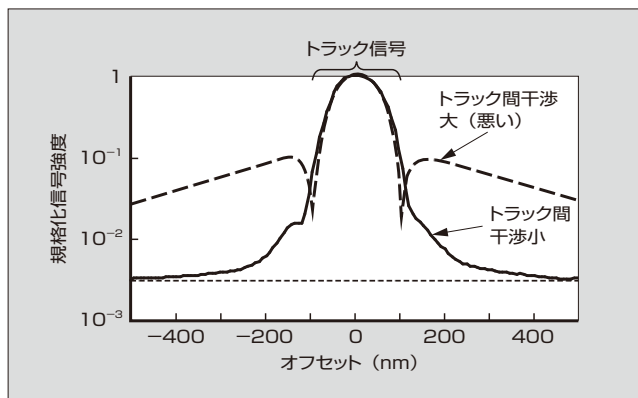


図 7 トラック間干渉評価例



林 崇

電流センサ、パワー半導体デバイスの開発、磁気記録媒体の開発・設計に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社営業・開発統括部設計部。博士 (工学)。日本物理学会会員。



門田 良一

磁気記録媒体の開発・設計に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社営業・開発統括部設計部課長補佐。



林 善智

半導体デバイスの研究・開発，磁気記録媒体の開発・設計に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社営業・開発統括部設計部課長。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。