新しい高密度記録技術 ――エネルギーアシスト磁気記録媒体――

New High Density Recording Technology: Energy Assisted Recording Media

稲葉　祐樹 Yuki Inaba　　中田　仁志 Hitoshi Nakata　　井上　大輔 Daisuke Inoue

次世代高記録密度技術の一つであるエネルギーアシスト磁気記録方式は，室温で信号の書込みが困難である記録層に外部からエネルギーを付与し，低い磁場でも書込みを可能にする方法である。富士電機は，次の二つの方法を検討している。熱源としてレーザ光を使った熱アシスト磁気記録では，SNR が約 3 dB 向上するという原理検証を行った。熱アシスト向け材料では，Co 系材料で保磁力の温度勾配を従来の－15 Oe/K から－85 Oe/K に向上させることに成功した。マイクロ波アシスト磁気記録では，Co-Pt 系材料の Pt をほかの元素で置換した，ダンピング定数の小さな材料の開発を進めている。

Energy assisted recording, is a next-generation high-density recording technology. This method enables writing even in the case of a low magnetic field by providing external energy to a recording layer, onto which the writing of signals has been difficult at room temperature. Fuji Electric is evaluating two methods of energy assisted recording; thermally assisted magnetic recording and microwave assisted magnetic recording. With thermally assisted magnetic recording using laser light as a heat source, an approximate 3 dB improvement in the SN ratio was confirmed and the inherent feasibility was verified. As material for this application, the coercive force temperature gradient of Co-based materials was improved to –85 Oe/K from the prior value of –15 Oe/K. With microwave assisted magnetic recording, the Pt in Co-Pt was replaced with another element, and a material having a low damping factor is being developed.

1　まえがき

われわれの身の回りでは，映像や音楽をはじめさまざまな情報が日々爆発的に増加している。それらの情報を蓄えるため，ハードディスクドライブ（HDD）に搭載される磁気記録媒体の記録密度は，年率約 40% の急ピッチで増加している。2010 年中に，記録密度は研究レベルでは，1 Tbits/in^2（3.5 インチハードディスク 1 枚当たり約 1.3 TB に相当）を超えると見込まれている。

1 Tbits/in^2 を超える記録密度を実現するには，媒体ノイズの低減，記録した情報の熱安定性（長期信頼性）の向上，書込み容易性の確保という互いに相反する“トリレンマ”の関係を克服しなくてはならない[(1)]。特にノイズの低減と熱安定性の向上は，媒体の保磁力 H_c の増大を招く。H_c が現行の磁気記録ヘッドが出し得る最大の磁界を超えてしまうと，信号を書込むために必要な磁界が足りず，信号品質が劣化してしまう。

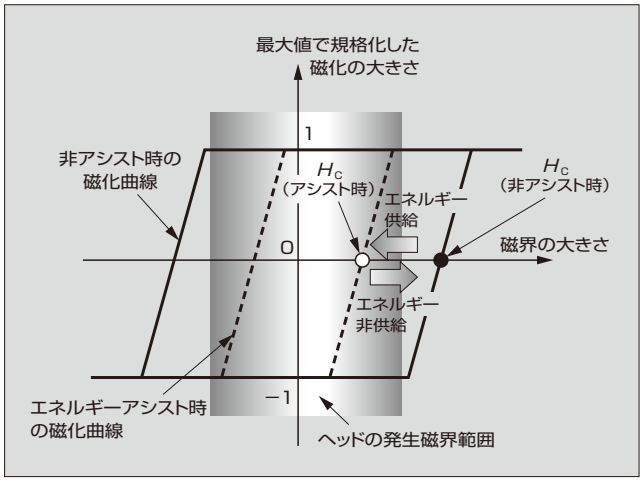

図 1　エネルギーアシスト磁気記録の概念

この課題に対し，**図 1** に示すように何らかの形で外部からエネルギーを与えて信号書込み時の H_c を小さくして信号書込みをアシストし，書込み容易性を向上させる，エネルギーアシスト磁気記録方式が盛んに検討されている。その中でも，本稿では熱アシスト磁気記録およびマイクロ波アシスト磁気記録について紹介し，書込み容易性の向上を主眼においた富士電機における媒体開発の現状を紹介する。

2　熱アシスト磁気記録媒体

2. 1　概　要

磁気記録媒体における信号の書込みやすさを決める H_c は，磁化が一方向を向こうとする強さである磁気異方性エネルギーによって決まる。その値は記録層の磁性材料によって決まり，温度上昇に伴い小さくなる。したがって，記録層を加熱すると，磁化の向きを反転させるために必要なエネルギー障壁が低下し，信号の書込みが容易になる。この特徴を利用して，書込み時のみ熱を加えて信号を書き込む方式が熱アシスト磁気記録方式である。富士電機では，計算機シミュレーションなどを用いて，媒体層構成や材料の開発を行っている[(2)]。

2. 2　熱アシスト磁気記録媒体開発の現状

富士電機では，実際の HDD を想定した記録再生特性評価装置（スピンスタンド）の記録ヘッドに，スポット径 10 μm の加熱用レーザ（波長＝830 nm）を追加する改造を加え，熱アシスト磁気記録の原理検証を行っている。**図 2** に，信号記録時のレーザパワーを変化させて記録時の温度を変化させた際のオーバーライト，および再生信号出力を測定した結果を示す。なお，再生信号出力については，

レーザを照射しない状態の出力で規格化した値を示した。オーバーライトは，あらかじめ周波数の高い信号を記録しておき，その上に先の信号よりも低い周波数の信号を上書きして前記録信号がどの程度消去されているかを表したものであり，一般に媒体の書込みやすさの指標として用いられている。実験は，ガラス基板の表側の片方のみ成膜を行った垂直磁気記録媒体を用い，裏側のガラス基板側からレーザを照射して記録層などを加熱し，表側から磁気ヘッドで記録した。また，本実験では熱によるアシスト効果のみを測定するため，書込みヘッドに流す電流は変化させず，ヘッドからの磁界を一定にして実験した。レーザを照射せず（0 mW に相当），媒体を加熱せずに信号を書き込んだ場合のオーバーライトは－13 dB 程度であるが，レーザパワーの増加に伴い書込み容易性が向上し，レーザパワー 130 mW では－28 dB にまで達することが分かる。媒体が書込みやすくなったことを受けて再生信号出力も増加しており，温度上昇による熱アシスト効果が確認できる。

図 3 に，信号記録時のレーザパワーを変化させて記録時の温度を変化させた際の SNR（信号対雑音比）を測定した結果を示す。レーザパワーの増加に伴い SNR が向上していることが分かる。これは，媒体への信号書込みが容易になったためと考えられる。レーザパワーを印加しない現状の記録再生系に比べると，レーザパワー 130 mW での加熱により SNR は 3 dB 向上している。熱アシスト効果が顕著に現れる結果が得られ，原理検証が行えた。

熱アシスト磁気記録媒体を実用化するためには，さらなる検討が必要である。**図 4** に，現行の非エネルギーアシスト磁気記録媒体と熱アシスト磁気記録向けに開発中の磁気記録媒体の層構成を示す。熱アシスト磁気記録媒体ではこれまでの媒体設計に加え，新たに光や熱に関する設計指針を取り入れなくてはならない。効率良く記録層を加熱するためには，反射率を小さく抑えて加熱光の吸収効率を上げることはもちろん，記録終了後は速やかに記録層の熱を逃がすためヒートシンク層を設けるといった工夫が必要である。また，潤滑層と保護膜の耐熱性向上も重要な課題である。熱アシスト磁気記録で使用する温度の上限は，これらの耐熱温度でほぼ決定される。低い温度で熱アシスト効果を享受するために，記録層にはキュリー温度が低く，温度増加に対する H_c の減少率が大きな材料が望まれる。

富士電機における記録層の材料開発の一例を次に挙げる。**図 5** は，プロセスパラメータに対する H_c の温度勾配（こうばい）dH_c/dT の変化である。なお，本稿では熱アシストによる書込み容易性を H_c の減少率で表現するため，符号は負の値をとっており，絶対値が大きくなるほどアシスト効果が大きくなることを意味する。現在量産している非エネルギーアシスト磁気記録媒体で用いている Co-Pt-Cr 系記録層材料の温度勾配は，たかだか－15 Oe/K である。加熱時の H_c を書込みヘッドの最大磁界以下に抑えて熱アシスト磁気記録を行うには，加熱温度をかなり高くする必要があり，実用上適切ではない。これまでに検討されてきた H_c の温度勾配が大きい材料である Fe-Pt-Cu（－180 Oe/K）[3]，Tb-Fe-Co（-240 Oe/K）[4] などは，薄膜形成温度

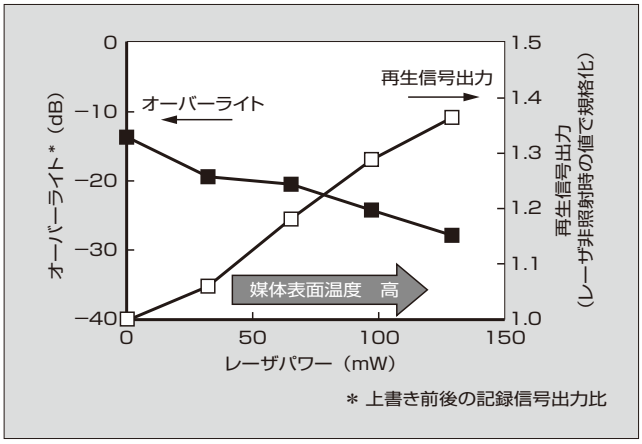

図 2　レーザパワーに対するオーバーライトおよび再生信号出力の変化

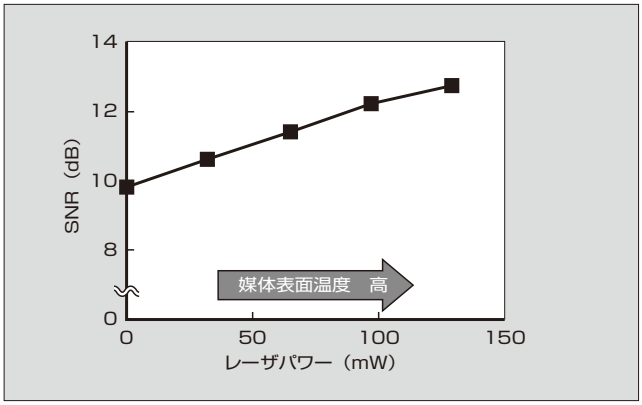

図 3　レーザパワーに対する SNR の変化

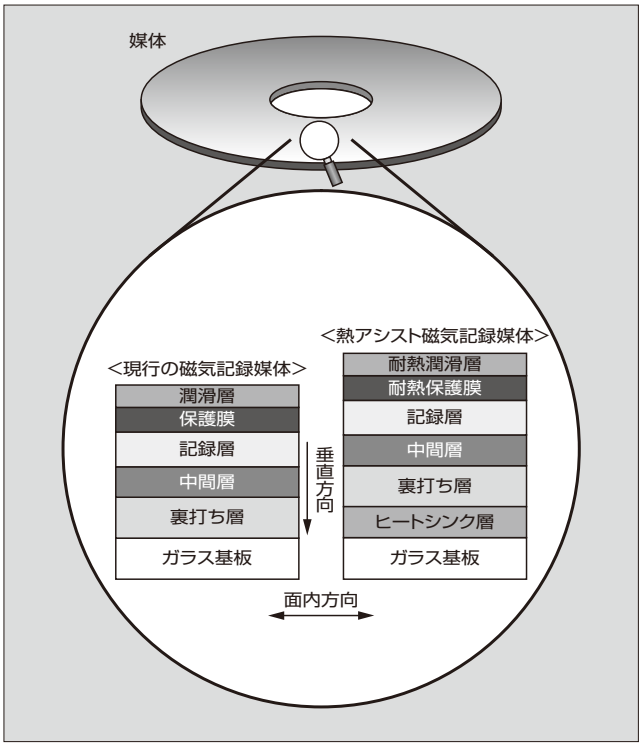

図 4　熱アシスト磁気記録媒体の構成

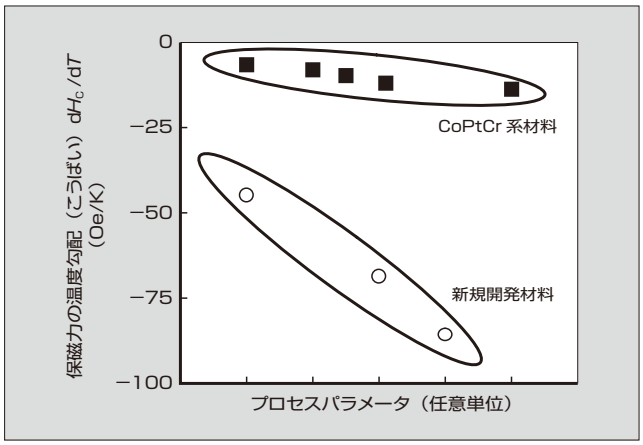

図 5　CoPtCr 系材料と新規開発材料の保磁力の温度勾配（こうばい）の比較

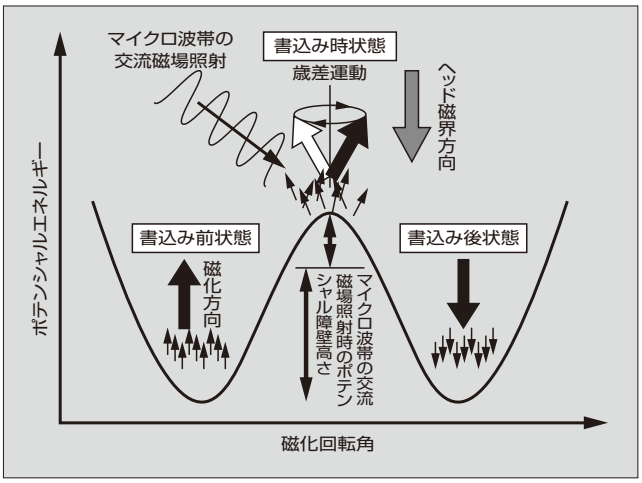

図 6　マイクロ波アシスト磁気記録の原理

が高く量産が困難であることや，結晶粒の微細化が困難である。さらに，良好な記録再生特性が得られないといった理由により媒体の記録層としては適切な材料ではなく，実用化には至っていない。一方，**図 5** に示すように，富士電機が新たに開発した Co を主体とする材料では，従来の Co–Pt–Cr 系材料の 3 倍以上の温度勾配を示しており，あるプロセスパラメータでは，−85 Oe/K に到達している。従来材料と同じ温度領域で用いた場合には，効果的に H_c を下げられ，高い熱アシスト効果が期待できる。

今後，この新規開発材料を適用した媒体を用いて熱アシスト磁気記録再生特性の評価をしていく予定である。

3　マイクロ波アシスト磁気記録媒体

3.1　概　要

2007 年に Zhu らは，新しいエネルギーアシスト磁気記録方式として，熱エネルギーの代わりに高周波（マイクロ波の周波数に対応する GHz 帯域）の交流磁場を記録層に印加することで書込み容易性を向上させるマイクロ波アシスト磁気記録方式を提案した[(5),(6)]。本方式は**図 6** に示すように，記録層材料の強磁性共鳴周波数に一致したマイクロ波帯の交流磁場を印加することで磁化を磁化容易軸方向から傾け，磁化の歳差運動（首振り運動）を促して磁化反転をアシストするものである。原理的には，現状の非エネルギーアシスト媒体の構成を大きく変化させる必要がないことが大きなメリットである。現在，シミュレーションと実験の両面から大学を中心として世界中で研究が進められている。

マイクロ波アシスト磁気記録は，その原理が発表されてから日が浅い。マイクロ波帯の交流磁場を用いた磁性薄膜の磁化反転アシスト実証例は，2007 年に軟磁性材料である Ni–Fe を用いて初めて報告された[(7)]。その後，2009 年には垂直磁気異方性を持つ Co/Pd 人工格子膜を用いて磁化反転アシストが報告された[(8)]。特に後者は垂直磁気記録媒体用材料としても研究が続けられている材料である。そのため，この報告によりマイクロ波アシスト磁気記録の垂直磁気記録媒体への適用有効性が明らかとなり，脚光を浴びている。現在，マイクロ波アシスト記録方式の垂直磁気記録媒体への適用が一気に加速している。

3.2　マイクロ波アシスト磁気記録媒体開発の現状

一般に，磁性体の磁化の方向を変えるために外部から磁界を印加すると，磁化は**図 6** に示すように，歳差運動（首振り運動）を始める。時間とともに首振り運動の角度が大きくなり，最終的には印加した磁界と同じ向きに磁化がそろい，反転が終了する。磁性体において首振り運動している磁化は，その向きを印加磁界の向きにそろえようとする力が働き，この力の大きさをダンピング定数と呼ぶ。ダンピング定数は磁性材料固有の値であり，値が小さいほど外部から印加されるマイクロ波に対する反応性が高まり，結果として反転アシスト効果が大きくなる。したがって，マイクロ波アシスト磁気記録方式の磁性層材料の開発では，ダンピング定数が小さな材料を探索する必要がある。

現行の垂直磁気記録媒体の記録層材料としては，hcp–CoPt 系の合金材料が盛んに検討されており，Pt 量により磁気異方性エネルギーを調整して信号の長期安定性を確保している。さらに磁気異方性エネルギーの大きな次世代高密度媒体向け材料としては，原子層レベルで規則的な構造を持つ Co–Pt や Fe–Pt に代表される規則合金系材料が有望である。しかし，これらの材料に含まれる Pt は軌道磁気モーメントが大きく，スピン－軌道相互作用によりダンピング定数が大きくなる傾向があることが実験により明らかとなっており[(9)]，マイクロ波アシスト磁気記録媒体向け材料としては適していない。富士電機は，Pt と置換することでダンピング定数を小さくすることができ，かつ現行の媒体と同じ特性が維持できるような元素を用いた磁性材料の開発を進めている。最終的には，希少資源である Pt の使用量を少なくした材料を記録媒体に適用することを目指している。

4　あとがき

富士電機は，エネルギーアシスト磁気記録方式を採用し

て，1 Tbits/in^2 を超える記録密度を持つ磁気記録媒体を世に出そうと検討を続けている。熱アシスト磁気記録方式とマイクロ波アシスト磁気記録方式には，ともにこれまでとは異なるアプローチでの媒体材料開発が必要である。材料開発部門のみならず，シミュレーション部門，そして社外機関との連携をこれまで以上に密に取りながら，エネルギーアシスト磁気記録媒体の早期実現を進めていく所存である。

参考文献

(1) 大内一弘. 垂直磁気記録用磁性材料Ⅷ. 日本磁気学会誌まぐね. 2008, vol.3, no.2, p.101-110.

(2) 由沢剛, 高橋伸幸. 熱アシスト磁気記録媒体のシミュレーション技術. 富士時報. vol.82, no.3. p.170-173.

(3) Tanak, F. et al. Magneto-Optical Recording Characteristics of TbFeCo Media by Magnetic Field Modulation Method, Jpn. Japanese journal of applied physics. 1987, vol.26, p.231-235.

(4) Ito, A. Tsukamoto, A. 2008 SRC annual report.

(5) Zhu Xiaochun, Zhu Jian-Gang. Bias-Field-Free Microwave Oscillator Driven by Perpendicularly Polarized Spin Current. IEEE Transactions on Magnetics. 2006, vol.42, p.2670-2672.

(6) Zhu Jian-Gang. et al. Microwave Assisted Magnetic Recording. IEEE Transactions on Magnetics. 2008, vol.44, p.125-131.

(7) Nozaki, Y. et al. Microwave-assisted magnetization reversal in 0.36-μm-wide Permalloy wires. Applied Physics-Letters. 2007, vol.91, p.122505-1-3.

(8) Nozaki, Y. et al. Microwave-assisted magnetization reversal in a Co/Pd multilayer with perpendicular magnetic anisotropy. Applied Physics Letters. 2009, vol.95, p.082505-1-3.

(9) Mizukami, S. et al. The Study on Ferromagnetic Resonance Linewidth for NM/80NiFe/NM（N=Cu, Ta, Pd and Pt）Films, Jpn. Japanese journal of applied physics. 2001, vol.40, p.580-585.

稲葉　祐樹

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機ホールディングス株式会社技術開発本部デバイス技術研究センター次世代媒体開発部。日本磁気学会会員。工学博士。

中田　仁志

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機ホールディングス株式会社技術開発本部デバイス技術研究センター次世代媒体開発部。日本磁気学会会員。理学博士。

井上　大輔

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機ホールディングス株式会社技術開発本部デバイス技術研究センター次世代媒体開発部。日本磁気学会会員。

e-Front runners

＊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。