

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月25日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560374

研究課題名（和文） 次世代垂直磁気記録のためのライトヘッドの提案

研究課題名（英文） A PROSAL ON MAGNETIC RECORDING WRITE HEADS FOR THE NEXT GENERATIONS

研究代表者

金井 靖 (KANAI YASUSHI)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：00251786

研究成果の概要（和文）：次世代磁気記録方式に関し、研究連携者にとどまらず国内外のグループと共同で研究を進めた。代表者はライトヘッドを提案し、2次元記録方式、シングル記録方式、熱アシスト磁気記録方式、高周波アシスト記録方式、ビットパターン媒体およびこれらの組み合わせについて報告した。また、平面型記録ヘッドは強い記録磁界を発生するとともに隣接トラックへの漏れ磁界を抑えることが可能であり、さらに高周波特性に優れることを示した。

研究成果の概要（英文）：The representative researcher investigated and proposed recording write heads in perpendicular magnetic recording system in the next generation: two-dimensional magnetic recording with shingle writing, thermally-assisted magnetic recording, microwave-assisted magnetic recording and bit-patterned magnetic recording. The shielded planar heads are superior to conventional heads with regard to obtaining a faster response and a larger recording field, and even a smaller adjacent track erasure (ATE) field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：記憶・記録、垂直磁気記録、記録ヘッド、マイクロマグネティクス、並列計算

## 1. 研究開始当初の背景

垂直磁気記録方式を用いたハードディスクドライブ（HDD）が市販されてから3年以上を経ている。その間、面記録密度は133 Gigabit/inch<sup>2</sup>から400 Gigabit/inch<sup>2</sup>へと3倍に向上し、市販されるHDDのほとんどが垂直磁気記録方式を採用していた。

HDDを含むデータストレージはネットワーク、中央処理装置（CPU）とともに現代の計

算機ハードウェアの3大構成要素をなしている。今後の記録密度向上には、信号対雑音比（S/N）を確保しつつ面記録密度を向上させるためには微小なグレインの媒体が必要であり、媒体グレインを小さくした上で熱磁気緩和を避けるためには高い異方性エネルギーが求められる。高い異方性エネルギーの媒体は高い異方性磁界を有するから結果として保磁力が高くなり、飽和記録が困難になる。

そのため、今後は新たな記録方式（次世代垂直磁気記録方式）を取り入れるとされ、Microwave Assisted Magnetic Recording (MAMR), Thermally Assisted Magnetic Recording (TAMR)などが候補に挙がっており、本申請で取り上げるBPMも有力な候補であった。また、投資などを含めた産業界の予測では1.5 Terabit/inch<sup>2</sup>を超えたところで次世代垂直磁気記録が導入されるとの見方がなされていた。

## 2. 研究の目的

本研究は計算機解析シミュレーションを用いた、次世代垂直磁気記録方式の書き込みヘッドの提案に関する。すなわち、3次元空間で、1) 垂直磁気記録単磁極ヘッドおよび2層垂直磁気記録媒体の系全体を考慮して、Maxwell方程式を解く有限要素法(FEM)静磁界計算を行い、さらにLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を解くマイクロマグネティック計算を行い、動的な記録ヘッド内部の磁化変化、動的な記録磁界分布などを求め、応答速度の速いヘッド構造、材料の提案を行う。また、2) ヘッド、連続およびビットパターン媒体(bit-patterned media: BPM)記録層を含む系全体のマイクロマグネティック計算を行う。これによって、3) 2テラビット/平方インチ(Terabit/inch<sup>2</sup>)およびそれ以上の面密度を実現するための、連続媒体およびBPMに対応した次世代垂直磁気記録の重要な構成要素となる単磁極ヘッドを提案する。

## 3. 研究の方法

### (1) 計算システムの高速化

計算機ハードウェアは課題とは直接関係ないが、大規模計算を高速に実行する手段として必要不可欠である。多次元FFTなどによるソフトウェアの最適化および4台のワークステーションによるクラスタシステムにより、研究開始時の50倍の計算速度を実現する。

### (2) マイクロマグネティック数値解析シミュレーション手法の妥当性の検証

磁気記録の諸現象は、極めて狭い領域で短時間に起こる。そのため、実験による検証は難しく、ソフトウェア検証を別のソフトウェア(富士通所有およびウィーン工科大学が公開しているソフトウェアMAGPAR)により行う。

### (3) 次世代垂直磁気記録ライトヘッドの提案

研究代表者は、静磁界解析シミュレーションを用いて、CF-SPT(cusp-field single-pole-type)ヘッドを基にテーパーのある主磁極とトレーリングシールドおよびサイドシールドを有するSPTヘッドを提案した。本

構造は、提案当時のプロセス技術では製造不可能とされたが、5年を経てTDKにより最初に製造プロセス技術が確立され、現在では記録能力の優れたヘッドとして市販されている。これは静磁界解析シミュレーションが有効に機能した実例である。このような経験と実績から、従来の常識にとらわれない、新しい発想による提案を行う。また、新規構造のヘッドなども大いに参考にする。具体的には4種類の次世代磁気記録方式が提案されており、それぞれに対応したライトヘッドを研究する。

## 4. 研究成果

### (1) 計算システムの高速化

計算速度の向上は事業開始前の10倍程度にとどまった。その理由を求めるため、高速化に必須な並列化率を求めた。実際の並列化率はコンパイラによる自動並列化を併用しており不明であるが、Intel社Core i7 Extremeの2スレッド時を理想状態(計算機に起因する速度劣化がない)と仮定すると、使用プログラムの並列化率は92.5%と見積もられた。今後の高速化はデータ入出力に対する配慮と細部の並列化が重要になるものと思われる。また、時間差分に用いている4次のRunge-Kutta法に代わる手法の導入も重要である。

### (2) マイクロマグネティック数値解析シミュレーション手法の妥当性の検証

自作のマイクロマグネティックソフトウェアの妥当性を検証するために、富士通所有およびウィーン工科大学が公開しているソフトウェア(MAGPAR)による結果を比較した。本事業の開始前は動的な記録磁界は一致しなかったが、モデル作成のノウハウを積み重ね、得られた結果がよく一致することを確認した。さらに、主磁極先端の動的な磁化分布も良好に一致することを確認した。これによりソフトウェア相互の妥当性を示した。

### (3) 次世代垂直磁気記録ライトヘッドの提案

①MAMR 研究代表者が提案した記録ヘッドとスピントルクオシレータを組み合わせ、連続媒体への記録シミュレーションを行った。2 Terabit/inch<sup>2</sup>は可能であるが4 Terabit/inch<sup>2</sup>の実現は、現状では、困難であることを示した。また、実際には記録ヘッド、スピントルクオシレータおよび記録媒体の相互作用を考慮する必要があることが明らかとなり、今後の課題となった。

②TAMR 従来はニアフィールド素子を磁気記録ヘッドの前縁または後縁に配置していた。前縁に配置すると記録された信号が磁気記録ヘッドの磁界により劣化することが避

けられず、後縁に配置すると記録磁界が弱く飽和記録が困難である。結果としていずれの場合も十分な信号対雑音比が得られない。研究代表者は記録ヘッドを媒体走行方向に分割した構造を提案した。これによって、ニアフィールド素子を任意の位置に配置し得る。媒体記録シミュレーションにより、従来構造の磁気記録ヘッドに比べ、信号対雑音比が得られることを示した。

③BPM 外部エネルギーを加えない記録では高異方性媒体への記録が困難となる。シングル記録方式を用いることにより、最大の面密度を見積もった。その結果、ビットアスペクト比（線密度とトラック密度の比）が1：1の場合に4 Tbit/in<sup>2</sup>は実現可能であると予想された。ただし媒体のビット位置が正しく配列され、また異方性定数も制御が必要である。一方、従来のライトヘッドによる記録では4 Tbit/in<sup>2</sup>の実現は困難であることも示された。

④シングル記録（2次元再生記録）方式

前述の通り、シングル記録とBPMとの組み合わせで4 Tbit/in<sup>2</sup>を実現可能であることを予測したが、条件を変えることにより、従来の連続媒体でも3.88 Tbit/in<sup>2</sup>を実現可能であることを示した。また、いろいろな2次元再生方式を検討し、その可能性を検討した。本記録方式は2009年に研究代表者らがシミュレーションにより1.5 Terabit/inch<sup>2</sup>以上の記録密度を予測し、以来、多くの研究結果が発表されるようになった。研究代表者は本記録方式のライトヘッドの特許出願も行っており、研究連携者とともに国内外で認識されるようになった。

⑤その他（高転送レート記録）

平面型記録ヘッドは、強い記録磁界強度と急峻な磁界勾配を有し、高密度記録用ヘッドとして有望であることが有限要素法を用いた記録磁界解析により示された。同時に、隣接トラックへの漏れ磁界（ATE磁界）が大きいことが欠点とされてきた。しかし、マイクロマグネティック解析により、ATE磁界も従来の単磁極ヘッド以下に抑えることが可能であり、さらには、高周波記録磁界への応答も速いことが示唆された。平面型ヘッドが高速に応答する因子を検討するために、5 GHzまでの記録周波数を仮定し、平面型記録ヘッドのマイクロマグネティック記録磁界解析を行った。すなわち、6種類の平面型ヘッドと既存のライトヘッドをモデル化し、高転送レートを実現するためにはコイル位置をなるべく主磁極ポール先端に近付けることと、ヨーク高さを低くすることが重要であることを述べた。これら2つの因子と比較してヨーク幅は大きな問題とはなり得ず、多巻コイルを形成する上で利点となる。ヘッドおよび媒体裏打層の材料も検討したが、ギルバートの制動定数には影響を受けるが、交換定数お

よび異方性定数は記録磁界の高周波応答に差異を与えなかった。

次節で述べるように雑誌論文や国内外で招待講演を含む発表の機会が多く、本研究の注目度も高まっている。研究連携者はもちろん国内外研究者との研究のネットワークが築かれており、次世代垂直磁気記録方式においてライトヘッド部門で研究代表者の果たす役割は大きい。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計28件）

- ① Y. Kanai, H. Hosokai, K. Yamakawa, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, “Micromagnetic model analysis of planar type recording write heads for high transfer-rate recording,” *IEEE Trans. on Magn.*, 査読有, vol. 48, no. 5, pp. 1723-1730, May. 2012.  
DOI: 10.1109/TMAG.2011.2171927
- ② Y. Kanai, Y. Jinbo, K. Koyama, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, “Requirements for soft magnetic underlayer (SUL) - Micromagnetic simulations of single-pole-type write heads and SUL systems”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 査読有, vol. 324, no. 3, pp. 282-286, Feb. 2012.  
DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.12.016.
- ③ T. Tsukamoto, Y. Kanai, K. Koyama, K. Yoshida, Y. Uehara, K. Shimizu, S. Greaves, and H. Muraoka, “Micromagnetic simulation of recording write heads a comparison of various micromagnetic software,” *IEEE Trans. on Magn.*, 査読有, vol. 48, no. 2, pp. 311-314, Feb. 2012.  
DOI: 10.1109/TMAG.2011.2172398
- ④ Y. Kanai, H. Hosokai, K. Koyama, K. Yamakawa, K. Yoshida, S. J. Greaves and H. Muraoka, “Micromagnetic analysis to reduce adjacent track erasure field in planar write heads”, 査読有, *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 3399-3402, Oct. 2011.  
DOI: 10.1109/TMAG.2011.2155631
- ⑤ Y. Kanai, K. Koyama, M. Ueki, T. Tsukamoto, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, “Micromagnetic analysis of shielded write heads using symmetric multiprocessing systems,” *IEEE Trans. on Magn.*, 査読有, vol. 46, no. 8, pp. 3337-3340, Aug. 2010.

DOI: 10.1109/TMAG.2010.2045883

- ⑥ Y. Kanai, Y. Jinbo, T. Tsukamoto, S. J. Greaves, K. Yoshida, and H. Muraoka, "Finite-element and micromagnetic modeling of write heads for shingled recording," 査読有, IEEE Trans. on Magn., vol. 46, no. 3, pp. 715-721, Mar. 2010.

DOI: 10.1109/TMAG.2009.2038354

[学会発表] (計50件)

- ① Y. Kanai, "Micromagnetic analysis of recording write heads for high transfer-rate recording," The Magnetic Recording Conference (TMRC 2011), B-3, Minneapolis, MN, U.S.A., Aug. 2011.
- ② Y. Kanai, "Micromagnetic simulations of recording write heads - A comparison of various micromagnetic software -," 18<sup>th</sup> International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2011), PB12-3, Sydney, Australia, July 2011.
- ③ Y. Kanai, "Micromagnetic analysis to reduce adjacent track erasure field in planar write heads," International Magnetics Conference (Intermag 2011), EE-01, Taipei, Taiwan, Apr. 2011.
- ④ Y. Kanai, "Requirements for soft magnetic underlayer (SUL) - Maxwell FEM and LLG micromagnetic simulations of single-pole-type write heads and SUL system -," The Ninth Perpendicular Magnetic Recording Conference (PMRC 2010), 18pA-5, pp. 188-189, Sendai, Japan, May 2010.
- ⑤ Y. Kanai, "FEM and micromagnetic modeling of write heads for shingled recording," IEEE The Magnetic Recording Conference (TMRC 2009), B-2, p. 15, Tuscaloosa, AL, U.S.A., Oct. 2009.

[図書] (計1件)

- ① 金井靖(日本シミュレーション学会編), コロナ社, "磁気ヘッド解析" (シミュレーション辞典), 2011. 担当 116-116.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 垂直磁気記録ヘッド  
発明者: 金井靖, 神保義裕  
権利者: 情報ストレージ研究推進機構  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-236528

出願年月日: 2009年10月13日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://nirr.lib.niigata-u.ac.jp/handle/10623/6903>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金井 靖 (KANAI YASUSHI)  
新潟工科大学・工学部・教授  
研究者番号: 00251786

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

村岡 裕明 (MURAOKA HIROAKI)  
東北大学・電気通信研究所・教授  
研究者番号: 20239479  
グリーブズ サイモン (GREAVES SIMON)  
東北大学・電気通信研究所・教授  
研究者番号: 60375152  
吉田 和悦 (YOSHIDA KAZUETSU)  
工学院大学・工学部・教授  
研究者番号: 90327718