様式Ｃ-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２１年　６月１５日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2006～2008
課題番号：１８５６０３５２
研究課題名（和文）　大規模なマイクロマグネティクス解析による超高密度垂直磁気記録用単磁極ヘッドの研究
研究課題名（英文）　A STUDY ON SINGLE-POLE-TYPE MAGNETIC RECORDING WRITE HEAD FOR ULTRA-HIGH DENSITY USING LARGE-SCALE MICROMAGNETIC ANALYSIS

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：垂直磁気記録技術のなかで重要な構成要素となる単磁極ライトヘッドに焦点を絞り，動的なマイクロマグネティクス磁化解析シミュレーションにより記録ヘッド内部の動的な磁化変化および記録磁界分布を解析し，１平方インチあたり２テラビット以上の面記録密度を実現する単磁極ヘッドの提案を行った．なお，解析を行う際，垂直磁気記録ヘッドおよび垂直２層媒体を考慮した系全体を扱うことを特徴としている．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００６年度	1,500,000	0	1,500,000
２００７年度	500,000	150,000	650,000
２００８年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総　計	3,500,000	600,000	4,100,000

研究分野：磁気記録，数値電磁界解析
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，数値解析，マイクロマグネティクス，有限要素法，並列計算

１．研究開始当初の背景

従来から超高密度記録の可能性が認められていた垂直磁気記録技術は，2004年末に東芝が世界初の垂直磁気記録ハードディスクドライブをアナウンスして以来，今後の超高密度磁気記録は垂直磁気記録技術により実現される，との認識で一致していた．さらに，市販の垂直磁気記録技術によるハードディスクドライブが実現されたことはゴールではなく，垂直磁気記録技術が新たなスタートを切ったものと認識されていた．

当時，磁気記録の記録密度向上の観点からボトルネックとなっているのは，記録方式によらず，記録ヘッドとされていた．記録ヘッドの記録磁界強度の上限は材料の飽和磁束密度で決まるが，材料面では既に飽和磁束密度の理論的な限界である 24kG 以上に達しており，また，構造によっては飛躍的に記録磁界強度を高めることは困難であると考えられていた．

２．研究の目的

垂直磁気記録技術のなかで重要な構成要素となる単磁極ライトヘッドに焦点を絞り，Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を解く動的なマイクロマグネティクス磁化解析シミュレーションにより記録ヘッド内部の動的な磁化変化と記録磁界分布を解析する．これによって１平方インチあたり数 100 ギガビット（数 100 Gigabit/inch^2）およびそれ以上の面密度を実現する単磁極ヘッドの提案を行うことを第１の目的とした．

解析計算の高速化は本研究の主題ではないが，大規模な問題を高速に解き，現象を解明することは本質に関わる．よって，計算機システム（ハードウェアおよびソフトウェア）の高速化（100 倍）および省メモリ化（50%）を図ることを第２の目的とした．

さらに，磁気記録の諸現象はピコ秒の時間スケールとナノメートル以下の空間で生ずる．そのため，実験による検証が非常に難しい．開発した解析システムの妥当性は，独立に開発したソフトウェアに頼らざるを得ない．よって，妥当性の検証を第３の目的とした．

３．研究の方法

(1)　高速計算機（ハードウェア）の導入

垂直磁気記録単磁極ヘッドおよび垂直２層媒体を考慮した３次元空間の系全体を扱うため，大規模な計算を高速に実行する計算機を導入した．まず，32 ビット CPU の計算機 (Pentium4, 3.0 GHz, 4 GB RAM)を 16 台購入し，申請者が PC クラスタシステムを組み上げた．さらに，64 ビットメモリ共有型計算機（Intel Core i7, 2.66 GHz, 4 core, 12 GB RAM）を導入した．

(2)　ソフトウェアの高速化，省メモリ化

マイクロマグネティクス計算で最も計算時間を要する箇所は静磁界計算である．これは全てのセル同士で総当りの演算を行うため，演算回数はセル数の２乗に比例する．よって，従来の直接法を用いては並列計算によっても実用レベルの速度は実現し難い．ここでは FFT を用いたアルゴリズムを導入し，研究開始当初の C++プログラムを数値解析で実績がある FORTRAN９０プログラムに書き換えた上で， PC クラスタシステムで並列処理が行えるものとした．さらに，メモリ共有型計算機上でマイクロマグネティクス解析ソフトウェアを並列化し，最適化を図った．

(3)　パターン媒体への書き込み

動的なマイクロマグネティクス磁化解析シミュレーションにより，単磁極ヘッドの動的な記録磁界分布を求めた．ヘッド磁界の反転速度とビットパターン媒体のドット位置に対する考察を行った．

(4)　解析システム（マイクロマグネティクスソフトウェア）の検証

国内の磁気記録産業に関わるメーカー（当時：富士通）が所有するソフトウェア，ウィーン工科大学が公開するソフトウェア（Magpar），および我々のソフトウェアにより得られた記録磁界（記録磁界強度，時間変化）を比較・検討した．

(5)　新しい記録方式の検討

記録ヘッドを最適化し，シングル記録方式により連続媒体への書き込みを検討する．最適化にあたっては，計算速度の点からマックスウェル方程式を解く，旧来の有限要素法を用いる．

４．研究成果

(1)　計算システムの高速化，省メモリ化

①FFT を用いたアルゴリズムを導入し，さらに，並列化プログラミングを実施した．PC クラスタシステム上で最適化を図り，当初と比べ 4,800 倍の速度を得た．同時に，当初比約 1/3 のメモリ使用量を実現した．

②PC クラスタシステムで実行時間を分析したところ，CPU 時間と通信時間がほぼ半分ずつであった．さらに実行速度を上げるためには通信時間の削減が必須であり，これには高価なスイッチングハブとネットワークカードが必要であることが判明した．そこで，メモリ共有型計算機上でソフトウェアを並列化・最適化し，PC クラスタシステムの 8.6 倍の速度を得た．また，約 1.5 倍の大規模計算が可能となった．さらに，消費電力は 1/10 程度となり，グリーン IT の思想とも合致する．

③上記の２点から，計算速度は当初比 41,000 倍以上，75%以上の省メモリ化を果たし，当初の目標（第２の目的）を上回る成果を得た．

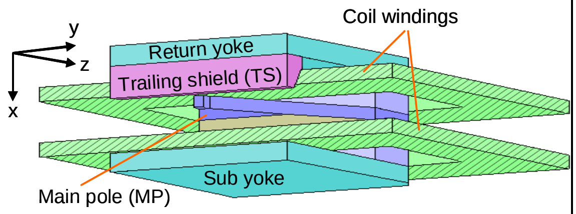
(2)　解析システム(ソフトウェア)の検証

富士通が所有するソフトウェア，ウィーン工科大学が公開するソフトウェア（Magpar）および我々のソフトウェアにより，図１に示す記録ヘッドのマイクロマグネティック計算を行った．

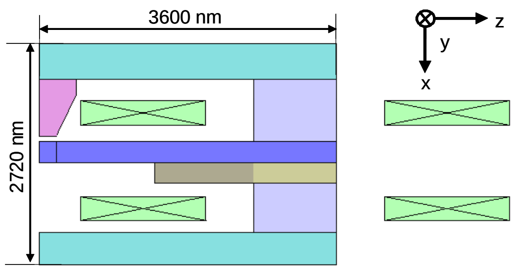
図２に静的記録磁界分布を示すが，３者は

よく一致している．さらに，旧来の有限要素法で求めた結果も良好に一致する．なお，Fujitsu-LLG の絶対値がやや小さい原因は主磁極先端面の形状がやや異なる（面積が小さい）ためである．

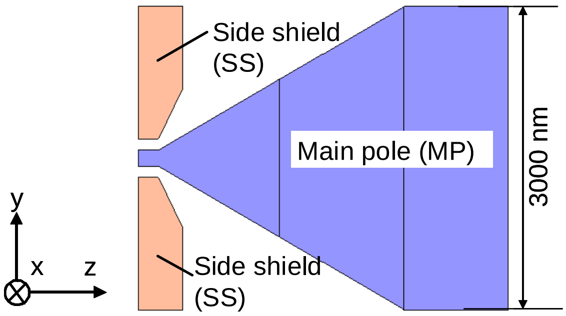
図３には高周波記録電流に対する，記録磁界の時間変化を示す．なお，ゼロ時刻付近で計算値が乱れているのは初期値に依存し，本



(a)記録ヘッドの全体図（斜視図）



(b)記録ヘッドの中央断面図



(c)記録ヘッド主磁極とサイドシールド

図１．計算に用いた記録ヘッドモデル

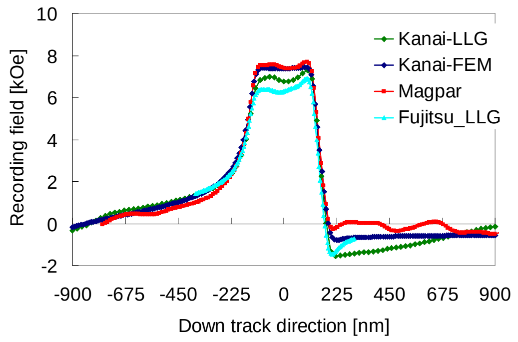


図２．いろいろなマイクロマグネティック解析ソフトウェアにより求めた静的記録磁界分布

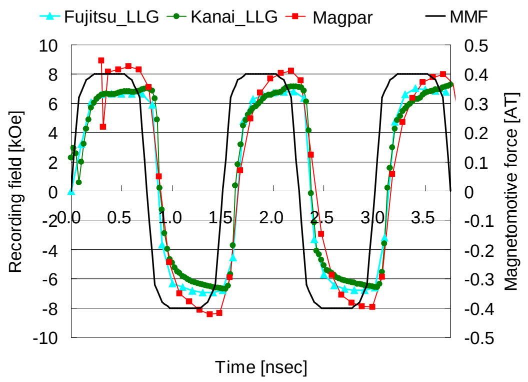


図３．いろいろなマイクロマグネティック解析ソフトウェアにより求めた高周波電流に対する動磁界

質的な問題ではない．以上から，動磁界も独立に開発された複数のソフトウェアでよく一致することから，我々が所有するソフトウェアの妥当性は高い．

さらに，本検討により，記録磁界の時間変化は主磁極構造のみならず，サイドシールドおよびトレーリングシールドの影響を大きく受けることが判明した．以上から第３の目的は完全に達したと考える．

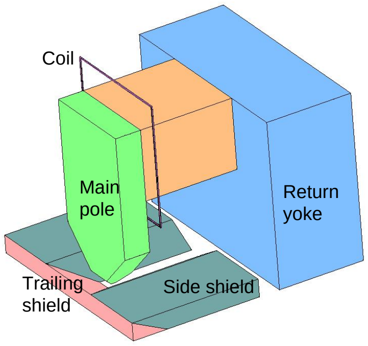
(3)　ビットパターン媒体への書き込み

図４に示すモデルを用いて，まず，いろいろな記録電流に対してマイクロマグネティック計算により記録磁界の追従性を求めた．図５から分かるように，立ち上がりが速い電流に対して記録ヘッドの立ち上がりも速い．これを定量的に示すために，無反応時間（記録磁界が負の最大値：-100%から-90%に変化する時間）およびライズタイム（記録磁界強度が-90%から＋90%に変化する時間）を定義した．図５で用いた電流 A,B および C の他に電流 A に 100%のオーバーシュートを加えた電流（D）および電流 B に 100%のオーバーシュートを加えた電流（E）を考えた．その結果を図６に示すが，電流の立ち上がり速度を速く，オーバーシュートを加えることが有効であることが分かる．

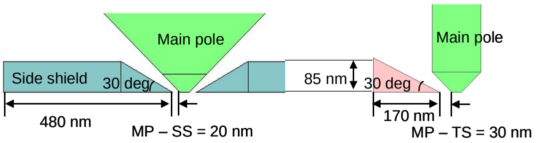
次に，マイクロマグネティック計算と静的な分布がよく一致することから，旧来の有限要素法により得られた静的記録磁界分布を用いて，マイクロマグネティック媒体磁化計算を行い，ビットパターン媒体への書き込みを検討した．図７はビットパターン媒体を構成するひとつの要素であり，ビットセルの寸法を変えながら，書き込みエラーが生じない最小のビットセルを求めた．その結果，図８

に示すように，30 nm × 15 nm のビットセルでは 1,800 回の書き込みに対してエラーは起こらないが，28 nm × 15 nm ビットセルでは 0.125 の確率でエラーが発生することが分かった(図 8(c)，(d)の○で囲んだビット)．なお，30 nm × 15 nm のビットセルは 1.43 terabit/inch^2 に相当する．

さらに，動的計算により得たヘッド磁界の反転速度とビットパターン媒体のドット位置に対する考察を行い，1 -2 terabit/inch^2 程度の比較的低い記録密度でもヘッド磁界の反転速度のほかに記録勾配が重要な因子であることが分かった．また，ヘッド磁界の反転速度向上には，電流の他に，磁性材料の制動定数を適当に選択することが特に重要であることを明らかにした．



(a)記録ヘッドの全体図（斜視図）



(b)主磁極先端拡大図：主磁極と(左)サイドシールドおよび(右)トレーリングシールドの配置

図4．ビットパターン媒体への書き込みの検討に用いた記録ヘッドモデル

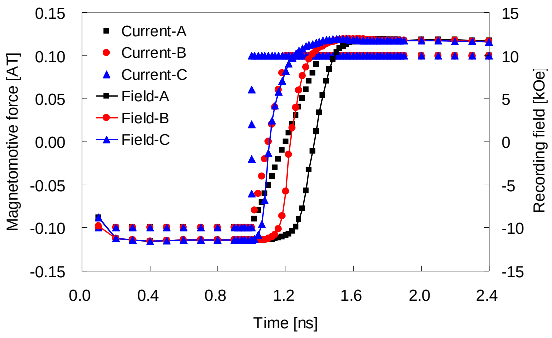


図5．マイクロマグネティック計算で求めたいろいろな電流(A, B, C)に対する記録磁界の追従性

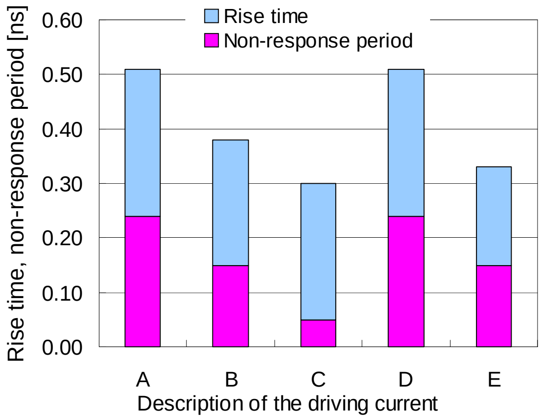


図6．いろいろな記録電流に対する記録磁界の無反応時間とライズタイム

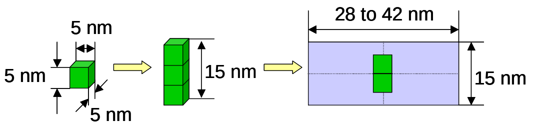


図7．ビットパターン媒体を構成するビットセル

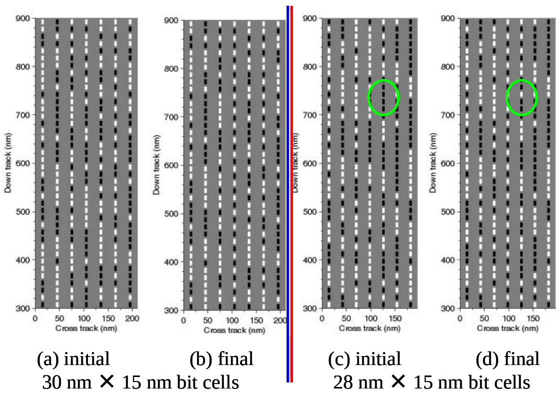


図8．ビットパターン媒体への書き込み結果

(4)　新しい記録方式の検討

①図 9 にシングル記録方式の概念図および記録ヘッドの模式図を示す．本方式は，トラックを順次(n -1，n，n+1，…)重ね書きする方式である．幅の広い記録ヘッドを使用できること，サイドシールドは片側のみに配すればよいこと，などにより強い記録磁界を発生可能である．旧来の FEM により構造を最適化し，マイクロマグネティック媒体磁化計算により連続媒体への書き込みを検討した．その結果，材料の分散やヘッドのスキューを考えた条件で 2 terabit/inch^2，理想状態では 3 terabit/inch^2 以上の面記録密度を，旧来の連続媒体を用いて達成可能であることが示唆された．この数値は従来

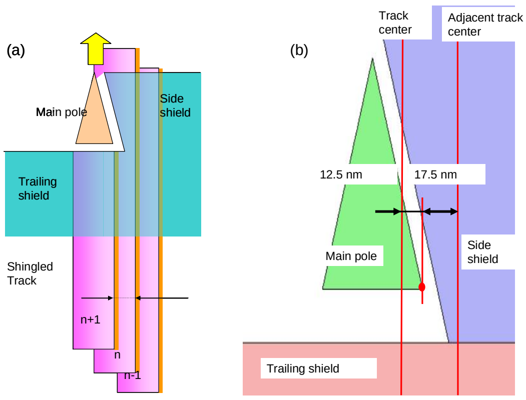


図９．(a)シングル記録方式と(b)記録ヘッドの模式図

の記録方式の限界であった 1 terabit /inch² をはるかに上回るものである．
②その他，高周波磁界アシスト磁気記録(microwave-assisted magnetic recording: MAMR)における，高周波を発生する素子（spin torque oscillator）のマイクロマグネティック計算を行った．
これらはいずれも今後の研究の進展を待たねばならないが，（３）および（４）より第１の目的は十分に達成したと結論する．

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２３件）

① Y. Kanai and K. Yamakawa, "Narrow-track perpendicular write heads," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 321, no. 6., pp. 518-525, Mar. 2009.（査読あり）

② Y. Kanai, K. Hirasawa, T. Tsukamoto, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic recording field analysis of a fast-switching single-pole-type head," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 2971-2974, vol. 320, no. 22, Nov. II, 2008.（査読あり）

③ Y. Kanai, K. Hirasawa, T. Tsukamoto, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic recording field analysis of a single-pole-type head for 1 – 2 terabit/inch2," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 3609-3612, Nov. 2008.（査読あり）

④ Y. Kanai, M. Saiki, K. Hirasawa, T. Tsukamoto, K. Yoshida, S .J. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic recording field analysis of single-pole-type head for bit patterned medium," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 14, pp. e287-e290, July 2008.（査読あり）

⑤ Y. Kanai, M. Saiki, K. Hirasawa, T. Tsukamoto, and K. Yoshida, "Landau-Lifshitz-Gilbert micromagnetic analysis of single-pole-type write head for perpendicular magnetic recording using full-FFT program with PC cluster system," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no.4, pp. 1602-1605, June 2008.（査読あり）

⑥ 斉木昌彦, 平澤和則, 金井靖, 吉田和悦, "狭ポールチップ幅 SPT ヘッドのマイクロマグネティック記録磁界解析", *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 31, no. 6, pp. 427-434, Nov. 2007.(査読あり)

〔学会発表〕（計４２件）

① Y. Kanai, K. Hirasawa, Y. Jinbo, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, "Write head modeling for shingled recording," *IEEE International Magnetics Conference (Intermag 2009)*, DC-08, Sacramento, CA, U.S.A., May 6, 2009.

② Y. Kanai, K. Hirasawa, T. Tsukamoto, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic recording field analysis of a single-pole-type head for 1 – 2 terabit/inch2," *IEEE International Magnetics Conference (Intermag 2008)*, HB-01, Madrid, Spain, May 8, 2008.

③ Y. Kanai, K. Hirasawa, T. Tsukamoto, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic recording field analysis of a fast-switching single-pole-type head using a PC cluster system," *The 8th Perpendicular Magnetic Recording Conference (PMRC 2007)*, 16aB-04, pp. 162-163, Tokyo, Japan, Oct. 16, 2007.

④ Y. Kanai, M. Saiki, K. Hirasawa, T. Tsukamoto, and K. Yoshida, "Micromagnetic recording field

analysis of single-pole-type head for bit patterned medium," *VIII Latin American Workshop on Magnetism, Magnetic Materials and their Applications*, MONPO119, pp. 68-69, Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 13, 2007.

⑤ Y. Kanai, M. Saiki, K. Hirasawa, and K. Yoshida, "Landau-Lifshitz-Gilbert micro-magnetic analysis of single-pole-type write head for perpendicular magnetic recording using PC cluster system," *16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2007)*, PA7-15, pp. 303-304, Aachen, Germany, June 25, 2007.

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