

走査型軟 X 線 MCD 顕微鏡によるハードディスク記録ヘッドの 高速磁化過程直接観察

Direct Observation of Ultra-fast Magnetization Process of a Hard Disk Write-head

by Using a Scanning Soft X-ray Magnetic Circular Dichroism Microscope

喜々津 哲^a, 首藤 浩文^a, 前田 知幸^a, 岡本 聡^b, 菊池 伸明^b,
小谷 佳範^c, 大沢 仁志^c, 中村 哲也^c

Akira Kikitsu^a, Hirofumi Suto^a, Tomoyuki Maeda^a, Satoshi Okamoto^b, Nobuaki Kikuchi^b,
Yoshinori Kotani^c, Hitoshi Osawa^c, Tetsuya Nakamura^c

^a(株)東芝, ^b東北大学, ^c(公財)高輝度光科学研究センター
^aToshiba Corp., ^bTohoku University, ^cJASRI

市販のハードディスクの記録ヘッドをパルス電流駆動し、数 μm のサイズの磁極部分における、sub-nsec の時間的な磁化状態の変化を軟 X 線ナノ MCD(Magnetic Circular Dichroism)を用いて観察することに成功した。準動的な計測かシミュレーションで推定するだけであった磁化状態変化を世界で初めて直接観察することができた。ヘッド駆動を RF バンチクロックと同期させることでストロボスコピック観察を行い、空間分解能 100 nm、時間分解能 50 ps を得た。駆動電流に遅れて磁化が変化する状況などがわかり、今後の高性能化・高密度化開発へ大きく貢献できる結果が得られた。

キーワード： ハードディスク、記録ヘッド、磁区観察、軟 X 線 MCD

背景と研究目的：

ハードディスク(HDD)の記録ヘッドにおける記録過程は、ナノメートルサイズの領域の磁化がナノ秒の時間スケールで反転する微細かつ高速な物理過程である[1]。励磁コイルによる起磁力でまず微細な磁極先端部で磁化反転が起こり、その後周辺の磁気シールド部に反転が伝播すると考えられている。この磁化反転過程は HDD の記録磁区形状に直接影響を及ぼすため、状況を詳細に把握することは極めて重要である。しかしながら、対象が微細領域であり、かつ時間領域が高速であり、しかも最大 1 T 程度の磁界が発生する環境下での現象であるため、これを直接観察することは困難である。これまでは、記録磁極の静的・準動的な磁化観察から推定するか[2]、有限要素法や動的磁化シミュレーション[3] によるのみであった。しかしながら、近年の HDD の高密度化に伴い、磁化反転の遅れや伝播といった高速磁化過程が記録特性に及ぼす影響が大きくなっており、また、次世代記録技術として検討されている高周波アシスト記録[4]では動的磁化過程を直接利用するため、磁化過程の直接間接の重要性はさらに増している。

そこで、軟 X 線ナノ XMCD(X-ray Magnetic Circular Dichroism)を利用して、HDD 記録ヘッドの磁極およびシールド部の磁化反転過程の観察を試みた。実際の記録過程における磁化状態を観察するために、ヘッドが駆動している状態で観測を行うことを目標とした。これは従来にない挑戦的な試みである。微細な磁性体の高速磁化過程の観察としてはこれまでも報告されているが[5]、これらは磁性体の発振や歳差運動といった自発的な単調な振動現象の観察が主であり、観察できる磁化反転過程には限りがあった。一方、今回の実験は、人為的な周波数・パターンで、観察対象に任意のタイミングで磁化反転を起こすところに特徴がある。今回試みる記録ヘッドの高速磁化過程の直接観察ができることによって、例えば、記録ヘッドの微細構造や励磁電流パターンの最適化が可能となり、HDD の高密度化に大きく貢献することが期待される

実験：

観察には、空間分解能約 100 nm での磁化イメージングが可能な BL25SU のナノ XMCD 装置を用いた。X 線吸収の測定には、サンプルに駆動電圧を印加することが可能な、高次光制限アパーチャーを

利用した電子収量法を採用した。ナノ XMCD 装置の測定チャンバー内に記録ヘッドサンプルを設置し、チャンバー外からフランジを介してヘッドに高周波ケーブルを接続し、外部のパルス電源から駆動電流を印加した状態で観察を行った。ヘッドサンプルを設置した状態での到達真空度は 2×10^{-7} Pa 程度であった。

測定系のブロック図を図 1 上部に示す。RF バンチクロックに駆動電流のタイミングを同期させることで、42.4 MHz で繰り返し同じ記録過程の測定を行えるようにした。そして、駆動電流タイミングを所望の値でディレイさせることで、設定したディレイ分だけ遅れたタイミングでの磁化状態を観察する。ディレイ時間を少しずつずらしていくことで、磁化状態の時間変化をサブナノ秒の時間分解能でストロボスコープ的に観察できることになる。RF バンチクロックと駆動電流パルスのオシロスコープ観察画面を図 1 下部に示す。RF バンチクロックに対する駆動電流のタイミングジッタは 1σ で 3 ps 程度であり、測定の最小時間刻み 50 ps に対して十分小さいことがわかった。

測定時には、サンプルホルダーや通電ユニット等からコンタミが発生し、観察部位に C として堆積する問題が起こる。そこでこれを除去するために、Ar イオンエッチングによるサンプル観察部位のクリーニングを適宜実施した。この処理によりチャンバ全体の真空度もさらに向上し、コンタミをより防止できることも分かった。また、サンプル駆動回路の発熱による若干のドリフトが発生したが、1~数時間のプレヒート動作をさせた後で観察実験を行うことでその影響を小さくするように試みた。

観察で得られた磁区像のコントラスト強度から磁化量を推定できるように、測定系を超電導マグネット内に移動させて飽和磁化させた場合の XMCD 像の観察も行った。この測定で得られた飽和レベルでの XMCD 強度を用いて、磁区像のコントラストに定量性を与えることができた。

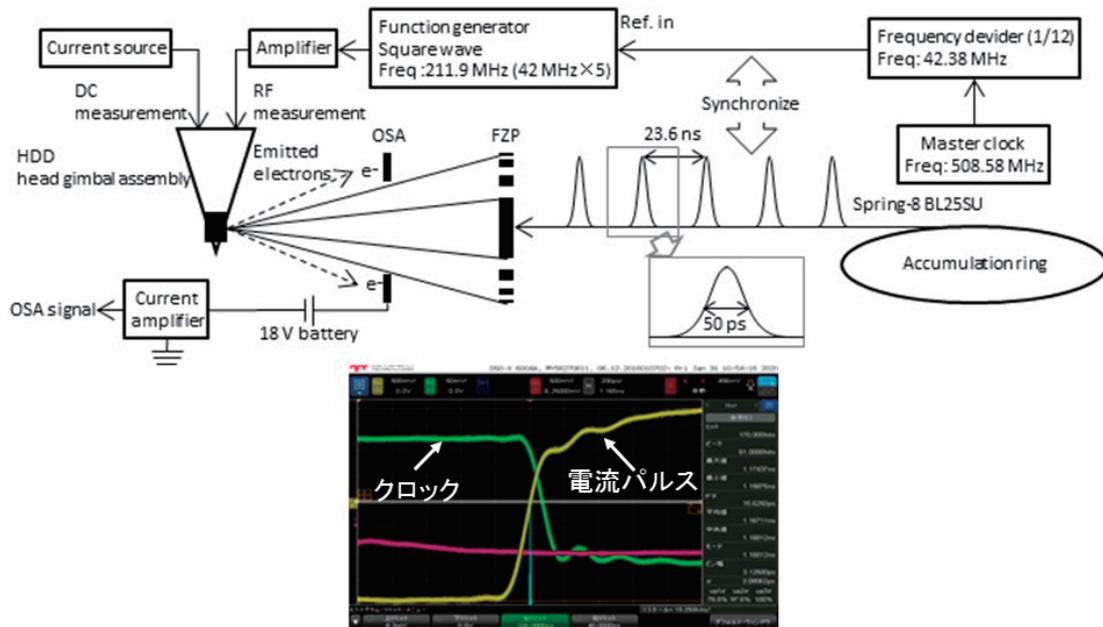


図 1 測定系のブロック図と駆動電流パルス波形

結果および考察：

観察結果を図 2 に示す。Fe の XMCD 像を各ディレイ時間に沿って観察したものである。左上に観察部位の Fe 吸収像を示す。台形状の磁極の下部にシールド部が設けられている構造である。磁極は Fe が主成分で、シールド分は Co リッチの CoFe 合金である。中央部に XMCD 像を示す。赤-青のカラースケールは紙面垂直方向の磁化成分を示す。図中に記した数字は RF バンチクロックに対するディレイ時間である。図の一部に太枠で囲って示されている像は磁極部分を高空間分解能撮像したものである。電流で駆動させている磁極およびその周辺部の磁区構造をこのように高時間分解能で観察した例はこれまでになく、世界で初めて得られた成果である。

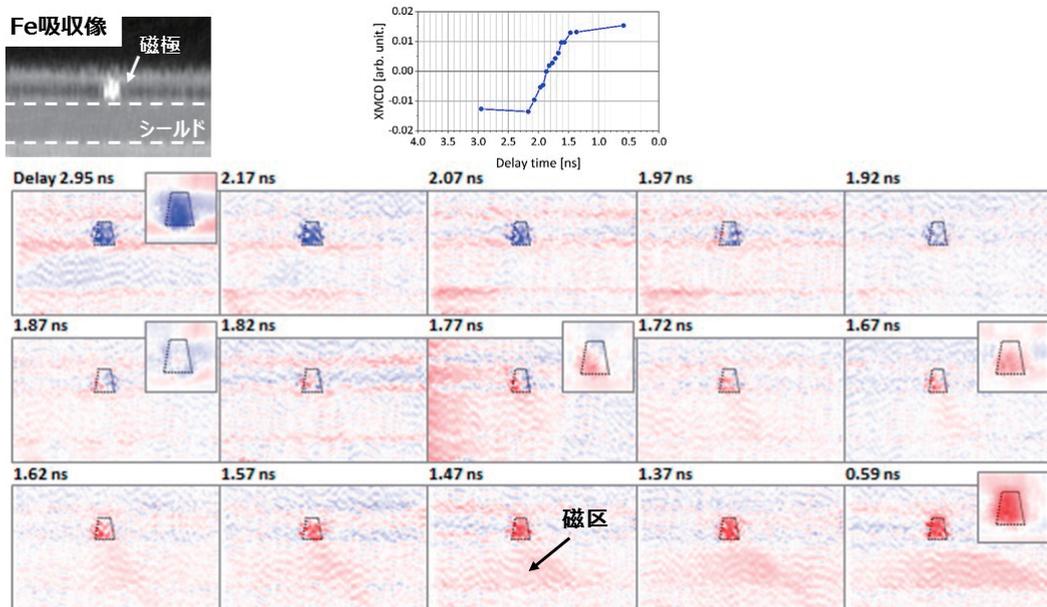
図から明らかのように、磁極部分の磁化が 1.77 ns あたりで反転していることがわかる。また、磁極部分の磁化反転に伴ってシールド部分にも磁区が形成され、その大きさと向きが時間と共に変化して

いることもわかる。シールド部分の磁区構造については Co の XMCD 観察でも同様なものが確認され、ノイズやアーティファクトではない磁区構造であることが確認された。微細磁区構造の生成や変化していく過程の詳細については得られたデータを基に今後検討していく予定である。

磁化量の時間変化を見積もるために、磁極部分の XMCD コントラスト強度の面積分値を求め、それを時間とともにプロットしたのが上中央部に示したグラフである。時間と共にリニアに磁化が変化していることがわかった。この時の駆動電流はヘッドの磁化が飽和する 35 mA まで 100 ps 程度で立ち上がるように設定されている。これに対し、磁極の磁化は駆動電流よりも遅く 500 ps ほどで変化していることがわかった。このような磁化変化の遅れはシミュレーションで予想はされていたが、遅れの大きさ、および磁化変化の過程は今回初めて実験的に得られた知見である。この結果を基に、駆動電流の立ち上がりを 500 ps と遅くした測定を行ったところ、磁化変化も 500 ps で追従することがわかった。以上のことから、この記録ヘッドの磁極部分の磁化は 500 ps 程度の立ち上がり速度を持っていることがわかった。

以上、世界で初めてとなる、HDD 記録ヘッド部の駆動電流印加時のナノスケール磁区の動的観察に成功した。磁極部の磁化の立ち上がり時間については今回初めて分かった知見であり、今後の HDD ヘッドの開発に大きく寄与できるものと期待される。

図2 観察した磁区像の時間変化。(左上図) Fe 吸収像による全体構成像。(上図) 観察像から求めた磁化量の時間変化。



今後の課題：

今回の観察においては、サンプルのドリフトがあったため、XMCD 撮影時にも像がわずかに動き、差分処理によって得られる XMCD 像の空間分解能を劣化させる要因になっている。これについては、得られた像の空間補完を行うなどして、より詳細な XMCD 像を得る検討を行う予定である。また、ドリフトの少ないサンプルホルダの設計も必要であると思われる。

謝辞：

本研究では、元素戦略プロジェクト<磁性材料研究拠点>で開発されたナノ XMCD 装置を利用しました。

参考文献：

[1] 中村慶久 他、*垂直磁気記録の最新技術*、シーエムシー出版、東京、2007、第3章
 [2] J. Einsle et al., *Nano Research*, **8**, 1241 (2015)
 [3] S. Song et al., *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3730 (2009)
 [4] J.-G. Zhu et al., *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 125 (2008)
 [5] N. Kikuchi et al., *J. Appl. Phys.*, **126**, 083908 (2019)