

# アナログ記憶素子としての磁性金属-酸化物グラニューラー薄膜 における熱ゆらぎの制御手法

秋田大学 理工学研究科 数理・電気電子情報学専攻 菊池伸明

Control Method for Magnetic Granular Films as Analog Memory Element

Nobuaki Kikuchi

Department of Engineering Science, Akita University

情報を保存するハードディスクドライブでは、ナノスケールの強磁性体微粒子と酸化物マトリクスからなるグラニューラー薄膜が記録媒体として用いられている。現在はデジタル情報の記録に用いられているが、人工ニューロン実現のためのアナログ情報の記録・演算素子としての可能性も秘めている。その実現のためには、熱揺らぎによる確率的な反転と、より積極的には記録(記憶)の消失プロセスも制御する必要がある。本研究では、GHz帯のマイクロ波磁場の存在下での熱揺らぎ現象について実験および計算の両面から取り組み、マイクロ波磁場が磁性微粒子の熱揺らぎ挙動を大きく変化させることを明らかにした。

Granular magnetic media consisting of nanoscale magnetic particles and oxide matrix, are widely used for Hard Disk Drives (HDD). In HDDs, digital information is stored as a direction of magnetization. The granular media can also store analog information as an average magnetization direction. In order to realize such analog functions, it is required to control probabilistic behavior by thermal activation. In this work, we have carried out experiments and simulations on magnetization reversal of granular media under microwave field. We found that the application of microwave field has a large impact on the behavior of thermal activation.

## 1. はじめに

爆発的に増え続けるデータの保存には、磁気記録の一種であるハードディスクドライブ(Hard Disk Drive:HDD)が広く用いられている。スマートフォンやノートパソコンなどの情報機器には半導体のフラッシュメモリが用いられるようになり、また、ネットワークを通じたクラウドストレージが普及したことによって一般の消費者が大容量のHDDを意識することは少なくなった。その一方で、それらのデータはデータセンターに蓄積されるようになり、その需要は増大し続けている。また、HDDの台数の増加はデータセンターの数や規模に直結することから、増え続ける消費電力という環境問題の観点からもその大容量化・高密度化は喫緊の課題となっている。HDDには、直径が数nmの強磁性微粒子と、それを囲む酸化物からなるグラニューラー薄膜が記録媒体として用いられている。現在、1ビットのデジタル情報を十数個程度の磁性粒子の磁化の向きが担っており、さらなる記録密度の向上のためには磁性微粒子の微細化が必須となっている。ところが、磁性粒子の微細化によって磁化を安定化する磁気異方性エネルギーと室温程度の熱エネルギーの競合が

顕在化し、磁化の熱揺らぎの問題が顕在化するようになった。熱による磁化の反転は“0”と“1”というデジタル情報の消失という致命的な問題を引き起こす。また、磁化の反転過程が確率的に起こるため、媒体への記録の書き込みが正確に行えないという問題も生じている。

一方、近年盛んに研究が行われている機械学習や人工知能技術の立場からこの現象を眺めると、同じ物理現象の様相が異なって見えてくる。現在、人工知能技術の分野で成功を収め、主流となっているのはデジタル情報を扱う既存の計算機を用い、ソフトウェアによりニューロンの機能を実装する方式である。他方、ハードウェアによって人間の神経回路を構成するニューロンの動作を模倣し、より高効率・低消費電力を施行した研究も進められている。これらの人工ニューロンに必要な機能の一つに、各ニューロン間のつながりの強さを保存する不揮発メモリ素子がある。これらの素子は0から1の間のアナログ的な値を保存する必要がある一方で、デジタルコンピューティングのような高い精度は要求されないという特徴がある。メモリそのものがアナログ性を示す強誘電体メモリや抵抗変化型メモリの利用が提案されてきた。これらの材料に対し、磁性体は高速な反転が可能、化学的変化を伴わないという特徴を持ち、強磁性 / 反強磁性界面の交換バイアス現象を利用して小規模なパターン認識などの動作が実証されている<sup>[1]</sup>。しかしながら、現状では素子サイズが5 $\mu\text{m}$ と非常に大きいことが難点であり、微細化が必要となっている。実は、先に述べたグラニューラー媒体は1ビットの内部に多数の粒子を含むことから、デジタル媒体として用いられているものの本質はアナログ媒体であり、また、その機能を100nm程度の微小な領域に持たせることができるという特徴がある。また、先述の熱エネルギーによる記憶の消失は、脳の“忘却”という機能に対応させることができ、一つのナノスケールの素子により記憶と忘却、あるいは長期記憶と短期記憶とを実現できる可能性がある。これらの機能を要求された時間スケールで実現するためには、グラニューラー薄膜における熱活性の影響を定量的に把握し、材料・デバイスの双方の観点からの設計指針を得る必要がある。グラニューラー薄膜をアナログ情報を担持する媒体・素子として再定義し、その観点から微小な磁性体の集団における熱揺らぎの効果と、アナログ挙動の理解を進めることを目的とした。

本研究では、GHz帯のマイクロ波磁場の印加により、より低磁場での磁化反転が期待できるマイクロ波アシスト磁化反転に着目し<sup>[例えば2,3]</sup>、粒子間の相互作用とマイクロ波磁場、熱揺らぎが磁化反転に及ぼす影響について研究を進めた。

## 2. 実験方法

マイクロ波アシスト磁化反転実験用の試料は、CoCrPt-SiO<sub>2</sub>グラニューラー薄膜を用いた<sup>[4]</sup>。基板には熱伝導性の高いノンドーパのSiウェハーを用い、マイクロ波磁場印加用のAuコプレーナ線路(Co-planar Wave Guide: CPW)を作製した。CPWの信号線はグラニューラー薄膜試料近傍で幅1 $\mu\text{m}$ に狭窄してしている。CPW上に厚さ100nmのSiO<sub>x</sub>薄膜を成膜した後、下地層とともに磁性層をスパッタリングによって成膜した。薄膜の構造はTa(5)/Pt(10)/Ru(20)/CoCrPt-SiO<sub>2</sub>(15- $t_{\text{cont}}$ )/CoCrPt( $t_{\text{cont}}$ )/Pt(2)で、カッコ内の数値はnm単位での膜厚を表す。CoCrPt合金の組成比は、Co:Cr:Pt=72:8:20とし、SiO<sub>2</sub>の体積比率は30vol.%とした。磁性粒子の平均粒径は8nmである。グラニューラー層とPt保護層の間に、磁性粒子間の交換結合を制御することを目的として厚さ $t_{\text{cont}}$ (=0、1、

2nm)の磁性合金層を挿入した。磁化曲線の測定は異常 Hall 効果 (Anomalous Hall Effect : AHE) を検出することにより行い、外部磁場は膜面に垂直に印加して行った。マイクロ波磁場は信号線に印加する高周波電流により発生させ、振幅は膜面内方向に  $\mu_0 h_{rf} = 48 \text{ mT}$  とした。

### 3. 実験結果

異常 Hall 効果により、粒子間結合強度の異なる各試料の磁化曲線を測定した。いずれの試料においてもマイクロ波磁場の印加により反転磁場は低下し、明瞭なアシスト効果が得られた。いずれの磁性合金層厚  $t_{\text{cont}}$  の試料においても、マイクロ波磁場周波数が  $f_{\text{rf}} = 20 \text{ GHz}$  近傍まで周波数の増加に伴って緩やかに保持力が低下し、それ以上の周波数においてはアシスト効果が低下する (保磁力が上昇する) という挙動が見られた。いずれの磁性合金層厚の試料においても得られる最大のアシスト効果はほぼ同程度であったが、アシスト効果が最大となる、マイクロ波磁場周波数は磁性合金層厚  $t_{\text{cont}}$  の増加に伴って低周波側に遷移した。このような変化は、粒子間交換結合の増加による反転体積の増加 (熱揺らぎの影響の低下) を考慮すると、マイクロ波磁場下における磁化の熱揺らぎで定性的には設営できる。しかしながら、磁性微粒子間の相互作用の影響を詳細に議論するためには、同一の試料での顕微鏡を用いた磁化状態の観察が望ましい。しかしながら、磁区観測装置での高周波磁場の印加の困難や、分解能の制限があることから、マイクロ波磁場下での反転状態の変化については計算機シミュレーションを用いて検討することにした。

### 4. 計算機シミュレーション

磁化反転挙動の数値計算は、GPU を用いたマイクロマグネティクス計算用フリーソフトウェア mumax3<sup>[5]</sup> により、汎用 PC にて行った。計算に当たっては、膜厚 12nm の磁性単層膜を仮定し、平均粒径 6nm となるようにボロノイ分割した。Fig.1 に分割したセルの一例を示す。この粒径は、実験に用いた試料の磁性微粒子径に比べて小さいが、妥当な計算時間で熱揺らぎの効果も取り入れるために設定した。磁性層の飽和磁化  $M_s$  は 600 kA/m、一軸磁気異方性定数  $K_u$  を  $6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$  とした。磁化容易軸は膜面に垂直方向とし、今回はその方向および強度の分散は考慮していない。粒子内の交換スチ

フネス定数  $A_{\text{grain}} = 1 \times 10^{-11} \text{ J/m}$  とし、粒子間の交換スチフネス定数  $A_{\text{int}}$  は  $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}}$  が 0 から 0.1 の範囲になるように変化させて計算させた。磁化曲線の計算は膜面に垂直方向の外部磁場を印加して計算し、その掃引速度は 0.2 T/ns とした。熱による磁化の揺らぎの効果を取り込むため、温度は  $T = 300 \text{ K}$  とした。マイクロ波磁場の振幅は  $\mu_0 h_{\text{rf}} = 50 \text{ mT}$  とした。図 1 に、 $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}} = 0$ 、つまり粒子間の交換結合がない場合のマイクロマグネティクス計算から得られた磁化曲線の一例を示す。マイクロ波磁場の周波数  $f_{\text{rf}}$  が 10 GHz 以下の場合には磁化曲線は外部磁場  $B_{\text{ext}}$  の変化に対して滑らかな変化を示すが、 $f_{\text{rf}} = 20 \text{ GHz}$  の場合には、 $B_{\text{ext}}$  が 1.0 から 1.5 T の間の領域でいったん変化が緩やかになる挙動が見ら

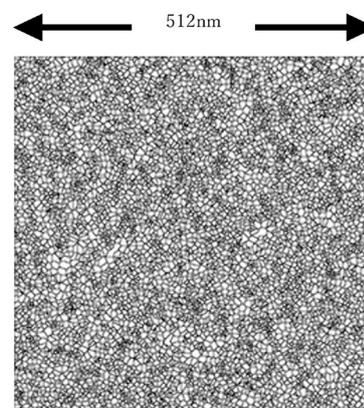


Fig.1 Voronoi cells for micromagnetics simulation

れた。磁化曲線の傾き、つまり各粒子の反転磁場のばらつき要因は静磁気相互作用と熱揺らぎによる確率的な反転の二種類が主であるが、マイクロ波磁場周波数による静磁気的な相互作用の変化は小さいため、この変化はマイクロ波磁場周波数によって熱揺らぎの影響が大きく変化することを反映するものである。この挙動は、KikuchiらがLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式をもとに磁化反転のエネルギー障壁を解析的に求めた結果とよく対応する<sup>[6]</sup>。また、Fig.2に示すような階段状の磁化曲線は、今回計算したいずれの $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}}$ の値においても見られ、マイクロ波磁場下での反転挙動は外部磁場に対して単調ではなく、熱揺らぎの効果が強く反映されることが明らかになった。磁化曲線の計算時には、各磁場における磁化の反転の様子を二次元分布が得られる。磁化分布から、磁化方向の自己相関関数を求め、反転クラスターサイズの見積もりを行った。Fig.3に、 $f_{\text{rf}} = 14 \text{ GHz}$ ,  $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}} = 0.05$ の場合の結果を示す。自己相関が0とは、ある点から、その距離だけ離れた場合に磁化の向きが平行な場合と反平行な場合の確率が同等になることを表す。よって、本研究では、自己相関の値が最初に0になる距離を自己相関長(クラスターサイズ)とみなした。Fig.4に、 $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}} = 0.0$ および $0.05$ の場合の自己相関長をマイクロ波磁場周波数 $f_{\text{rf}}$ の関数として示す。いずれの条件においても、マイクロ波磁場周波数の増大とともに自己相関長が低下し、ある周波数を境に増大に転じているのがわかる。磁化曲線の解析から、この周波数はアシスト効果が消失する臨界周波数によく一致することがわかっており、マイクロ波磁場の印加は反転磁場の低減とともに、熱揺らぎの存在下では反転クラスターサイズの低下も引き起こすことが分かった。

## 5. 結論

本研究では、マイクロ波磁場印加下でのグラニューラ媒体において熱揺らぎが及ぼす影響について、粒子間相互作用が異なる条件下で実験および計算の両面からアプローチした。磁化曲線の評価からは、マイクロ波磁場の周波数が高い領域では熱揺らぎの効果が顕在化

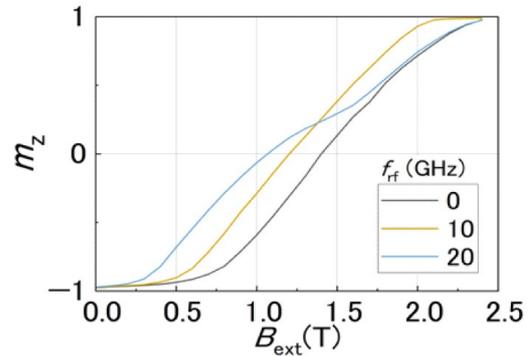


Fig.2 Calculated magnetization curves for microwave frequency  $f_{\text{rf}} = 0\text{--}20 \text{ GHz}$ .  $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}} = 0$ .

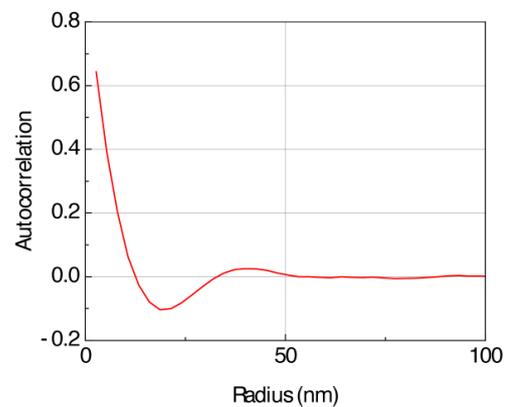


Fig.3 Autocorrelation function as a function of radius ( $f_{\text{rf}} = 14 \text{ GHz}$ ,  $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}} = 0.05$ ).

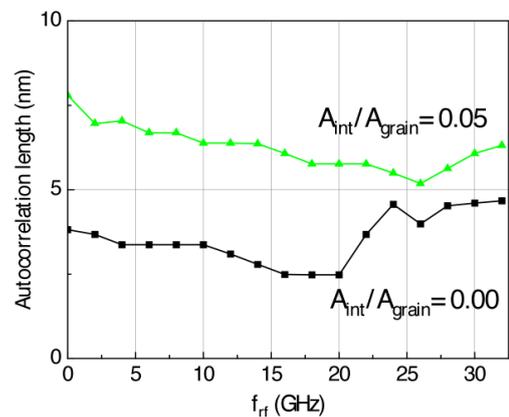


Fig.4 Autocorrelation length as a function of microwave frequency  $f_{\text{rf}}$  for  $A_{\text{int}}/A_{\text{grain}} = 0.0$  and  $0.05$ .

し、階段状の磁化曲線となることが明らかとなった。また、自己相関長の解析からはマイクロ波磁場の存在によりクラスターサイズの低減が生じ、熱揺らぎの効果がより顕在化しやすくなることが示唆された。

## 6. 謝辞

本研究は、第44回(令和4年度)日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行った。ここに深謝いたします。また、マイクロマグネティクス計算に協力してくれた秋田大学生の作並浩太氏に謝意を表します。

## 7. 参考文献

- [1] A. Kurenkov *et al*, *Adv. Mater.* 31, 1900636 (2019).
- [2] J.-G. Zhu *et al*, *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 125 (2008).
- [3] G. Bertotti *et al*, *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 724 (2001).
- [4] N. Kikuchi *et al*, *Jpn J. Appl. Phys.* 62, SB1015 (2023).
- [5] A. Vansteenkiste *et al*, *AIP Advances* 4, 107133 (2014).
- [6] N. Kikuchi *et al*, *Phys. Rev. B*, 105, 054430 (2022).