

# 傾斜異方性記録媒体の単粒子における磁化反転時間の検討

## Magnetization switching time of graded anisotropy recording media grains

秋田谷尚紀・Simon Greaves・村岡裕明

東北大学電気通信研究所, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

N. Akitaya, S. Greaves, and H. Muraoka

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai Miyagi 980-8577, Japan

A media grain with graded anisotropy is expected to have a shorter magnetization reversal time than a single layer grain due to the lower uniaxial anisotropy at one end of the grain. Here the magnetization reversal time of graded anisotropy grains is examined as a function of the anisotropy gradient and applied field and compared with single layer grains. Using graded anisotropy media the magnetization reversal time can be reduced to about 2/3 that of a single layer grain with the same damping constant. If the anisotropy gradient is increased the damping constant of the lower anisotropy part of the grain has a significant effect on the magnetization reversal time.

**Key words:** Magnetization switching time, LLG simulation, graded anisotropy media, damping constant

### 1. 序論

近年, ハードディスク装置(HDD: Hard disk drive)の大容量化とともに転送レートも向上してきている. 転送レートが向上すると 1 bit あたりの書き込み時間が短くなるが, HDD に用いられている磁性粒子の磁化は反転の際に歳差運動しながら徐々に反転するため, 高速記録時には磁化の反転が間に合わず書き込むことができなくなる可能性がある. よって, 磁化反転時間について検討を行う必要がある.

磁化反転時間を短くするには, 媒体の保磁力に対して印加磁界を大きくすることや容易軸と印加磁界の間に角度をつけることが効果的である<sup>1)</sup>. 我々は以前, 単層構造の単粒子において単磁極(SPT: Single pole type)ヘッドとリングヘッドを組み合わせることで印加磁界に角度をつけ, タイミングよく磁界の印加を止めることで歳差運動を抑えて磁化反転時間を短縮する方法<sup>2)</sup>を提案した. また, 現在 HDD の記録媒体には磁化反転しやすい軟磁性層を用いて, 熱安定性は高いが保磁力の大きい硬磁性層の反転を促すことで熱安定性を保ちながら反転磁界を下げるができる ECC 媒体<sup>3)</sup>や傾斜異方性媒体<sup>4)</sup>が用いられているがこれらの媒体の反転時間についての検討はまだ少ない. 2層 ECC 構造の粒子の磁化反転時間について我々は以前に検討を行い, 硬磁性層の熱安定性が単層媒体の熱安定性と等しい場合において, 単層媒体に比べて同じダンピング定数で 1/2 の以下の反転時間で反転できることを示した<sup>5)</sup>. 本論文では, 傾斜異方性媒体の単粒子における磁化反転時間についてマイクロマグネティックシミュレーションにより検討を行ったので報告する.

### 2. 計算モデル

本研究では, Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式を用いて単粒子の磁化反転時間を計算し, 単層モデルと傾斜異方性モデルの比較を行った. 単層モデル・傾斜異方性モデルともに粒子のサイズを 7 nm (width) × 7 nm (length) × 15 nm (thickness)とした. 厚さ 1 nm でセルを分割し, セ

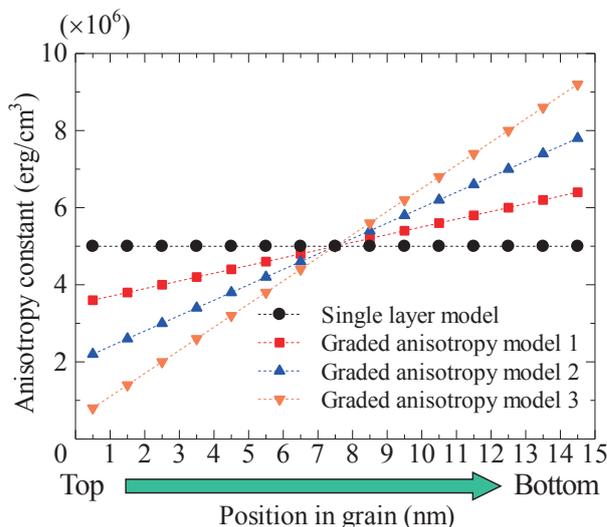


Fig. 1 Anisotropy constant as a function of position in a 15 nm thick grain.

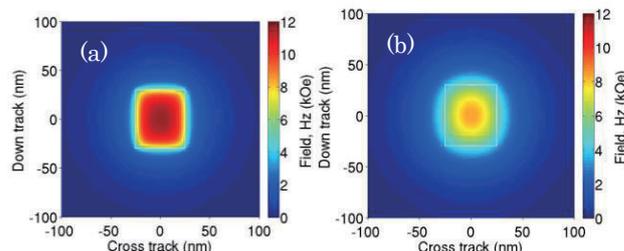
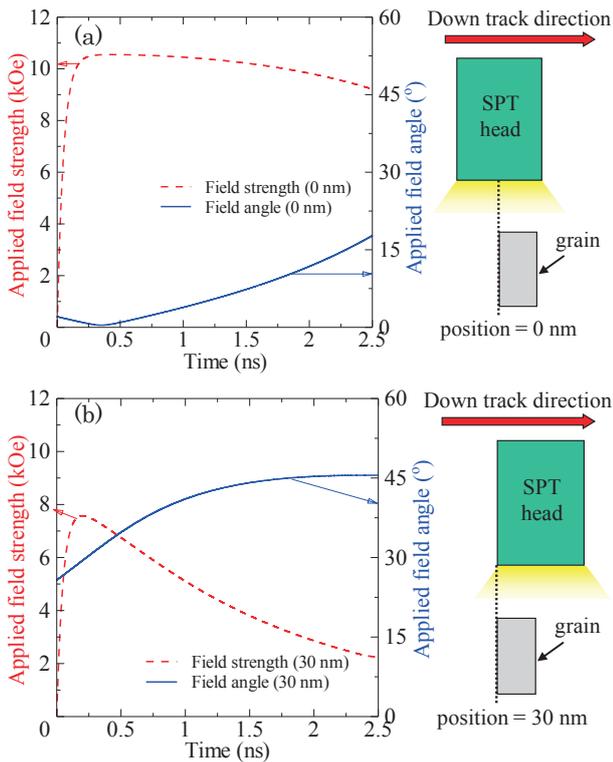
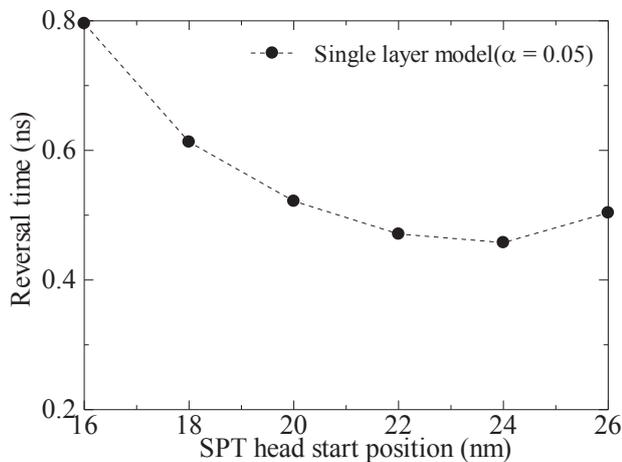


Fig. 2 Head field distributions in medium. (a) Top layer of medium, (b) bottom layer of medium.

ル間の交換結合定数を 10 erg/cm<sup>2</sup>として計算を行った. 単層モデルでは, 飽和磁化  $M_s$ を 800 emu/cm<sup>3</sup>, 異方性定数  $K_u$ を  $5.0 \times 10^6$  erg/cm<sup>3</sup>とし, 傾斜異方性モデルでは  $M_s$ を 800 emu/cm<sup>3</sup>, 全体の平均の  $K_u$ を  $5.0 \times 10^6$  erg/cm<sup>3</sup>と



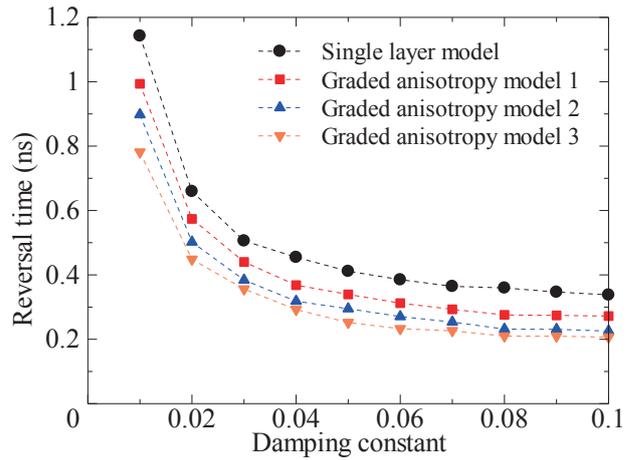
**Fig. 3** Time dependence of average applied field strength and average angle in a grain, and definition of the SPT head start position. (a) SPT head start position = 0 nm, (b) SPT head start position = 30 nm.



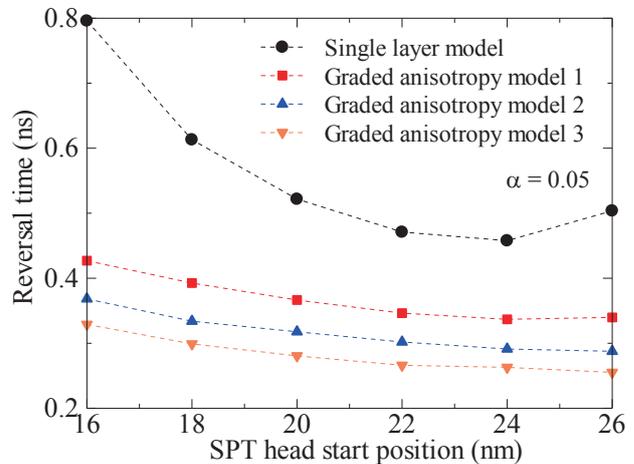
**Fig. 4** Dependence of magnetization reversal time on SPT head start position for a single layer grain.

して傾斜の違う 3 種類のモデルを用いた。それぞれのモデルの  $K_u$  を表したグラフを Fig.1 に示す。単層モデルは傾斜がなく全体の  $K_u$  が  $5.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$  であり、傾斜異方性モデル 1 では  $K_u$  が  $3.6 \sim 6.4 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、モデル 2 では  $K_u$  が  $2.2 \sim 7.8 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、モデル 3 では  $K_u$  が  $0.8 \sim 9.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$  の各々の範囲でそれぞれ線形に変化させている。すべての条件においてノイズを抑えて傾向を見るために周囲温度は 4.2 K とした。

書き込みヘッドには  $50 \text{ nm} \times 60 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$  の直方体の SPT ヘッドモデルを用い、ヘッドの  $M_s$  を  $1910 \text{ emu/cm}^3$ 、軟磁性裏打ち層(SUL : Soft under layer)の  $M_s$  を  $1600$



**Fig. 5** Dependence of magnetization reversal time on damping constant for single layer and graded anisotropy grains.

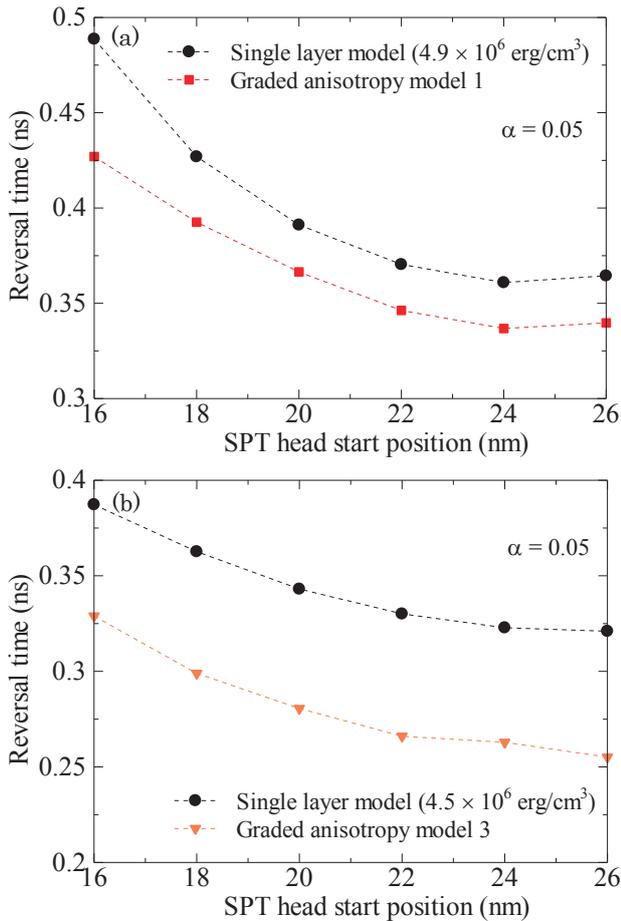


**Fig. 6** Influence of SPT head start position on magnetization reversal time for single layer and graded anisotropy grains with  $\alpha = 0.05$ .

$\text{emu/cm}^3$  とした。このときの粒子の最上部の高さと最下部の高さにおける  $z$  軸(垂直)方向のヘッドの磁界分布を Fig.2 に示す。粒子の最上部の高さではヘッドの最大磁界は約  $11.5 \text{ kOe}$  であり、最下部の高さでは最大磁界は約  $8.5 \text{ kOe}$  であった。また、磁界の立ち上がり時間(0 から最大磁界の 90% となるまでの時間)を  $0.12 \text{ ns}$  とし、 $-z$  方向に磁界を印加しながら  $10 \text{ m/s}$  の速さでヘッドを動かした。反転時間は上向き(+ $z$  方向)の磁化に下向き(- $z$  方向)の磁界を印加し、磁界の印加が始まってから全体の磁化の大きさの平均が収束したときの大きさの 90% になるまでにかかる時間とした。ヘッドの磁界勾配や立ち上がりのために、ヘッドが動く際の初期位置を変化させると Fig.3 のように粒子が受ける磁界が変化し、反転時間も Fig.4 のように開始位置によって変化する。本研究では、最短となった位置における時間を反転時間として用いた。

### 3. 結果

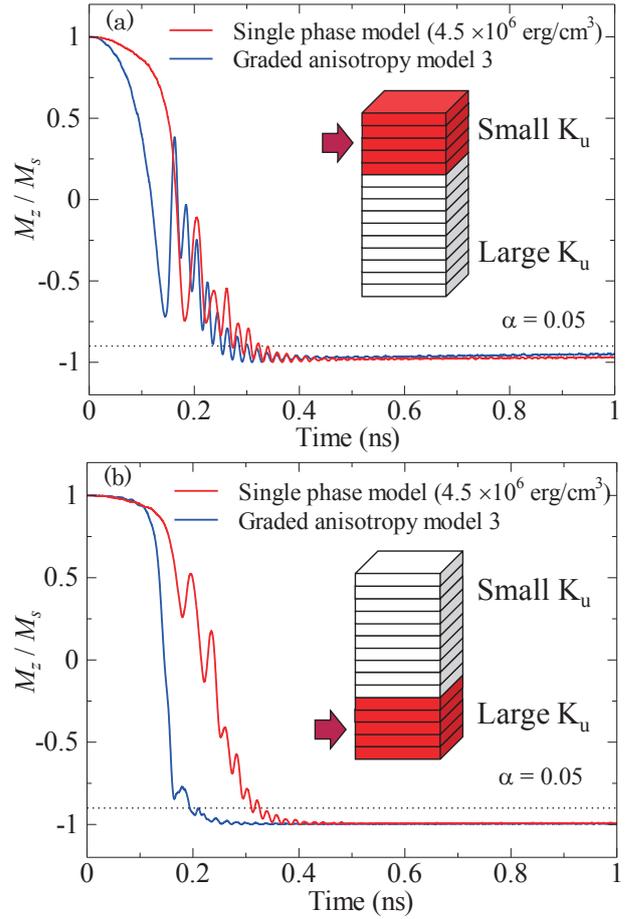
Fig.5 は単層モデルと傾斜異方性モデルの反転時間のダンピング定数依存性を示したものである。このとき、ダンピング定数はすべての層で等しい値を用いた。すべてのモデルにおいてダンピング定数が小さくなるにつれて反転



**Fig. 7** Influence of coercivity on magnetization reversal time. (a) Single layer and graded anisotropy model 1 grains have the same coercivity, (b) single layer and graded anisotropy model 3 grains have the same coercivity.  $\alpha = 0.05$ .

時間が長くなった。単層モデルに比べて傾斜異方性モデルのほうが反転時間は短く、傾斜度は大きいほうが反転時間は短くなり、傾斜度が一番大きいモデル 3 では単層モデルの 2/3 程度となった。このときのヘッドからの磁界や保磁力の影響を調べる。Fig.6 はダンピング定数が 0.05 のときの反転時間のヘッドの初期位置依存性である。すべてのモデルにおいて反転時間が最も短くなるのは 24 ~ 26 nm 程度であるため、印加磁界強度や角度の差はほとんどないと考えられる。

次に、保磁力による影響を調べるために、単層モデルの異方性定数の大きさを変化させて傾斜異方性モデルと保磁力を等しくしたときの反転時間を計算した。傾斜異方性モデル 1 では  $K_u$  が  $4.9 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、傾斜異方性モデル 3 では  $K_u$  が  $4.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$  のときに保磁力がほぼ等しくなった。このときのダンピング定数が 0.05 の場合の反転時間のヘッドの初期位置依存性を Fig.7 に示す。保磁力を同程度にした場合においても傾斜異方性モデルのほうが反転時間は短くなった。また、単層モデルと傾斜異方性モデルの保磁力が同程度であっても、傾斜が大きくなると単層モデルと傾斜異方性モデルの反転時間の差が大きくなっており、モデル 1 では単層モデルの約 7%、モデル 3 では単層モデルの約 20% 反転時間が短くなった。これらのことから、記録ヘッドから受ける印加磁界や媒体の保磁



**Fig. 8** Comparison of magnetization switching for single layer and graded anisotropy model 3 with the same coercivity. (a) Top part of the grain, (b) bottom part of the grain.  $\alpha = 0.05$ .

力の影響以外の要因で傾斜異方性モデルの反転時間が短くなったと考えられる。

そこで、傾斜異方性モデルを用いることで、反転時間が短くなった理由について調べるために、磁化の反転の様子を確認した。Fig.8 は単層モデルと傾斜異方性モデル 3 を厚さ 5 nm で 3 分割したときの最上層部と最下層部の容易軸方向の磁化の時間変化を示したものである。このとき、単層の保磁力は傾斜異方性モデル 3 に合わせ、ダンピング定数は 0.05 とした。単層モデルは最上層部・最下層部の反転が始まるのがほぼ同時であるが、傾斜異方性モデルでは最上層部から反転が始まり、最上層部が  $M_z / M_s = 0$  付近まで反転してから最下層部の反転が始まっていることから傾斜異方性媒体の磁気異方性の小さい最上層部から磁気異方性の高い最下層部へ徐々に反転をアシストするという特徴が確認できる。また、傾斜異方性モデルでは単層モデルに比べて最上層部の反転開始までの時間が非常に早い。これは、傾斜異方性モデル 3 では最上層部の平均の  $K_u$  が  $2.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$  と非常に小さいためヘッド磁界の影響を受けやすいからであると考えられる。最下層部では、単層モデルと傾斜異方性モデルで反転開始までの時間にほとんど差はないが、単層モデルは容易軸方向に歳差運動しながら反転しているのに対し、傾斜異方性モデルではほとんど歳差運動せずに反転が完了している。これは我々が以前に提案した単層媒体において十分な角度をつけて磁界を印加し、適切なタイミ

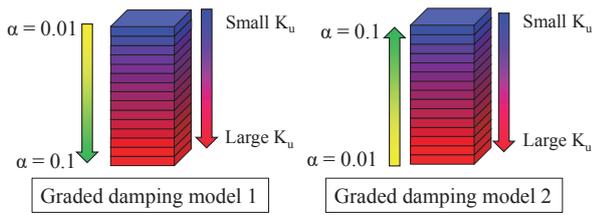


Fig. 9 Graded damping model configuration.

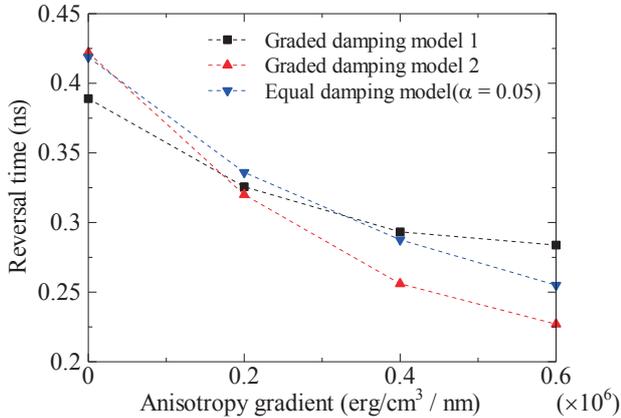


Fig. 10 Dependence of magnetization reversal time on anisotropy gradient.

ングで磁界の印加を止めることでほとんど歳差運動させずに反転を完了させる方法<sup>2)</sup>と同様な反転の様子であると考えられる。傾斜異方性モデルでは下層部の  $K_u$  の値が大きいため下層部の反転には上層部のアシストが必要となる。しかし、下層部の磁化が  $-z$  方向を向いたあとに再び歳差運動により  $+z$  方向を向くための上層部のアシストは十分に得ることができない。よって、そのまま容易軸方向に収束するため、傾斜異方性モデルでは上層部は歳差運動しているのに対し、下層部ではほとんど歳差運動せずに反転することができ、粒子全体でみると単層モデル比べて傾斜異方性モデルのほうが反転時間は短くなったと考えられる。

Fig.8 から傾斜異方性モデルでは、下層部ではほとんど歳差運動していないため反転時間が短い、上層部では単層の場合よりも歳差運動が激しく反転に時間がかかっていることがわかる。このことから上層部のダンピング定数を大きくすることで反転時間が短くできると考えられる。そこで、異方性定数とダンピング定数を変化させた傾斜ダンピングモデルを用いて反転時間を計算した。Fig.9 のように、傾斜ダンピングモデル 1 では最上部のダンピング定数を 0.01 とし、最下部のダンピング定数を 0.1 として線形に変化させ、傾斜ダンピングモデル 2 ではモデル 1 とは反対に最上部のダンピング定数を 0.1 とし、最下部のダンピング定数を 0.01 として線形に変化させた。このときの反転時間の異方性定数の傾斜度依存性を Fig.10 に示す。異方性定数の傾斜度が  $0 \text{ erg/cm}^3 / \text{nm}$  のときには  $K_u = 5.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$  の単層モデル、傾斜度が  $0.2 \text{ erg/cm}^3 / \text{nm}$  は

傾斜異方性モデル 1、傾斜度が  $0.4 \text{ erg/cm}^3 / \text{nm}$  は傾斜異方性モデル 2、傾斜度が  $0.6 \text{ erg/cm}^3 / \text{nm}$  は傾斜異方性モデル 3 に対応している。単層モデルでは下層部のダンピング定数が大きいほうが反転時間は短くなった。これは、Fig.8 から単層モデルの上層部は  $M_z/M_s = -0.5$  付近で  $z$  軸方向に振動しているのに対し、下層部は  $M_z/M_s = 0$  付近で  $z$  軸方向に振動しているため、下層部のダンピング定数が大きくなったことにより、下層部の収束が早まり、全体の反転が早まったと考えられる。傾斜異方性モデルでは上層部のダンピング定数が大きいほうが反転時間は短くなり、傾斜度が大きくなった際には傾斜ダンピングモデル 1 に比べて、傾斜ダンピングモデル 2 の反転時間の変化が大きいため、モデル 1 と 2 の反転時間の差が大きくなった。これは、下層部は Fig.8 で示したようにほとんど歳差運動せずに収束しているため、ダンピング定数の影響は小さい。しかし、上層部では傾斜度が小さいときには  $K_u$  の値は大きい、傾斜度が大きくなるにつれて  $K_u$  の値が小さくなり、外部磁界の影響を受けやすくなることで、ダンピング定数が大きく影響し、ダンピング定数が小さいときには容易軸方向への収束が遅いが、ダンピング定数が大きいときには収束が早くなったためであると考えられる。また、すべての層のダンピング定数が傾斜ダンピングモデルの平均値にほぼ等しい 0.05 のときには反転時間は傾斜ダンピングモデル 1 と 2 のほぼ中間の値になった。

#### 4. 結論

転送レート向上時における高速磁化反転のために傾斜異方性媒体の単粒子における磁化反転時間について検討を行った。単層媒体に比べて傾斜異方性媒体のほうが反転時間は短くなり、傾斜異方性媒体の傾斜を大きくするとさらに反転時間は短くなった。印加磁界強度や角度、媒体の保磁力などを等しくした場合においても、傾斜異方性媒体の異方性定数が大きい下層部でほとんど歳差運動をせずに磁化が容易軸方向に収束し、反転が完了するのが早いため、単層媒体に比べて傾斜異方性媒体のほうが反転時間は短くなった。また、ダンピング定数にも傾斜をもたせた場合、上層部のダンピング定数が小さい場合に比べて、上層部のダンピング定数が大きい場合のほうが反転時間は短くなったことから傾斜異方性媒体では磁気異方性の大きい下層部のダンピング定数はあまり影響がないが、磁気異方性の小さい上層部のダンピング定数は反転時間に影響しやすいということが考えられる。

#### References

- 1) M. Benakli, Adam F. Torabi, Michael L. Mallery, Hong Zhou, and H. Neal Bertram, *IEEE Trans. Magn.*, 37, 1564 (2001).
- 2) N. Akitaya, S. Greaves, and H. Muraoka, *IEEE Trans Magn.*, 52 (7), 3100804, (2016).
- 3) R. H. Victora, and Xiao Shen, *IEEE Trans Magn.*, 41, 537 (2005).
- 4) D. Suess, T. Schrefl, S. Fahler, M. Kirschner, G. Hrkac, F. Dorfbauer, and J. Fidler, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 012504 (2005).
- 5) N. Akitaya, S. Greaves, and H. Muraoka, *IEICE Technical Report*, Vol. 116, No. 83, p. 21 (2016).

2016年10月19日受理, 2017年3月13日採録