

Copyright ©2025 by the Magnetics Society of Japan. This article is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0) http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)., 9, 1-6 (2025)

<Paper>

磁気テープ用スパッタ媒体の記録特性シミュレーション

Simulation of recording characteristics of sputtered media for magnetic tape

大久保 亜偉輝 a)[†]・立花 淳一 b)・相澤 隆嗣 b)・山鹿 実 b)・田河 育也 a) a)東北工業大学 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1 (〒982-8577) b)ソニーストレージメディアソリューションズ 宮城県多賀城市桜木 3-4-1 (〒985-0842)

Aiki OKUBO a), Junichi TACHIBANA b), Takashi AIZAWA b), Minoru YAMAGA b), Ikuya TAGAWA a)

^{a)}Tohoku Institute of Technology, *35-1 Yagiyamakasumi-cho, Taihaku-ku, Sendai 982-8577, Japan* ^{b)}Sony Storage Media Solutions Corporation, *3-4-1 Sakuragi, Tagajyo 985-0842, Japan*

We investigated recording characteristics by simulation, assuming sputtered magnetic tape media for HDDs and SPT (Single-Pole Type) heads, which are expected to be introduced into the technology in future magnetic tape systems. In the case of sputtered media with SUL (Soft-magnetic Under Layer), it was found that the media SNR improves even if the head media spacing is large because it functions as a SPT head. In the case of the SPT head with SUL, the media SNR was found to deteriorate as the thickness of the SUL decreases and/or the saturation flux density of the SUL decreases. This is mainly due to the transition of the writing mode from SPT head mode to ring head mode due to SUL saturation. The SUL thickness and saturation flux density should be designed so that the SUL does not become magnetically saturated.

Key words: Magnetic Recording, LTO9 head (Tape head), SPT head (HDD head), Media SNR, Roll-Off, Simulation

1. はじめに

現在,現行の磁気テープ製品として LTO9 規格の磁気テ ープが商品化されている¹⁾. その LTO9 の面記録密度は約 11 Gbits/inch² と推定されるが²⁾,面密度が 50 Gbits/inch² を超える領域ではハードディスクドライブ(HDD)に使用 されているヘッドや媒体の技術導入が必要と思われる.こ のため我々は,バリウムフェライト(BaFe)塗布テープ媒 体に代わる次世代の媒体候補として,スパッタ薄膜磁気テ ープ媒体の開発を行っている^{3),4)}.

しかし、磁気テープシステムでは、ヘッド媒体間磁気ス ペーシングの微小化や媒体に厚い軟磁性下地層(Softmagnetic Under Layer, SUL)を形成することが困難であ る. このため、HDD用のスパッタ媒体をそのまま適用する ことができず、再設計が必要となる.そこで本研究の目的 として、HDD用の単磁極型(Single-Pole Type, SPT)へ ッドを用いたときに必要なSULの厚さとSULの飽和磁束 密度、および、ヘッド媒体間の磁気スペーシングが大きく ても SPT ヘッドが機能するかを明らかにするため、HDD 用の SPT ヘッドを仮定したシミュレーションを実施した.

2. シミュレーションモデル

2.1 ヘッドおよび媒体

Fig. 1 に (a) リングヘッドと塗布媒体,および, (b) SPT ヘッドとスパッタ媒体の構造を示す. Fig. 1 に示すように, LTO9 ではリング型の記録ヘッドであるのに対して, HDD 用は SPT ヘッドである. LTO9 ヘッドの再生トラック幅 (TWr) は 800 nm, シールド間隔は 90 nm である.また, ヘッド媒体間の磁気スペーシングは 45 nm である.一方, SPT ヘッドは 250 GByte クラスの HDD 用ヘッドを参考

Corresponding author: A. Okubo (e-mail: <u>m241801@st.tohtech.ac.jp</u>). に、TWrを面密度 100 Gbits/inch² クラスで想定される 150 nm, 磁気スペーシングは LTO9 ヘッドの磁気スペーシング に合わせ、45 nm と仮定した.

LTO9の媒体は、本来、BaFe 微粉末塗布型であるが、こ こでは HDD 媒体と同様のスパッタ薄膜垂直磁化媒体を想 定した.これは、CoPtCr-SiO2 複合ターゲットに Co3O4 を 添加したターゲットを用いてフィルム基板上に成膜したも のである³⁾.また、本来の LTO9 媒体に SUL は付いていな いが、SPT ヘッドによる本検討では、SUL ありと SUL な



Fig. 1 Structure of (a) ring head and coating media, and (b) single-pole head and sputtered media.

しの両者について検討を行った.

2.2 シミュレーション手法^{5),6)}

SPT ヘッドおよび SUL 付きスパッタ媒体を想定したと きのシミュレーションモデルを Fig. 2 に示す.円柱状の磁 性粒子を規則的に三次元配列した粒子配置モデルを用い, トラック幅方向にはヘッドの再生幅に対応した数の粒子を 置く.粒子の平均直径 D,粒子の異方性磁界の大きさ H_k, 磁化容易軸方向(すなわち,ベクトル H_kの向き),および, 粒子間の交換結合定数 A に,それぞれ正規乱数を用いて分 布を与えた.

各磁性粒子の磁化挙動の計算には、Stoner-Wohlfarth モ デルを用いる.また、熱揺らぎによる磁化反転確率 $P(\Delta t)$ の 計算には、Arrhenius-Neelの式(1)を用いる.ここでいう磁 化反転は粒子の異方性磁界ベクトルの反転を意味する.

$$P(\Delta t) = 1 - \exp\left\{-f_0 \Delta t \exp\left(-\frac{E_{\rm B}V}{k_{\rm B}T}\right)\right\}$$
(1)

ここで、 $E_{\rm B}$ は磁気エネルギー障壁、Vは粒子体積、 $k_{\rm B}$ はボ ルツマン定数、Tは絶対温度、 f_0 は試行周波数、 Δt は経過 時間である. $E_{\rm B}$ の計算には式(2)を用いた 7 .

$$E_{\rm B} = K_{\rm u} \left(1 + \frac{H}{H_{\rm k}} \frac{\boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{H}_{\rm k}}{|\boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{H}_{\rm k}|} \right)^2 \tag{2}$$

ただし、H=|H|, $H=H_{st}+H_{ex}$ であり、 H_{st} と H_{ex} はそれ ぞれ静磁界、および、粒子間交換結合磁界である.交換磁 界は隣接する磁化からの有効磁界の和として式(3)で計算 する.

$$H_{\text{ex}} = \sum_{i} \left(\frac{A_{i}}{a d M_{\text{s}}} \frac{M_{\text{s},i}}{M_{\text{s}}} \right)$$
(3)

ここで, $M_{5,i}$ と A_i は、それぞれ隣接粒子の磁化ベクトル、 および、粒子間の交換結合定数である.また、a、および、 dはそれぞれ格子定数、粒子中心間距離である.なお、CoPt 系薄膜のaは 0.2~0.5 nm 程度と思われるが、ここではa=0.5 nm と仮定し、後述するようにA(すなわち、A/a) をフィッティングパラメータとして扱った.

これらは三次元モデルであるが、計算時間を短縮するため、書き込みヘッド磁界を含む静磁界 *H*st の計算には二次元有限要素法(FEM)を使用した.このとき、媒体メッシュの各セルには、トラック幅方向で平均した磁化を与える.

再生のシミュレーションでは、LTO9 で用いられるシー ルド型トンネル磁気抵抗(Tunnel Magneto-Resisitive, TMR) ヘッドを想定した FEM メッシュを用いる.シール ド材料にはパーマロイ(NiFe)を仮定し、シールド間隔は、 前述のとおり、90 nm とした.

TMR 素子の自由層として、トラック幅方向に磁化容易軸 を持つ NiFe を設定するが、これ以外の固定層やピン層は



Fig. 2 Simulation model when assuming SPT head and sputter medium with SUL.

無視する. FEM により自由層磁化の垂直成分 M_{\perp} を計算し, 式(4)で再生電圧 V_{out} を求める. V_{b} , ΔR , TW_{r} は, それぞ れ,バイアス電圧,磁気抵抗変化率,再生トラック幅であ る.

$$V_{\rm out} = V_{\rm b} \frac{\Delta R}{2} T W_{\rm r} \frac{M_{\perp}}{M_{\rm s}} \tag{4}$$

3. 実測との比較

3.1 磁気特性とMHループ

Table 1 に実測およびシミュレーションに使用したパラ メータを示す. Table 1 中にある記号 t は媒体記録層の厚 さ、 σ_{EA} は粒子配向分布の標準偏差, Pは粒子中心間距離 の平均値, Dは粒子の平均直径, σ_d/D は粒子直径分布の標 準偏差, M_s は飽和磁化, H_k は粒子の異方性磁界の大きさ, Aは交換結合定数, SUL_B_s はSULの飽和磁束密度, SUL_t はSULの厚さを表す. 実測には, 振動資料型磁力計 (VSM), トルク磁力計, 透過型電子顕微鏡 (TEM), および, X 線回 折 (XRD)を用いた⁸. ここで, σ_{EA} は XRD の hcp-Ru(002)



Fig. 3 (a) Vertical and (b) in-plane MH loops in measurements and simulations.

Table 1 Magnetic properties of media, measured and used in the simulation.

	t (nm)	$\sigma_{ m EA}$ (deg)	P (nm)	D (nm)	$\sigma_{\rm d}/D$	$M_{ m s}$ (emu/cm³)	H _k (kOe)	A (10 ⁻⁶ erg/cm)	SUL_B _s (kG)	SUL_t (nm)
Meas.	14	6	8.2	6.9	0.22	494	19.0	-	11	80
Simu.	14	6	8.2	6.9	0.22	490	15.4	0.05	14	50

ピークにおけるロッキングカーブ測定より得られる $\Delta \theta_{50}$ を 正規分布の標準偏差に換算したものである. *SUL_B*₈, およ び, *SUL_t*は実測ではそれぞれ 11 kG, および, 80 nm で あるが ^{9), 10}, ここでは 14 kG, および, 50 nm とした.

計算では、実測とほぼ一致するパラメータを用いるが、 A および H_kについては、それぞれ、垂直方向、および、面 内方向の MH ループの傾きが実測と合うようにパラメータ を調整した. Fig. 3 に (a) 垂直方向および (b) 面内方向 の MH ループを示す.計算と実測の MH ループはよく一致 することがわかる.

3.2 現行リングヘッドによる記録特性

Fig. 4 に現行の LTO9 テープ装置で使用されているリン グヘッドを用いた実測,および,計算による (a) 再生出力 基本波成分 (Amp) の記録電流 (*Iw*) 依存性と, (b) Amp の記録密度 (Roll-off) 依存性を示す.

(a) に示す *Iw* 依存性の線記録密度(*LD*)は現行 LTO9 の最高線記録密度(約550 kfci)の半分強の値とした.た だし、シミュレーション上の都合で計算と実測の*LD*とは 完全には一致していない.なお、記録ヘッドコイルの巻き 数は公開されていないが、*Iw* 依存性における実測と計算 の Amp 立ち上がり電流値の比較より、7 ターンと推定され る. *Iw* が 40 mA 以上の領域で出力が低下する記録減磁現 象が計算値においてやや顕著であるものの、計算と実測と ほぼ一致することがわかる.なお、実測の立ち上がりにお いて 20 mA 以下で出力が低下してから上昇しているが、こ の原因については分かっていない.

(b)の Roll-off 依存性においても計算と実測はほぼ一致 した.ただし,*LD*が 600 kfci 以上の領域で計算値が実測 値よりもやや大きい.このことより,シミュレーションで 設定した再生ヘッドのシールド間隔 (90 nm)が実物より もやや狭いこと,磁気スペーシングが実測よりもやや小さ いことが考えられる.

4. SPT ヘッドによる記録特性

4.1 Roll-off 依存性

次に、将来のテープ装置で使用するための SPT ヘッドを 仮定した計算を行い、現行 LTO9 リングヘッドを用いた計 算結果と比較した. Fig. 5 に SPT ヘッドおよび LTO9 ヘッ ドを用いた媒体 SNR の Roll-off 依存性を示す. 媒体 SNR は、再生振幅の平均電力と二乗平均平方根(RMS) ノイズ 電力との比で定義した⁶⁰.計算に用いたデータ長(=媒体 移動長さ) は約 15 μ m である.



Fig. 4 (a) Recording current and (b) recording density dependences of readout amplitude in measurements and simulations.



Fig. 5 Recording density dependences of media SNR for tape head (LTO9) and HDD head (SPT).



Fig. 6 Magnetic flux lines near the head tip and magnetization vector distribution in the medium during recording at (a) LTO9 head no SUL, (b) SPT head no SUL, and (c) SPT head with SUL.



Fig. 7 Head flux density and magnetization distribution in the medium at (a) LTO9 head no SUL, (b) SPT head no SUL, and (c) SPT head with SUL.

SPT ヘッド (SUL なし)の媒体 SNR が LTO9 ヘッドに 比べて大幅に悪化しているのは、SPT ヘッドの TWr (150 nm)がLTO9 ヘッドのTWr (800 nm)よりも大幅に狭い (約1/5以下)ことが主要因である.一方, SUL を付与し た SPT ヘッド (SUL あり) においては, LTO9 ヘッドと比 べて 500 kfci 以上の領域で媒体 SNR が改善している. こ れは、後述するように(4.2節)、磁化転移幅が急峻になる ためである.本来, HDD における磁気スペーシングは 10 nm 以下であるが, ここでは先に述べたように 45 nm に設 定している. それにもかかわらず, SPT ヘッド(SUL あり) では 500 kfci 以上の領域で媒体 SNR が向上し、媒体 SNR が 0 となる LD を比較すると、LTO9 ヘッドの約 1.2 倍と なっている. したがって、LTO9 ヘッド (TWr =800 nm) から SPT ヘッド (TW_r=150 nm) に変更するとともに, 媒 体にSULを付与することにより、トラック密度で約5.3倍, LD で約 1.2 倍となるため, 合計で約 6 倍の面記録密度が 達成可能と言える.

4.2 ヘッド記録モードの違い

SUL を付与することで媒体 SNR が向上する理由を検討 するため, Fig. 6 に記録時におけるヘッド先端付近の磁束 線および媒体内の磁化ベクトル分布を示す. 同図 (a) は LTO9ヘッド, (b) は SPT ヘッド (SUL なし), (c) は SPT ヘッド (SUL あり)の場合である. これらはヘッド磁界の 極性が反転した直後に磁化転移が形成される状態を表して いる. なお,孤立磁化転移に着目するため, LD は 99 kfci とした.

今回使用したスパッタ媒体では垂直配向性が非常に強い ため、ヘッドの垂直成分が特に重要である.そこで、Fig.7 に媒体記録層厚さ中央におけるヘッド磁界(ただし、ここ では磁東密度)の垂直成分の分布、および、磁化の垂直成 分分布を示す. B₁はヘッド磁東密度の垂直成分、M₁は媒体 の磁化の垂直成分(ただし、ここでは4 π を掛けて Gauss 単位とした)である.また、M₁曲線上の太い点線は磁化転 移領域、B₁曲線の太い実線はその領域の磁界勾配を表す. Fig.7 の (a), (b), (c) は、それぞれ、Fig.6 の (a), (b),

(c) に対応する.SUL なしの場合, SPT ヘッドであっても LTO9 リング

型ヘッドと同様の磁界分布となる.また,媒体の垂直配向 性が強いため、ヘッドの垂直成分の勾配で磁化転移が決ま る.すなわち、Fig.6 (a)、(b) に示すように、ヘッド磁界 反転直後にはギャップ直下(破線の丸)とギャップ左側(実 線の丸)の二ヶ所に磁化転移が起きているように見える. しかし、ヘッド磁界が反転しない状態で媒体が右から左へ と移動すると、ギャップ直下の磁化転移はギャップ左側の 垂直磁界によって書き消されてしまう.このため、最終的 に、もともとギャップ左側に形成された磁化転移のみが残 ることになる.これを"リングヘッドモード"と呼ぶこと にする.このとき、Fig.7(a)、(b)に示すように、磁界勾 配が緩やかなため磁化転移幅が広くなる.

一方, SUL ありの場合,本来の SPT ヘッドとして機能 する. Fig. 7 (c) の磁化転移が起きている領域の磁界勾配 が急峻であり,ギャップ直下に急峻な磁化転移が形成され る. これを "SPT ヘッドモード"と呼ぶことにする.

4.3 SUL の厚さ(SUL_t) 依存性

SPT ヘッド (SUL あり) において,基準とした SUL_t は 50 nm であるが,ここでは 0 nm (SUL なし) ~50 nm の間で SUL_t による比較を行った.

Fig. 8 に媒体 SNR の Roll-off 依存性, また, Fig. 9 に Roll-off 依存性のデータから最小二乗近似により求めた 454 kfci における媒体 SNR, および, ヘッド磁界垂直成分 の *SUL_t* 依存性を示す. ここで, 厚さ 0 nm は SUL なし である. SUL が厚いときに媒体 SNR が 0 となる *LD* が約 800 kfci であることから, ここではその半分強の *LD* であ る 454 kfci を用いた. 端数となるのはシミュレーションの メッシュ分割の都合による.

SUL_t が 50 nm から 15 nm まで薄くなったときの媒 体 SNR はほぼ変わらないが,厚さが 10 nm 以下になると 媒体 SNR は急激に悪化する.このことから *SUL_t* を 15 nm までは薄くすることが可能であると考えられる.

ヘッド磁界垂直成分の最大値(Hh, perp.)を見ると,



Fig. 8 Recording density dependences of media SNR for various SUL thicknesses.



Fig. 9 SUL thickness dependence of media SNR and head magnetic field perpendicular component.



Fig. 10 Magnetic flux lines near the head tip and magnetization vector distribution in the medium during recording at (a) *SUL_t* 0 nm, (b) *SUL_t* 10 nm, (c) *SUL_t* 20 nm, and (d) *SUL_t* 50 nm.

 SUL_t が 50 nm から 0 nm まで減少するにしたがって磁 界強度も単調に減衰しており,媒体 SNR に見られるよう な 15 nm から 10 nm での急激な変化は生じていない.従 って,ヘッド磁界強度の減衰で媒体 SNR の変化を説明す ることはできない.

15 nm から 10 nm における媒体 SNR 悪化の原因を検討 するため, Fig. 10 に各 *SUL_t* における記録時のヘッド先 端付近の磁束線および媒体内の磁化ベクトル分布を示す.

(d) に示す *SUL_t* が 50 nm の場合には, SUL より下部 に漏れ出す磁束線は極めて少なく, SUL が飽和していない ことがわかる. ゆえに SPT ヘッドモードであるため高い媒 体 SNR が得られたと考えられる.

SUL_t が薄くなるに従い磁束線が漏れ出し,(b)の SUL_t が 10 nm になると,急激に増えることがわかる.こ れは,膜厚が薄くなることで SUL が磁気飽和するためであ り,SUL が飽和することで SPT ヘッド(SUL なし)と同 じリングヘッドモードになる.この記録モードの変化のた め,媒体 SNR が厚さ 10 nm で急激に悪化すると考えられ る.この記録モードの移行は SUL の厚さの減少に伴って比 較的急激に起こる.これは,SUL が飽和し始めると記録に 必要な *Iw* が増大し,飽和を助長するためである.Roll-off 計算では, *Iw* 依存性において Amp が最大となる *Iw* を使 用している.

4.4 SUL の飽和磁束密度(SUL_B_a)依存性

次に SUL_B_s を変化させて媒体 SNR の比較を行った. SPT ヘッド (SUL あり) において,基準とした SUL_B_s は 14 kG であるが,ここでは 0 kG (SUL なし) まで低下させた.

Fig. 11 に媒体 SNR の Roll-off 依存性を示す.また, Fig. 12 に 454 kfci における媒体 SNR,および、ヘッド磁界垂 直成分の SUL_B₈依存性を示す. SUL_B₈を 14 kG から 4 kG まで低下させたときの媒体 SNR の減衰は緩やかである が、4 kG から 2 kG へ低下させると媒体 SNR が急激に悪 化する.このことから、SUL_t が 50 nm の場合、4 kG 程 度までは SUL_B₈を小さくすることが可能であると考えら れる.

ヘッド磁界垂直成分の最大値においては, SUL_B。の減 少とともに単調に磁界強度も減衰しており, 媒体 SNR に 見られるような4kGから2kGでの急激な変化は生じてい ない. 従って, 4.3節と同様, ここでもヘッド磁界強度の減 衰で媒体 SNR の変化を説明できない.

4 kG から 2 kG における媒体 SNR 悪化の原因を検討す るため, Fig. 13 に各 SUL の飽和磁束密度における記録時 のヘッド先端付近の磁束線および媒体内の磁化ベクトル分 布を示す. (d) に示す SUL_B₈が 14 kG の場合, SUL は 飽和していないため, SPT ヘッドモードであり,高い媒体



Fig. 11 Recording density dependences of media SNR for various SUL saturation flux densities.



Fig. 12 SUL saturation flux density dependence of media SNR and perpendicular head field.



Fig. 13 Magnetic flux lines near the head tip and magnetization vector distribution in the medium during recording at (a) *SUL_B*₈ 0 kG, (b) *SUL_B*₈ 2 kG, (c) *SUL_B*₈ 6.3 kG, and (d) *SUL_B*₈ 14 kG.

SNR が得られたと考えられる. 一方, *SUL_B*, が小さくな ると磁束線が漏れ出し, (b) の *SUL_B*, が 10 nm で急激に 増加する. ゆえに SUL が磁気飽和し, 4.3 節と同様, リン グヘッドモードに移行するため, 媒体 SNR が急激に悪化 すると考えられる.

5. まとめ

将来の磁気テープシステムにおいて技術導入が予想され る,スパッタ磁気テープ媒体と HDD 用の SPT ヘッドを仮 定し,シミュレーションによる記録特性の検討を行った.

その結果, SUL 付きスパッタ磁気テープ媒体の場合, SPT ヘッドとして機能するため, ヘッド媒体間スペーシン グが大きくても媒体 SNR は向上することがわかった.こ れは SPT ヘッドと SUL を組み合わせることにより,LTO9 のリング型ヘッドと比較して, 垂直方向に急峻な記録ヘッ ド磁界が得られることに起因する.

このことにより,LTO9 ヘッドと比較して,トラック幅 が 1/5 以下にまで狭くても,むしろ優れた Roll-off 特性を 示した.これはスパッタ媒体の持つ,高い垂直配向性と薄 い膜厚という2つの特徴による効果と考えられる. スパッタ磁気テープ媒体に SUL を付与する場合, 媒体 SNR は *SUL_t* の低下, および, *SUL_B*。の低下に依存し て悪化することがわかった.これは主として SUL の飽和で SPT ヘッドモードからリングヘッドモードに移行するため である.

SUL が磁気飽和しないように、その厚さおよび飽和磁束 密度を設計する必要がある.本検討のヘッド条件では、 SUL_tは15 nm まで(SUL_B_sが14 kG の場合),SUL_B_s は4 kG まで(SUL_tが50 nm の場合)それぞれ小さくす ることが可能であると示された.このことから、膜厚とB_s の積(SUL_tB_s)として、約2×10⁵ nm Gauss まで小さく できるものと考えられる.ただし、ヘッドの条件(ポール 長やトラック幅など)により変化することが予想されるの で、今後検討を行いたい.

References

- <u>https://home.jeita.or.jp/upload_file/20220328083241_6bOgZ</u> <u>PJAE3.pdf</u> (As of October 16, 2024).
- 2) <u>https://insic.org/wp-content/uploads/2019/07/INSIC-</u> <u>Technology-Roadmap-2019.pdf</u> (As of October 16, 2024).
- J. Tachibana, H. Kobayashi, T. Sai, S. Kodama, and T. Aizawa: *IEEE Trans. Magn.*, 59, 2100305 (2023).
- S. Furrer, M. Lantz, P. Reininger, A. Pantazi, and H. Rothuizen: *IEEE Trans. Magn.*, 54, 3100308 (2018).
- 5) I. Tagawa, S. Kodama, J. Tachibana, T. Aizawa, and M. Yamaga: *IEEE Trans. Magn.*, **59**, 3100305 (2023).
- I. Tagawa, S. Kodama, J. Tachibana: *IEICE Tech. Rep.*, **122**, 7 (2022).
- T. Kobayashi and I. Tagawa, J. Magn. Soc. Jpn., 47, 128 (2023).
- J. Tachibana, H. Kobayashi, T. Sai, T. Aizawa, and S. Saito: *IEICE Tech. Rep.*, **123**, 21 (2023).
- J. Tachibana, T. Endo, R. Hiratsuka, S. Inoue, D. Berman, P. O. Jubert, T. Topuria, C. Poon, and W. Imaino: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 3202806 (2014).
- 10) J. Tachibana, T. Endo, R. Hiratsuka, S. Inoue, D. Berman, P. O. Jubert, T. Topuria, C. Poon, and W. Imaino: *IEICE Tech. Rep.*, **114**, 23 (2014).

2024年10月24日受理, 2024年12月2日再受理, 2025年3月1日採録