

高周波アシスト磁気記録ヘッドのマイクロマグモデル解析(2) —印加磁界のライズタイムと STO の発振特性—

板垣 諒[†] 金井 靖[†] Simon Greaves[‡] 村岡 裕明[‡]

[†]新潟工科大学 〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋 1719

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

E-mail: [†] {r_itagaki@cc, kanai@iee}.niit.ac.jp, [‡] {simon, muraoka}@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 高周波アシスト磁気記録方式に用いる高周波発振素子 (STO) の安定な発振を目的として, 記録ヘッドを考慮しない STO 単独モデルのマイクロマグネティック解析を行った. 記録ヘッドのギャップ中磁界を想定してライズタイムを変えた高周波磁界を加えたところ, STO の発振に顕著な差異がみられた. また, STO を記録ヘッドに挿入した統合モデルでも記録ヘッドのライズタイムにより STO の発振に違いがみられたので報告する.

キーワード 高周波アシスト磁気記録(MAMR), スピントルク発振素子 (STO), 記録ヘッド, ライズタイム, マイクロマグネティック解析

Micromagnetic model analysis of MAMR recording head (2) —Oscillation of STO vs. rise time of external field—

Ryo ITAGAKI[†] Yasushi KANAI[†] Simon GREAVES[‡] and Hiroaki MURAOKA[‡]

[†] Niigata Institute of Technology, 1719 Fujihashi, Kashiwazaki-shi, Niigata, 945-1195 Japan

[‡] RIEC, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8577 Japan

E-mail: [†] {r_itagaki@cc, kanai@iee}.niit.ac.jp, [‡] {simon, muraoka}@riec.tohoku.ac.jp

Abstract A micromagnetic model analysis of spin-torque oscillators (STOs) was carried out. First, the conditions for stable oscillation were determined using a uniform, in-gap field applied to the STO in place of the field from a write head. It was found that the rise time (0-90%) of the in-gap field greatly affected the STO oscillation, i.e. a shorter rise time gave more stable STO oscillation. We also investigated STOs in the write head gap and found that the STO oscillation was dependent on the rise time of the in-gap field.

Keywords Microwave-Assisted Magnetic Recording (MAMR), Spin Torque Oscillator (STO), Write Heads, Rise Time of Applied Field, Micromagnetic Simulations

1. はじめに

高周波アシスト磁気記録 (microwave-assisted magnetic recording: MAMR)方式[1]を用いた大容量ディスクドライブ(HDD)を2019年に出荷する,とウェスタンデジタル社がアナウンスした[2]. また, [3]の動画は熱アシスト磁気記録 (heat-assisted magnetic recording: HAMR)方式とMAMRを比較し,信頼性やコストの面からHAMRに対するMAMRの優位性を述べており興味深い. [4]は2009年時点での次世代垂直磁気記録方式として4つの技術を挙げている. このうち, SMRは2013年に市販HDDに導入された[5]. 一方, BPMは商品開発が先送りされたように思われる. したがって面記録密度を大幅に伸ばすためにはエネルギーアシスト磁気記録方式のHAMRあるいはMAMRを導入せねばならない.

MAMRにおいて高周波発振素子 (spin-torque

oscillator: STO)は最も重要な構成要素である[6]. STOの研究開発のため,理論,基礎実験,スピンスタンドテスト,およびシミュレーションにより研究が進められてきた[7]-[12].我々はマイクロマグネティック解析によるモデル計算を行い,記録ヘッドを考慮しないSTO単独(孤立STO)のモデルでは比較的安定な発振が得られることを述べた.一方,記録ヘッドの主磁極(MP)とトレーリングシールド(TS)の間(MP-TS gap)に挿入したSTO(統合STO)モデルは,STOと記録ヘッドの静磁気相互作用のため,安定な発振を得ることが難しく,これまでに以下を述べた[13]-[16].

1) 統合STOが安定して発振するためには,記録ヘッドとSTOの静磁気相互作用およびMP-TS gap中の磁界分布が不均一であるため,孤立STOで最適な磁界よりも強い磁界を加える必要がある.

2) 強いMP-TS gap磁界の下で安定した発振を得るた

めには、孤立 STO で最適な電流密度(J)よりも、高い電流密度 J を印加する必要がある。

3) 静磁気相互作用を抑えるために、トレーリングシールドのエッジが斜め(媒体表面に対して垂直ではない)のギャップ中に挿入した、STO が直立した(媒体表面に対して垂直の)モデルは安定に発振しないが、媒体表面に対して傾いた STO は比較的安定に発振する。

4) 面積の大きな STO よりも小さな STO の方が、小さな J と弱い MP-TS gap 磁界で安定な発振を得易い。

本報告ではマイクロマグネティック解析を用いて STO に加える磁界の立ち上がり(ライズタイム:0-90%)による STO の発振特性を述べる。孤立ヘッドモデルには一様な外部磁界を仮定して議論を進める。また、前報告[16]で示さなかった、STO 面積による媒体位置における発振磁界を示し、前述のように面積の小さな STO の優位性を述べる。

次に、市販ヘッドと寸法が同等の統合ヘッドモデルを用いて記録ヘッドのコイルに電流を加え、いろいろな構造に対する STO の発振特性を述べる。MP-TS gap が広い(30 nm)とギルバートの制動定数を 0.02 から 0.2 へ大きくするとライズタイムが短く(ヘッド磁界の立ち上がりが速く)なり、STO は安定に発振する。一方、MP-TS gap が狭い(20 nm)とギルバートの制動定数を 0.02 から 0.2 へ変えてもライズタイムが短くならず、結果として STO の発振は改善されない。最後に MP-TS gap が狭いモデルで MP-TS gap を斜めにし、媒体表面に対して傾いた STO モデル(斜め STO モデル)は FGL に加わる面直磁界の分布が均一であり、STO の安定な発振に有効であった。

2. 解析モデル

図 1 に本報告で用いた STO 素子の模式図を示す。また表 1 に STO 素子の諸元を示す。特に断らない限り、同表の条件を用いた。ここでは、軟磁性のスピントルクを仮定した STO モデル[17]を用いた。マイクロマグネティック解析には市販ソフトウェア(富士通, EXAMAG v.2.1)[18]を用いた。

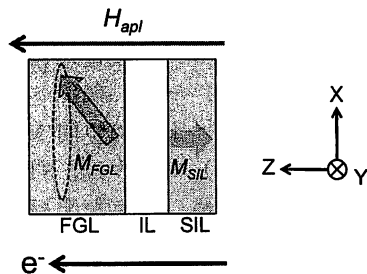


図 1 透過のスピントルクを用いた STO 素子モデル(孤立モデル)。FGL:発振層, IL:非磁性中間層, SIL: スピントルク注入層

表 1 計算に用いた発振層(FGL)および SIL の諸元

	FGL	SIL
$4\pi M_s$	20 kG	6 kG
$H_k^{(1)}$	31.4 Oe	31.4 Oe
α	0.02	0.02
Exchange, A	2.5×10^{-6} erg/cm	0.75×10^{-6} erg/cm
Thickness	10 nm	2 nm
$P_0 = 0.5$, Width \times height = 20 nm \times 20 nm, Inter layer = 2 nm		

(*): FGL: xy 面内 SIL: z 方向

3. 孤立モデルの解析

3.1. FGL の面積による発振磁界の強度

図 2 にいろいろな面積の FGL の回転を示す。同図の横軸は時刻であり初期状態より表示している。縦軸は FGL 磁化の面内成分(M_y)と面直成分(M_z)を FGL 全体で平均し、飽和磁化で規格化して表示した。 $M_y/M_s = 1$ のとき、FGL の磁化が完全に面内で回転していることを示す。[16]で報告した通り、面積が小さい STO の方が、小さな印加磁界(H_{apl})と低い電流密度で安定に発振する。たとえば、20 nm \times 20 nm の孤立モデルは $H_{apl} = 12$ kOe_{pp} でも安定に発振するが、40 nm \times 40 nm のモデルは $H_{apl} = 32$ kOe_{pp} 程度で漸く安定に発振する。

図 3 は FGL からの磁界を観測する位置を示す。孤立モデルを考えているので記録ヘッドは存在しないが、FGL のエッジから z 方向に 1.5 nm, y 方向に 7.5 nm 離

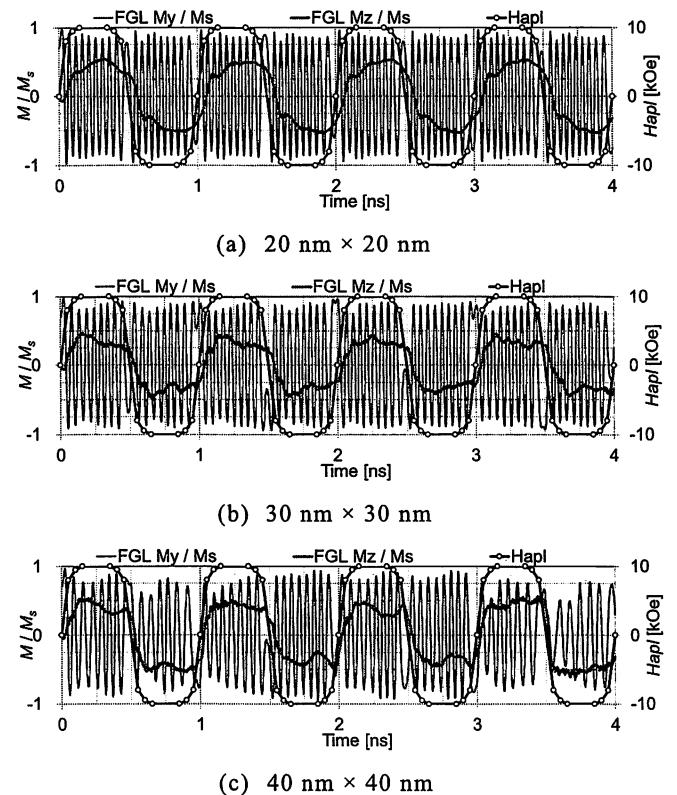


図 2 いろいろな面積の FGL の回転 vs. 時刻. $J = 3.0 \times 10^8$ A/cm².

れた、記録ポイントを推定した観測位置を考えた。図4および5には、記録に与するそれぞれ、図1のxおよびz成分を示す。安定な発振が得られるよう、20 nm × 20 nmの孤立モデルは $H_{ap1}=10 \text{ kOe}_{pp}$ とし、30 nm × 30 nmおよび40 nm × 40 nmのモデルは $H_{ap1}=32 \text{ kOe}_{pp}$ とした。これらから分かるように、いずれの成分も1 GHz程度でベースラインが大きく動いている。面積の大きなSTOは強い発振磁界を得る点で有利と思われるが、観測点から離れると、FGL内部の注目する磁化による磁界は距離の2乗で減衰するので、FGLの体積(面積)に比例して高周波磁界が減衰することはない。

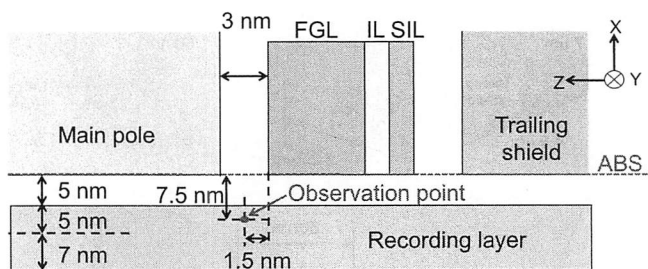


図3 孤立ヘッドの磁界を観測した位置(Observation point)。

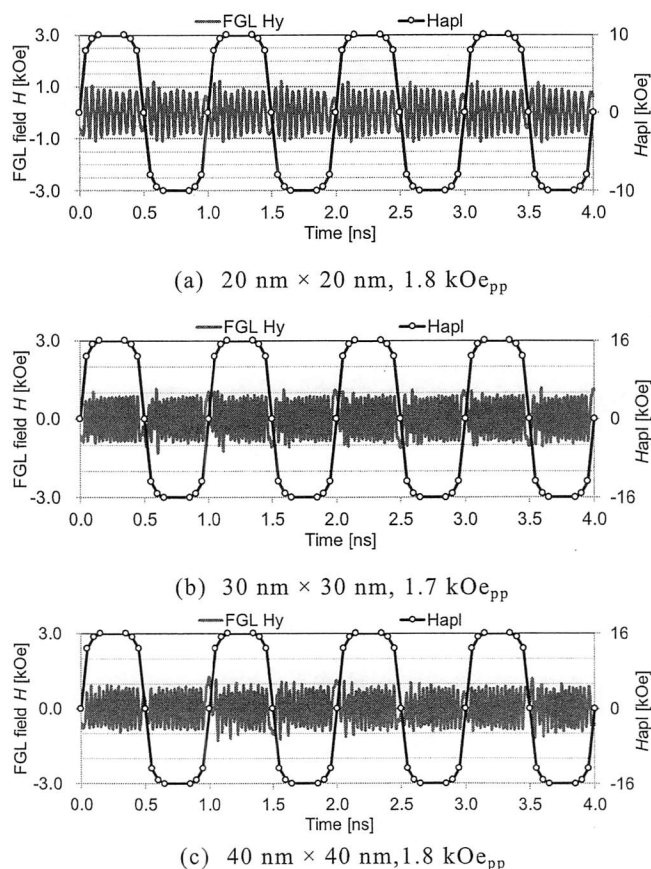
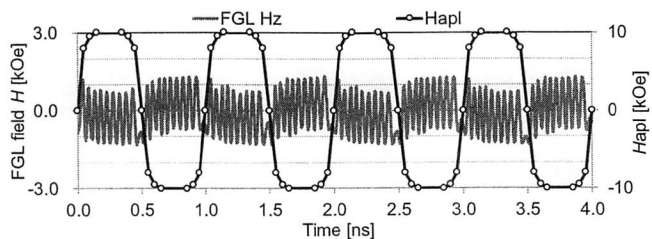
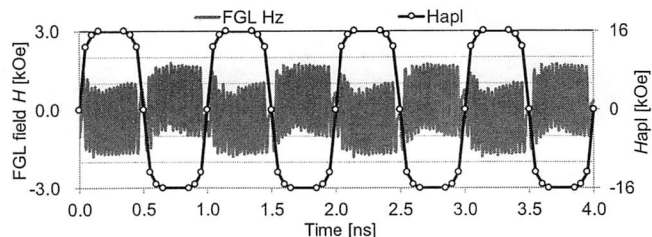


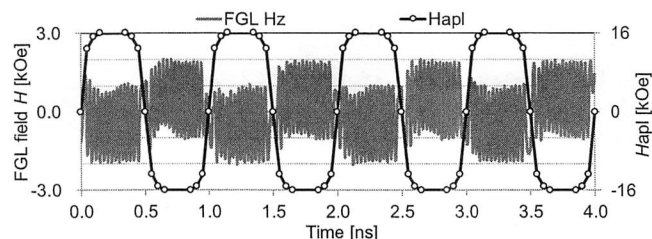
図4 Observation pointにおけるFGL磁界のx成分。



(a) 20 nm × 20 nm, 2.0 kOe_{pp}



(b) 30 nm × 30 nm, 2.5 kOe_{pp}



(c) 40 nm × 40 nm, 2.6 kOe_{pp}

図5 Observation pointにおけるFGL磁界のz成分。

3.2. 外部磁界の立ち上がり(ライズタイム)によるSTOの発振

図6および7にFGLの面積が20 nm × 20 nmおよび30 nm × 30 nmの場合に外部磁界の立ち上がり(ライズタイム)を変えてFGLの発振を観測した。いずれの面積のFGLでも、ライズタイムが短い(0.083 nsec)場合はSTOが安定に発振するが、ライズタイムが長い(0.283 nsec)場合は、回転が不安定である。つまり、 M_y/M_s の絶対値が小さく、かつ変動し、発振周波数も低い。 J を $2.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ および $4.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ と変えた場合も同様の傾向が見られた。また、印加磁界の絶対値は同じであるが、ライズタイムが長くなるにつれて発振周波数が低下する。これらの結果を後述の統合ヘッドの結果と比較すると興味深い。

4. 統合モデル(直立ギャップ)の解析

4.1. MP-TS gapが30 nmのモデル

図8に解析に用いたモデルを示す。FGLは30 nm × 30 nm × 10 nmとし、その他は表1の値を用いた。表2には記録ヘッドの諸元を示す。このヘッドに高周波電流を加え、記録ヘッドのギルバート制動定数(α)を変えて、図9に示すように、ヘッド磁界の応答を求

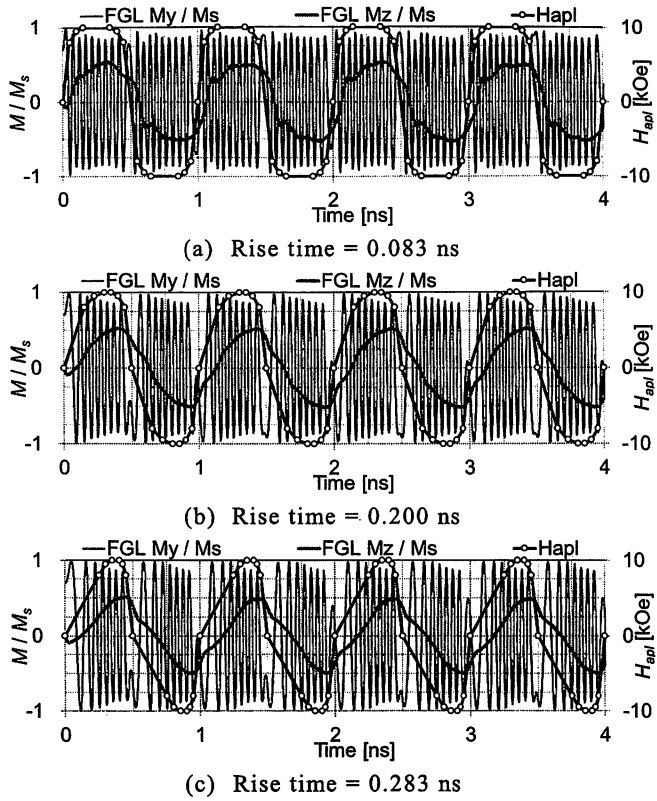


図 6 外部磁界のライズタイムによる FGL の振動 vs 時刻. FGL: $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$. $J = 3.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$.

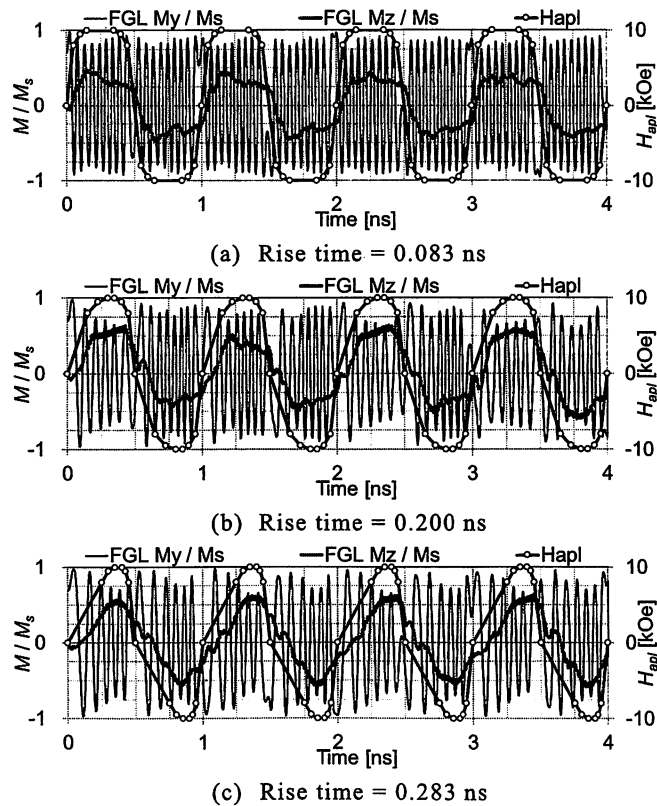


図 7 外部磁界のライズタイムによる FGL の振動 vs 時刻. FGL: $30 \text{ nm} \times 30 \text{ nm}$, $J = 3.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$.

めた. 観測点は FGL の中央である. 一般に α は材料固有の値であり, 人為的な制御が難しいとされる. 一方, 記録ヘッドで $\alpha = 0.2$ としたときにライズタイムが最も短くなる [19] とされ, 数値計算の面からはライズタイムの影響を観測する上で興味深い. 同図から分かるように, α の値を $\alpha = 0.02$ から $\alpha = 0.2$ に変えるとライズタイムが 0.23 ns から 0.15 ns に短くなり, 図 10 に示すように, FGL の発振が比較的であるが安定する.

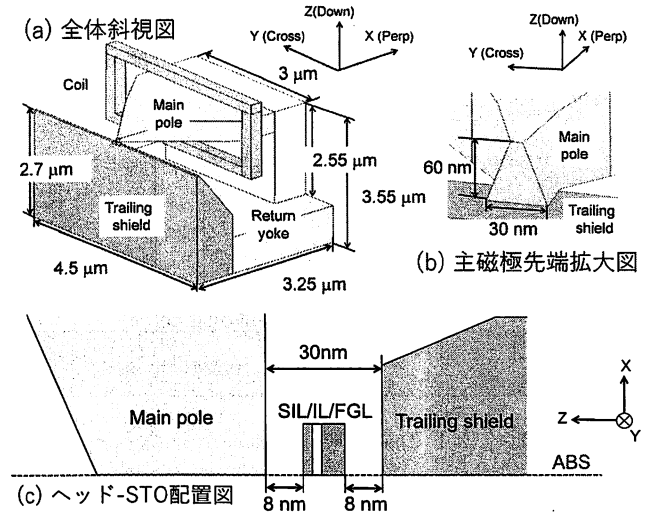


図 8 記録ヘッドの模式図

表 2 記録ヘッドの諸元

Major head specs			SUL specs	
Main pole	ABS thickness	60 nm	Recording layer	Permeability 1 (linear)
	Physical width	30 nm	Soft under layer	Thickness 30 nm
	$4\pi M_s$	24 kG		$4\pi M_s$ 10 kG
	H_k	31.4 Oe		H_k 75.4 Oe
	Exchange, A	$3.0 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$		Exchange, A $1.0 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$
	α	0.02		α 0.02
Return path	Thickness	1000 nm	Medium specs	
	$4\pi M_s$	24 kG	Magnetic spacing total 5 nm	
	H_k	31.4 Oe	Recording layer thickness 12 nm	
	Exchange, A	$3.0 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$	Inter layer thickness 1 nm	
	α	0.02		
Trailing shield	MP-TS distance	30 nm	Observation plane 11 nm from ABS	
	$4\pi M_s^*$	15 kG		
	H_k^*	50.2 Oe		
	Exchange, A*	$1.5 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$		
	α	0.02		

*: Main pole vicinity
 $4\pi M_s$ 24 kG
 H_k 31.4 Oe
Exchange, A $3.0 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$

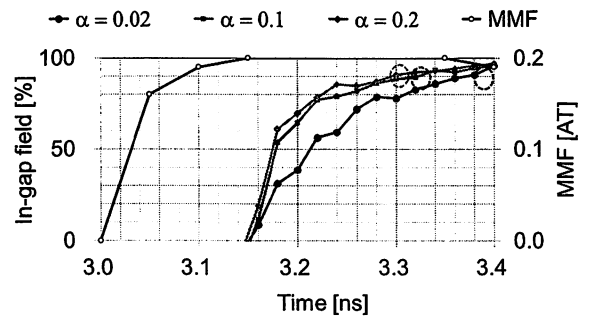
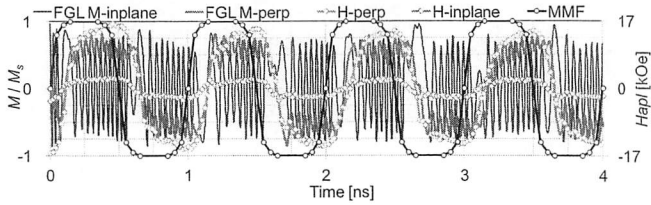
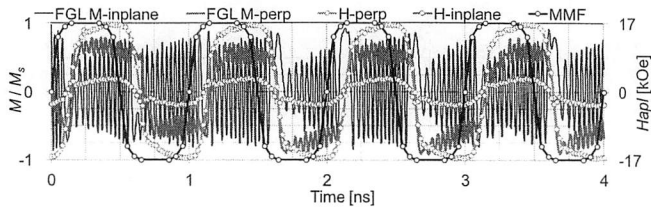


図 9 記録ヘッドの α による MP - TS gap 磁界の応答. MP-TS gap 長さ = 30 nm , $J = 6.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$. ライズタイムはそれぞれ, 0.15 ns ($\alpha = 0.2$), 0.17 ns ($\alpha = 0.1$) および 0.23 ns ($\alpha = 0.02$) であった.



(a) 記録ヘッド $\alpha = 0.02$



(b) 記録ヘッド $\alpha = 0.2$

図 10 記録ヘッドのギルバート制動定数 (α) による FGL の発振 vs. 時刻. 垂直ギャップ. MP-TS gap = 30 nm. $J = 6.0 \times 10^8$ A/cm².

4.2. MP - TS gap が 20 nm のモデル

ところで, MP - TS gap が 20 nm のモデルでは, 図 11 に示すように, α の値を $\alpha = 0.02$ から $\alpha = 0.2$ に変えてもライズタイムは変わらない. したがって, 図 12 に示すように, FGL の発振も変わらない. ここで, MP - TS gap 長が短いと記録ヘッドと STO の間で静磁気相互作用が強く, STO は安定に回転し難い.

5. 統合モデル (斜め STO) の解析

[16] で述べたように, 統合モデルで MP - TS gap を斜めにし, 媒体表面に対して傾いた STO モデル (斜め STO モデル) (図 13) は STO の安定な発振に有効であった. ここでは, 図 8 のモデルで MP-TS gap 長さを 20 nm とし, 主磁極幅を 40 nm としたモデルを用い, 図 13 に示す面で磁界分布を観測した. 図 14 から, 斜め

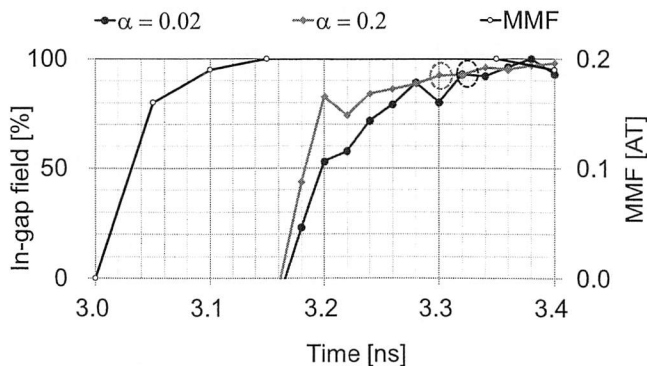
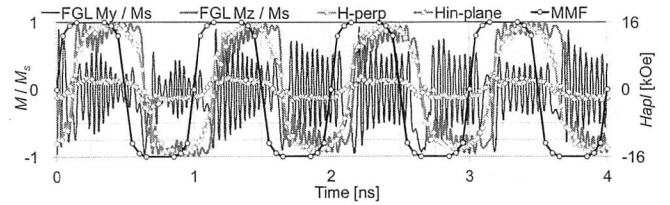
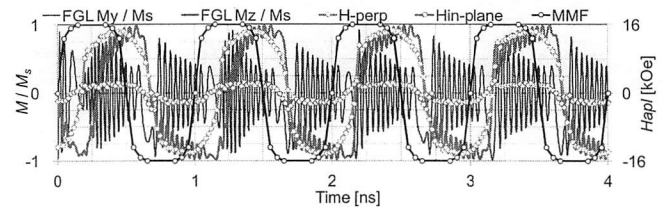


図 11 記録ヘッドの α による MP - TS gap 磁界の応答. MP-TS gap 長 = 20 nm, $J = 3.0 \times 10^8$ A/cm². ライズタイムはそれぞれ, 0.14 ns ($\alpha = 0.2$) および 0.15 ns ($\alpha = 0.02$) であった.



(a) 記録ヘッド $\alpha = 0.02$



(b) 記録ヘッド $\alpha = 0.2$

図 12 記録ヘッドのギルバート制動定数 (α) による FGL の発振 vs. 時刻. 垂直ギャップ. MP-TS gap = 20 nm, $J = 3.0 \times 10^8$ A/cm².

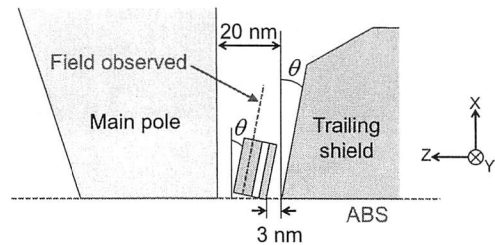


図 13 斜め STO モデルのギャップ近傍拡大図と FGL に加わる磁界を観測した面. 主磁極幅 = 40 nm.

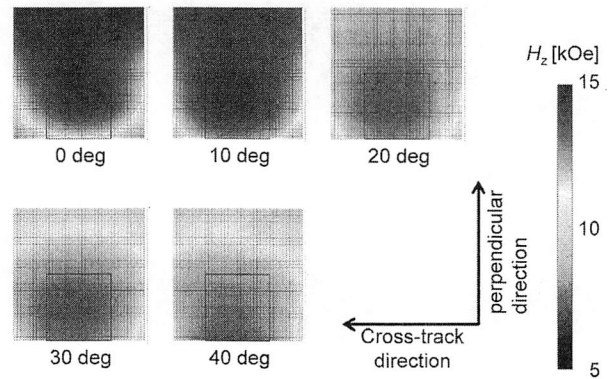


図 14 いろいろな角度の斜め STO の FGL に加わる磁界 (面直成分). $\alpha = 0.02$. 四角で囲んだ領域は 20 nm \times 20 nm の FGL に相当する.

STO モデルで $\theta = 30 - 40^\circ$ のとき FGL に加わる磁界分布が均一になることが分かる. その結果, 図 15 に示すように, 直立ギャップモデルと比べ, 斜め STO モデルの FGL は安定に回転する.

6. まとめ

マイクロマグネティック解析を用いて STO に印加す

る磁界のライズタイムと回転の特性を調べた。STO 単独のモデル、STO を記録ヘッドのギャップ中に挿入したモデル（統合モデル）ともにライズタイムが短いと STO が安定に発振する。ただし、統合モデルで短いライズタイムを得ることは容易ではない。この場合は、主磁極とトレーリングシールドで構成されるギャップを媒体面に対して斜めにし、さらに STO も媒体面に対して斜めに配置すると、記録ヘッドと STO の静磁気相互作用を抑えられ、安定な STO の発振を得やすい。

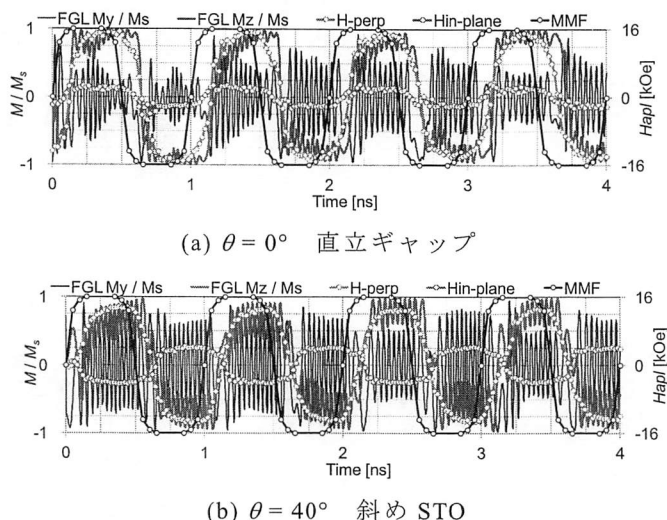


図 15 FGL の回転 vs. 時刻. $MMF = 0.12 \text{ AT}_{pp}$, $J = 3.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$.

謝 辞

本研究の一部は学術振興会科学研究費補助金（課題番号 16K06321）および情報ストレージ研究推進機構（Advanced Storage Research Consortium: ASRC, Japan）の補助金によった。磁界解析計算ソフトウェア *JMAG* は株式会社 JSOL に提供いただいた。ここに記して深謝する。

文 献

- [1] J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang, "Microwave assisted magnetic recording," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 44, no. 1, pp.125-131, Jan. 2008.
- [2] Western Digital Unveils Next-Generation Technology To Preserve And Access The Next Decade Of Big Data, <https://www.wdc.com/about-wd/newsroom/press-room/2017-10-11-western-digital-unveils-next-generation-technology-to-preserve-and-access-the-next-decade-of-big-data.html>, San Jose, CA, U.S.A., Oct. 11, 2017.
- [3] Energy-assisted Recording Technology, <https://play.vidyard.com/JZLozr2ujb2jR964BaFNPW>.
- [4] Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenoiri, H. Tanaka, H. Mutoh, and N. Yoshikawa, "Future options for HDD storage," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 45, no. 10, pp.3816-3822, Oct. 2009.
- [5] シーゲイトが画期的な技術革新を果たす：次世代シングル磁気記録搭載のハードディスク・ドライブを世界に先駆けて出荷, <http://www.seagate.com/about/newsroom/press-releases/shingled-magnetic-recording-milestone-pr-master/>, 2013 年 9 月 9 日.
- [6] 五十嵐, 城石, "高周波磁界発生デバイスとしてのスピントルクオシレーターマイクロ波アシスト記録の要一," 日本磁気学会第 198 回研究会資料, pp. 15 - 20, 2014 年 11 月.
- [7] Y. Nozaki and S. Kasai, "Microwave-assisted magnetization reversal in exchange-coupled composite media using linearly polarized microwave fields," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 52, no.2, Feb. 2016, Art ID 3100207.
- [8] S. Okamoto, M. Furuta, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, "Theory and experiment of microwave-assisted magnetization switching in perpendicular magnetic nanodots," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 50, no.3 Mar. 2014, Art ID 3200906.
- [9] A. Takeo, K. Koi, G. Koizumi, M. Shimizu, N. Narita, T. Funayama, H. Iwasaki, K. Yamada, W. Chen, M. Zhang, and M. Li, "MAMR - R/W performance improvement by mag-flip STO assist," *Intermag Conf.*, AD-02, Dresden, Germany, May 2014.
- [10] I. Tagawa, M. Shiimoto, M. Mastubara, S. Nosaki, J. Aoyama, and Y. Urakami, "Advantages of MAMR read-write performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 9, Sep. 2016, Art ID 3101104.
- [11] Y. Kanai, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic model analysis of spin-transfer torque oscillator and write heads for microwave-assisted magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 2, Feb. 2017, Art ID 3000211.
- [12] Y. Kanai, R. Itagaki, S. J. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic model analysis of various spin torque oscillators with write head for microwave-assisted magnetic recording," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 53, no.11, Nov. 2017, Art ID 3001105.
- [13] 金井, 板垣, S. Greaves, 村岡, "高周波アシスト磁気記録ヘッドのモデル解析シミュレーション - 種々の STO とライトヘッドの組み合わせ -", 電子情報通信学会技術研究報告 磁気記録・情報ストレージ研究会資料, MR2017-10, 2017 年 6 月.
- [14] 板垣, 金井, S. J. Greaves, 村岡, "マイクロマグ解析による MAMR 用 STO に加わる外部磁界の検討," 第 41 回日本磁気学会学術講演会, 22pC-3, 2017 年 9 月.
- [15] Y. Kanai, R. Itagaki, S. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic model analysis of spin torque oscillators integrated into write head gap vs. head field response," *MMM Conf.*, BQ-08, Pittsburgh, PA, U.S.A., Nov. 2017.
- [16] 板垣, 金井, S. Greaves, 村岡, "高周波アシスト磁気記録ヘッドのマイクロマグ解析 - 弱い印加磁界による小面積 STO の発振 -", 電子情報通信学会技術研究報告 磁気記録・情報ストレージ研究会資料, MR2017-20, 2017 年 10 月.
- [17] J.-G. Zhu, "Novel perpendicular spin torque oscillator design for high data rate microwave assisted magnetic recording," *MMM Conf.*, AC-13, Honolulu, HI, U.S.A., Nov. 2014.
- [18] 富士通ウェブページ, EXAMAG LLG simulator, <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2015/03/24.html>, 2015 年 3 月 24 日.
- [19] A. Kaya, M. Benakli, M. L. Mallery, and J. A. Bain, "A micromagnetic study of the effect of spatial variations in damping in perpendicular recording heads," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 2428- 2430, Oct. 2006.