

CoCrPt グラニューラ垂直磁気記録媒体における マイクロ波アシスト効果

島田恭平, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修
(東北大)

Microwave assisted switching effect for CoCrPt granular perpendicular media

K. Shimada, T. Shimatsu, N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami
(Tohoku University)

はじめに 磁性体にマイクロ波を印加することで反転磁場が減少するマイクロ波アシスト磁化反転(microwave-assisted magnetization switching, MAS)^{1,2)}は将来の高密度磁気記録に用いられる技術の一つとして有望である。これまでにCoCrPt-TiO₂グラニューラ単層垂直記録媒体のMASを解析した結果, 高周波磁場を印加することで, 熱擾乱を補正した保磁力低減は最大低下率 50 %程度になることが報告されている³⁾。しかし, マイクロ波周波数に対する依存性は単磁区ドットのMASに比較して緩慢である⁴⁾。その原因の一つとして媒体に十分な高周波磁場が印加されていないことが考えられる。そこで本研究では, 下地膜に直接マイクロ波を印加する構造の試料を用いることで, 大きな高周波磁場を印加した状態でのMASの解析を目指した。

実験方法 試料の膜構成は Pt(2 nm)/CoCrPt-TiO₂(15 nm)/Ru(10 nm)/[Pt(5 nm)/Ta(2 nm)]×13/MgO sub.とした。膜厚を含む下地層の構成は磁気特性と高周波の透過特性に加え, 磁気信号の検出に用いた異常ホール効果の信号強度の観点から決定した。試料は DC マグネトロンスパッタ法により成膜した。Fig.1 の光学顕微鏡像に示すように試料を十字型電極に微細加工し, 下地膜に高周波電流を伝送することで膜面内方向に高周波磁場が印加される。なお, 図中の点線部分以外の磁性体は除去した。

実験結果 Fig.2 に作製した試料の高周波の透過特性を示す。実験に用いる $f_{rf}=2\sim 26$ GHz の範囲において損失は 2 dB 以下に抑えられている。Fig.3 に高周波を印加していない場合と, $f_{rf}=11$ GHz の高周波を印加した場合の異常ホール効果磁化曲線を示す。高周波を印加した状態でも高い S/N 比で異常ホール効果による磁化曲線の測定が可能であった。一方で, 高周波を印加することでみられる保磁力の低下はジュール熱による試料の温度上昇による影響も大きいため, MAS の解析が難しい。当日は発熱を抑えた試料での MAS について詳細に議論する予定である。

参考文献

- 1) Z.Z.Sun and X.R.Wang, *Phys.Rev.B*, **74**, 13240(2006)
- 2) Y.Nozaki and K.Matsuyama, *J.Appl.Phys.*, **100**, 053911(2006)
- 3) S.Okamoto, N.Kikuchi, A.Hotta, M.Furuta, O.Kitakami and T. Shimatsu, *Appl. Phys.Lett.*, **103**, 202405 (2013).
- 4) M.Furuta, S.Okamoto, N.Kikuchi, O.Kitakami, and T.Shimatsu, *Appl. Phys.Express.*, **6**, 053006 (2013)

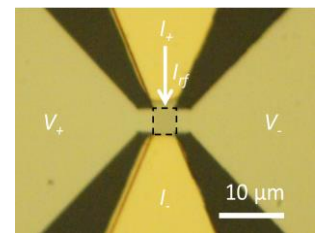


Fig.1 Optical microscope image of the sample

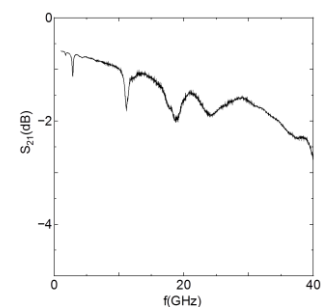


Fig.2 Transmission property of the fabricated sample

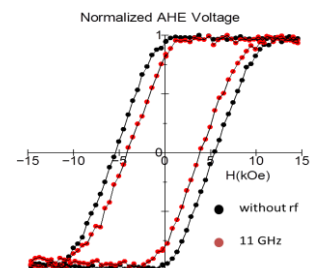


Fig.3 Magnetization curves without and with rf field ($f_{rf}=11$ GHz)

積層磁性ドットによるマイクロ波アシスト磁化反転

金原 大樹, 岡本 聡, 菊池 伸明, 北上 修, 島津 武仁
(東北大)

Magnetization switching of layer structured magnetic dots under the assistance of microwave fields

D. Kanahara, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu
(Tohoku University)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転 (MAS: Microwave Assisted magnetization Switching) は次世代超高密度磁気記録技術の有力候補として注目を集めている。GHz 帯域の大振幅交流磁場を印加し、磁気モーメントに大角歳差運動を誘起することで、反転磁場を大幅に低減することが可能となる。これまでの研究において、ドット内にスピン波励起が生じると、MAS 効果が著しく増大することが報告されている¹⁾。このように励起モードと MAS 効果には強い相関があり、励起モードの制御が重要であることが分かる。本研究では、励起モード制御手法として層間結合を有する積層磁性体ドットに着目した。層間結合は中間層の材料や厚みを変えることで、符号や強度の制御が可能である。今回は、交換結合は無視できる双極子相互作用が支配的な場合についての検討を行った。

実験方法と結果

実験に用いた膜構成は、MgO sub./Ta(2)/Pt(5)/Ru(20)/[Pt(0.5)/Co(0.6)]₅/Pt(10)/[Co(1)/Pt(0.5)]₃/Ru(10), 単位(nm)とした。[Pt(0.5)/Co(0.6)]₅ (有効異方性磁場 $H_k^{\text{eff}} = 9.3$ kOe) を Hard 層, [Co(1)/Pt(0.5)]₃ ($H_k^{\text{eff}} = 3.5$ kOe) を Soft 層とする。成膜には DC マグネトロンスパッタを用いた。この多層膜を電子線リソグラフィと Ar イオンエッチングにより加工し、同一基板上に様々な直径 D の磁性ドットを形成した。 $D = 100 \sim 2000$ nm の範囲で変化させた。異常 Hall 効果 (AHE) 測定用の電極およびマイクロ波交流磁場印加用の Au 線路もあわせて形成した。MAS 測定では、dc 磁場 H_{dc} を膜面に垂直に $-10 \sim 10$ kOe の範囲で印加し、Au 線路に高周波電流を印加し交流磁場 $h_{\text{rf}} = 500$ Oe を膜面内に印加した。一例として Fig. 1 に交流磁場を印加していない場合の AHE によって測定した $D = 2000$ nm のドットの磁化曲線を示す。Hard 層, Soft 層それぞれの異方性の大小に対応したステップ状の磁化曲線が得られた。Fig. 2 に MAS 実験より得られた $D = 2000$ nm のドットにおける反転磁場 H_{sw} を交流磁場周波数 f_{rf} の関数として示す。赤線が Hard 層, 青線が Soft 層の H_{sw} を示している。Hard 層の H_{sw} は f_{rf} の増加に伴い $f_{\text{rf}} = 20$ GHz までほぼ線形に減少しており、60% の H_{sw} 低減が確認された。一方 Soft 層の H_{sw} は非線形的に減少し、特に低周波領域で大きな H_{sw} 減少を示し、95% の H_{sw} 低減が確認された。講演時には、より微小な D での MAS 実験の結果についても報告する予定である。

参考文献

- 1) M. Furuta *et. al.*, *J. Appl. Phys.* **115**, 113914 (2014).

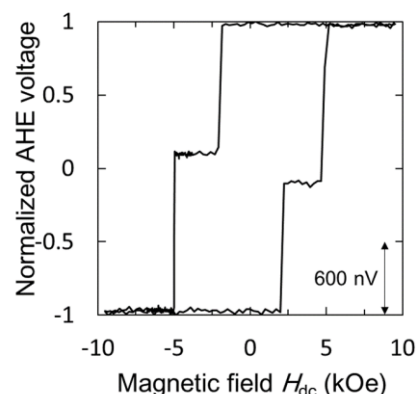


Fig. 1 Magnetization curve for the layer structured nanodot ($D = 2000$ nm)

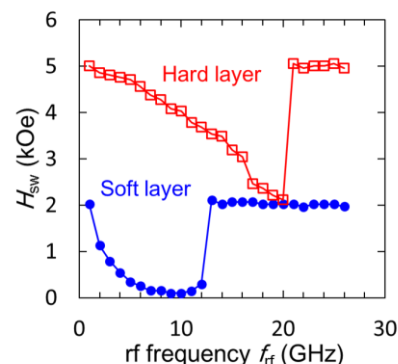


Fig. 2 Switching field H_{sw} of each layer of layer structured dot as a function of rf frequency

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

板垣諒、金井靖、Simon J. Greaves¹、村岡裕明¹
(新潟工科大、¹東北大)

Micromagnetic analysis of the effect of external field rise time on STO oscillation for MAMR

R. Itagaki, Y. Kanai, S. J. Greaves¹, H. Muraoka¹
(Niigata Inst. of Tech., ¹Tohoku Univ.)

はじめに

高周波アシスト磁気記録(MAMR)方式は、高周波発振素子(STO)から発生する高周波磁界を主磁極(MP)からの記録磁界に重畳し、高異方性媒体への記録を可能にする¹⁾。STOはMAMRで最も重要な構成要素であり、安定した強い高周波磁界を発生すること、低い注入電流密度(J)で発振すること、媒体のFMRを誘起する周波数の磁界を発生することが求められる。我々は記録ヘッドギャップ中にSTOを挿入したモデル(統合STO)は、STO単独のモデル(孤立STO)に比べSTOが安定に発振し難いことを示した²⁾。つまり、ヘッドからSTOに印加される磁界(in-gap field)を単に強くしてもSTOは安定に発振しない。ここではSTOの安定な発振を目的として、孤立STOのマイクロマグネティック解析を行った。記録ヘッドのin-gap fieldを想定してrise time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ので報告する。

解析モデルとソフトウェア

Fig. 1に示すように、高周波発振層(FGL)とスピン注入層(SIL)からなるSTOを考える。SILは透過のスピンをFGLに注入する。STOの諸元をTable 1に示す。STO素子に加える外部磁界は、面直(z 方向)成分のみを持ち、かつ均一であると仮定した。解析には富士通製のEXAMAG V2.1を用いた。

計算結果

STOに1 GHz、20 kOe_{pp}、rise time (0 to +90%)の異なる2種類の外部磁界(H_{apl})を加えた。 J は 3.0×10^8 A/cm²とした。Fig. 2にSTOの発振を示す。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。同図より、rise timeが短い(0.083 nsec)場合はSTOが安定に発振するが、rise time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 2.0×10^8 A/cm²および 4.0×10^8 A/cm²と変えた場合も同様の傾向が見られた。

小さな記録ヘッド素子を用いるとrise timeが短くなり、安定したSTOの発振を得ることが可能³⁾だが、単なる素子の微小化は記録磁界強度が低下する懸念がある²⁾。講演では安定なSTOの発振を得るための条件を述べる。

本研究の一部はJSPS 科研費(基盤研究(c)課題番号 16K06321)および情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の補助金による。

参考文献

- 1) J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang: *IEEE Trans. on Magn.*, 44(1), 125, 2008.
- 2) 金井, 板垣, S. Greaves, 村岡: 信学会研資 MR2017-9, 2017.
- 3) T. Katayama, et al., *Journal of App. Phys.*, 117, 17C503, 2015.

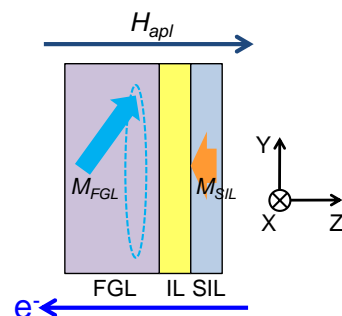


Fig. 1 Schematic of STO.

Table 1 Major parameters of STO.

	FGL	SIL
Thickness	10 nm	2 nm
$4\pi M_s$	20 kG	8 kG
H_k in z direction	31.4 Oe	31.4 Oe
Exchange, A	2.5×10^{-6} erg/cm	1.0×10^{-6} erg/cm
α	0.02	0.02

Non-magnetic interlayer (IL) thickness = 2 nm, $P_0 = 0.5$,
Width (x) x height (y) = 30 nm x 30 nm

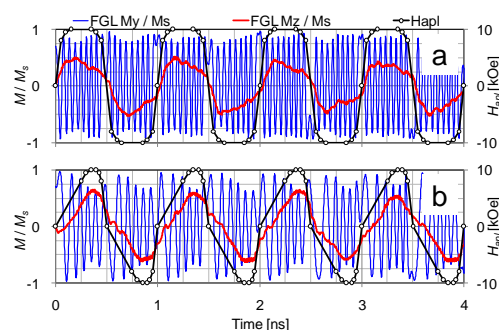


Fig. 2 Volume-averaged FGL oscillation vs. time. $J = 3.0 \times 10^8$ A/cm², AC external field = 1 GHz, 20 kOe_{pp}.

MAMR を用いた二層記録における

上層と下層の間の交換結合の影響について

Effect of Exchange Coupling between Top & Bottom Layers for Dual Layer in Microwave Assisted Magnetic Recording

菊地 忠裕
Tadahiro Kikuchi

Simon Greaves
Simon Greaves

村岡 裕明
Hiroaki Muraoka

東北大学電気通信研究所
RIEC, Tohoku University

1. まえがき

ハードディスクの大容量化に伴い、新しい記録方式が研究されている。その一つにマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)を用いた二層記録という方法があり、スピントルク発振機(STO)の高周波磁界の周波数を変化させることで、二つの層から一つの層を選択して磁化反転させることが可能となる[1]。ここでは、ECC媒体の反転特性を上層と下層の間の交換結合を変化させて計算する。

2. 計算方法

本研究では LLG 方程式によるシミュレーション[2]を行った。表 1 に計算条件を示した。図 1(1a)のモデルのように ECC 媒体の上層は、ヘッドに近い側から 3nm が軟磁性層、残りの 2nm が硬磁性層の積層構造となっている。軟磁性層と硬磁性層の間には交換結合が働き、大きさは 6.0 erg/cm^2 である。下層は非磁性層 2nm を挟んで、4nm が軟磁性層、残りの 3nm が硬磁性層、交換結合は 4.0 erg/cm^2 である。

シミュレーションでは粒子に対してヘッドが下向きに磁界を印加しながら 10m/s で動く。STO の高周波磁界の周波数は $0\sim 60\text{GHz}$ の範囲を取り、その周波数それぞれにおいて反転可能な上層の硬磁性層の異方性磁界(H_k)を、上層と下層の間の交換結合を変化させて調べた。

3. 結果と考察

図 1(1b)、図 2(2a)、図 2(2b)はそれぞれ上層と下層の交換結合が $0, 0.5, -0.5 \text{ erg/cm}^2$ のときの上層における周波数と反転可能な H_k の関係である。(1b)では下層の磁化が上向き(赤)よりも下向き(黄)の方が、上層の反転可能な H_k が大きくなった。これは下層の磁化から発生する磁界が、上層の磁化の反転を助けたためであると考えられる。

(2a)と(2b)を見ると交換結合が負のとき、周波数が $40\sim 50\text{GHz}$ において反転可能な H_k の差が小さくなっているのが分かった。これは負の交換結合が下層の磁化の影響を相殺したためである。下層の磁化の向きによる影響が小さくなれば、反転の信頼性が高くなると考えられる。

4. 参考文献

[1]H.Suto,T.Nagasawa,K.Kudo,T.Kanao,K.Mizushima,R.Sato, Phys. Rev.Applied 5 014003 Published 12 January 2016
[2]S.Greaves, High Performance Computing on Vector Systems 2007, pp.229-244, Springer Berlin Heidelberg ISBN 978-3-540-74383-5

表 1 計算条件

粒子のサイズ(上層)	7nm×7nm×5nm
粒子のサイズ(下層)	7nm×7nm×7nm
飽和磁化	750 emu/cm ³
印加磁界	約 10 kOe
温度	4.2 K
異方性定数(Top Soft Layer)	$5.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$
異方性定数(Bottom Soft Layer)	$3.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$
異方性定数(Hard Layer)	Variable
ダンピング定数	0.03
STO のサイズ	40nm×40nm×15nm

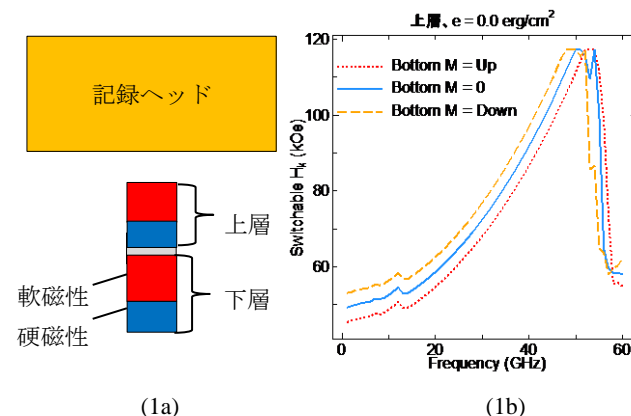


図 1.上層と下層の交換結合が 0 erg/cm^2 のとき

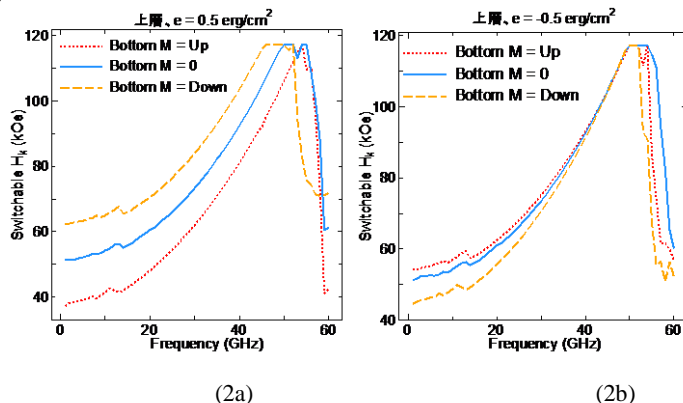


図 2.上層と下層の交換結合が $\pm 0.5 \text{ erg/cm}^2$ のとき

スーパーコンピュータ FX10 を用いたマイクロマグネティックシミュレータの高速化

新井眞大, 赤城文字, 吉田和悦

(工学院大学大学院 工学科電気・電子専攻)

Speed-Up of STO Micromagnetic Simulator Using Supercomputer FX10

Masahiro Arai, Fumiko Akagi, Kazuetsu Yoshida

(Graduate School of Electrical Engineering and Electronics, Kogakuin University)

1. まえがき

近年, 磁性材料を用いた様々な技術の設計手段には, 磁性体の複雑な磁化挙動を解析するマイクロマグネティックシミュレーションが用いられている. 中でも, 磁気ディスク装置(Hard Disk Drive: HDD)のヘッドや媒体それぞれの解析には非常に多く用いられている. 一方, 高記録密度化の手段として期待されているマイクロ波アシスト磁気記録方式(Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR) [1]は, 磁気ヘッドと媒体を同時に解析することが重要である. しかし, 要素数が 900 万個以上必要であり, 高々4ビット計算するにも通常のワークステーションでは数日を要する.

本研究では計算時間を短縮することを目的に, 東京大学のスーパーコンピュータ FX10 を使用して並列化の手法を検討した. 並列化手法として, メッセージ交換ライブラリに MPI(Message Passing Interface)を用いることで複数の CPU 間で並列処理を行う手法[2], OpenMP を用いたマルチスレッドによる並列処理を行う手法[3], そして上記二つの方法を合わせた Hybrid 並列化手法をシミュレータに導入して比較した.

2. 計算モデル及び計算方法

高速化の検討のモデルは, MAMR のスピントルクオシレータ(STO)のみとした. STO は電流密度低減のためにスピン注入層を 2 層用いた構造とし, クロストラック方向と高さは 30 nm, STO 全体の膜厚は 25nm とした. 1つの要素は 2.5 nm の立方体であり, 要素数は 229376 個である.

本シミュレータでは, 磁化挙動を(1)式に示す Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式を解くことで求めた.

$$(1 + \alpha^2) \frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times (\vec{H}_{eff} - \alpha \vec{H}_{st}) - \frac{\gamma}{M_s} \vec{M} \times \{ \vec{M} \times (\alpha \vec{H}_{eff} + \vec{H}_{st}) \} \quad (1)$$

\vec{M} は磁化ベクトル, γ はジャイロ磁気定数, α はダンピング定数, M_s は飽和磁化, \vec{H}_{eff} は実効磁界ベクトルとする. \vec{H}_{st} は STO へ電流を流す事で各層に印加される偏極スピンによる磁界(スピントルク磁界)である. また, 実効磁界の一つである静磁界の計算に最も多くの計算時間を要するため, 高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)を用いているが, 計算時間の 70% は静磁界の計算である.

計算に用いた東京大学のスーパーコンピュータ FX10 のスペックを Table.1 に示す.

Table.1 Specification of FX 10

Processor	1.848 GHz, 16core × 1
Theoretical peak performance	236.5 Gigaflops
Memory capacity	32 GB
HDD/SSD	1.1 PB+2.1PB

3. プログラムの並列化

MPI の場合, 反復処理の分割や通信命令をプログラミングしなくてはならない. まず, MPI 関数を用いて実行 CPU ノード数とランクを取得する. 取得したノード数とランクを利用して処理範囲を各ノードに均等に割り当てるように分割することで反復処理の並列化を行う. その後, 通信関数により各ノードの計算結果を統合することで, 計算結果に矛盾が生じないようにする. 通信関数には MPI_Allreduce() または MPI_Allgather() を用い, その性能を比較する.

OpenMP の場合は #pragma から始まる指示文を挿入するだけで並列化を行える. 並列化を適用する for ループの直前に #omp parallel for schedule(static) private() を挿入することで処理範囲が均等に分割され, 反復処理の並列化を行う.

Hybrid 並列化では MPI と OpenMP のそれぞれで並列化に必要な処理をプログラムに組み込み, 並列化を行う.

また並列化は計算時間の大半を占める静磁界, 磁化の FFT を行う計算部に対して行った.

4. 計算結果

Fig.1 に OpenMP におけるスレッド数, MPI におけるプロセス数, 及び hybrid 並列化におけるスレッド数 (プロセス数は 7 に固定) と計算時間の関係を並列化の種類で比較した結果を示す. OpenMP は約 10.2 倍, MPI_Allreduce() は約 8.4 倍, MPI_Allgather() は約 11.8 倍, MPI_Allgather() を使用した hybrid 並列化は約 22 倍の高速化に成功した. このことから MPI と OpenMP の両方を利用した Hybrid 並列化が一番効果が得られることがわかった. また, MPI_Allreduce() では計算結果の統合の際に加算を行うため, その分通信時間がかかってしまったと考えられる. これより, 演算を必要としないデータの統合を行う場合は MPI_Allgather() を用いた方が計算時間が短いことがわかった.

5. まとめ

本研究は東京大学のスーパーコンピュータ FX10 を用いてマイクロマグネティックシミュレータの並列化による高速化の検討を行った.

静磁界の計算部に MPI_Allgather() を用いた Hybrid 並列化を適用することで計算時間を短縮できた.

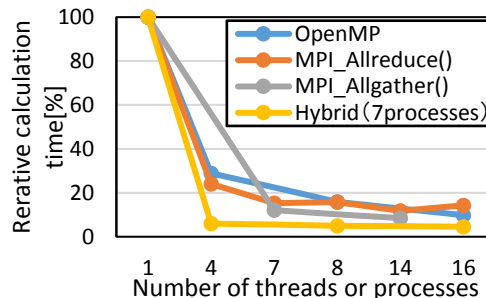


Fig.1 Relationship between number of threads or processes and calculation time for different types of parallelization

謝辞 本研究の一部は, 情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の助成を受けて行った.

参考文献

- [1] Y. Tang, and J. G. Zhu, IEEE Trans. Magn. Vol. 44, no. 11, pp. 3376-3379, (2008).
 [2] P. Pacheco, 秋葉博: MPI 並列プログラミング, p. 43-56, 培風館, 東京, (2001)
 [3] 牛島省: OpenMP による並列プログラミングと数値計算法, p. 11-73, 丸善, 東京, (2007)