

超短時間光物質作用と超高速磁気記録

Ultrafast light matter interaction and Ultrafast magnetic recording

○塚本新¹*Arata Tsukamoto¹

Abstract: This paper summarizes our recent results in laser-induced magnetization dynamics, in particular, ultrafast spin manipulation in ferrimagnetic system of GdFeCo metallic film. We demonstrated deterministic magnetization reversal in a ferrimagnetic GdFeCo driven by an ultrafast heating of the medium without the presence of a magnetic field. These findings open new insights into the understanding of ultrafast magnetic excitation and may provide new prospects for applications of ultrafast opto-magnetic phenomena in magnetic storage and spintronic technology.

1. はじめに

スピンの超高速制御、超高速磁化反転は、情報記録、スピントロニクスにおいて重要な課題として挙げられる。従来主として短時間磁場パルスや電流パルスにより磁化反転が駆動されているが、遙かに短い時間スケールの超短パルス光照射が、磁化反転を励起するトリガーとなり得る事を述べる。詳細な超短時間現象の理解に基づく超高速磁化制御法と、高速磁化応答可能な材料の双方を研究する事が重要である。これまで、ユニークな磁化動特性を有するGdFeCoフェリ磁性合金を対象材料とし、角運動量補償現象に伴う実効的磁気回転比 γ および実効的ダンピング定数 α の増大¹⁾、超短パルス光による歳差スイッチング現象の誘起¹⁾、円偏光誘起磁化反転現象²⁾等報告してきた。本報告では、レーザー光誘起磁化ダイナミクスに関する継続発展研究の最近の成果について報告する。

2. 新奇なスピンドイナミクス：超高速磁化反転過程における過渡的フェロ状態の出現

強磁性あるいは反強磁性磁気秩序は、磁性体における最も強力なスピン間相互作用である交換結合相互作用により支配され発現する。通常これら磁性体のスピンドイナミクスは、外的な磁場、光、電流パルス等によりもたらされる短時間摂動に続く交換結合したスピンの集団運動を観察し検討されている。図1は、超短パルス光（パルス長90fs）照射後の磁化応答、主として遷移金属磁気モーメントの挙動を磁気光学効果により時間分解計測した結果³⁾である。光照射後約300fsまでに急峻な減磁過程を生じ、その後10ps付近からは歳差運動を示す大きな信号の変動、そして印加磁場と共に共鳴周波数の増大がみられる。しかしながら、これら超高速減磁効果やスピンの集団運動が出現する前の過程等、ブリルアンゾーン端でのマグノン（10~100fs周期に相当）に匹敵する時間スケールで励起された直後のスピンの振る舞いは依然未知な領域である。そのような励起を経て物質内には、非断熱的経路によって、従来型の平衡熱力学に基づく描像では表せない強い非平衡状態へと移行する。

フェムト秒パルス・レーザーにより励起されたフェリ磁性GdFeCo合金におけるスピンドイナミクスの詳細検討により、予期せぬスピン反転過程を見出した⁴⁾。基底状態で反強磁性的に結合した副格子スピン集団が反転する過程において過渡的強磁性状態が出現する現象である。超高速スピンドイナミクスを誘起するため、直流磁場を印加した条件で、波長800nm、パルス長60fsの直線偏光照射により試料の磁化補償点 T_M をまたぎ越える超高速加熱により両副格子磁化の反転を誘導した。そして、パルス長100fsの軟X線をプローブ光として使い、X線円二色性(XMCD)による元素識別手法を用い(Fe L_3 とGd M_5 吸収端を利用)、FeとGdの磁気モーメントの振る舞いをそれぞれ独立に計測した。

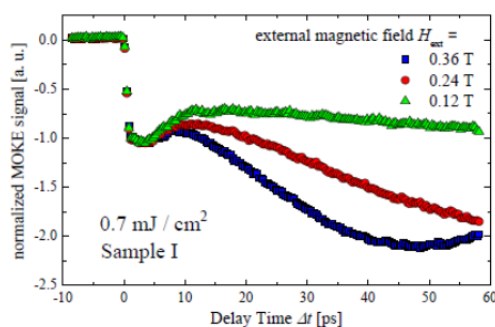


図1 GdFeCo 薄膜磁化ダイナミクス(磁気光学応答)の外部磁場依存性³⁾。主として遷移金属のダイナミクスを示す。

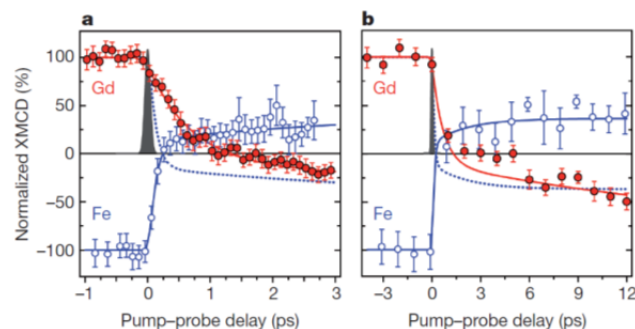


図2 軟X線円二色性計測によるFeとGd磁気モーメントの元素分解ダイナミクス⁴⁾。Fe(o)とGd(●)磁気モーメントの過渡ダイナミクス。励起後 a: 3 ps および b: 12 ps 時間スケール。

図 2 は Fe (○)、Gd (●) 副格子毎の磁化ダイナミクスの時間分解計測結果である。測定は、入射励起光量 $4.4\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、試料温度 83K で行った。 T_M は約 250K である。実線は 2 項指数関数関数でフィッティングを行ったものであり、両図における破線は Fe 副格子磁化の測定結果の符号を反転させたものである。光入射後の最初の減磁時定数は Fe および Gd に対しそれぞれ $\tau_{\text{Fe}} = 100 \pm 25\text{fs}$ 、 $\tau_{\text{Gd}} = 430 \pm 100\text{fs}$ である事を見出した。すなわち光学励起に続き、Gd および Fe それぞれの正味の磁気モーメントは、異なる時定数で、急速に減少し、それらの向きが反転、そして再び正味の磁化が回復する。約 10ps までは、Gd と Fe 副格子は明らかに異なる反転ダイナミクスを示し、Gd 副格子の正味の磁化は約 1.5ps で反転し、Fe については約 300fs 程度である。つまり、フェリ磁性 GdFeCo 合金において、基底状態で Fe と Gd 磁気モーメントは反強磁性結合するにも関わらず、一時的に平行配置となる過渡的強磁性状態が出現することが明らかとなった。このように、サブ ps という超短時間で外部刺激に引き起こされるフェリ磁性内部のスピンドイナミクスは、非平衡かつ副格子磁化毎に異なるダイナミクスを示し、マグノン励起(集団スピン励起) という描像自体も詳細な検討が必要となる未踏領域と考えられる。また、交換結合の時間スケールという超短時間で磁気秩序制御の可能性をも示している。

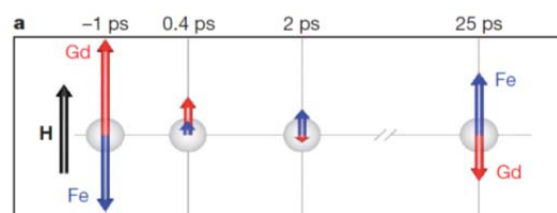


図 3 外部印加磁場下における Fe および Gd 磁気モーメントの非平衡スピンドイナミクスの模式図。

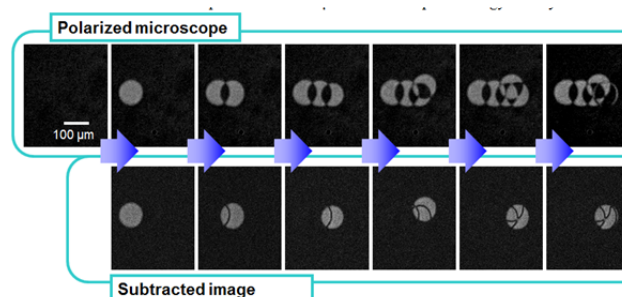


図 4 単一パルス光(パルス長 90 fs)照射前後における磁気光学像および照射前後での差分画像。

図 4 単一パルス光(パルス長 90 fs)照射前後における磁気光学像および照射前後での差分画像。

3. 新奇な超短時間磁化反転現象：超短熱パルス磁化反転

強い非平衡下での新奇なスピンドイナミクスの発見により、新奇な磁化反転機構をもたらす可能性が期待される。前節では直流磁場印加のもと、磁化補償点を越える超短パルス加熱により誘起される磁化反転過程を詳細に検討したが、検討を進めた結果として、磁化反転に磁場は必要なく熱エネルギーの供給のみで達成できる過程が存在する事が明らかとなった⁹⁾。今日まで、加熱は(ベクトルで表現されない)磁化反転を補助する事はあっても、それ自体で決定論的な磁化反転を引き起こすことは無いものと一般には考えられてきたが、超高速加熱のみにより、決定論的な磁化反転を引き起こす新奇な磁化反転現象である。これまで同様 GdFeCo 磁性薄膜を用いた。パルス長 90 fs の単一パルス光を照射する毎に照射位置を移動しながら観察した照射前後の磁気光学像と、照射前後での差分画像を図 4 に示す。複雑な構造の初期磁区状態においてもパルス光照射により円形領域内の磁化方向が逆転した磁区構造が形成されるのを確認した。また、(円偏光)偏光によらず本現象を引き起こせる事を確認した。技術的応用上重要な点として、このような反転現象が室温環境下で生じ得ることを実証した事である。

4. まとめ

本稿では、フェリ磁性 GdFeCo 希土類遷移金属垂直磁化膜について、高強度光パルス照射後出現する強い非平衡状態において平行スピン配置を経た磁化反転過程が生じる事が X-ray 時間分解元素選択計測から明らかとなり、また本機構に基づく新たな超高速磁化反転現象として、超短熱パルス磁化反転現象も見出した。これら成果が、光と磁気の超短時間作用の更なる理解、超高速スピン制御技術の発展へと貢献できることを期待する。

参考文献：

- [1] A. Tsukamoto, T. Sato, S. Toriumi, and A. Itoh: *J. Appl. Phys.* **109** (2011) 07D302.
- [2] C. D. Stanciu, F. Hansteen, A.V. Kimel, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A. Itoh and Th. Rasing, *Physical Review Letters*, **99** (2007) 047601.
- [3] T. Sato, S. Toriumi, R. Shimizu, A. Tsukamoto, and A. Itoh, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **36** (2011) 82.
- [4] I. Radu, K. Vahaplar, C. Stamm, T. Kachel, N. Pontius, H. A. Durr, T. A. Ostler, J. Barker, R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, Th. Rasing and A. V. Kimel, *Nature*, **472** (2011) 205.
- [5] T.A. Ostler, J. Barker, R.F.L. Evans, R.W. Chantrell, U. Atxitia, O. Chubykalo-Fesenko, S. El Moussaoui, L. Le Guyader, E. Mengotti, L.J. Heyderman, F. Nolting, A. Tsukamoto, A. Itoh, D. Afanasiev, B.A. Ivanov, A.M. Kalashnikova, K. Vahaplar, J. Mentink, A. Kirilyuk, Th. Rasing, and A.V. Kimel, *Nature Communications* **3** (2012) 666.