## 時間分解磁気円偏光二色性測定によるスピンの超高 速ダイナミクス観測

Ni 金属の 1 ピコ秒(ps)以下の超高速消磁が Beaurepaire らによる時間分解磁気カー効果測定[1]によって明らかに なって以降、磁性体の磁気秩序を光で制御する研究が盛ん になっている。特に近年、GHz 以上の帯域で動作する電 子・スピン材料の測定のため、世界中の放射光(SOR)施設 及び自由電子レーザー(XFEL)施設で、サブナノ秒(ns)領 域での光誘起時間分解X線分光測定が盛んに行われるよう になっている[2]。そこで本研究では、東京大学物性研究 所ビームラインである SPring-8 B L07LSU において、放 射光軟X線を用いた時間分解 x-ray magneto circular dichroism(X 線磁気円偏光二色性・XMCD)および共鳴軟 X線散乱(弾性散乱・回折)の測定装置を建設し、磁性材料 の光誘起ダイナミクスの測定を行った。測定対象としては、 強磁性を示す合金である FePt 薄膜に注目した。FePt 薄膜 は、室温で強磁性を示し、面直方向に磁化が向きやすい垂 直磁化膜であるため、応用面でも期待されている[3,4,5]。 この物質にレーザーを照射することで磁化を消す消磁のダ イナミクスの観測を目指した。

定常状態の軟X線XMCD測定は、通常はX線による光 電流を測定する全電子収量法(TEY)を用いて行われる。し かし、光誘起ダイナミクスの測定においてはレーザー照射 に伴う光電流の問題のため、TEYを用いることが難しい。

極限コヒーレント光科学研究センター 田久保 耕

そのため、これまでの時間分解 XMCD 測定は主として透 過法を用いて行われてきた。しかし、軟X線が透過するほ ど薄い基板上に試料を作成することは困難であり、例えば 今回のような良質な FePt 試料を透過法で測定することは 不可能である。そこで今回、我々は検出器として micro channel plate(MCP)を使用する新たな工夫により、部分 電子収量法(PEY)及び蛍光法による時間分解 XMCD 測定 を可能とした。MCP は検出面に+電場を印可すると試料 から放出される光電子を検出し、-電場を印可すると電子 を跳ね返しフォトン(蛍光)を検出することができる素子で ある。

時間分解 XMCD 測定は東大物性研ビームライン SPring-8 BL07LSU で行った。図1に示す実験配置によ り、時間分解 XMCD 測定を行った。図のチャンバーの上 半分において、時間分解共鳴軟X線散乱(弾性散乱・回折) 測定を行うことが可能であり、下半分において時間分解 XMCD 測定が行うことが可能である。直線導入器及び20 回転器上に MCP を設置しており、試料と検出器の位置関 係を調整できる。

BL-07LSU のレーザーステーションから実験チャン バーに放射光と同期したパルス幅 50 fs のチタンサファイ アレーザー(波長:800 nm、エネルギー:1.55 eV)をポン



図 1. BL-07LSU における時間分解吸収分光および共鳴軟 X 線散乱測定装置概要

プ光として導入し、ポンププローブ法による時間分解測定 を行った。一方で、SPring-8のF-mode及びH-modeに おける単一バンチ幅は約50psであるため、時間分解能は 50ps 程度である。時間分解測定の繰り返し周波数は 1kHz であり、ポンプレーザーの周波数によって決まる。 ポンプ光と放射光の遅延時間は電気的に調整した。遅延回 路からの信号をトリガとして、ポンプされた信号をオシロ スコープを用いて切り出した。測定に用いた FePt 薄膜は、 MgO(100)基板上に作製された単結晶で膜厚は50ナノメー トル程度である。

図2にPEYで測定したXMCDの時間発展を示す。レー ザー照射後、50ps以内に90%以上のXMCDが消失し、そ の後、熱拡散などにより数百 ps の緩和時間で元の状態に 緩和していく様子が観察される。消磁の時間スケールは約 50ps に見えるが、これは放射光の時間幅であり実際には もっと短いと考えられる。La 端、L2 端でほぼ同じダイナ ミクス(変化率、緩和時間)が得られているが、これは PEY により歪みのない測定が行われていることを示して いる。また消磁を起こすためのレーザー強度に閾値的な振 る舞いが見られているが(図 3)、これは光で誘起した相転 移に特徴的なものである。合金の強磁性は一般に2次転移 であり、光誘起であっても消磁のメカニズムに閾値は関係 しないと考える人もいるかもしれないが、最近の Ni 金属 の消磁の時間分解X線反射率測定においても、光照射直後 に表面の急激な構造変化が報告されている[6]。これらの



図 2. FePt 薄膜の Tr-XMCD 時間発展プロファイル (上図 Fe L<sub>3</sub>端、下図 L<sub>2</sub>端)



図 3. Tr-XMCD (Fe L3端)の励起光強度依存性 (t=30ps)

結果は、光誘起相転移の機構に構造変化も含めた協同効果 が作用していることを暗に示していると考えられる。

本研究により、SPring-8 BL07LS-Uにおいて FePt 薄 膜における消磁のダイナミクス観測に成功した。これは、 日本の放射光施設で唯一のセットアップであり、今後の系 統的な磁性体のスピンダイナミクス研究に活用することが できる。放射光を用いるメリットとしては、元素別のスピ ンダイナミクス観測など、実験室光源では得られない研究 展開が期待できる。特に XMCD はスペクトルに総和則を 適用することで、スピンと軌道の角運動量の大きさと比を 元素別に抜き出すことができる強力な手法である。粒状 FePt や Co/Pt 超格子などで、円偏光レーザーによる磁化 反転が報告されているが[7]、例えばその XMCD スペクト ルのダイナミクスの測定を行えば、光による角運動量の変 化(逆ファラデー効果とも言われる)をダイナミクス上で直 接明らかにできるなど画期的な成果が期待できる。

謝辞 本研究は以下の方々(山本 航平、平田 靖透、横山 優一、久保田 雄也、山本 真吾、山本 達、松田 巌、辛 埴、関 剛斎、高梨 弘毅、和達 大樹及び田中 良和、大 河内 拓雄、木下 豊彦 各氏)の協力をもとに行われま した。また日本学術振興会による科学研究費補助金事業 (KAKENHI 16K20997, 16K17722, 26400328)の支援を 受けました。SPring-8 BL07LSU における時間分解 XMCD実験は東京大学の放射光連携研究機構(2016A7504, 2016A7403, 2016B7403, 2016B7518)のサポートを受け て行いました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, and J.-Y. Bigot, Phys. Rev. Lett. **76**, 4250 (1996).
- [2] 例えばA. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, Rev. Mod. Phys. 82, 2731 (2010).
- [3] C. L. Platt, K. W. Wierman, E. B. Svedberg, R. van de Veerdonk, J. K. Howard, A. G. Roy, and D. E. Laughlin, J. Appl. Phys. 92, 6104 (2002).
- [4]T. Seki, H. Iwama, T. Shima, and K. Takanashi, J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 335001 (2011).
- [5] Bedanta, T. Seki, H. Iwama, T. Shima, and K. Takanashi, Appl. Phys. Lett. 107, 152410 (2015).
- [6] E. Jal, V. Lopez-Flores, N. Pontius, C. Sch€ußler-Langeheine, T. Ferte, N. Bergeard, C. Boeglin, B. Vodungbo, J. L€uning, and N. Jaouen, Phys. Rev. B 95, 184422 (2017).
- [7] C.-H. Lambert, S. Mangin, B. S. D. Ch. S. Varaprasad,
  Y. K. Takahashi, M. Hehn, M. Cinchetti, G. Malinowski, K. Hono, Y. Fainman, M. Aeschlimann, and E. E. Fullerton, Science 345, 1337 (2014).

.....